

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SUSTURUCU İÇERİSİNDEKİ AKIŞIN MODELLENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Engin ZENGİN**

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği

Programı : Isı - Akışkan

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SUSTURUCU İÇERİSİNDEKİ AKIŞIN MODELLENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Engin ZENGİN
(503081109)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2010

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Cem PARMAKSIZOĞLU (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Salim ÖZÇELEBİ (İÜ)
Prof. Dr. Feridun ÖZGÜÇ (İTÜ)**

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

Susturucular, klima santralleri ya da havalandırma kanalları içerisinde ses yutumu sağlayarak ses seviyelerini istenilen değerlere indirmeye yarayan elemanlardır. Ses yutma işlemi susturucular içerisindeki gözenekli malzeme ile sağlanır. Susturucular, ses yutma temel görevlerini yerine getirmelerine rağmen klima santrali ya da havalandırma kanalları içerisinde önemli derecede basınç kayıplarına neden olurlar. Bu sebeple susturucu hücresi içerisine belirli mesafeler ile dizilen susturucuların hava akışına dik alın yüzeylerinin minimum basınç düşümünü sağlayacak şekilde tasarlanması ve böylece gereksiz basınç kayıplarının ortadan kaldırılması önemli bir araştırma konusudur.

Yapılan tez çalışmasında farklı şekillerde susturucu alın yüzeyleri tasarlanmıştır ve susturucular içerisindeki akış modellenerek minimum basınç kaybını sağlayacak susturucu modeli elde edilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmam esnasında benden hiçbir yardımını esirgemeyen değerli tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Cem PARMAKSIZOĞLU'na ve çalışmamın her aşamasında bilgilerinden faydalandığım Sayın Doç.Dr. Mustafa Özdemir'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca maddi ve manevi destekleri ile daima yanımda olan ve beni her konuda destekleyen değerli aileme ve Begüm ARDA'ya teşekkür ederim.

Mayıs 2010

Engin Zengin
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|-----------|
| ÖNSÖZ..... | iii |
| İÇİNDEKİLER..... | v |
| KISALTMALAR..... | vii |
| ÇİZELGE LİSTESİ..... | ix |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | xi |
| SEMBOL LİSTESİ..... | xiii |
| ÖZET..... | xv |
| SUMMARY..... | xvii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1 Gözenekli Ortamlar Konusunda Yapılan Tarihsel Çalışmalar..... | 3 |
| 2. GÖZENEKLİ ORTAMIN İNCELENMESİ..... | 5 |
| 2.1 Gözenekli Ortamı İfade Eden Parametreler..... | 5 |
| 2.1.1 Porozite..... | 5 |
| 2.1.2 Geçirgenlik..... | 7 |
| 2.2 Gözenekli Ortamlarda Basınç Düşümünü İfade Eden Denklemler..... | 8 |
| 2.2.1 Darcy kanunu..... | 8 |
| 2.2.1.1 Darcy kanun geçerlilik alanı..... | 9 |
| 2.2.2 Forchhemier terimi ile genişletilmiş Darcy kanunu..... | 10 |
| 2.2.3 Ergun denklemi..... | 11 |
| 2.2.4 Brinkman denklemi..... | 13 |
| 3. TEL ÖRGÜ TABAKA GÖZENEKLİ ORTAM AKIŞ ANALİZİ..... | 17 |
| 3.1 Oluşturulan Gözenekli Ortam..... | 18 |
| 3.2 Hidrodinamik Deneyi Sonuçları..... | 19 |
| 3.3 Tel Örgü Elek Tabaka için Fluent Programında Analiz..... | 22 |
| 3.3.1 Tel örgü tabaka geometrisi ve çözüm ağlarının oluşturulması..... | 22 |
| 3.3.2 Fluent programında gözenekli ortamı ifade eden denklemler..... | 24 |
| 3.3.3 Fluent programında verilerin girilmesi ve analiz sonuçları..... | 25 |
| 3.3.4 Tel örgü tabaka için Fluent basınç düşümü analizi..... | 26 |
| 3.4 Fluent Sonuçları ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması..... | 28 |
| 4. SUSTURUCULAR ÜZERİNDEKİ AKIŞIN MODELLENMESİ..... | 31 |
| 4.1 Alın Yüzeyleri Düz Sac Kaplı Susturucu Hücresi..... | 32 |
| 4.1.1 Hücre geometrisi ve çözüm ağlarının oluşturulması..... | 32 |
| 4.1.2 Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturular için Fluent analizleri..... | 36 |
| 4.1.2.1 Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturular için hız analizi..... | 37 |
| 4.1.2.2 Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturular için basınç analizi..... | 37 |
| 4.2 Alın Yüzeyleri Üçgen Sac Kaplı Susturucu Hücresi..... | 38 |
| 4.2.1 Hücre geometrisi ve çözüm ağlarının oluşturulması..... | 38 |
| 4.2.2 Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturular için Fluent analizleri..... | 40 |
| 4.2.2.1 Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturular için hız analizi..... | 40 |
| 4.2.2.2 Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturular için basınç analizi..... | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3 Alın Yüzeyleri Silindirik Sac Kaplı Susturucu Hücresi..... | 41 |
| 4.3.1 Hücre geometrisi ve çözüm ağlarının oluşturulması..... | 41 |
| 4.3.2 Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturular için Fluent analizleri..... | 43 |
| 4.3.2.1 Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturular için hız analizi..... | 44 |
| 4.3.2.2 Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturular için basınç analizi..... | 44 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 45 |
| KAYNAKLAR..... | 49 |
| EKLER..... | 51 |

KISALTMALAR

ASHRAE : American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning
Engineers

TBH : Temel Birim Hacim

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Çizelge 2.1 : Gözenekli ortam örneklerinin porozite değerleri..... | 6 |
| Çizelge 2.2 : Gözenekli ortam örneklerinin geçirgenlik değerleri..... | 7 |
| Çizelge 3.1 : Hidrodinamik deneyi yapılan ölçümler[4]..... | 18 |
| Çizelge 3.2 : Boyutsuz basınç düşümü ve Re sayısı ile deney sonuçları[4]..... | 20 |
| Çizelge 3.3 : Boyutsuz basınç düşümü ve Re sayısı ile Fluent sonuçları..... | 27 |
| Çizelge 3.4 : Fluent ve hidrodinamik deneyi sonuçlarının karşılaştırılması..... | 28 |
| Çizelge 4.1 : Susturucu hücresi yapısı..... | 33 |
| Çizelge 4.2 : Cam yünü için yoğunluğa bağlı gözeneklilik değerleri..... | 36 |
| Çizelge 5.1 : Susturucu hücrelerinde meydana gelen basınç düşümü sonuçları..... | 47 |
| Çizelge A.1 : Paslanmaz tel örgü çelik hacmi[4]..... | 52 |
| Çizelge A.2 : Tabakalara göre gözenekliliğin hesabı[4]..... | 53 |
| Çizelge A.3 : Formül yardımıyla tabakalara göre gözenekliliğin hesabı[4]..... | 54 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 3.1 : Deneysel verilere göre debi, basınç gradyanı değişimi[4]..... | 19 |
| Şekil 3.2 : Boyutsuz basınç gradyanı Re sayısı değişimi..... | 21 |
| Şekil 3.3 : Tel örgü tabaka için Gambit programında oluşturulan geometri..... | 23 |
| Şekil 3.4 : Tel örgü tabaka için kenarlar üzerinde oluşturulan çözüm sıklıkları..... | 23 |
| Şekil 3.5 : Tel örgü tabaka için hacim üzerinde oluşturulan çözüm ağları..... | 23 |
| Şekil 3.6 : Tel örgü tabaka sınır şartları..... | 24 |
| Şekil 3.7 : $u_m=0,002988$ m/s sınır şartı için basınç düşümü analizi..... | 26 |
| Şekil 3.8 : Fluent sonuçları ile boyutsuz Basınç gradyanı ile Re sayısı değişimi..... | 26 |
| Şekil 4.1 : Susturucu hücresi geometrisi..... | 32 |
| Şekil 4.2 : Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucu..... | 33 |
| Şekil 4.3 : Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucu için oluşturulan geometri..... | 34 |
| Şekil 4.4 : Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucu için çözüm ağları..... | 34 |
| Şekil 4.5 : Alın yüzeyi düz sac kaplı susturucu sınır şartları..... | 35 |
| Şekil 4.6 : Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucu için hız analizi..... | 37 |
| Şekil 4.7 : Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucu için basınç analizi..... | 37 |
| Şekil 4.8 : Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu..... | 38 |
| Şekil 4.9 : Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu için oluşturulan geometri..... | 38 |
| Şekil 4.10 : Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu için çözüm ağları..... | 39 |
| Şekil 4.11 : Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu sınır şartları..... | 39 |
| Şekil 4.12 : Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu için hız analizi..... | 40 |
| Şekil 4.13 : Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu için basınç analizi..... | 41 |
| Şekil 4.14 : Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucu oluşturulan geometri..... | 42 |
| Şekil 4.15 : Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucu çözüm ağları..... | 42 |
| Şekil 4.16 : Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucu sınır şartları..... | 43 |
| Şekil 4.17 : Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucu için hız analizi..... | 44 |
| Şekil 4.18 : Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu için basınç analizi..... | 44 |
| Şekil A.1 : Duvardan itibaren seçilen hacimlere göre gözeneklilik[4]..... | 55 |
| Şekil B.1 : Deney tesisatı[4]..... | 57 |
| Şekil B.2 : Deney odası[4]..... | 57 |

SEMBOL LİSTESİ

| | |
|---------------|--|
| A_E | : Ergun Sabiti |
| B | : Susturucu hücresi genişliği (m) |
| B_E | : Ergun Sabiti |
| c_F | : Biçim çekiş Sabiti |
| C_2 | : Atalet etkileri içeren katsayı (1/m) |
| d | : Parçacık Çapı(m) |
| H | : Susturucu hücresi yüksekliği (m) |
| K_t | : Atalet Geçirgenlik katsayısı (m) |
| K_v | : Viskoz geçirgenlik katsayısı (m ²) |
| L | : Gözenekli ortam uzunluğu (m) |
| P | : Boyutsuz basınç düşümü |
| Re_m | : Ortalama hız ve tel çapına göre tanımlanan Reynolds sayısı |
| s | : Susturucular arası mesafe (m) |
| S_p | : Tanecik özgül yüzey alanı |
| S_b | : Ortamın özgül yüzey alanı |
| u_d | : Darcy hızı (m/s) |
| u_f | : Birim hızı (m/s) |
| u_m | : Ortalama hız (m/s) |
| V_f | : Akışkan hacmi (m ³) |
| α | : Geçirgenlik (m ²) |
| ζ | : Küresellik katsayısı |
| ε | : Porozite |
| ρ_a | : Akışkan Yoğunluğu (kg/m ³) |
| μ_a | : Akışkan dinamik viskozitesi |
| μ_e | : Etkili viskozite |

SUSTURUCU İÇERSİNDEKİ AKIŞIN MODELLENMESİ

ÖZET

Susturucular klima santralleri ya da hava kanalları içersinde ses yutumunu gerçekleştiren elemanlardır. Susturucular hava akışına dik olan alın yüzeylerinin uygunsuz tasarımı sonucu gereksiz basınç kayıplarına ve hava akışından kaynaklı ses oluşumuna neden olmaktadır. Bu çalışmada susturucu hücresi içersindeki akış modellenerek gereksiz basınç kayıplarının minimuma indirilmesi amaçlanmıştır.

Susturucular içersinde ses yutumunu sağlayan eleman olarak gözenekli bir malzeme olan cam yünü kullanılmaktadır ve hücre içersinde susturucular arasından geçen hava gözenekli ortam ile temasta olmaktadır. Bu sebeple öncelikle gözenekli ortam içersinde meydana gelen akış konusu incelenmiştir. Gözenekli ortamı ifade eden denklemlerin elde edilmesinden sonra, Mustafa Özdemir tarafından tel örgü katmanlardan oluşan gözenekli ortam için yapılmış hidrodinamik deney sonuçları incelenmiştir. Tel örgü tabakalardan oluşan gözenekli ortam Fluent ile modellenmiştir ve deney sonuçları ile Fluent sonuçları karşılaştırılmıştır. Basınç düşümleri arasındaki farkın ortalama olarak oldukça yakın olduğu görülmüştür. Böylece, susturucular için yapılacak Fluent analizleri için bir referans oluşturulmuştur.

Tez çalışmasında susturucu alın yüzeyleri düz sac kaplı, üçgen sac kaplı ve silindirik sac kaplı olmak üzere üç farklı şekilde tasarlanmıştır ve fluent programı ile akış analizi yapılarak hücre içersinde meydana gelen basınç düşümleri elde edilmiştir. Sonuç olarak ise üç susturucu hücresi için de elde edilen basınç düşümleri karşılaştırılmıştır. Susturucu alın yüzeylerinin silindirik sac ile kaplanması hücrede meydana gelen basınç kayıplarını yüzde yirmi altı mertebesinde azalttığı sonucu elde edilmiştir.

MODELING OF THE SILENCERS FLOW

SUMMARY

Silencers within air handling units or air ducts are components that perform voice absorbing. Silencer surfaces that are perpendicular to the airflow causes unnecessary loss of pressure because of improper design and are caused by the formation of the sound source. This study modeled the flow within the silencer section to minimize the unnecessary loss of pressure.

Silencer component in ensuring sound absorbing as glass wool is used as a porous material and air from passing between silencers is contact with porous media. Therefore, primarily about the flow occurring in porous media is investigated. After the equations of porous media obtained, hydrodynamic test results made by Mustafa Ozdemir are analyzed for porous media of wire screen meshes. Porous media of wire screen meshes are modeled with Fluent and its results are compared with experimental results. On average, the difference between the pressure drops was found to be very close. Thus, there will be made for creating the referance the Fluent analysis of silencers.

Silencer surfaces that are perpendicular to airflow covered with three different shapes in thesis, rectangle, triangular and cylindrical steel sheet are designed and modeled with Fluent and obtained pressure drops that occur within the silencer section.

As a result, three silencers section pressure drops obtained and compared. Surfaces are covered with cylindrical sheet in silencer section that occurs in order to reduce pressure losses as a result twenty-six percent were obtained.

1. GİRİŞ

Susturucular klima santralleri ya da hava kanalları içersinde ses yutumunu gerçekleştiren elemanlardır. Ses seviyesini istenilen değerlere indirebilmek için uygun boylarda susturucular tasarlanır ve klima santralleri içersinde genellikle fan hücresinin önüne veya ardına yerleştirilirler. Susturucuların hava kanalları içersine yerleştirilmesi ve böylece şartlandırılan oda içersinde insanları rahatsız etmeyecek ses seviyelerine inilmesi de kullanılan bir yöntemdir.

Susturucular içersinde, ses yutucu eleman olarak cam yünü bulunmaktadır. Cam yünü inorganik hammadde olan silis kumunun 1200 °C – 1250 °C ‘ de ergitilerek elyaf haline getirilmesi sonucu oluşturulan gözenekli bir malzemedir. Susturucular, ses yutucu eleman olan gözenekli malzeme cam yünü ile ses yutumunu gerçekleştirmelerinin yanı sıra önemli derece de basınç kaybına neden olurlar. Bu sebeple susturucular üzerindeki akışın modellenmesi ve basınç kayıplarının minimize edilmesi önemli bir araştırma konusudur.

Susturucular klima santralleri ya da hava kanalları içersine aralarında uygun mesafeler bırakılarak ve belirli kulis kalınlıklarında üretilmiş olarak yerleştirilirler. Susturucuların boyları ise istenilen ses yutumu seviyesine göre değişmektedir. Susturucuların hava akış yüzeyine dik olan alın yüzeyleri sac ile kapatılmaktadır. Böylece hava akışının direkt olarak gözenekli malzeme üzerinden geçişi engellenmektedir. Susturucu alın yüzeylerine kaplanan sac malzemenin tasarımı susturucu üzerindeki basınç düşümlerinin minimum seviyeye indirilebilmesi için oldukça önemlidir.

Klima santrali hücresi içersine yerleştirilen susturucular arasından geçen hava ise gözenekli ortam ile yani cam yünü ile temasta olmaktadır. Bu sebeple susturucular içersindeki akışın incelenmesi için öncelikle gözenekli ortam içersindeki akışın araştırılması gerekmektedir.

Gözenekli ortam anlam olarak katı bir yapı ve birbirine bağlı boşluklardan oluşan maddeleri ifade eder. Bu boşluklar (gözenekler) akışkanın bu madde içersinde

akışına belli oranda izin verir. Tek fazlı akışlarda gözenekler sadece tek bir akışkan ile doldurulmuşken iki fazlı akışlarda gözenekler gaz ve sıvı haldeki akışkanlarla doldurulmuştur.

Doğal bir gözenekli ortamda gözeneklerin şekli ve boyutu düzensiz bir şekilde dağılmıştır. Sahil kumu, kumtaşı, tahta, çavdar ekmeği, kireç taşı ve insan akciğeri doğal gözenekli ortam örnekleridir. Mikroskobik düzeyde yani gözenekler mertebesinde akışın hız ve basınç dağılımları düzensizdir[1].

Gözenekli ortamlarla ilgili çalışmaların tamamına yakını yerel hacimler metoduyla ortaya konan formülasyona dayanmaktadır. Bu metotla, momentum ve ısı geçişi denklemleri bütün gözenekli ortamı temsil edebilen mümkün olduğu kadar küçük elementler bir hacim üzerinde ortalamaları alınmış fiziksel büyüklükler ile ifade edilmeye çalışılmaktadır. Katı ile akışkan fazları için ayrı ayrı yazılması gereken momentum ve ısı geçişi denklemleri, tek bir faz varmış gibi birleştirilmektedir[1,2].

Bu metotla elde edilen korunum denklemlerinde, ortalama büyüklüklerle kendiliğinden ifade edilemeyen ve elemanter hacmin katı sınırlarına ait integral ifadeler mevcuttur. Elemanter hacim içindeki katı fazın yüzeylerindeki hız, sıcaklık ve bunların gradyanlarına bağlı olan bu ifadelerin gözenekler içi hız ve sıcaklıklar bilinmeden hesaplanması mümkün değildir. Gözenek içi hız ve sıcaklıkların bilinmesi durumunda da bu metoda gerek kalmayacağı açıktır[2].

Yerel hacimli momentum denklemindeki integral biçiminde verilen terim, Darcy ve Ergun denklemleri ile ortalama büyüklükler cinsinden ifade edilmektedir. Böylece ortamın geometrisine bağlı geçirgenlik tamamen ortalama büyüklüklere bağlı olarak yazılmaktadır[2,3].

Susturucular üzerindeki akışın incelenebilmesi için Fluent akış analiz programı kullanılmaktadır. Bu sebeple Fluent programında gözenekli ortamlarda meydana gelen basınç düşümlerinin doğru olarak elde edilip edilemediği sorgulanmalı ve deneysel olarak elde edilmiş değerler ile Fluent sonuçları karşılaştırılmalıdır. Bu kontrol işleminin yapılabilmesi için bir doktora çalışması kapsamında yapılmış olan basınç düşümü deneylerinin sonuçları veri olarak kullanılmıştır. Deneyler tel örgü elek tabakaların üst üste konulmasıyla oluşturulan gözenekli ortam için yapılmıştır[4]. Tel örgü elek tabakalardan oluşan gözenekli ortam için Bölüm 3 'de Fluent programında analiz yapılmıştır ve sonuçlar deneysel verilerle

karşılaştırılmıştır. Böylece Fluent programı ile susturucular için yapılacak çalışmalara referans oluşturulmuştur.

Fluent programında tel örgü gözenekli ortam için çıkan sonuçların deneysel veriler ile oldukça yakın olduğunun görülmesinden sonra susturucu hücreleri hava akışına dik olan alın yüzeyleri farklı şekillerde tasarlanmıştır. Tasarlanan susturucular klima santrali hücre yapısı içersine yerleştirilmiştir ve Fluent programı üzerinde hız ve basınç analizleri yapılmıştır böylece minimum basınç düşümünü sağlayan susturucu hücresinin bulunması sağlanmıştır.

Gözenekli ortamlar içersindeki akışın incelenebilmesi için öncelikle gözenekli ortamlar konusunda yapılan tarihsel çalışmalar incelenmiştir ve kaynak araştırması yapılmıştır.

1.1 Gözenekli Ortamlar Konusunda Yapılan Tarihsel Çalışmalar

Gözenekli ortamlar tarih boyunca birçok çalışmaya konu olmuştur. Yer altı suyu akışı ile borulardaki laminer akış arasındaki benzerliği ortaya koyan Darcy ve Dupuit tarafından gözenekli ortamlardaki akış problemi incelenmiştir. Darcy tarafından, homojen bir gözenekli ortamda daimi rejimdeki tek boyutlu akışla ilgili yapılan deneylerin sonucunda basınç düşüşü ile debi arasında doğrusal bir bağıntı olduğu bulunmuştur. Hubbert tarafından ise kumla oluşturulan gözenekli ortamda debi ile basınç düşüşü arasındaki doğrusal ilişkinin ortamın geometrik yapısına bağlı olduğu kadar akışkanın özelliklerine de bağlı olduğu ortaya atılmıştır. Gözenek duvarlarında sürtünme kuvvetlerine yani akışa karşı gösterilen dirence bağlı olduğu bilinen geçirgenlik katsayısının ortam geometrisine bağlılığını gösteren birçok model geliştirilmiştir[1,4]. Gözenekli ortam içersinde basınç düşümü analizlerinin yapılmasını sağlayan bu denklemler Bölüm 2 ' de ayrıntılı olarak incelenmektedir.

Gözenekli ortamda zorlanmış taşınım ile ilgili Zhang ve Zhao tarafından yapılan çalışmada sıkıştırılmaz akışı çözmek için yapısal olmayan üçgen elemanlı bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Aniden genişleyen bir kanalın içine giren akışkanın değişik uzunluktaki ve Darcy sayısındaki gözenekli tabakalara çarpması ile birlikte değişen hız profillerine bakılmıştır. Sonuçlara göre eklenen gözenekli ortamın uzunluğu arttıkça ve Darcy sayısı küçüldükçe akışın ayrılması ve girdap oluşması

zorlaşmaktadır. Bunun nedeni ise gözenekli ortamın akışkanın geçişine direnç göstermesi ve akışkanın hız profilini düzleştirilmesi olarak açıklanmıştır[5].

Bir sonraki adımda düz bir kanala birbirini takip eden gözenekli ortamlar yerleştiren Zhang ve Zhao bu eklentilerin akış alanının karakteristiğini büyük ölçüde değiştirdiğini ve yapılan bu değişikliğin ısı transferini oldukça geliştirdiğini saptamışlardır[6].

İçine aralıklarla gözenekli bloklar yerleştirilmiş olan bir kanaldaki zorlanmış taşınımı inceleyen Chikh gözenekli bölgelerdeki akışı modellemek için Darcy-Forchemier-Brinkman denklemini kullanmıştır. Sonuçlara göre düşük geçirgenlikteki bloklar etrafında oluşan sirkülasyon alanı akışın bir sonraki bloğa geçmesini engellemektedir. Ayrıca, eklenen bu blokların ısı transferini artırdığı da saptanmıştır[7].

Paralel iki levha arasındaki gözenekli ortamın zorlanmış taşınımı inceleyen Nield, Kuznetsov ve Ming Xiong levhalardaki sıcaklığı sabit tutup Peclet ve Darcy sayılarının sonuca olan etkilerini incelemiştir. Denklemlerde Brinkman modeli uygulanmış olup ısı transferinin Peclet numarası ile değişimine karşı daha duyarlı olduğu görülmüştür[8].

Hooman ve Ranjbar-Kani ise içi gözenekli ortamla doldurulmuş tam gelişmiş laminer zorlanmış taşınımı dairesel bir boru içerisinde incelemiştir. Boru duvarlarından akışkana sabit ısı akısıyla ısı verilmiştir. Problemden kullanılan yüksek Darcy sayıları için ayrı bir metot geliştirilmiş ve hız profillerinin Darcy sayısının değişimine karşı çok hassas olduğu görülmüştür. Öte yandan sıcaklık profillerinin Darcy sayısına karşı çok daha az hassas olduğu belirlenmiştir[9].

2. GÖZENEKLİ ORTAMIN İNCELENMESİ

Toprak, kum, seramik, pamuk, ekmek ve akciğer gibi doğal ve yapay cisimlerin büyük bir kısmı gözeneklidir. Su, kum ve hava filtreleri de gözenekli ortamlara örnek olarak verilebilir. Ancak içinde delikler bulunan her cisim gözenekli ortam olarak ele alınamaz. Yukarıda verilen örneklerde gözlenen ortak bir özellik, katı matris denilen sürekli bir fazın mevcut olması ve geriye kalan boş kısmında akışkan fazı ile dolu olmasıdır. Gözenekli ortamın diğer bir ortak özelliği ise katı ve boşluğun ortamın her tarafına yayılı olmasıdır. Diğer bir deyişle, ortamın değişik bölgelerinden yeterli büyüklükte alınan gözenekli ortam örneklerinin içinde hem katı hem de boşluğun bulunuyor olması gerekir[4].

2.1 Gözenekli Ortamı İfade Eden Parametreler

2.1.1 Porozite

Gözenekli ortamın karakteristik ve önemli parametrelerinden biri olan porozite (ϵ) boşluğun doldurduğu hacmin toplam hacme oranı olarak ifade edilir[10].

Bundan hareketle $(1-\epsilon)$ katı kısmın kapladığı hacmi temsil eder.

$$\epsilon = \frac{V_f}{V} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1' de V_f terimi akışkanın kapladığı hacmi göstermektedir.

ϵ terimi tanımında gözeneklerin(porların) birbirleriyle bağlantılı olduğu varsayılır[1].

Birbirine bağlı gözeneklerin toplam hacme oranına etkili porozite denir. Akış yalnızca birbirine bağlı porlar arasından olur. Yoğun olmayan ortamlarda, yani matrisi oluşturan parçacıklar gevşek doldurulmuşsa porozite etkili poroziteye eşit olur. Yoğun ortamlarda ise porozite ve etkili porozite arasındaki fark ayrıntılıdır.

Katı matrisler için porozite (ϵ) basınç sabitinin varlığında değişmez.Yani katı matrislerde $\partial\epsilon/\partial p = 0$ ' dır. Deforme edilebilir matrisler için $(\partial\epsilon/\partial p \neq 0)$

porozitedeki değişimin boyutu yapısal özelliklere ve deformasyona bağlıdır. Her gözenek genelde bir gözenek düzlemsel ölçütü d ile temsil edilir. Bu bir idealizasyondur çünkü boşluk biçimi düzgün değildir. Gözenek düzlemsel ölçütü d boşluğu olabildiğince yakın dolduran kürenin çapına denilmiştir.

Genelde boşluklar kendi boyutlarında ve matrislerdeki dağılımlarında düzensizdir. Boşluk boyunun düzensizliği ve matris yığındaki dağılım genelde istatistikî olarak ortalaması alınmış sınırlı hacimlerin dağılımlarıyla sunulur.

Bu istatistikî ortalamalar, por hacminden daha büyük, ama bütün katı matrisin hacminden daha küçük hacimlerden alınır. Bu ara hacme ‘örnekleyici başlangıç hacmi’ denir. Örnekleyici başlangıç hacmi uygun olarak seçildiğinde gözeneklerin artarak eklenmesi poroziteyi değiştirmez[4, 11].

Bazı gözenekli malzemeler için ortalama yığın porozitelerinin örnekleri Çizelge 2.1’ de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 : Gözenekli ortam örneklerinin porozite değerleri.

| MADDE | POROZİTE |
|---------------------------------|-----------|
| Beton | 0,02-0,07 |
| Kömür | 0,02-0,12 |
| Kireç taşı | 0,04-0,10 |
| Kum Taşı, Petrollü kum | 0,08-0,38 |
| Sıkıştırılmış, Sıcak Bakır Tozu | 0,09-0,34 |
| Tuğla | 0,12-0,34 |
| Sigara Filtresi | 0,17-0,49 |
| Silindirik Balata, Conta | 0,36-0,43 |
| Silika Tozu | 0,37-0,49 |
| Kum | 0,37-0,50 |
| Toprak | 0,43-0,54 |
| Öğütölmüş Taneli Taş | 0,44-0,45 |
| Taneli Katalizör | 0,45 |
| Deri | 0,56-0,59 |
| Kara Barut Tozu | 0,57-0,66 |
| Silika Taneleri | 0,65 |
| Tel Kıvrımları | 0,68-0,76 |
| Fiberglas | 0,88-0,93 |
| Poliüretan Köpük | 0,98 |

2.1.2 Geçirgenlik

Darcy kanununa göre geçirgenlik K_v matrisinin yani $-\mu_a u / (\partial P / \partial x)$ 'in akış iletkenliği ölçüsüdür. K_v terimi ortamın geometrisine bağlıdır ve geçirgenlik olarak tanımlanır. İzotropik bir ortam için;

$$\nabla P = -\frac{\mu_a}{K_v} u_d \quad (2.2)$$

şeklinde yazılabilir.

Tanım olarak geçirgenlik gözenekli ortamın akışı iletkenliğinin bir ölçüsüdür veya malzemeni içinden akışkanın geçme kolaylığının bir ölçüsüdür.

Geçirgenliğin pratik birimi Darcy'dir. Eğer 1 cP viskoziteye sahip bir akışkan kenarları 1 santimetreden oluşan bir küpün içerisinde 1 cm³/s'lik bir debi ile geçerken 1 atm'lik basınç farkı yaratıyorsa bu gözenekli malzemenin geçirgenliği bir Darcy olarak tanımlanır. Çizelge 2.2' de bazı katı matrisler için geçirgenlik büyüklüğünün örnekleri verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Gözenekli ortam örneklerinin geçirgenlik değerleri.

| MATRİS YAPISI | K (GEÇİRGENLİK) (m ²) |
|-------------------------|---|
| Kum Taşı (Petrollü Kum) | 5,0x10 ⁻¹⁶ – 3,0x10 ⁻¹² |
| Tuğla | 4,8x10 ⁻¹⁵ – 2,2x10 ⁻¹³ |
| Kireç Taşı | 2,0x10 ⁻¹⁵ – 4,5x10 ⁻¹⁴ |
| Deri | 9,5x10 ⁻¹⁴ – 1,2x10 ⁻¹³ |
| Kara Barut Tozu | 4,9x10 ⁻¹⁴ – 1,2x10 ⁻¹³ |
| Silika Tozu | 1,3x10 ⁻¹⁴ – 5,1x10 ⁻¹⁴ |
| Toprak | 2,9x10 ⁻¹³ – 1,4x10 ⁻¹¹ |
| Asfalt | 1,0x10 ⁻¹³ – 2,3x10 ⁻¹¹ |
| Fiberglas | 2,4x10 ⁻¹¹ – 5,1x10 ⁻¹¹ |
| Gevşek Kum | 2,0x10 ⁻¹¹ – 5,1x10 ⁻¹¹ |
| Keçe | 8,3x10 ⁻¹⁰ – 1,2x10 ⁻⁹ |
| Mantar Plaka | 3,3x10 ⁻¹⁰ – 1,5x10 ⁻⁸ |
| Tel Kıvrımları | 3,8x10 ⁻⁹ – 1,0x10 ⁻⁸ |
| Sigara | 1,1x10 ⁻⁹ |

2.2 Gözenekli Ortamlarda Basınç Düşümünü İfade Eden Denklemler

2.2.1 Darcy Kanunu

Gözenekli ortam, katı fazın genellikle sıkıştırılmış parçacıkların veya fitil liflerin yerleştirilmesinden meydana gelen bir katı-akışkan sistemidir. Bir gözenekli ortam boyunca akışta sürüklenmenin sebep olduğu basınç düşüşü, düşük hızlı akışlar için hızla doğru orantılıdır.

Darcy kanunu olarak bilinen bu bağıntı denklem (2.3) ' de ifade edildiği gibi;

$$\nabla P = -\frac{\mu_a}{K_v} u_d \quad (2.3)$$

şeklinde gösterilir.

K_v büyüklüğü gözenekli ortamın geçirgenlik katsayısıdır. u_d terimi darcy hızını, ∇P ise basınç düşümünü ifade etmektedir.

Gözenekli bir ortam içindeki sıkıştırılamaz bir akış içerisinde, her akışkan taneciğinin hızı üç boyutlu kompleks bir yapıdadır. Fakat makroskobik düzeyde akışkanın hızı tek yönlüdür. Bu bakımdan ortalama bir hız terimi kavramı ortaya çıkmıştır ve bu hıza Darcy hızı denmiştir.

İfade edildiği gibi;

$$u_d = \frac{1}{V} \int_{V_f} u_d dV \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'de V_f terimi akışkanın kapladığı hacmi göstermektedir.

Başka bir ortalama metodu ise,

$$u_f = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} u_d dV \quad (2.5)$$

şeklindedir.

Denklem (2.5)'de u_f terimi gözenek hızı olarak tanımlanmıştır.

Darcy hızı ile gözenek hızı arasındaki ilişki şu şekildedir;

$$u_f = \frac{u_d}{\varepsilon} \quad (2.6)$$

Buradaki ε terimi gözeneklilik olarak tanımlanmıştır ve akışkanın hacminin toplam hacme olan oranıdır.

∇P basınç düşüşü ve u_d darcy hızı bilindiğinde (2.3) denkleminde hesaplanan K_v 'nin ortam içindeki değişimi ve geometrik yapıya bağımlılığı gözden kaçırılacaktır. Gözenek duvarlarındaki sürtünme kuvvetlerine (akışa gösterilen dirence) bağlı olduğu bilinen K_v 'nın ortam geometrisine bağımlılığını gösteren birçok model geliştirilmiştir. Geliştirilen teoriler arasında en yaygın kabul gören teorilerden biri, bir hidrolik yarıçap teorisi olan Kozeny Teorisi'dir[4, 10, 11].

Kozeny gözenekli ortamı farklı dairesel kesitte olabilen eşit boylu kılcal tüplerden oluşmuş gibi varsayarak yavaş daimi akış için klasik hidrodinamik denklemlerinin çözümünden, ortam geçirgenliğinin gözenekliliğin küpüyle doğru orantılı ve tanecik özgül yüzey alanının karesiyle ters orantılı olması gerektiğini göstermiştir. Ancak gözenekli ortamdaki akış tüpleri doğrusal olmadığından akışkanının yol aldığı uzunluğun, ortamın uzunluğundan büyük olduğu da göz önüne alınmalıdır. Akış yolu uzunluğunun ortam uzunluğuna oranı şeklinde ifade edilen kıvrımlılık parametresi ile Kozeny'nin çalışması yeniden düzenlenmektedir. Kozeny teorisinin birçok modifikasyonu yapılmış olup bunlar arasında en çok kullanılanı Carman tarafından yapılan ve

$$K_v = \frac{\varepsilon^3}{\kappa S_p^2 (1 - \varepsilon)^2} \quad (2.7)$$

şeklinde yazılan 'Kozeny-Carman' teorisidir. Burada S_p tanecik yüzey alanının tanecik hacmine oranı şeklinde ifade edilen tanecik özgül yüzey alanıdır[4].

2.2.1.1 Darcy kanunu geçerlilik alanı

Poroz ortam boyunca akış üzerindeki katı cidar, atalet kuvvetleri ve değişken porozite etkilerini ihmal eden Darcy kanunu esas alan matematik formülasyon ile ilgili birçok analitik çalışma yapılmıştır.

Darcy modeli, herhangi bir yöndeki hacim ortalamalı hızın bu yöndeki basınç gradyeni ile orantılı olduğunu ifade eden lineer bir momentum denklemini açıklamaktadır. Darcy kanunu temelde viskoz kuvvetler ve basınç gradyeninin dengesi temeline dayanmaktadır. Bu model basittir ve geçerlilik alanı içinde iyi bir şekilde uygulanmıştır.

Darcy modelinin belli başlı sınırlamaları bulunmaktadır. Darcy modeli yerel hız ve gözenek çapı kullanılan Reynolds sayısının birden büyük olduğu akışlar için uygun değildir. Çünkü atalet kuvvetleri artık viskoz kuvvetlere nazaran ihmal edilememektedir. Duvar ve atalet kuvvetlerinin her ikisi de ısı sınır tabaka içindeki hızı azaltmakta, sıcaklık dağılımını genişletmekte ve ısı geçiş oranını azaltmaktadır.

Darcy denklemi katı cidardaki kaymama sınır şartını sağlamamaktadır. Isı geçiş problemlerinde ısı sık sık katı cidar yoluyla gözenekli matrisi dolduran akışkana transfer edilmektedir. Bu gibi durumlarda Darcy modeli yetersiz kalmaktadır.

Matris porozite değişimini göz önünde bulundurmamaktadır. Poroz matris içindeki yüksek poroziteli bölgelerin, akışkan tarafından tesir edilebilir olduğu gösterilebilir. Bunun sonucu olarak sistemin ısı geçişi karakteristikleri üzerindeki önemli etkilerle hızlı akan akışkanın yönlendirilmesi bu bölgelerde yapılır.

Darcy denklemi u_d hızının küçük mertebelerde olduğunda geçerlidir. Küçük mertebelerle kast edilen Reynolds sayısının 1 mertebesinde ya da daha küçük olduğu durumlardır, u hızı artarken doğrusal olmayan çekişe geçiş oldukça yumuşaktır.

Re sayısının 1'den 10 'a kadar olduğu aralıkta artırılırken ani geçişler meydana gelmez. Böyle nispeten düşük Reynolds sayılarında gözeneklerdeki akış laminerdir. Doğrusallıktaki kopuş, katı engellerden kaynaklanan biçim çekişin sürtünmeden kaynaklanan yüzey çekişle şimdi kıyaslanabilir olmasından meydana gelmektedir.

2.2.2 Forchhemier terimi ile genişletilmiş Darcy kanunu

Forchhemier de bünyesel kuvvetlerin etkisini de gösterebilmek için Darcy kanununda bazı değişiklikler yapmıştır. Buna göre Forchhemier terimi ile genişletilmiş Darcy kanunu,

$$\nabla p = -\frac{\mu_a}{K_v} u - \frac{c_F}{K_v^{1/2}} \rho_a |u| u \quad (2.8)$$

şeklindedir. Bu denklemde sağ taraftaki ilk terim viskoz etkileri gösterirken, ikinci Forchheimer terimi ise bünyesel kuvvetlerin etkisini göstermektedir.

Denklem 2.8' de gösterilen c_F bir boyutsuz biçim-çekiş sabitidir. Ward c_F ' nin yaklaşık 0,55 değerli evrensel bir sabit olabileceğini düşünmüştür fakat daha sonra c_F ' nin poroz ortamın doğasına göre değiştiği ve köpüklü maden lifleri durumunda 0,1 kadar küçük olduğu ortaya çıkmıştır.

Beavers , Sparrow ve Rodenz sarmalayıcı duvarların c_F ' nin değeri üzerinde çok büyük etkisinin olabileceğini ve aşağıdaki ifadeyle yüksek bir korelasyon içinde olduğunu göstermişlerdir.

$$c_F = 0,55 \left(1 - 5,5 \frac{d}{D_e} \right) \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)' da d ile gösterilen kürelerin çapını, D_e ise yatağın eşdeğer çapını ifade etmektedir.

D_e şu şekilde formülize edilmektedir;

$$D_e = \frac{2wh}{w+h} \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)' da w yatağın genişliğini , h ise yatağın yüksekliğini ifade etmektedir.

2.2.3 Ergun denklemi

Ergun tarafından kullanılan ve deneysel sonuçlarla uyumu ile yaygın kabul gören basınç düşümü ifadesi kürelerden oluşan gözenekli ortam için,

$$\frac{\Delta P}{L} = A_E \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d^2} \mu_a u_m + B_E \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d} \rho_a u_m^2 \quad (2.11)$$

şeklinde gösterilmiştir.

Denklem (2.11)' de A_E ve B_E Ergun sabitleri olup kürelerden oluşan gözenekli ortam için deneysel olarak sırasıyla 150 ve 1,75 değerine eşittir.

Denklem (2.11)' de sağ taraftaki ilk terim katı matris yüzeyindeki viskoz sürtünmeleri gösterirken ikinci terim şekil sürüklenmesini göstermektedir. Forcheimer akışı için basınç düşümü ifadesi,

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu_a}{K_v} u_m + \frac{\rho_a}{K_{at}} u_m^2 \quad (2.12)$$

şeklinde yazılmaktadır.

Denklem (2.12)' de K_v ortamın viskoz geçirgenliğini , K_{at} ise ortamın atalet geçirgenliğini göstermektedir.

K_v ve K_{at} şu şekilde formülize edilmektedir,

$$K_v = \frac{\zeta^2 \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2 S_p^2 a_1} \quad (2.13)$$

Denklem (2.13) ve Denklem (2.14)' de ζ tanecik hacmine eşdeğer kürenin yüzey alanının tanecik yüzey alanına oranı olarak tanımlanan küresellik katsayısıdır.

Ayrıca $3 < a_1 < 6$ ve $0,2 < a_2 < 0,5$ olduğu ileri sürülmektedir[4].

$$K_{at} = \frac{\zeta \varepsilon^2}{(1 - \varepsilon) S_p a_2} \quad (2.14)$$

Vafai Tien tarafından (2.11) denklemi yerine boyut analizi yolu ile basınç düşüşü ifadesi,

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu_a}{K_v} u_m + \frac{F(K_v, Re_{\sqrt{K_v}}, Geometri)}{\sqrt{K_v}} \rho_a u_m^2 \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilmiştir[3,4].

2.2.4 Brinkman denklemi

Yüksek gözenekliliğe sahip yapılarda sınır(duvar) etkileri kayda değer bir şekilde artmakta ve akışın içlerine doğru erişmektedir. Sınırlardaki sürtünme etkisi modellenmek üzere Brinkman Darcy kanunu;

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{K}u + \mu_e \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.16)$$

şeklinde düzenlenmiştir.

Brinkman denkleminde iki tane viskoz terim bulunmaktadır. İlk terim bildiğimiz Darcy terimidir. İkincisi ise Navier Stokes denklemindeki Laplace terimiyle benzeşim içerisindedir. Denklemden görülen μ_e etkili viskozite olarak adlandırılır.

Brinkman μ ile μ_e 'yi birbirine eşit olarak saptamıştır fakat bu terimler birbirine yaklaşık olarak eşittir.

Brinkman denklemini Darcy yasasının Brinkman uzanımı olarak nitelendirip, yasaya sadece bir terim eklendiğini düşünmek yanlıştır. Çünkü Brinkman geçirgenlik (K) ile porozite (ε) arasındaki ilişkiyi küreler toplamı içerisinde elde etmiştir. Brinkman porozitenin Brinkman denklemi için bireysel küre içinden geçen akışa uygulanabilecek kadar büyük olduğunu ve akışkanın sıkıştırılmaz olduğunu varsayarak;

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2.17)$$

denklemini ve (2.18) denklemini, küre yüzeyinde $u=0$ ve küreden büyük uzaklıklarda $u=u_0$ sınır şartları ile çözmüştür.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K}u + \mu_e \nabla^2 u \quad (2.18)$$

Brinkman küre üstündeki çekişi mD_s olarak saptamıştır.

$$D_s = 6\pi\mu u_0 a \quad (2.19)$$

Brinkman daha sonra u_0 ' ı tek yönlü ortalama süzülme hızı ile bir tutmuştur ve bir kolonda bulunan küreler üzerindeki toplam gücü, bu kolon üzerindeki Darcy çekişine eşitlemiştir.

$$m = 1 + \lambda a + \lambda^2 a^2 / 3 \quad (2.20)$$

λ denklem (2.21)' de gösterilmiştir.

$$\lambda = \left(\frac{\mu}{K\mu_e} \right) \quad (2.21)$$

Böylece,

$$K = \frac{K_0}{m} \quad (2.22)$$

olduğunu göstermiştir.

Denklem (2.22)' de K_0 sınırdaki K ' nın $\varepsilon \rightarrow 1$ değeridir ve m çarpım etkeni,

$$m^{-1} = 1 + \frac{3}{4}(1 - \varepsilon) \left[1 - \left(\frac{8}{1 - \varepsilon} - 3 \right)^{1/2} \right] \quad (2.23)$$

olarak saptanmıştır.

Loundgren 'e göre ise Brinkman u_0 ' ı ortalama sızıntı hız yerine porozite tarafından bölünen hıza eşitlemeyi ve bu durumda m çarpım etkeni,

$$m^{-1} = 1 + \frac{3}{4\varepsilon}(1 - \varepsilon) \left[1 - \left(\frac{8}{1 - \varepsilon} - 3 \right)^{1/2} \right] \quad (2.24)$$

şeklinde ifade edilecektir. Bu durumda m ' nin pozitif olması için $\varepsilon > 0,6$ olmalıdır. Bu gereklilik çok kısıtlayıcıdır çünkü doğal olarak ortaya çıkan bir çok poroz ortam 0,6 ' dan daha az poroziteye sahiptir[3,12].

Araştırmacıların Brinkman denklemini kullanmayı özellikle uygun buldukları durumlar mevcuttur. Poroz bir ortam içerisindeki akış ile temiz ortam arasındaki akış karşılaştırılmak istendiğinde ortaya çıkan durum Brinkman denkleminin kullanılması için uygundur.

Brinkman denklemi $K \rightarrow \infty$ olarak Navier Stokes denklem biçimine ve $K \rightarrow 0$ olarak Darcy denklemine dönüşür.

3. TEL ÖRGÜ TABAKA GÖZENEKLİ ORTAM AKIŞ ANALİZİ

Tel örgü katmanlardan oluşan gözenekli ortamda zorlanmış ısı geçişi konusu Mustafa Özdemir tarafından doktora tezi kapsamında incelenmiştir ve bu kapsamda ısı geçişi ve hidrodinamik deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan hidrodinamik deneyi sonuçları veri olarak kullanılmaktadır[4].

Bu bölümde öncelikle oluşturulan gözenekli ortam açıklanmakta ve hidrodinamik deneyinin sonuçları verilmektedir. Daha sonra aynı gözenekli ortam için Fluent programında basınç düşümü değerleri elde edilmektedir. Hidrodinamik deneyi sonuçları ile Fluent’ de yapılan analiz sonuçları karşılaştırılmaktadır. Böylece Fluent’ de bulunan sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumluluğu irdelenip, ilerideki bölümlerde yapılan susturucu akışı için Fluent analizlerine referans oluşturulmaktadır.

Deneysel çalışma sırasında öncelikle tel örgü elek tabakalardan oluşan ortamın, gözeneklilik ve geçirgenlik değerleri deneysel olarak hesaplanmıştır. Daha sonra kurulan tesisat yardımıyla gözenekli ortam üzerinde hidrodinamik deneyleri gerçekleştirilmiş ve gözenekli ortamın Ergun sabitleri elde edilmiştir[4].

Deneysel çalışmada elde edilen gözeneklilik ve deneysel boyutsuz katsayı değerleri Fluent programında yapılan analizlerde gözenekli ortamın karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Fluent analizlerinin yapılabilmesi öncelikle Gambit programında gözenekli ortamın geometrik yapısı oluşturulmuş ve ortamın geometrik yapısına uygun çözüm ağları ve çözüm sıklıkları belirlenmiştir. Daha sonra gerekli sınır şartları verilerek gözenekli ortam üzerinde meydana gelen basınç düşümü değerleri elde edilmiştir.

Deneysel çalışma sırasında deney yapılan her debi değeri için Fluent ‘de sınır değerleri değiştirilerek basınç düşümü değerleri elde edilmiştir ve sonuçların uyumluluğu irdelenmiştir.

3.1 Oluşturulan Gözenekli Ortam

Gözenekli ortam, tel çapı 0,5 mm, boyu 310 mm ve eni 180 mm olan paslanmaz çelik tel örgü tabakaların üst üste konulup sıkıştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Tabakaların üst üste konulmasıyla örgüdeki tepe ve çukurların diğer tabakanın tepe ve çukurları ile ilişkisi rastgele olmaktadır. Bu durum tabakaların kısmen birbiri içerisine girmesine de sebep olduğundan toplam kalınlık azalmaktadır.

Çizelge 3.1 : Hidrodinamik deneyi yapılan ölçümler[4].

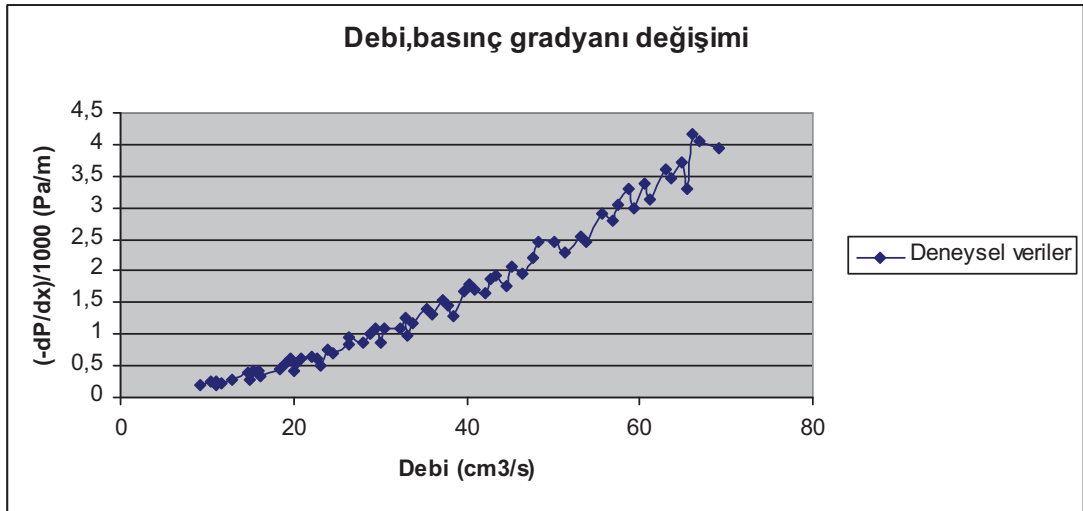
| Deney No | (P1-P2)/L (Pa / m) | Hacimsel Debi (cm ³ /s) | Deney No | (P1-P2)/L (Pa / m) | Hacimsel Debi (cm ³ /s) |
|----------|--------------------|------------------------------------|----------|--------------------|------------------------------------|
| 1 | 197,3895 | 9,185 | 35 | 1306,6011 | 36,093 |
| 2 | 264,8794 | 10,401 | 36 | 1524,5789 | 37,3166 |
| 3 | 250,318 | 11,0092 | 37 | 1451,4978 | 37,8975 |
| 4 | 207,703 | 11,1034 | 38 | 1295,5282 | 38,5338 |
| 5 | 237,4344 | 11,6308 | 39 | 1664,8797 | 39,7446 |
| 6 | 289,0024 | 12,8325 | 40 | 1800,9266 | 40,3701 |
| 7 | 392,9294 | 14,6766 | 41 | 1706,3324 | 41,0012 |
| 8 | 291,7870 | 14,9862 | 42 | 1637,2060 | 42,2145 |
| 9 | 423,1426 | 15,2878 | 43 | 1880,1270 | 42,8349 |
| 10 | 413,3800 | 15,8961 | 44 | 1924,6710 | 43,4291 |
| 11 | 330,0658 | 16,1774 | 45 | 1766,7588 | 44,6644 |
| 12 | 446,0793 | 18,3394 | 46 | 2061,2919 | 45,2757 |
| 13 | 531,4843 | 18,965 | 47 | 1959,5853 | 46,4997 |
| 14 | 607,4271 | 19,5678 | 48 | 2202,3979 | 47,7408 |
| 15 | 426,7011 | 19,9884 | 49 | 2468,0682 | 48,3419 |
| 16 | 532,4479 | 20,1911 | 50 | 2464,5091 | 50,1493 |
| 17 | 608,3249 | 20,8005 | 51 | 2292,0884 | 51,3842 |
| 18 | 640,6458 | 22,0306 | 52 | 2532,2119 | 53,2247 |
| 19 | 626,2511 | 22,6101 | 53 | 2470,8364 | 53,8462 |
| 20 | 514,5505 | 23,1145 | 54 | 2920,1659 | 55,6615 |
| 21 | 746,3560 | 23,8558 | 55 | 2795,1140 | 56,9135 |
| 22 | 696,0103 | 24,4627 | 56 | 3048,2086 | 57,5124 |
| 23 | 843,4379 | 26,3079 | 57 | 3295,2922 | 58,7624 |
| 24 | 938,6648 | 26,3139 | 58 | 2976,7094 | 59,3349 |
| 25 | 862,2618 | 28,1312 | 59 | 3374,1589 | 60,557 |
| 26 | 993,0105 | 28,7591 | 60 | 3124,1370 | 61,2081 |
| 27 | 1097,1653 | 29,3776 | 61 | 3613,1114 | 63,003 |
| 28 | 852,6126 | 30,0039 | 62 | 3454,7419 | 63,618 |
| 29 | 1093,8632 | 30,579 | 63 | 3730,7732 | 64,8195 |
| 30 | 1089,8888 | 32,3955 | 64 | 3308,9752 | 65,459 |
| 31 | 1259,9368 | 33,0293 | 65 | 4159,9268 | 66,0996 |
| 32 | 986,9823 | 33,2021 | 66 | 4051,9072 | 66,8663 |
| 33 | 1187,5675 | 33,6699 | 67 | 3932,4580 | 69,1262 |
| 34 | 1384,4565 | 35,493 | | | |

Bir tabakanın yaklaşık kalınlığı tel çapının en az iki katı olduğuna göre, 20 tabakadan oluşan ortamların yüksekliklerinin teorik olarak 20 mm olması beklenirken tel örgü elek tabakanın kalınlığı ağırlık altında sıkıştırılmasıyla 17,08 mm olarak ölçülmüştür[4].

3.2 Hidrodinamik Deneyleri Sonuçları

Hidrodinamik deneylerin amacı gözenekli ortamda meydana gelen basınç düşümü ile gözenekli ortam üzerinden geçen debi arasındaki ilişkinin tespit edilmesidir. Bölüm 2' de açıklanan Ergun sabitleri hesaplandıktan sonra ortamın viskoz ve atalet geçirgenlikleri bulunmaktadır.

Tel örgü katmanlardan oluşan gözenekli ortamın gözeneklilik değerinin belirlenmesi deneyi, hidrodinamik deney tesisatı ve hidrodinamik deneylerinin yapılışı EK B' de açıklanmıştır.Şekil 3.1' de paslanmaz tel örgü çelik tabakalardan oluşturulan gözenekli ortam için debi ile basınç gradyanı değişimleri deneysel verilere göre çizilmiştir.



Şekil 3.1 : Deneysel verilere göre debi, basınç gradyanı değişimi[4].

Şekil 3.1' de görüldüğü gibi deney yapılan aralıkta $\Delta P/L$, u_m arasındaki ilişki 2. derece bir polinoma uymaktadır. Forchhemier akış rejiminin de benzer polinom ile ifade edildiği bilindiğinden, buradaki ölçüm aralığı bu rejimin başlangıç ve gelişme bölgelerini içine almaktadır. $\Delta P/L$, u_m değerlerinin lineer değişmesi gereken debilerde ise(Darcy rejimi) yapılan ölçme hatasının büyük olmasından dolayı deney sonuçlarında lineer ilişki görülmemektedir[4]. Hidrodinamik deneyi sonuçları

boyutsuz sayılar ile ifade edilebilir. Re_m , ortalama hız ve tel çapına göre tanımlanan Reynolds sayısını sembolize etmektedir.

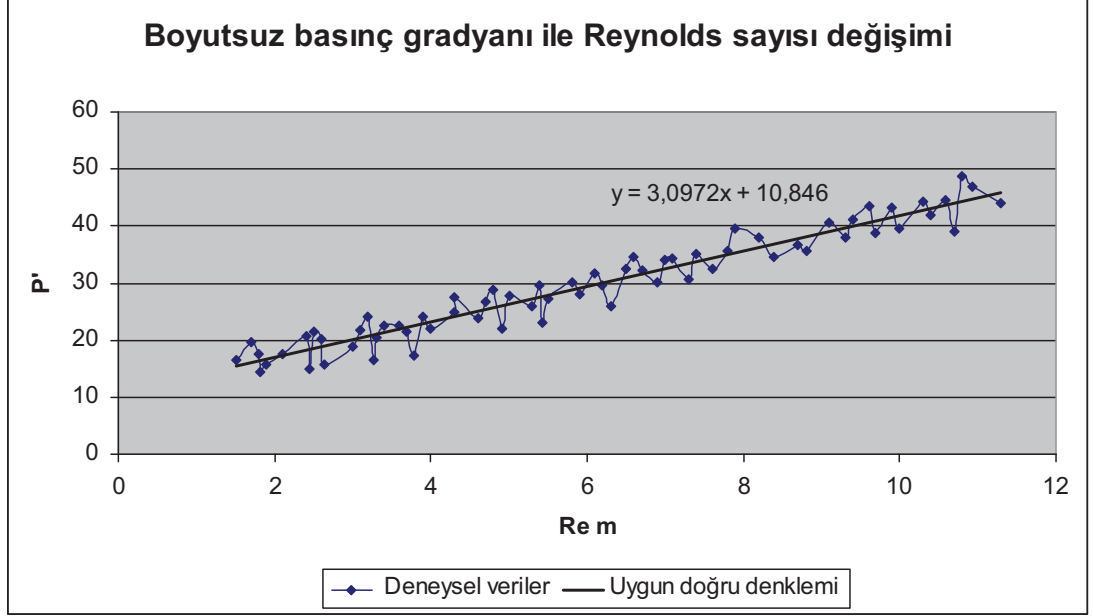
$$Re_m = \frac{\rho u_m d}{\mu} \quad \bar{P} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{\mu u_m} \quad (3.2)$$

\bar{P} ise boyutsuz basınç düşümü değerini sembolize etmektedir.

Çizelge 3.2 : Boyutsuz basınç düşümü ve Re_m ile deney sonuçları[4].

| Deney No | $Re_m = \frac{\rho u_m d}{\mu}$ | $\bar{P} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{\mu u_m}$ | Deney No | $Re_m = \frac{\rho u_m d}{\mu}$ | $\bar{P} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{\mu u_m}$ |
|----------|---------------------------------|--|----------|---------------------------------|--|
| 1 | 1,501 | 16,627 | 35 | 5,8991 | 28,0044 |
| 2 | 1,6997 | 19,7035 | 36 | 6,0982 | 31,6096 |
| 3 | 1,7991 | 17,5917 | 37 | 6,1931 | 29,633 |
| 4 | 1,8145 | 14,473 | 38 | 6,2971 | 26,0121 |
| 5 | 1,9007 | 15,7944 | 39 | 6,4949 | 32,4096 |
| 6 | 2,097 | 17,4246 | 40 | 6,5971 | 34,5149 |
| 7 | 2,3984 | 20,7137 | 41 | 6,7003 | 32,1986 |
| 8 | 2,449 | 15,0642 | 42 | 6,8986 | 30,0062 |
| 9 | 2,4983 | 21,4147 | 43 | 6,9999 | 33,9594 |
| 10 | 2,5977 | 20,1201 | 44 | 7,0971 | 34,2883 |
| 11 | 2,6437 | 15,7857 | 45 | 7,2989 | 30,6045 |
| 12 | 2,997 | 18,819 | 46 | 7,3988 | 35,2245 |
| 13 | 3,0992 | 21,6824 | 47 | 7,5988 | 32,605 |
| 14 | 3,1977 | 24,0172 | 48 | 7,8016 | 35,6925 |
| 15 | 3,2664 | 16,5164 | 49 | 7,8999 | 39,5006 |
| 16 | 3,2996 | 20,4027 | 50 | 8,1952 | 38,0221 |
| 17 | 3,3991 | 22,6273 | 51 | 8,3971 | 34,5121 |
| 18 | 3,6002 | 22,4989 | 52 | 8,6978 | 36,8092 |
| 19 | 3,6949 | 21,4297 | 53 | 8,7994 | 35,5025 |
| 20 | 3,7773 | 17,2232 | 54 | 9,096 | 40,5903 |
| 21 | 3,8984 | 24,206 | 55 | 9,3006 | 37,9974 |
| 22 | 3,9976 | 22,0131 | 56 | 9,3985 | 41,0066 |
| 23 | 4,2992 | 24,8048 | 57 | 9,6028 | 43,3875 |
| 24 | 4,3001 | 27,5991 | 58 | 9,6963 | 38,8147 |
| 25 | 4,5971 | 23,7149 | 59 | 9,896 | 43,1094 |
| 26 | 4,6997 | 26,7173 | 60 | 10,0024 | 39,4904 |
| 27 | 4,8008 | 28,8952 | 61 | 10,2958 | 44,3701 |
| 28 | 4,9031 | 21,9859 | 62 | 10,3963 | 42,0151 |
| 29 | 4,9971 | 27,6764 | 63 | 10,5926 | 44,5311 |
| 30 | 5,294 | 26,0296 | 64 | 10,6971 | 39,1106 |
| 31 | 5,3976 | 29,5134 | 65 | 10,8018 | 48,6919 |
| 32 | 5,4258 | 22,9993 | 66 | 10,9271 | 46,8838 |
| 33 | 5,5022 | 27,2889 | 67 | 11,2964 | 44,0141 |
| 34 | 5,8001 | 30,1792 | | | |

Deney sonuçları, ortalama hız ve tel çapına göre tanımlanan Reynolds sayısı ve boyutsuz basınç düşümü sayısına göre düzenlenmiştir ve Çizelge 3.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Boyutsuz basınç gradyanı, Reynolds sayısı değişimi.

Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi hidrodinamik deneylerin yapıldığı aralıkta deney sonuçlarına en uygun eğrinin bir doğru olduğu görülmektedir. Bu uyum debi ile basınç düşüşü arasındaki parabolik ilişkinin doğal sonucudur.

Deney sonuçlarına uygun doğru denklemi ;

$$\bar{P} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{\mu u_m} = 3,0972 \text{ Re}_m + 10,846 \quad (3.3)$$

şeklinde olmaktadır.

Forchemier akış rejiminde Carman-Kozeny tipi basınç düşüşü ifadesi ;

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu u_m}{a \varepsilon^3 / S_b^2} + \frac{\rho u_m^2}{b \varepsilon^3 / S_b} \quad (3.4)$$

şeklinde dir. Denklem 3.4’ de S_b gözenekli oramdaki katının ıslak yüzey alanının , toplam hacme oranı olarak tanımlanan özgül yüzeydir. Boyutsuz a ve b katsayıları ise deneysel olarak bulunması gereken sayılardır.

Tel örgü tabakası için özgül yüzey;

$$S_b = \frac{4}{d}(1 - \varepsilon) \quad (3.5)$$

şeklinde tanımlanmaktadır[4].

(3.4) denklemi (3.3) denkleminde yerine yazılırsa;

$$\bar{P} = \left(\frac{\mu u_m}{\varepsilon^3 d^2} + \frac{\rho u_m^2}{b \varepsilon^3 d} \right) \frac{d^2}{\mu u_m} = 3,0972 \text{Re}_m + 10,846 \quad (3.6)$$

elde edilir.

$A_E = \frac{16}{a}$ ve $B_E = \frac{4}{b}$ olarak tanımlanıp denklem (3.6)' da yerine konursa;

$$\bar{P} = A_E \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + B_E \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \text{Re}_m = 3,0972 \text{Re}_m + 10,846 \quad (3.7)$$

elde edilir.

Denklem (3.7)' den Ergun sabitleri; $A_E = 110,8585$ ve $B_E = 6,8632$ olarak bulunur[4].

3.3 Tel Örgü Elek Tabaka için Fluent Programında Analiz

Oluşturulan gözenekli ortam için Fluent'de analiz yapılarak basınç düşümü değerlerinin elde edilebilmesi için öncelikle analiz edilecek gözenekli ortamın geometrik yapısının oluşturulup, çözüm sıklıkları ve ağ yapısı belirlenmelidir. Bu kısım Gambit' de yapılmaktadır.

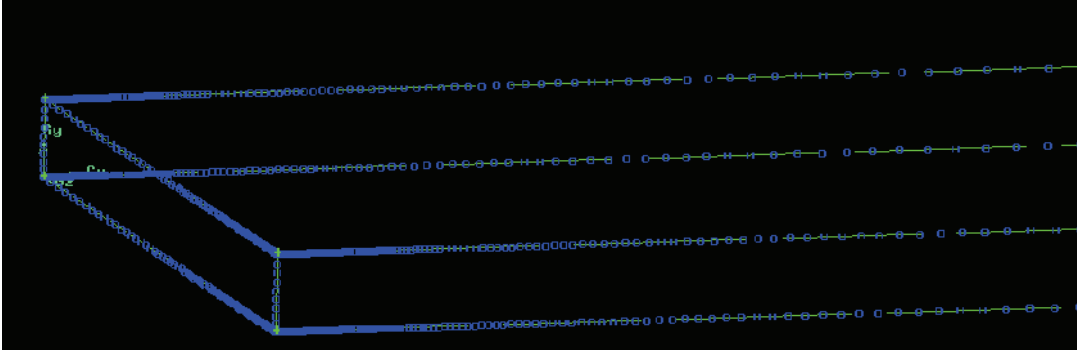
3.3.1 Tel örgü tabaka geometrisi ve çözüm ağlarının oluşturulması

Öncelikle çapı 0,5 mm olan çelik tel tabakaların sıkıştırılmasıyla elde edilen gözenekli ortam, boyu 310 mm, eni 180 mm ve kalınlığı 17,08 mm olacak şekilde Gambit programında çizilmiştir.

İkinci aşamada ise çözüm ağlarının uygun sıklıklarla oluşturulabilmesi için kenarlar uygun aralıklara bölünmüştür. Eni ve boyu 2 mm sıklıkta, yükseklikte ise 0,5 mm sıklıkta ve 1,032 oranında genişleyen aralıklarla kenarlarda çözüm aralıkları oluşturulmuştur.

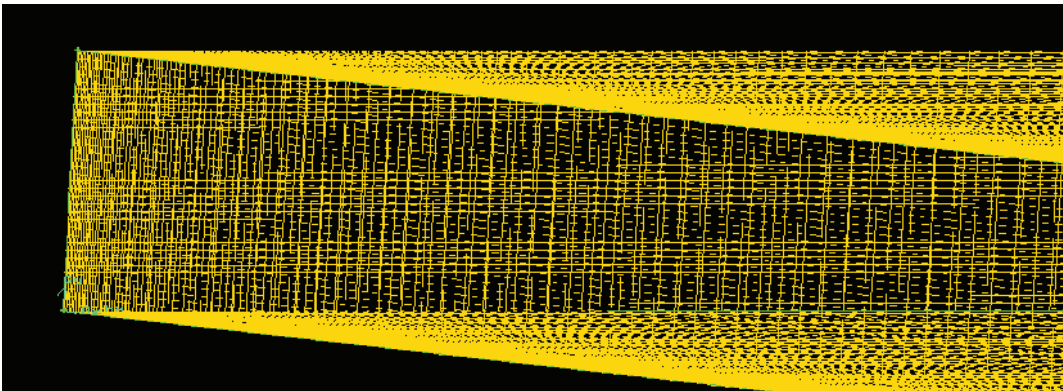


Şekil 3.3 : Tel örgü tabaka için gambit programında oluşturulan geometri.



Şekil 3.4 : Tel örgü tabaka için kenarlar üzerinde oluşturulan çözüm sıklıkları.

Kenarlar uygun çözüm sıklıkları ile bölündükten sonra, hacmin tamamında çözüm ağlarının oluşturulması işlemine geçilmiştir. Hacim üzerinde oluşturulan çözüm ağları Şekil 3.5’ de görülmektedir.

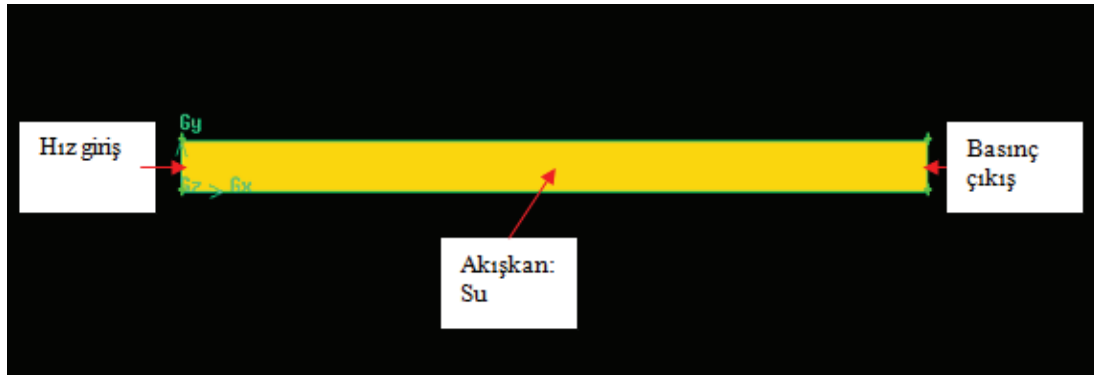


Şekil 3.5 : Tel örgü tabaka için hacim üzerinde oluşturulan çözüm ağları.

Tel örgü elek tabakadan oluşan hacmin tamamı için çözüm ağları oluşturulduktan sonra çözüm yapılabilmesi için gerekli sınır şartlarının girilmesi işlemine geçilmiştir.

Sınır şartları girilirken tel örgü elek tabakanın giriş kısmına ‘hız giriş’ sınır şartı girilmiştir. Böylece Fluent ‘de çözüm yapılırken farklı hacimsel debi değerlerini sağlayan hız değerlerinin sınır şartı olarak girilmesi sağlanmıştır.

Tel örgü elek tabaka içerisindeki basınç düşümünün görülebilmesi için ise elek tabakanın çıkış kısmına ‘basınç çıkış’ sınır şartı girilmiştir. Oluşturulan sınır şartları Şekil 3.6’ da görülmektedir.



Şekil 3.6 : Tel örgü tabaka sınır şartları.

Sınır şartlarının tanımlanmasından sonra dosya Gambit programında mesh dosyası olarak kaydedilmiştir ve Fluent programında analiz kısmına geçilmiştir.

Tel örgü elek tabakalardan oluşan gözenekli hacmin, gözenekli ortamı ifade eden gözeneklilik, viskoz ve atalet geçirgenlik katsayılarının girilmesi işlemi Fluent’de yapılmaktadır.

3.3.2 Fluent programında gözenekli ortamı ifade eden denklemler

Fluent gözenekli ortamlarda çözümlene yaparken klasik momentum denklemine ilave bir terim ele alır. İlave terim iki kısımdan oluşmaktadır.

Birinci kısım, viskoz düşümleri ifade etmektedir. Denklem 3.8’ de sağ taraftaki ilk terim viskoz etkileri yani Darcy etkilerini içermektedir[15].

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j \right) \quad (3.8)$$

İkinci kısım, atalet etkilerini ifade etmektedir. Denklem 3.8' de sağ taraftaki ikinci terim atalet etkileri içermektedir[15].

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v_i| v_i\right) \quad (3.9)$$

Denklem 3.9' da α geçirgenlik , C_2 ise atalet etkilerini içeren katsayıyı ifade etmektedir.

Fluent' de gözenekli ortam çözümlemesi yapılırken $1/\alpha$ ($1/m^2$) ve C_2 katsayılarının programa girilerek gözenekli ortam özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir.

3.3.3 Fluent programında verilerin girilmesi ve analiz sonuçları

Deneysel verilerin sonucunda ortalama gözenekliğe göre Ergun sabitleri Bölüm 3.2 'de $A_E = 110,8585$ ve $B_E = 6,8632$ olarak bulunmuştur.

$$\nabla P = -\frac{\mu \varepsilon}{K_v} u - \frac{F \varepsilon}{\sqrt{K_v}} \rho |u| u \quad (3.10)$$

(3.10) denkleminde,

$$K_v = \frac{\varepsilon^3 d^2}{A_E (1-\varepsilon)^2}, K_{at} = \frac{\varepsilon^3 d}{B_E (1-\varepsilon)}, F = \frac{B_E}{\sqrt{A_E}} \frac{1}{\varepsilon \sqrt{\varepsilon}} \quad (3.11)$$

olacağından gözenekli ortam için, $K_v = 2,3050 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, $K_{at} = 1,6144 \times 10^{-4} \text{ m}$, $F = 0,9404$ olarak bulunur[4].

(3.10) denklemi ile , Fluent'in referans aldığı (3.9) denklemi karşılaştırılırsa Fluent'e girilmesi gereken katsayıları ifade eden denklemler,

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{K_v}, C_2 = \frac{2F \varepsilon}{\sqrt{K_v}} \quad (3.12)$$

olması gerekmektedir.

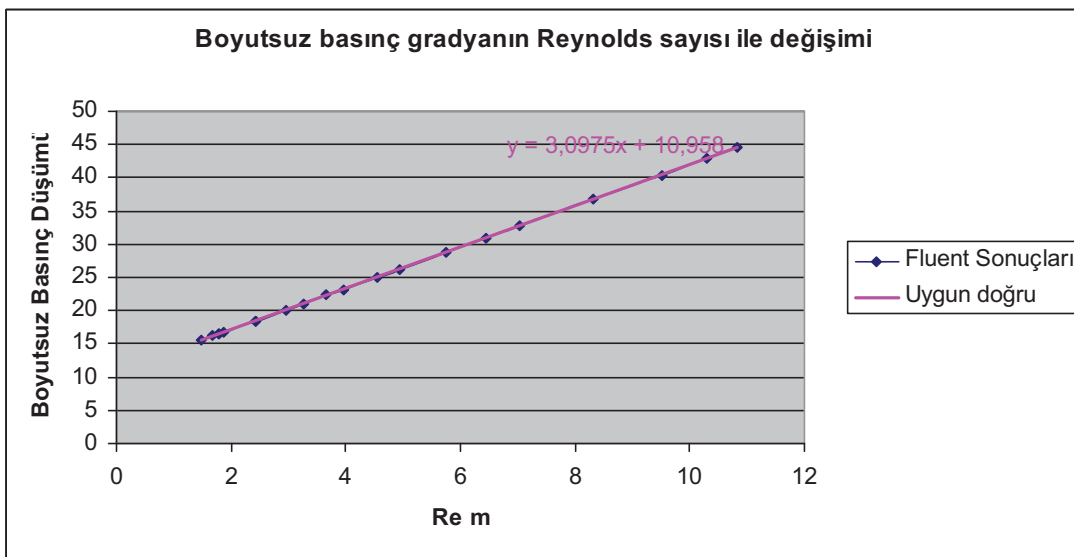
Denklem (3.12) hesaplanırsa tel örgü tabakalardan oluşan gözenekli ortam için Fluent' e girilmesi gereken katsılar sırasıyla $1/\alpha$ değeri $4,338395 \times 10^7$ ve C_2 değeri 12388,5 olması gerekmektedir.

Ortalama gözeneklilik değeri de 0,7812 olarak Fluent'e girilmektedir. (EK A). Deneysel çalışmada olduğu gibi Fluent programında da Gambit programında belirlenmiş olan hız giriş sınır şartı için ilk olarak 0,002988 m/s değeri girilir ve basınç düşümü değerlerinin elde edilebilmesi için çözüm yakınsayana kadar program çalıştırılır.

3.3.4 Tel örgü tabaka için Fluent basınç düşümü analizi



Şekil 3.7 : $u_m = 0,002988$ m/s sınır şartı için basınç düşümü analizi.



Şekil 3.8 : Fluent sonuçları ile boyutsuz basınç gradyanı ile Re sayısı değişimi.

Şekil 3.7' de $u_m = 0,002988$ m/s sınır şartı için tel örgü tabakalardan oluşan gözenekli ortamda meydana gelen basınç düşümü görülmektedir. Şekil 3.8' de paslanmaz tel örgü çelik tabakalardan oluşturulan gözenekli ortam için boyutsuz basınç düşümü ile ortalama hız ve tel çapına göre tanımlana Re_m sayısı değişimleri Fluent verilerine göre çizilmiştir.

Çizelge 3.3' de boyutsuz basınç düşümü ile, ortalama hız ve tel çapına göre tanımlanan Re_m sayısı ile hidrodinamik deneylerin gerçekleştirildiği tüm debi değerleri için Fluent programından elde edilen sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 3.3 : Boyutsuz basınç düşümü ve Re_m ile Fluent sonuçları.

| Deney No | $Re_m = \frac{\rho u_m d}{\mu}$ | $\bar{P} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{\mu u_m}$ | Deney No | $Re_m = \frac{\rho u_m d}{\mu}$ | $\bar{P} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{\mu u_m}$ |
|-----------------|---------------------------------|--|-----------------|---------------------------------|--|
| 1 | 1,4866 | 15,5633 | 35 | 5,8418 | 29,0531 |
| 2 | 1,6835 | 16,1703 | 36 | 6,0399 | 29,6665 |
| 3 | 1,7819 | 16,4765 | 37 | 6,1339 | 29,9578 |
| 4 | 1,7971 | 16,5259 | 38 | 6,2369 | 30,2768 |
| 5 | 1,8825 | 16,7871 | 39 | 6,4329 | 30,8862 |
| 6 | 2,0770 | 17,3915 | 40 | 6,5341 | 31,1974 |
| 7 | 2,3755 | 18,3161 | 41 | 6,6363 | 31,5138 |
| 8 | 2,4256 | 18,4737 | 42 | 6,8326 | 32,1221 |
| 9 | 2,4744 | 18,6225 | 43 | 6,9330 | 32,4331 |
| 10 | 2,5729 | 18,9274 | 44 | 7,0292 | 32,7315 |
| 11 | 2,6184 | 19,0685 | 45 | 7,2292 | 33,3503 |
| 12 | 2,9683 | 20,1517 | 46 | 7,3281 | 33,6568 |
| 13 | 3,0696 | 20,4660 | 47 | 7,5262 | 34,2704 |
| 14 | 3,1671 | 20,7682 | 48 | 7,7271 | 34,8927 |
| 15 | 3,2352 | 20,9791 | 49 | 7,8244 | 35,1940 |
| 16 | 3,2680 | 21,0788 | 50 | 8,1169 | 36,1002 |
| 17 | 3,3667 | 21,3862 | 51 | 8,3168 | 36,7211 |
| 18 | 3,5658 | 22,0030 | 52 | 8,6147 | 37,6420 |
| 19 | 3,6596 | 22,2928 | 53 | 8,7153 | 37,9536 |
| 20 | 3,7412 | 22,5464 | 54 | 9,0091 | 38,8637 |
| 21 | 3,8612 | 22,9180 | 55 | 9,2117 | 39,4914 |
| 22 | 3,9594 | 23,2236 | 56 | 9,3087 | 39,7916 |
| 23 | 4,2581 | 24,1474 | 57 | 9,5110 | 40,4165 |
| 24 | 4,2590 | 24,1504 | 58 | 9,6037 | 40,7053 |
| 25 | 4,5532 | 25,0617 | 59 | 9,8015 | 41,3180 |
| 26 | 4,6548 | 25,3763 | 60 | 9,9068 | 41,6444 |
| 27 | 4,7549 | 25,6863 | 61 | 10,1974 | 42,5443 |
| 28 | 4,8563 | 26,0003 | 62 | 10,2969 | 42,8529 |
| 29 | 4,9494 | 26,2882 | 63 | 10,4914 | 43,4550 |
| 30 | 5,2434 | 27,1994 | 64 | 10,5949 | 43,7756 |
| 31 | 5,3460 | 27,5171 | 65 | 10,6986 | 44,0968 |
| 32 | 5,3739 | 27,6037 | 66 | 10,8226 | 44,4792 |
| 33 | 5,4496 | 27,8383 | 67 | 11,1884 | 45,61414595 |
| 34 | 5,7447 | 28,7544 | | | |

3.4 Fluent Sonuçları ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çizelge 3.4 : Fluent ve hidrodinamik deneyi sonuçlarının karşılaştırılması.

| Deney No | FLUENT SONUÇLARI | | DENEY SONUÇLARI | | Sapma % |
|----------|---------------------------------|--|---------------------------------|--|---------|
| | $Re_m = \frac{\rho u_m d}{\mu}$ | $\bar{P} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{\mu u_m}$ | $Re_m = \frac{\rho u_m d}{\mu}$ | $\bar{P} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{\mu u_m}$ | |
| 1 | 1,50 | 15,56 | 1,50 | 16,63 | 6,8 |
| 2 | 1,70 | 16,17 | 1,70 | 19,70 | 21,9 |
| 3 | 1,80 | 16,48 | 1,80 | 17,59 | 6,8 |
| 4 | 1,81 | 16,53 | 1,81 | 14,47 | 12,4 |
| 5 | 1,90 | 16,79 | 1,90 | 15,79 | 5,9 |
| 6 | 2,10 | 17,39 | 2,10 | 17,42 | 0,2 |
| 7 | 2,40 | 18,32 | 2,40 | 20,71 | 13,1 |
| 8 | 2,45 | 18,47 | 2,45 | 15,06 | 18,5 |
| 9 | 2,50 | 18,62 | 2,50 | 21,41 | 15 |
| 10 | 2,60 | 18,93 | 2,60 | 20,12 | 6,3 |
| 11 | 2,64 | 19,07 | 2,64 | 15,79 | 17,2 |
| 12 | 3,00 | 20,15 | 3,00 | 18,82 | 6,6 |
| 13 | 3,10 | 20,47 | 3,10 | 21,68 | 5,9 |
| 14 | 3,20 | 20,77 | 3,20 | 24,02 | 15,6 |
| 15 | 3,27 | 20,98 | 3,27 | 16,52 | 21,3 |
| 16 | 3,30 | 21,08 | 3,30 | 20,40 | 3,2 |
| 17 | 3,40 | 21,39 | 3,40 | 22,63 | 5,8 |
| 18 | 3,60 | 22,00 | 3,60 | 22,50 | 2,3 |
| 19 | 3,69 | 22,29 | 3,69 | 21,43 | 3,9 |
| 20 | 3,78 | 22,55 | 3,78 | 17,22 | 23,6 |
| 21 | 3,90 | 22,92 | 3,90 | 24,21 | 5,6 |
| 22 | 4,00 | 23,22 | 4,00 | 22,01 | 5,2 |
| 23 | 4,30 | 24,15 | 4,30 | 24,80 | 2,7 |
| 24 | 4,30 | 24,15 | 4,30 | 27,60 | 14,3 |
| 25 | 4,60 | 25,06 | 4,60 | 23,71 | 5,4 |
| 26 | 4,70 | 25,38 | 4,70 | 26,72 | 5,3 |
| 27 | 4,80 | 25,69 | 4,80 | 28,90 | 12,5 |
| 28 | 4,90 | 26,00 | 4,90 | 21,99 | 15,4 |
| 29 | 5,00 | 26,29 | 5,00 | 27,68 | 5,3 |
| 30 | 5,29 | 27,20 | 5,29 | 26,03 | 4,3 |
| 31 | 5,40 | 27,52 | 5,40 | 29,51 | 7,3 |
| 32 | 5,43 | 27,60 | 5,43 | 23,00 | 16,7 |
| 33 | 5,50 | 27,84 | 5,50 | 27,29 | 2 |

Çizelge 3.4 (Devam) : Fluent ve hidrodinamik deneyi sonuçlarının karşılaştırılması.

| Deney No | FLUENT SONUÇLARI | | DENEY SONUÇLARI | | Sapma % |
|----------|---------------------------------|--|---------------------------------|--|---------|
| | $Re_m = \frac{\rho u_m d}{\mu}$ | $\bar{P} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{\mu u_m}$ | $Re_m = \frac{\rho u_m d}{\mu}$ | $\bar{P} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{\mu u_m}$ | |
| 34 | 5,80 | 28,75 | 5,80 | 30,18 | 5 |
| 35 | 5,90 | 29,05 | 5,90 | 28,00 | 3,6 |
| 36 | 6,10 | 29,67 | 6,10 | 31,61 | 6,5 |
| 37 | 6,19 | 29,96 | 6,19 | 29,63 | 1,1 |
| 38 | 6,30 | 30,28 | 6,30 | 26,01 | 14,1 |
| 39 | 6,49 | 30,89 | 6,49 | 32,41 | 4,9 |
| 40 | 6,60 | 31,20 | 6,60 | 34,51 | 10,6 |
| 41 | 6,70 | 31,51 | 6,70 | 32,20 | 2,2 |
| 42 | 6,90 | 32,12 | 6,90 | 30,01 | 6,6 |
| 43 | 7,00 | 32,43 | 7,00 | 33,96 | 4,7 |
| 44 | 7,10 | 32,73 | 7,10 | 34,29 | 4,8 |
| 45 | 7,30 | 33,35 | 7,30 | 30,60 | 8,2 |
| 46 | 7,40 | 33,66 | 7,40 | 35,22 | 4,7 |
| 47 | 7,60 | 34,27 | 7,60 | 32,61 | 4,9 |
| 48 | 7,80 | 34,89 | 7,80 | 35,69 | 2,3 |
| 49 | 7,90 | 35,19 | 7,90 | 39,50 | 12,2 |
| 50 | 8,20 | 36,10 | 8,20 | 38,02 | 5,3 |
| 51 | 8,40 | 36,72 | 8,40 | 34,51 | 6 |
| 52 | 8,70 | 37,64 | 8,70 | 36,81 | 2,2 |
| 53 | 8,80 | 37,95 | 8,80 | 35,50 | 6,5 |
| 54 | 9,10 | 38,86 | 9,10 | 40,59 | 4,4 |
| 55 | 9,30 | 39,49 | 9,30 | 38,00 | 3,8 |
| 56 | 9,40 | 39,79 | 9,40 | 41,01 | 3,1 |
| 57 | 9,60 | 40,42 | 9,60 | 43,39 | 7,4 |
| 58 | 9,70 | 40,71 | 9,70 | 38,81 | 4,6 |
| 59 | 9,90 | 41,32 | 9,90 | 43,11 | 4,3 |
| 60 | 10,00 | 41,64 | 10,00 | 39,49 | 5,2 |
| 61 | 10,30 | 42,54 | 10,30 | 44,37 | 4,3 |
| 62 | 10,40 | 42,85 | 10,40 | 42,02 | 2 |
| 63 | 10,59 | 43,46 | 10,59 | 44,53 | 2,5 |
| 64 | 10,70 | 43,78 | 10,70 | 39,11 | 10,7 |
| 65 | 10,80 | 44,10 | 10,80 | 48,69 | 10,4 |
| 66 | 10,93 | 44,48 | 10,93 | 46,88 | 5,4 |
| 67 | 11,30 | 45,61 | 11,30 | 44,01 | 3,5 |

4. SUSTURUCULAR ÜZERİNDEKİ AKIŞIN MODELLENMESİ

Klima santralleri içerisinde düşük ses seviyelerinin yakalanabilmesi için fan hücresinin önüne veya ardına susturucular yerleştirilmektedir. Klima santrali içerisinde ses yutumunu sağlayan elemanlar susturuculardır.

Susturma işlemi cam yünüden imal edilen A2 yanmazlık sınıfındaki ses yutucu elemanla gerçekleştirilmektedir. Susturucu hücresi ses yutumu işlemi gerçekleştirirken, klima santrali içerisinde önemli ölçüde basınç düşümüne neden olmaktadır. Basınç düşümlerinin minimize edilmesi klima santrali içerisinde havanın hareketini sağlayan fan ve fan motorunun yükünü azaltacağı için üzerinde önemle durulması gereken bir konudur.

Susturucular içerisinde gözenekli bir malzeme olan cam yünü bulunmaktadır. Havanın direkt olarak cam yünü malzemesi üzerinden geçmesinin önlenmesi açısından susturucu alın yüzeyleri sac malzeme ile kaplanmaktadır. Hava eğer direkt olarak cam yünü malzemesi üzerinden geçirilirse, gözenekli ortamda yani cam yünü üzerinde çok yüksek oranda basınç kayıpları meydana gelecektir.

Susturucular arasından geçen hava cam yünü ile yani gözenekli ortam ile temasta olacaktır. Bunun için tez çalışması kapsamında önceki bölümlerde öncelikle gözenekli ortamlarda geçmişte yapılan çalışmalar irdelenmiştir, gözenekli ortamda basınç düşümünü ifade eden denklemler ayrıntılı olarak incelenmiş ve yorumlanmıştır. Daha sonra ise çözümün sayısal metotlar yardımıyla çözülebilmesi için gözenekli ortamlarda deneysel olarak yapılan çalışmalar fluent programı ile çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçların doğrulanması ile gözenekli ortamlarda fluent çözümünün deneysel verilere çok yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Böylece susturucu hücresi için yapılan çalışmanın da doğru sonuçlara ulaşacağı düşünülmüştür. Susturucu alın yüzeylerinin düz bir sac ile kaplanmış olması havanın direkt olarak gözenekli ortama geçişini engellemesi açısından önemlidir fakat yeterli değildir. Susturucu alın yüzeylerine monte edilecek bir yayıcı sac ile susturucu üzerinde oluşacak basınç kayıplarının minimize edilebileceği ve susturucu üzerindeki akışın modellenebileceği düşünülmüştür.

Susturucu alın yüzeyine monte edilecek sac yayıcı yüzeyin tasarımı oldukça önemlidir. Tez çalışması kapsamında öncelikle susturucu alın yüzeyleri düz sac ile kaplı olarak ele alınacaktır.

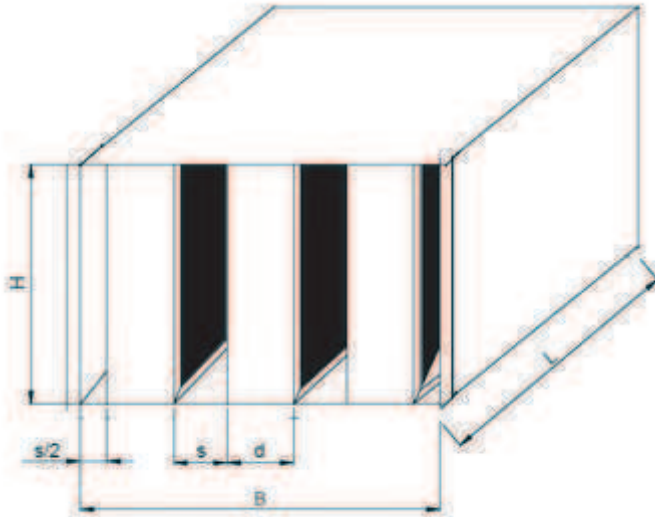
Fluent programı yardımıyla susturucu hücresi içerisindeki hız profilleri gözlemlenecek ve basınç düşümleri elde edilecektir. Daha sonra ise susturucu alın yüzeyleri için tasarlanan silindirik sac ve üçgen yüzeyli saclar susturucu alın yüzeylerine monte edilecek ve fluent programı yardımı ile hız ve basınç değerleri elde edilecektir.

Yapılan fluent analizleri sonucunda elde edilecek basınç düşümü profilleri birbirleri ile karşılaştırılacak ve minimum basınç düşümünü sağlayan sac yayıcı yüzey elde edilecektir.

4.1 Alın Yüzeyleri Düz Sac Kaplı Susturucu Hücresi

4.1.1 Hücre geometrisi ve çözüm ağlarının oluşturulması

Fluent’de analiz yapılabilmesi için öncelikle analiz edilecek susturucu hücresi geometrik yapısının oluşturulup, çözüm sıklıkları ve ağ yapısı belirlenmelidir. Bu kısım Gambit’de yapılacaktır.



Şekil 4.1 : Susturucu Hücresi Geometrisi.

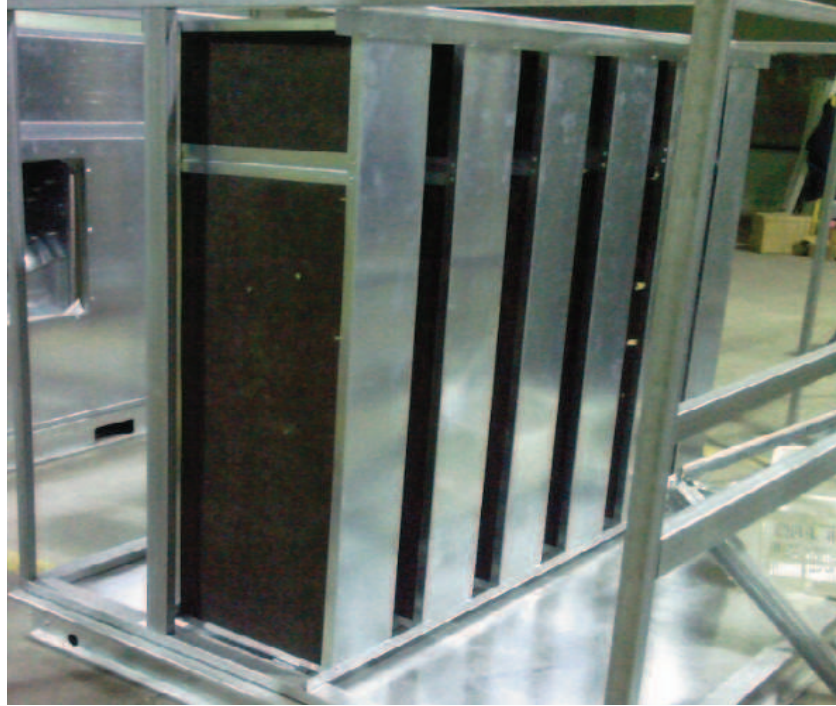
Susturucu hücresi öncelikle Gambit programında verilen ölçülere göre oluşturulmuştur. Daha sonra susturucu hücresi içerisinde susturucuların dışında kalan

kısım ile susturucuların bulunduğu kısım ayırıştırma işlemi ile birbirinden ayrı ortamlar olarak tanımlanmıştır.

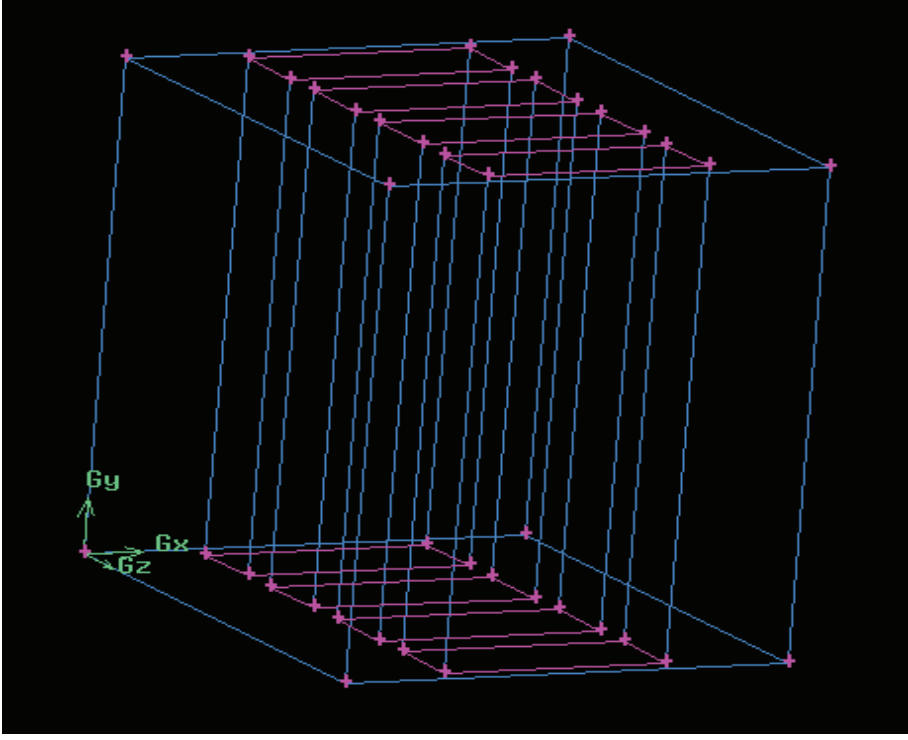
Çizelge 4.1 : Susturucu Hücresi Yapısı.

| Susturucu Hücresi | Açıklama |
|---------------------------------|----------|
| Hücre genişliği (B) | 1224 mm |
| Hücre yüksekliği(H) | 1224 mm |
| Hücre uzunluğu (L) | 1000 mm |
| Susturucu kulis genişliği (d) | 200 mm |
| Susturucu uzunluğu | 500 mm |
| Susturucu sayısı | 4 adet |
| Susturucular arası mesafe (s) | 106 mm |
| Susturucu ve panel arası mesafe | 53 mm |
| İzolasyon malzemesi | Cam yünü |

Susturucular içerisinden geçen hava gözenekli ortam şartlarına geçmektedir. Susturucu içerisinden geçen hava için gözenekli ortamın tanımlanması Fluent kısmında yapılacaktır.

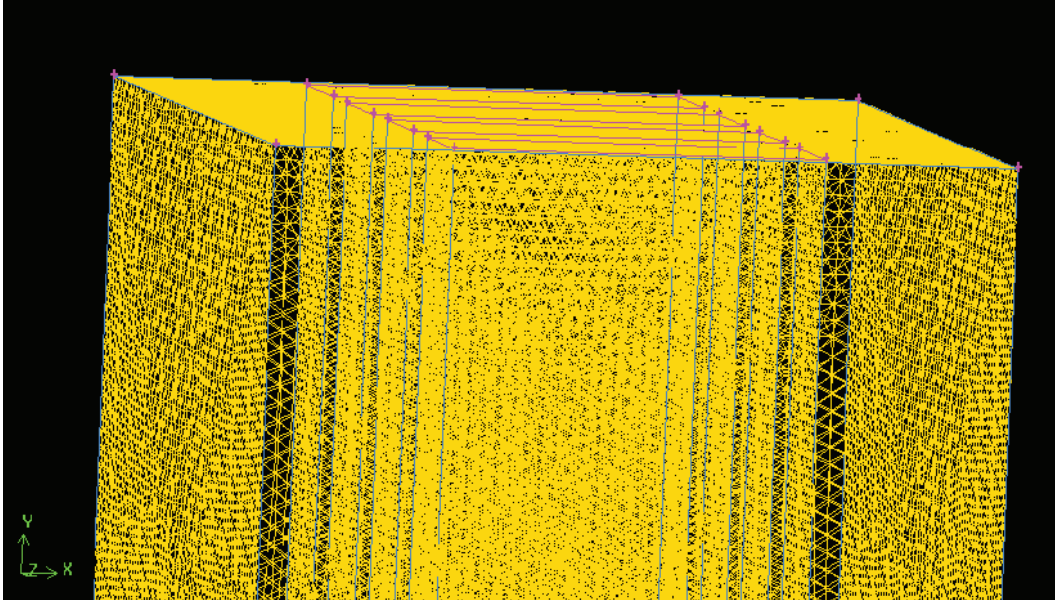


Şekil 4.2 : Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucu.



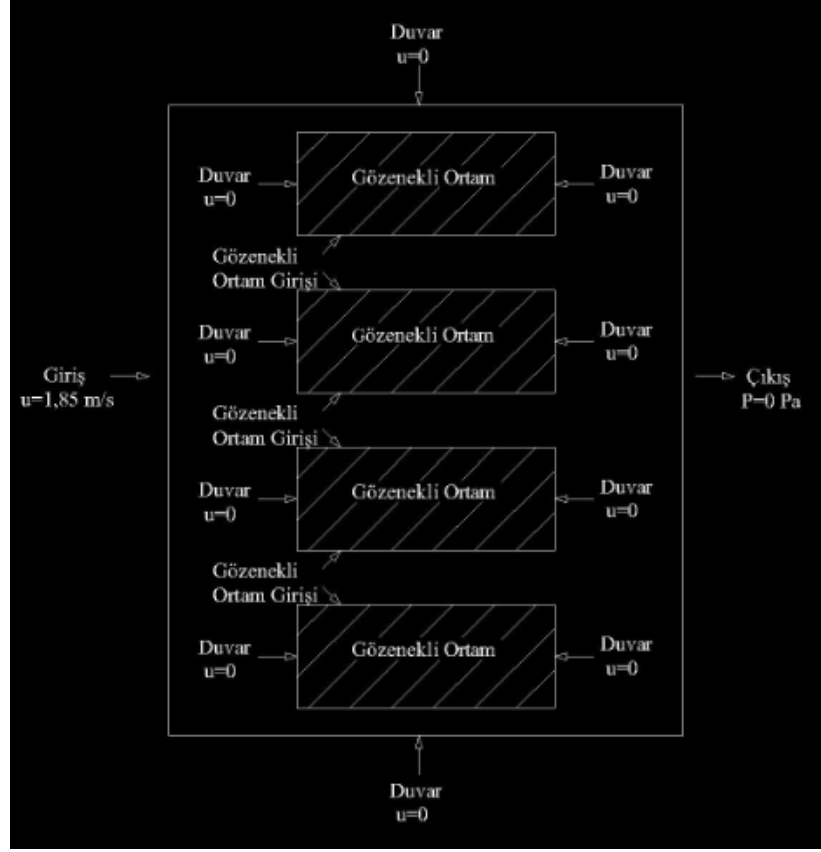
Şekil 4.3 : Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucu için oluşturulan geometri.

Bir sonraki aşamada ise hacmin tamamında çözüm ağlarının oluşturulması işlemine geçilmiştir. Susturucular için 25 mm sıklıkta, susturucu dışındaki hava akış yüzeyleri ise 22 mm sıklıkta hacimsel çözüm ağları oluşturulmuştur.



Şekil 4.4 : Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucu için çözüm ağları.

Susturucu hücresi hacminin tamamı için çözüm ağları oluşturulduktan sonra çözüm yapılabilmesi için gerekli sınır şartlarının girilmesi işlemine geçilmiştir.



Şekil 4.5 : Alın yüzeyi düz sac kaplı susturucu sınır şartları.

Sınır şartları girilirken susturucu hücresinin giriş kısmına 'hız giriş' sınır şartı girilmiştir. Böylece Fluent 'de çözüm yapılırken susturucu hücresi giriş hız değerinin sınır şartı olarak girilmesi sağlanmıştır.

Susturucuların alın yüzeyleri ise sac ile kaplı olduğu için susturucu alın yüzeylerine 'duvar' sınır şartı girilmiştir.

Susturucuların cam yünü ile kaplı ve açık yan yüzeylerine ise hava girişi olduğunu tanımlamak için 'gözenekli ortam giriş' sınır şartı girilmiştir.

Susturucular içerisindeki cam yününden oluşan gözenekli hacmin, gözenekli ortamı ifade eden gözeneklilik, viskoz ve atalet geçirgenlik katsayılarının girilmesi işlemi Fluent'de yapılmaktadır.

Susturucu hücresi içerisindeki basınç düşümünün görülebilmesi için ise susturucu hücresi çıkış kısmına 'basınç çıkış' sınır şartı girilmiştir.

Gambit programında sınır şartı girilmeyen hücrenin panel kısımları ise otomatik olarak duvar olarak tanımlanmaktadır.

Sınır şartlarının da tanımlanmasından sonra dosya Gambit programında mesh dosyası olarak kaydedilmiştir ve Fluent programında analiz kısmına geçilmiştir.

4.1.2 Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucular için Fluent analizleri

Öncelikle Gambit programında belirlenmiş olan hız giriş sınır şartı için 1,85 m/s değeri girilir. Daha sonra hücre içerisindeki statik basınç kaybının görülebilmesi için Gambit programında hücre çıkış kısmı için tanımlanan basınç çıkış sınır şartı için 0 Pa değeri girilir.

Susturucular içerisinde bulunan cam yünü ile oluşan gözenekli ortamın fluent programına tanımlanması için 4 susturucuda gözenekli ortam olarak tanımlanır. Susturucular içerisindeki gözenekli ortamın özelliklerinin fluent programına tanımlanabilmesi için ise cam yünü malzemesinin gözeneklilik değeri, viskoz ve atalet etkileri katsayı değerlerinin girilmesi gerekmektedir.

Yapılan literatür araştırması sonucunda cam yünü malzemesi için yoğunluğa göre değişen gözeneklilik değerleri elde edilmiştir.

Yoğunluğa bağlı gözeneklilik değerleri Çizelge 4.2' de gösterilmektedir.

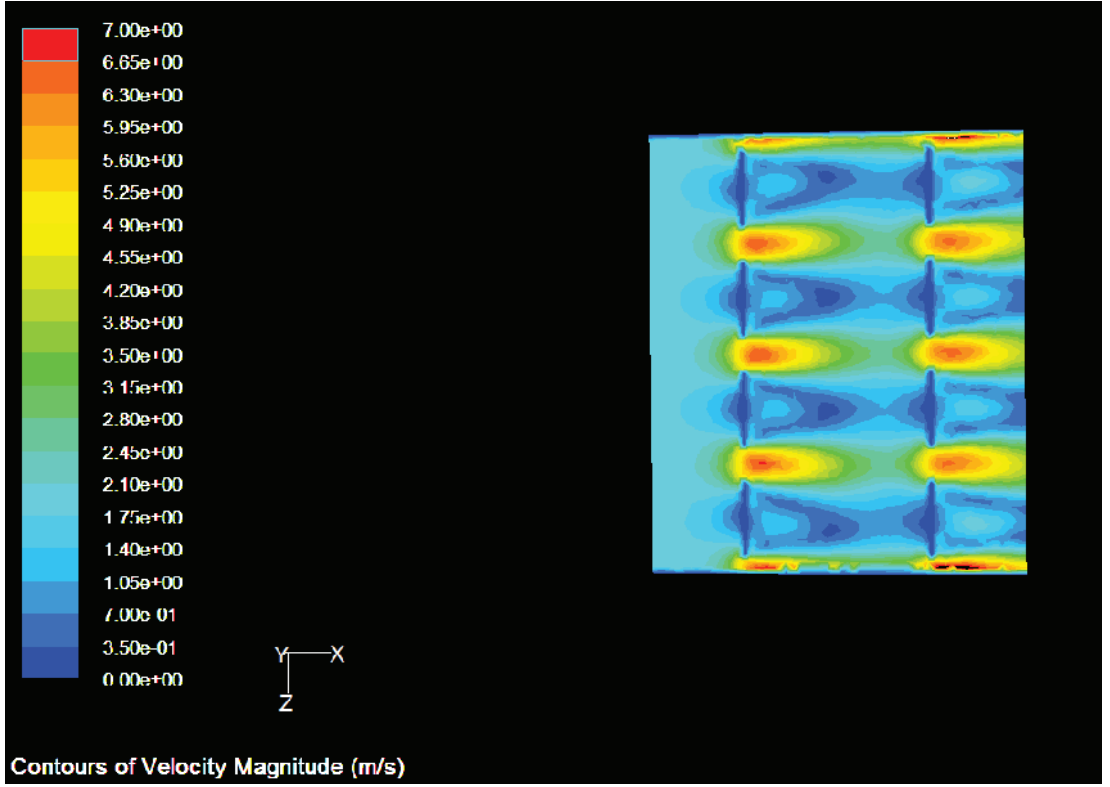
Çizelge 4.2 : Cam yünü için yoğunluğa bağlı gözeneklilik değerleri[16].

| Yoğunluk (kg/m ³) | Gözeneklilik (%) |
|-------------------------------|------------------|
| 16 | 98,18 |
| 20 | 97,86 |
| 24 | 97,90 |
| 32 | 97,00 |
| 48 | 95,78 |
| 100 | 93,63 |
| 112 | 92,70 |

Susturucular içerisinde 32 kg/m³ yoğunluklu cam yünü malzemesi kullanıldığı için gözeneklilik değeri olarak 0,97 değeri girilir.

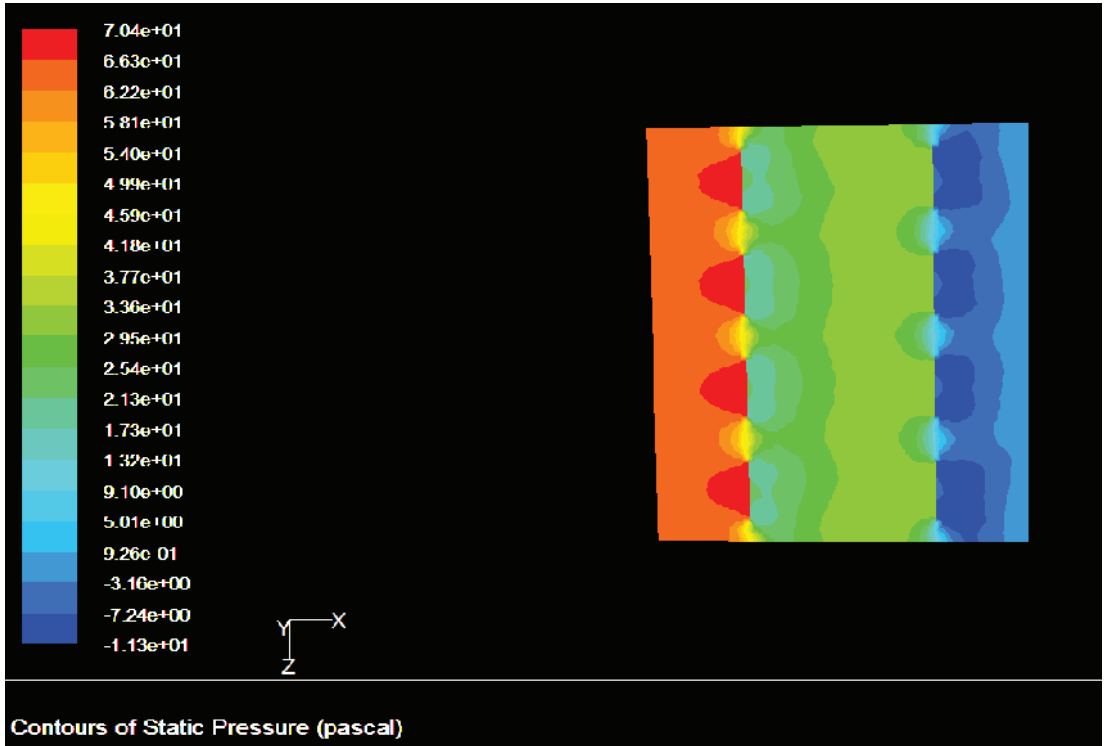
Gerekli tüm tanımlamaların yapılmasından sonra sonuçlar yakınsayana kadar program koşturulur. Böylece programdan istenilen tüm düzlemlerde hız ve basınç analizlerinin elde edilebileceği konuma geçilmiş olur.

4.1.2.1 Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucu için hız analizi



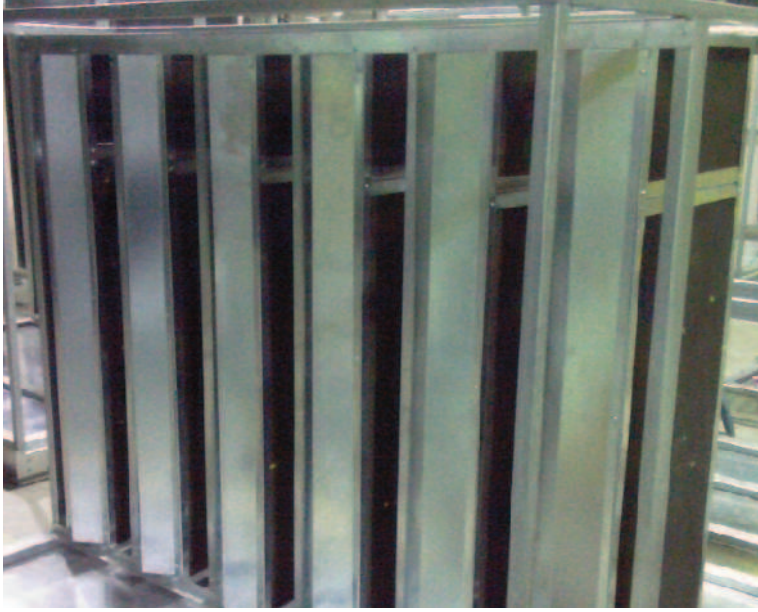
Şekil 4.6 : Alın yüzeyi düz sac kaplı susturucu için hız analizi.

4.1.2.2 Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucular için basınç analizi



Şekil 4.7 : Alın yüzeyi düz sac kaplı susturucu için basınç analizi.

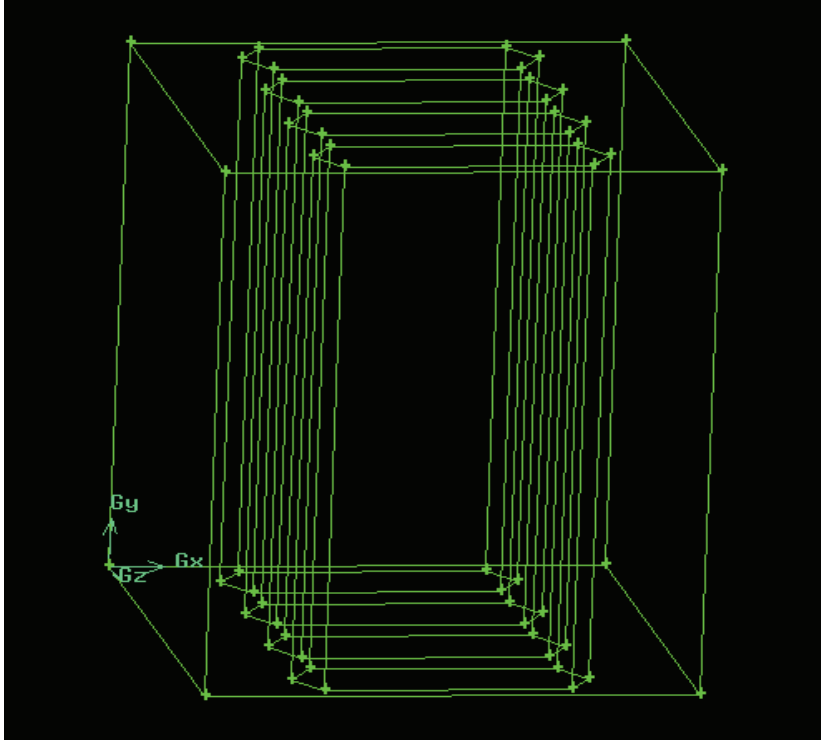
4.2 Alın Yüzeyleri Üçgen Sac Kaplı Susturucu Hücresi



Şekil 4.8 : Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu.

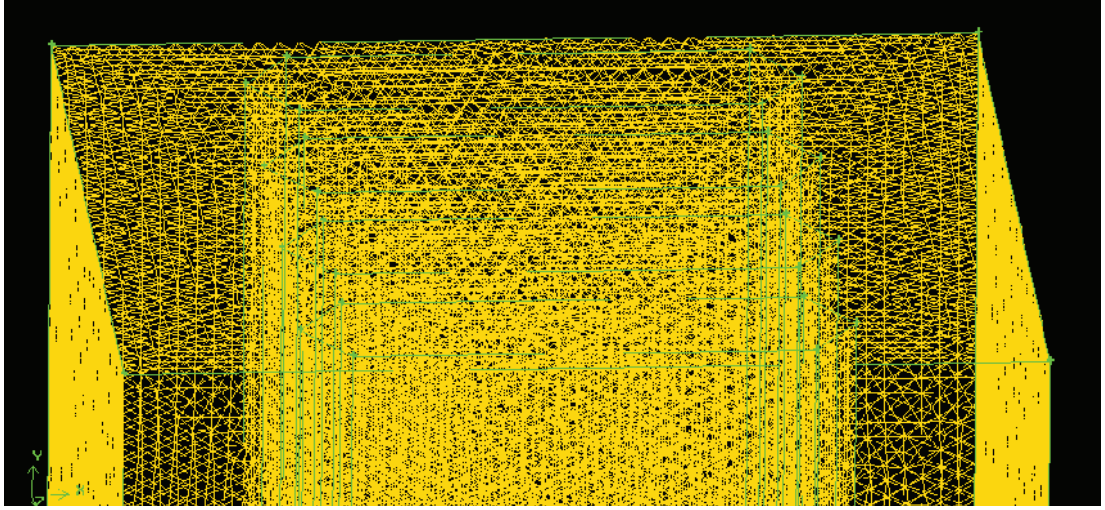
4.2.1 Hücree geometrisi ve çözüm ağlarının oluşturulması

Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucu hücresinde olduğu gibi öncelikle hücrenin Gambit programında geometrisi oluşturulmuştur.



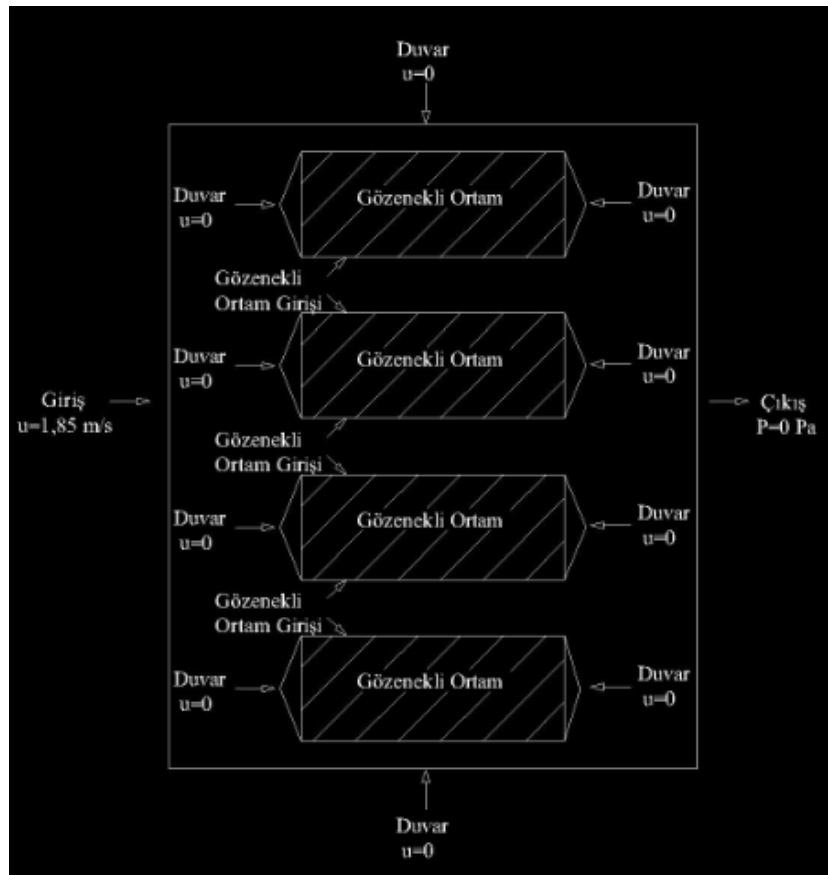
Şekil 4.9 : Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu için oluşturulan geometri.

Bir sonraki aşamada ise hacmin tamamında çözüm ağlarının oluşturulması işlemine geçilmiştir. Susturucular için 25 mm sıklıkta, susturucu dışındaki hava akış yüzeyleri ise 22 mm sıklıkta hacimsel çözüm ağları oluşturulmuştur.



Şekil 4.10 : Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu için çözüm ağları.

Susturucu hücresi hacminin tamamı için çözüm ağları oluşturulduktan sonra çözüm yapılabilmesi için gerekli sınır şartlarının girilmesi işlemine geçilmiştir.



Şekil 4.11 : Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu sınır şartları.

Sınır şartları Gambit programında alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucu hücreesine benzer şekilde girilmiştir.

Sınır şartlarının da tanımlanmasından sonra dosya Gambit programında mesh dosyası olarak kaydedilmiştir.

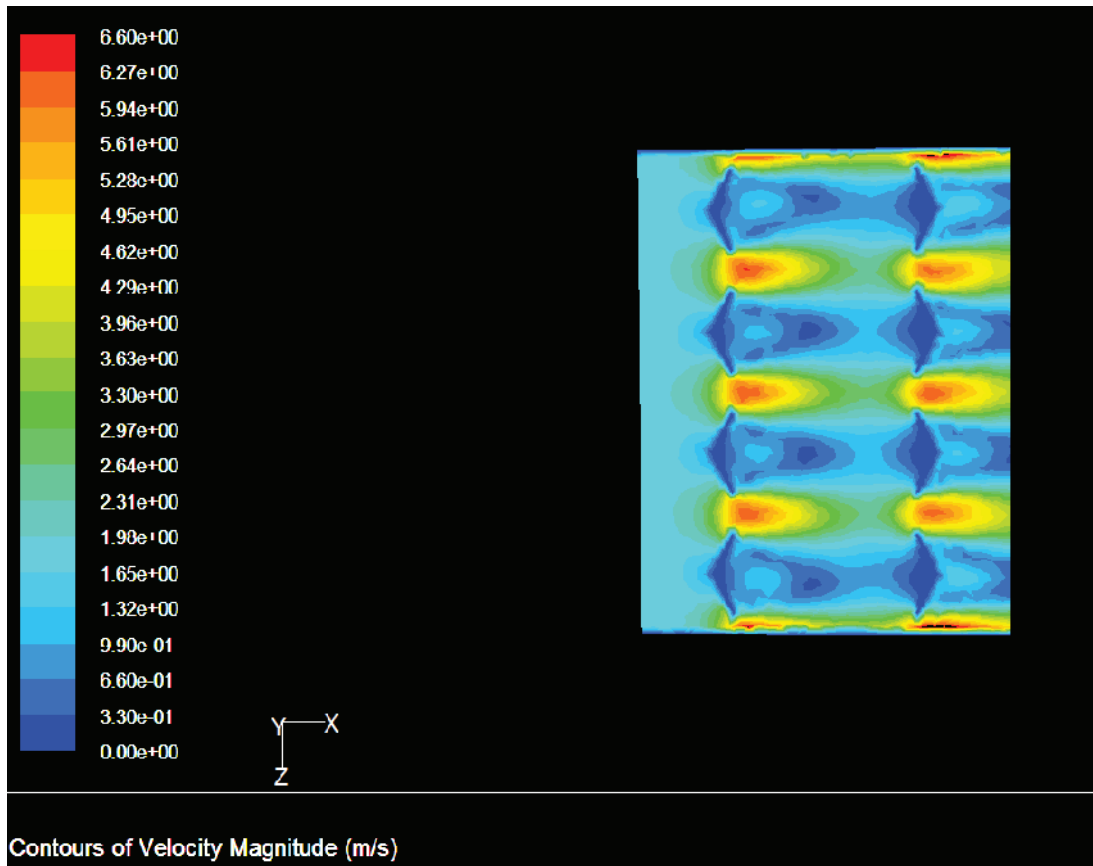
Dosyanın kaydedilmesinden sonra Fluent programında analiz kısmına geçilmiştir.

4.2.2 Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu hücresi için Fluent analizleri

Fluent analizi için sınır şartı olarak 1,85 m/s hız giriş değeri, 0 Pa basınç çıkışı değerleri girilmiştir.

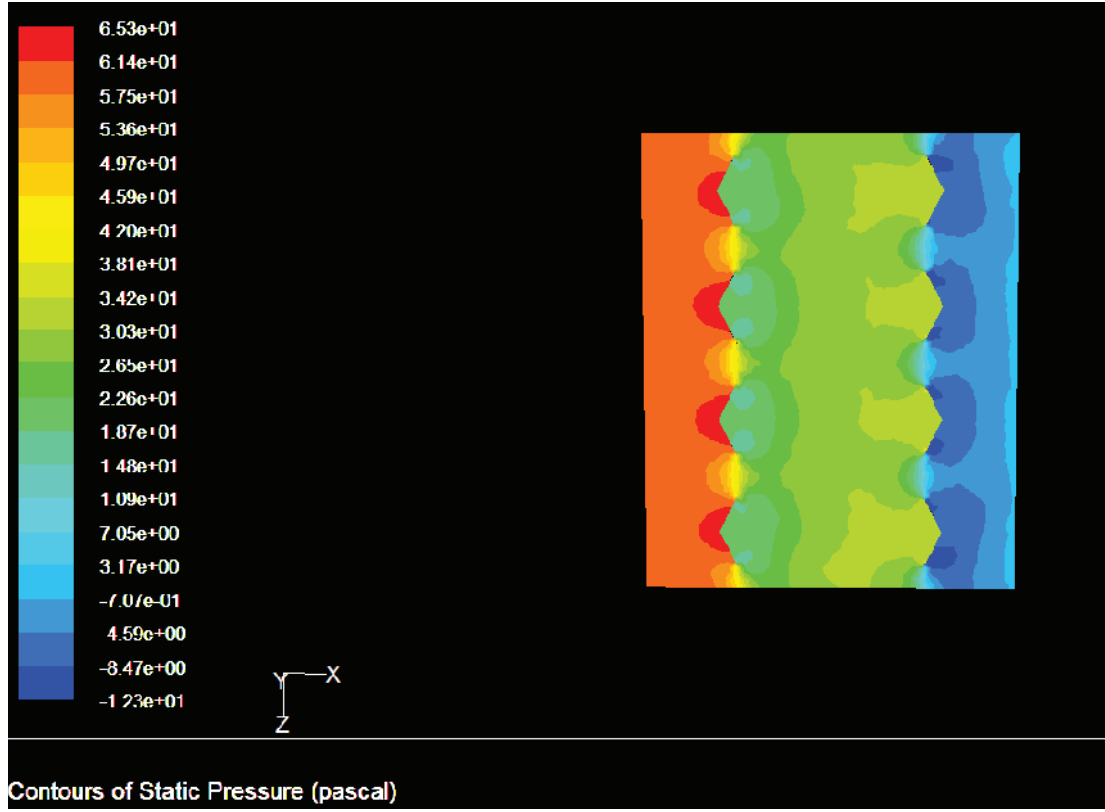
Susturucu içerisindeki cam yününden oluşan gözenekli ortam tanımlanmış ve gözeneklilik değeri 0,97 olarak girilmiştir.

4.2.2.1 Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucular için hız analizi



Şekil 4.12 : Alın yüzeyi üçgen sac kaplı susturucu için hız analizi.

4.2.2.2 Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucular için basınç analizi



Şekil 4.13 : Alın yüzeyi üçgen sac kaplı susturucu için basınç analizi.

4.3 Alın Yüzeyleri Silindirik Sac Kaplı Susturucu Hücresi

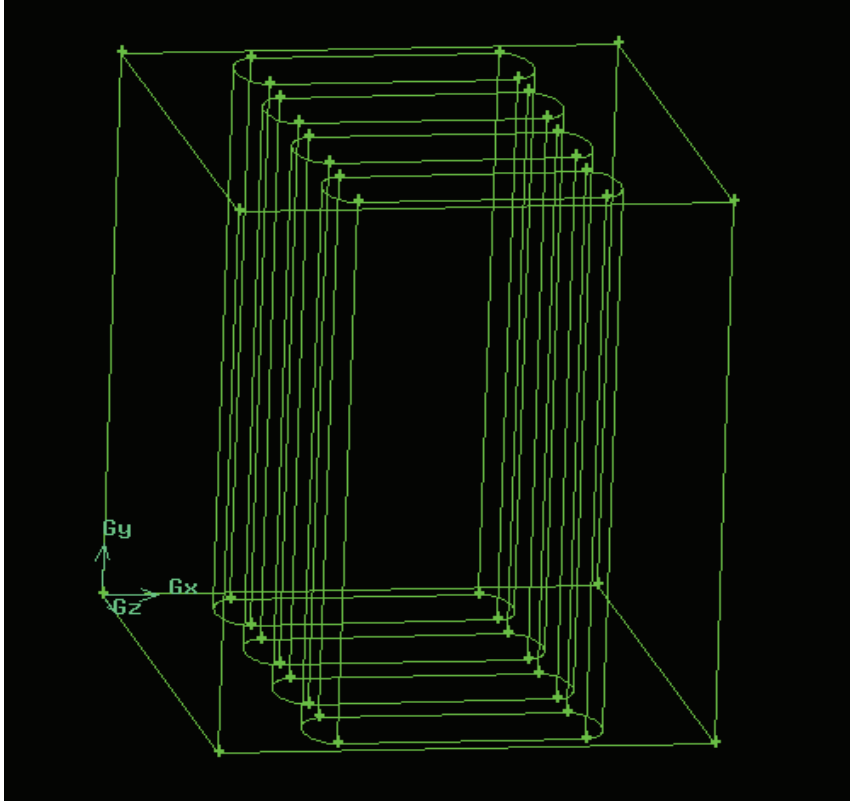
4.3.1 Hücre geometrisi ve çözüm ağlarının oluşturulması

Susturucu hücresi alın yüzeyi düz ve üçgen sac kaplı susturucu hücreleri ile aynı uzunluktadır. Buna ilaveten 4 susturucunun da giriş ve çıkış alın yüzeyleri silindirik saclar ile kaplıdır.

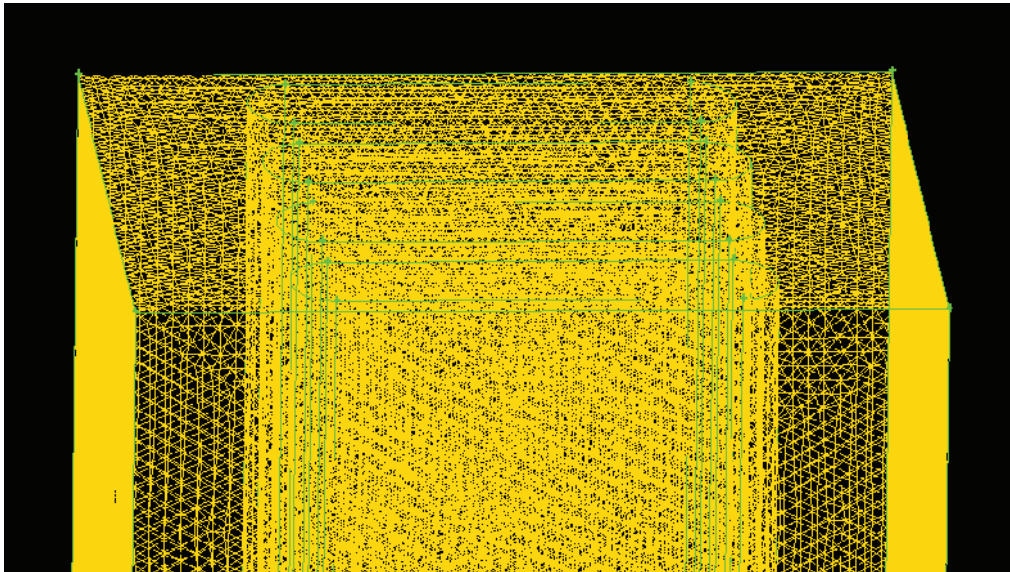
Fluent analizi sonucunda silindirik yüzeyli sacların hücre içerisinde hız ve basınç değerlerine etkisi gözlemlenecektir.

Alın yüzeyi düz ve üçgen sac kaplı susturucu hücrelerin de olduğu gibi öncelikle hücrenin Gambit programında geometrisi oluşturulmuştur.

Bir sonraki aşamada ise hacmin tamamında çözüm ağlarının oluşturulması işlemine geçilmiştir. Susturucular için 25 mm sıklıkta, susturucu dışındaki hava akış yüzeyleri ise 22 mm sıklıkta hacimsel çözüm ağları oluşturulmuştur.

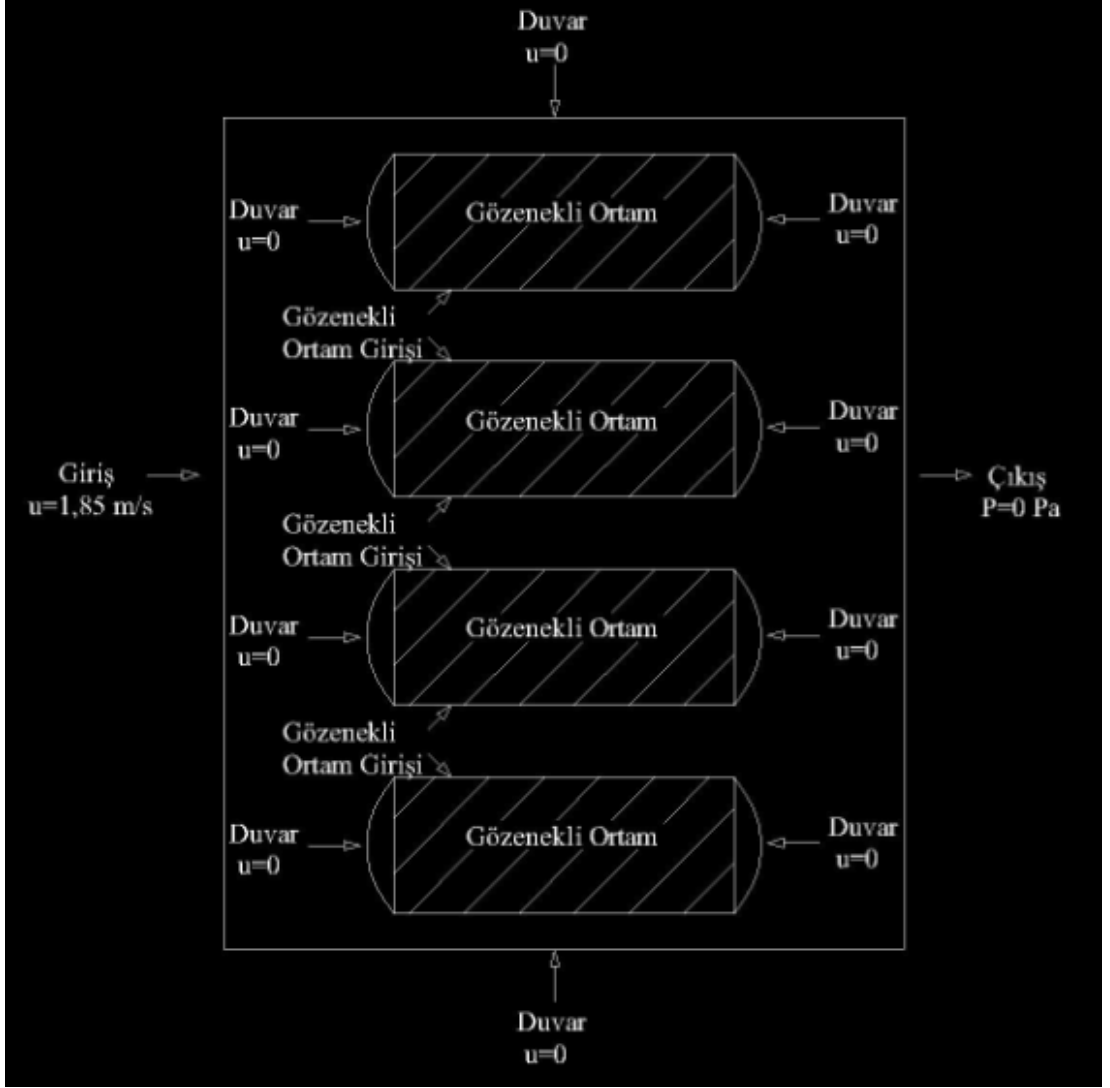


Şekil 4.14 : Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucu oluşturulan geometri.



Şekil 4.15 : Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucu çözüm ağıları.

Susturucu hücresi hacminin tamamı için çözüm ağıları oluşturulduktan sonra çözüm yapılabilmesi için gerekli sınır şartlarının girilmesi işlemine geçilmiştir.



Şekil 4.16 : Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucu sınır şartları.

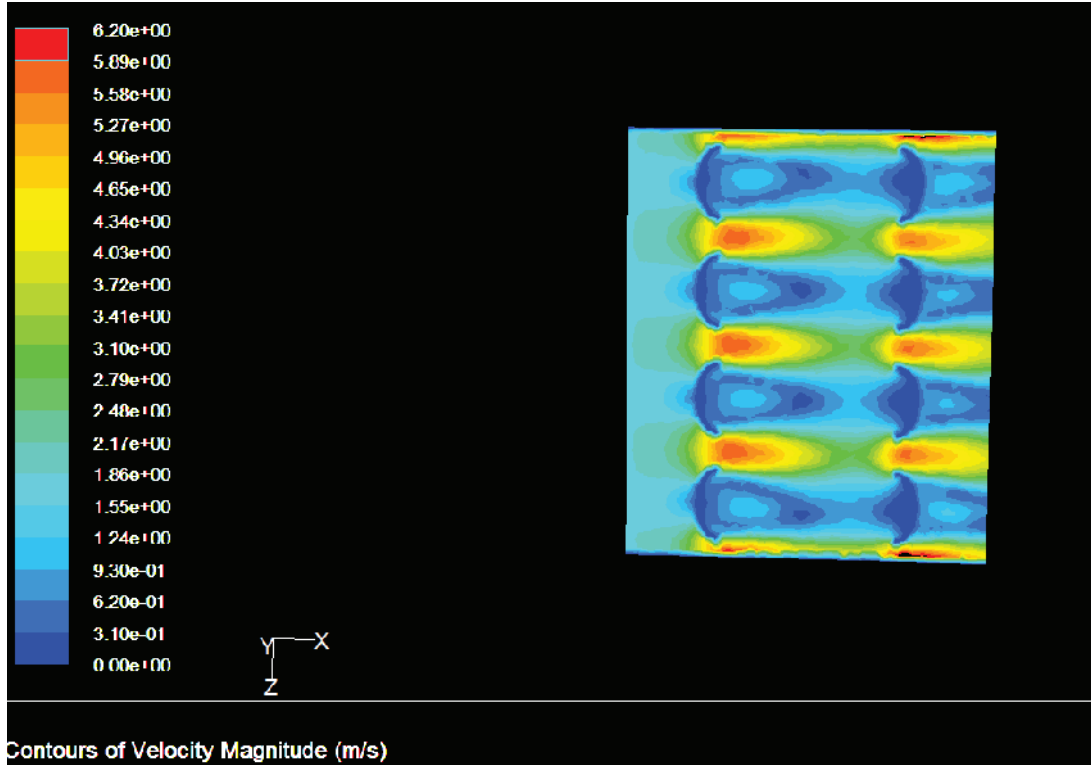
Sınır şartları Gambit programında alın yüzeyleri düz ve üçgen sac kaplı susturucu hücrelerine benzer şekilde girilmiştir.

Sınır şartlarının da tanımlanmasından sonra dosya Gambit programında mesh dosyası olarak kaydedilmiştir ve Fluent programında analiz kısmına geçilmiştir.

4.3.2 Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucular için Fluent analizleri

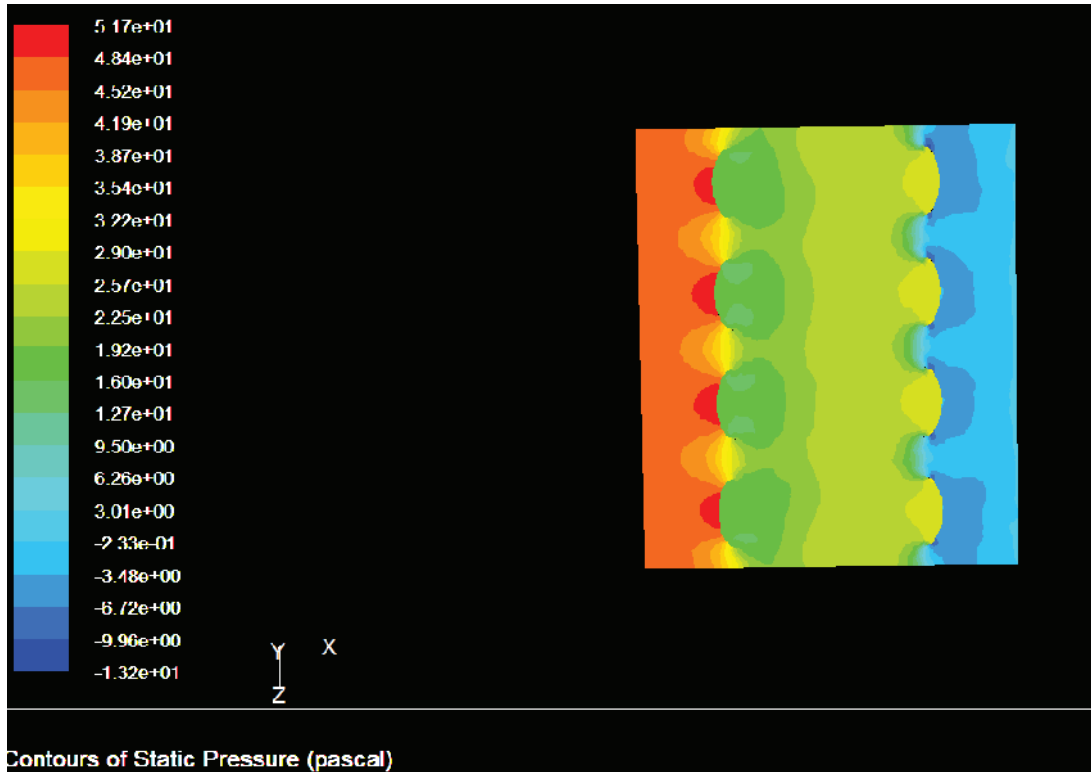
Fluent analizi için alın yüzeyleri düz ve üçgen sac kaplı susturucu hücreleri için de tanımlanmış olan $1,85 \text{ m/s}$ hız giriş değeri, 0 Pa basınç çıkışı değerleri girilmiştir. Susturucu içerisindeki cam yününden oluşan gözenekli ortam tanımlanmış ve gözeneklilik değeri $0,97$ olarak girilmiştir.

4.3.2.1 Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucular için hız analizi



Şekil 4.17 : Alın yüzeyi silindirik sac kaplı susturucu için hız analizi.

4.3.2.2 Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucular için basınç analizi



Şekil 4.18 : Alın yüzeyi silindirik sac kaplı susturucu için basınç analizi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Klima santralleri içerisinde ses yutumunu sağlayan eleman olan susturucular ses yutucu eleman olarak kullanılırken hava akışına dik olan alın yüzeylerinin uygunsuz tasarımı sonucu gereksiz basınç kayıplarına ve hava akışından kaynaklı ses oluşumuna neden olmaktadır.

Tez çalışması içerisinde tasarlanan susturucular 200 mm kulis kalınlığındadır ve susturucu hücresi içerisinde susturucular arasında 106 mm mesafe, susturucular ile hücre paneli arasında ise 53 mm mesafe olacak şekilde tasarlanmıştır. Susturucular içerisinde ses yutumunu sağlayan eleman olarak gözenekli bir malzeme olan cam yünü kullanılmaktadır ve susturucular arasından geçen hava gözenekli ortam ile temasta olmaktadır.

Bölüm 3 ' de tel örgü tabakaların üst üste konulmasıyla elde edilmiş gözenekli ortam için deneysel olarak elde edilen veriler kullanılmıştır.

Ortamın gözeneklilik değeri deneysel olarak 0,7812, hidrodinamik deneyler sonucunda boyutsuz basınç düşümü ile ortalama hız ve tel çapına göre ifade edilen Reynolds sayısı arasında;

$$\bar{P} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{\mu u_m} = 3,0972 \text{ Re}_m + 10,846$$

İlişkisi olmaktadır[4].

Fluent gözenekli ortam çözümü için,

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v_i| v_i \right)$$

denklemini kullanmaktadır ve deneysel sonuçları ifade eden denklem yardımıyla Fluent' e girilmesi gereken katsılar sırasıyla $1/\alpha$ değeri $4,338395 \times 10^7$ ve C_2 değeri 12388,5 olarak elde edilmiştir.

Hidrodinamik deneyleri sonucunda elde edilmiş basınç düşümü değerleri ile Fluent analizleri sonucunda elde edilen basınç düşümü değerleri Çizelge 3.4 ' de görüldüğü

gibi oldukça yakın çıkmıştır. Boyutsuz basınç düşümleri arasındaki fark ortalama % 5 mertebesindedir. Bu durumda Fluent analiz sonuçlarının oluşturulan gözenekli ortam üzerinde meydana gelen basınç düşümlerini gerçek değerlere çok yakın olarak hesapladığını göstermektedir. Böylece, susturucular için yapılacak Fluent analizleri için bir referans oluşturulmuştur.

Tez çalışmasında susturucu alın yüzeyleri üç farklı şekilde tasarlanmıştır ve fluent programı ile akış analizi yapılarak hücre içerisinde meydana gelen basınç düşümleri elde edilmiştir.

Öncelikle susturucu alın yüzeyleri Bölüm 4.1' de düz sac kaplı olarak ele alınmıştır. Susturucu hücresi Gambit programında geometrik olarak modellenip, çözüm ağırları oluşturulduktan sonra Fluent analizlerine geçilmiştir.

Cam yününden oluşan gözenekli ortam için yani susturucular için 0,97 olan gözeneklilik değeri Fluent ' e girilmiştir. Sınır şartlarının da tanımlanmasından sonra program sonuçlar yakınsayana kadar çalıştırılmıştır. Fluent analizi sonucunda susturucu hücresi içerisinde meydana gelen toplam basınç düşümü 70,4 Pa olarak elde edilmiştir.

İkinci tasarımda susturucu alın yüzeyleri üçgen sac kaplı olarak tasarlanmıştır. Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu için de Gambit' de alın yüzeyi düz sac kaplı susturucu da olduğu gibi geometrik modelleme yapıp, çözüm ağırları oluşturulduktan sonra Fluent analizlerine geçilmiştir.

Fluent analizleri neticesinde susturucu alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu hücresinde meydana gelen basınç düşümü 66 Pa olarak elde edilmiştir.

Üçüncü tasarımda susturucu alın yüzeyleri silindirik sac kaplı olarak tasarlanmıştır. Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucu için de Gambit' de alın yüzeyi düz ve üçgen sac kaplı susturucular da olduğu gibi geometrik modelleme yapıp, çözüm ağırları oluşturulduktan sonra Fluent analizlerine geçilmiştir.

Fluent analizleri neticesinde susturucu alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucu hücresinde meydana gelen basınç düşümü 51,7 Pa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.1' de görüldüğü gibi susturucu hücresi alın yüzeylerinin üçgen sac ile kaplanması sonucu hücre içerisinde meydana gelen basınç kaybı alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucuya göre % 6,3 azalmaktadır. Susturucu alın yüzeylerinin silindirik

sac kaplanması sonucu ise hücre üzerinde meydana gelen toplam basınç düşümündeki azalım alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucuya göre % 26,6 oranında olmaktadır.

Çizelge 5.1 : Susturucu hücrelerinde meydana gelen basınç düşümü sonuçları.

| Susturucu | Susturucu hücresinde oluşan toplam basınç düşümü (Pa) | Susturucu hücresinde meydana gelen basınç düşümündeki azalım(%) |
|---|---|---|
| Alın yüzeyleri düz sac kaplı susturucu | 70,4 | 0 |
| Alın yüzeyleri üçgen sac kaplı susturucu | 66 | 6,3 |
| Alın yüzeyleri silindirik sac kaplı susturucu | 51,7 | 26,6 |

KAYNAKLAR

- [1] **Nield, D.A., Bejan, A.**, 1992 *Convection in Porous Media*, New York
- [2] **Özdemir, M. ve Özgüç, A.F.**, 1993 Gözenekli Ortamın Geçirgenlik, Isıl İletkenlik ve Isıl Dispersiyon Katsayılarının Dikdörtgen Mikrokanallarda Analitik olarak İncelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği 9.Ulusal kongresi*, Cilt I, 125-135, Elazığ
- [3] **K. Vafai, C.L. Tien**, 1980 Boundary and Inertia Effects on Flow and Heat Transfer in Porous Media. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 24. 195-203
- [4] **Özdemir, M.**, 1996 Tel Örgü Katmanlardan Oluşan Gözenekli Ortamda Zorlanmış Isı Geçişi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [5] **Zhang, B., Zhao, Y.**, 1999 A numerical method for simulation of forced convection in a composite porous fluid system, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 432-441
- [6] **Zhang, B., Zhao, Y.**, 2001 Simulations of flow through porous layers by a characteristic-based method on unstructured grids, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2443-2457
- [7] **Chikh, S., Boumedien, A., Bouhadek, K., Lauriat, G.**, 1998 Analysis of fluid flow and heat transfer in a channel with intermittent heated porous blocks, *Heat and Mass Transfer*, 405-413
- [8] **Nield, D.A., Kuznetsov, A.V., Xiong M.**, 2002 Effect of local thermal non equilibrium on thermally developing forced convection in a porous medium, *International Journal Of Heat and Fluid Flow*, 4949-4955
- [9] **Hooman, K., Ranjbar, A.**, 2003 Forced Convection in a fluid saturated porous medium tube with isoflux wall, *International Comm. Heat and Mass Transfer*, 1015-1026
- [10] **Bear, J.C., Bachmat, Y.**, 1991 *Introduction to modeling of transport phenomena in porous media*, Kluwer Academic Publishers
- [11] **Scheidtger, A.E.**, 1963 *The physics of flow through porous media*, University of Toronto Press
- [12] **Ingham, D.B., Pop, I.**, 2005 *Transport Phenomena in Porous Media*, Oxford
- [13] **Altaç, Z.**, 2005 Gambit ve Fluent ile örneklerle modelleme, *Ders ve laboratuvar notları*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir

[14] **Url-1** <http://ent.ohiou.edu/juwt/HTMLS/fluent/gabit2/html/users_guide/0301> alındığı tarih,10.12.2009, **Gambit User Guide**, 2005

[15] **Fluent User Guide**, 2001 Porous Media Conditions

[16] **Url-2** < <http://ntur.lib.ntu.edu.tw/bitstream>>, alındığı tarih 02.02.2010, **A study on the acoustic absorption characteristics of the porous material**

EKLER

EK A.1 : Tel örgü tabaka gözeneklilik hesabı

EK B.1 : Hidrodinamik deneyler

EK A.1

Gözenekliliğin hesaplanması için ortamdaki boşluk veya tel (katı faz) hacimlerinin ölçülmesi gerekmektedir. Tel örgü tabakaların birim hacim başına düşen tel hacimlerini ölçebilmek için 78x45 mm²' lik tabaka örnekleri hazırlanıp ölçekli kap içerisinde taşırdıkları su miktarları gözlenmiştir[4].

Gözenekli ortamın tabaka tabaka yüksekliğini ölçmek için iki rijit levha kullanılmaktadır. Levhalar arasına örgü elek tabakaları birer artırılarak konulup aynı yük altında sıkıştırıldıktan sonra kumpas yardımıyla yükseklikleri ölçülmektedir. Böylece tabaka sayısına göre kapladıkları toplam hacim tabaka boyutları bilindiğinden kolayca hesaplanabilir.

Çizelge A.1 ' de paslanmaz tel örgü tabakanın ölçülen katı hacmi görülmektedir.

Çizelge A.1 : Paslanmaz tel örgü çelik hacmi (tel çapı 0,5 mm) [4]

| Ortam | Örgü No | Tabaka Boyutu (mm ²) ± %1,3 | 3 Tabakanın Katı Hacmi (ml) ± 0,05 | Birim Alan Başına Katı Hacim (mm ³ /cm ²) ± 0,53 |
|----------------------|---------|---|------------------------------------|---|
| Tel örgü elek tabaka | 12 | 78x45 | 1,95 | 18,518 |

Yüksekliğin tabaka tabaka ölçülen değerleri Çizelge A.2 ' de verilmiştir. Bu yükseklikler belirli sayıdaki tabakanın toplam kalınlığını gösterdiğinden blok içindeki herhangi bir tabakanın başlangıç noktasını değil bir önceki tabakanın bitiş noktasını verir. Çünkü tabakalar üst üste geldiğinden iç içe gelmeler oluşmaktadır. Çizelge A.2' de görülen y noktalarına göre toplam gözeneklilik hesap edilirken bu durum göz önüne alınmaktadır.

Tabakaların birbiri içerisine geçme miktarları göz önüne alınarak herhangi bir y yüksekliğinde yarım kalan tabakanın tel hacminin tabakanın toplam tel hacmiyle doğru orantılı olduğu kabulü altında hesaplanan gözeneklilik değişimleri Tablo A.2 'de bazı y noktaları için yapılmıştır. Burada hesaplanan ε değerleri, ortamın y=0, y=y değerleri arasındaki gözenekliliğini göstermektedir[4].

Çizelge A.2 : Tabakalara göre gözenekliliğin hesabı[4]

| Tabaka Sayısı N | Y _i =y/H (H=17,08 mm) | ε |
|-----------------|-------------------------------------|--------|
| 1 | 0,0831 | 0,8487 |
| 2 | 0,1323 | 0,8148 |
| 3 | 0,1756 | 0,8111 |
| 4 | 0,2307 | 0,7970 |
| 5 | 0,2705 | 0,7948 |
| 6 | 0,3220 | 0,8027 |
| 7 | 0,3888 | 0,7900 |
| 8 | 0,4520 | 0,7928 |
| 9 | 0,4731 | 0,7873 |
| 10 | 0,5152 | 0,7892 |
| 11 | 0,5726 | 0,7868 |
| 12 | 0,6159 | 0,7881 |
| 13 | 0,6721 | 0,7884 |
| 14 | 0,7237 | 0,7885 |
| 15 | 0,7752 | 0,7891 |
| 16 | 0,8290 | 0,7853 |
| 17 | 0,8630 | 0,7819 |
| 18 | 0,9005 | 0,7809 |
| 19 | 0,9473 | 0,7814 |
| 20 | 1,0000 | 0,7832 |

$$\varepsilon = 1 - \frac{N/H + Y_i - (Y_{i+1} - 1/H)}{Y_i} \rho_A$$

Ortamın teorik yüksekliği ile ölçülen yüksekliği arasındaki farkın tabakalar arasında eşit olarak paylaşıldığı yaklaşımı yapılmaktadır. Böylece tabakaların birbirine geçme miktarları bilindiğinden tabaka sayısına göre ölçülen yüksekliklerdeki toplam el hacimleri yaklaşık olarak,

$$\left(N + \frac{\delta_{geç}}{h_{tel}}\right)V_{tel}$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada N tabaka sayısı, h_{tel} bir tabakanın kalınlığı ve $\delta_{geç}$ ise,

$$\delta_{geç} = (20 - H)/19$$

Bağıntısıyla hesaplanan geçme miktarıdır.

$V_{tel} = LxWx\rho_A$ ve $V = LxWxy$ olduğuna göre y noktasındaki toplam gözeneklilik,

$$\varepsilon = 1 - \frac{(N + \delta_{geç} / h_{tel})\rho_A}{y}$$

olarak hesaplanabilir[4].

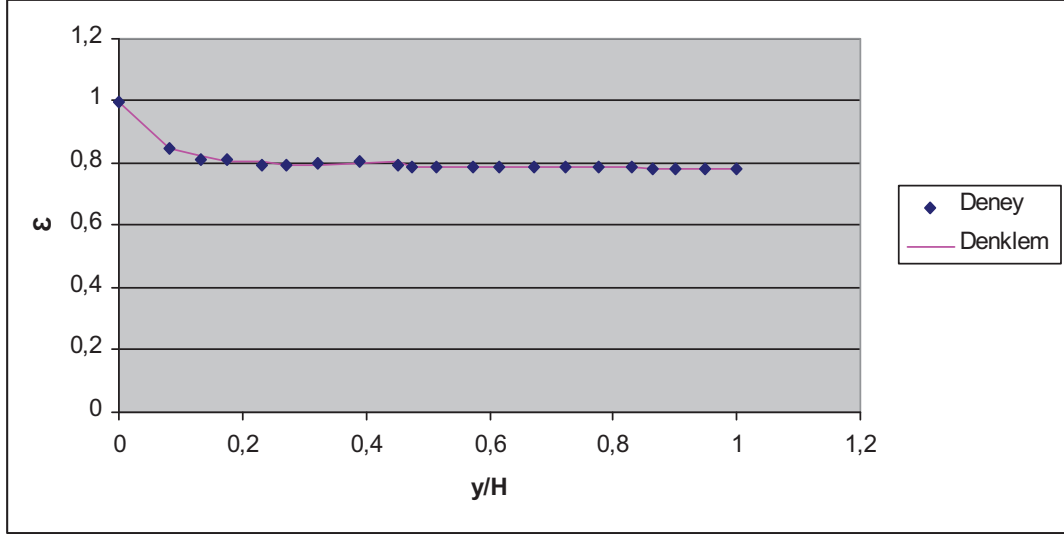
Çizelge A.3 : Formül yardımıyla tabakalara göre gözenekliliğin hesabı[4].

| Tabaka Sayısı N | Yi=y/H (H=17,08 mm) | ε |
|-----------------|---------------------|---------------|
| 1 | 0,0831 | 0,8461 |
| 2 | 0,1323 | 0,8214 |
| 3 | 0,1756 | 0,8037 |
| 4 | 0,2307 | 0,8036 |
| 5 | 0,2705 | 0,7924 |
| 6 | 0,3220 | 0,7919 |
| 7 | 0,3888 | 0,7998 |
| 8 | 0,4520 | 0,8038 |
| 9 | 0,4731 | 0,7896 |
| 10 | 0,5152 | 0,7858 |
| 11 | 0,5726 | 0,7883 |
| 12 | 0,6159 | 0,7856 |
| 13 | 0,6721 | 0,7874 |
| 14 | 0,7237 | 0,7876 |
| 15 | 0,7752 | 0,7877 |
| 16 | 0,8290 | 0,7884 |
| 17 | 0,8630 | 0,7842 |
| 18 | 0,9005 | 0,7811 |
| 19 | 0,9473 | 0,7805 |
| 20 | 1,0000 | 0,7812 |

20 adet tabakadan meydana gelen ortamın ortalama gözenekliği ise,

$$\varepsilon_o = 1 - \frac{20\rho_A}{H}$$

olacaktır ve böylece tel örgü ortamın ortalama gözenekliliği yukarıdaki bağıntıdan 0,7832 olarak bulunur[4].



Şekil A.1 : Duvardan itibaren seçilen hacimlere göre gözeneklilik[4]

Duvar bölgesinde ϵ ' un değişim genliği fazla iken duvardan uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir. $y=6d$ civarında genlikte görülen azalmalar gözeneklilik değerinin bu kısımdaki değerlere yakın olarak seçilmesi gerektiğini göstermektedir. Yani ϵ sabit bir değer etrafında değişmektedir. Tel örgü tabakalardan oluşan 12 numaralı gözenekli ortam için bu sabit gözeneklilik değeri 0,7812' dir[4].

EK B.1 : HİDRODİNAMİK DENEYLER

Gözenekli ortamda momentum deneyleri Şekil B.1 ' de görülen tesisatta yapılmaktadır.

Deney tesisatı ön deposu(1) dışında 5 ve 10 mm kalınlıktaki pleksiglas malzemedan imal edilmiştir.520x520x1200 mm iç boyutlarında olan fiberglas malzemedan yapılan ön deponun içinde çeşitli yüksekliklerde dikdörtgen delikleri olan bir bölme(2) vardır.

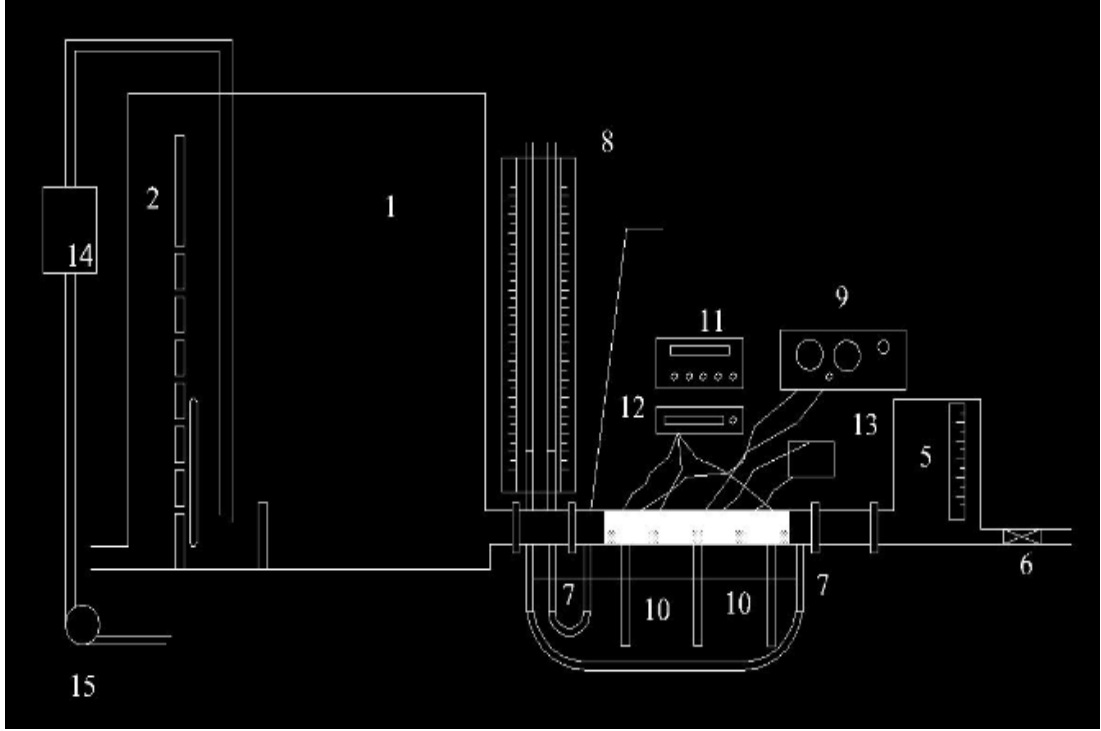
Bölmedeki delikler su seviyesini sabit tutmak için yapılmış olup, deney esnasında uygun delik açık tutularak depoya gelen fazla suyun bu delikten taşması sağlanmaktadır. Böylece, deney tesisatına giren suyun seviyesinin sabit tutulmasıyla giriş basıncı kontrol altına alınmaktadır.

Ön depoya su filtreden(14) geçip gelmektedir. Ön depoda seviyesi sabit tutulan su deney odasındaki(3) gözenekli ortam içinden geçerek 180x180x300 mm boyutundaki arka depoya(5) gelmektedir.

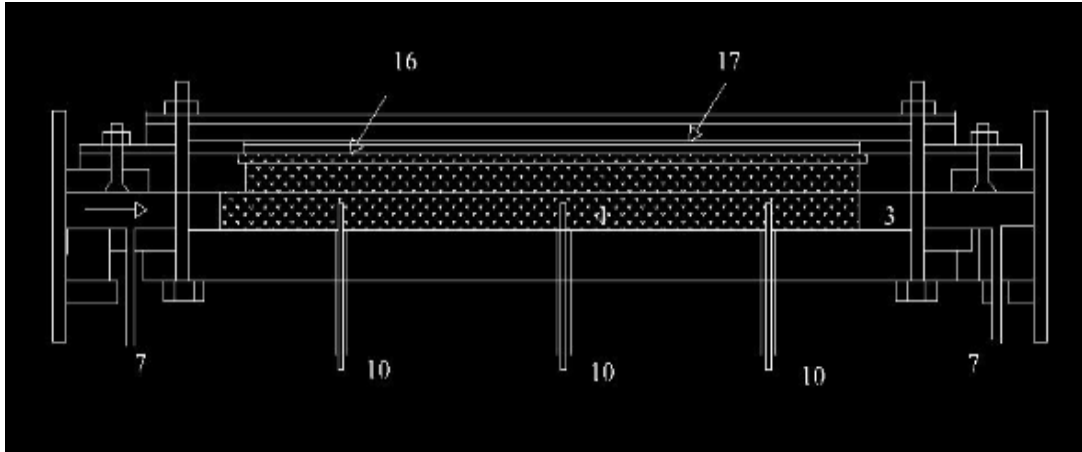
Arka deponun seviyesi ise su debisine bağlı olarak değişmektedir. Çıkıştaki vana(6) ile ayarlanan herhangi bir su debisi için arka depodaki su belirli bir seviyede dengeye ulaştığında, deney odasının çıkış basıncı da sabit bir değere gelmektedir. Böylece, ön ve arka depolar arasında debiye bağlı olarak sabit bir basınç farkı yaratılmış olmaktadır[4].

Deney odası ve kanallar 10 mm kalınlığında pleksiglas malzemedan yapılmış olup 180x50x500 mm boyutlarında bir kanal şeklindedir. Ancak gözenekli ortama bağlı olarak kanal yüksekliği değiştirilmektedir.

Gözenekli ortam kalınlığı 50 mm' den küçük olduğunda deney odasının giriş ve çıkışı, ön ve arka depolara kadar gözenekli ortamın kalınlığına göre çeşitli kalınlıklarda ve 180 mm genişliğinde pleksiglas malzemeler ile ayarlanmaktadır. Böylece akışın bozulması büyük oranda önlenmiş olmaktadır[4].



Şekil B.1 : Deney tesisatı[4]



Şekil B.2 : Deney odası[4]

Tel örgü tabakaların üst üste istiflenmesi ile oluşturulan gözenekli ortamın istenilen oranda sıkıştırılması işlemi 4 adet pirinç civata yardımı ile yapılmaktadır. Deney odasının içinden geçen civata yüzeylerinin akışa gösterdiği direnç ihmal edilmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Engin Zengin

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul 25.01.1987

Elektronik Posta: enginzengin34@hotmail.com

Lisans Üniversite: İstanbul Üniversitesi Makine Mühendisliği