

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YATAY HİDROLİK BORULARDA TAŞIYICI SIVI İLE EŞİT
YOĞUNLUKLU KÜRESEL KAPSÜL TREN AKIŞI BASINÇ
KAYIPLARININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI İLE
BELİRLENMESİ

Selahattin KARAÇAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Proses Programı

Danışman

Prof. Dr. Deniz ULUSARSLAN

Ocak, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YATAY HİDROLİK BORULARDA TAŞIYICI SIVI İLE EŞİT
YOĞUNLUKLU KÜRESEL KAPSÜL AKIŞI BASINÇ KAYIPLARININ
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE BELİRLENMESİ

Selahattin KARAÇAY tarafından hazırlanan tez çalışması 10.01.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı Proses Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Deniz ULUSARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Deniz ULUSARSLAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa ATMACA, Üye
Marmara Üniversitesi

Doç. Dr. Zafer GEMİCİ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Deniz ULUSARSLAN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan yatay hidrolik borularda taşıyıcı sıvı ile eşit yoğunluklu küresel kapsül tren akışı basınç kayıplarının hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile belirlenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Selahattin KARAÇAY

İmza



Aileme

TEŐEKKÜR

Çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen ve her daim yol gsteren danışman hocam Prof.Dr. Deniz ULUSARSLAN'a teőekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.1.1 Deneysel Çalışmalar	1
1.1.2 Nümerik Çalışmalar	3
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	4
1.4 Tezin Kapsamı.....	4
1.5 Kapsül Boru Hattı Taşımacılığı	4
1.6 HKB'lerde Basınç Düşüşü Hesaplamaları ve Deneysel Parametreler	6
2 MATERYAL VE YÖNTEM	11
2.1 Metodoloji.....	11
2.2 Ön İşlem	12
2.2.1 Akış Hacminin Oluşturulması	12
2.2.2 Akış Hacminin Mesh Elemanlarına Ayrılması.....	14
2.3 Çözücü.....	16
2.3.1 Fiziksel Modelin Seçilmesi.....	16
2.3.2 Malzeme Özellikleri ve Çalışma Koşulları	17
2.3.3 Sınır Şartları.....	17
2.3.4 Çözücü Ayarları.....	19
2.3.5 Mesh Elemanı Sayısından Bağımsızlık Testi.....	20
2.3.6 Yakınsama Kriteri	21
3 BULGULAR VE TARTIŞMA	24
3.1 Tek Faz Akışına Ait Bulgular	24
3.2 Kapsül Akışına Ait Bulgular	26
3.3 Ortamala Hızın Akış Parametrelerine Etkisi	32

3.4	Çap Oranının Akış Parametrelerine Etkisi.....	34
3.5	Kapsül Konsantrasyonun Akış Parametrelerine Etkisi	37
3.6	Akış Parametrelerine Bağlı Global Basınç Düşüşleri ve Had Analiz Sonuçlarının Literatürdeki Benzer Çalışmalarla Karşılaştırılması.....	40
4	SONUÇ VE ÖNERİLER	49
	KAYNAKÇA	50
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	52



SİMGE LİSTESİ

A	Boru kesit alanı
s	Bağlı Yoğunluk
R_p	Basınç Oranı
N	Birim zamanda sisteme giren kapsül adedi
D	Boru çapı
ε	Boru pürüzlülük uzunluğu
L	Boru uzunluğu
k	Çap oranı
f	Darcy sürtünme faktörü
C_{din}	Dinamik konsantrasyon
μ	Dinamik viskozite
V	Hız
R_v	Hız oranı
$(\Delta P)_c$	Kapsül akışının toplam basınç düşüşüne etkisi
V_{av}	Kapsül akışkan karışımı ortalama hızı
d	Kapsül çapı
Q_c	Kapsül debisi
V_c	Kapsül hızı
f_c	Kapsül sürtünme faktörü
$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_m$	Kapsül -taşıyıcı sıvı karışım akışı birim uzunluktaki basınç düşüşü
$(\Delta P)_m$	Kapsül- taşıyıcı sıvı toplam basınç düşüşü
ρ_c	Kapsül yoğunluğu
l	Kapsüllerin arasındaki mesafe
C	Konsantrasyon
Re	Reynold sayısı
C_{st}	Statik konsantrasyon
Q_w	Su debisi
f_w	Su sürtünme faktörü
ρ_w	Su yoğunluğu

φ	Şekil faktörü
$(\Delta P)_w$	Taşıyıcı sıvının tek faz akışı toplam basınç düşüşü
$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_w$	Tek faz su akışı birim uzunluktaki basınç düşüşü
ρ	Yoğunluk



KISALTMA LİSTESİ

CFD	Computational Fluid Dynamics
CLP	Coal-Log Pipeline
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HKB	Hidrolik Kapsül Boru Hattı
PKB	Pnömatik Kapsül Boru Hattı



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Silindirik kapsül yapısal elemanları [16]	5
Şekil 1.2 Ulusarslan ve Teke deney tesisatı[3]	7
Şekil 1.3 Yatay borularda basınç düşüşü	9
Şekil 2.1 Akış hacmi geometrisi	13
Şekil 2.2 Eşit yoğunluklu küresel kapsüller	14
Şekil 2.3 Akış hacminin mesh elemanlarına ayrılmış hali	14
Şekil 2.4 Kapsül ve boru duvarlarında oluşturulan sınır tabakanın çözülmesi için oluşturulan genişleme katmanları	15
Şekil 2.5 (2.1) eşitliği ve deneysel kapsül hızlarının karşılaştırılması [18]	19
Şekil 2.6 Mesh sayısından bağımsızlık testi	21
Şekil 2.7 Yakınsama kriterini sağlamış çözüm a) momentum, süreklilik ve türbülans parametrelerinin kalıntı değerleri b) giriş basıncı c) çıkış basıncı	23
Şekil 3.1 Tek faz akış basınç konturları	25
Şekil 3.2 Tek faz akışı test bölümü boyunca basınç değişimi	25
Şekil 3.3 Test bölgesi hız profili	26
Şekil 3.4 $k = 0,8$ ve $V_{av} = 1 m/s$ için basınç dağılımı	27
Şekil 3.5 Oluşturulan analiz çizgisinin konumu	27
Şekil 3.6 $k = 0,8$ ve $V_{av} = 1m/s$ için hız dağılımı	28
Şekil 3.7 $k = 0,8$ ve $V_{av} = 1m/s$ için analiz çizgisi boyunca a) basınç ve b) hız değişimleri	29
Şekil 3.8 $k = 0,8$ ve $V_{av} = 1m/s$ için a) kapsül öncesi ve b) kapsül sonrası hız profilleri	31
Şekil 3.9 $k = 0,8$ ve $V_{av} = 0,6 m/s$ için basınç konturları	32
Şekil 3.10 $k = 0,8$ ve $V_{av} = 0,2$ ve $0,6 m/s$ için analiz çizgisi boyunca hız dağılımı	33
Şekil 3.11 $V_{av} = 1 m/s$ için $k = 0,8$ ve $0,7$ durumunda basınç konturları	35
Şekil 3.12 $V_{av} = 1 m/s$ için $k = 0,8$ ve $0,7$ hız konturları	36
Şekil 3.13 $V_{av} = 1 m/s$ için $k = 0,8$ ve $0,7$ analiz çizgisi boyunca basınç değişimleri	37
Şekil 3.14 $k = 0,7$ ve $V_{av} = 0,6 m/s$ için 1 ve 3 kapsül akışları için basınç konturları	38
Şekil 3.15 $k = 0,7$, $V_{av} = 0,6 m/s$ için 1 ve 3 kapsül akışlarının analiz çizgisi boyunca basınç değişimleri	39
Şekil 3.16 a) 0,5, b) 0,7 ve c) 0,8 çap oranları için HAD basınç düşüşleri	41

Şekil 3.17 $s=0,87$, %5 konsantrasyon[5] deney ve HAD analizi basınç düşüşleri	42
Şekil 3.18 $k = 0,5, 0,7, 0,8$ ve $0,9$ için Asim [18] ve HAD sonuçları.....	43
Şekil 3.19 Farklı konsantrasyonlarda deney[5] ve HAD karşılaştırılması	48



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 HAD çalışmasının aşamaları.....	11
Tablo 2.1 HAD çalışmasının aşamaları(devamı)	12
Tablo 2.2 Kapsül adedi ve çap oranlarına karşılık gelen konsantrasyonlar.....	13
Tablo 2.3 Sınır şartları.....	17
Tablo 2.4 Su hızı ve karşılık gelen kapsül hızları	18
Tablo 2.5 Çözücü parametreleri.....	19
Tablo 3.1 Tek faz akışta oluşan basınç kayıplarının HAD ve ampirik formül ile karşılaştırılması.....	24
Tablo 3.2 Kapsül sayısı, ortalama hız ve k değerlerine karşılık gelen basınç düşüşleri	43
Tablo 3.2 Kapsül sayısı, ortalama hız ve k değerlerine karşılık gelen basınç düşüşleri(devamı)	44
Tablo 3.2 Kapsül sayısı, ortalama hız ve k değerlerine karşılık gelen basınç düşüşleri (devamı)	45
Tablo 3.2 Kapsül sayısı, ortalama hız ve k değerlerine karşılık gelen basınç düşüşleri (devamı)	46
Tablo 3.2 Kapsül sayısı, ortalama hız ve k değerlerine karşılık gelen basınç düşüşleri (devamı)	47

Yatay Hidrolik Borularda Taşıyıcı Sıvı ile Eşit Yoğunluklu Küresel Kapsül Tren Akışı Basınç Kayıplarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Belirlenmesi

Selahattin KARAÇAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Deniz ULUSARSLAN

Artan enerji fiyatları ve küresel ısınmanın çevreye etkileri taşımacılık sektöründe farklı yollar aranmasına sebep olmaktadır. Taşımacılık amacıyla kullanılan yeni bir yöntem olan hidrolik kapsül boru hatları (HKB) taşıyıcı sıvının akış enerjisinden yararlanarak malzeme taşınması sağlamaktadır. HKB hattına belirli konsantrasyonlarda verilen kapsüllerin düzenli akışı ile malzeme nakli sağlanmaktadır. HKB hatlarının tasarımında kullanılacak pompa kapasitelerinin belirlenme aşamasında farklı kapsül konsantrasyonlarında ve taşıyıcı sıvı akış hızlarında basınç kayıplarının bilinmesi gerekmektedir. Bunun için kapsül konsantrasyonu, akış hızı ve çap oranı değerleri verildiğinde meydana gelen basınç düşüşlerini ve buna bağlı pompa gücünü seçmemize yarayan gerçekçi bir korelasyona ihtiyaç vardır. Bu amaçla, deneysel veriler temel alınarak kapsül trenine ait nümerik akış analizi ve basınç düşüşü ilişkisi oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada kapsül çap oranı 0,5, 0,7 ve 0,8 olan kapsül yoğunluğu taşıyıcı sıvı yoğunluğuna eşit, 20000-150000 Re sayısı aralığında, %3,53-%10,6 konsantrasyonlarda çalışılmıştır. Basınç düşüşlerinin belirlenmesinde nümerik analiz sonuçları ile deneysel sonuçların %5-%10 konsantrasyonlarda uyum içinde

olduğu görülmüştür. %5 kapsül konsantrasyonunda nümerik ve deneysel basınç düşüşleri arasındaki sapma ortalama %11,37'dir. Kapsül konsantrasyonu arttıkça, oluşturulan model ile deney sonuçları arasında sapma miktarı artmıştır. Nümerik alışma ve deneysel çalışmada kapsül davranışlarının yapısı benzer olup konsantrasyon ve su hızı arttıkça basınç düşüşleri de artmıştır. Çalışma sonuçları literatürde yer alan benzer nümerik çalışmalar ile de karşılaştırılmış ve uyum içinde olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Küresel kapsül, basınç düşüşü, hidrolik transport, had



Computational Fluid Dynamics Based Determination of Pressure Losses of Spherical Capsule Train Flow with Equal Density to that of Carrier Liquid

Selahattin KARAÇAY

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Deniz ULUSARSLAN

Increasing energy prices and the effects of global warming on the environment cause different ways to be sought in the transportation sector. Hydraulic capsule pipelines (HCP), a new method used for transportation purposes, provide material transportation by making use of the flow energy of the carrier liquid. Material transport is ensured by the regular flow of capsules given to the HCP at certain concentrations. During the determination of the pump capacities to be used in the design of HCP, it is necessary to know the pressure losses at different capsule concentrations and carrier liquid flow rates. For this, given the capsule concentration, flow rate and diameter ratio values, a realistic correlation is needed to enable us to choose the pressure drops and the related pump power. For this purpose, numerical flow analysis of the capsule train and pressure drop relationship were tried to be established based on the experimental data. In this study, the capsule diameter ratios were 0,5, 0,7 and 0,8, the capsule density was equal to the carrier liquid density, the Re number is in the range of 20000-150000, concentrations of 3,53%-10,6% were studied. In the determination of pressure drops, it was seen that the results of the numerical analysis and the experimental

results were in agreement at 5-10% concentrations. At 5% capsule concentration, the deviation between numerical and experimental pressure drops averaged 11,37%. As the capsule concentration increased, the amount of deviation between the generated model and the experimental results increased. In the numerical study and experimental study, the structure of the capsule behavior was similar, and the pressure drops increased as the concentration and water velocity increased. The results of the study were also compared with similar numerical studies in the literature and it was determined that they were in harmony.

Keywords: Spherical capsule, pressure drop, hydraulic transport, cfd



1.1 Literatür Özeti

Tez kapsamında çalışılmış olan yatay hidrolik borularda taşıyıcı sıvı ile eşit yoğunluklu küresel kapsül tren akışının basınç kayıplarının hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile belirlenmesi başlıklı konu ile ilgili sırasıyla deneysel ve nümerik çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

1.1.1 Deneysel Çalışmalar

Ellis vd.[1] yatay borulardan oluşan ve kapsül yoğunlukları taşıyıcı sıvı yoğunluğuna eşit ve fazla olan tek kapsül akışı deneylerini yaptı. Boyut analizi ile kapsül hızının çap oranı, k ($k = d/D$), ve ortalama su hızına bağlı olduğunu tespit etti. Deney $k=0,39$ ile $0,89$ arasında $V_{av} = 1$ ile $3,7$ m/s arasında ve N (kapsül adedi) = 1 olan şartlarda deney yapıldı. Bu çalışmada basınç düşüşü ve akış yapısı hakkında bir çalışma yapılmamıştır.

Charles[2] yoğunluğu taşıyıcı sıvı yoğunluğuna eşit olan silindirik kapsül akışı için teorik bir çalışma yaptı. Kapsül hızı ve basınç düşüşünü sadece k (çap oranı)'nın bir fonksiyonu olarak ifade etti. Bu nedenle, araştırma aralığı, kapsülün uzunluğunun kapsülün hızı ve basınç düşüşü üzerindeki etkisi dikkate alınmadan, tek bir silindirik kapsülle yapıldığında ciddi şekilde sınırlı oldu. Ayrıca, boru hattı içindeki akış alanına ilişkin herhangi bir analiz çalışmaya dahil edilmedi.

Ulusarslan ve Teke[3] yatay hidrolik boruda küresel kapsül akışının basınç düşüşünü matematiksel olarak ifade edecek bir denklem elde ettiler. Akışı karakterize eden boyutsuz parametreleri tanımlayarak birim boyda oluşan basınç düşüşünü bu boyutsuz parametreler ile ifade ettiler. Birim boyda oluşan basınç düşüşlerini ifade eden matematiksel denklemin deneyler ile uyumlu olduğu ve 12000 ile 150000 Re aralığında %2,7 hata ile hesaplanabildiği tespit edilmiştir.

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_m = \frac{f \frac{1}{D} \rho_m (V_{av}^2)}{2} \left[1 + 0,45 * \left[\frac{C_{st}}{(1-k)k^2[1 + C_{st}(s-1)]}\right]\right] \quad (1.1)$$

Denklem 1.1'de kapsül akışına ait oluşturulan basınç kayıp formülü verilmiştir. Eşitliğin sağ tarafında köşeli parantez içindeki statik konsantrasyon, çap oranı ve yoğunluk oranını içeren ifade kapsül hareketinin oluşturduğu ek basınç kayıplarını temsil etmektedir.

Ulusarslan ve Teke[4] bir seri yoğunluğu taşıyıcı sıvı yoğunluğuna eşit küresel kapsül akış deneyi yaptılar. Deney $k = 0,8$, $V_{av} = 0,2- 1,6$ m/s değerleri arasında gerçekleştirildi. Çalışmada ortalama hızın kapsül hızı ve kapsüller arası mesafeye olan etkisini inceledi. Basınç düşüşlerine ait bir sonuç verilmedi. Ayrıca çalışmalarında yatay borularda çap oranı 0,8 olan küresel kapsül tren akışının %5-30 konsantrasyonlarda R_p hız oranı (kapsül hızı/ortalama hız) ve kapsüller arası mesafenin değişimini incelediler. Hız oranının çalışılan 12000 ile 150000 Re aralığında ortalama 1,05 olduğunu ve su hızının artışıyla kapsüller arası mesafenin değişmediğini ve ortalama hız değeriyle kapsül hızlarının doğrusal değiştiğini gözlemlediler.

Ulusarslan ve Teke [5] yatay hidrolik boruda yoğunluğu taşıyıcı akışkanın yoğunluğundan az olan çap oranı(kapsül çapının boru çapına oranı) 0,8 olan küresel kapsül treni akışını deneyini gerçekleştirerek birim boyda ve belirli statik ve dinamik konsantrasyonlar için basınç düşüş değerlerini tespit ettiler. Yoğunluğu 870 kg/m^3 olan polipropilen küresel kapsüller ile 12000 ile 150000 Re sayıları aralığında ve 5-30 % C_{din} (dinamik konsantrasyon) oranlarında çalıştılar. Burada belirtilen dinamik konsantrasyon denklem 1.2'de verildiği üzere kapsül debisinin toplam debiye oranını ifade etmektedir. C_{st} ise statik konstantrasyon olarak isimlendirilen ve akış halindeki kapsül hacminin toplam boru hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır.

Ulusarslan ve Teke[6] $s = 1$ olduğu ($s = \text{kapsül yoğunluğu/akışkan yoğunluğu}$) kapsül treni akışında taşıyıcı akışkan olarak su kullanılarak deney yapıldı. 0,2 ve 1m/s ortalama hızlarda ve %5-20 aralığındaki konsantrasyonlarda basınç düşüşleri saptandı. $\frac{(\Delta P/L)_m}{(\Delta P/L)_w}$ olarak tanımlanan ve basınç oranı (R_p) olarak isimlendirilen terim kapsül akışında oluşan basınç düşüşünün tek faz akışında oluşan basınç düşüşüne oranını ifade etmektedir. Basınç düşüş oranının daha düşük yoğunluklu kapsül akışı için yapılan deneyler ile karşılaştırıldı. Ortalama

hız olarak tanımlanan V_{av} ise kapsül ve taşıyıcı akışkan hacimsel debisinin toplamlarının boru alanına bölünmesiyle türetildi. $\frac{V_c}{V_{av}}$ (kapsül hızı/ortalama hız) oranının ortalama hızın artışı ile arttığı tespit edildi. Konsantrasyonun artışı ile basınç düşüş oranının arttığı tespit edildi.

Ulusarslan[7] yoğunluğu taşıyıcı sıvı yoğunluğundan az ve çap oranı 0,72 ve 0,8 olan deney yaparak çap oranının hız oranı ve basınç düşüşlerine etkisini inceledi. %5 ve 10 konsantrasyon ve 0,2 ve 1,0m/s hız aralığında gerçekleştirilen deneyde çap oranı ve konsantrasyonun azalmasıyla hız oranının arttığı tespit edildi. Her iki kapsül çap oranında ortalama hız ile basınç kayıplarının arttığı fakat çap oranının artması ile basınç kayıplarının artışının ihmal edilebilir düzeyde olduğu tespit edildi.

1.1.2 Nümerik Çalışmalar

Newton vd.[8] silindirik kapsül kullanarak ve kapsül boyunun kapsül çapına oranı (karakteristik uzunluk) 1 ile 20 arasında değişen akış için nümerik bir çalışma yaptı. Laminer akış şartlarında yapılan analiz kapsül hızı ve basınç düşüşlerini belirlerdi. Fakat yapılan analizin laminer olması pratik kullanım açısından yetersiz olması sonucunu ortaya çıkarmıştır.

Kroonenberg[9] silindirik kapsül akışından kapsül hızı ve basınç düşüşlerini verecek matematiksel bir eşitlik yarattı.

Tomita[10] silindirik kapsül akışının nümerik analizini gerçekleştirdi. Kapsül treni yerine noktasal kütle olarak modellenen tek kapsül akışının hızı ve konumu üzerine çalıştı.

Asim ve Mishra[11] çalışmasında sayısal olarak bulunan basınç düşüşlerinden yatay ve dikey borular için basınç düşüş katsayılarını ve dirsekler için yerel kayıp katsayılarını belirledi. Ayrıca optimizasyon çalışması da gerçekleştirdi. Optimizasyon modelinde taşınması amaçlanan kapsül debisi istenirken, model optimum boru çapını kullanıcıya sunmaktadır.

Asim ve Mishra[12] çalışmasında silindirik kapsülleri kullanarak sayısal çalışma gerçekleştirdi. Çalışmada silindirik kapsüllerin akış özelliklerini inceledi. Sayısal

çözüm ile bulunan basınç kayıplarını kullanarak yatay boru, dikey boru ve dirsekler için optimizasyon modeli geliştirdi.

Asim vd.[13] farklı geometrilerden oluşan kapsül akışlarında basınç düşüşlerini HAD analizi ile tespit ettiler. $\varphi = \left(\frac{\text{Kapsül hacmi}}{\text{Kapsülü içine alan en küçük kürenin hacmi}} \right)^{1/3}$ ile ifade edilen şekil faktörü ile basınç düşüşleri ve boru içerisindeki basınç dağılımı arasındaki ilişkiyi incelediler. Şekil faktörünün artışının basınç düşüşlerini ve boru içerisindeki basınç farklarını arttırdığı tespit edildi.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı hidrolik kapsül boru hattı tasarımında kullanılacak pompanın seçimi için gereken basınç düşüş değerlerini veren bir korelasyon elde etmektir. Ayrıca kapsül konsantrasyonu, su hızı ve çap oranının basınç düşüşü üzerine etkilerini tespit etmektir.

1.3 Hipotez

Bu çalışmanın hipotezi:

Literatürde belirli su hızlarına karşılık gelen kapsül hız değerlerini kullanarak kapsül akışına ait basınç düşüşlerini tespit etmek ve basınç düşüşüne etki eden bağımsız değişkenlerin (çap oranı, su hızı, kapsül konsantrasyonu) basınç düşüşüne etkilerini göstermektir.

1.4 Tezin Kapsamı

Kapsül akışı basınç düşüşünün belirlenmesinin amaçlandığı HAD analizi kapsamında çap oranı 0,5- 0,7- 0,8 su hızı 0,2- 0,4- 0,6- 0,8- 1- 1,2- 1,4- 1,6 ve kapsül sayısı 1, 2 ve 3 olduğu durumlar için toplamda 72 adet HAD analizi yapılmıştır.

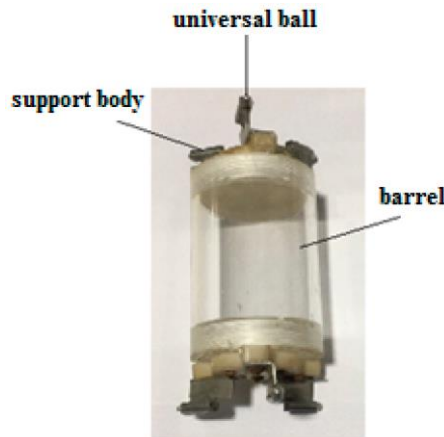
1.5 Kapsül Boru Hattı Taşımacılığı

Boru hattı taşımacılığı bir akışkanın (sıvı veya gaz) ya da taşıyıcı akışkan ile birlikte katının boru sistemi ile taşınmasıdır. Genellikle market veya tüketim bölgelerine taşıma yapılması anlamında kullanılmaktadır. Boru hattı taşımacılığı

tarihsel kullanımı bakımından üçe ayrılmaktadır. Bunlar 1.Kuşak, 2.Kuşak ve kapsül boru hatlarıdır. 1.Kuşak boru hatları tek fazda akışın olduğu akışları içeren boru hattı taşımacılığıdır. 2. Kuşak boru hatları çok fazlı akışların olduğu boru hatlarıdır. Çok fazlı akışlar katı, sıvı ve gaz fazlarının çeşitli kombinasyonlarını içerebilir. Su ve yağ (sıvı-sıvı), çamur akışı (sıvı-katı), kabarcıklı akış (sıvı-gaz) akışları 2. kuşak boru hatlarına örnek olarak verilebilirler. [14]

Son grup olan kapsül boru hattı taşımacılığı ise bir takım materyal, kargo veya yolcunun boru içerisinde bir akışkanın akışı vasıtasıyla taşınmasıdır. Kargolar gerekirse akışkan ile teması kesecek olan kaplama ile kaplanabilir veya kargo istenen geometriye göre sıkıştırılarak (CLP taşımacılığı ile sıkıştırılmış kömür taşımacılığı yapılmaktadır) boru hattına yerleştirilebilir. Kapsül boru hattı ikiye ayrılır. Bunlar sırasıyla: hidrolik kapsül boru hattı ve pnömatik kapsül boru hattıdır. Hidrolik kapsül boru hattında akışkan olarak sıvı kullanılırken (genellikle su) pnömatik kapsül boru hattında gaz kullanılmaktadır.[15]

Kapsül boru hatlarında genellikle kapsüller silindirik veya küresel şekillerde kullanılmaktadır. Silindirik kapsüllerin kullanıldığı boru hatlarında boru ile temas alanın fazla olması sürtünmeyi arttırmaktadır ve bu sebeple pnömatik nakilde kapsüllere tekerlekler yerleştirilerek taşıma sağlanmaktadır.



Şekil 1.1 Silindirik kapsül yapısal elemanları [16]

Şekil 1.1'de silindirik kapsül universal ball olarak adlandırılmış olan küresel tekerlekler yardımıyla sürtünmeyi azaltarak taşıma sağlanmaktadır. Küresel kapsül akışlarında boru yüzeyi ile kapsüller arasındaki temas noktasal olduğundan sürtünme sorunu silindirik kapsül akışlarına kıyasla daha azdır. Kullanım

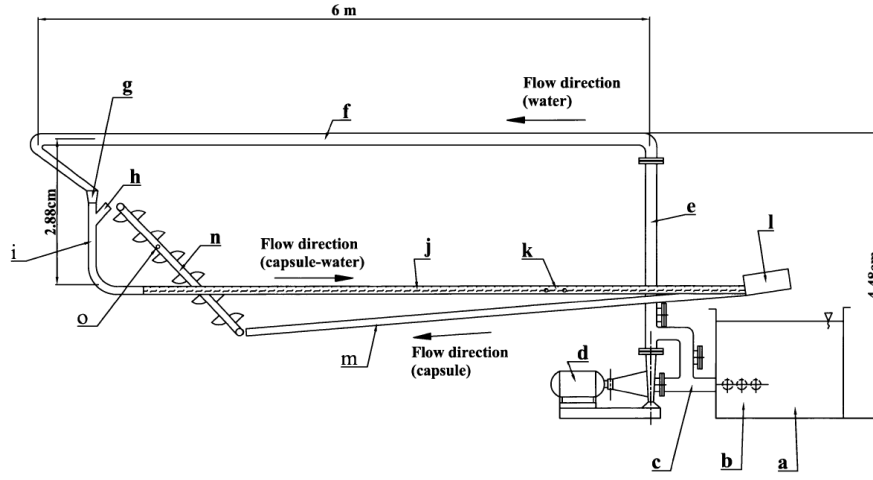
açısından bakıldığında PKB çok hızlı taşımacılık sağlarken HKB daha yavaş bir taşımacılık sağlar. HKB'lerin taşınan birim kütledeki enerji ihtiyacı daha azdır.[15] Ekonomik açıdan bakıldığında ise çalışmalar kapsül boru hatlarının geleneksel taşıma yöntemlerinden (karayolu ve demiryolu taşımacılığı) daha ekonomik olduğunu göstermiştir.[17]

Kapsül boru hatlarının daha birçok yönden avantajları bulunmaktadır. Bunlar:

- Enerji tüketimi düşüktür. (Karayolu ve demiryolu taşımacılığına kıyasla)
- Çevre dostudur. (Yer altında olması dolayısıyla trafik oluşturmaz. Yerine kullanılan karayolu ve demiryolu taşımacılığı şehirlerde hava kirliliği yaratırken bu durum HKB'lerde görülmez)
- Trafik kazaları açısından güvenlidir. Ayrıca boru hatları değişik geometrilere kuruluma elverişlidir.
- Hava durumundan etkilenmez.
- Alan işgal etmezler.
- Otomasyona uygundur.
- İlk yatırım maliyeti yüksektir fakat işletme maliyeti çok düşüktür. Bu sebeple ekonomik enflasyondan diğer taşıma araçlarına kıyasla daha az etkilenirler.

1.6 HKB'lerde Basınç Düşüşü Hesaplamaları ve Deneysel Parametreler

Bu bölümde deneysel çalışma parametreleri kapsül hızı, su hızı, ortalama hız vb. ifadeler tanımlanacak ve nümerik çözüm için yapılan varsayımlar açıklanacaktır.



Şekil 1.2 Ulusarslan ve Teke deney tesisatı[3]

Şekil 1.2’de Ulusarslan ve Teke tarafından hazırlanan deney tesisatının şematik diyagramı verilmiştir. Taralı olup “j” ile işaretlenen 4 metre boyunda olan saydam plexiglass hatta ölçümler yapılmıştır. Bu sistemde pompa vasıtasıyla basınçlandırılan su “n” ile işaretlenen kapsül besleme mekanizması yardımıyla sisteme alınan kapsülleri, ölçüm alınan 4 metre uzunlukta ve 0,1 metre çapındaki boru hattına vermektedir. Akış kapsülleri “l” ile işaretlenen elek bölümüne sürükler ardından çıkış yapan su yeniden “a” ile işaretlenen tanka, kapsüller ise tekrardan besleme mekanizması ile sisteme dahil olurlar. Bu sayede bir sürekli akışı sağlanan kapsül treni oluşur ve besleme mekanizmasının açılma hızı ve pompa debisi ayarlanarak istenilen konsantrasyon ve su akış hızlarında ölçüm alınabilir.

Deneysel parametreler sırasıyla;

$$C_{din} = \frac{Q_c}{Q_w + Q_c} = \frac{\left(\frac{\pi d^3}{6}\right) N}{Q_w + \left(\frac{\pi d^3}{6}\right) N} \quad (1.2)$$

Denklem 1.2’de kapsül dinamik konsantrasyon formülü verilmiştir. Denklem içerisindeki değişkenler

C_{din} = Kapsül konsantrasyonu [%] (Kapsül debisinin toplam debiye bölünmesi ile bulunur)

Q_c = Kapsül hacimsel debisi [m^3/s] (kapsül hacmi ve birim zamanda geçen kapsül sayısının çarpımı ile bulunur)

Q_w = Su hacimsel debisi [m^3/s]

N = Birim zamanda sisteme aktarılan kapsül adedi

$$V_{av} = \frac{Q_w + Q_c}{A} \quad (1.3)$$

V_{av} = Ortalama hız [m/s]

A = Boru kesit alanı [m^2]

Denklem 1.3'te ortalama hız formülü verilmiştir. Ortalama hız kapsül ve su hacimsel debisinin boru kesit alanına bölünmesiyle bulunmaktadır.

$$R_v = \frac{V_c}{V_{av}} \quad (1.4)$$

R_v = Hız oranı (Kapsül hızının ortalama hıza oranı)

V_c = Kapsül hızı [m/s]

Denklem 1.4'te kapsül hızının ortalama hıza oranı hız oranı olarak tanımlanmıştır. Deneylerde bu oranın 1,05 civarlarında olduğu ve kapsül ve su hızlarının birbirine yakın seyrettiği belirlenmiştir.

$$R_p = \frac{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_m}{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_w} \quad (1.5)$$

Denklem 1.5'te basınç oranı olarak tanımlanan R_p karışım halinde olan akışta oluşan basınç düşüşünün tek faz halinde olan basınç düşüşüne oranını ifade etmektedir.

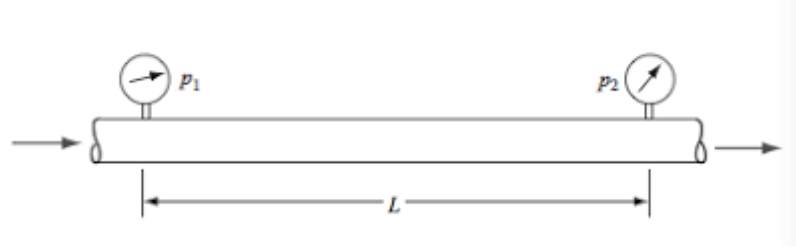
R_p = Basınç Oranı

$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_m$ = Karışım halinde oluşan basınç düşüşü

$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_w$ = Tek faz akışı halinde oluşan basınç düşüşü

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1.6)$$

Denklem 1.6'de verilen Reynolds sayısı Osborne Reynolds tarafından ifade edilen ve akışın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını temsil eden boyutsuz sayıdır. Akışın rejimi hakkında bilgi verir.



Şekil 1.3 Yatay borularda basınç düşüşü

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (1.7)$$

ΔP = Basınç düşüşü [Pa]

L = Boru uzunluğu [m]

D = Boru çapı [mm]

$f \left(Re, \frac{\epsilon}{D} \right)$ = Darcy sürtünme katsayısı

Denklem 1.7'de verilen ΔP düz yatay borularda oluşan basınç düşüşünü ifade etmektedir. Tek faz akışta basınç düşüşü $f \left(Re, \frac{\epsilon}{D} \right)$, L, D ve V 'nin bir fonksiyonudur. Şekil 1.3'te verilen $P_2 - P_1$ ifadesi bulunarak basınç düşüşü elde edilir.

Kapsül ve su akışından oluşan karışım akışı için ise basınç kayıpları iki kısımdan oluşmaktadır. Bir kısım su akışından dolayı oluşacak basınç kayıpları diğer kısım ise kapsüllerin varlığından dolayı oluşacak ek basınç kayıplarıdır. Denklem 1.8'de bu ilişki verilmiştir.

$$\Delta P_m = \Delta P_w + \Delta P_c \quad (1.8)$$

ΔP_w = Taşıyıcı akışkandan dolayı oluşan basınç kaybı

ΔP_c = Kapsüller dolayısıyla oluşan basınç kaybı

$$\Delta P_m = f_w \frac{L_p}{D} \frac{\rho_w V_{av}^2}{2} + f_c \frac{L_p}{D} \frac{\rho_c V_{av}^2}{2} \quad (1.9)$$

Denklem 1.8'de verilen basınç kayıp terimleri denklem 1.9'da verildiği gibi açılabilir.[18]

L_p = Boru uzunluğu

f_w = Su akışı sűrtűnme faktűrű

f_c = Kapsűl hareketi dolayısıyla oluđu sűrtűnme katsayısı



2.1 Metodoloji

Bu çalışmada yatay hidrolik borularda yoğunluğu taşıyıcı sıvı yoğunluğuna eşit kapsüllerin taşınması durumunda oluşan basınç düşüşleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile belirlenmiştir. Kullanılan sınır şartları ve kabuller literatürde bulunan deneylerden elde edilmiştir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ısı transferi, akış ve bağlantılı alanlarda (kimyasal reaksiyon vb.) bilgisayar tabanlı simülasyon yapmamızı sağlayan analiz sistemidir. HAD tekniği çok güçlü bir teknik olup hem akademide hem de endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Hava aracının aerodinamik özelliklerinin incelenmesi, gemi hidrodinamiği, içten yanmalı motorlar, turbomakineler, hidroloji ve oşinografi, biomedikal uygulamalar, meteoroloji gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

HAD kodları akış problemlerini çözmek için tasarlanan sayısal algortimalardır. Bu kodlar 3 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla ön işlem, çözücü ve son işlem bölümüdür.[19] Tablo 2.1'de belirtilen aşamalar ve bu aşamaları oluşturan alt aşamalar verilmiştir.

Tablo 2.1 HAD çalışmasının aşamaları

<ul style="list-style-type: none"> • Ön İşlem 	<ul style="list-style-type: none"> • Akış hacminin oluşturulması • Akış hacminin küçük parçalara ayrılması • Fiziksel veya kimyasal modelin seçilmesi • Akışkan özelliklerinin belirlenmesi • Akış hacminin sınırlarına sınır şartlarının tanımlanması
--	---

Tablo 2.1 HAD çalışmasının aşamaları(devamı)

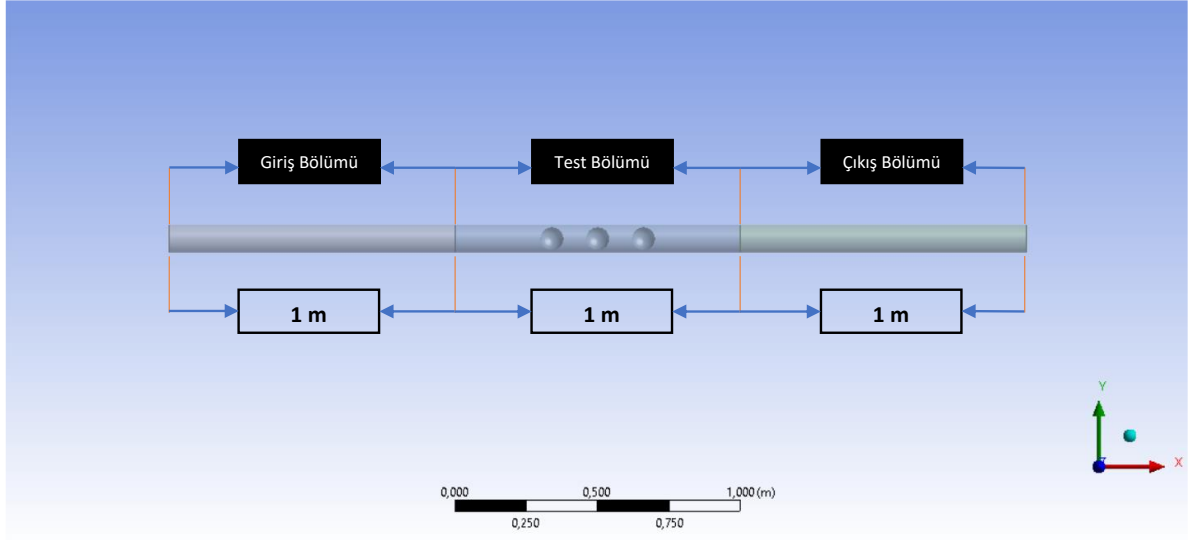
<ul style="list-style-type: none">• Çözücü	<ul style="list-style-type: none">• Yöneten denklemlerin akış hacmindeki ayrık geometrilere integre edilmesi• Ayrıklaştırma (ortaya çıkan integral denklemlerinin cebirsel denklemlere dönüştürülmesi)• Cebirsel denklem takımının iteratif yöntemler ile çözülmesi
<ul style="list-style-type: none">• Son İşlem	<ul style="list-style-type: none">• Bulunan verilerin akış geometrisi üzerinde görselleştirilmesi

2.2 Ön İşlem

2.2.1 Akış Hacminin Oluşturulması

Akış hacmi ANSYS 2021 simülasyon programının içindeki Design Modeler modülü ile oluşturulmuştur. Akış hacmi Ulusarslan ve Teke[5]'nin deneyi ile aynı geometrik özelliklere sahiptir. Boru çapı $D = 0.1$ metre ve test bölgesi birim boyda oluşan basınç düşüşlerinin belirlenmesi için 1 metre seçilmiştir. Analiz yapılan Re sayısı aralığında akış türbülanslı akış özelliklerini taşımaktadır. Türbülanslı iç akışlarda giriş bölgesi uzunluğunun Re sayısına bağımlılığı laminar akışa göre daha azdır ve giriş uzunluğu $10 \cdot D$ olarak alınabilir. Bu sebeple giriş bölümü uzunluğu 1 metre seçilmiştir.[20] Borunun hidrolik olarak pürüzsüz olması sebebiyle pürüzlülük katsayısı ε sıfır olarak tanımlanmıştır.

Akış hacmi 3 kısımdan oluşmaktadır. Şekil 2.1'de gösterildiği üzere her biri 1 metre uzunluğunda sırasıyla akışın gelişmesi için giriş kısmı, kapsüllerin yerleştirildiği test bölgesi ve çıkış kısmıdır.



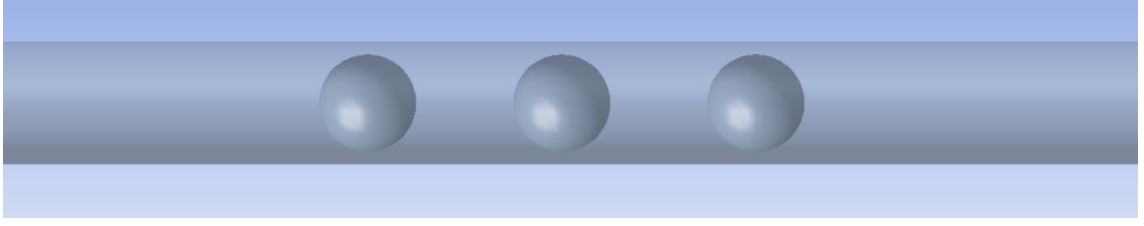
Şekil 2.1 Akış hacmi geometrisi

Boru çapı 0,1 metre, kapsül çapı ise 0,08 metredir. k değeri kapsül çapının boru çapına oranı ile ifade edilen boyutsuz sayıdır ve Şekil 2.1’de verilen akış hacmi için k değeri 0,8’dir. Analizler $k=0,5$, 0,7 ve 0,8 değerleri için yapılmıştır.

Tablo 2.2 Kapsül adedi ve çap oranlarına karşılık gelen konsantrasyonlar

Kapsül adedi/m	Statik konsantrasyon		
	$k=0,5$	$k=0,7$	$k=0,8$
1	%0,83	%2,29	%3,41
2	%1,67	%4,57	%6,83
3	%2,50	%6,86	%10,24

Deneylerde sisteme birim zamanda verilen kapsül adedi ve su hızı bilindiğinden dinamik konsantrasyon olarak tanımlanan ($C_{din} = \text{kapsül debisi} / \text{toplam debi}$) bilinmektedir. Nümerik analizde yoğunluk oranı(s) 1 olan durum incelediği ve deneylerde[4] kapsül hızının ortalama hıza oranının 1,05 civarlarında olması dolayısıyla statik konsantrasyon ($C_{st} = \text{kapsül hacmi} / \text{toplam boru hacmi}$) ve dinamik konsantrasyon birbirine çok yakındır. Bu sebeple nümerik analizde statik konsantrasyon dinamik konsantrasyona eşit kabul edilmiştir. Statik konsantrasyon ifadesi kullanılarak her bir kapsül adedi ve çap oranına karşılık gelen konsantrasyon değerleri Tablo2.2’de verilmiştir.

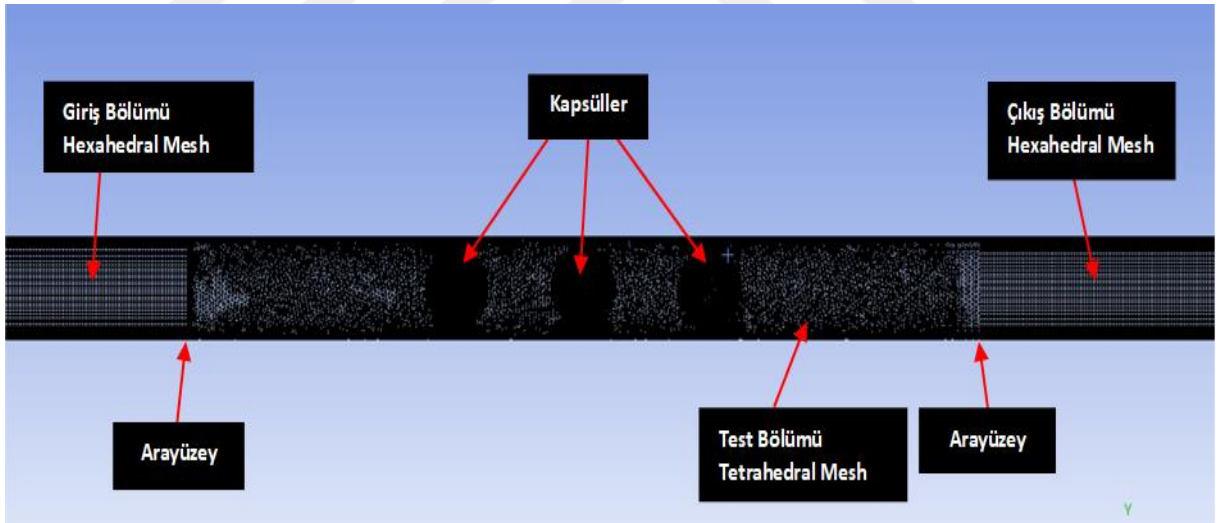


Şekil 2.2 Eşit yoğunluklu küresel kapsüller

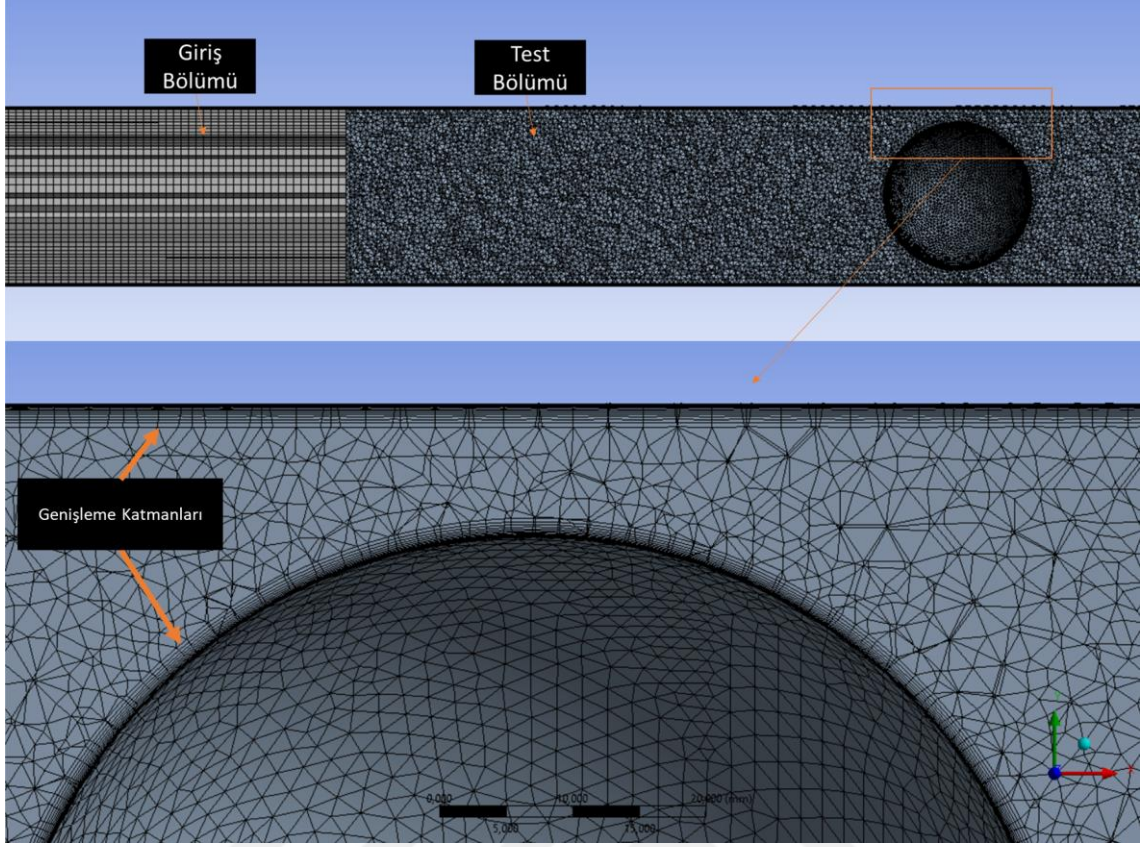
Şekil 2.2’te eşit yoğunluklu küresel kapsüllerin test bölgesinde konumlanması verilmiştir. Kapsüller Ellis[1] deneylerinde tespit edildiği gibi boru merkezinde hizalanmışlardır. Kapsüllerin merkezleri arasındaki uzaklık $2*d$ ($2*$ kapsül çapı) mesafededir. Kapsüller literatürdeki deneylerden alınan veriler ile doğrusal hareket eden duvar olarak tanımlanmışlardır. Detaylar ileride verilecektir.

2.2.2 Akış Hacminin Mesh Elemanlarına Ayrılması

Giriş, test ve çıkış bölümlerinden oluşan akış hacmi her birinin üzerinde kütle ve momentum korunum denklemlerinin integre edildiği küçük geometrilere bölünür. Bu işlem Ansys 2021 Meshing modülü ile yapılmıştır.



Şekil 2.3 Akış hacminin mesh elemanlarına ayrılmış hali



Şekil 2.4 Kapsül ve boru duvarlarında oluşturulan sınır tabakanın çözülmesi için oluşturulan genişleme katmanları

Şekil 2.3'te akış hacminde giriş, çıkış ve kapsüllerin bulunduğu test bölümünün mesh elemanlarına ayırma işlemi yapılmış hali verilmiştir. Mesh işleminde hibrit mesh yöntemi seçilmiştir. Hibrit mesh yöntemi iki farklı mesh geometrisinin kullanılması anlamına gelmektedir. Akış geometrisinin giriş ve çıkış bölümünde hexahedral (altıyüzlü) mesh elemanları seçilirken test bölümünde tetrahedral (beşyüzlü) mesh elemanları tercih edilmiştir. Giriş ve çıkış bölgelerinde hexahedral mesh elemanlarının seçilmesinin nedenleri;

- Giriş ve çıkış bölgelerindeki geometrilerin basit olması
- Hexahedral mesh elemanlarının düşük skewness (çarpıklık) değerlerine sahip olması
- Hexahedral mesh elemanları daha düşük nümerik difüzyon dolayısıyla daha kesin sonuçlar vermesidir.

Test bölümünde kapsüllerin bulunmasından dolayı akış geometrisi karmaşıklaşmıştır. Test bölümünde bu sebeple tetrahedral mesh elemanları tercih edilmiştir.

Çözümün mesh sayısından bağımsız olması için 1,5 milyon ve 2,5 milyon mesh elemanı aralığında değerler alınarak çözüm yapılmış, 2,1 milyon mesh elemanının uygun olduğuna karar verilmiştir. Detaylarından sonraki bölümlerde bahsedilecektir. Şekil 2.4'te boru girişi için oluşturulan hexahedral mesh elemanları ve test bölümünden oluşturulan tetrahedral mesh elemanları görülmektedir. Ayrıca boru ve kapsül duvarlarında oluşacak sınır tabakasını çözmek için genişleme katmanları oluşturulmuştur. Boru yüzeyi ve kapsül yüzeyinden oluşan sınır tabakanın uygun doğrulukta çözülmesi için y^+ değeri 10'dan az olacak şekilde hesaplanmıştır. Oluşturulan sınır katmanları Şekil 2.4'te verilmiştir. Mesh elemanlarının kalitesi elde edilecek sonuçların doğruluğu açısından büyük önemi vardır. Mesh kalitesini değerlendirmek için birçok parameter vardır. Yapılan analizlerde çarpıklık kriteri göz önüne alınmıştır. ANSYS simülasyon paket programının sonuçların doğruluğu ve stabilitesi açısından tavsiye ettiği maksimum çarpıklık(skewness) değeri 0,9'dur. Yapılan analizlerde çarpıklık değeri 0.9'un altında tutulmuştur.[21]

2.3 Çözücü

Mesh işleminin akış hacmi üzerinde uygulanmasını takiben oluşturulan kütle ve momentum korunum denklemleri cebirsel denklem takımlarına dönüştürülür. Çözüm ise ortaya çıkan cebirsel denklemlerin bir takım sayısal çözüm şemalarının iteratif yöntemler kullanarak denklem takımını çözmesi ile oluşturulur. Korunum denklemlerinin cebirsel denklem takımına dönüştürülmesi ayrıklaştırma olarak isimlendirilmiştir. Ayrıklaştırma işlemi kendi içerisinde bir hata ihtiva etmektedir.

2.3.1 Fiziksel Modelin Seçilmesi

HKB hatlarında kullanılan akışkan sıvı fazdadır. Sıkıştırılamaz akış şartlarında akış sağlanmaktadır. Bu sebeple basınç bazlı çözücü (pressure-based solver) kullanılmıştır.

Tasarlanacak HKB'lerde sabit kapsül debisinde akışın olması istenmektedir. Sabit pompa gücü ve kapsül debisinde HKB'lerde kararlı akış şartlarına sahip olacaktır. Bu sebeple kararlı durum çözücüsü (steady state solver) kullanılmıştır.

Sayısal çalışmamızda 20.000 ile 150.000 Re sayı aralığında çalışılmıştır. İç akışlarda Re sayısının 4000 'in üzerinde olması akışın türbülanslı akış olduğunu göstermektedir. Bu sebeple türbülans etkilerinin tespit edilmesi için bir türbülans modeli seçilmelidir.

Kullanılmakta olan birçok türbülans modeli mevcuttur ve her birinin avantajları ve dezavantajları vardır. Kapsül akışında oluşan akış ayrılmalarından dolayı oluşan wake bölgeleri oluşmaktadır. Wake bölgelerini modelleme ve kapsül ile boru hattı yüzeyi arasında oluşacak yüksek basınç gradyanlarını modellemedeki yeteneği dolayısıyla SST k- ω türbülans modeli seçilmiştir. [22]

2.3.2 Malzeme Özellikleri ve Çalışma Koşulları

Akışkan 998,2 kg/m³ yoğunluğa ve 0,001003 kg/m.s dinamik viskoziteye sahip olan sıvı sudur. Kapsüller ise su ile aynı yoğunluğa sahip polipropilen malzemedir. Çalışma basıncı 101325 Pa (1 atm) ve yerçekimi ivmesi 9,81 m/s²'dir

2.3.3 Sınır Şartları

Tablo 2.3 Sınır şartları

Sınır Bölgesi	Sınır Şartı Tipi	Sınır Şartı
Giriş	Hız girişi	0,2-1,6 m/s
Çıkış	Çıkış basıncı	0 Pa (Efektif)
Boru yüzeyi	Sabit duvar	Kaymaz duvar
Kapsül yüzeyi	Hareketli duvar	Doğrusal hareket yapan duvar (Literatürden alınmıştır) [1]

Tablo 2.3'te sınır şartları verilmiştir. Boru hattı girişinde verilen hız sınır şartı Ulusarslan ve Teke[5]'nin deneylerinde kullanılan su hızı aralığı olan 0,2-1,6 m/s aralığıdır. Boru hattı çıkışında 0 Pa efektif basınç tanımlanmıştır. Boru yüzeyi pürüzsüz ve sabit duvar olarak tanımlanmıştır.

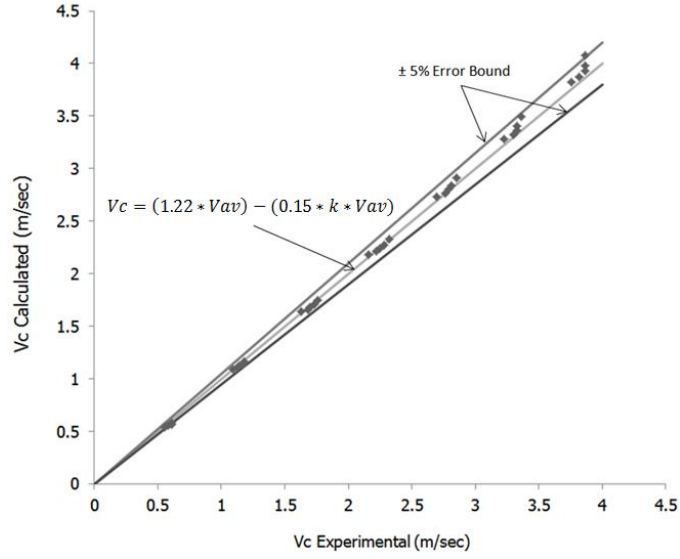
Kapsüllerde doğrusal hareket yapan duvar sınır şartı tanımlanmıştır. Doğrusal hareket yapan kapsüllerin hızı birçok parametreye bağlıdır. Kapsül yoğunluğu, taşıyıcı sıvı hızı, taşıyıcı sıvı yoğunluğu, kapsül çapının boru çapına oranı (k) vb. bunlardan bazılarıdır. Kapsül hız değerleri Ellis [1]'in deneylerinde elde ettiği verileri çok değişkenli regresyon analizi ile ortalama su hızı ve k değeri cinsinden Asim [11] tarafından ifade edilmiştir.

$$V_c = (1,22 \times V_{av}) - (0,15 \times k \times V_{av}) \quad (2.1)$$

Tablo 2.4 Su hızı ve karşılık gelen kapsül hızları

Su hızı[m/s]	Kapsül Hızı[m/s]
0,2	0,22
0,4	0,44
0,6	0,66
0,8	0,88
1	1,1
1,2	1,32
1,4	1,54
1,6	1,76

Tablo 2.4'te verilen, Ulusarslan ve Teke[5]'nin deneyinden kullanılan ve nümerik çalışmada kullanılacak olan akış hızlarına karşılık gelen kapsül hızları denklem 2.1 kullanılarak verilmiştir. Verilen kapsül hızları, karşılık gelen su hızlarında sınır şartı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.5 (2.1) eşitliği ve deneysel kapsül hızlarının karşılaştırılması [18] Asim[18] tarafından regresyon ile türetilen denklem 2.1 ile gerçek kapsül hız değerlerinin karşılaştırılması yine Asim tarafından oluşturulan Şekil 2.5'te verilmiştir. Kapsül hızlarının %90'ının denklem 2.1'de verilen doğru denkleminin $\pm 5\%$ aralığında olduğu tespit edilmiştir.

2.3.4 Çözücü Ayarları

Tablo 2.5'te çözücü parametreleri verilmiştir. Bu çalışmada kapsül çıkışının sabit olduğu varsayımı yapıldığından zamandan bağımsız, daimî (steady flow) seçilmiştir. Su akışının sıkıştırılmaz akış olması sebebiyle basınç bazlı çözücü tipi seçilmiştir. Ayrıca yerçekimi ivmesi oluşturulan akış geometrisinin oryantasyonu dikkate alınarak -y yönünde 9,81 m/s olarak tanımlanmıştır.

Tablo 2.5 Çözücü parametreleri

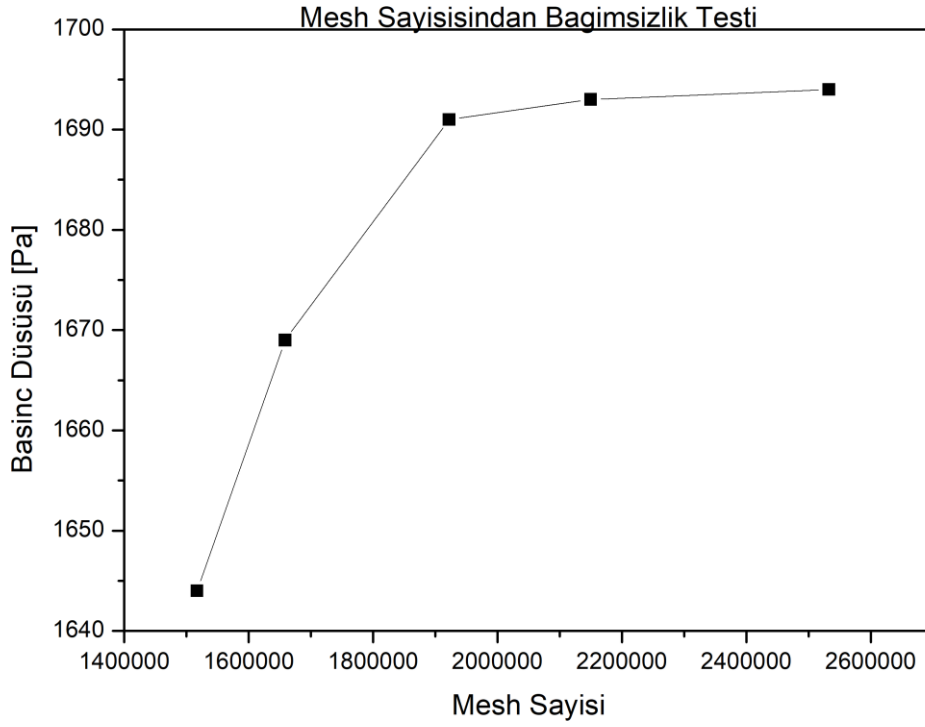
Çözücü	Basınç Tabanlı
Zaman	Daimî(steady)
Çözüm Algoritması	SIMPLE
Gradient	Green Gauss Node Based
Basınç	2 nd order upwind
Momentum	2 nd order upwind
Türbülans Kinetik Enerji	2 nd order upwind
Spesifik Dağılma Hızı	2 nd order upwind

Basınç-hız çiftinin çözümü için SIMPLE çözüm algoritması basit geometriler üzerindeki akışlar için güvenilir sonuçlar vermesi ve hızlı yakınsaması dolayısıyla seçilmiştir.

Basınç, momentum, türbülans kinetik enerji ve spesifik dağılma hızı için 2nd order upwind şeması seçilmiştir. 2nd order upwind şeması çözümün doğruluğunu arttırmaktadır.[23]

2.3.5 Mesh Elemanı Sayısından Bağımsızlık Testi

Akış hacminin mesh elemanlarına ayrılması aşamasında dikkat edilmesi gerekenlerin başında muhtemel gradyenlerin (basınç, hız vs) oluşabileceği yerlere daha sık mesh elemanı yerleştirmektir. Yapılan HAD çözümünde mesh elemanlarının sayısının artırılması çözümün doğruluğunu arttırmakta fakat aynı zamanda çözüm süresini de arttırarak zaman kaybına sebep olmaktadır. Çözümün doğruluğunun mesh sayısından bağımsız ve çözüm süresinin makul seviyelerde kalması için doğru çözümü veren en az mesh sayısı belirlenmelidir. Bu çalışmada belirlenmesi gereken parametre basınç düşüşü olduğundan belirli mesh sayılarında basınç düşüşleri tespit edilmiş ve basınç düşüşünün kararlı hale geldiği mesh sayısı tespit edilmiştir.

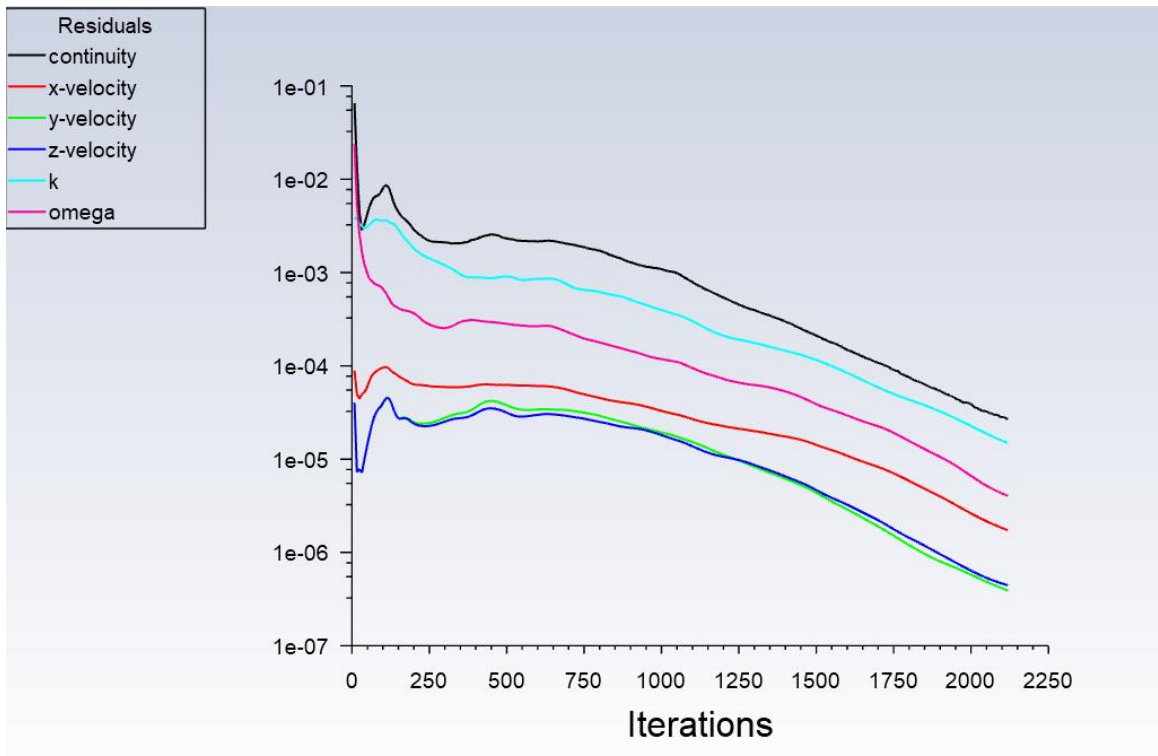


Şekil 2.6 Mesh sayısından bağımsızlık testi

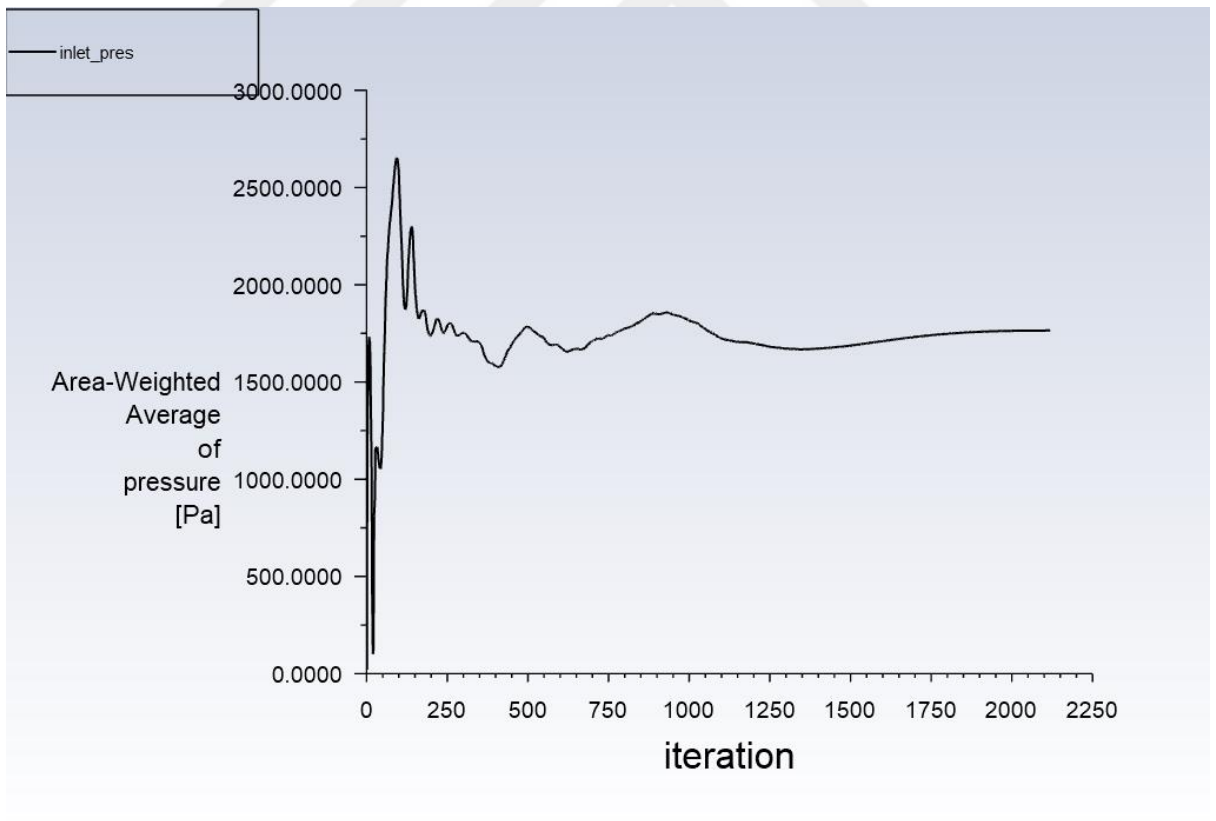
Mesh eleman sayısından bağımsızlık testi Şekil 2.6’da verildiği üzere $V_{av} = 1 \text{ m/s}$, $k=0,8$ ve 3 kapsül (%10.6 konsantrasyon) için 1.5, 1.7, 1.9, 2.1 ve 2.5 milyon mesh eleman sayılarında yapılmış ve 1,9 ve 2,1 milyon mesh eleman sayısında yapılan çözüm sonuçlarında %1,3 oranında bir değişim olduğu tespit edilmiştir. 2,1 milyon mesh eleman sayısının akış özelliklerini tahmin etmede yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

2.3.6 Yakınsama Kriteri

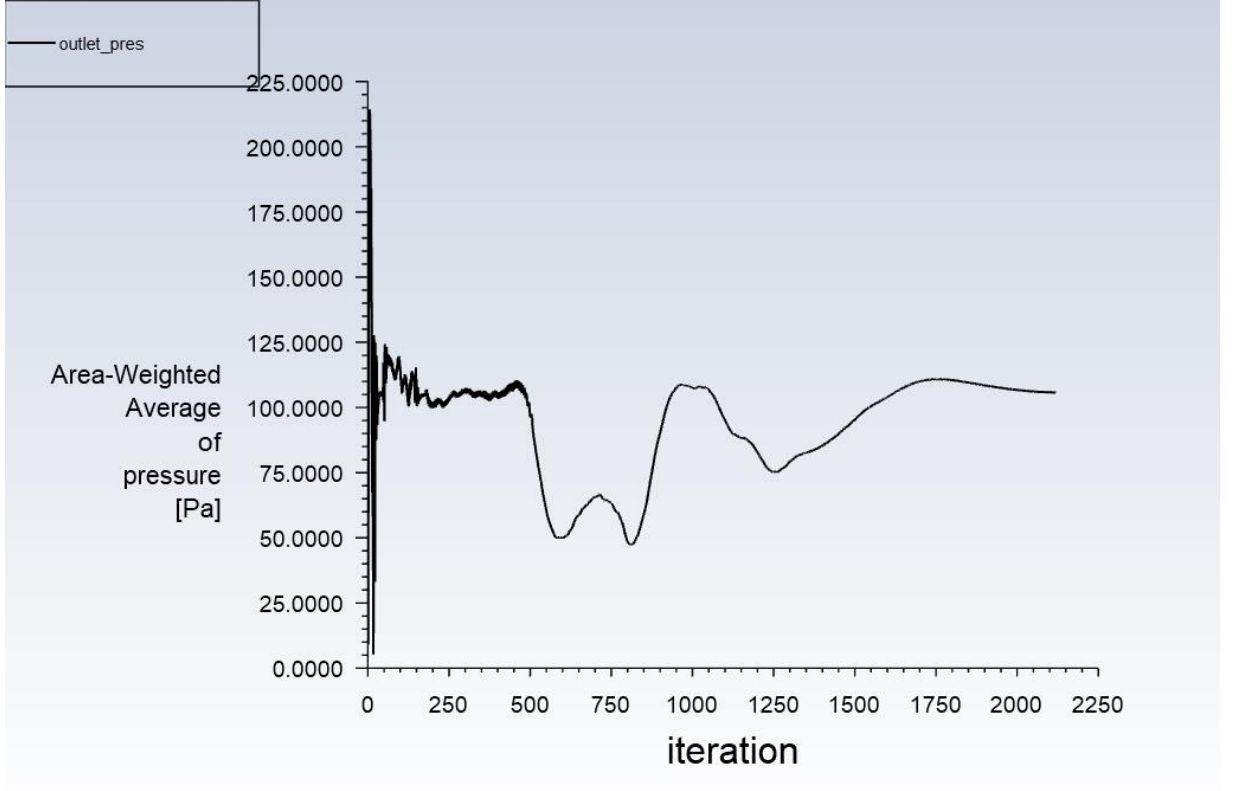
Akış parametrelerinin doğruluğu açısından yakınsayan bir çözüme ulaşmak önemlidir. ANSYS 2021 simülasyon programında varsayılan yakınsama kriteri momentum, süreklilik ve türbülans modeli parametreleri için 0,001’dir. Yapılan analizlerde yakınsama kriteri momentum, süreklilik ve türbülans modeli parametreleri için 1×10^{-4} olarak tanımlanmış, giriş ve çıkış basıncının ise son 30 iterasyonda hata sınırı 1×10^{-3} olarak tanımlanmıştır.



a)



b)



c)

Şekil 2.7 Yakınsama kriterini sağlamış çözüm a) momentum, süreklilik ve türbülans parametrelerinin kalıntı değerleri b) giriş basıncı c) çıkış basıncı

Şekil 2.7'de giriş, çıkış basıncının stabil hale geldiği ve momentum, süreklilik ve türbülans modeli parametrelerinin kalıntı değerlerinin oluşturulan yakınsama kriterini sağladığı çözüm verilmiştir.

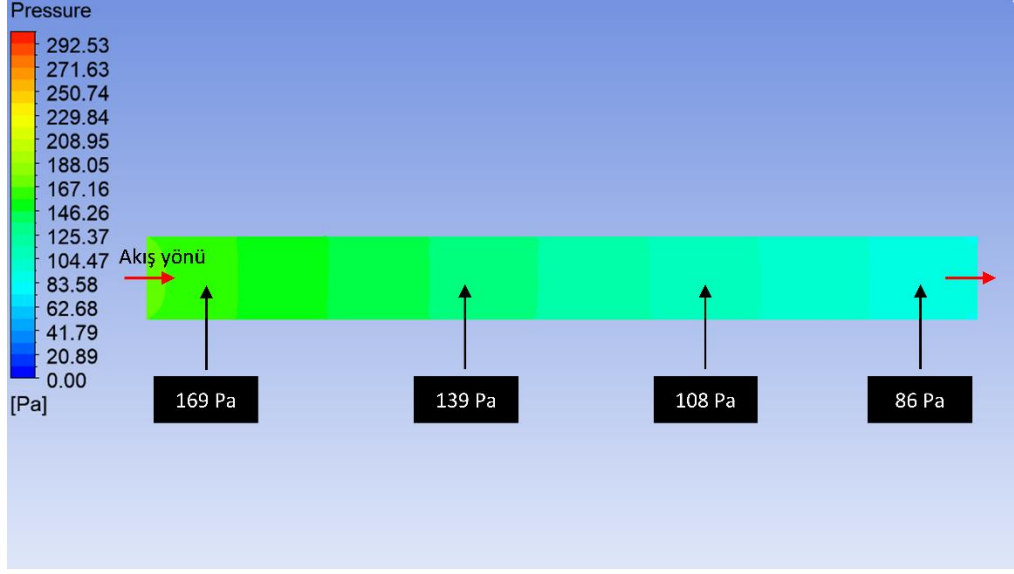
3.1 Tek Faz Akışına Ait Bulgular

Kapsül akışına geçmeden çözümlerin tek faz sıvı akışında verdiği sonuçların doğruluğunu teyit etmemiz kapsül akışına ait bulunan parametrelerin doğruluğu açısından önem arz etmektedir.

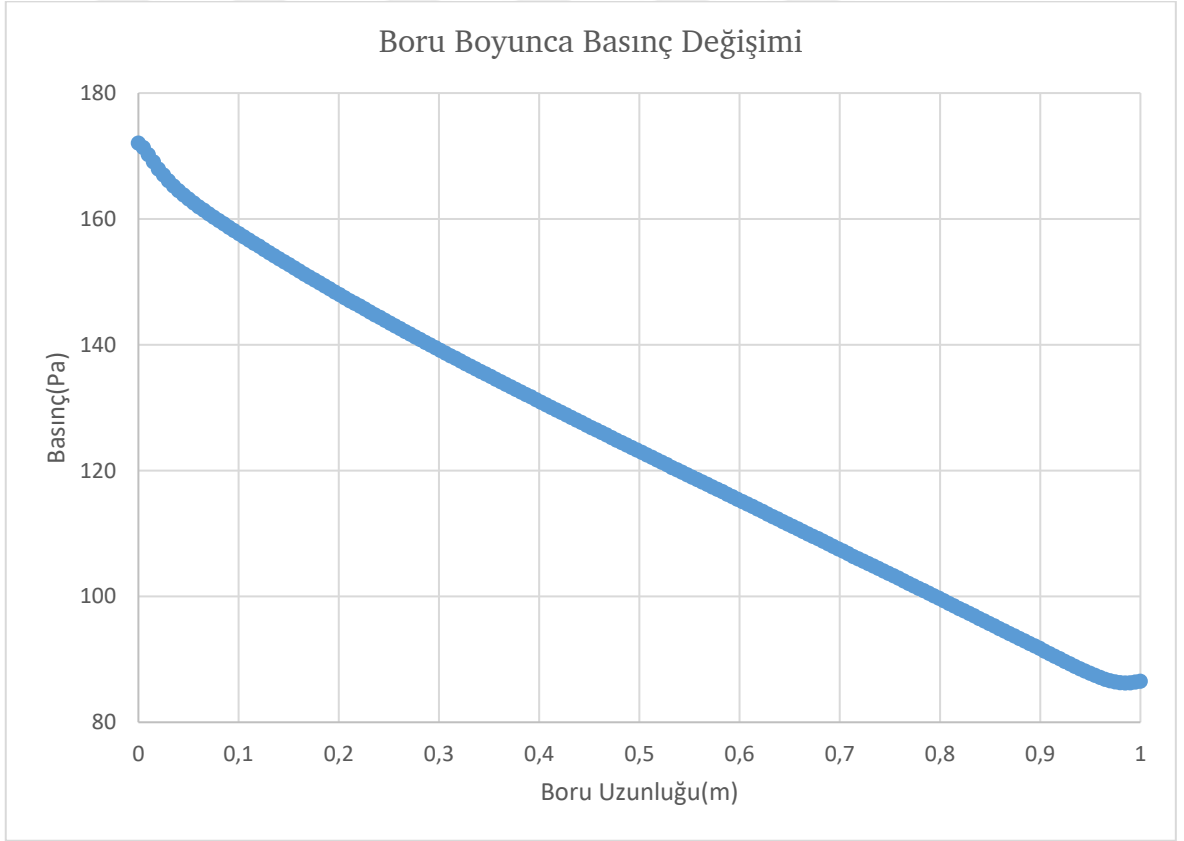
Tablo 3.1 Tek faz akışta oluşan basınç kayıplarının HAD ve ampirik formül ile karşılaştırılması

V (m/s)	Re	f	ΔP (Darcy-Weisbach) (Pa/m)	ΔP (HAD) (Pa/m)	Hata (%)
0,2	22426,96	0,0251705	5,02405	5,03412	1,7
0,4	44853,93	0,0214066	17,09105	17,1253	0,35
0,6	67280,89	0,0195714	35,15821	35,2287	0,84
0,8	89707,86	0,0184043	58,77602	58,8938	1,32
1	112134,83	0,0175671	87,65993	87,8356	1,78
1,2	134561,79	0,0169234	121,6049	121,849	2,27
1,4	156988,76	0,0164054	160,4523	160,774	2,6
1,6	179415,73	0,0159752	204,074	204,483	3,07

Tablo 3.1’de HAD hesaplaması ve ampirik basınç kayıp formülü ile bulunan basınç kayıp değerlerinin çok yakın olduğu görülmüştür.

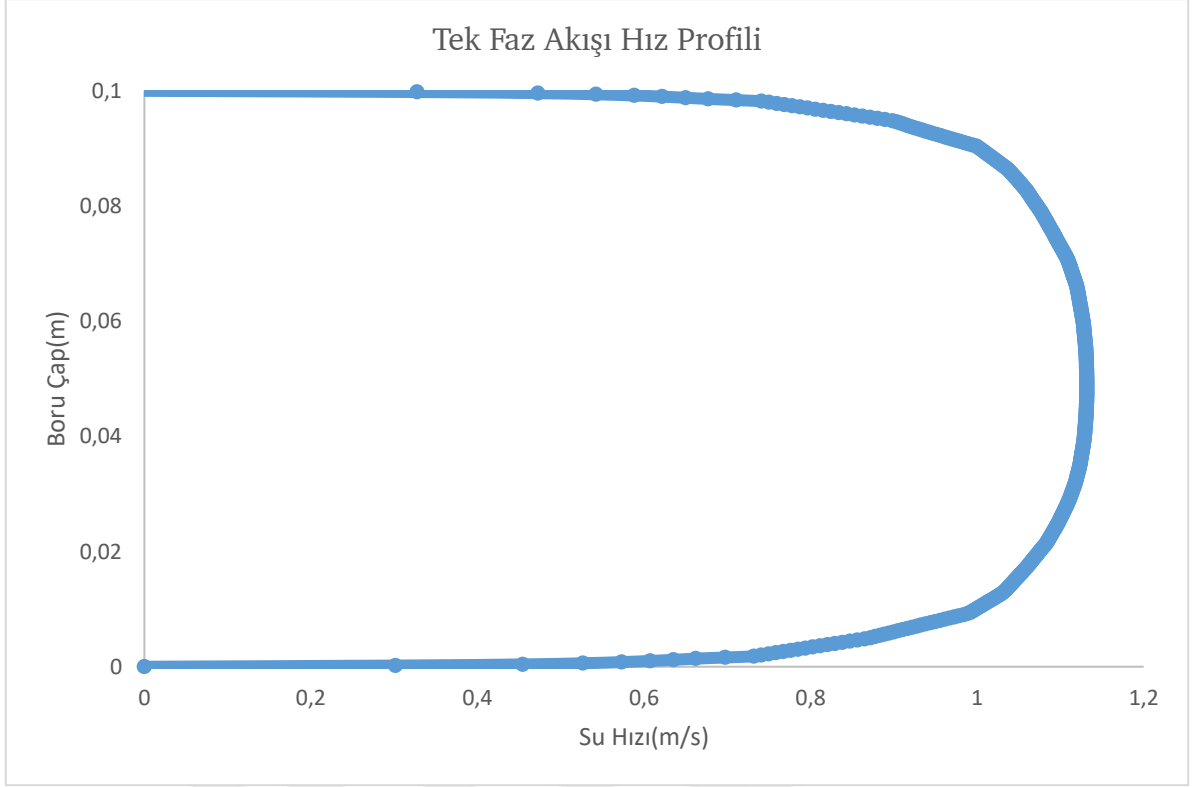


Şekil 3.1 Tek faz akış basınç konturları



Şekil 3.2 Tek faz akışı test bölümü boyunca basınç değişimi

Şekil 3.1 ve 3.2'de sırasıyla verilen tek faz akışta oluşan basınç konturları ve basınç değişim grafiği verilmiştir. Denklem 1.7'de verilen basınç düşüş ilişkisinde görüleceği gibi boru uzunluğu ve basınç düşüşü arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Şekil 4.2'de ise bu lineer ilişki gösterilmiştir.

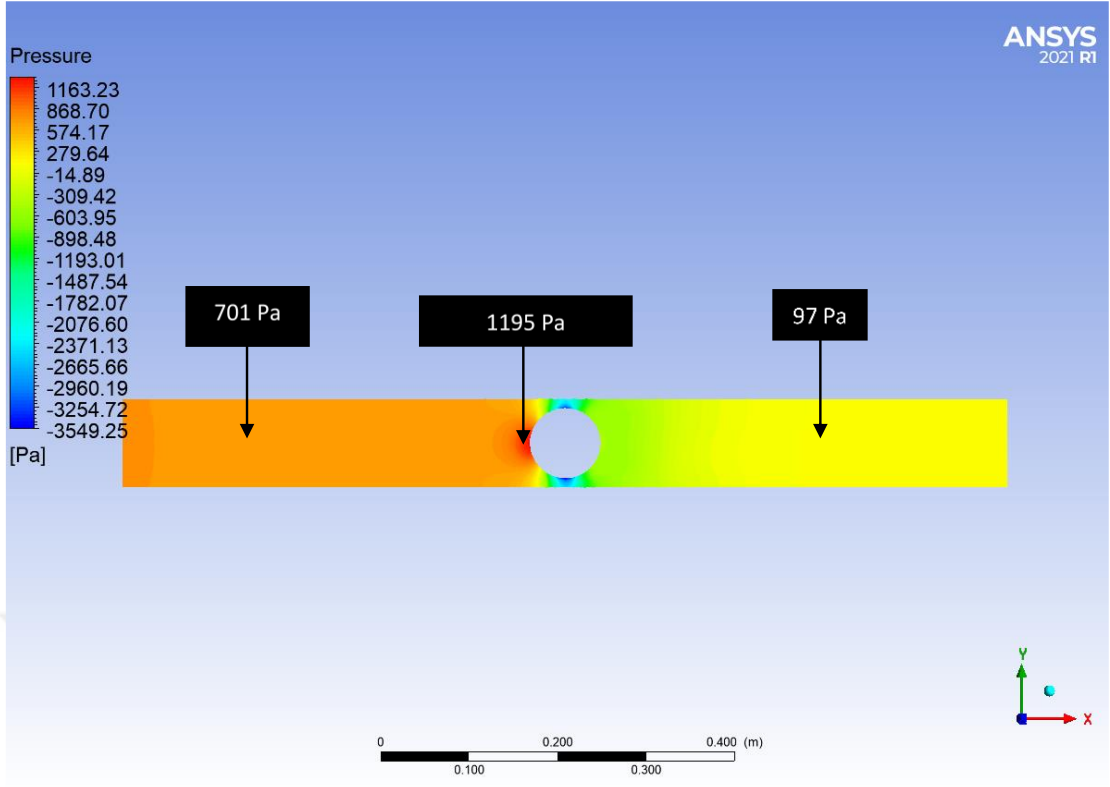


Şekil 3.3 Test bölgesi hız profili

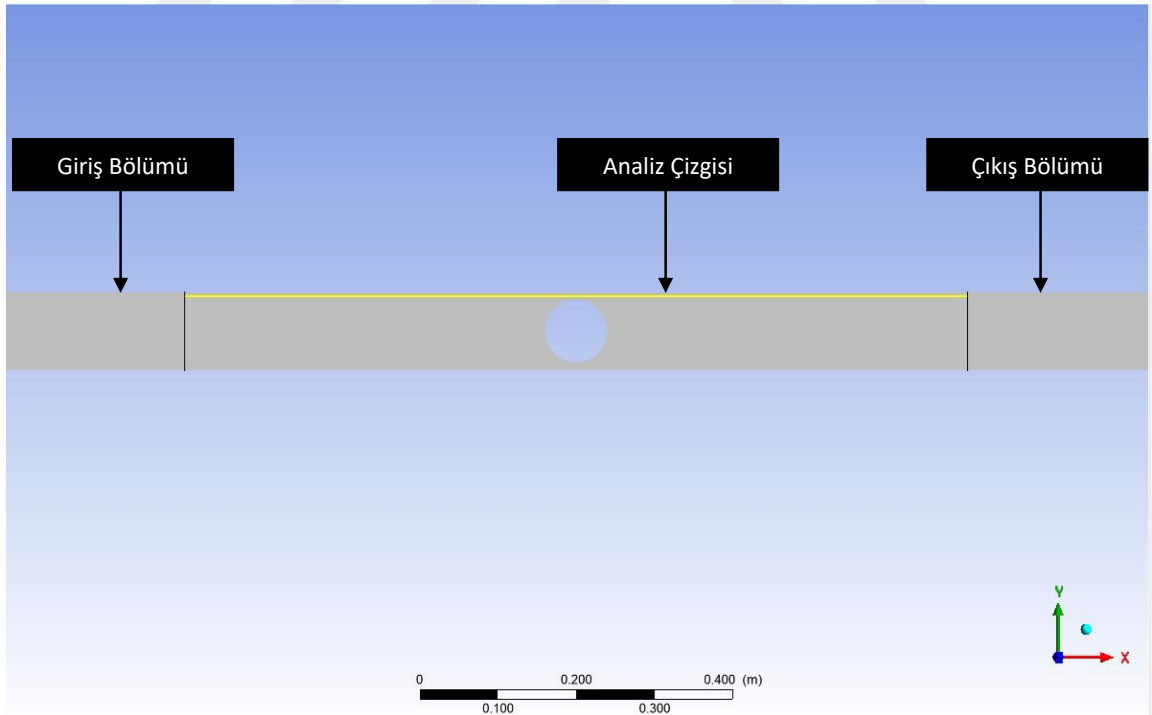
Şekil 3.3'te tek faz akışı test bölgesindeki hız profili verilmiştir. Türbülanslı akışlarda duvar ve su teması olan bölgede kaymazlık koşulundan dolayı hız sıfırdır. Ardından ani hızlanma gerçekleşmekte ve boru merkezinde en yüksek hız görülmektedir. Türbülanslı sınır tabaka içerisinde hızın ani artışı gözlenmiştir.

3.2 Kapsül Akışına Ait Bulgular

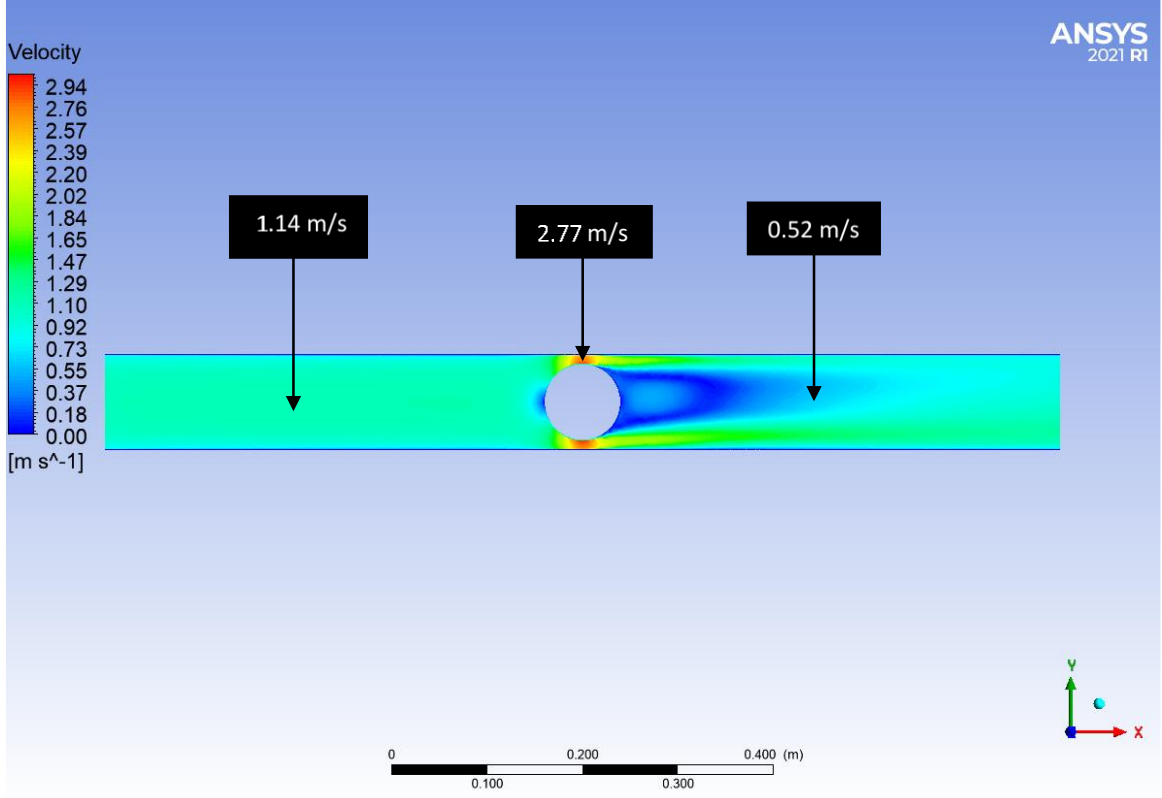
Şekil 3.4'de $k = 0,8$ ve $V_{av} = 1 m/s$ için basınç düşüşü net bir şekilde görülmektedir. Kapsül akışının yerel ve global analizi için test bölümü girişi, kapsül çevresi, test bölümünün çıkışında basınç ve hız değerlerinin boru boyunca bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 3.5'te verilen boru yüzeyi ve kapsül arasındaki mesafenin ortasına yatay olarak ve test bölümü boyunca uzanan analiz çizgisi yerleştirilmiştir. Analiz çizgisi boyunca oluşturulacak basınç ve hız grafikleri kapsül varlığının basınç ve hız üzerindeki etkilerini anlamamıza yardımcı olacaktır.



Şekil 3.4 $k = 0,8$ ve $V_{av} = 1 \text{ m/s}$ için basınç dağılımı

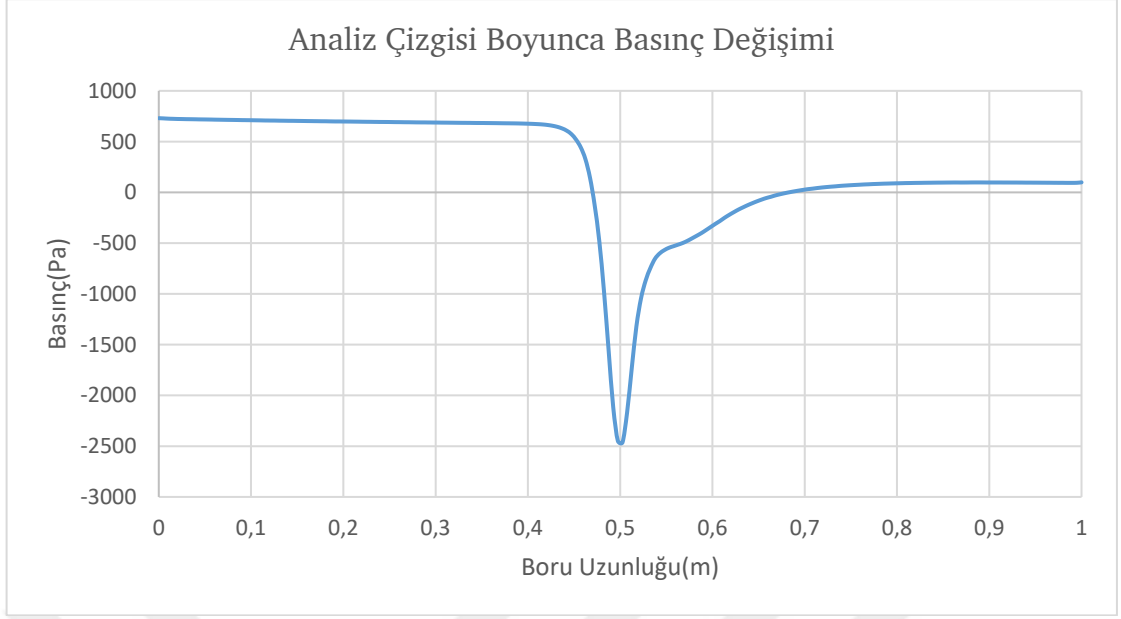


Şekil 3.5 Oluşturulan analiz çizgisinin konumu

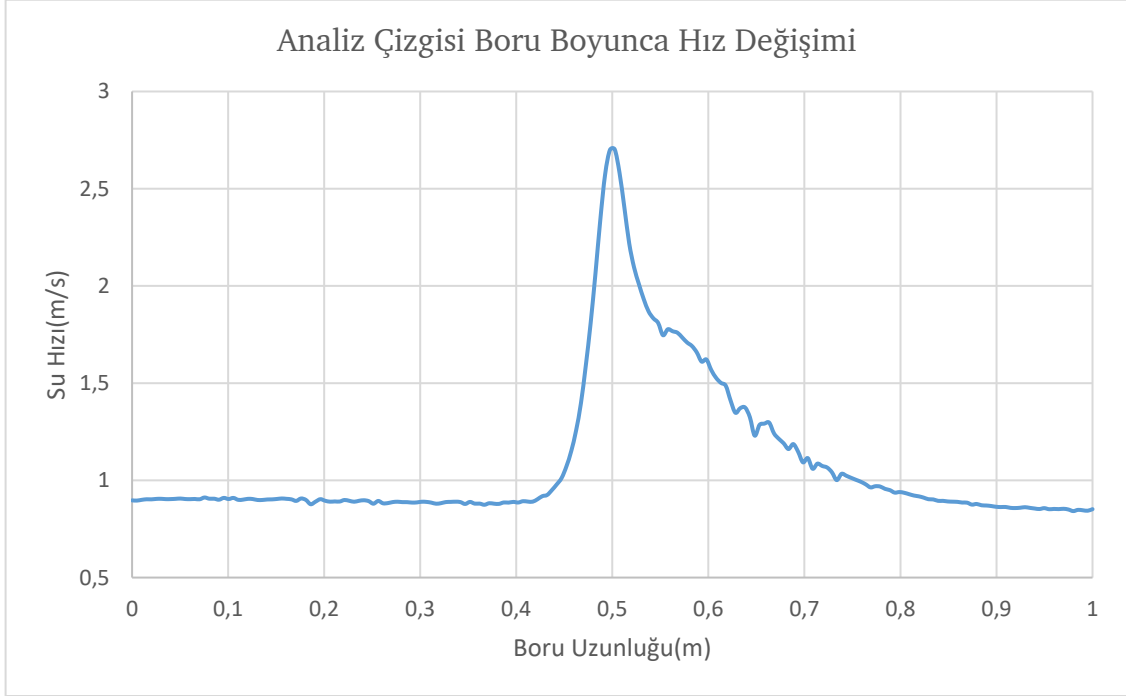


Şekil 3.6 $k = 0,8$ ve $V_{av} = 1m/s$ için hız dağılımı

Şekil 3.4 ve 3.6'da sırasıyla verilen $k=0,8$ ve $V_{av} = 1m/s$ olduğu durum için basınç ve hız konturları verilmiştir. Tek faz sıvı akışı için oluşturulmuş olan Şekil 3.1 ile kapsül akışının olduğu Şekil 3.4 karşılaştırılacak olursa küresel kapsül varlığının basınç dağılımı üzerine etkisi anlaşılabilir. Kapsül öncesinde 701 Pa olan statik basınç kapsül yakınında 1195 Pa seviyelerine çıkmış, kapsül sonrasında ise 97 Pa seviyelerine kadar bir basınç düşüşü oluşmuştur. Şekil 3.6'da verilen hız dağılımında kapsül öncesi hız 1,14 m/s seviyesinde iken kapsül ve boru duvarı arasında hızlı bir alan azalması ile 2,77 m/s'ye ulaşmış ardından ani bir genişleme ile 0,52 m/s'ye düşmüştür. Bu ani hızlanma ve yavaşlamalar kapsül etrafında kayma gerilmeleri yaratmaktadır. Fakat oluşan bu kayma gerilmeleri birbirlerine ters yönde ve eşit büyüklükte olduklarından sönmülmekte ve oluşan kuvvetlerin bileşkesi sonucunda kapsüller boru merkezine yerleşerek doğrusal hareket yapmaktadır.



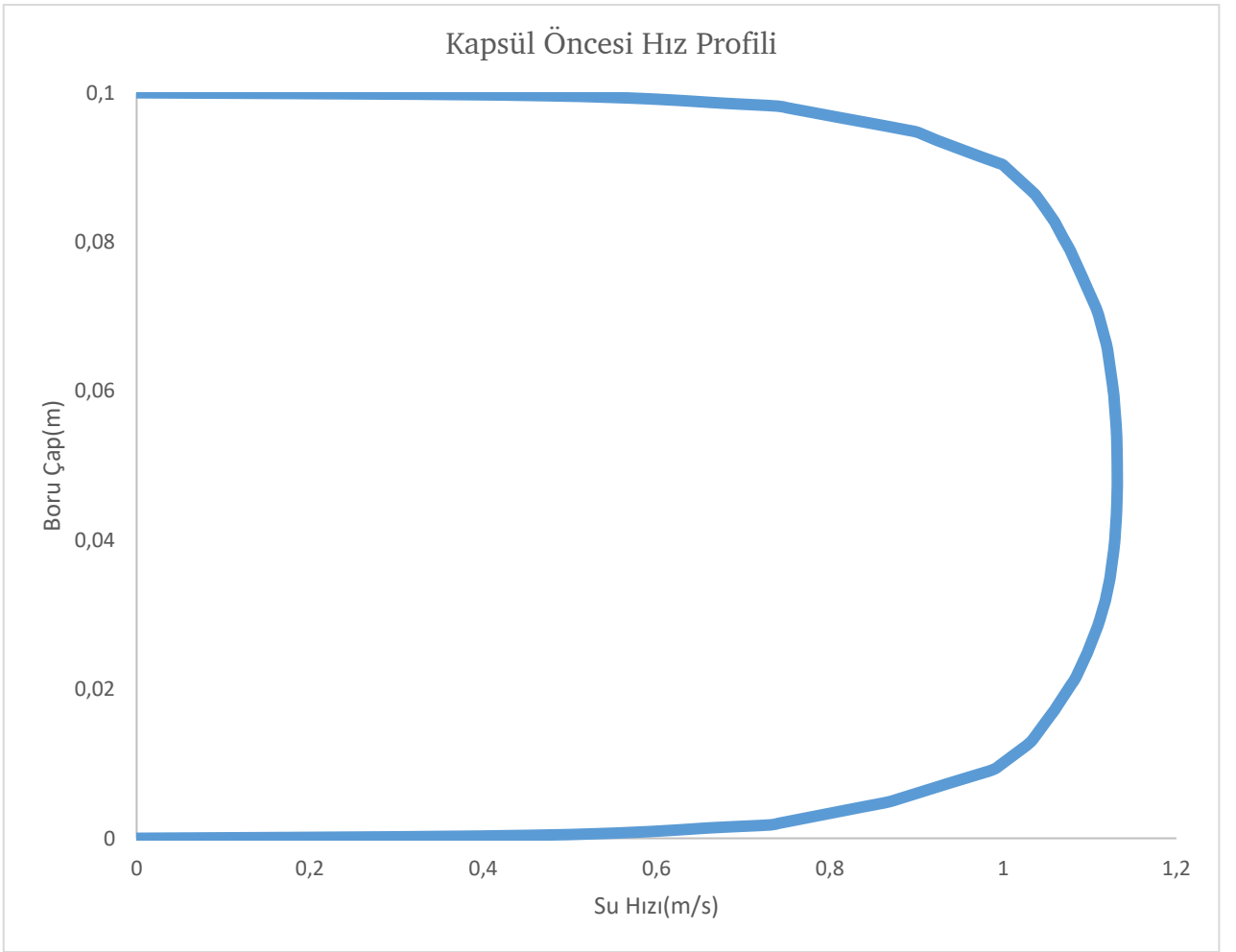
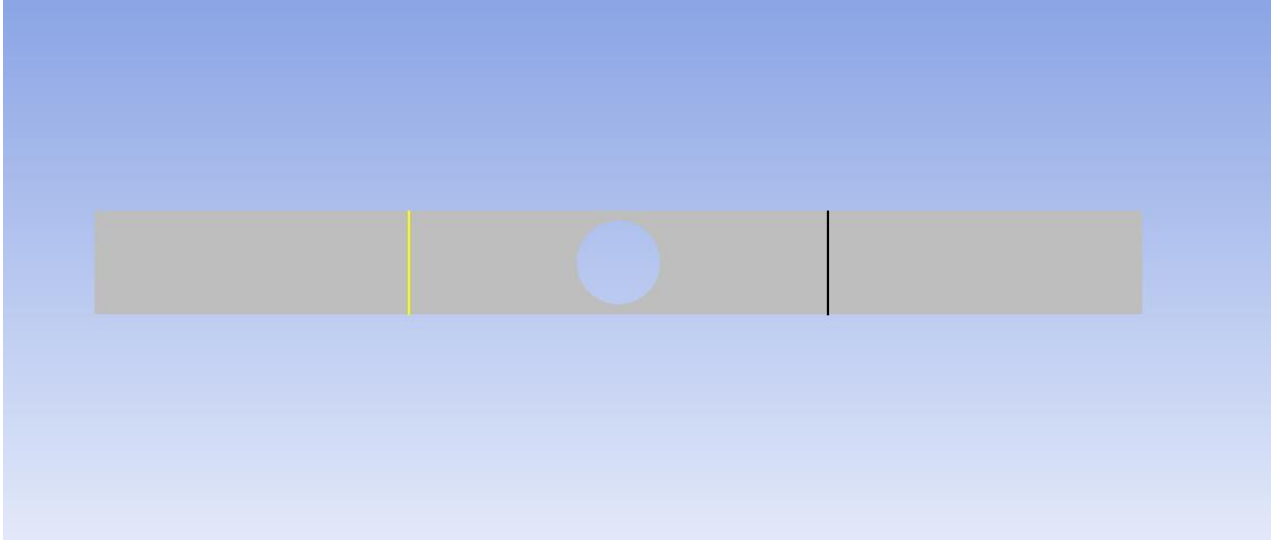
a)



b)

Şekil 3.7 $k = 0,8$ ve $V_{av} = 1m/s$ için analiz çizgisi boyunca a) basınç ve b) hız değişimleri

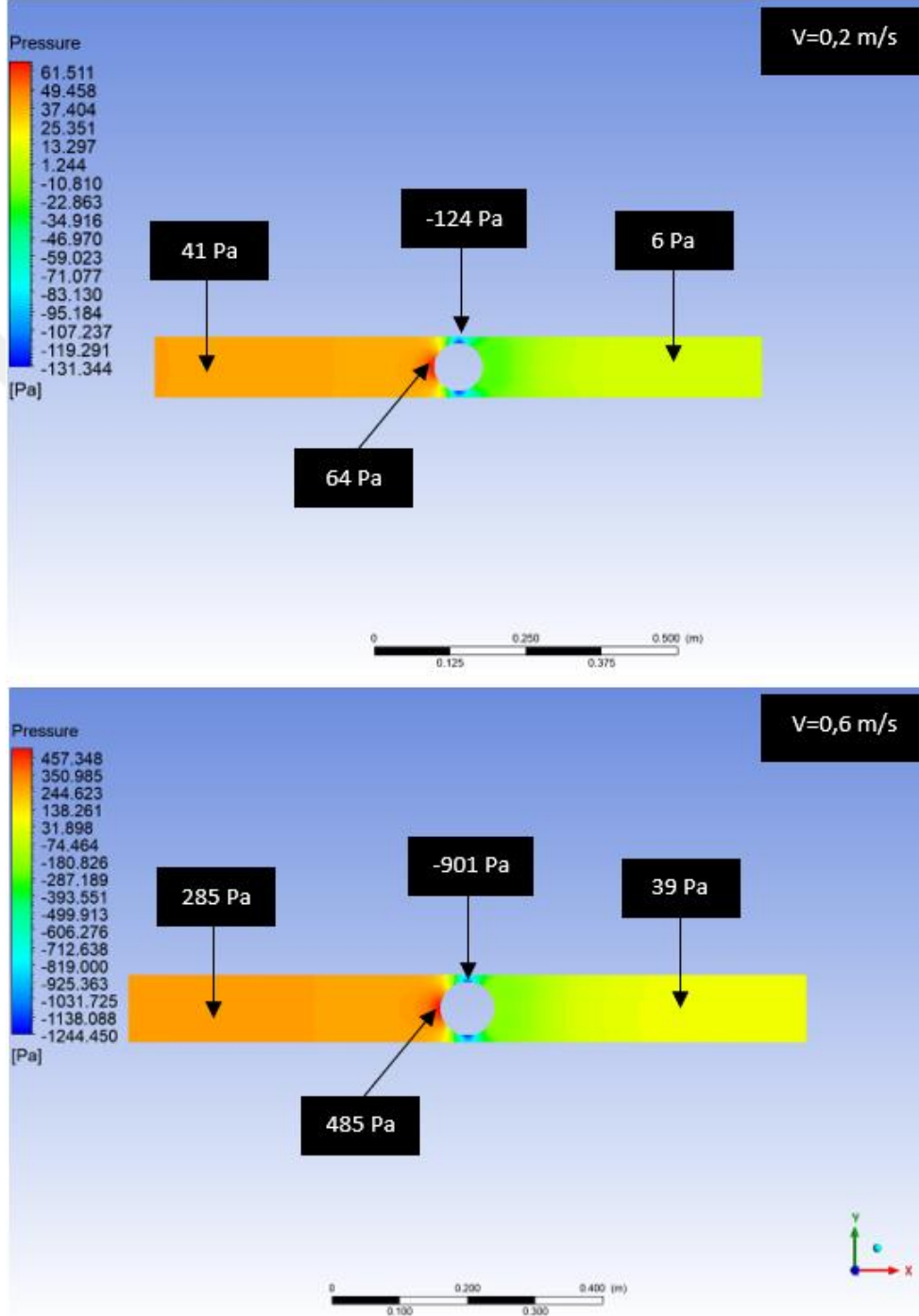
Şekil 3.7 (a) ve (b)'de sırasıyla analiz çizgisi boyunca basınç ve hız değişimleri verilmiştir. Şekil 3.7 (a)'da görüldüğü üzere kapsülün bulunduğu 1,5 m konumunun öncesinde ve sonrasında basınç ani olarak değişmektedir, aynı şekilde hız kapsül etrafında ani değişime uğramaktadır. Kapsül öncesi ve sonrası arasındaki kinetik enerji farkı ise iş olarak kapsül duvarına etki etmektedir ve kapsül hareketini oluşturmaktadır.



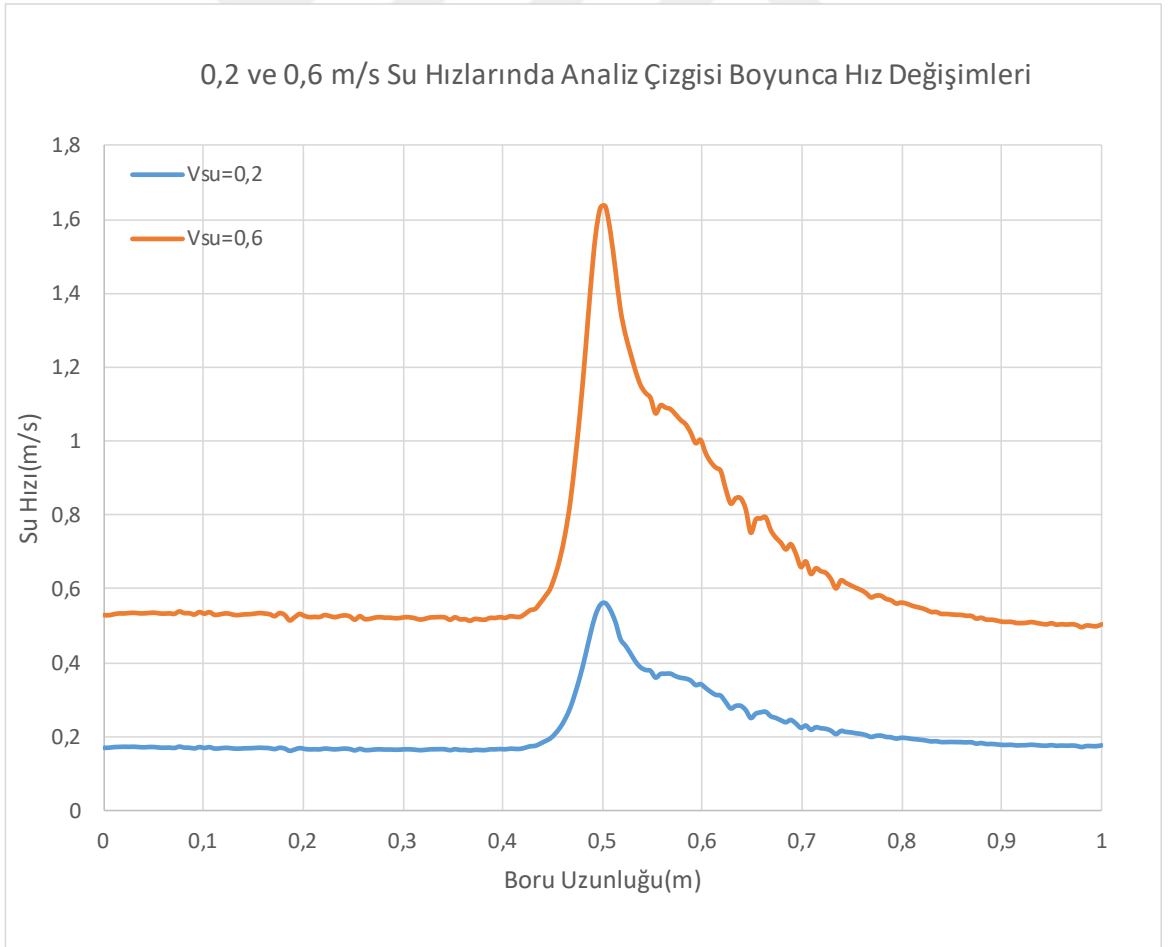
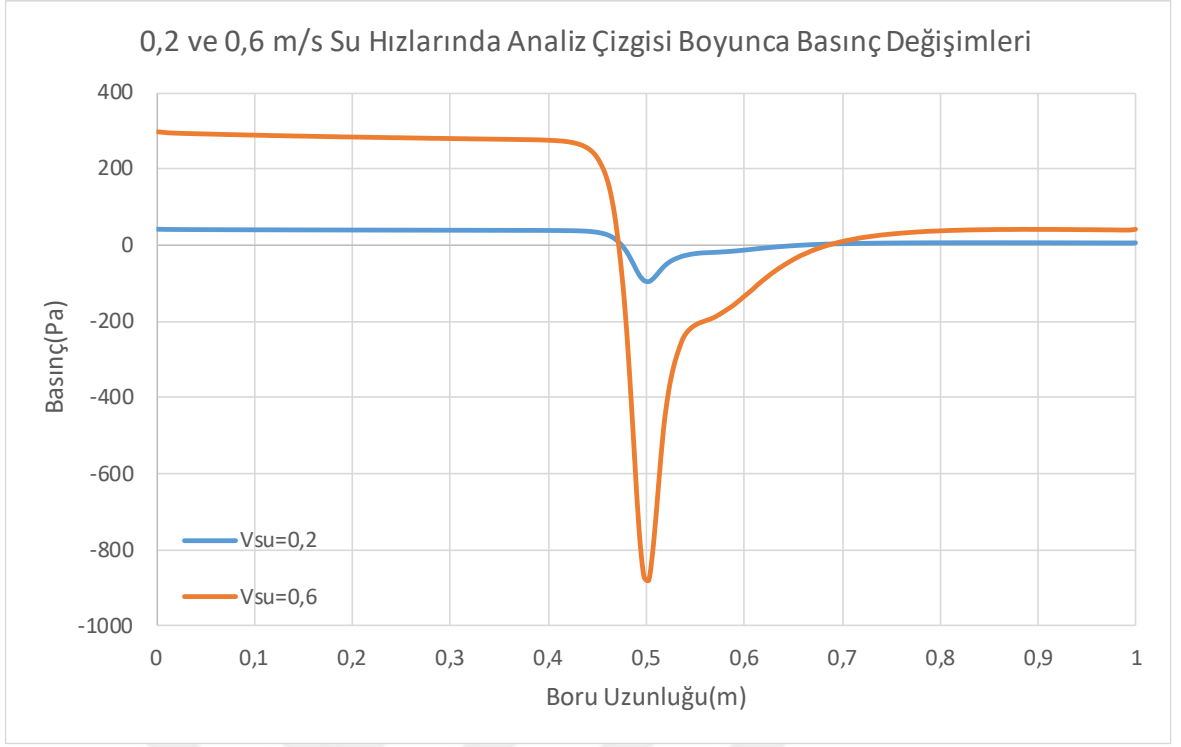
a)

3.3 Ortamala Hızın Akış Parametrelerine Etkisi

Su hızının etkilerini açıklamak amacıyla $k=0,8$ olduğu durumda ve $V_{av} = 0,2$ ve $0,6$ m/s değerleri karşılaştırılarak su hızının kapsül akış parametrelerine etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.9 $k = 0,8$ ve $V_{av} = 0,6$ m/s için basınç konturları



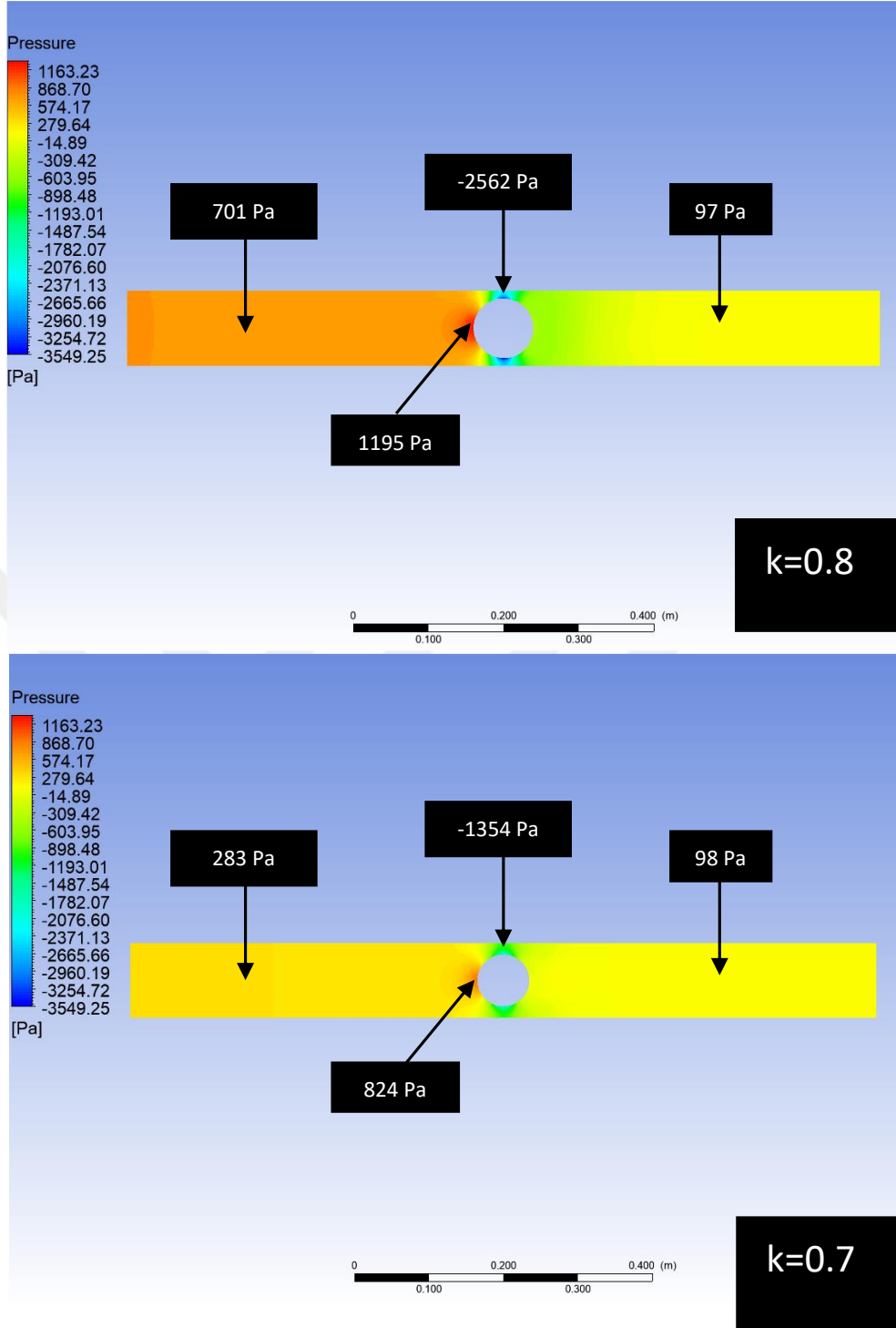
Şekil 3.10 $k = 0,8$ ve $V_{av} = 0,2$ ve $0,6$ m/s için analiz çizgisi boyunca hız dağılımı

Şekil 3.9'da verilen $V_{av} = 0,2$ ve $0,6$ için basınç değişimlerinden Şekil 3.4 ve Şekil 3.6'da verilen $V_{av} = 1\text{ m/s}$ 'deki durum ile aynı davranışın sergilendiği görülmektedir. Kapsül öncesinde 285 Pa olan değer kapsül öncesinde 485 Pa seviyesine çıkmakta ardından boru ile kapsül arasında hızlanmanın etkisiyle -901 Pa seviyesine düşmektedir. Ardından kapsül arkasında ani genişleme ile yavaşlayan akışkan 39 Pa seviyesinde kalmaktadır. Şekil 3.10 a) ve b)'de sırasıyla analiz çizgisi boyunca basınç ve hız değişimleri $V_{av} = 0,2$ ve $0,6$ m/s değerleri için karşılaştırma amaçlı verilmiştir. $V_{av} = 0,6$ m/s olduğu durumda basınç düşüşlerindeki ve kapsül çevresindeki hız gradyanlerinin arttığı gözlenmiştir.

Şekil 3.4 ve Şekil 3.6'da verilen, ortalama hızın 1 m/s olduğu durum ve Şekil 3.9'da verilen ortalama hızın $0,6$ m/s olduğu durum karşılaştırıldığında kapsül öncesi basıncın artan hızın etkisiyle %171 artış gösterdiği, kapsül sonrasında ise %148 azaldığı gözlenmiştir.

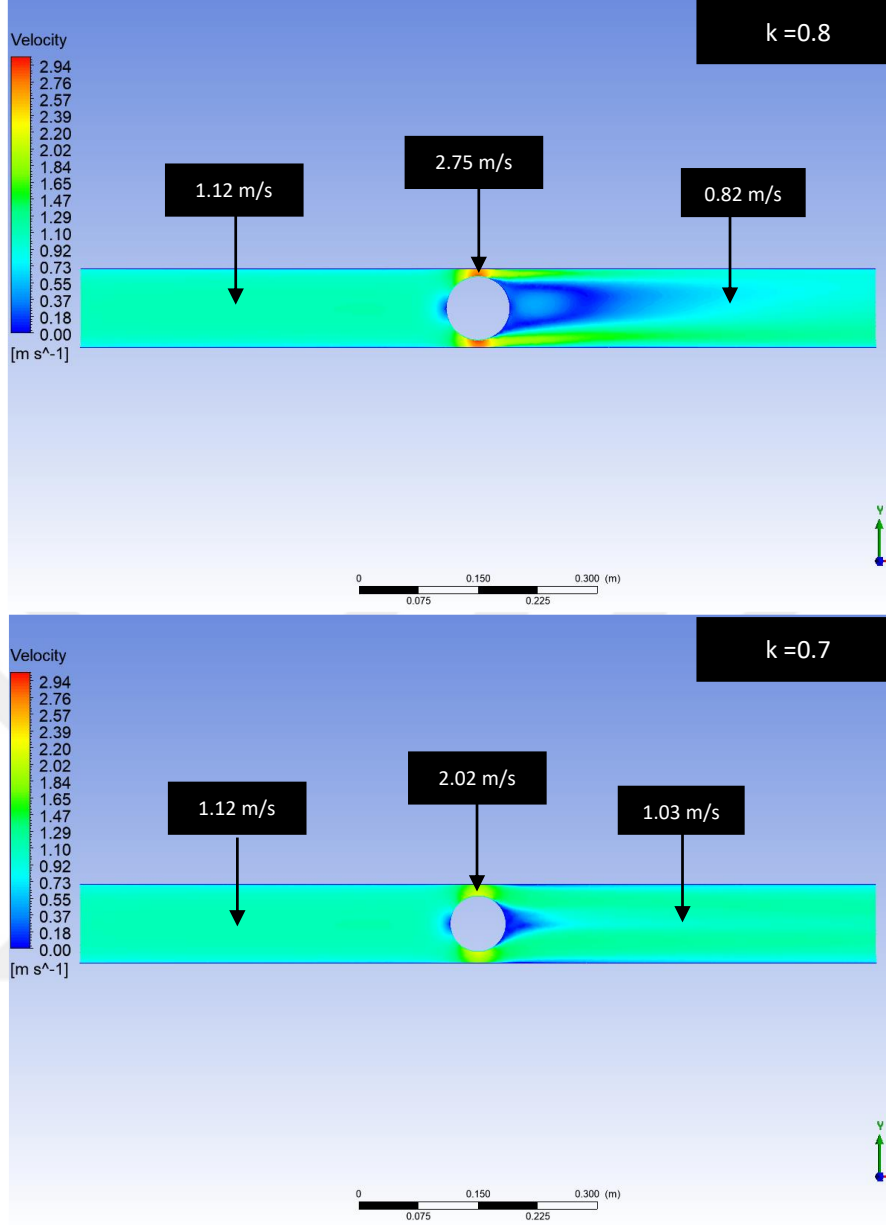
3.4 Çap Oranının Akış Parametrelerine Etkisi

Kapsül çapının akış parametrelerine etkisi incelemek amacıyla $k = 0,7$ ve $0,8$ olduğu durumlar ve $V_{av} = 1$ m/s olduğu durumda karşılaştırılmıştır.



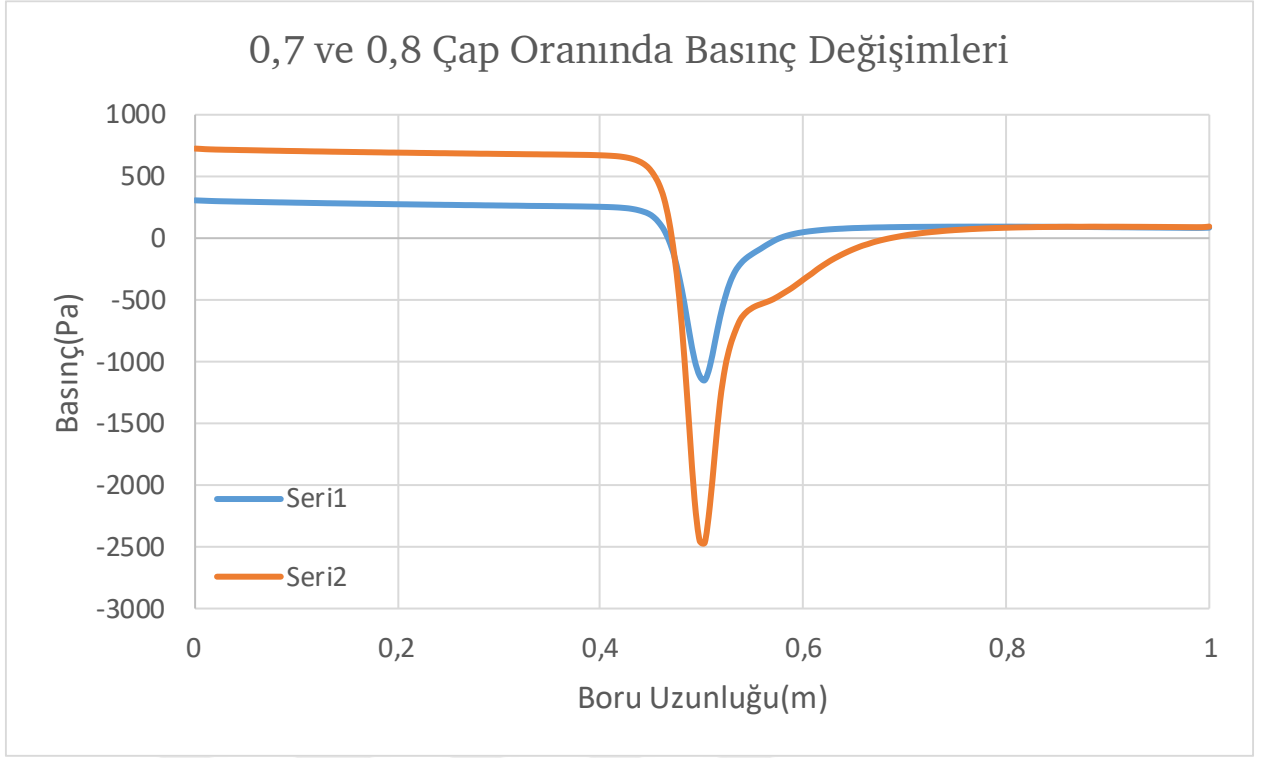
Şekil 3.11 $V_{av} = 1 \text{ m/s}$ için $k = 0,8$ ve $0,7$ durumunda basınç konturları

Şekil 3.11'de $k=0,8$ kapsül öncesi basıncın 701 Pa olduğu kapsül sonrasında ise 98 Pa seviyesinde olduğu görülmüştür. Bu değerler $k=0,7$ ile karşılaştırıldığında kapsül öncesindeki basıncın %147 arttığı ve kapsül sonrasında ise sabit kaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.12 $V_{av} = 1\ m/s$ için $k = 0,8$ ve $0,7$ hız konturları

Şekil 3.12’te $V_{av} = 1\ m/s$ ve $k = 0,8$ ve $0,7$ için verilen hız konturlarından $k = 0,8$ durumunda kapsül ve boru arasında %26’lık artış olduğu tespit edilmiştir. Boru çapındaki artışın hız boru içerisinde hız dağılımı artırma etkisi gösterdiği görülmektedir.

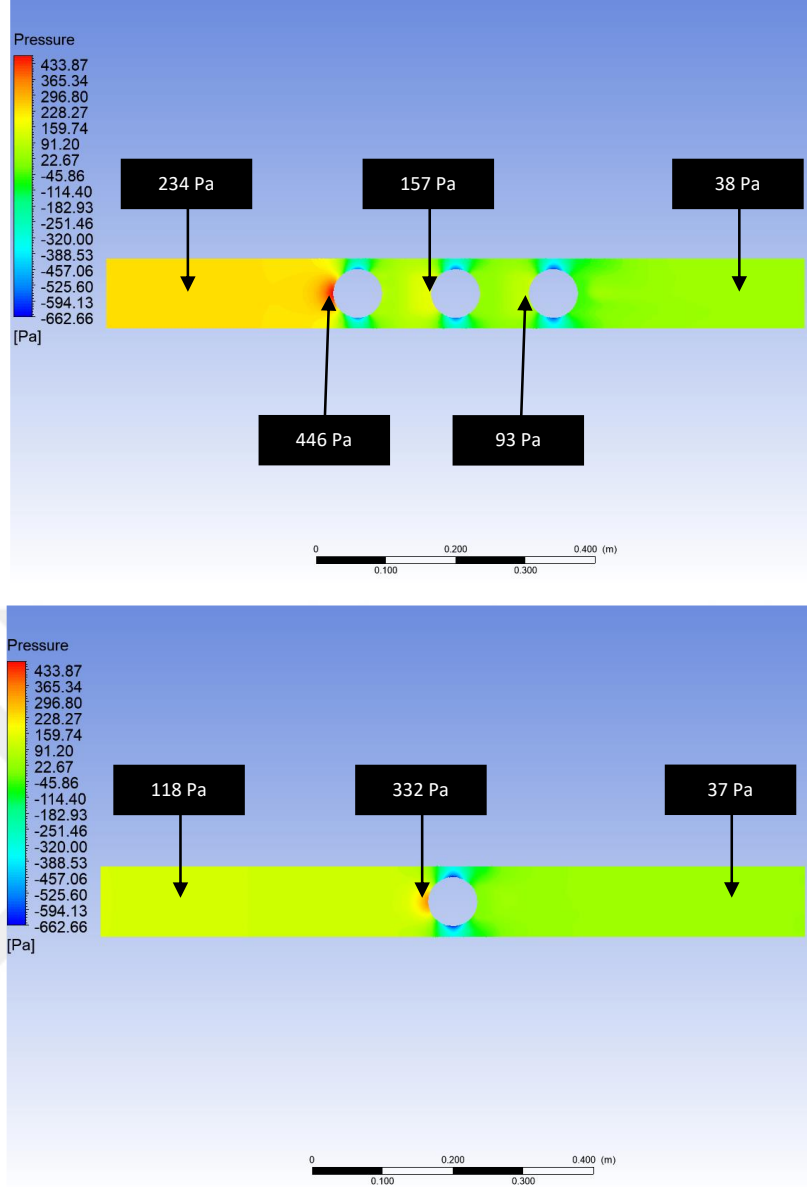


Şekil 3.13 $V_{av} = 1 \text{ m/s}$ için $k = 0,8$ ve $0,7$ analiz çizgisi boyunca basınç değişimleri

Şekil 3.13'te $k = 0,7$ ve $0,8$ için verilen analiz çizgisi boyunca basınç değişimlere bakıldığında kapsül çap oranının arttıkça boru içerisinde basınç farklarının artma trendi gözlenmektedir. Yapılan analizlerde çap oranının artmasının basınç düşüşlerini arttırdığı tespit edilmiştir.

3.5 Kapsül Konsantrasyonunun Akış Parametrelerine Etkisi

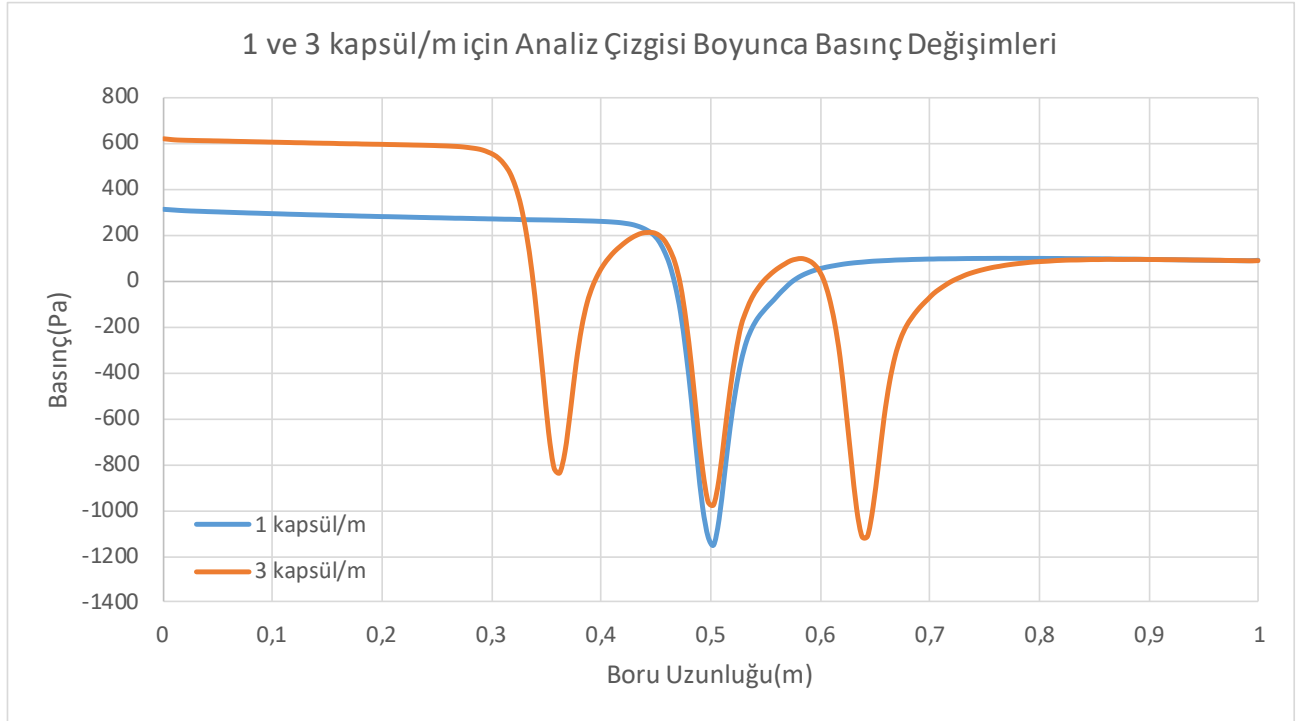
Kapsül konsantrasyon etkisi $k = 0,7$, $V_{av} = 0,6 \text{ m/s}$ için 1 ve 3 kapsül akışları karşılaştırılarak incelenmiştir.



Şekil 3.14 $k = 0,7$ ve $V_{av} = 0,6 \text{ m/s}$ için 1 ve 3 kapsül akışları için basınç konturları

Şekil 3.14 $k = 0,7$, $V_{av} = 0,6 \text{ m/s}$ olduğu, 1 ve 3 kapsül akışı için basınç gradyenlerini göstermektedir. 3 kapsül bulunan analizde kapsüllerin merkezleri arası $2*d$ ($2*$ kapsül çapı) olacak şekilde konumlandırılmıştır. Basınç değişimlerinin davranışı tek kapsül akışındakine benzerdir. 3 kapsül akışında kapsül öncesi basınç 234 Pa, birinci, ikinci ve üçüncü kapsüllerin yüzeyinde sırasıyla 446, 157 ve 93 Pa olarak tespit edilmiştir. Kapsüllerin sonrasında ise 38 Pa basınç tespit edilmiştir. %10,6 kapsül konsantrasyonu değerine karşılık gelen

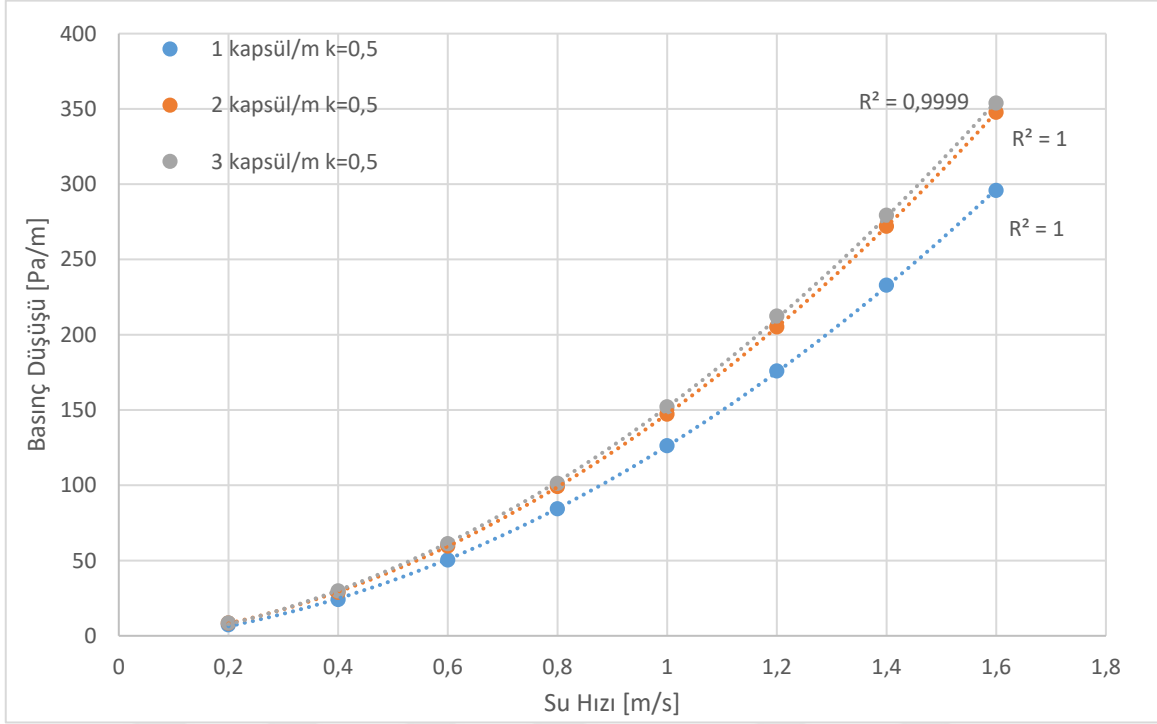
3 kapsül akışında kapsüller öncesi basınçta %98 artış gözlenmiştir. Kapsül sonrası basıncın ise sabit kaldığı tespit edilmiştir.



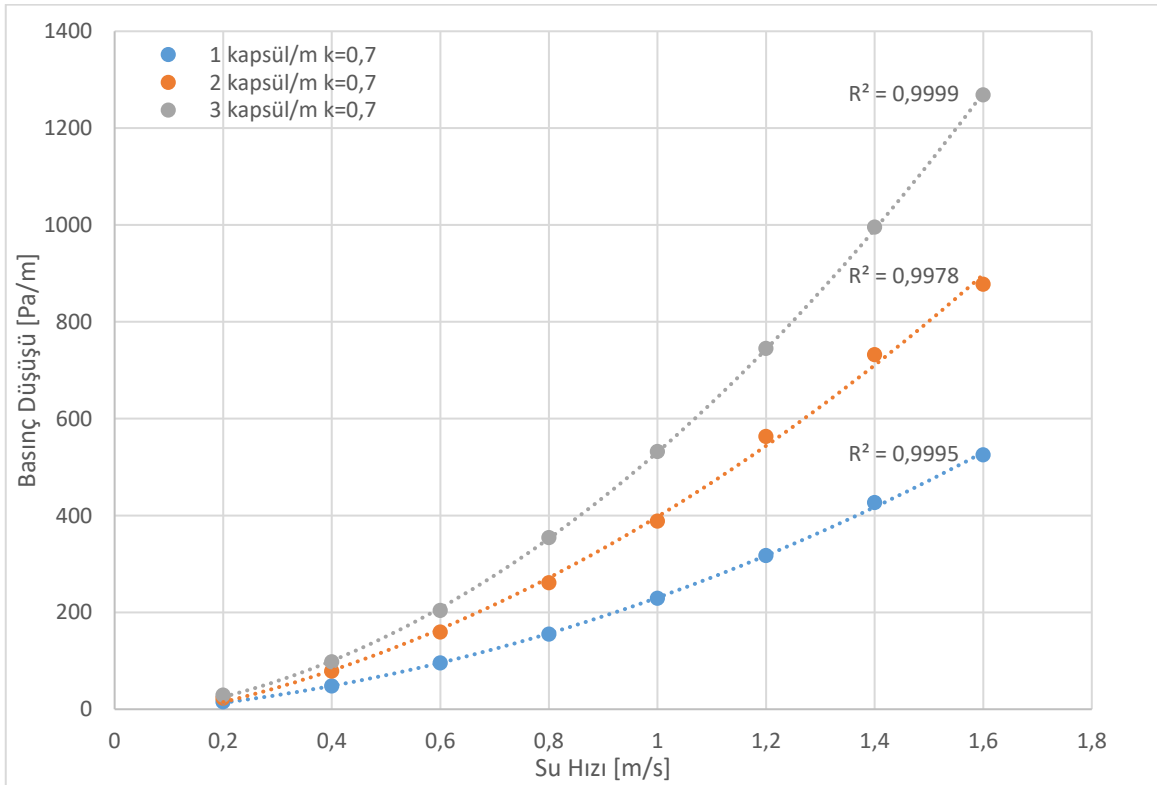
Şekil 3.15 $k = 0,7$, $V_{av} = 0,6 \text{ m/s}$ için 1 ve 3 kapsül akışlarının analiz çizgisi boyunca basınç değişimleri

Şekil 3.15'da analiz çizgisi boyunca basınç değerleri verilmiştir. 3 kapsül için çizilen eğride her bir kapsüle denk gelen konumlarda kapsüllere iletilen akış işi dolayısıyla basınç düşüşleri görülmektedir. Kapsül sayısının artışı 95 Pa fazladan basınç kaybına neden olmaktadır. Analizler sonucunda konsantrasyon artışının basınç düşüşlerini arttırdığı gözlemlenmiştir.

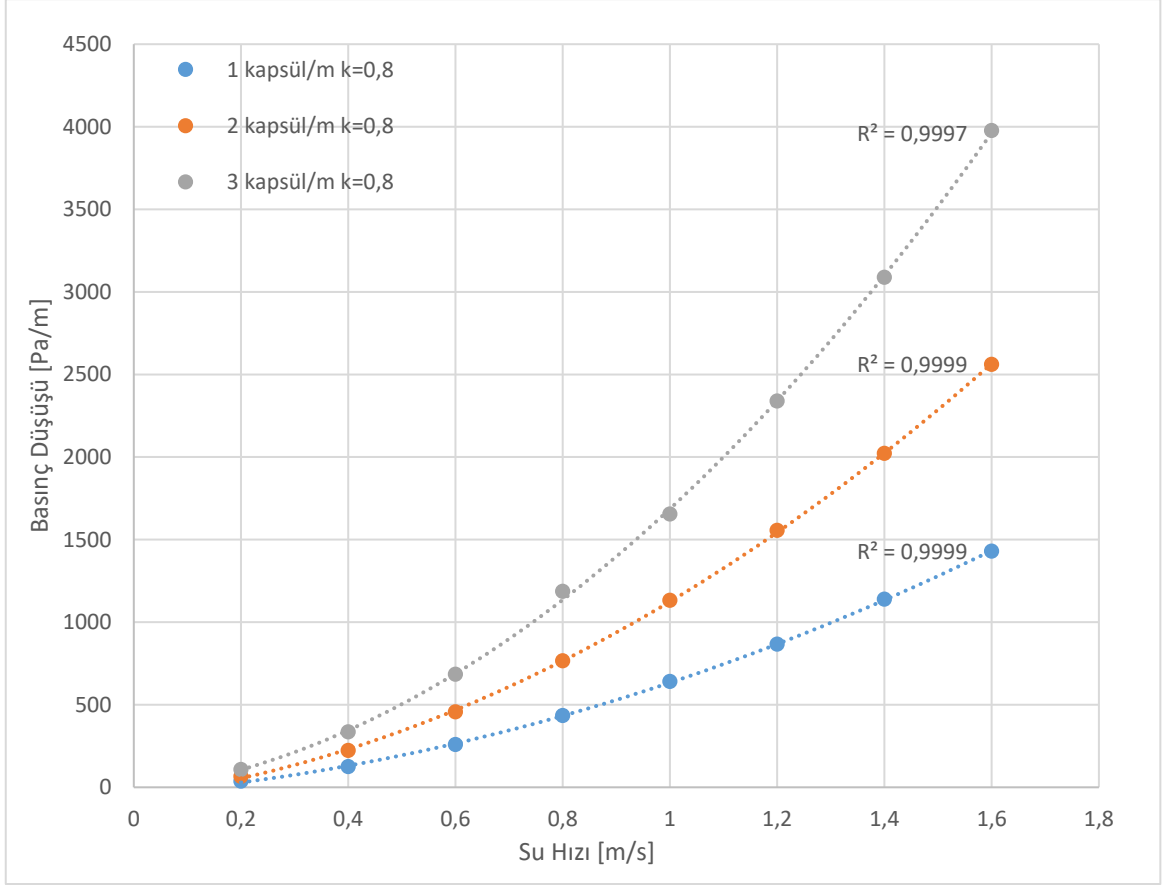
3.6 Akış Parametrelerine Bağlı Global Basınç Düşüşleri ve Had Analiz Sonuçlarının Literatürdeki Benzer Çalışmalarla Karşılaştırılması



a)



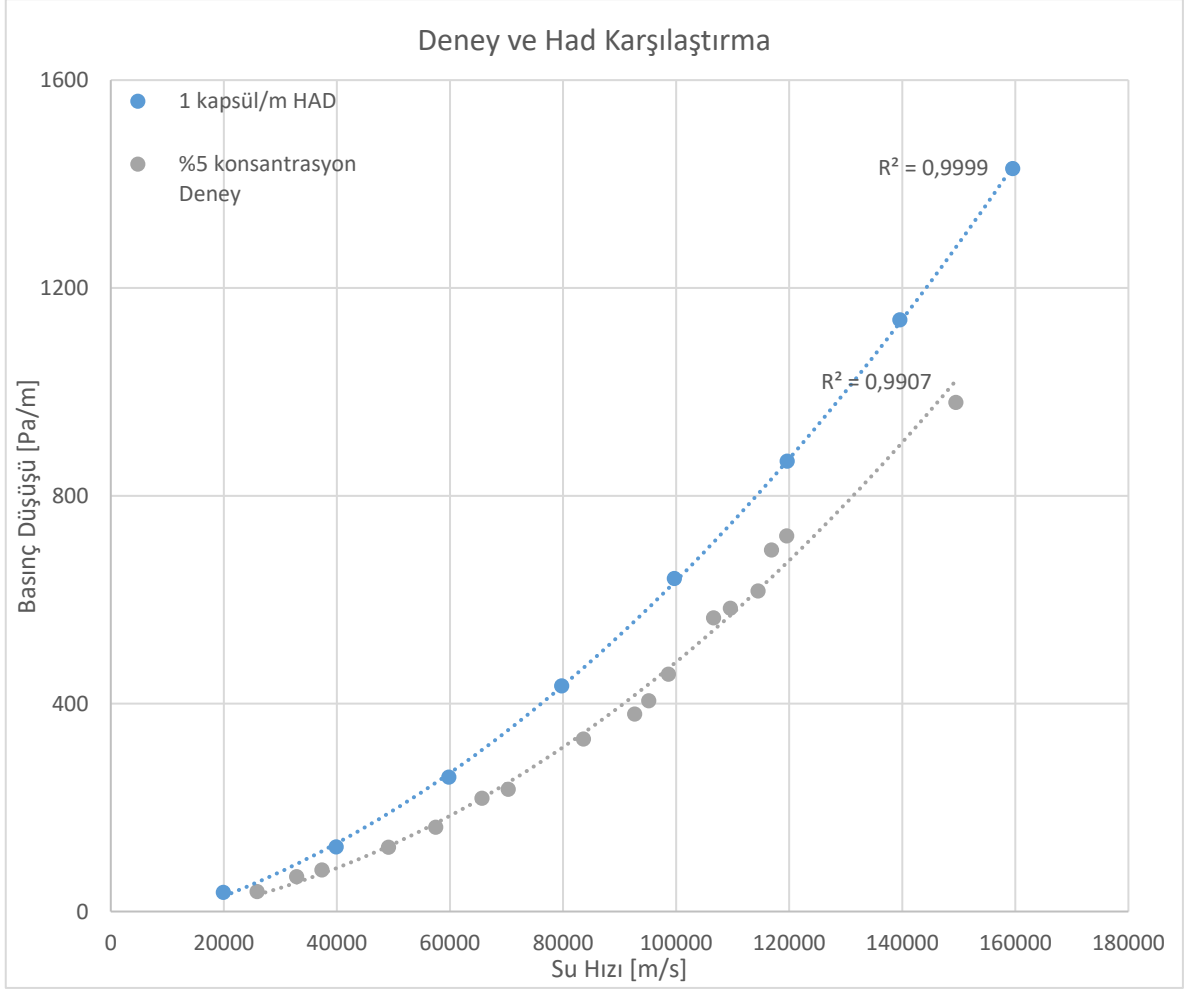
b)



c)

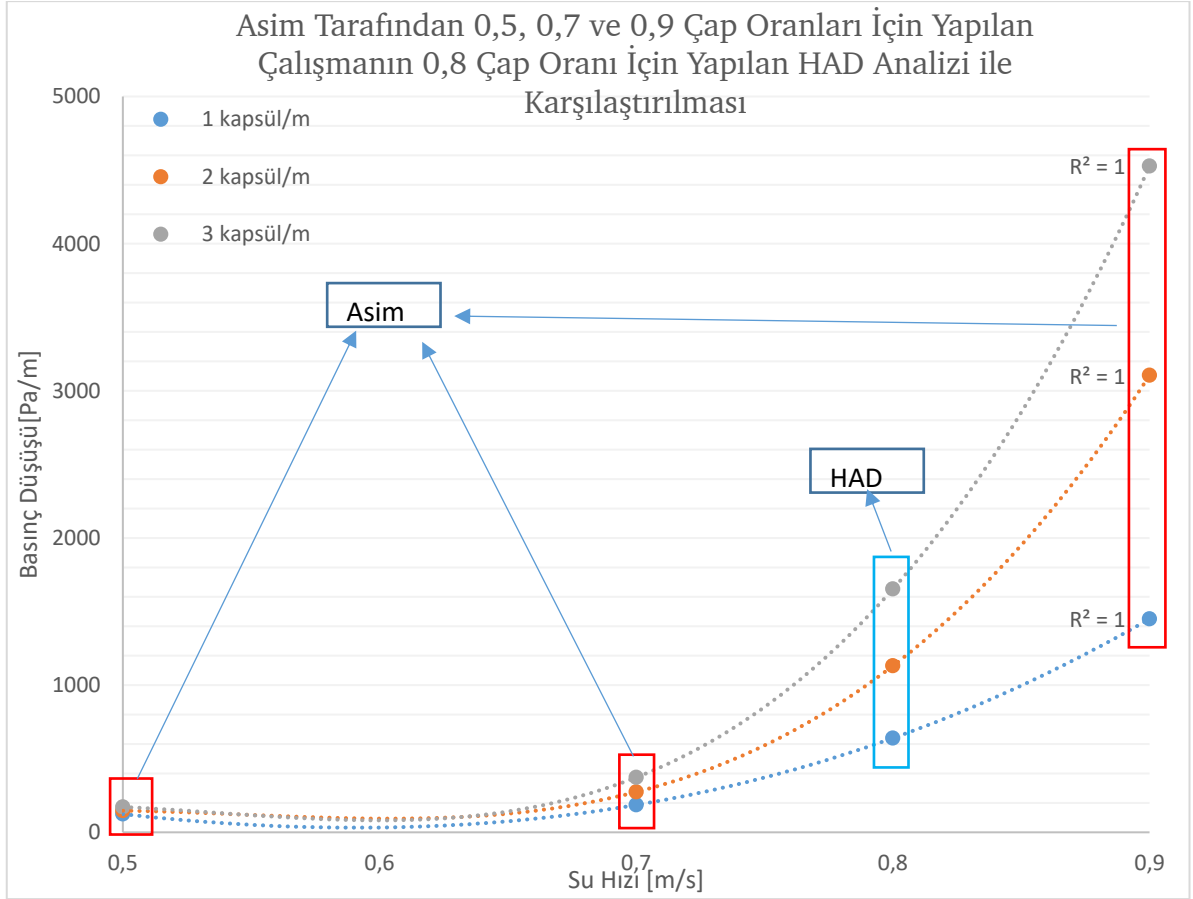
Şekil 3.16 a) 0,5, b) 0,7 ve c) 0,8 çap oranları için HAD basınç düşüşleri

Şekil 3.16 a), b) ve c)'de sırasıyla 0,5, 0,7 ve 0,9 çap oranları 0,2 ile 1,6 m/s ortalama hız aralığında basınç düşüş değerlerinin kapsül çap oranı ve su hızı artışıyla arttığı gözlemlenmiş ve çap oranı artışının basınç düşüşünü üstsel arttırdığı görülmüştür.



Şekil 3.17 $s=0,87$, %5 konsantrasyon[5] deney ve HAD analizi basınç düşüşleri

Şekil 3.17'de verilen Ulusarlan[5] ve HAD analizi basınç düşüşleri verilmiştir. Analiz ve $s = 0,87$ değeri için yapılan deney sonuçları karşılaştırıldığında analizin %11,37 oranında sapma gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 3.18 $k = 0,5, 0,7, 0,8$ ve $0,9$ için Asim [18] ve HAD sonuçları

Şekil 3.18'de verilen $V_{av} = 1 \text{ m/s}$ için Asim [18] tarafından 0,5, 0,7 ve 0,9 çap oranlarında yapılan nümerik sonuçlar ile 0,8 çap oranında yapılan HAD analizi sonucu 1, 2 ve 3 kapsül sayılarında oluşan basınç düşüşleri verilmiştir. Şekil 3.18'den anlaşılacağı üzere 0,8 çap oranında yapılan HAD analizleri genel basınç düşüş trendine uyacak şekilde Asim tarafından yapılan 0,7 ve 0,9 çap oranında basınç düşüş ifadelerinin arasında konumlanmakta ve üstsel artış trendine uyum sağlayacak biçimde hizalanmışlardır.

Tablo 3.2 Kapsül sayısı, ortalama hız ve k değerlerine karşılık gelen basınç düşüşleri

N	k	Ortalama Hız(m/s)	Basınç Düşüşü HAD(Pa/m)	Matematiksel ifade[3](Pa/m)	Hata (%)
1	0,5	0,2	7,22	5,2	39,5
		0,4	24,05	17,8	36,7
		0,6	50,33	36,5	39,2

Tablo 3.2 Kapsül sayısı, ortalama hız ve k değerlerine karşılık gelen basınç düşüşleri(devamı)

N	k	Ortalama Hız(m/s)	Basınç Düşüşü HAD(Pa/m)	Matematiksel ifade[3](Pa/m)	Hata (%)
1	0,5	0,8	84,37	61,0	39,7
		1	126,26	90,9	40,3
		1,2	175,86	126,1	40,9
		1,4	232,89	166,3	41,4
		1,6	295,82	211,5	41,3
	0,7	0,2	14,95	5,3	184,3
		0,4	47,71	18,1	167,1
		0,6	95,15	37,3	159,3
		0,8	154,86	62,3	152,6
		1	228,81	92,9	150,4
		1,2	316,93	128,8	150,1
		1,4	426,51	169,9	155,1
		1,6	524,82	216,0	146,9
		0,8	0,2	36,483	5,4
	0,4		123,95	18,5	571,8
	0,6		258,33	37,9	581,3
	0,8		433,95	63,3	585,1
	1		640,48	94,4	578,3
	1,2		866,3	130,9	561,7
	1,4		1138,2	172,7	559,1
	1,6		1429,3	219,6	550,9
	0,5	0,2	8,42	5,3	62,2
		0,4	28,86	18,0	63,8

Tablo 3.2 Kapsül sayısı, ortalama hız ve k değerlerine karşılık gelen basınç düşüşleri (devamı)

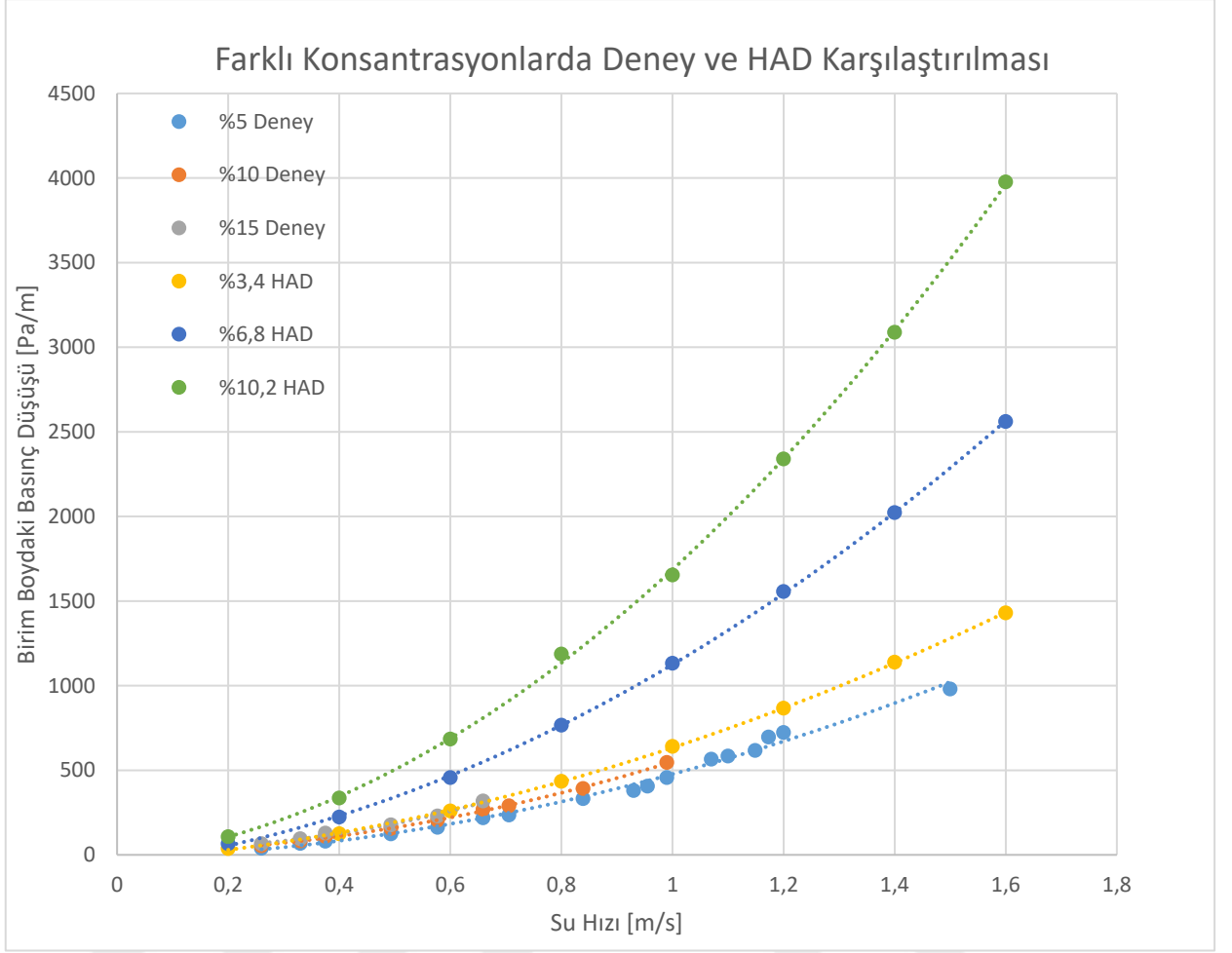
N	k	Ortalama Hız	Basınç Düşüşü HAD(Pa/m)	Matematiksel ifade[3](Pa/m)	Hata (%)
2	0,5	0,6	59,59	37,0	64,5
		0,8	99,08	61,7	63,8
		1	147,14	92,0	63,1
		1,2	205,13	127,6	64,0
		1,4	271,96	168,4	64,9
		1,6	347,77	214,1	65,8
	0,7	0,2	22,54	5,5	321,1
		0,4	78,54	18,8	332,1
		0,6	159,18	38,6	326,2
		0,8	260,71	64,4	317,8
		1	388	96,1	317,1
		1,2	563,03	133,2	336,5
		1,4	732,02	175,7	330,3
		1,6	877,41	223,4	305,6
	0,8	0,2	65,26	5,7	1041,4
		0,4	222,32	19,4	1045,4
		0,6	456,11	39,9	1043,5
		0,8	765,19	66,6	1048,3
		1	1131,61	99,3	1039,2
		1,2	1555,27	137,7	1029,2

Tablo 3.2 Kapsül sayısı, ortalama hız ve k değerlerine karşılık gelen basınç düşüşleri (devamı)

N	k	Ortalama Hız	Basınç Düşüşü HAD(Pa/m)	Matematiksel ifade[3](Pa/m)	Hata (%)
2	0,8	1,4	2021,61	181,7	1012,7
		1,6	2560,2	231,0	1008,3
3	0,5	0,2	8,56	5,4	64,7
		0,4	29,76	18,2	68,6
		0,6	61,20	37,4	68,7
		0,8	101,25	62,5	67,0
		1	152,01	93,2	68,2
		1,2	212,33	129,2	69,4
		1,4	279,30	170,4	69,0
		1,6	353,88	216,7	68,4
	0,7	0,2	28,96	5,7	431,4
		0,4	97,71	19,4	427,9
		0,6	203,84	39,9	435,9
		0,8	353,95	66,7	457,1
		1	531,875	99,4	461,6
		1,2	744,76	137,8	467,1
		1,4	995,41	181,8	474,6
0,8	1,6	1268,47	231,1	475,9	
	0,2	106,51	6,0	1668,8	
	0,4	335,16	20,4	1539,6	

Tablo 3.2 Kapsül sayısı, ortalama hız ve k değerlerine karşılık gelen basınç düşüşleri (devamı)

	k	Ortalama Hız	Basınç Düşüşü HAD(Pa/m)	Matematiksel ifade[3](Pa/m)	Hata (%)
3	0,8	0,6	683,70	42,0	1527,6
		0,8	1185,61	70,2	1589,4
		1	1653,55	104,6	1480,7
		1,2	2338,63	145,1	1512,2
		1,4	3087,06	191,3	1513,4
		1,6	3976,22	243,3	1534,4



Şekil 3.19 Farklı konsantrasyonlarda deney[5] ve HAD karşılaştırılması

Şekil 3.19’de Ulusarslan ve Teke[5] $s=0,87$ durumunda oluşan basınç düşüşleri ile farklı konsantrasyonlarda yapılan HAD analizi sonuçları verilmiştir. Su hızı ve konsantrasyonun artışının, modellenen sistem ve deney sonuçları arasındaki farkın artmasına sebep olduğu anlaşılmaktadır.

4 SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan 72 adet analiz sonucunda kapsül sayısı (konsantrasyonu), çap oranı ve ortalama hız bağımsız değişkenlerinin basınç düşüşü bağımlı değişkenine olan etkileri incelenmiştir. Analizlerden çıkarılan sonuçlar ve öneriler sırasıyla:

- Kapsül konsantrasyonu arttıkça basınç düşüşleri artmıştır.
- Ortalama hız arttıkça basınç düşüşleri artmıştır.
- k değeri arttıkça basınç düşüşleri artmıştır.
- Su hızının artışının basınç düşüşlerinin artmasında dominant faktör olduğu tespit edilmiştir. 0,8 çap oranında su hızının 0,2 m/s 'den 1,6 m/s'ye çıkarıldığında basınç düşüşünün ortalama 38,5 katına çıktığı kapsül adedinin 1'den 3'e çıkarıldığında ise basınç düşüşünün ortalama 2,7 katına çıktığı tespit edilmiştir.
- Basınç düşüşü hesabında sağlıklı bir korelasyonun elde edilebilmesi için daha fazla deney yapılmalı ve nümerik çalışmalarla paralel bir şekilde yürütülmelidir.
- Kapsül üzerindeki hidrodinamik kuvvetlerin tespit edilmesini sağlayabilen 6DOF modelleme tekniği ve dinamik mesh ağ yapısının kullanımı ile kapsül akış yörüngesi önceden belirlenip analize sınır şartı olarak girilebilir. Bu sayede geçici (transient) olan kapsül akışı için basınç düşüş değerleri daha yüksek doğruluk ile bulunabilir.

- [1] H. S. Ellis, "The pipeline flow of capsules: Part 3 - An experimental investigation of the transport by water of single cylindrical and spherical capsules with density equal to that of the water," vol. 42, ed: Wiley, 1964, pp. 1-8.
- [2] M. E. Charles, "The pipeline flow of capsules: Part 2: Theoretical analysis of the concentric flow of cylindrical forms," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 46-51, 1963, doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450410203>.
- [3] I. Teke and D. Ulusarslan, "Mathematical expression of pressure gradient in the flow of spherical capsules less dense than water," *International journal of multiphase flow*, vol. 33, no. 6, pp. 658-674, 2007.
- [4] D. Ulusarslan and İ. Teke, "An experimental investigation of the capsule velocity, concentration rate and the spacing between the capsules for spherical capsule train flow in a horizontal circular pipe," *Powder Technology*, vol. 159, no. 1, pp. 27-34, 2005/11/02/ 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.059>.
- [5] D. Ulusarslan and I. Teke, "An experimental determination of pressure drops in the flow of low density spherical capsule train inside horizontal pipes," *Experimental thermal and fluid science*, vol. 30, no. 3, pp. 233-241, 2006.
- [6] D. Ulusarslan, "Effect of Capsule Density and Concentration on Pressure Drops of Spherical Capsule Train Conveyed by Water," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 132, no. 1, 2010, doi: 10.1115/1.4000738.
- [7] D. Ulusarslan, "Experimental investigation of the effect of diameter ratio on velocity ratio and pressure gradient for the spherical capsule train flow," *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, vol. 37, pp. 42-47, 2013/01/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2012.05.004>.
- [8] R. Newton, P. J. Redberger, and G. F. Round, "The pipeline flow of capsules part 6 - numerical analysis of some variables determining free flow," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 168-173, 1964, doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450420408>.
- [9] H. H. Van Den Kroonenberg, "A mathematical model for concentric horizontal capsule transport," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 56, no. 5, pp. 538-543, 1978, doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450560502>.
- [10] Y. Tomita, M. Yamamoto, and K. Funatsu, "Motion of a single capsule in a hydraulic pipeline," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 171, pp. 495-508, 1986.
- [11] T. Asim and R. Mishra, "Optimal design of hydraulic capsule pipelines transporting spherical capsules," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 94, no. 5, pp. 966-979, 2016.

- [12] T. Asim and R. Mishra, "Computational fluid dynamics based optimal design of hydraulic capsule pipelines transporting cylindrical capsules," *Powder Technology*, vol. 295, pp. 180-201, 2016, doi: 10.1016/j.powtec.2016.03.013.
- [13] T. Asim, A. Algadi, and R. Mishra, "Effect of capsule shape on hydrodynamic characteristics and optimal design of hydraulic capsule pipelines," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 161, pp. 390-408, 2018/02/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.12.001>.
- [14] G. W. Hodgson and M. E. Charles, "The pipeline flow of capsules: Part 1: The concept of capsule pipelining," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 43-45, 1963, doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450410202>.
- [15] H. Liu, *Pipeline Engineering*. CRC Press, 2003.
- [16] Y. Li, Y. Gao, X. Sun, and X. Zhang, "Study on Flow Velocity during Wheeled Capsule Hydraulic Transportation in a Horizontal Pipe," *Water*, vol. 12, no. 4, p. 1181, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/4/1181>.
- [17] K. Subramanya, "Pipeline transportation technology: An overview," *Current Science*, vol. 75, no. 8, pp. 824-826, 1998. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/24101631>.
- [18] T. Asim, "Computational fluid dynamics based diagnostics and optimal design of hydraulic capsule pipelines," University of Huddersfield, 2013.
- [19] W. Malalasekera and H. Versteeg, "An introduction to computational fluid dynamics," *The finite volume method*, Harlow: Prentice Hall, p. 1995, 2007.
- [20] Y. A. Cengel and A. Ghajar, "Heat and mass transfer (a practical approach, SI version)," *McGraw-670 Hill Education*, vol. 671, p. 52, 2011.
- [21] A. Inc., "ANSYS fluent user's guide," *Ansys Fluent*, vol. 15317, p. 2498, 2013.
- [22] M. F. Khalil, S. Z. Kassab, I. G. Adam, and M. A. Samaha, "Prediction of Lift and Drag Coefficients on Stationary Capsule in Pipeline," *CFD Letters*, vol. 1, no. 1, pp. 15-28, 01/16 2021. [Online]. Available: <https://akademiabaru.com/submit/index.php/cfdl/article/view/3308>.
- [23] T. BARTH and D. JESPERSEN, "The design and application of upwind schemes on unstructured meshes," in *27th Aerospace Sciences Meeting*.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. S. Karaçay and D. Ulusarslan, "Yatay Hidrolik Borularda Taşıyıcı Sıvı ile Eşit Yoğunluklu Küresel Kapsül Tren Akışı Basınç Kayıplarının Had Analizi ile Belirlenmesi," presented at the 7. Uluslararası Mühendislik Ve Teknoloji Yönetimi Kongresi, 2022, 317-322.

