

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOLU SAVAKLAR ÜZERİNDE OLUŞAN AKIM
ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL ANALİZİ**

Mücella ÖZDEM

Tez Yöneticisi
Yrd. Doç. Dr. Nihat KAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ELAZIĞ, 2007

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOLU SAVAKLAR ÜZERİNDE OLUŞAN AKIM
ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL ANALİZİ**

Mücella ÖZDEM

Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Bu tez, 22.01.2007 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından **oybirliği** ile **başarılı** olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Nihat KAYA

Üye: Doç. Dr. İhsan DAĞTEKİN

Üye: Doç. Dr. M. Emin EMİROĞLU

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlarken, katkı ve yardımlarını esirgemeyen, her konuda yardımcı olan saygıdeğer danışman hocam Yrd. **Doç. Dr. Nihat KAYA'ya**, Fluent programını tanımamı sağlayan ve öğrenme sürecinde bana bir çok konuda yardımcı olan **Öğr.Gör. Mehmet Cihan Aydın'a (Y.Y.Ü İnşaat Bölümü)** ve **SEÇKİN AYDIN'a (Aydın DSİ XXI. Bölge Müdürlüğü)** teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca, çalışmam süresince bana her türlü desteği veren **aileme** sonsuz teşekkürleri borç bilirim.

Mücella ÖZDEM

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	III
TABLolar LİSTESİ	V
SİMGELER LİSTESİ	VI
ÖZET	VII
ABSTRACT	VIII
1.GİRİŞ	1
2.CFD ANANLİZİ İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR	2
3. SAVAKLARIN HİDROLİK HESABI	3
3.1. Yaklaşım Kanallarının Hidrolik Hesabı	4
3.2. Serbest Akışlı Dolusavakların Hidrolik Hesabı	7
3.2.1. Serbest Akışlı Kapaklı Dolusavakların Profilleri ve Debi Katsayıları	7
3.2.2. Serbest Akışlı Kapaksız Dolusavaklarda Alt Basınca Yer Vermeyen Profilin Belirlenmesi	7
3.2.2.1. Alt Basınca Yer Vermeyen Profillerde Debi Katsayısı	13
3.2.3. Serbest Akışlı Kapaksız Dolusavaklarda Alt Basıncılara Yer Veren Profillerin Belirlenmesi	14
3.2.3.1.Dolusavakların geçirdikleri debiler	14
3.2.3.2.Debi Katsayısının Savaşın (P) Yüksekliğine Bağlı Olarak Değişimi	16
3.2.4.Serbest Akışlı Kapaksız Dolusavaklarda Oluşan Basıncıların Hesabı	17
4.CFD YAZILIMLARI	22
4.1. Fluent CFD Yazılımı (Fluent v5.3)	22
4.2. Fluentin Yapısı	24
4.3. Fluentin Özellikleri	24
4.4. Fluent 'de çok fazlı akım problemlerinin modellenmesi (Multiphase Flows)	25
4.4.1. Dağınık Faz Modeli (Dispersed Phase Model-DPM)	26
4.4.2. Akışkan Hacmi (Volume of Fluid-VOF) Modeli	26
4.4.2.1. Hacim Oranı	28
4.4.3. Cebriyel Kaynak Karışım Modeli (Algebraic Slip Mixture Model-ASMM)	29
4.4.4. Kaviteasyon Model (Cavitation Model)	30
5. MODELLERİN ANALİZİ	31

5.1. Dolusavakların Sayısal Modellenmesi	31
5.2. Çalışılan Modellerin Hazırlanması ve Parametreleri	31
5.2.1. Sayısal Modelin Geometrisi	33
5.2.2. Çözüm Parametreleri	33
5.2.3. k - ϵ Türbülans Modeli	34
5.2.4. Türbülanslı Akımda Cidar Pürüzlülüğü	34
5.2.5. Sınır Şartları (<i>Boundary Condition</i>)	34
5.2.6. İşletme Durumları (<i>Operating condition</i>)	35
5.3. Programı Kullanımındaki Deneyimler	35
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	36
6.1. Dolusavak Üzerindeki Faz, Hız ve Basınç Görünümleri	44
6.2. Dolusavak Üzerinde Oluşan Hız ve Basınç Grafikleri	56
7.SONUÇLAR	86
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Yaklaşım kanalındaki akım karakteristikleri	5
Şekil 3.2. İnce kenarlı savaktan akım	8
Şekil 3.3. WES tarafından kullanılması önerilen dolusavak profilleri.....	11
Şekil 3.4. İnce kenarlı bir savağın üstünden aşan su napının koordinatları (menba yüzü düşey).....	11
Şekil 3.5. İnce kenarlı bir savağın üstünden aşan su napının koordinatları (menba yüzü 45 derece eğimli)	12
Şekil 3.6. USBR'a göre dolusavak sırt eğrisinin tarifi.....	13
Şekil 3.7. Değişik savak formüllerinin karşılaştırılması	14
Şekil 3.8. Debi katsayısının h/H_p oranına göre değişimi	15
Şekil 3.9. Debi katsayısının P/H_p cinsinden değişimi.....	16
Şekil 3.10. USBR'a göre debi katsayısının h/H_p cinsinden değişimi	17
Şekil 3.11. Kurbadaki akıma etkiyen kuvvetler.....	18
Şekil 3.12. Kurbada yer alan akım.....	20
Şekil 4.1. Temel Program Yapısı	24
Şekil 4.2 Dağınık Faz Modeli	26
Şekil 4.3 Serbest Yüzeyli Akım Modeli	27
Şekil 4.4 Cebirsel Kayma Karışım Modelinin Fluent 5 Yazılımında Çözümü.....	29
Şekil 4.5 Kavitasyon Modeli.....	30
Şekil.5.1. Modellerin Görünümü	32
Şekil.5.2. Meshli görüntü.....	33
Şekil 6.1. Model-1 için ölçüm yerleri	37
Şekil 6.2. Model-2 için ölçüm yerleri	39
Şekil 6.3. Model-3 için ölçüm yerleri	41
Şekil 6.4. Model-4 için ölçüm yerleri	43
Şekil 6.5. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$ için faz görünüşleri.....	44
Şekil 6.6. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$ için faz görünüşleri.....	45
Şekil 6.7. $Q_3=2833.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$ için faz görünüşleri.....	46
Şekil 6.8. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$ için hız görünüşleri.....	47
Şekil 6.9. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$ için hız görünüşleri.....	48
Şekil 6.10. $Q_3=2833.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$ için hız görünüşleri.....	49
Şekil 6.11. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$ için basınç görünüşleri	50
Şekil 6.12. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$ için detaylı basınç görünüşleri	51

Şekil 6.13. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$ için basınç görünümleri	52
Şekil 6.14. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$ için detaylı basınç görünümleri	53
Şekil 6.15. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$ için basınç görünümleri	54
Şekil 6.16. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$ için detaylı basınç görünümleri	55
Şekil 6.17. $Q_1=223,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; ölçüm-1 için Hız-H grafiği	56
Şekil 6.18. $Q_1=223,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; ölçüm-1 için Basınç-H grafiği	57
Şekil 6.19. $Q_1=223,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; ölçüm-2 için Hız-H grafiği	58
Şekil 6.20. $Q_1=223,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; ölçüm-2 için Basınç-H grafiği	59
Şekil 6.21. $Q_1=223,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; ölçüm-3 için Hız-H grafiği	60
Şekil 6.22. $Q_1=223,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; ölçüm-3 için Basınç-H grafiği	61
Şekil 6.23. $Q_1=223,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; ölçüm-4 için Hız-H grafiği	62
Şekil 6.24. $Q_1=223,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; ölçüm-4 için Basınç-H grafiği	63
Şekil 6.25. $Q_1=223,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; ölçüm-5 için Hız-H grafiği	64
Şekil 6.26. $Q_1=223,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; ölçüm-5 için Basınç-H grafiği	65
Şekil 6.27. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; ölçüm-1 için hız-H grafiği	66
Şekil 6.28. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; ölçüm-1 için Basınç-H grafiği	67
Şekil 6.29. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; ölçüm-2 için Hız-H grafiği	68
Şekil 6.30. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; ölçüm-2 için Basınç-H grafiği	69
Şekil 6.31. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; ölçüm-3 için Hız-H grafiği	70
Şekil 6.32. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; ölçüm-3 için Basınç-H grafiği	71
Şekil 6.33. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; ölçüm-4 için Hız-H grafiği	72
Şekil 6.34. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; ölçüm-4 için Basınç-H grafiği	73
Şekil 6.35. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; ölçüm-5 için Hız-H grafiği	74
Şekil 6.36. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; ölçüm-5 için Basınç-H grafiği	75
Şekil 6.37. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; ölçüm-1 için Hız-H grafiği	76
Şekil 6.38. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; ölçüm-1 için Basınç-H grafiği	77
Şekil 6.39. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; ölçüm-2 için Hız-H grafiği	78
Şekil 6.40. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; ölçüm-2 için Basınç-H grafiği	79
Şekil 6.41. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; ölçüm-3 için Hız-H grafiği	80
Şekil 6.42. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; ölçüm-3 için Basınç-H grafiği	81
Şekil 6.43. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; ölçüm-4 için Hız-H grafiği	82
Şekil 6.44. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; ölçüm-4 için Basınç-H grafiği	83
Şekil 6.45. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; ölçüm-5 için Hız-H grafiği	84
Şekil 6.46. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; ölçüm-5 için Basınç-H grafiği	85

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Baraj gölünden kanala girişte yük kaybı katsayısının değerleri.....	6
Tablo 3.2. H_p 'nin değişik değerlerine ve yaklaşım hızına bağlı olarak ince kenarlı savaktan çıkan su ışınının alt napının koordinatları.....	9
Tablo 3.3. k ve n parametrelerinin değerleri	10

1. GİRİŞ

Dolusavak deyimi ile su yapılarında, suyu, menbadan mansaba geçiren yapımlar anlatılmaktadır. Bunlar barajların birer parçası olabildiği gibi bağlamaların da gövdelerinin şekillendirilmesinde kullanılmıştır. Bu kadar yaygın olmalarına rağmen rasyonel etütleri sadece son senelerde yapılabilmektedir.

Dolusavakların incelenmesi çok yönlüdür. İlk çözümlenmesi gerekli problem, asal su yapısındaki konumlarıdır. Bundan sonraki hidrolik hesapları ve nihayet statik hesapları gelir. Bunu için birçok modeller yapılmış ve bunlar üzerinde deneyler yapılarak birçok karakteristik özellikler incelenmeye çalışılmıştır. Günümüzde artık bu çalışmalar yerini bilgisayara bırakarak CFD yazılımlarının kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Hatta bu çalışmalar sadece akademik yönden değil askeri alanda da kendini göstermeye başlamıştır. Bu çalışmalar kullanımda olan barajların iyileştirme projelerinin yapılması, bu barajların incelenmesi ve daha elverişli barajların inşası için yeni modellerin incelenmesi olarak aktarılabilir.

Şu da belirtmelidir ki bu çalışmaların sonuçları, hidrolik modeller elde edilen sonuçlarla çok yakın değerler vermektedir. Bu da araştırmacıları CFD yazılımlarına yöneltmektedir. Diğer bir avantajı ise daha az hata vermesi ve daha kısa zamanda sonuca gidilmesidir. Eğer yeterli özelliklerde bilgisayarlar kullanılırsa zaman ve ekonomik yönden birçok fayda sağlamaktadır.

Yapılan çalışmalar dolusavakların farklı geometrileri üzerinde yapılmıştır. Ogee profilli dolusavaklar, basamaklı dolusavaklar, yandan alıslı savaklar incelenmiştir.

Yapılan bu çalışmada Ogee profilli dolusavak üzerinde giriş kısmına farklı oranlar verilerek dolusavak gövdesi üzerinde oluşan basınç ve hız değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak en uygun model elde edilmeye çalışılmıştır.

2.CFD ANALİZİ İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Gelişen teknoloji ile artık çalışmalar bilgisayar ortamında yapılmaya başlanmıştır. Yurt içi ve yurtdışında yapılan birçok çalışma CFD yazılımları ile yapılmaktadır. Bunlar arasında:

Aydın ve diğ. (2005), Kars Barajı yandan alışı dolusavak teknesini üç boyutlu olarak Fluent yazılımını kullanarak modellemişler ve buradan elde ettikleri verileri, daha önce yapılan hidrolik modelle elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada sonuçların birbirine yakın olduklarını görmüşler ve klasik tasarım ile görülemeyen, su yüzeyinde görülen türbülans yoğunluğu dağılımı ve kanal tabındaki basınç dağılımı gibi sonuçlar rahatlıkla görülmüştür [1].

Chatila ve Tabbara (2004), 'da Ogee profilli dolusavağı üç boyutlu olarak modelleyip bu savaklar üzerinde farklı su yüklerinde yüzeydeki su profillerinin x ve y koordinatlarını bulup hidrolik modelle elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Çalışmalarında $k-\epsilon$ modelini kullanmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada Adina-F programını kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma ile serbest yüzeyli akımların karakteristik özelliklerini çok kolay olarak belirlenmiştir [2].

Ho, Boyes ve diğ. (2003), yılında yaptıkları çalışmalarında dolusavak profillerini ilk olarak iki boyutlu daha sonra da üç boyutlu olarak modelleyip incelemişlerdir. Ayrıca, Warragamba barajının iyileştirme projesini de sayısal yöntemle yapmışlardır. New South Wales'daki Hume Barajı dolusavağını, Victoria'daki Buffalo Barajı ana dolusavağını CFD analizi ile çözmüşler ve verileri hidrolik modellerle karşılaştırmışlardır [3].

Savge ve Johnson (2001), Ogee dolusavak üzerindeki analizlerle hata oranının çok az hatta %0 olduğunu görmüşlerdir. Özellikle bu çalışmalarını fiziksel model ile sayısal model arasında ki farklılıkları, avantaj ve dezavantajları belirlemek için yapmışlardır [4].

Tabbara ve diğ. (2005), 2004 yılında yaptıkları ogee profilli dolusavak üzerindeki çalışmalarını, adına programını kullanarak basamaklı dolusavaklar üzerinde yapmışlardır. Yine bu çalışmada basamaklı dolusavak üzerinde karakteristik özellikleri incelemişler ve CFD yazılımlarının gerçekten çok güçlü olduklarını belirtmişlerdir [5].

Behr (2001), yılında yaptığı çalışma ile CFD yazılımlarının çalışma prensibi olan sonlu elemanlar yöntemini açıklamıştır. Ayrıca sayısal bir örnekle dolusavak üzerindeki enerji kırıcılar üzerinde çözüm yaparak $t = 125.0, 250.0, 375.0$ ve 500.0 s lerinde suyun yüzey profilini ve savak üzerindeki hızları belirlemiştir. Çalışmasın da şunu da belirtmiştir, temel metot olarak genel'de bu gibi yazılımlarda Navier-Stokes formüllerinin sonlu elemanlar yöntemiyle kullanıldığını belirtmiştir [6].

Yapılan alışmalar sadece dolusavaklar üzerinde değil bunun yanında akarsu hidroliği üzerinde' de yapılmıştır;

Nguyen ve Nestmann (2004), dolusavak çalışmaların da olduğu gibi $k-\epsilon$ modeli ve VOF metodunu kullanarak Avrupa'nın önemli akarsularından olan ve 1320 km uzunluğunda ki Rhine akarsuyunu modelleyip akarsuyun farklı km. in de suyun derinliklere göre hızını, türbülanslı akımını incelemiştir [7].

Bunun yanında sadece inşaat mühendisliği değil, makine mühendisliğinde çalışmalar yapılmıştır.

elik ve Güner (2005), nozullu pervaneler için Gambit programını kullanarak model oluşturmuşlar ve Fluent programını kullanarak çözüm yapmışlardır. Bu çalışmalarında hareketli meshleme'yi kullanmışlardır [8].

Yapılan birçok çalışma gösteriyor ki bilgisayar teknolojisi araştırmaları CFD yazılımlarının kullanımına itmeye başlamıştır. Ek olarak da çok büyük kolaylık ve avantaj sağlamaktadır.

3. SAVAKLARIN HİDROLİK HESABI

Savakların hidrolik hesabı, bu yapıların projelendirilmesinde önde gelen dayanaktır. Savakların hidroliği, suyun savağın yaklaşım kanalına girdiği kesitten başlar ve ana yatağa yeniden verildiği konumda son bulur [9].

3.1. Yaklaşım Kanallarının Hidrolik Hesabı

Su rezervuarın dar alarak dolusavağa kadar getiren kanala yaklaşım kanalı ismi verilmektedir. Yaklaşım kanallarının hidrolik hesabı klasik formüllerle yapılamaz. Problemi model üzerinde incelemek gerekir. Model deneyleri sadece su çizgisini vermekle kalmaz ayrıca tabanda oluşan hızları da belirleyebileceğinden kanalın oyulmalara karşı nasıl korunması gerektiği konusunda mühendise yardımcı olur. Bununla beraber, girişi gayet düzenli ve doğrusal olan bir yaklaşım kanalı yapılabilirse bu takdirde hidrolik hesapları aşağıda gösterildiği şekilde yürütmek mümkündür.

Yaklaşım kanalında akım, genellikle kritik üstü ve tedricen değişkendir. Bu bakımdan hesaplar mansaptan başlayarak menba yönüne doğru ilerleyerek yapılır. Yaklaşım kanalının mansap ucunda dolusavağın gövdesi veya kapakları vardır. Q, debisi bilindiğine göre gerek kabartıcı gövdenin üzerinden yer alacak akımın, gerekse, kapaklı savaklar halinde orta ayaklar arasından yer alacak akımın hidrolik yükü hesaplanabilir. Bu yükten hareket edilerek baraj gölündeki su seviyesine gelinir; elde edilen göl seviyesi gerçek göl seviyesinden farklı ise q debisi değiştirilerek hesaplara iki seviye eşit oluncaya kadar devam edilir.

Yukarıda açıklanan yaklaşımın matematiksel ifadesi de şöyledir.

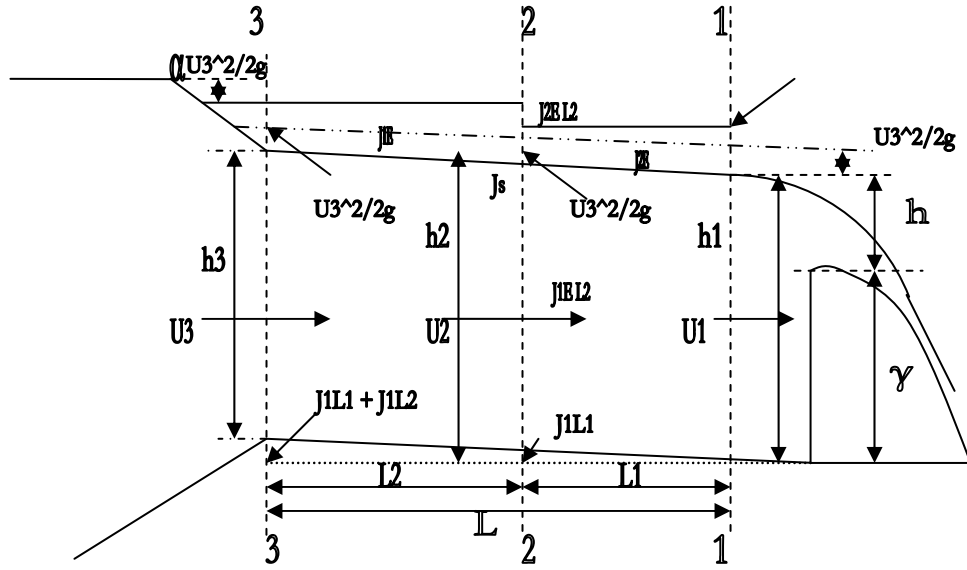
Kabuller:

- Kanalların giriş ağzı ters akımlara yer vermeyecek şekilde ve akımsal olarak düzenlenmiştir.
- Kanal prizmatiktir.
- Kanal güzergâhı üzerinde ters akımlara yer verecek düzensizlikler yoktur. Akımın hızı her kesit için hesaplanabilecek durumdadır. Yani enine kesitler için kesiklikler yoktur. Plan da kanal güzergâhı doğrusal veya doğrusala çok yakındır.
- Kanalın geçirdiği debi sabittir ve zaman içinde değişmemektedir. Yani akım permananttır.
- Akım nehir rejimindedir. Sel rejimindeki akımlar içinde benzer bir yöntem geliştirilebilir.

- Akım üniform veya büyük bir çoğunlukla tedricen değişkendir.

Bu koşullar altında yaklaşım kanalı içindeki akımı matematiksel olarak tanımlama olanağı vardır.

Şekil 3.1'i inceleyelim. Burada, L uzunluğundaki bir yaklaşım kanalının mansap ucunda bir kabartıcı gövde yer almıştır. Kabartıcı gövdenin mansaba aktaracağı debinin Q olduğunu varsayalım. Debi formülü olarak kullanılarak savak yükü hesaplanabilir:



Şekil 3.1. Yaklaşım kanalındaki akım karakteristikleri

$$Q = mA(2gh)^{1/2} = mBh(2gh)^{1/2} = CBh^{3/2} \quad (3.1)$$

$$C = m(2g)^{1/2}$$

B ile 1-1 kesitindeki kanal genişliği gösterilmiştir; h, savak yüküdür. Kanalı n sayıda kesite bölerek hesapları ona göre yapmak mümkündür. Bu özel halde n = 3 kabul edilmiştir. Çok uzun kanallarda kesit sayısı artırılabilir. Kanalın enine kesiti değişken genişlikte dikdörtgendir. 1-1 kesitinin savağın çekiş alanı dışında seçildiği göz önüne alınarak enerji denklemi 1-1 ve 2-2 kesitleri arasında uygulanırsa,

$$h_1 + \frac{U_1^2}{2g} + J_{1E}L_1 = J_tL_1 + h_2 + \frac{U_2^2}{2g} \quad (3.2)$$

bulunur. Bu denklemde kullanılan işaretlerin anlamları:

J_{1E} ile gösterilen enerji çizgisinin eğimi, Manning denklemi kullanılarak şöyle hesaplanır:

$$J_{1E} = \frac{U_0^2 n^2}{R_0^{4/3}} \quad (3.3)$$

U_0 ve R_0 , 1-1 ve 2-2 kesitleri arasındaki ortalama hızı ve hidrolik yarıçapı göstermektedir. Değerleri aşağıdadır:

$$U_0 = \frac{(U_1 + U_2)}{2} \quad (3.4)$$

$$R_0 = \frac{(R_1 + R_2)}{2} \quad (3.5)$$

n ile kanalın Manning pürüzlülük katsayısı gösterilmiştir. O halde bu değerler 3.2 denkleminde yerlerine konularak 3.6 denklemi elde edilir:

$$h_1 + \frac{Q^2}{B_1^2 h_1^2} \frac{1}{2g} + n^2 L_1 \frac{Q^2}{4} \left(\frac{1}{B_1^2 h_1^2} + \frac{1}{B_2^2 h_2^2} + \frac{2}{B_1 h_1 B_2 h_2} \right) * \frac{1}{\left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right)^{4/3}} = J_t L_1 + h_2 + \frac{Q^2}{B_2^2 h_2^2} \frac{1}{2g} \quad (3.6)$$

Denklemin bilinmeyeni h_2 'dir ve R_2 de h_2 cinsinden yazılabileceği için eşitlik kolaylıkla çözülür.

Enerji denklemi bir kerede 2-2 ve 3-3 kesitleri arasında yazılarak J_{2E} 'nin ve h_3 'ün değerleri bulunur. Bunlar elde edilince:

$$H = h_3 + \alpha \frac{U_3^2}{2g} \quad (3.7)$$

Eşitliği kontrol edilir. Eşitlik sağlanıyorsa problem çözülmüş sayılır. Aksi halde Q değiştirilerek hesaplar, eşitlik sağlanıncaya kadar yenilenmelidir.

$\alpha U_3^2 / 2g$ ile kanala giriş kaybı gösterilmiştir. Buradaki α katsayısının değeri Tablo 3.1 de verilmiştir.

Tablo 3.1. Baraj gölünden kanala girişte yük kaybı katsayısının değerleri

Girişin özellikleri	Katsayı
1. Yuvarlatılmamış sert köşeli girişler, transizyon	
Yok	1
2. Yuvarlatılmış girişler, tranzisyon yok	0.50
3. Tranzisyonlu ve akım çizgilerine uygun girişler	0,20–0,10

3.2. Serbest Akışlı Dolusavakların Hidrolik Hesabı

Hidrolik olayların teorik bakımdan tam bir çözüme genel olarak gidilmemektedir. Dolusavağın probleminin çözümü için bazı kabuller yapılmıştır. Başlangıçta, yaklaşım hızının sıfır olduğu kabul edilecektir. Formüller çıkarıldıktan sonra bu hızın varlığından doğan fark sonuçlara eklenir.

Dolusavakların hidrolik hesabında iki ana yön vardır,

a. $Q = mA (2g H_E)^{1/2}$ denklemindeki m katsayısının hesabı ve

b. Dolusavağın mansap kanalındaki alt basınçların hesabı.

Gerçekte m katsayısı ile alt basınçlar birbirine bağlıdır. Alt basınç arttıkça m katsayısı da artar. Mühendisin görevi uygun değer çözümü bulmaktır. Debi formülünün:

$$Q = mA(2gH_E)^{1/2} \quad (3.8)$$

formu altında verilisinin fiziksel bir anlamı vardır. Özellikle Amerikan kaynaklarında:

$$Q = CAh^{1/2} = CLh^{3/2} \quad (3.9)$$

şekli görülür.

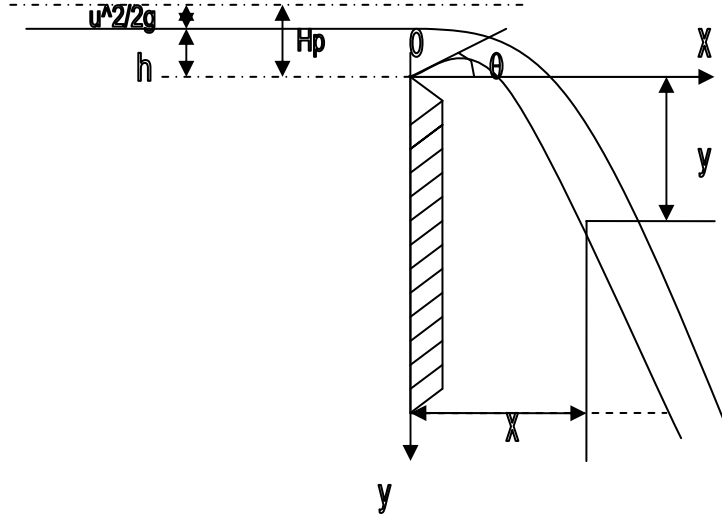
Burada L ile savak boyu işaretlenmekte ve $C = (2g)^{1/2}$ kabul edilmektedir. Sonuca böylelikle daha çabuk varılır.

3.2.1. Serbest akışlı kapaklı dolusavakların profilleri ve debi katsayıları

Bu tip dolusavaklar mühendislik uygulamasında en çok görülenlerdir. Tam olarak belirlenebilmeleri için debi katsayılarının, savak sırtı üstünde oluşan basınçların belirlenmesi ve bunlara tekabül eden geometrik şekillerin belirlenmesi zorunluluğu vardır.

3.2.2. Serbest akışlı kapaksız dolusavaklarda alt basınca yer vermeyen profilin belirlenmesi

İnce kenarlı bir savağı göz önüne alalım. Bu savağın üzerinden Şekil 3.2 'de görüldüğü gibi bir akım yer almış olsun. Oluşan su ışınının alt ve üst naplarının denklemleri noktanın mekaniği esaslarından gidilerek derhal bulunabilir. Özellikle alt napın önemi büyüktür. İnce kenarlı savağın statik bakımdan kendi kendine yeterli olabilmesi için savak ile alt nap arasında kalan boşluğun beton ile doldurulduğunu düşünelim. Bu yolla elde edilen yapım dolusavağın ta kendisidir. Sırt eğrisi boyunca alt basınç oluşamaz. Debi katsayısı $m_0 = 0,49562$ dir. Bu değer deneyseldir ve Şekil 3.2'de görülen H_p yüküne tekabül eder. H_p proje yükü ismini alır.



Şekil 3.2. İnce kenarlı savaktan akım

Şekil 3.2’de görülen ince kenarlı savağın eşliğinden atlayan alt napı göz önüne alalım. Bunun A gibi bir noktasının koordinatları x ve y olsun. Su U_0 hızı ile boşluğa fırlatılmış ise x apsisinin değeri:

$$x = U_0 t \cos \theta$$

olur. y ordinatının değeri ise:

$$y = -U_0 t \sin \theta + 0,50 g t^2 + y_0$$

‘dır. x ve y arasında t zamanın eleyecek ve denklemin her iki tarafını H_p ile bölecek olursak:

$$\frac{y}{H_p} = \frac{g H_p}{2 U_0^2 \cos^2 \theta} \left(\frac{x}{H_p} \right)^2 - \tan \theta \frac{x}{H_p} + \frac{y_0}{H_p} \quad (3.10)$$

elde edilir. Bu denklem ikinci dereceden bir parabolü göstermektedir. Çizilebilmesi için (θ) ve (U_0) parametrelerinin değerlerinin bilinmesi gerekir. Koordinat eksenlerinin başlangıç noktasının parabolün en yüksek noktasına taşınması halinde y sıfır olacağından denklem:

$$y = \frac{g}{2 U_0^2 \cos^2 \theta} x^2 - \tan \theta x \quad (3.11)$$

şeklini alır.

Dibinde bir delik bulunan ve suyu aşağıya doğru θ açısı ile fişkırtan bir su haznesini göz önüne alalım. Bu takdirde 3.11 denklemi:

$$y = \frac{x^2}{4 H_p \cos^2 \theta} + \tan \theta x \quad (3.12)$$

$\tan \theta = b$, $\frac{x^2}{4H_p \cos^2 \theta} = a$ kabulü ile 3.12 denklemi genelleştirilebilir:

$$y = ax^2 + bx \quad (3.13)$$

$$\theta = 0 \text{ ise : } y = ax^2$$

$$\text{veya } y = \frac{x^2}{4H_p}$$

elde edilir. Bu denklem:

$$\frac{Y}{H_p} = \frac{1}{4} \left(\frac{X}{H_p} \right)^2 \quad (3.14)$$

şekline sokulabilir ve böylece parabolik sırt eğrisinin denklemi bulunmuş olur.

En genel hali tarif eden eğri 3.11 ve 3.13 denklemleri ile verilmiş olmandır. Bu takdirde H_p yükü altında savak sırtında hiçbir alt basınç oluşmaz. $h < H_p$ için nap, savak sırtına yapışıyor; dolayısıyla üst basınçlar doğar $h > H_p$ için ise nap savak sırtından ayrılma eğiliminde olur. Bu takdirde de alt basınçlar doğar 3.14 denkleminin dolusavak profilini ifade edebilmesi için genel olarak:

$$\frac{Y}{H_p} = a \left(\frac{X}{H_p} \right)^n \quad (3.15)$$

şeklinde yazılması gerekir. Uygulamada a ve n parametrelerine değişik değerler yakıştırılmıştır. Bunlardan en çok kullanılanları aşağıda verilmiştir [10]:

Tablo 3.2. H_p 'nin değişik değerlerine ve yaklaşım hızına bağlı olarak ince kenarlı savaktan çıkan su ışınının alt napının koordinatları

$$\frac{Y}{H_p} = 0,5 \left(\frac{X}{H_p} \right)^{1.85} \quad \text{Creager - Scimemi} \quad (3.16)_1$$

$$\frac{Y}{H_p} = 0,47 \left(\frac{X}{H_p} \right)^{1.80} \quad \text{Creager - Scimemi} \quad (3.16)_2$$

$$\frac{Y}{H_p} = 0,461 \left(\frac{X}{H_p} \right)^{1.85} \quad \text{Smetana} \quad (3.16)_3$$

$$\frac{Y}{H_p} = 0,556 \left(\frac{X}{H_p} \right)^2 \quad \text{de Marchi} \quad (3.16)_4$$

Görülüyor ki, 3.16 formülleri $\theta = 0$ olması halinde elde edilmektedir. Her birinin ileri sürülmesinde değişik esaslar vardır. (3.16)₁ formülü Creager'in teklif etmiş olduğu sırt eğrisini

verir. n parametresinin değeri düşürülmüş buna mukabil a'nınki artırılmıştır. Böylelikle 3.13 bağıntısının sonuçlarına uyulmak istenmiştir. (3.16)₂ bağıntısı (3.16)₁ bağıntısında % 6 farklıdır (Şentürk, F. 1957). H_p yükü altında oluşan nap bu profile hafifçe yaslanır; böylelikle alt basınçlardan tamamen kaçınılmış olur. H_p = h_{max} kabul edildiği takdirde en büyük debilerde dahi basınçlar pozitif olacaktır. Gerçekte elde edilen yapının ekonomik olmadığı açıktır. (3.16)₁ denkleminde verilen su napı H_p'nin değişik değerlerine bağlı olarak, nokta ölçülmüş ve sonuçlar toplanmıştır.

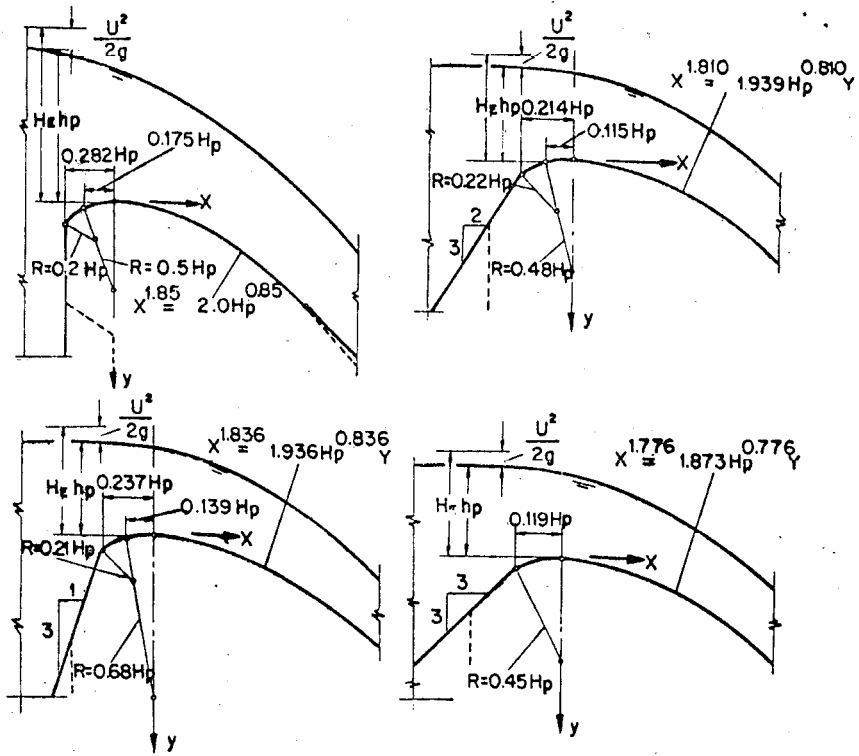
Birçok ülkede değişik savak tipleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Burada Birleşik Amerika'da "Waterways Experiment Station, WES" idaresi tarafından teklif edilen savak şekilleri örnek olarak verilmiştir:

$$\frac{Y}{H_p} = \frac{1}{k} \left(\frac{X}{H_p} \right)^n \quad (3.17)$$

Koordinat sisteminin sıfır noktası sırt eğrisinin en yüksek noktasına tekabül etmektedir. k ve n parametrelerinin değerleri menba yüzü eğimine göre belirlenmiştir. Teorik bakımdan θ açısının değişimleri göz önüne alınıyor demektir. Filvaki bu tip formüllerde (x tg θ) teriminin değişimi k parametresi içinde incelenmektedir [11].

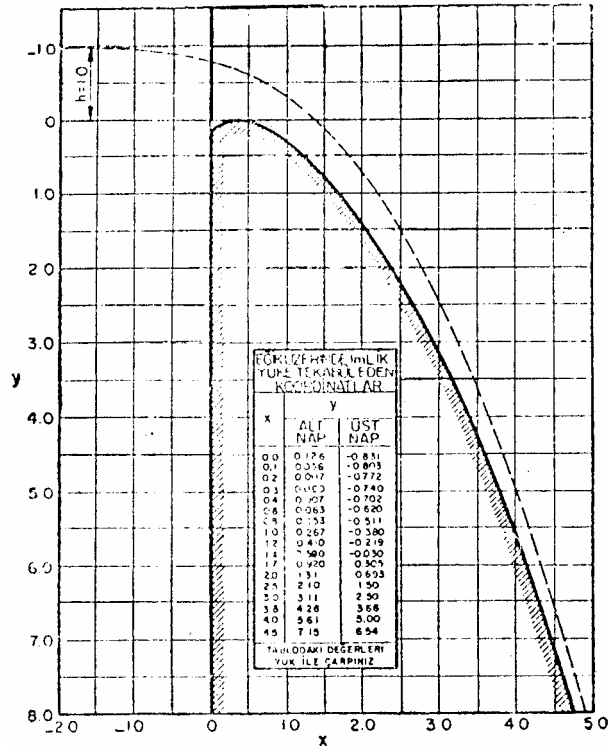
Tablo 3.3. k ve n parametrelerinin değerleri

Savağın menba yüzünün eğimi	k	n
Düşey: 3, yatay: 1	2,000	1,850
Düşey: 3, yatay: 2	1,936	1,836
Düşey: 1, yatay: 1	1,873	1,776

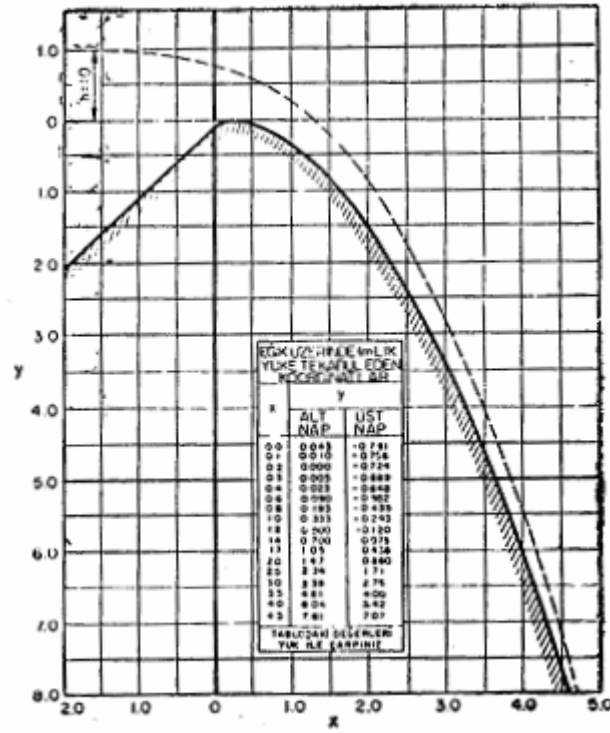


Bu şekillerde $H_p = H_p$ alınmıştır.

Şekil 3.3. WES tarafından kullanılması önerilen dolusavak profilleri



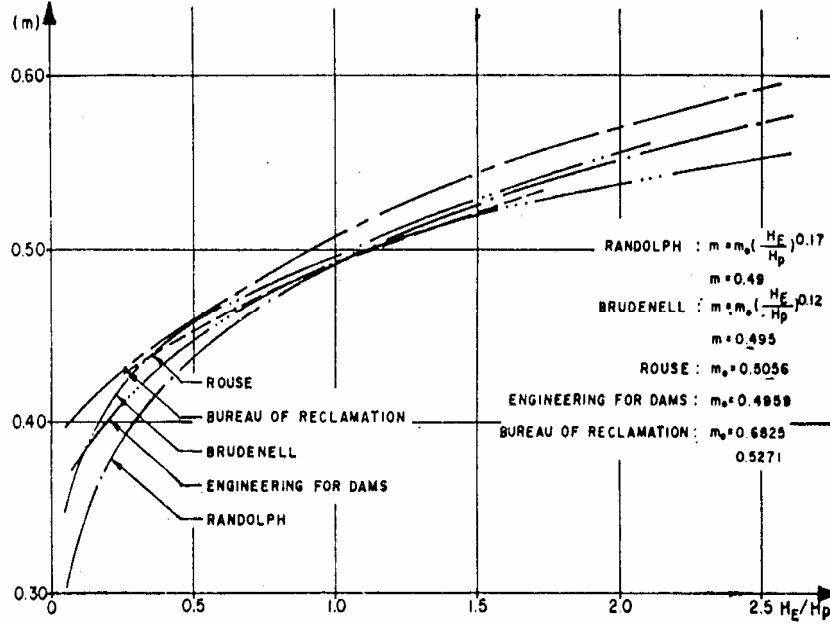
Şekil 3.4. İnce kenarlı bir savağın üstünden aşan su napının koordinatları (menba yüzü düşey)



Şekil 3.5. İnce kenarlı bir savağın üstünden aşan su napının koordinatları (menba yüzü 45 derece eğimli)

Yukarıdaki değerlere tekabül eden standart savak tipleri Şekil 3.3 'de verilmiştir. Şekil 3.4 ve 3.5'de de Creager profilinin $H_p = 1$ için verilen koordinatları görülmektedir. Bu savaklardan birinin yerine göre seçilerek projelerde kullanılması gereklidir. WES 'in ve 3.16 formüllerinin tavsiye ettiği katsayılar ister n ister k için verilmiş olsun sabittir. Hâlbuki bunların h su yüküne bağlı sürekli bir şekilde değişimleri gerekir. "Bureau of Reclamation, USBR" in yapmış olduğu laboratuvar deneyleri sonucu, bu değişimleri grafikler halinde teklif etmiştir. Şekil 3.6'da serbest akışlı bir savağın hem n ve k katsayıları hem de geometrik karakteristikleri gösterilmiştir. Grafiklerde $K = 1/k$ olarak işaretlenmiştir.

formülü ile özetlemek mümkündür. Değişik ülkelerde yapılan çalışmalar birbirine benzer bağıntılar yardımıyla yapılmıştır. Şekil 3.7'de gösterilen eğriler müracaat kitaplarında verilenleri birbiriyle karşılaştırmaktadır.



Şekil 3.7. Değişik savak formüllerinin karşılaştırılması

Çalışma kuralları bellidir ve aşağıda özetlenmiştir:

1. Su içikleri savak eksenine diktir.
 2. Kinetik yükseklik ihmal edilebilir değerdedir ve savakta yanal büzülmeler yoktur.
- Ölçümlerin yapıldığı model en duyarlı ölçüm cihazları ile donatılmıştır.

3.2.3. Serbest akışlı kapaksız dolusavaklarda alt basınçlara yer veren profillerin belirlenmesi

3.2.3.1. Dolusavakların geçirdikleri debiler

Bilindiği gibi dolusavakların debileri,

$$Q = mA(2gh)^{1/2} = CLh^{3/2} \quad (3.8)$$

formülü ile hesaplanır. Burada:

Q: m³ / s cinsinden savak debisi

m: debi katsayısı

A: m² cinsinden ıslak alan

L: savağın uzunluğu

h: m cinsinden savak yükü (kinetik yük buna dâhildir.)

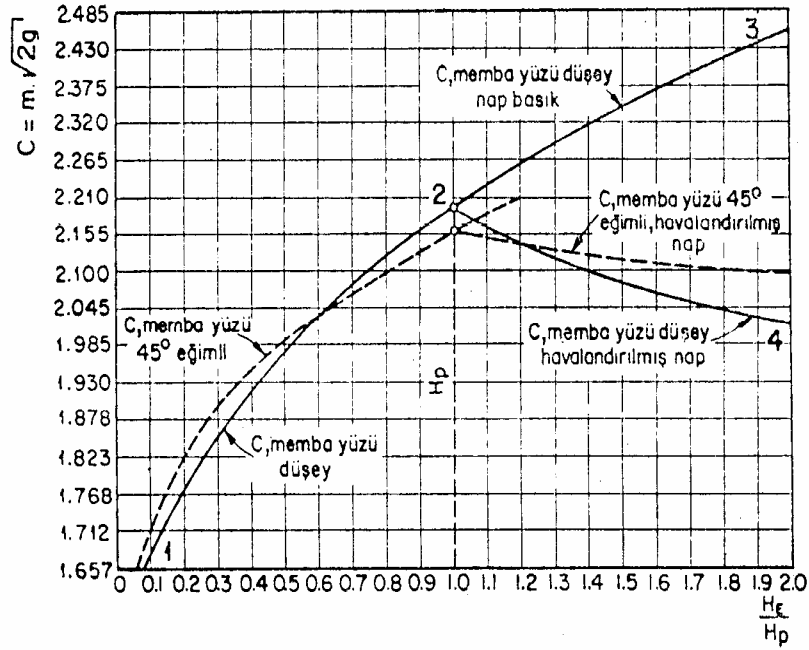
‘dür.

Savak debisini veren bağıntıda m katsayısı sabit değildir, yüke bağlı olarak değişir. Yukarıda da söylenmiş olduğu gibi $h = H_p$ için $m = 0,4956$ olur. $h > H_p$ değerlerinde m debi katsayısı artar. Bu değişimin ifadesi deneysel yoldan belirlenmiş ve değişik araştırmacılar tarafından teklif edilmiştir. 3.18 ve 3.19 nolu bağıntılar bunlardan iki tanesini örnek olarak vermektedir.

$$m = m_0 \left(h / H_p \right)^{0.17} \quad (3.18)$$

$$m = m_0 \left(h / H_p \right)^{0.12} \quad (3.19)$$

3.18 nolu bağıntı Randolph [12], 3.19 nolu bağıntı Brudenell [13] tarafından teklif edilmiştir. Benzer bir değişim grafik yoldan da gösterilmiştir.(Şekil 3.8)



Şekil 3.8. Debi katsayısının h/H_p oranına göre değişimi

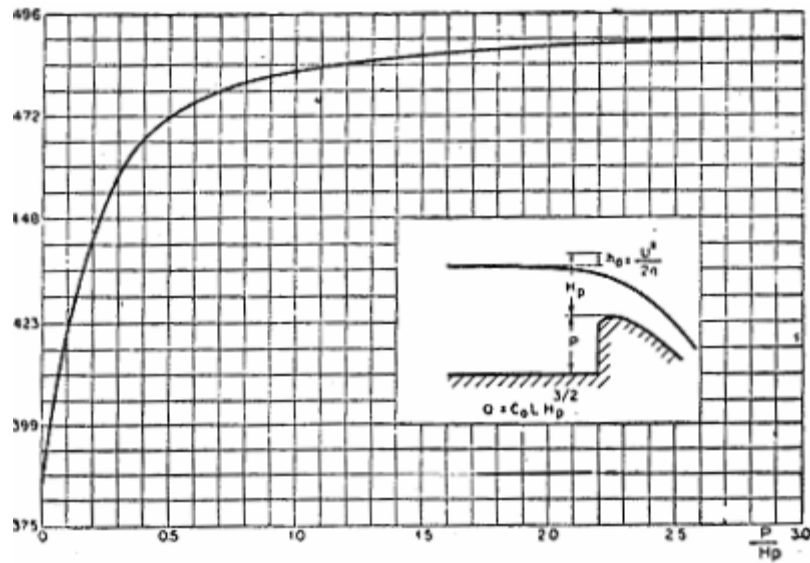
Debi hesaplarında bu diyagramdan da faydalanmak mümkündür. 3.18 incelendiği zaman $h/H_p > 1$ için $m/m_0 > 1$ olduğu görülmektedir.

m katsayısının bu artımı sonsuz değildir. Genel olarak $m > 0,52$ için su ışınında parçalanmalar olur. Bu konuyu açıklamak için m katsayısının artımını su ışınının r eğrilik yarıçapının değişimine bağlamak gerekir. r, ne kadar küçülürse m o nispette artar. Gerçekte bu olay su ışınının savak sırtından sıyrılmasının nedenidir. Nap ile ışın arasında bir A alçak basınç bölgesi vardır. Bu alçak basınç, su ipçiklerini tıpkı bir sifonda olduğu gibi çeker; dolayısıyla

debi katsayısı artar. $m > 0,52$ için bu alçak basınç öyle bir düzeye iner ki atmosfer basıncı ışını parçalayarak hava girmesine neden olur.

r , yarıçapı artacağından debi katsayısı azalır. Fakat bu hava yeniden sürüklenerek m katsayısının artımına neden olur. Böylelikle hareket devam eder. Su ışını sallanır, titreşimler ve su darbeleri başlar. Bu, tehlikeli bir durumdur. Titreşimler nedeniyle yapımda da titreşimler doğacaktır, titreşim halinde hasar kaydedilebilir. Laboratuvarlarda özel tedbirler alınarak m katsayısı 0,60 değerine kadar çıkarılabilmektedir. Fakat uygulamada 0,52 geçilmemelidir. $m=0,51$ kabul edilebilecek bir değerdir. Daha ileride de görüleceği gibi alt basıncın limit değeri, yapının inşaat malzemesi ile ilgilidir. Gerçek değerinin hesaplanabilmesi için sırt eğrisinin bilinmesi gerekir. 3.20 formülünün Creager profili için geçerli olduğu unutulmamalıdır. Fakat profiller için değerler farklı olur. Görülüyor ki, Creager profili üzerinde de alt basınçlar elde etmek olanağı vardır. Bu basıncın alacağı max değer belirlendikten sonra m katsayısına geçmek ve H_p proje yükünü buna göre belirlemek gerekir.

3.2.3.2. Debi katsayısının savağın (P) yüksekliğine bağlı olarak değişimi

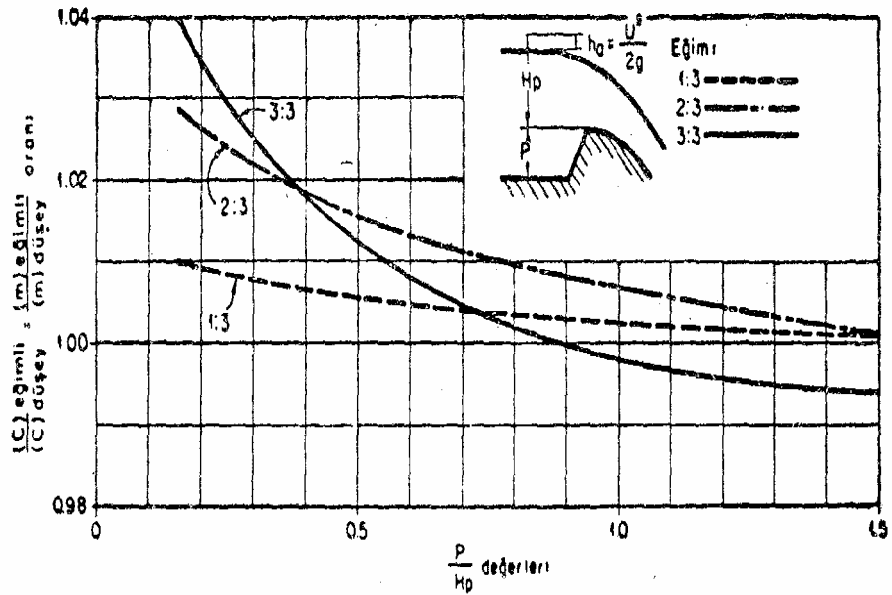


Şekil 3.9. Debi katsayısının P/H_p cinsinden değişimi

Bir kanal içine yerleştirilmiş olan ve profili Şekil 3.9'da gösterilen bir savağı göz önüne alalım. Bunun üzerinde yer alan akımın m debi katsayısı P/H_p oranının artımına bağlı olarak artar. Bu artış $m = 0,4956$ oluncaya kadar devam eder. Bu değerlerden sonra P savak yüksekliğinin m katsayısı üzerindeki etkisi sıfıra eşit olur.

(P) değeri akımı sağlayan yükün beşte birinden küçük ise bu takdirde ikinci bir sınır sayı elde edilir. Bu da geniş eşikli savaklara ait ve teorik yoldan hesap edilmiş olan $m=0,383$ değeridir.

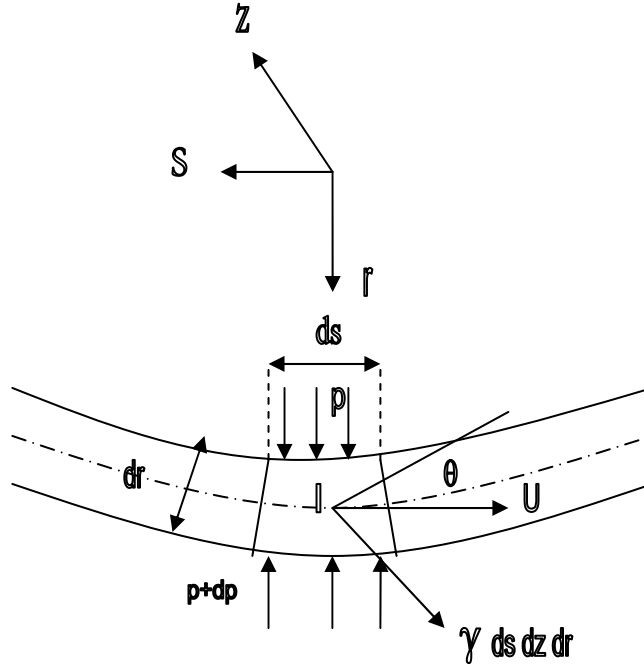
m yukarıda görülen sınırlar arasında ve P'ye bağlı olarak Şekil 3.9'daki eğri kuralınca değişir. Hesaplara giren yük ölçümlerinin büzülme kesitinden itibaren ölçüleceği göz önüne alınmalıdır. Kabartma gövdesi menba yüzü eğimli ise bu takdirde (P) derinliğinin (m) katsayısı üzerindeki etkisi değişir. Bu değişim Şekil 3.10'da verilmiştir. Görüldüğü gibi eğriler birbirini kesmektedir. (P/H_p) 'nin küçük değerleri için debi katsayısının en büyük değerlerine ulaşılmıştır. (P/H_p) 'nin büyük değerleri için, nap büzülmesi üzerinde eğimli menba yüzünün etkisi azalacağından katsayı, düşey yüzölçümüne eşit olur.



Şekil 3.10. USBR'a göre debi katsayısının h/H_p cinsinden değişimi

3.2.4. Serbest akışlı kapaksız dolusavaklarda oluşan basınçların hesabı

Büyük eğimli eğrisel kanallar içinde yer alan akımlardan doğan basınçların hesabı rasyonel bir şekilde Lauffer tarafından ele alınmıştır [14]. Şekil 3.11'de eğrisel bir kanalda hareket eden su kitlesi görülmektedir. Teorik açıdan gerçekçi olabilmesi için dirsek içinde hareket eden suyun derinliğinin eğrilik yarıçapına nazaran küçük olması zorunluluğu vardır. Bu takdirde (ds) uzunluğunda (dr) derinliğinde elemanter bir su hacmini bir dikdörtgen prizmasına benzetmek mümkün olur. Bu prizmanın üçüncü boyutu (dz)'den ibarettir.



Şekil 3.11. Kurbadaki akıma etkiyen kuvvetler

Böylece tarif edilen prizmaya üç kuvvet etkir ve prizma bu üç kuvvetin etkisi altında dengededir.

1. Prizmanın ağırlığı : $\gamma * dr * ds * dz$
2. Prizmaya etkiyen basınç kuvveti : $-(p + dp)ds * dz + p * ds * dz$
3. Prizmaya etkiyen merkez kaç kuvveti : $\left(\frac{U^2}{r}\right)\left(\frac{\gamma}{g}\right)dr * ds * dz$

Burada (p) ile basınç kuvveti, (U) ile yersel hız, (γ) ile suyun özgül ağırlığı, (r) ile eğrilik yarıçapı ve (g) ile de yerçekimi ivmesi gösterilmiştir.

Bu üç kuvveti (r) eksenini üzerinde izdüşümleyelim ve dengede olduklarını yazalım:

$$\gamma * dr * ds * dz * \cos \theta + \left(\frac{U^2}{r}\right)\left(\frac{\gamma}{g}\right)dr * ds * dz + -(p + dp)ds * dz + p * ds * dz$$

buradan:

$$\cos \theta + U^2 / gr = d(p + \gamma) / dr \quad (3.21)$$

elde edilir.

3.21 denkleminde iki bilinmeyen vardır:

- Yersel U hızı
- (P) basıncı

Bunların çözüle bilmesi için ikinci bir denklem gerekir. Bu ikinci denklem ‘enerji denklemi’ olabilir.

$$dp / \rho + gdz + UdU = 0 \quad (3.22)$$

Gerek 3.21 gerekse 3.22 denklemleri Şekil 3.11’de görülen L noktası için yazılmıştır. Dolayısıyla:

$$\begin{aligned} \cos \theta + (U^2_c / gr_c) &= (dp_c / \gamma) / dr_c \\ (dp / \rho) + gdz + UdU &= 0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

bulunur. (ρ), suyun yoğunluğudur.

H_c hidrolik yükünün sabit olduğu düşünülecek olursa enerji denkleminin entegre edilmesi gerçekleşebilir. O halde:

$$d(p / \gamma) + dz + (udu / g) = 0$$

ve

$$d(p / \gamma) = dr * \cos \theta - (udu / g)$$

$d(p / \gamma)$ ’yı 2.24 sisteminde elemek suretiyle:

$$r * du + u * dr = 0$$

veya

$$u = \text{sabit}$$

bağıntısı elde edilir. O takdirde 3.23 sistemi 3.24 sistemine dönüştürebilecektir,

$$u_c r_c = \text{sabit}$$

$$(p_c / \gamma) + z_c + (u^2_c / 2g) = \text{sabit} \quad (3.24)$$

(3.24) sisteminde iki sabit vardır. Bunların değerleri belirlenebildiği takdirde problem çözülmüş olur. Şekil 3.12’yi inceleyelim.

$$p_0 / \gamma = H - (H - d \cos \theta) [(r - d) / r]^2 \quad (3.26)$$

$$u_0 = [2g(H - d \cos \theta)]^{1/2} [(r - d) / r]$$

3.25 ve 3.26 sistemi Laeuffer, [14] ve Maitre, R. [10] tarafından verilmiştir. Bağlıntıların değişimlerinin incelenmesi ve uygulanabilecekleri sınırın iyice belirlenmesi gerekir.

3.26 bağıntılarını H_c yüküne bölelim. Akımın her ipçiğindeki yük sabit kabul edildiğinden $H_c = H$ alınmıştır.

$$(p / \gamma) / H = 1 - [1 - (d \cos \theta / H)] [1 - (d \cos \theta) / H (H / r \cos \theta)]^2$$

bu denklemde bir değişken değişimi yapılabilir:

$$z = (H / r \cos \theta)$$

$$x = d \cos \theta / H$$

$$y = (p / \gamma) / H$$

ve

$$y = 1 - (1 - x)(1 - zx)^2$$

$$y = (1 + 2z)x - z(2 + z)x^2 + z^2 x^3 \quad (3.27)$$

bulunur.

3.27 bağıntısının değişimi incelendiği zaman aşağıdaki sonuca varılır:

1. Eğrinin iki tepe noktası vardır. Bunların değerleri:

$$x_n = (1 / z) \quad x_m = (2 / 3) + (1 / 3z) \quad (3.28)_1$$

$$y_n = 1 \quad (3.28)_2$$

2. Su yüzeyindeki bir nokta göz önüne alınacak olursa,

$$H = d \cos \theta + \frac{u^2}{2g}$$

yazılabilir. $u^2/2g > 0$ olduğuna göre $H > d \cos \theta$ 'dır . O halde $0 < x < 1$ eşitsizliği geçerli olacaktır. Bu şart çok önemlidir. Buna göre $z < 1$ değerleri için fiziksel bakımdan denklem yetersizdir. $z < 0$ değerleri için ise alt basınçlar görülür.

3. Eğrilik merkezi eğrinin altında bulunması ve $z < -0,50$ şartının gerçekleşmesi halinde alt basınçlar doğar. Bunlar x 'in artan değerlerine bağlı olarak önce artar sonra eksilir ve kaybolur.

4. Alt basınçların, sırt eğrisinin hangi noktasında oluştuğunu bulmak için yukarıda verilmiş olan formüllerden 3.27 'den yararlanılır. Böylelikle d ve r değişkenlerinin yardımıyla (p/γ) basınç değişimi bulunmuş olur.

4.CFD YAZILIMLARI

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics-CFD) ileri bir konudur. Akışkanların hareketini belirlemek için, temel denklemlerden ve deneysel sonuçlardan yola çıkılarak geliştirilmiş bazı matematiksel yöntemler vardır. Bu yöntemlerin sayısal çözümlemesi kompleks modeller için ancak bilgisayar desteği ile mümkün olabilmektedir. Sonlu elemanlar gibi sayısal yöntemler kullanılarak geliştirilen matematik modeller, bilgisayar desteği ile çok hızlı ve etkili bir şekilde çözülebilir. Hidrolikteki birçok problemin üç boyutlu incelenmesi gerekmesine rağmen, önceleri yapılan sayısal modellerin birçoğu işlem zamanı düşünülerek iki boyutlu olarak incelenmiştir. Üç boyutlu modellerde hassas çözüm için sonlu eleman sayısı çok fazla artacağından çözüm zamanı ve çok fazla artmaktadır [16].

Çok fazlı ve serbest yüzeyli akımlar gibi problemlerin sayısal analizlerinin yapılabilmesi için yazılım şirketleri Çok Fazlı Model (*Multiphase model*), Akışkan Hacmi (VOF – Volume of Fluid) Modeli gibi CFD modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerle Dolusavak Profilleri üzerinde birçok çalışmalar yapılmıştır.

Her bir problem için uğraştırıcı matematik modeller kurmak yerine, bu konuda yılların birikim ve deneyimleri sonucu hazırlanmış, Fluent gibi, genel amaçlı CFD yazılımlarının kullanılması çok daha uygun ve doğru olacaktır.

4.1. Fluent CFD Yazılımı (Fluent v5.3)

Bu tezde, dünya çapında CFD konusunda ileri düzeye gelmiş olan, özellikle hava-su karışımı gibi çok fazlı, serbest yüzeyli akımların modellenmesinde ve türbülanslı akımların çözümünde başarılı Fluent yazılımı kullanılmıştır. Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıdır. 1983' ten bu yana dünya çapında birçok endüstri dalında kullanılan ve günden güne gelişerek tüm dünyadaki HAD piyasasında en çok kullanılan yazılım durumuna gelen Fluent, en ileri teknolojiye sahip ticari HAD yazılımı olarak kullanıcılarının en zor problemlerine kolay ve kısa sürede elde edilen çözümler sunmaktadır. Modelleri Fluente hazır hale getirmek için Gambit ve TGrid gibi üç boyutlu çizim programları kullanılmaktadır. Bu programlarla modelin üç boyutlu geometrisi oluşturulur ve bu modeller sonlu elemanlar ağına bölünür. Gambit, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve Sonlu Elemanlar (SE) analizlerinde kullanılabilen genel amaçlı bir ön işlemdir.

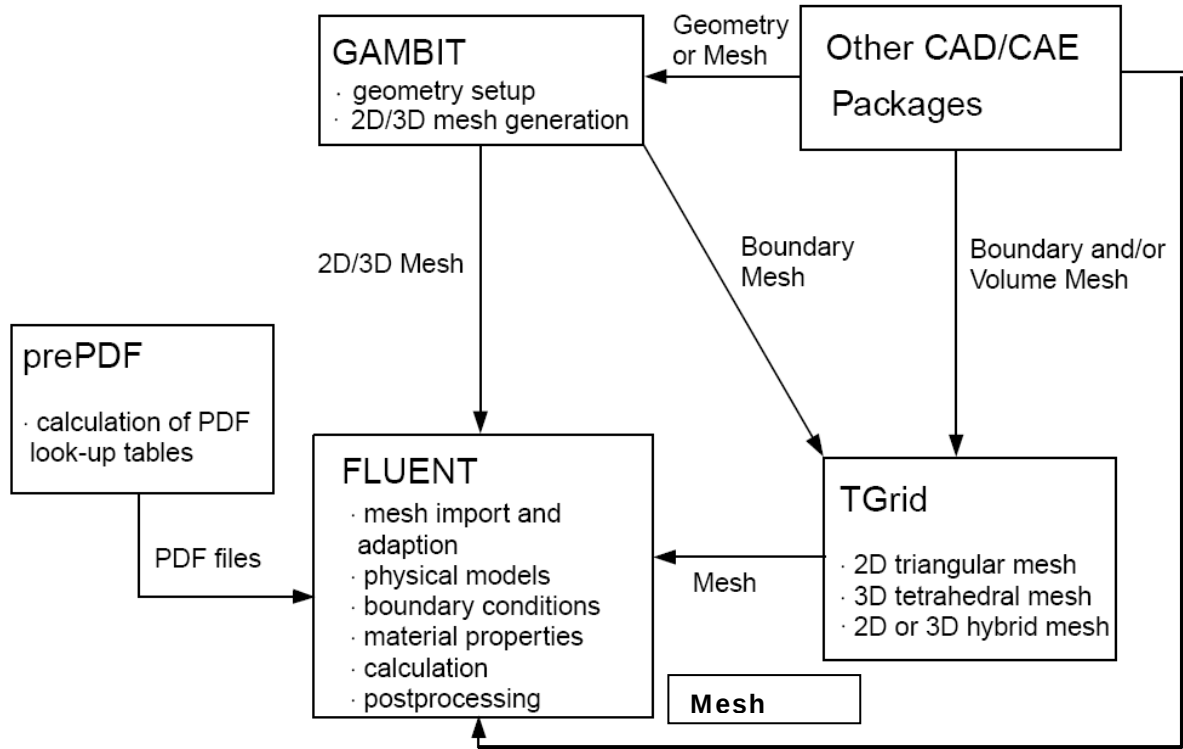
Gambit, HAD ve SE analizlerinin üzerinde en fazla vakit harcanan kısmı olan model hazırlama ve sayısal ağ oluşturma işlemlerini, bünyesinde barındırdığı araçların da yardımıyla, kolaylaştırma ve hızlandırmayı amaçlayan bir yazılımdır. Gambit, sunduğu araçlarla,

kullanıcısına kaliteli bir çözüm için gerekli ilk şart olan kaliteli sayısal ağı sahip olma imkânı tanır. Diğer ön işlemcilerin aksine Gambit, sahip olduğu katı modelleme araçları sayesinde hem orta derecede karmaşık geometrilerin oluşturulmasına hem de gelişmiş geometri alım kapasitesi sayesinde UNIGRAPHICS, I-DEAS, Pro/ENGINEER, CATIA, SOLIDWORKS gibi profesyonel katı modelleme programlarından model alımına olanak tanıyarak kullanıcısına büyük bir esneklik sağlar [15].

Gambit, iki boyutta dörtgen ve üçgen elemanların, üç boyutta ise altı yüzlü, dört yüzlü ve geçiş elemanları olarak kama tipi ve piramit tipi elemanların kullanımına izin vererek istenilen tipteki sayısal ağı basit ve hızlı bir şekilde oluşturulmasına imkân verir. Bununla beraber, “boyut fonksiyonu” ve “sınır tabaka aracı” gibi araçları yardımıyla model içinde ve kritik noktalarda eleman yoğunluğunun ve kalitesinin kontrol altında tutulmasına olanak sağlar [15].

Fluent gibi CFD yazılımlarının en büyük dezavantajı çözüm zamanı ve yüksek kapasiteli bilgisayar gereksinimidir. Özellikle üç boyutlu modellerin hassas çözümlerinde daha küçük ve daha fazla sayıda sonlu eleman ağına bölmek gerekmektedir bu durumda da daha fazla zamana ve daha büyük kapasiteli PC'lere gereksinim duyulmaktadır. Ancak günümüzdeki yüksek hızlı işlemci (Pentium IV, Xeon gibi) ve yüksek bellekli (en az 512 MB RAM) Pc'lerle bile yeterli sayıda sonlu eleman hücrelerine sahip üç boyutlu modeller çözülebilmektedir. Fluent ile sayısal çözümlerde, her 100.000 üç boyutlu eleman için yaklaşık 100MB RAM'a ihtiyaç duyulur. Örneğin, 512MB RAM bellekli bir bilgisayarla yaklaşık 500.000 üç boyutlu elemana sahip bir model çözülebilir.

4.2. Fluentin Yapısı



Şekil 4.1. Temel Program Yapısı

4.3. Fluentin Özellikleri

Fluent çözümlerinin bazı model özellikleri;

- 2D düzlemsel, 2D eksenel, 2D dönel eksenel ve 3 boyutlu akımlar.
- Quadrilateral, triangular, hexahedral (brick), tetrahedral, prizmatik, piramit ve karışık eleman meshleri.
- Üniorm ve üniorm olmayan akımlar.
- Sıkışmayan ve sıkıştırılabilen akımlar, bütün hız rejimlerini kapsar (düşük sesaltı, sestem hızlı, sestem çok hızlı).
- Viskoz olmayan, laminar ve türbülanslı akımlar.
- Newtonyel ve newtonyel olmayan akımlar.
- Isı transferi, doğal ve karışım konveksiyon, çekme (katı/sıvı) ısı transferi ve ışıınım.
- Özel kimyasal karışımlar ve reaksiyonlar, homojen ve heterojen yanma modelleri ve yüzey reaksiyon modelleri.
- Kavitasyon modeli.
- Erime ve katılaşma için değişken faz modellerinde kullanılır.

- Hareketli alan modellenmesi için dinamik meshleme modeli.
- Materyal özellikleri verileri.

Fluent, sıkışmaz ve sıkıştırılabilir akışkan akımlarının simülasyon çalışmalarında kullanımı önerilen bir yazılımdır.

4.4. Fluent ‘te Çok Fazlı Akım Problemlerinin Modellenmesi (Multiphase Flows)

Fluent, aşağıda sıralanan çok fazlı akım problemlerinin modellenmesine olanak sağlar.

- **Kabarcık Akımı (*Bubble Flow*):** Sürekli sıvı faz içindeki gaz veya hava kabarcıklarının modellenmesi (Havalandırıcılar gibi).
- **Damlacık Akımı (*Droplet Flow*):** Sürekli gaz fazı ortamındaki sıvı zerrelere veya damlacıklarının modellenmesi
- **Sediment Akımı (*Particle-Laden Flow*):** Sürekli akışkan ortamındaki katı parçacık hareketi (sediment gibi).
- **Büyük Kabarcık Akımı (*Slug Flow*):** Sürekli sıvı ortamındaki büyük kabarcıkların modellenmesi.
- **Halkasal Akış (*Annular Flow*):** Cidarlar boyunca sürekli akışkan modellenmesi.
- **Serbest Yüzeyli Akım (*Free Surface Flow*):** Net bir şekilde belirlenmiş ara yüzeyle birbirine karışmayan akışkanların modellenmesi.

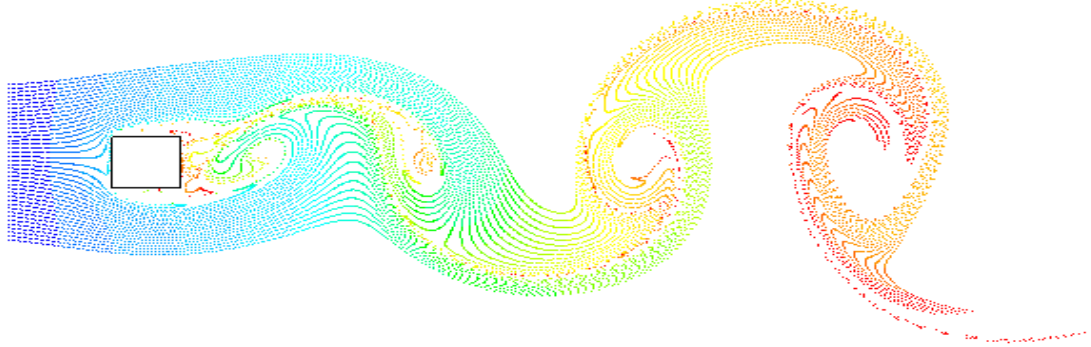
Fluent’te çok fazlı akımlar genelde, birincil faz sürekli ortam akışkanı, diğeri ise bu akışkan içine dağılmış olan ikincil faz olarak tanımlanır. Atmosfere açık serbest yüzeyli akımlar için, sürekli ortam akışkanı hava, ikincil faz ise su olarak alınır. Dolusavaklar’da da VOF modeli kullanılacağından fazlar bu şekilde alınacaktır.

Fluent 5’te çok fazlı akışkan modelleri için 4 farklı model önerilmiştir:

- Dağınık Faz Modeli (*Dispersed Phase Model-DPM*)
- Akışkan Hacmi Modeli (*Volume of Fluid Model- VOF*)
- Cebirsel Kayma Karışım Modeli (*Algebraic Slip Mixture Model-ASMM*)
- Kaviteasyon Modeli (*Cavitation Model*)

4.4.1. Dağınık faz modeli (Dispersed Phase Model-DPM)

Sürekli ortam akışkanlarından katı parçacıkları, sıvı damlaları veya gaz kabarcıklarının ayrılması gerekiyorsa bu model kullanılabilir.



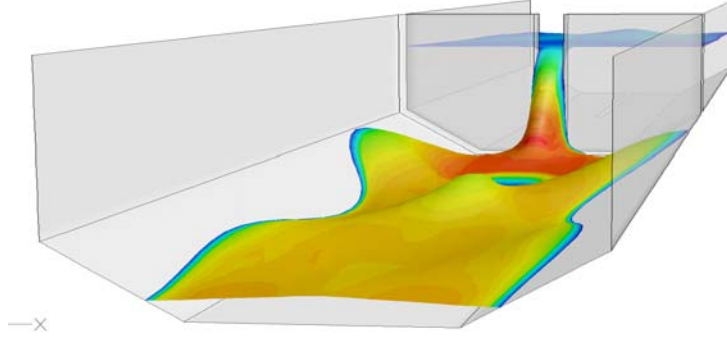
Şekil 4.2 Dağınık Faz Modeli

Hücrelerin %10'undan daha küçük hacim oranlarının belirlenmesi için uygundur. DPM, çözüm yaparken aşağıdaki hesapları gerçekleştirir:

- Sürekli akışkan içerisindeki ikincil faz akışkan parçacıklarının yörüngesi hesaplanır (kabarcıkların yörüngesi gibi).
- Sürekli ve ayrılmış akışkan fazları arasında ısı, kütle ve moment transferi hesaplarını gerçekleştirir.
- Parçacık-parçacık etkileşimini ihmal eder.
- Zamanla değişen veya değişmeyen akımların parçacık izlerini hesaplar.

4.4.2. Akışkan hacmi (Volume of Fluid-VOF) modeli

Karışmayan akışkanların net bir ara yüzey ile ayrılması bekleniyorsa bu modelin kullanılması doğru olur. Özellikle serbest yüzeyin şeklinin önemli olduğu problemlerde kullanılmaktadır. Genellikle, bir sıvı içerisindeki büyük kabarcıkların hareketinde, bir engelden sonraki sıvının hareketi gibi ara yüzeyleri net olan birçok modellemede kullanılabilir. Bizim çalışmamızda da dolusavak üzerindeki su ile atmosfer arasında bir ara yüzey olduğu için bu modeli kullanmamız uygun olacaktır.



Şekil 4.3 Serbest Yüzeyle Akım Modeli

VOF modelde sıvı ve gaz fazı arasındaki ara yüzeyin belirlenmesi her k fazı için bir hacim oranı süreklilik denkleminin çözümü ile gerçekleşir.

$$\frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon_k}{\partial x_j} = S_{\varepsilon_k} \quad (4.1)$$

Denklemin sağ tarafındaki kaynak terimi VOF model için sıfıra eşittir. Bu terim, kavitasyon model için sıfırdan farklıdır. Hacim oranı denklemi birinci faz için çözülmeyecektir. Birincil fazın oranı (4.2)'deki sınırlamaya dayalı olarak hesaplanır.

$$\sum_{k=1}^n \varepsilon_k = 1 \quad (4.2)$$

Denklem (4.1) ve (4.2)'deki; ε_k : k . Fazın hacim oranı, u_i : Hız vektörleri, x_i : Yön vektörleri, S_{ε_k} : Kaynak terimi, n : Akışkan sayısını ifade etmektedir. Seçilen sonlu elemanın boyutundan daha küçük hassaslıkta ara yüzey belirlemek mümkün değildir. Dolayısıyla daha net bir ara yüzey için daha hassas bir sonlu eleman ağı gerekmektedir. VOF modelin çözüm özellikleri şunlardır:

- Her akışkan için momentum denkleminin bir seti çözülür.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + F_j \quad (4.3)$$

- Momentum denklemine eklenen bir terimle yüzey gerilimleri ve cidar adezyonu modellenebilir.
- Türbülanslı akımlar için transfer denklemlerinin tekil seti çözülür.
- Birincil fazın korunum denklemleri çözülür.

Fluent'teki yüzey gerilim kuvvetleri Brackbill ve diğ. [16] tarafından önerilen sürekli yüzey kuvvet (Continuum Surface Force-CSF) yöntemiyle modellenir. Buna göre, ara yüzeyin her iki tarafında kalan akışkanların basınç farkı yüzey gerilim katsayısına bağlıdır. Yüzey eğriliği iki yarıçaplı (R_1 ve R_2) olarak tanımlanırsa, bu basınç farkı aşağıdaki (4.4) denklemiyle ifade edilir:

$$P_1 - P_2 = \sigma_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.4)$$

Burada; P_1 ve P_2 : Ara yüzeyin her iki tarafında kalan akışkanlardaki basınçlar, σ_s : Yüzey gerilmesidir. CSF modeline göre VOF hesaplarında momentum denkleminde eklenen ek terim, yüzeydeki kuvvetin bir hacim kuvveti olarak aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$F_{vol}(x) = 2\sigma_s K(x) \varepsilon_2 \nabla \varepsilon_2 \quad (4.5)$$

Bu ek terim ara yüzeyin yalnızca bir tarafına eklenir. Fluent, VOF modelde bu ikincil fazdır. Burada; ε_2 : İkincil fazın hacim oranı ve K : Yüzey eğriliğidir. Yüzey eğriliği, $\hat{n}$ vektörün diverjansı bakımından aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$K = \nabla \hat{n} = \frac{1}{|n_s|} \left[\left(\frac{n_s}{|n_s|} \nabla \right) |n_s| - (\nabla n_s) \right] \quad (4.6)$$

Burada, n_s : İkincil fazın hacim oranı gradyentiyle tanımlanan yüzey normalidir ($n_s = \nabla \varepsilon_2$).

$\hat{n} = n_s / |n_s|$ olarak ifade edilir. Yine Brackbill ve diğ. [17] tarafından önerilen yöntemden alınarak VOF modelde kullanılan cidar adezyon kuvvet açısı ile alakalı ifade aşağıdaki gibidir:

$$\hat{n} = \hat{n}_\omega \cos \theta_\omega + \hat{t}_\omega \sin \theta_\omega \quad (4.7)$$

Burada; $\hat{n}$: Yüzeye normal birim vektör $\hat{n}_\omega$ ve $\hat{t}_\omega$: Sırasıyla, katı cidara normal ve teğetsel birim vektörler, θ_ω : Katı cidarla yüzey teğeti arasındaki ikincil faz içinde ölçülen temas açısıdır. ∇ operatörü aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \text{ve } \text{div}(n) = \nabla n$$

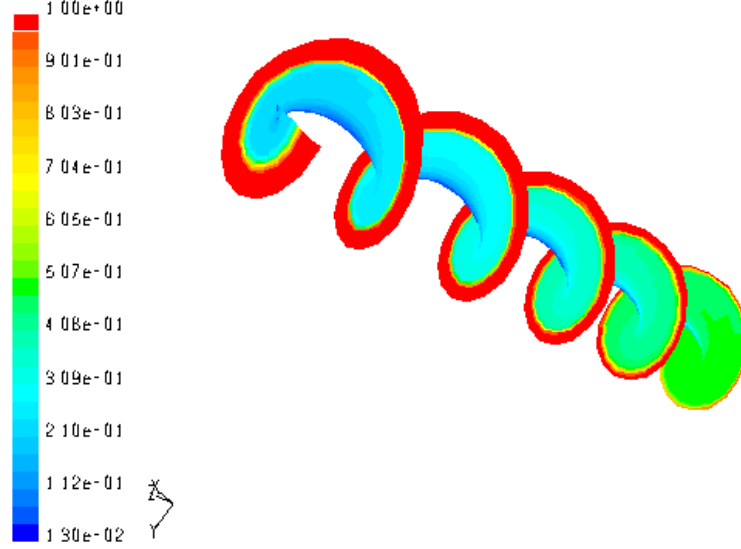
4.4.2.1. Hacim oranı

Çok fazlı akımlarda sonlu elemanlar ağlarıyla bölünmüş her bir hücre iki akışkanın belirli hacim oranlarıyla işgal edilir. 'k' akışkanın hacim oranı için üç durum söz konusudur.

- $\varepsilon_k = 0$ ise k akışkanın hücresi boş,

- $\varepsilon_k = 1$ ise akışkanı hücreyi tamamen doldurmuş,
- $0 < \varepsilon_k < 1$ ise hücre iki akışkanın ara yüzeyini içerir.

4.4.3. Cebirsel kayma karışım modeli (Algebraic Slip Mixture Model- ASMM)

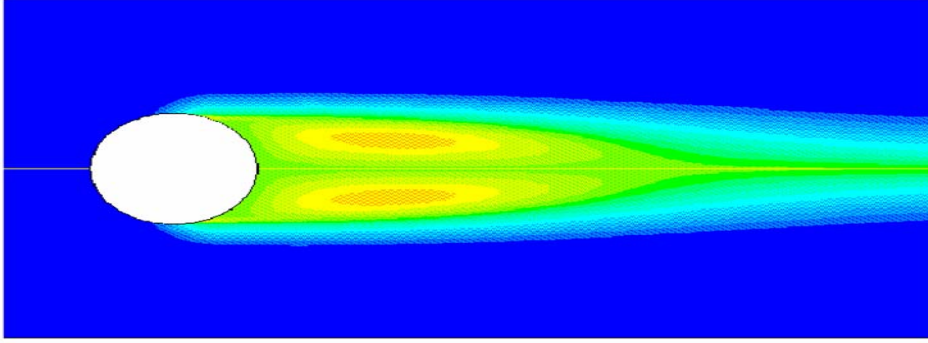


Şekil 4.4 Cebirsel Kayma Karışım Modelinin Fluent 5 Yazılımında Çözümü

VOF modelden farklı olarak ASMM model akışkan fazlarının birbirine karışmasına izin verir. Sıvı içindeki çok daha küçük gaz kabarcıklarının modellenmesine olanak sağlar. Kontrol hacimlerinde 0~1 arasında hacim oranları elde edilir. ASMM'nin çözüm özellikleri şunlardır:

- Karışım süreklilik ve momentum denklemlerini çözer.
- İkincil fazın hacim oranının taşınımını çözer.
- Fazlar arasındaki kayma hızını hesaplamak için cebirsel bir bağıntı kullanılır. Böylece iki faz akışkanın farklı hızlarda hareket etmesine olanak tanır
- Zamanla değişen veya değişmeyen akımlar içinde uygundur.
- Yalnız iki fazlı akımlar modellenebilir.
- Akım sıkıştırılamaz olmalıdır.
- Tüm kontrol hacimleri tek bir akışkan fazıyla veya iki fazın birleşmesiyle doldurulmalı boş hacim bırakılmamalıdır.

4.4.4. Kavitasyon model (Cavitation Model)



Şekil 4.5 Kavitasyon Modeli

VOF modelden iki yönüyle ayrılır. Birincisi, iki akışkan arasında arayüzey olması gerekmez, akışkanların birbirine karışması sağlanır. İkincisi, fazlar arasında dönüşüm mümkündür. Dolusavaklar gibi açık kanallar üzerinde meydana gelen kavitasyon olayında hem hava-su-buhar gibi üç fazlı akım durumu mevcut olacaktır [16]. Kavitasyon modelde ise yalnızca iki faz modellenebilir. Bu nedenle dolusavaklar üzerindeki kavitasyon olayının modellenmesi için uygun değildir. Kavitasyon modelin çözüm özellikleri şunlardır:

- Kavitasyonun başlangıcını ve kabarcıklarının yaklaşık boyutunu tahmin eder.
- Karışımın momentum denklemini hesaplar.
- Karışımın süreklilik denklemini hesaplar.
- Fazlar arasında kayma (*slip*) hızının olmadığı varsayılır.
- Buhar fazının hacim oranı taşınımı için çözüm yapar.
- Akım sıkıştırılmaz olmalıdır.
- Yalnızca iki faz modellenebilir.

5. MODELLERİN ANALİZİ

5.1. Dolusavakların Sayısal Modellenmesi

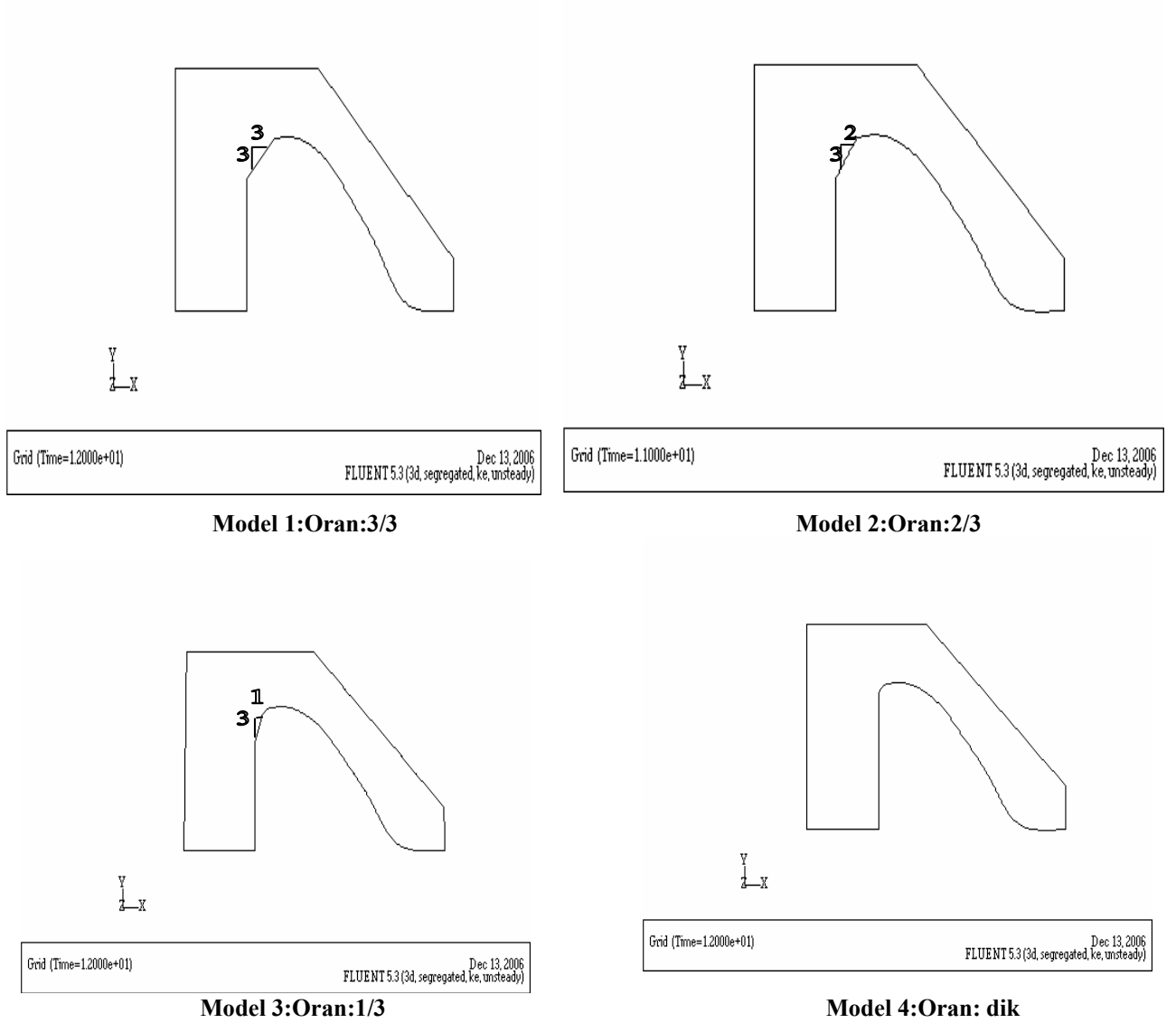
Dolusavaklarla ilgili çalışmalarda genel olarak fiziksel hidrolik modeller kullanılır. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile 2000 yılından buyana yurtdışı ve ülkemizde ki çalışmalarda CFD yazılımları kullanılmaya başlanmıştır. Literatür bölümünde de belirttiğimiz gibi dolusavaklar hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Bu tür yazılımlar dolusavak çalışmalarında birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bizim yaptığımız çalışmada da dolusavak profilinin geometrisinde değişiklikler yapılarak belirli debilerde ki akımların oluşturduğu basınç ve hız değerleri incelenmiştir. CFD yazılımları, dolusavaklarla kalmayıp hidrolik alanında birçok farklı konularda çalışmaya olanak sağlamaktadırlar. Bunlar arasında, havalandırıcılar, enerji kırıcı yapılar, akarsu hidroliği, pervaneler ve birçok konu gösterilebilir.

5.2. Çalışılan Modellerin Hazırlanması ve Parametreleri

Yapılan bu çalışmada, farklı geometride ki dolusavaklar üzerinde oluşan basınç ve hız değerleri incelenmiştir. Bu değerleri sağlıklı elde etmek için Elazığ ilinde bulunan Keban barajı dolusavak geometrisinin değerleri alınmıştır. Barajın genel özellikleri;

Tipi	: Kaya dolgu ve beton
Krem uzunluğu	: 1097 m.
Kret genişliği	: 11 m.
Ortalama akım	: 635 m ³ /s
Dolusavak	
Kapak sayısı	: 6 adet
Kapak genişliği	: 16 m.
Kret kotu	: 828 m.
Toplam kapasite	: 17 000 m ³ olarak alınmıştır [17].

Çalışmada dolusavak sırt eğrisi Keban barajı dolusavak sırt eğrisinin geometrisi ile aynı koordinatlar alınmıştır. Giriş profili ise farklı olarak 1/1, 1/3, 2/3, 3/3 oranlarında alınarak oluşan farklılıklar incelenmiştir. Profillerin şekilleri Şekil 5.1 de gösterilmiştir.



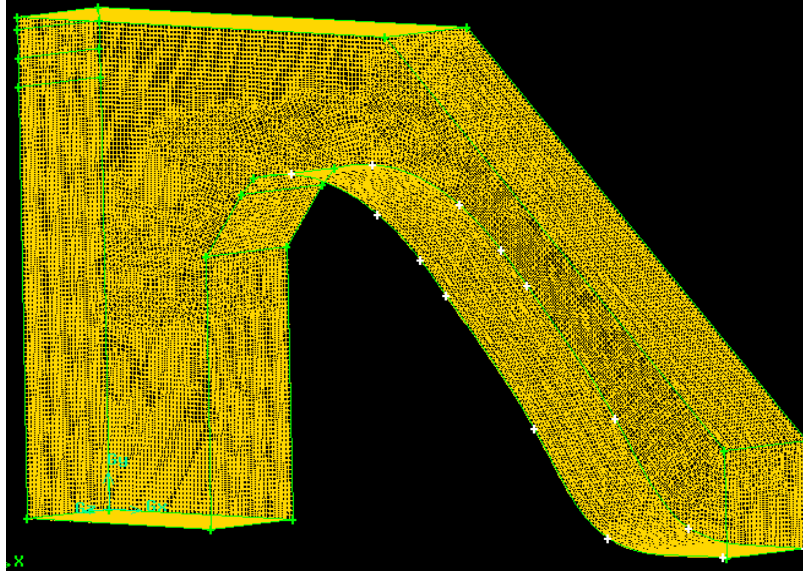
Şekil.5.1. Modellerin Görünümü

Bu oranlar incelenirken $Q_1=1340 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=8070 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_3=17000 \text{ m}^3/\text{s}$ debilere denk gelen $h_1=2 \text{ m}$, $h_2=10 \text{ m}$, $h_3=18 \text{ m}$ su yüksekliğinde ki hızlar hesaplanıp $V_1=0.27 \text{ m/s}$, $V_2=1.4 \text{ m/s}$, $V_3=2.6 \text{ m/s}$ hız değerleri ile çözüm yapılmıştır. Fluent programı çözüm sırasında hız değerleri kullandığı için debiler hıza çevrilerek bu değerler bilgisayara girilmiştir. Ayrıca bu hızlar hesaplanırken barajın bir dolusavağı incelendiği için debilerin 1/6'sı alınarak tek savağa gelen debi hesaplanmıştır. Dolusavak genişliği; $B=16 \text{ m}$ olarak alınmıştır. Bu geometri altında modelin bilgisayar ortamına aktarılmasına başlanmıştır.

5.2.1. Sayısal Modelin Geometrisi

Modelin geometrisi oluşturulurken Gambit programı kullanılmıştır. Dolusavağın giriş oranı 90° , $1/2$, $2/3$, $3/3$ olmak üzere ve her modelde $h_1=2$ m, $h_2=10$ m, $h_3=18$ m su yükleri incelenmek üzere 12 model oluşturulmuştur. Modeller 3 boyutlu olarak hazırlanıp genişliği $B=16$ m olarak alınmıştır. Rezervuar 30 m alınmış, mansap kısmının ise 1 m alınması yeterli görülmüştür.

Modelimiz üç boyutlu hacim oluşturulduktan sonra sonlu elemanlar yöntemiyle 267750 ila 296325 arasında hexlwedge elemana meshlenmiştir. Çözümün hassas olması için eleman boyutları 0,6 olarak verilmiştir. Meshli görüntüsü Şekil.5.2’de gösterilmiştir.



Şekil.5.2. Meshli görüntü

Meshleme adımından sonra modelimizin sınır şartları belirlenmiştir. Bu sınırlar; atmosfer girişi, hız girişi, katı cidardır.

Tüm bu çalışmalar Gambit programı içerisinde yapılmıştır. Oluşturulan üç boyutlu model Fluentte export edilerek çözüm parametreleri girilmiştir.

5.2.2. Çözüm parametreleri

Fluente aktarılan modelimiz için; üç boyutlu (3D), ayrılmış (Segregated), zamanla değişen akım (unsteady) çözüm modeli seçilmiştir. Modelimiz VOF (Volume of Fluid) çok fazlı akım modelidir. 1. faz; hava, 2. faz; su olarak kabul edildi. Bu iki fazın fiziksel özellikleri tanıtılmıştır. Yerçekimi (g), yüzey kuvvetleri, katı cidar sürtünmeleri dikkate alınmıştır. VOF

modeli içerisinde k - ε türbülans modeli kullanılmış ve türbülans parametreleri sabit olarak alınmıştır.

5.2.3. k - ε türbülans modeli

Dolusavaklar üzerindeki akım türbülanslı akımdır. Akım türbülansını modelleyebilmek için Fluent'teki türbülans modellerinden k - ε modeli kullanılmıştır.

Standart k - ε model, türbülans kinetik enerji (k) ve bunun yayılımı (ε) için taşınım denklemleri üzerine kurulu yarı deneysel bir modeldir. Taşınım denklemi, k için kesin bir denklemden, ε için ise fiziksel sonuç çıkarma ve birazda matematik yaklaşım desteği ile türetilir. Standart k - ε model türetilirken akım tamamen türbülanslı akım olarak kabul edilir. Moleküler viskoz etkileri ihmal edilir. Bu nedenle k - ε model sadece türbülanslı akımlarda kullanılır. Dolusavak üzerindeki akımlar tamamen türbülanslı kabul edilebileceğinden bu model uygun olacaktır.

5.2.4. Türbülanslı akımda cidar pürüzlülüğü

Fluent'te türbülanslı akım için cidar pürüzlülüğü de hesaba katılır. Pürüzlülük etkileri nedeniyle akışkan hareketini engelleme miktarını belirleyen bir pürüzlülük fonksiyonu tanımlanmıştır (ΔB). Bu fonksiyon genel olarak pürüzlülüklerin şekil ve boyutuna bağlıdır.

Fluent'te cidar pürüzlülük etkilerini modelleyebilmek için iki parametrenin tanıtılması gerekir. Bunlar; pürüzlülük yüksekliği (k_s) ve pürüzlülük sabiti (C_{Ks}) dir. Dolusavak beton yüzeyler için pürüzlülük değeri $k_s=0.5\sim 1$ mm.dir. Fluent'te varsayılan $C_{Ks}=0.5$ değeri, pürüzlendirilmiş borular için Nikuradse'nin direnç datalarından üretilen ve k - ε türbülans modeli için kullanılan bir değerdir.

5.2.5. Sınır şartları (*Boundary Condition*)

Modelde sınır şartları her bir eleman için ayrı ayrı tanıtılmıştır:

- **Katı Cidar (*Wall*):** Dolu savak yan ayakları, dolusavak tabanı, rezervuar tabanı Wall olarak tanıtılmıştır. Beton yüzeyler için pürüzlülük $k_s=0.001$ m, $C_{Ks}=0.5$ sabit olarak alınmıştır.
- **Basınç girişleri (*Pressure Inlets*):** Modelin atmosfer olan üst kısmı, mansapta suyun çıkış kısmı ve farklı su seviyelerinde suyun gelmediği kısımlar basınç girişi olarak

tanıtılmıştır. Bu çalışmada rölatif basınçla çalışılmış ve atmosfer basıncı 0 alınmıştır.

- **Hız girişleri (*Velocity Inlets*):** Suyun girdiği $h_1=2$ m, $h_2=10$ m, $h_3=18$ m su yükseklerinde her bir model çözümünde bu yükseklikler hız girişi olarak verilmiştir. $V_1=0.27$ m/s, $V_2=1.4$ m/s, $V_3=2.6$ m/s hızları sahip oldukları yüksekliklerde çözüme katılmıştır.

5.2.6. İşletme durumları (*Operating condition*)

Burada modelimizin, işletme basıncı, yerçekimi ivmesi, ortam yoğunluğu gibi parametreler belirlenir. Gerçek ortamda serbest yüzeyli akımlar atmosfer basıncı altında işletilmektedir. Bizim modelimizde rölatif basınçlarla çalışmak işimizi kolaylaştırdığından atmosfer basıncı 0 olarak alınmıştır. Yerçekimi ivmesi $g= 9.81$ m/s² ve ortamı çeviren hava kütlesinin yoğunluğu $\rho_a= 1.225$ kg/m³ olarak alınmıştır.

5.3. Programı Kullanımımdaki Deneyimler

Programı kullanırken birçok model deneyerek bunlar arasında çalışmamı en doğru şekilde tamamlayan modeli bulmuş oldum. Modellemede ilk olarak rezervuar kısmını 5 m olarak alınmıştı. Fakat bu kadar kısa bir rezervuar alınması model üzerinde ki çözüm sonuçlarında hatalı sonuçlar verdiği görülmüştür. Dolusavak giriş kısmında suyun gidişi su jetinden çıkan su çıkışı şeklinde olmuştur.

Farklı olarak tüm model üzerinde yapılan aynı değerdeki meshleme modelin çözümünde gereksiz yerler için çok fazla çözüm yaptığı ve buda bilgisayarın çözüm hızını yavaşlattığı görülmüştür. Bunun için modelin rezervuar kısmı daha büyük, dolusavak yüzeyi daha küçük değerlerle meshlenmiştir. Buda çözümde çok büyük kolaylık sağlamıştır.

Model farklı olarak ASM metodu ile çözülmüştür, buda bize VOF modeli ile %5 lik farklı bir sonuç vermiştir. Buna bağlı olarak modelde VOF metodunu kullanmak daha uygun görülmüştür.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada; farklı su yüklerinde $h_1=2$ m, $h_2=10$ m, $h_3=18$ m’de dolusavağın giriş kısmında ki oran 3/3, 2/3, 1/3 ve dik olarak modellenip tam olarak 12 model üzerinde çalışılmıştır. Bu modellerin dolusavak sırtında oluşturdukları basınç ve hız değerleri ölçülmüştür.

Her bir su yükü ve oran için;

$$x_1=0; \quad x_2=120; \quad x_3=120$$

$$y_1=0; \quad y_2=0; \quad y_3=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8; \quad z_3=8$$

koordinatlarından geçen bir kesit alınmıştır. Bu kesitler üzerinde modelin, faz görünümü; toplam basınç ve hız verilmiştir.

Ayrıca, kesitten ayrı olarak;

Oran=3/3; h=2m:

Ölçüm 1: $x_1=35; \quad x_2=35$

$$y_1=38; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Oran=3/3; h=10m:

Ölçüm 1: $x_1=35; \quad x_2=35$

$$y_1=38; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 2: $x_1=40; \quad x_2=40$

$$y_1=30; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 2: $x_1=40; \quad x_2=40$

$$y_1=30; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 3: $x_1=61.2; \quad x_2=61.2$

$$y_1=30; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 3: $x_1=61.2; \quad x_2=61.2$

$$y_1=30; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 4: $x_1=68; \quad x_2=68$

$$y_1=30; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 4: $x_1=68; \quad x_2=68$

$$y_1=30; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 5: $x_1=98; \quad x_2=98$

$$y_1=0; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 5: $x_1=98; \quad x_2=98$

$$y_1=0; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Oran=3/3; h=18m:

Ölçüm 1: $x_1=35$; $x_2=35$

$y_1=38$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 2: $x_1=40$; $x_2=40$

$y_1=30$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 3: $x_1=61.2$; $x_2=61.2$

$y_1=30$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 4: $x_1=68$; $x_2=68$

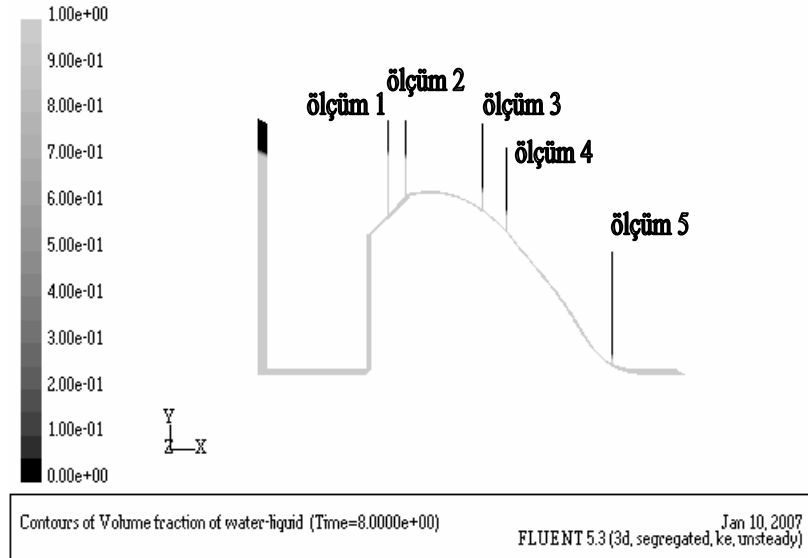
$y_1=30$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 5: $x_1=98$; $x_2=98$

$y_1=0$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$



Model 1:Oran=3/3

Şekil 6.1. Model 1 için Ölçüm yerleri

Oran=2/3; h=2m:

Ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 2: $x_1=37$; $x_2=37$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 3: $x_1=44.2$; $x_2=44.2$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 4: $x_1=65$; $x_2=65$

$y_1=30$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 5: $x_1=95$; $x_2=95$

$y_1=0$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Oran=2/3; h=10m:

Ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 2: $x_1=37$; $x_2=37$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 3: $x_1=44.2$; $x_2=44.2$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 4: $x_1=65$; $x_2=65$

$y_1=30$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 5: $x_1=95$; $x_2=95$

$y_1=0$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Oran=2/3; h=18m:

Ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 2: $x_1=37$; $x_2=37$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 3: $x_1=44.2$; $x_2=44.2$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 4: $x_1=65$; $x_2=65$

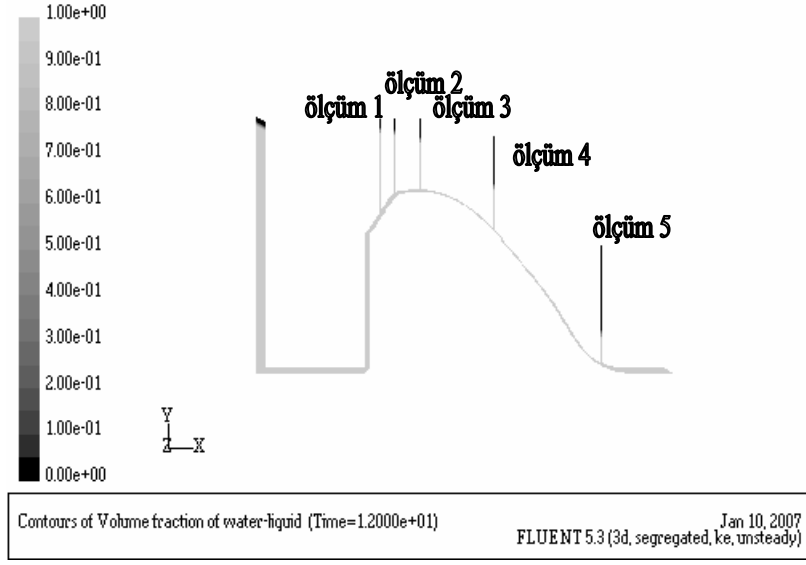
$y_1=30$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 5: $x_1=95$; $x_2=95$

$y_1=0$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$



Model 2:Oran=2/3

Şekil 6.2. Model 2 için Ölçüm yerleri

Oran=1/3; h=2m:

Ölçüm 1: $x_1=31.50$; $x_2=31.50$

$$y_1=35; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 2: $x_1=34$; $x_2=34$

$$y_1=35; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 3: $x_1=41.2$; $x_2=41.2$

$$y_1=35; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 4: $x_1=62$; $x_2=62$

$$y_1=30; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 5: $x_1=92$; $x_2=92$

$$y_1=0; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Oran=1/3; h=10m:

Ölçüm 1: $x_1=31.50$; $x_2=31.50$

$$y_1=35; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 2: $x_1=34$; $x_2=34$

$$y_1=35; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 3: $x_1=41.2$; $x_2=41.2$

$$y_1=35; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 4: $x_1=62$; $x_2=62$

$$y_1=30; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 5: $x_1=92$; $x_2=92$

$$y_1=0; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Oran=1/3; h=18m:

Ölçüm 1: $x_1=31.50$; $x_2=31.50$

$$y_1=35; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 2: $x_1=34$; $x_2=34$

$$y_1=35; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 3: $x_1=41.2$; $x_2=41.2$

$$y_1=35; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 4: $x_1=62$; $x_2=62$

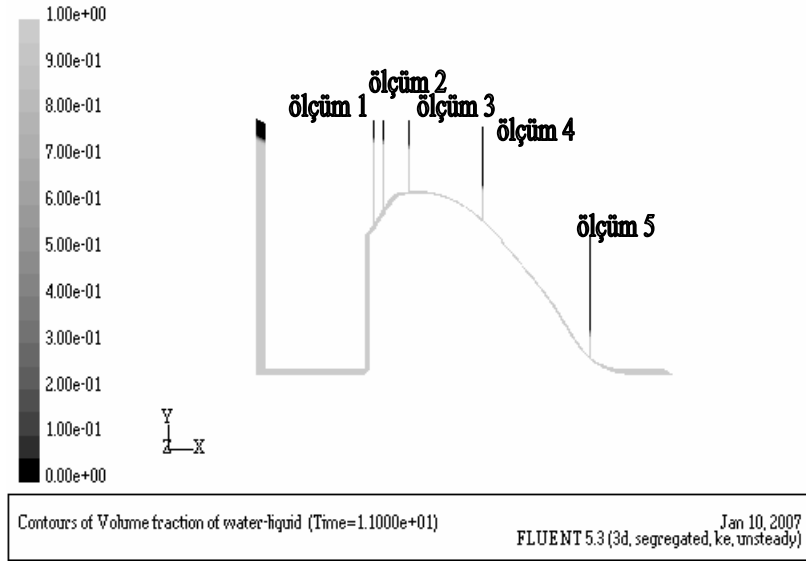
$$y_1=30; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$

Ölçüm 5: $x_1=92$; $x_2=92$

$$y_1=0; \quad y_2=70$$

$$z_1=8; \quad z_2=8$$



Model 3:Oran=1/3

Şekil 6.3. Model 3 için Ölçüm yerleri

Oran=dik; h=2m:

Ölçüm 1: $x_1=31$; $x_2=31$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 2: $x_1=38.2$; $x_2=38.2$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 3: $x_1=59$; $x_2=59$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 4: $x_1=89$; $x_2=89$

$y_1=30$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Oran=dik; h=10m:

Ölçüm 1: $x_1=31$; $x_2=31$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 2: $x_1=38.2$; $x_2=38.2$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 3: $x_1=59$; $x_2=59$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 4: $x_1=89$; $x_2=89$

$y_1=30$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Oran=dik; h=18m:

Ölçüm 1: $x_1=31$; $x_2=31$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 2: $x_1=38.2$; $x_2=38.2$

$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 3: $x_1=59$; $x_2=59$

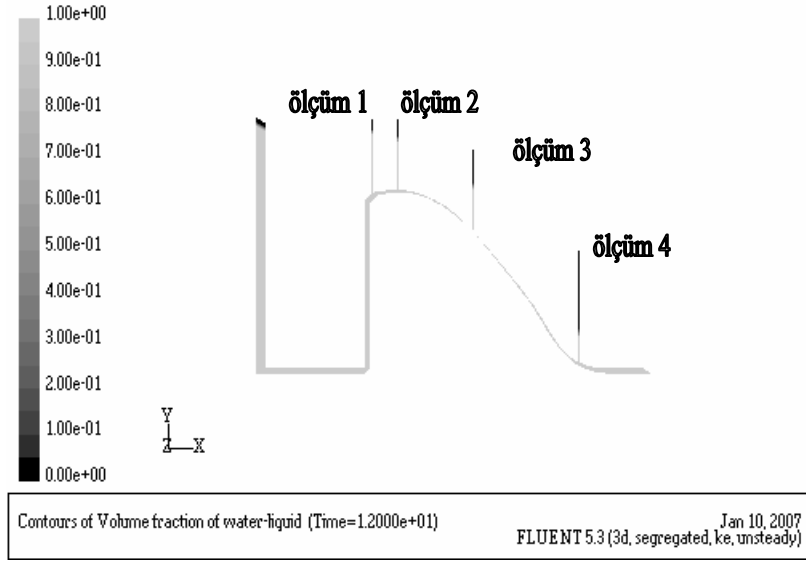
$y_1=35$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$

Ölçüm 4: $x_1=89$; $x_2=89$

$y_1=30$; $y_2=70$

$z_1=8$; $z_2=8$



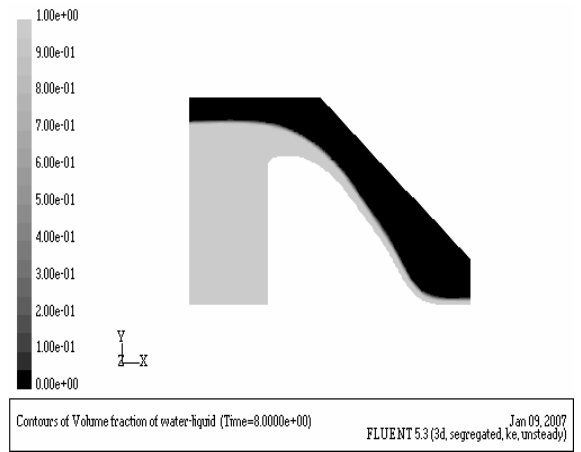
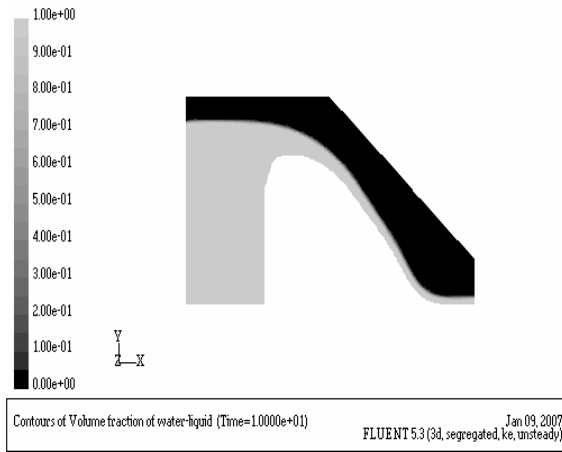
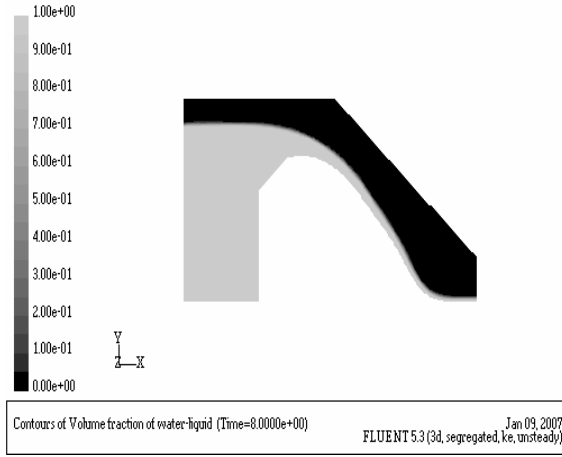
Model 4:Oran=dik

Şekil 6.4. Model 4 için Ölçüm yerleri

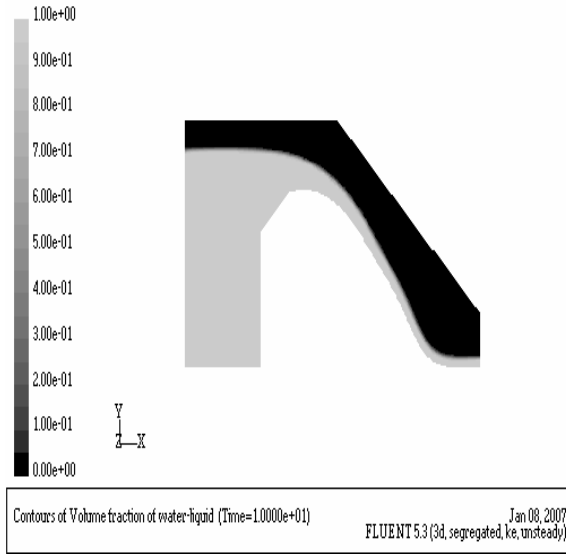
olmak üzere ilk 3 modelde 5'er son model de ise 4 ölçüm noktası belirlenerek basınç ve hız grafikleri çıkartılmıştır.

6.1. Dolusavak Üzerindeki Faz, Hız ve Basınç Görünümleri

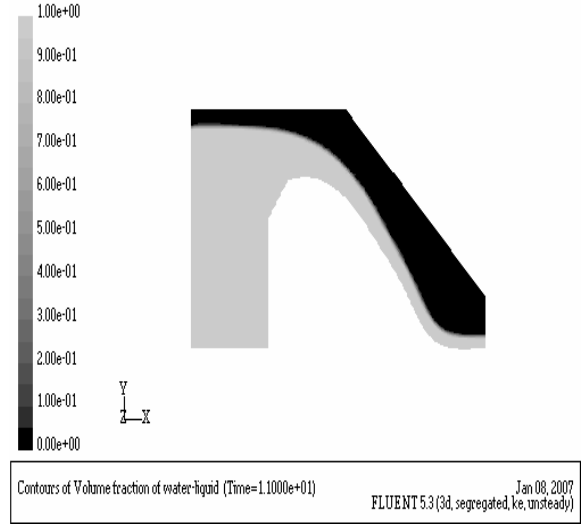
Burada, dolusavak üzerinde akım tamamlandıktan sonra $h_1=2\text{m}$, $h_2=10\text{m}$, $h_3=18\text{m}$ için $Q_1=223,33\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=1345\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_3=2833.33\text{ m}^3/\text{s}$ debileri için faz görünüşleri verilmiştir:



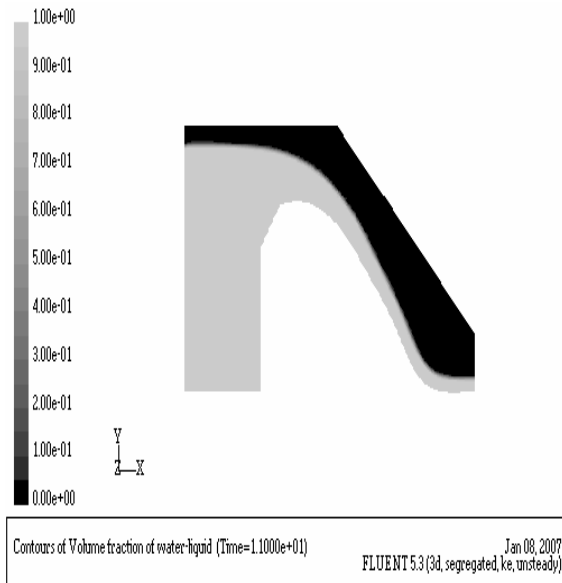
Şekil 6.5. $Q_1=223.33\text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$ için faz görünüşleri



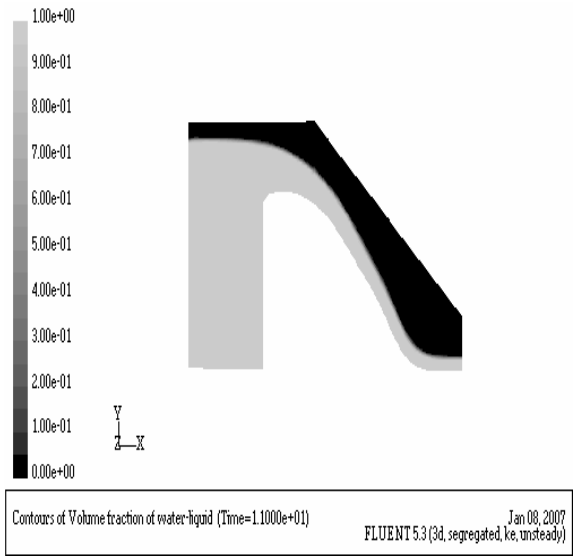
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3

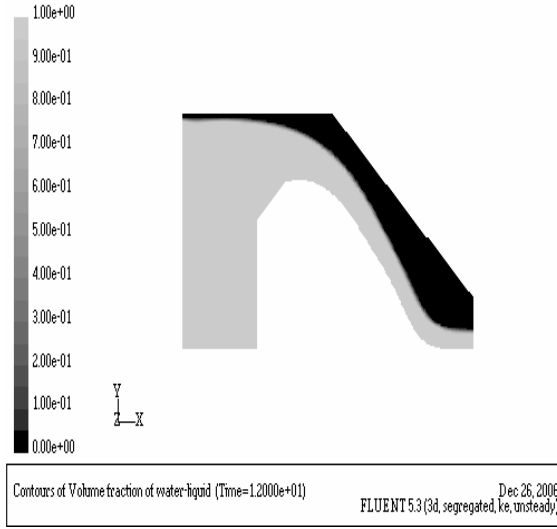


Model 3: Oran=1/3

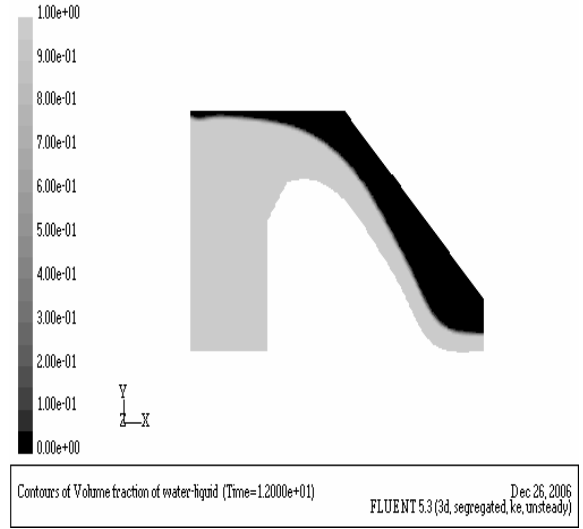


Model 4: Oran=dik

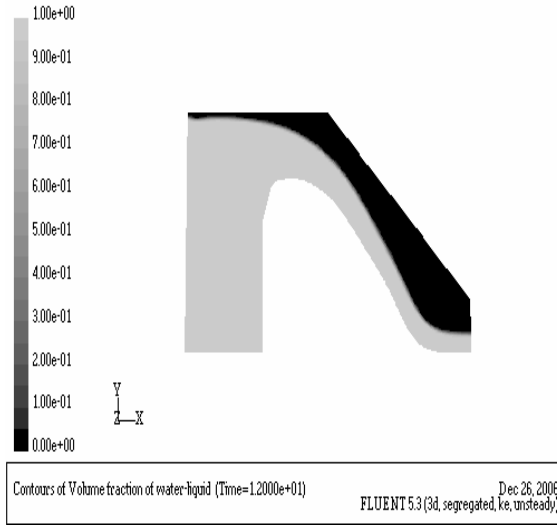
Şekil 6.6. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$ için faz görünümleri



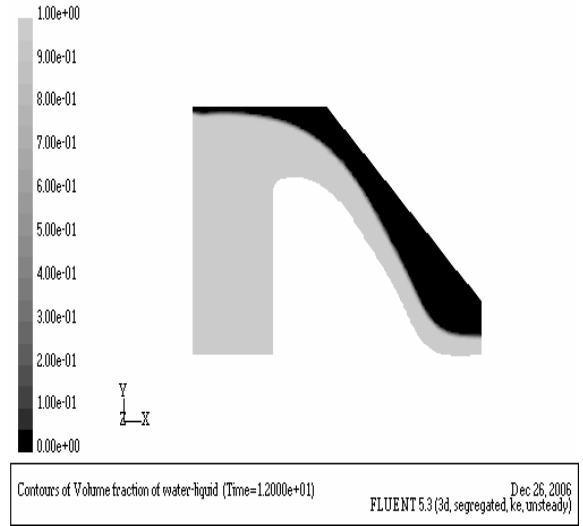
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3



Model 3: Oran=1/3

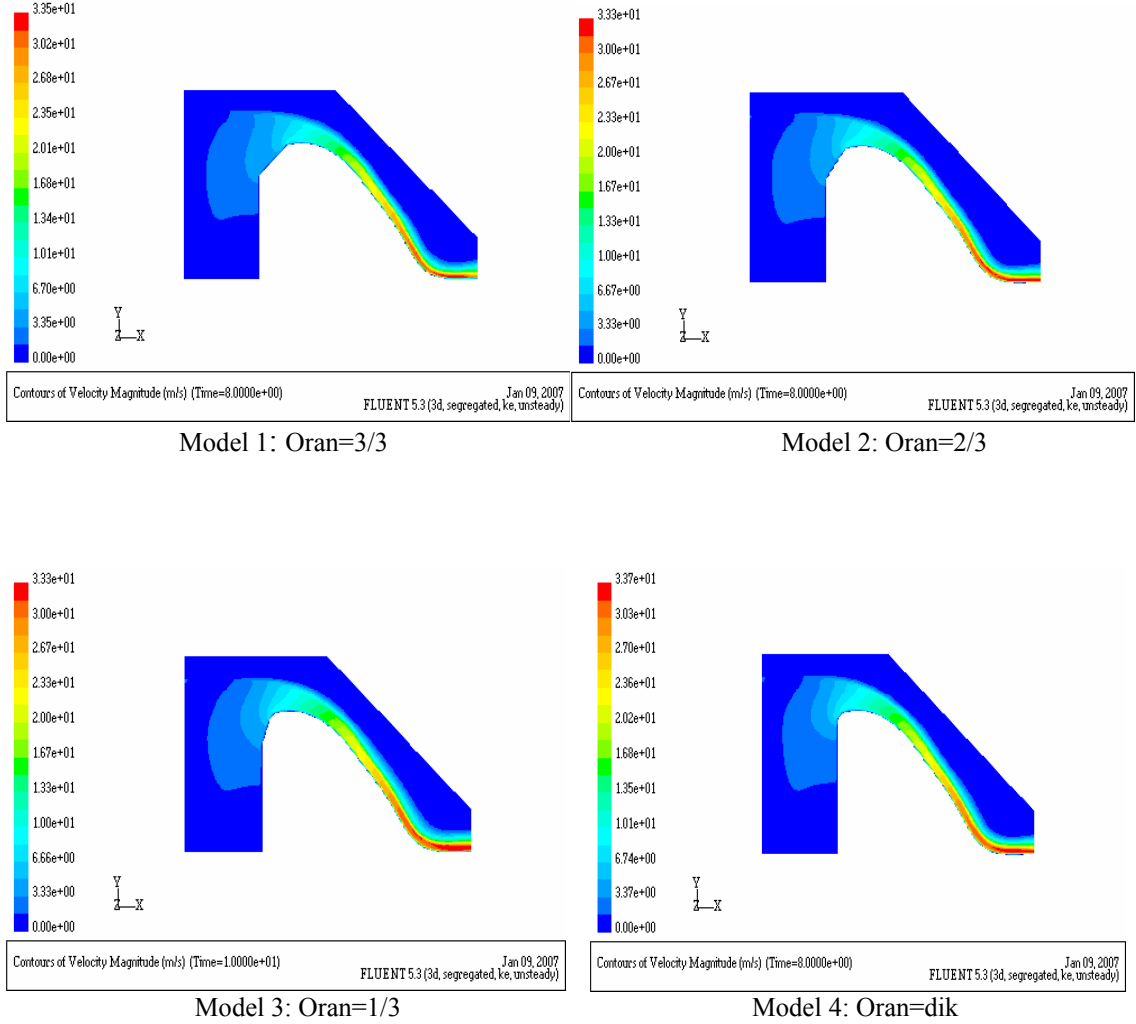


Model 4: Oran=dik

Şekil 6.7. $Q_3=2833.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$ için faz görüntüleri

Her su yükündeki görüntüler de görüldüğü gibi akımlar düzgün bir şekilde tamamlanmış ve su girişi, dolusavak gövdesi ve su çıkışında yüzeyde hiçbir dalgalanma olmamıştır. Suyun düzenli akımı yönünden hiçbir modelde sorun oluşmamıştır.

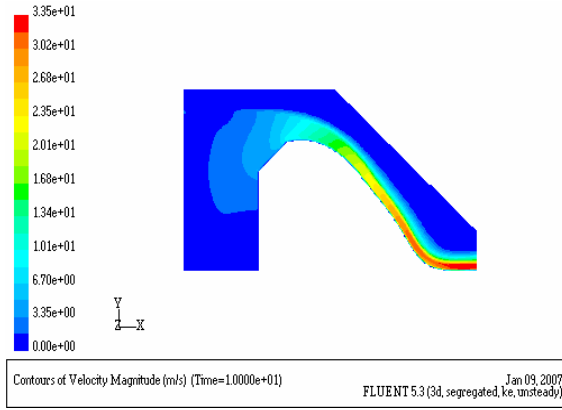
Modellerimizin hız görünümünü verecek olursak;



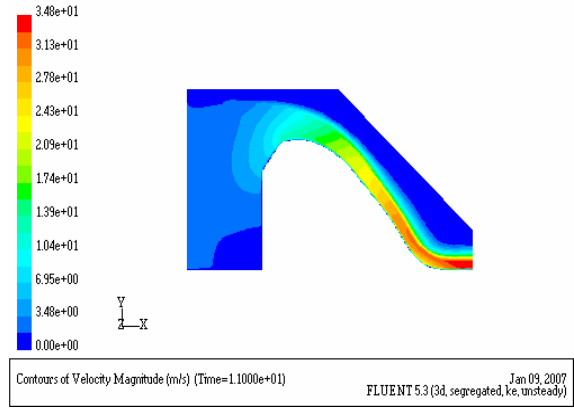
Şekil 6.8. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$ için hız görünüşleri

Şekil 6.8’de ise $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2 \text{ m}$ su yükü için elde edilen değerler gösterilmiştir. Oran=3/3, 2/3 ve 1/3 için 1.ölçüm kesitindeki hızlar yaklaşık olarak $V=4.5 \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur. Oran=dik için ise hız $V=5 \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur.

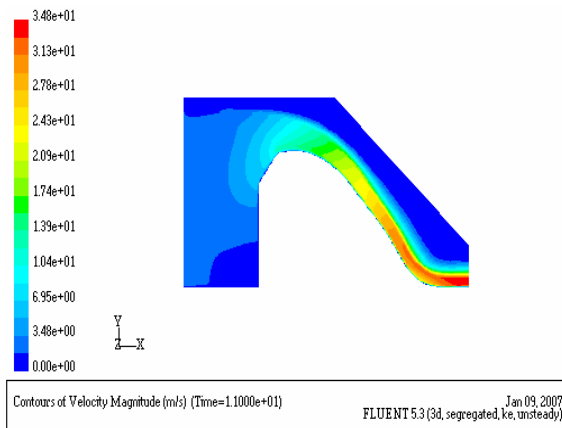
Suyun dolusavak sonundaki hızları ise, Oran=2/3 ile 1/3 için $V=33.3 \text{ m/s}$, Oran=3/3 için $V= 33.5 \text{ m/s}$, Oran=dik $V=33.7 \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur.



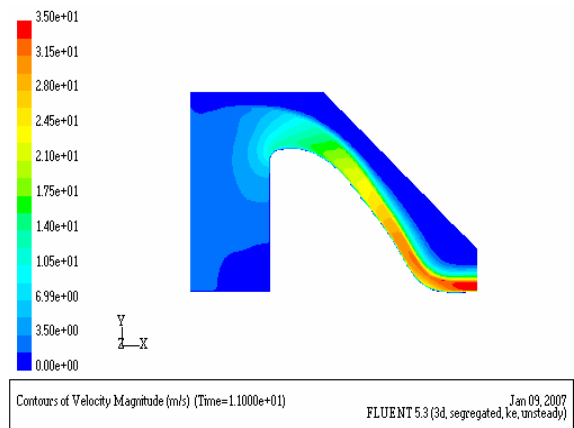
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3



Model 3: Oran=1/3

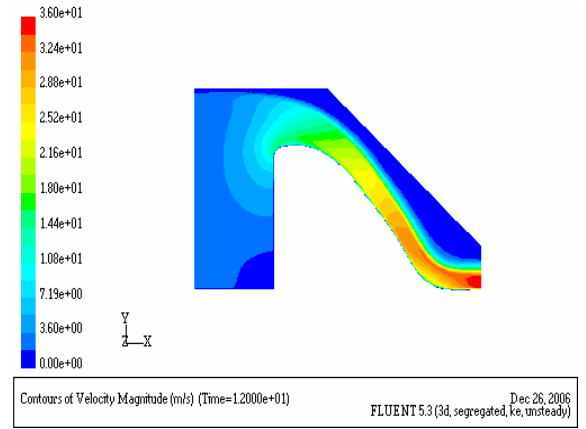
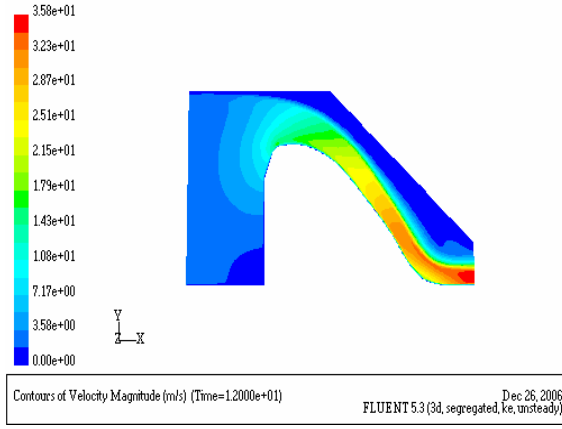
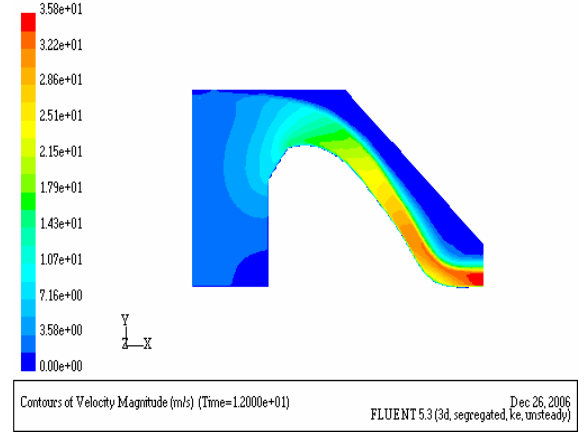
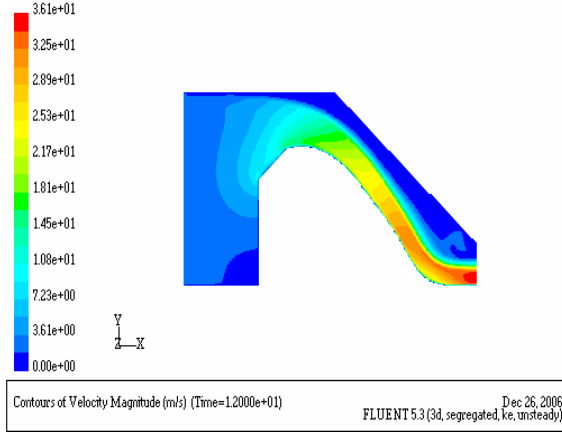


Model 4: Oran=dik

Şekil 6.9. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$ için hız görünümleri

Şekil 6.9'a baktığımızda $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=10\text{m}$ su yükünde oranlar üzerinde en fazla hızın $V=3.50 \text{ m/s}$ ile dik oran olarak adlandırdığımız 4. Model üzerinde olduğu görülmektedir. Oran=2/3 ile Oran=1/3 ün hızları ise birbirine yakın olduğu görülmektedir. $V=3.48 \text{ m/s}$ olduğu tespit edilmiştir. Oran=3/3 de ise $V=3.35 \text{ m/s}$ olarak hesaplanmıştır.

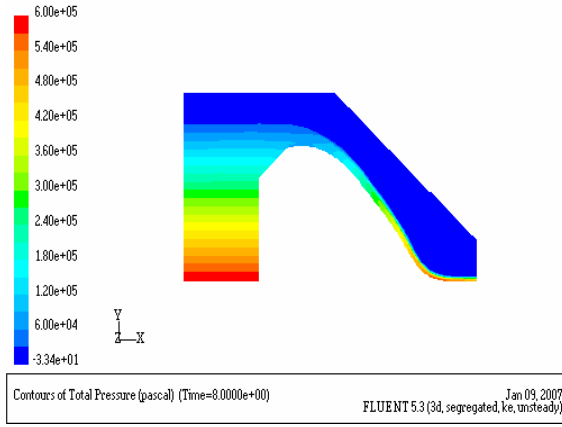
Suyun dolusavak sonunda ki hızlarını incelersek, Oran=dik için $V=35 \text{ m/s}$, 2/3 ve 1/3 de $V=34.8 \text{ m/s}$ ve 3/3'de ise $V=33.5 \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur.



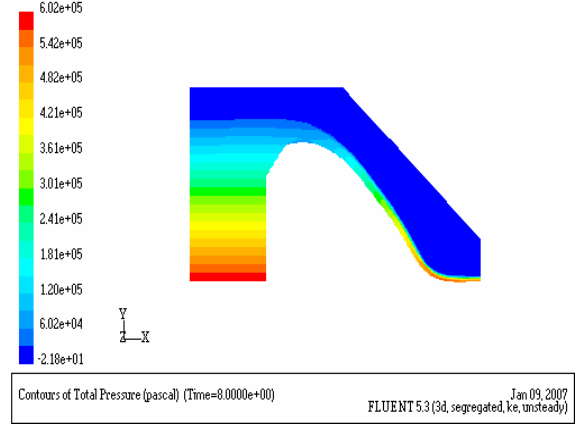
Şekil 6.10. $Q_3=2833.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$ için hız görünüşleri

Şekil 6.10'da ise $Q_1=2833.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=18\text{m}$ su yükü için elde edilen değerler gösterilmiştir. Oran=3/3, 2/3 ve 1/3 için 1.ölçüm kesitindeki hızlar yaklaşık olarak $V=8.6 \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur. Oran=dik için ise hız $V=7.2 \text{ m/s}$ olarak bulunmuş.

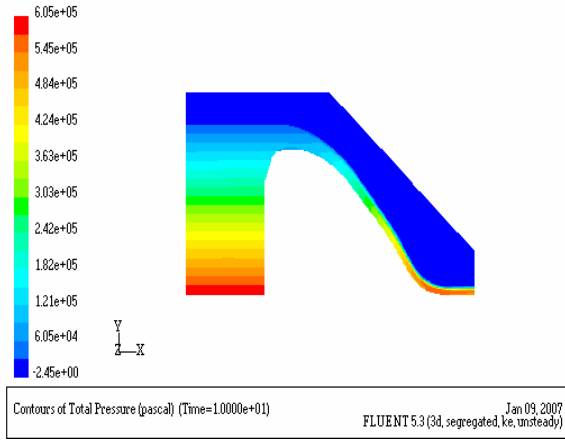
Suyun dolusavak sonunda ki hızları ise, Oran=2/3 ile 1/3 için $V=35.8 \text{ m/s}$ ve 3/3 için $V=36.1 \text{ m/s}$, Oran=dik $V=36 \text{ m/s}$ olarak verilmiştir. Bu da bize gösteriyor ki $h=18\text{m}$ su yükü altında dolusavak sonunda ki hızlar birbirine yakındır.



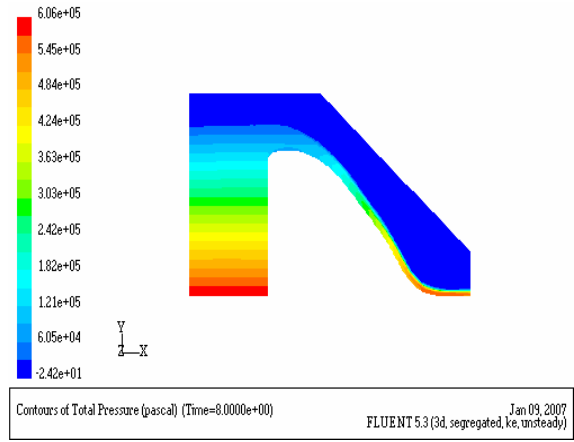
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3



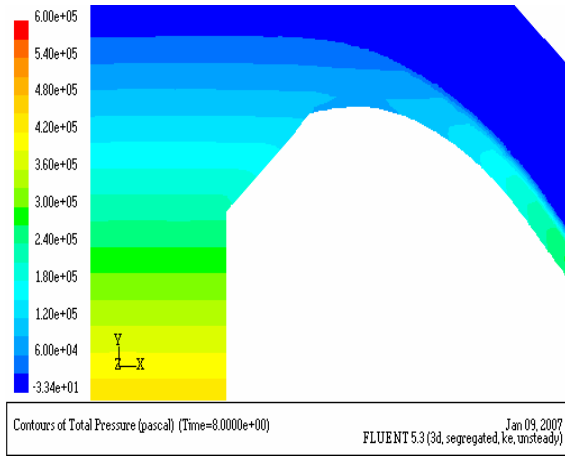
Model 3: Oran=1/3



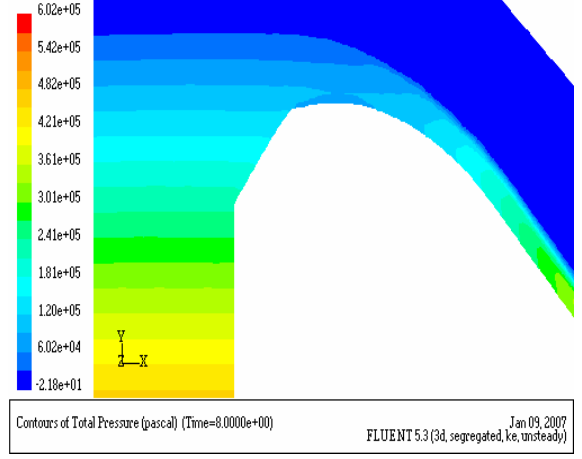
Model 4: Oran=dik

Şekil 6.11. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$ için basınç görünümleri

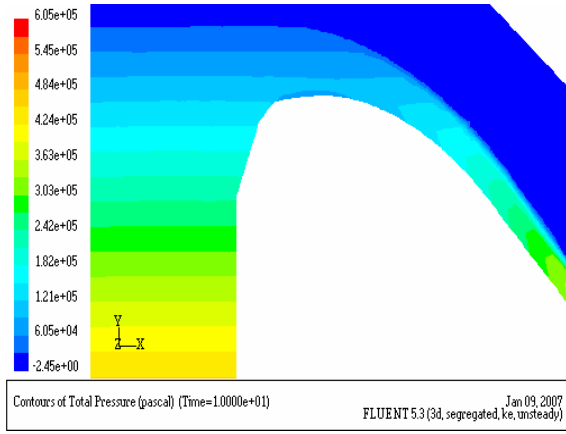
Şekil 6.11'e baktığımızda dolusavak sonunda ki basınç değerleri; Oran=3/3'de $6.00 \cdot 10^5$ Pa, 2/3'de $6.02 \cdot 10^5$ Pa, 1/3'de $6.05 \cdot 10^5$ Pa ve dik'te ise $6.06 \cdot 10^5$ Pa olduğu görülmektedir. Kret ve oran kısmını daha ayrıntılı bir şekilde gösterecek olursak Şekil 6.12'de ayrıntılı olarak görünümleri verilmiştir.



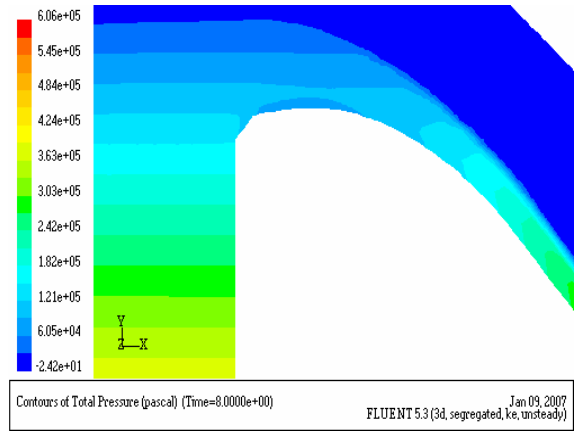
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3

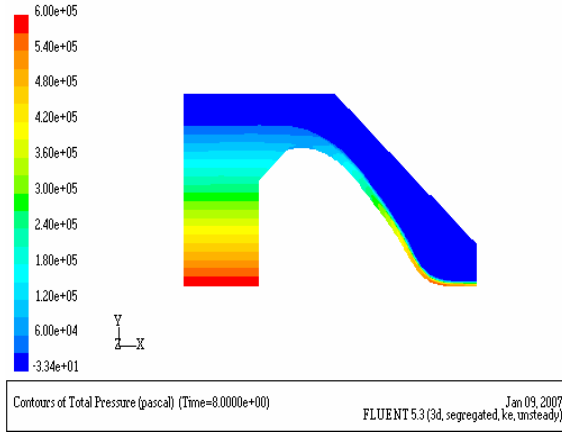


Model 3: Oran=1/3

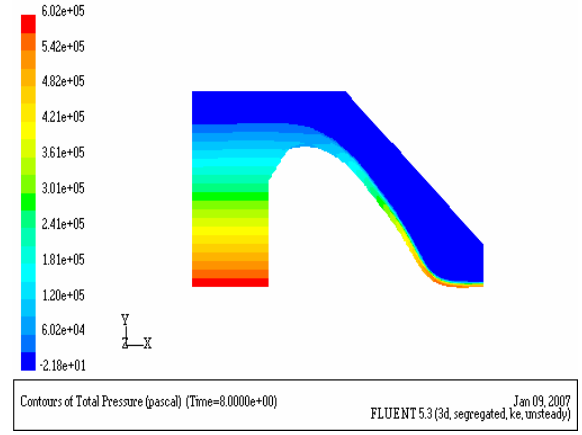


Model 4: Oran=dik

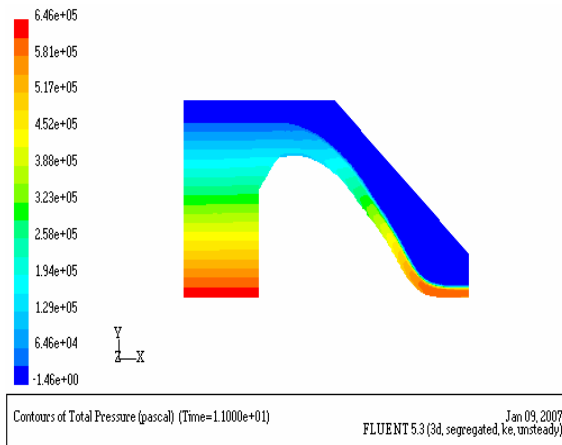
Şekil 6.12. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$ için detaylı basınç görünüşleri



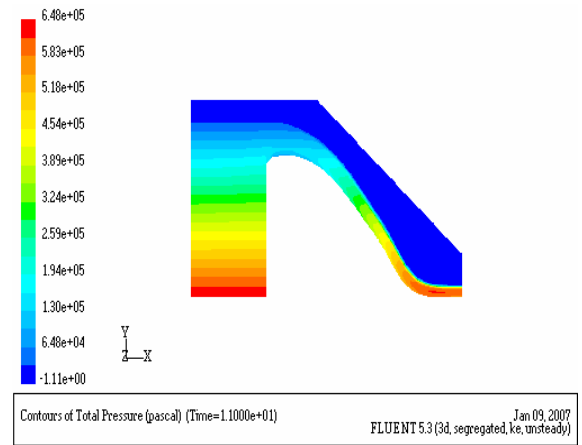
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3



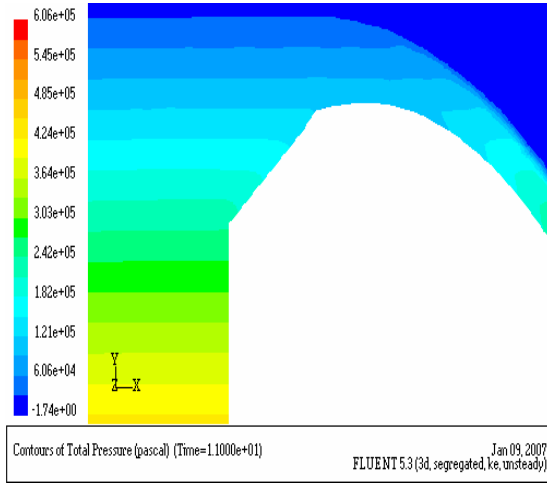
Model 3: Oran=1/3



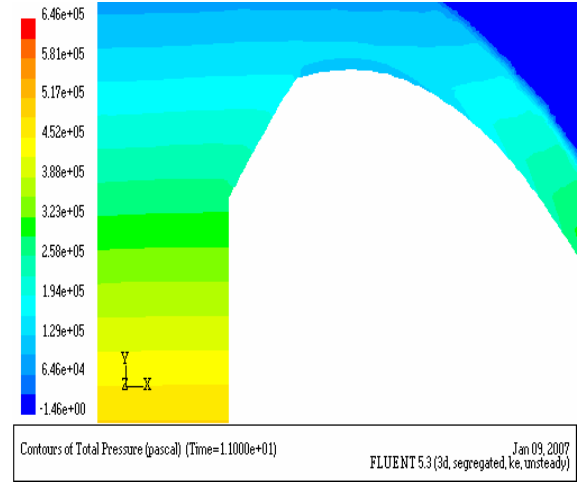
Model 4: Oran=dik

Şekil 6.13. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$ için basınç görünüşleri

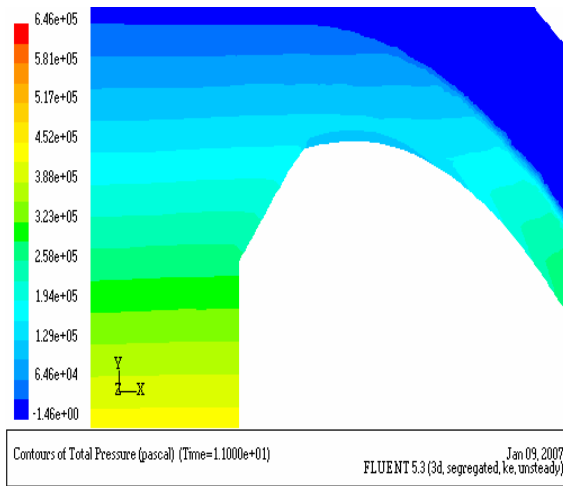
Şekil 6.13'e baktığımızda dolusavak sonunda ki basınç değerleri; Oran=3/3'de basınç $6.06 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, 2/3, 1/3'de $6.46 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ve dik'te ise $6.48 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ olduğu görülmektedir. Kret ve oran kısmını daha ayrıntılı bir şekilde gösterecek olursak Şekil 6.14'de ayrıntılı olarak görünüşleri verilmiştir.



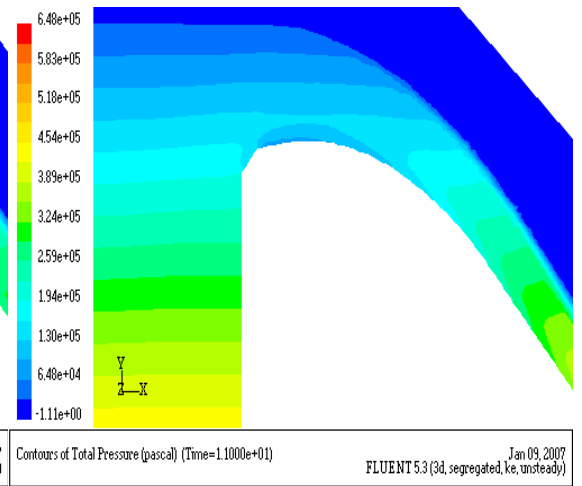
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3

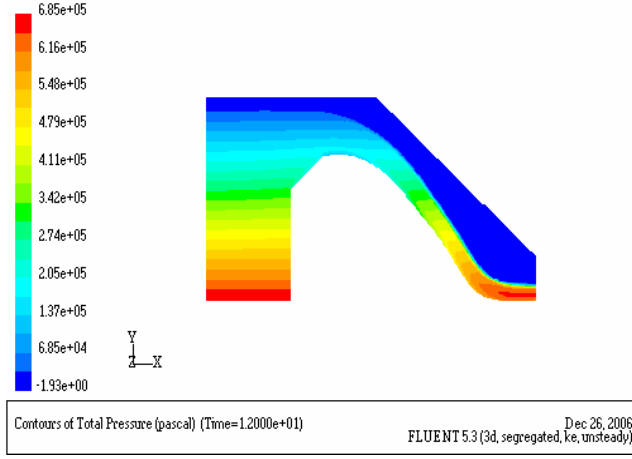


Model 3: Oran=1/3

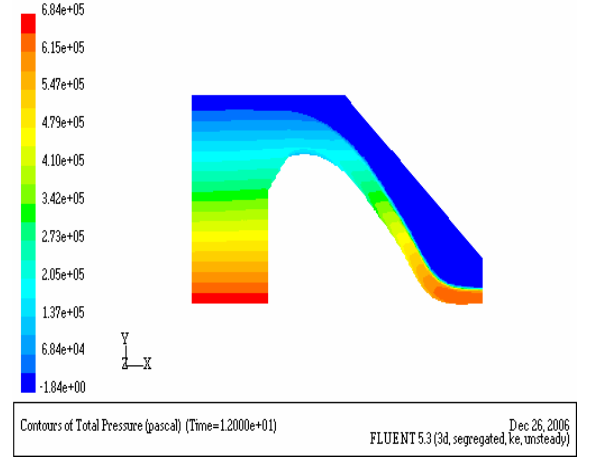


Model 4: Oran=dik

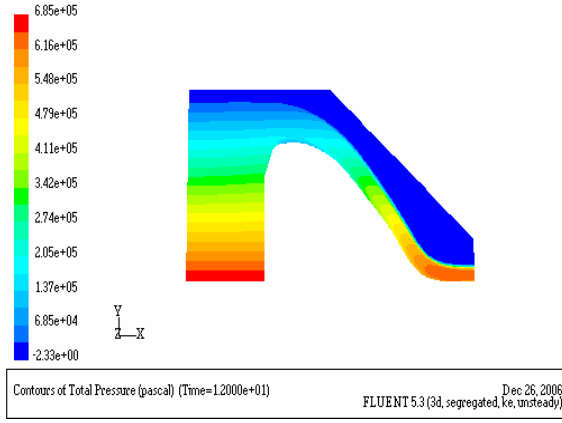
Şekil 6.14. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$ için detaylı basınç görünüşleri



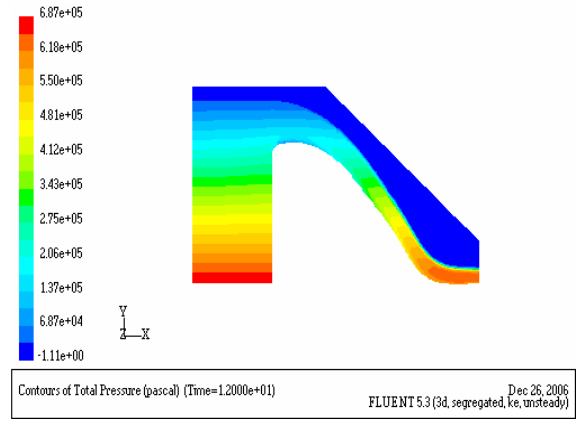
Model 1 : Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3



Model 3: Oran=1/3

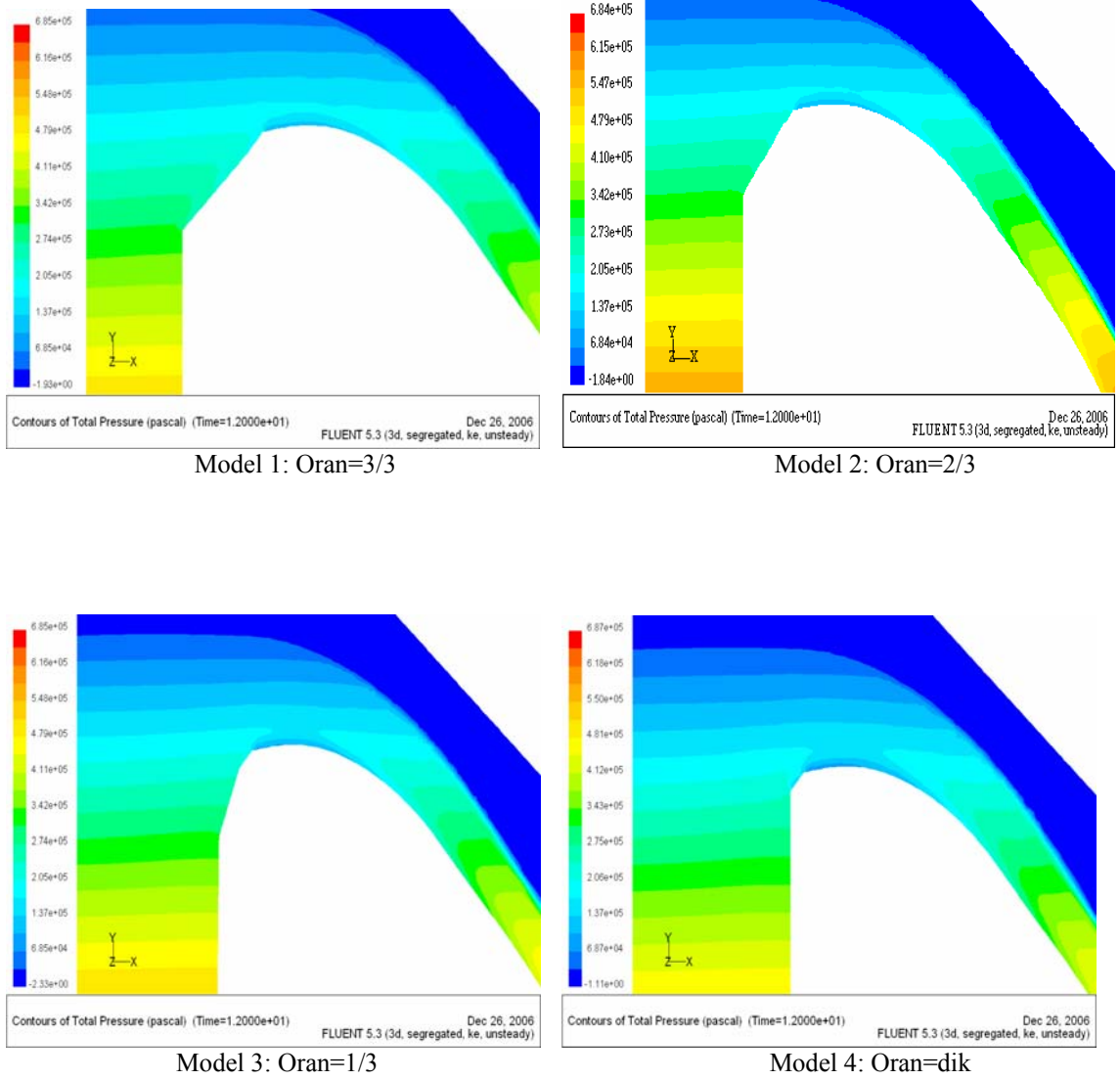


Model 4: Oran=dik

Şekil 6.15. $Q_3=2833.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$ için basınç görünümleri

Şekil 6.15'te görüldüğü gibi dolusavak sonunda ki basınç değerleri, Oran=3/3 ve 1/3'de $6.85 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, 2/3'de $6.84 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ve dik'te ise $6.87 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ olarak bulunmuştur.

Kret kısmının daha ayrıntılı görünümüleri şekil.6.16’da verilmiştir.

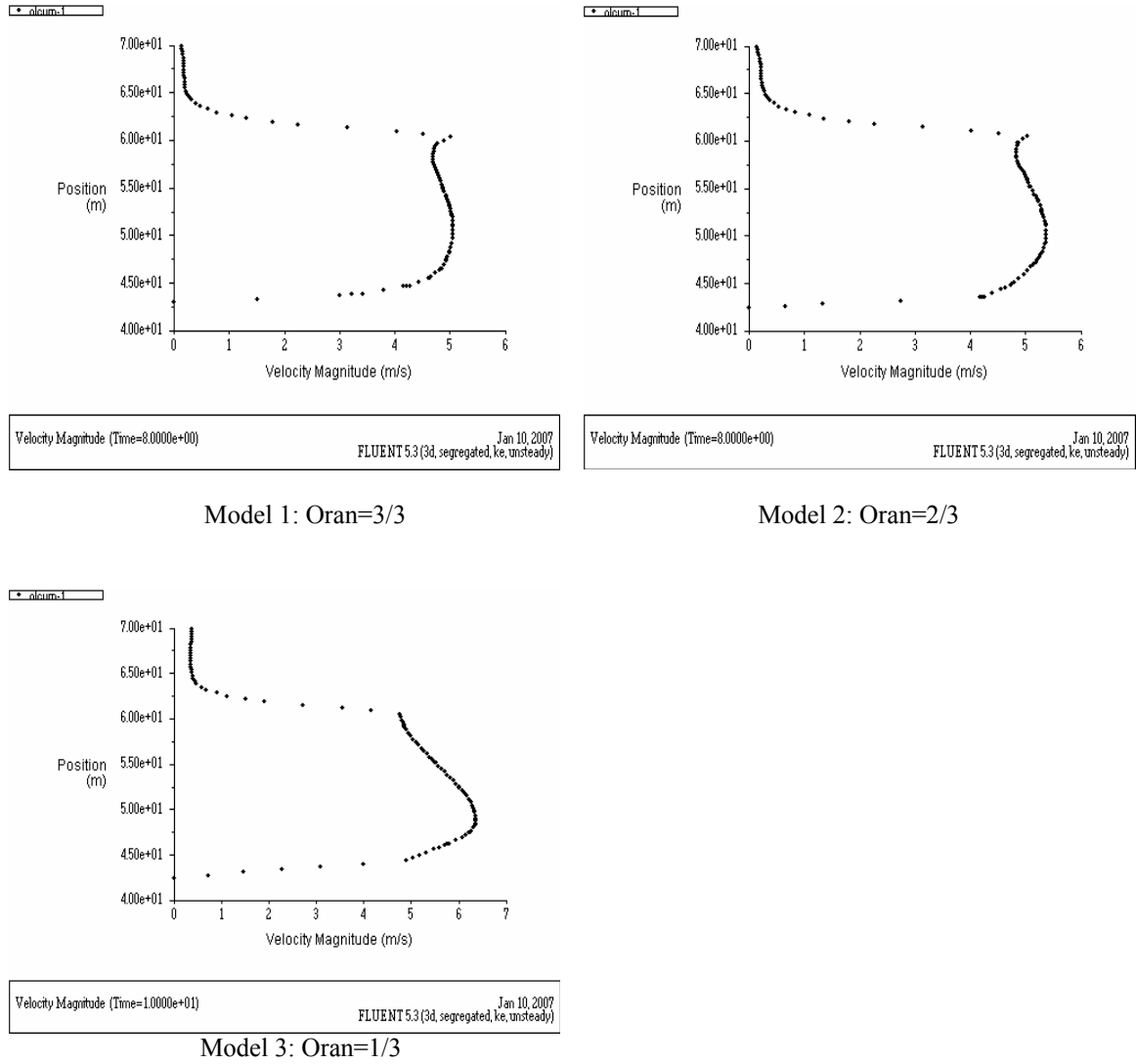


Şekil 6.16. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$ için detaylı basınç görünümüleri

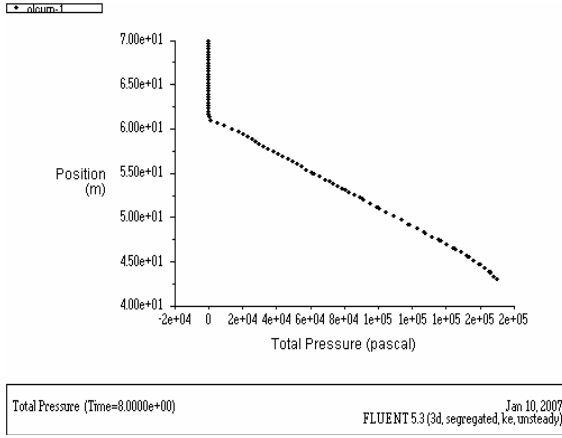
Genel olarak baktığımızda Model 1’den Model 4 doğru gittiğimizde hızların arttığını, buna bağlı olarak basıncın düştüğünü görüyoruz. Yani, Model 4’ün kretinde daha fazla alt basınç oluşturmakta, bu da kavitasyon riskini artırmaktadır. Diğer modeller Model 4’e göre daha emniyetli kısımda kalmaktadır.

6.2. Dolusavak Üzerinde Oluşan Hız ve Basınç Grafikleri

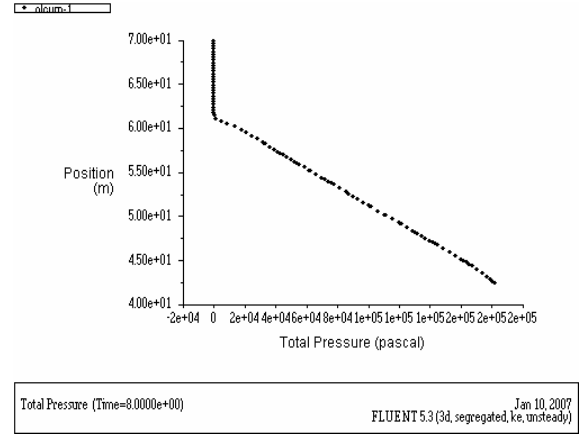
Model 1, Model 2 ve Model 3 üzerinde beş, Model 4 üzerinde dört nokta belirlenerek bu noktalarda dolusavak üzerinde oluşan hız ve basınç değerlerinin grafikleri çıkartılmıştır. Bu grafikler üzerinde daha detaylı inceleme yapılarak hangi modelimizin bizim için daha uygun olduğunu belirleyebiliriz.



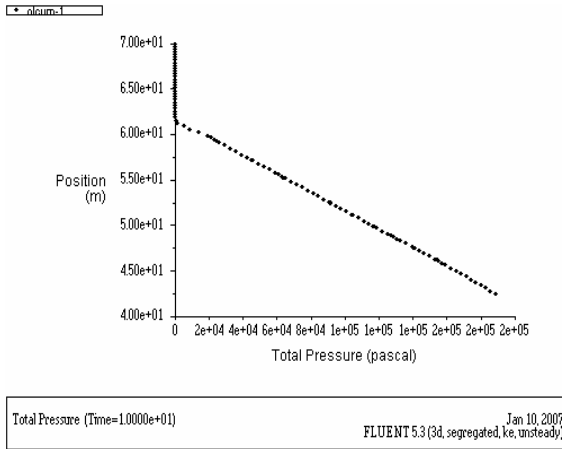
Şekil 6.17. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; Ölçüm 1 için Hız-H grafiği



Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3

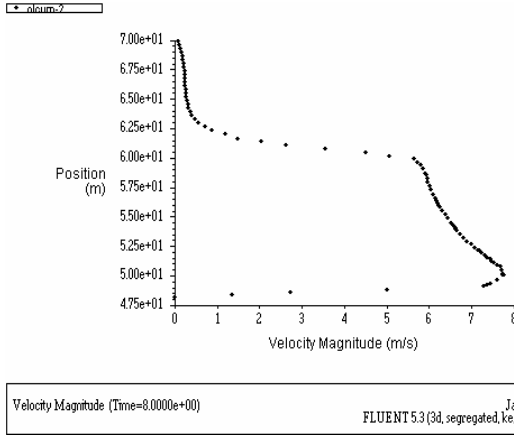


Model 3: Oran=1/3

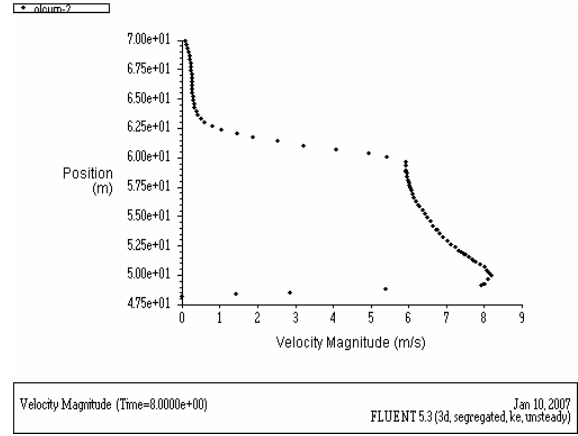
Şekil 6.18. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; Ölçüm 1 için Basınç-H grafiği

Şekil 6.17 'e baktığımızda hızın Model 1'den Model 3'e doğru gidildiğinde arttığı görülmektedir. Model 1'de hız $V=5.2 \text{ m/s}$ iken Model 3'de $V=6.7 \text{ m/s}$ 'ye ulaşmıştır.

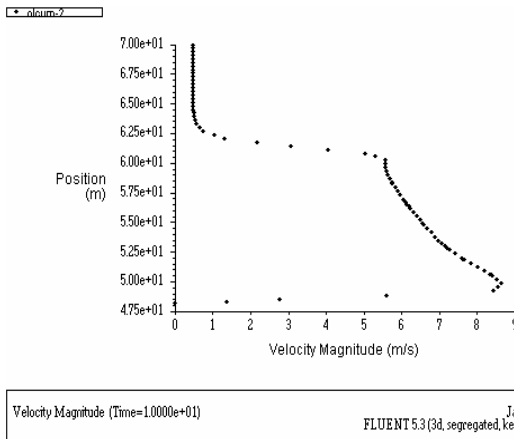
Şekil 6.18 'de basınç değerlerine baktığımızda basınç değerleri de hız değerleri gibi artış göstermektedir. Model 1'de $2.19 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ iken Model 3'de bu değer $2.65 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ değerini almaktadır.



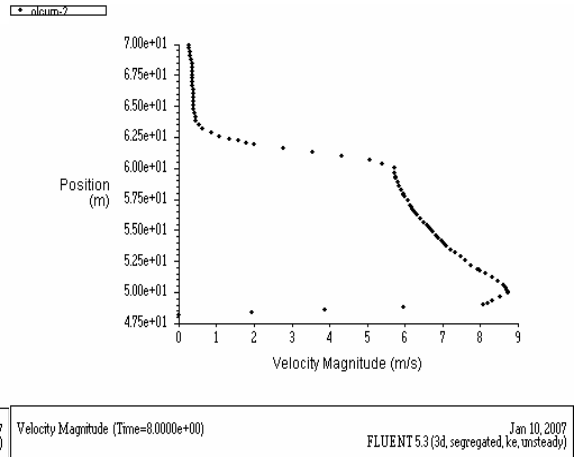
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3

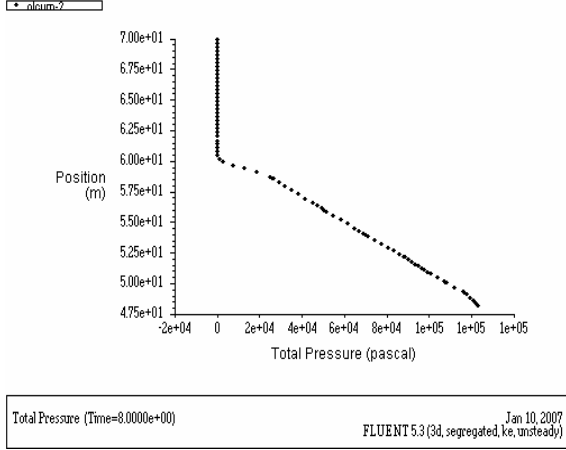


Model 3: Oran=1/3

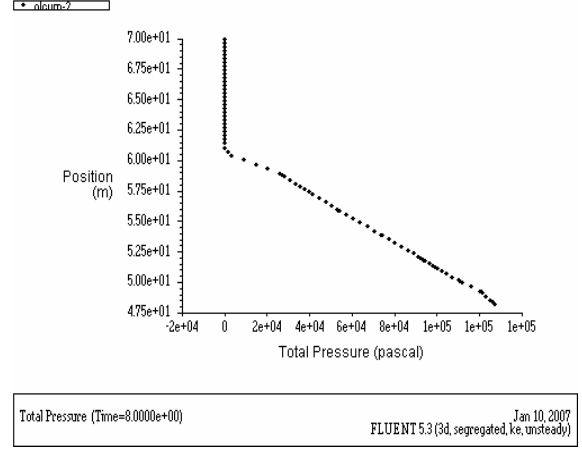


Model 4: Oran=dik

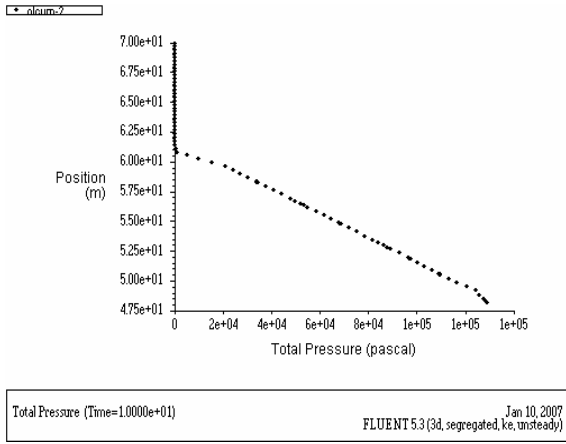
Şekil 6.19. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; Ölçüm 2 için Hız-H grafiği



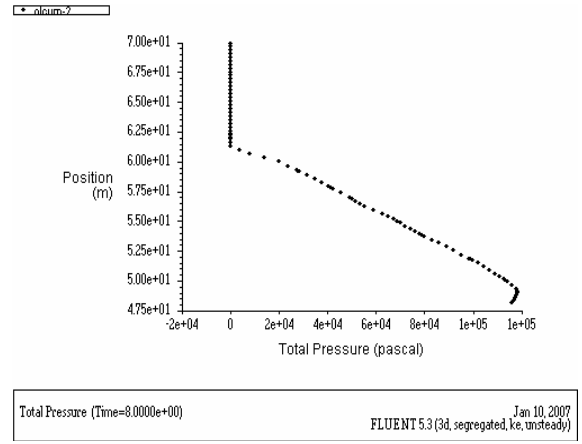
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3



Model 3: Oran=1/3

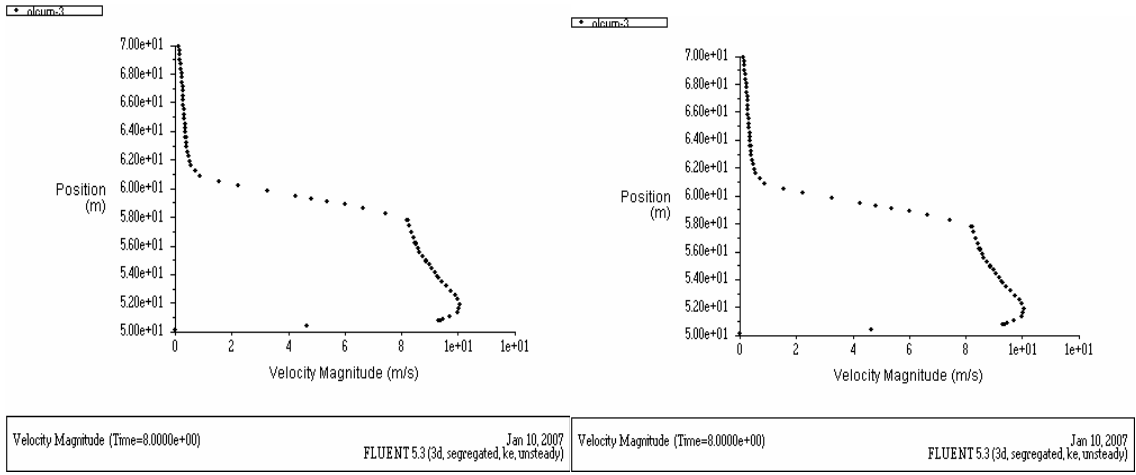


Model 4: Oran=dik

Şekil 6.20. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; Ölçüm 2 için Basınç-H grafiği

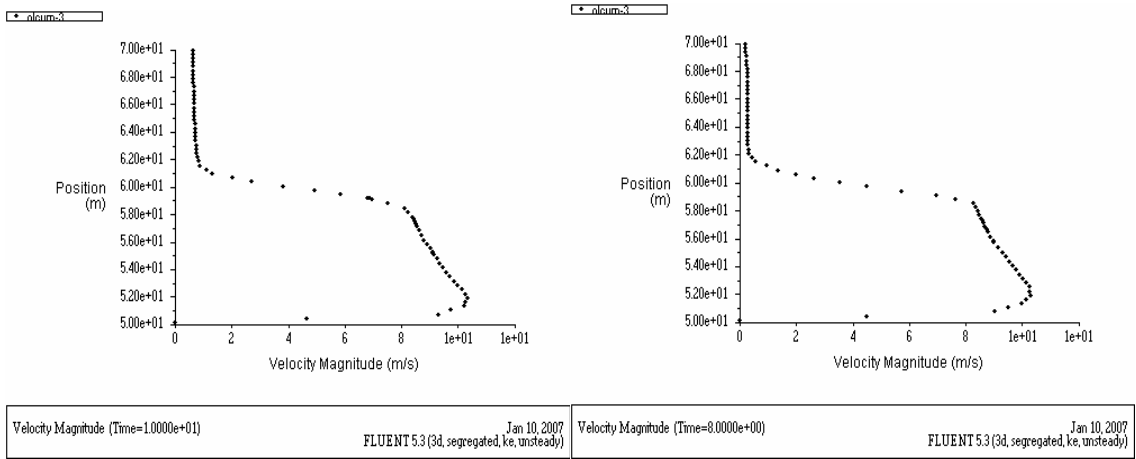
Şekil 6.19'a baktığımızda hız değerleri Model 1'den, Model 4'e gittikçe artış göstermektedir. Model 1'de $V=7.8 \text{ m/s}$ iken Model-4'te bu değer $V=8.9 \text{ m/s}$ olmaktadır

Yine aynı şekilde Şekil 6.20'e baktığımızda basınç değerleri de hıza ters olarak azalmaktadır. Model 1'de basınç $1.3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ iken Model 4'te $1.25 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ dır.



Model 1: Oran=3/3

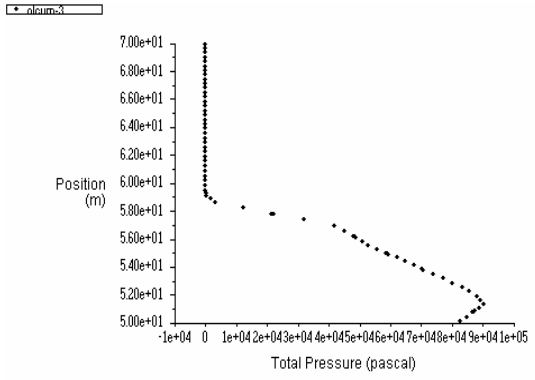
Model 2: Oran=2/3



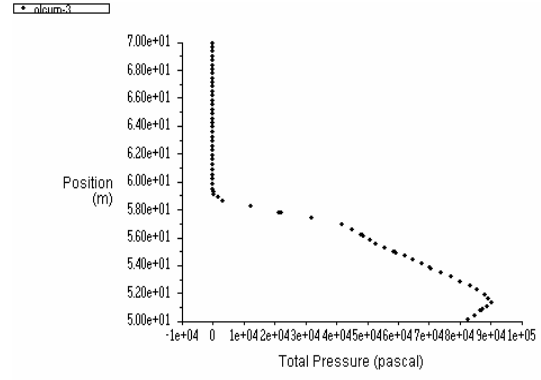
Model 3: Oran=1/3

Model 4: Oran=dik

Şekil 6.21. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; Ölçüm 3 için Hız-H grafiği



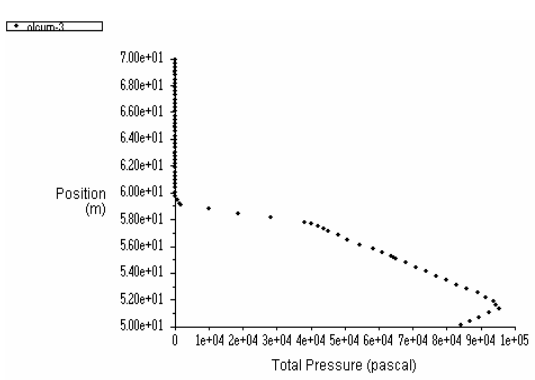
Total Pressure (Time=8.0000e+00) Jan 10, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)



Total Pressure (Time=8.0000e+00) Jan 10, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

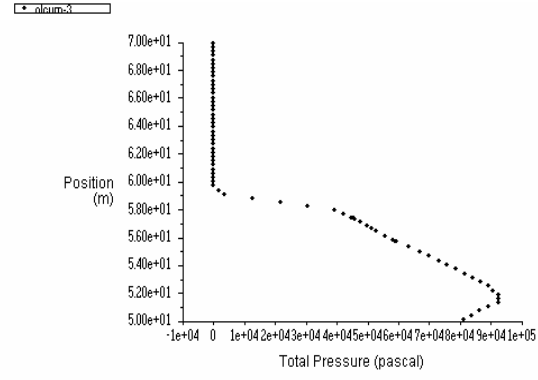
Model 1: Oran=3/3

Model 2: Oran=2/3



Total Pressure (Time=1.0000e+01) Jan 10, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

Model 3: Oran=1/3

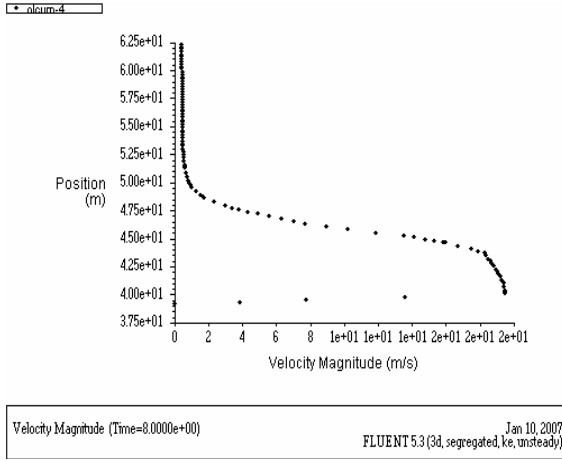


Total Pressure (Time=8.0000e+00) Jan 10, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

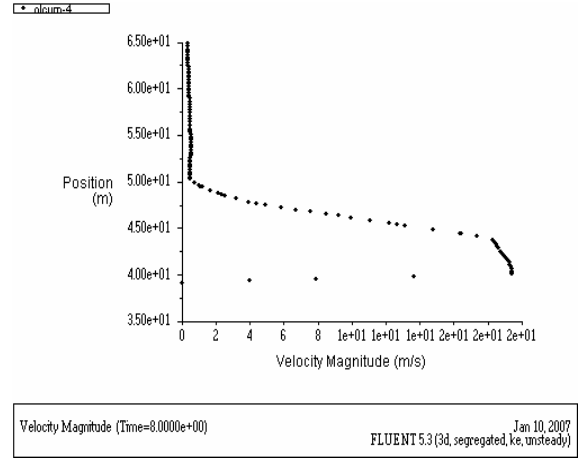
Model 4: Oran=dik

Şekil 6.22. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; Ölçüm 3 için Basınç-H grafiği

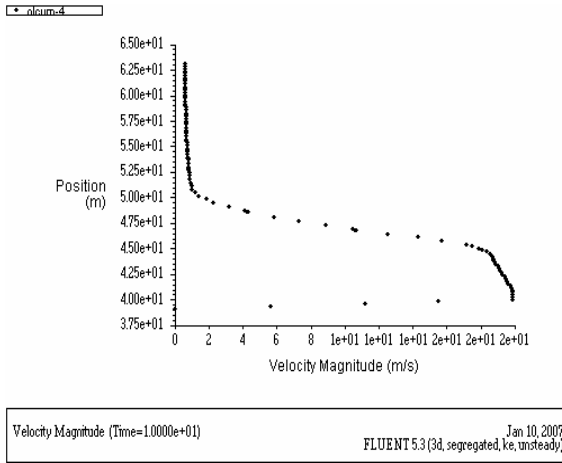
Şekil 6.21'de hızlarda artış, basınç değerlerin de ise düşüş görülmektedir. Model 1'de hız $V= 1.1 \text{ m/s}$ basınç $9.7 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ iken, Model 4'te bu değerler; $V=1.19\text{m/s}$, basınç ise $9.2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ değerini almıştır.



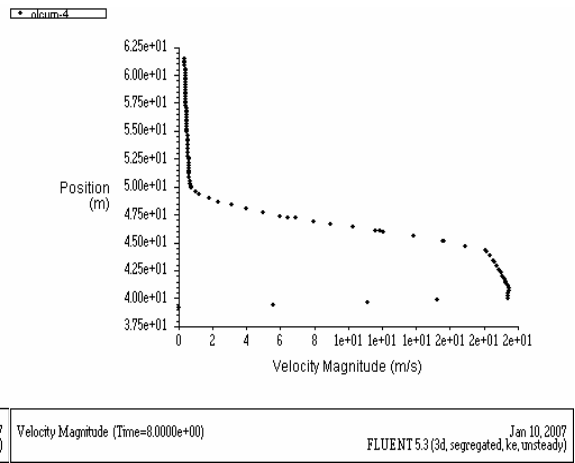
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3

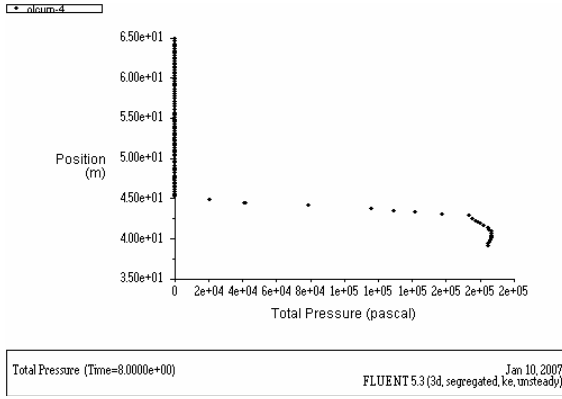


Model 3: Oran=1/3

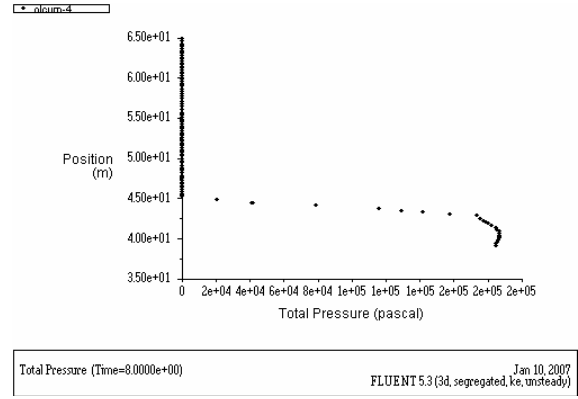


Model 4: Oran=dik

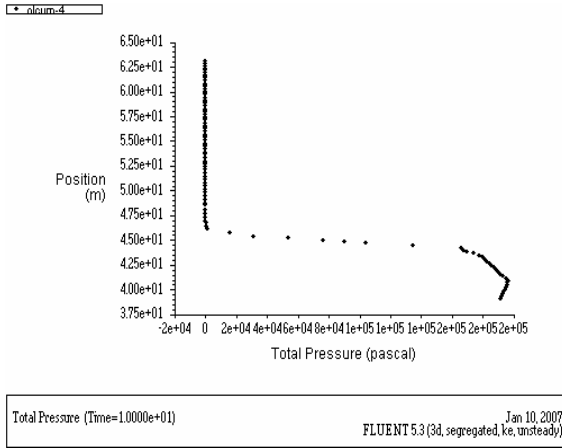
Şekil 6.23. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; Ölçüm 4 için Hız-H grafiği



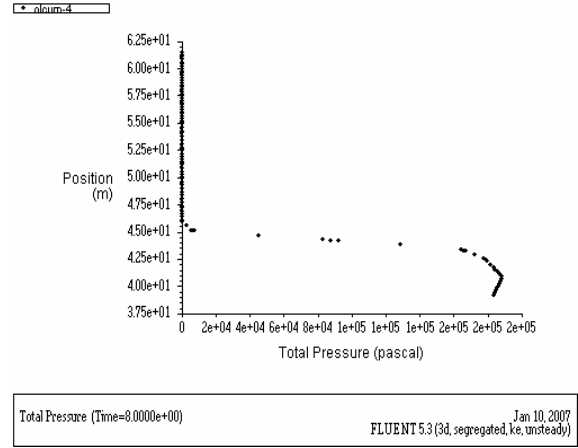
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3



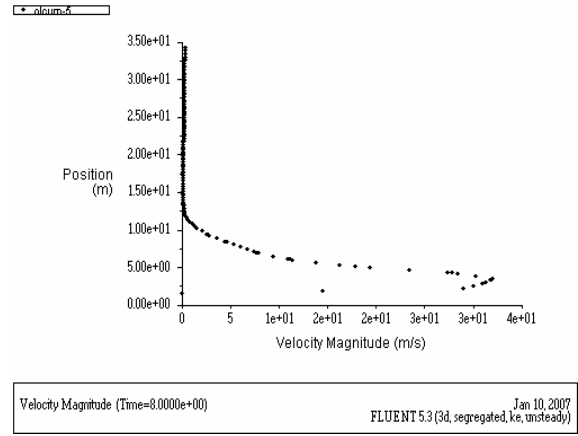
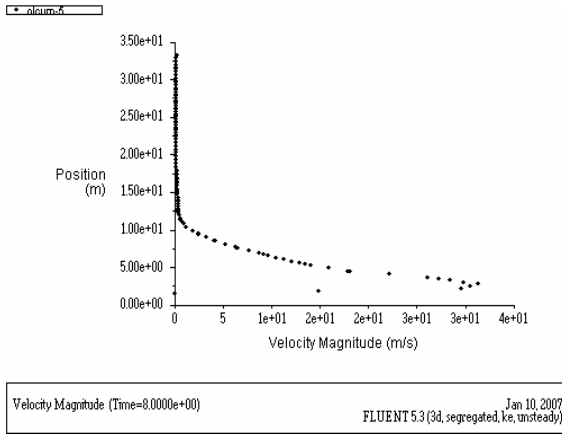
Model 3: Oran=1/3



Model 4: Oran=dik

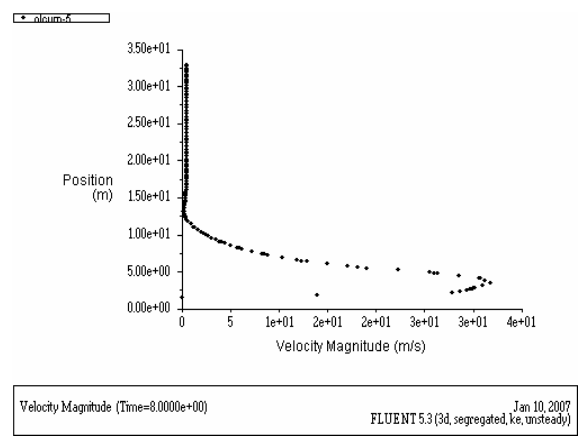
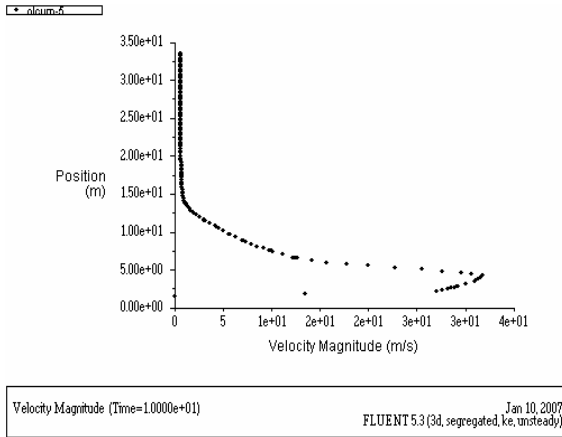
Şekil 6.24. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; Ölçüm 4 için Basınç-H grafiği

Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'te görüldüğü gibi dolusavak üzerinde mansaba yakın yerlerdeki hız ve basınç değerleri birbirine yakındır. Hız değerleri $V=2.7\sim 2.75 \text{ m/s}$, basınç değerleri ise $2.68\cdot 10^5\sim 2.75\cdot 10^5 \text{ Pa}$ arasında değişim göstermektedir.



Model 1: Oran=3/3

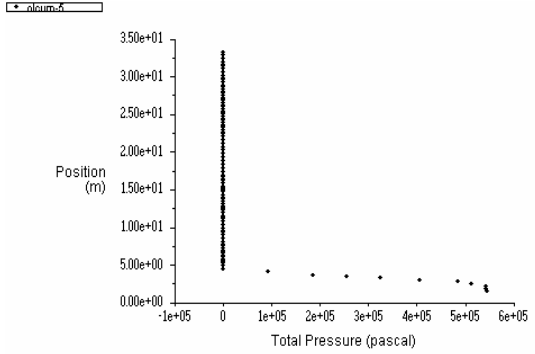
Model 2: Oran=2/3



Model 3: Oran=1/3

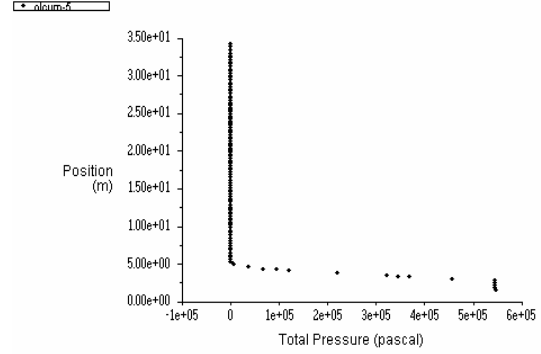
Model 4: Oran=dik

Şekil 6.25. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; Ölçüm 5 için Hız-H grafiği



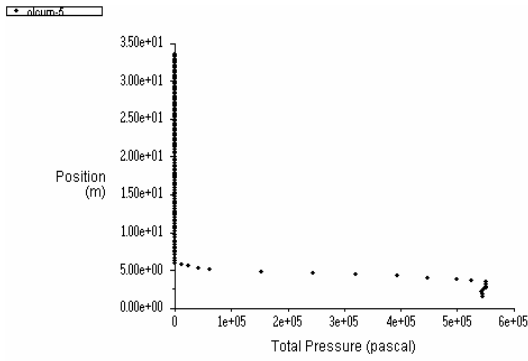
Total Pressure (Time=8.0000e+00) Jan 10, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

Model 1: Oran=3/3



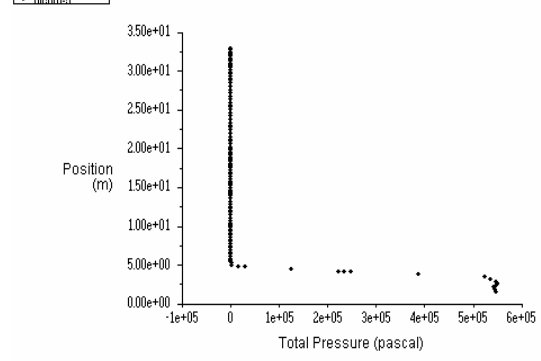
Total Pressure (Time=8.0000e+00) Jan 10, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

Model 2: Oran=2/3



Total Pressure (Time=1.0000e+01) Jan 10, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

Model 3: Oran=dik

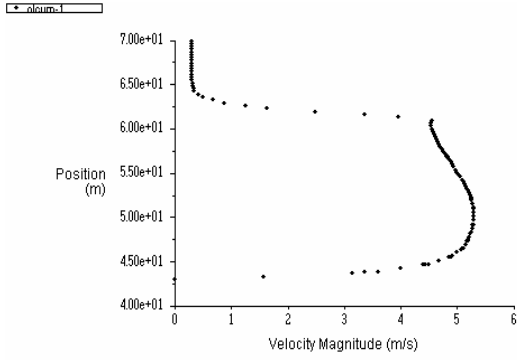


Total Pressure (Time=8.0000e+00) Jan 10, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

Model 4: Oran=1/3

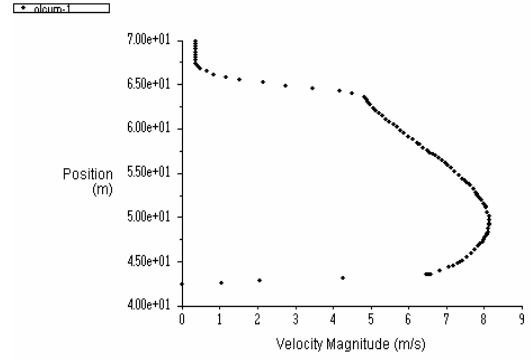
Şekil 6.26. $Q_1=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=2\text{m}$; Ölçüm 5 için Basınç-H grafiği

Şekil 6.25 ve Şekil 6.26 'da görüldüğü gibi dolusavak üzerinde mansap yakın yerlerdeki hız ve basınç değerleri birbirine yakındır. Hız değerleri $V=3.4\sim 3.5 \text{ m/s}$, basınç değerleri ise $5.3 \cdot 10^5 \sim 5.5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ arasındadır.



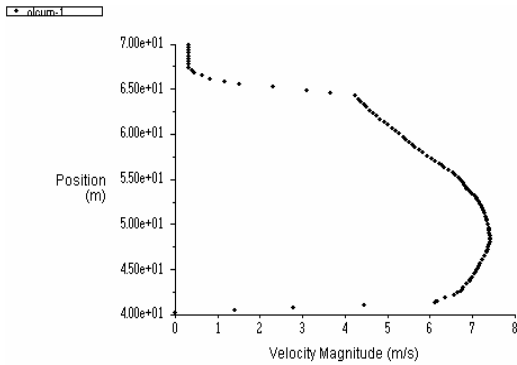
Velocity Magnitude (Time=1.1000e+01) Jan 09, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

Model 1: Oran=3/3



Velocity Magnitude (Time=1.1000e+01) Jan 09, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

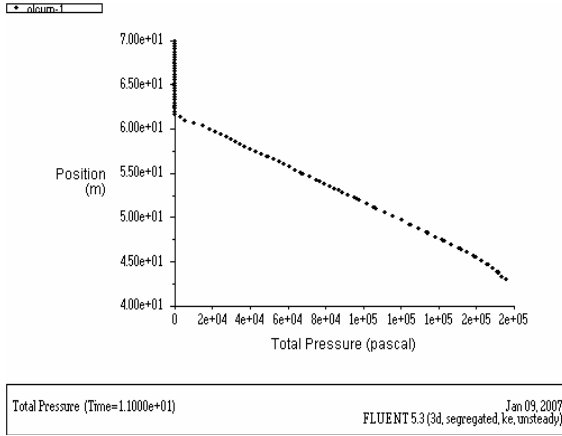
Model 2: Oran=2/3



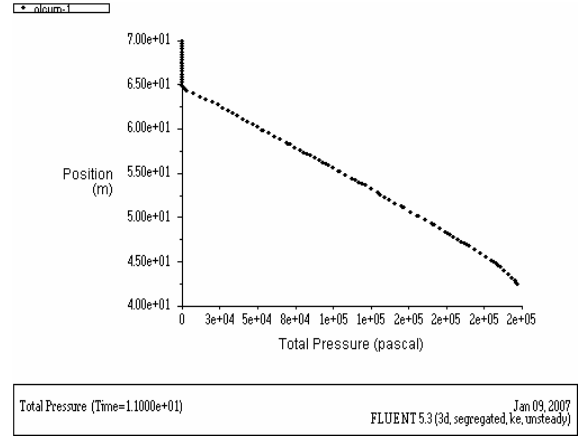
Velocity Magnitude (Time=1.1000e+01) Jan 09, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

Model 3: Oran=1/3

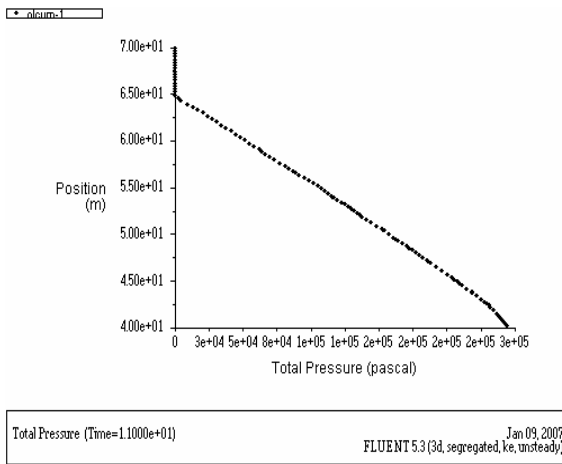
Şekil 6.27. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; Ölçüm 1 için hız-H grafiği



Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3

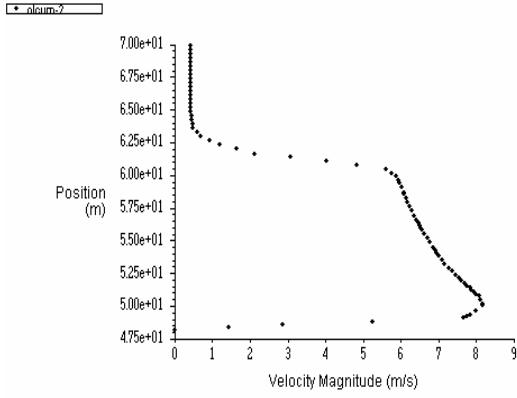


Model 3: Oran=1/3

Şekil 6.28. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; Ölçüm 1 için Basınç-H grafiği

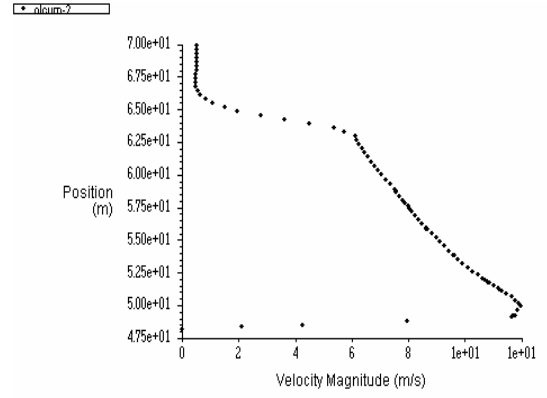
Şekil 6.27'e baktığımızda hızın cidar'da $V=0 \text{ m/s}$, max hızın ise Model 2'de $V=8.5 \text{ m/s}$ ile en büyük değeri aldığı, Model 1'de ise $V=5.3 \text{ m/s}$ hızla en düşük değeri aldığı görülüyor.

Şekil 6.28'de basınçlara baktığımızda ise Model 3 ile Model 2'de basınç değerlerinin birbirine yakın olduğu, $2.75 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ çıktığı görülmektedir. Model-1'de ise $2.17 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ olarak bulunmuştur.



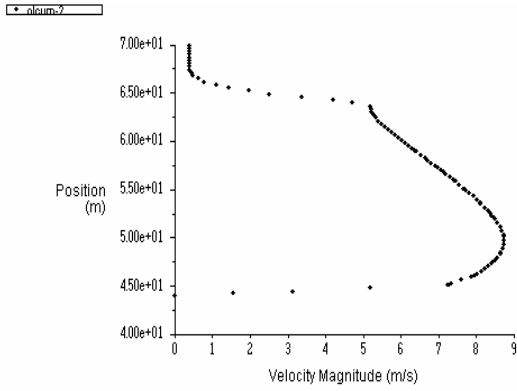
Velocity Magnitude (Time=1.1000e+01) Jan 09, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

Model 1: Oran=3/3



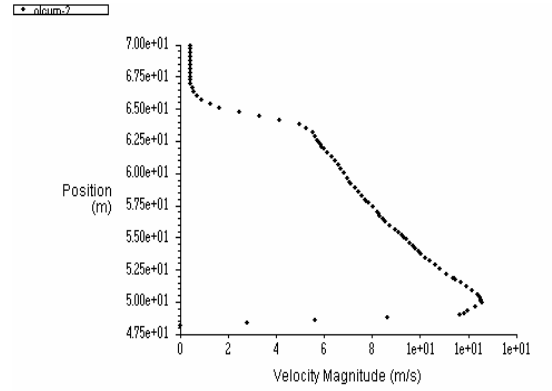
Velocity Magnitude (Time=1.1000e+01) Jan 10, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

Model 2: Oran=2/3



Velocity Magnitude (Time=1.1000e+01) Jan 09, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

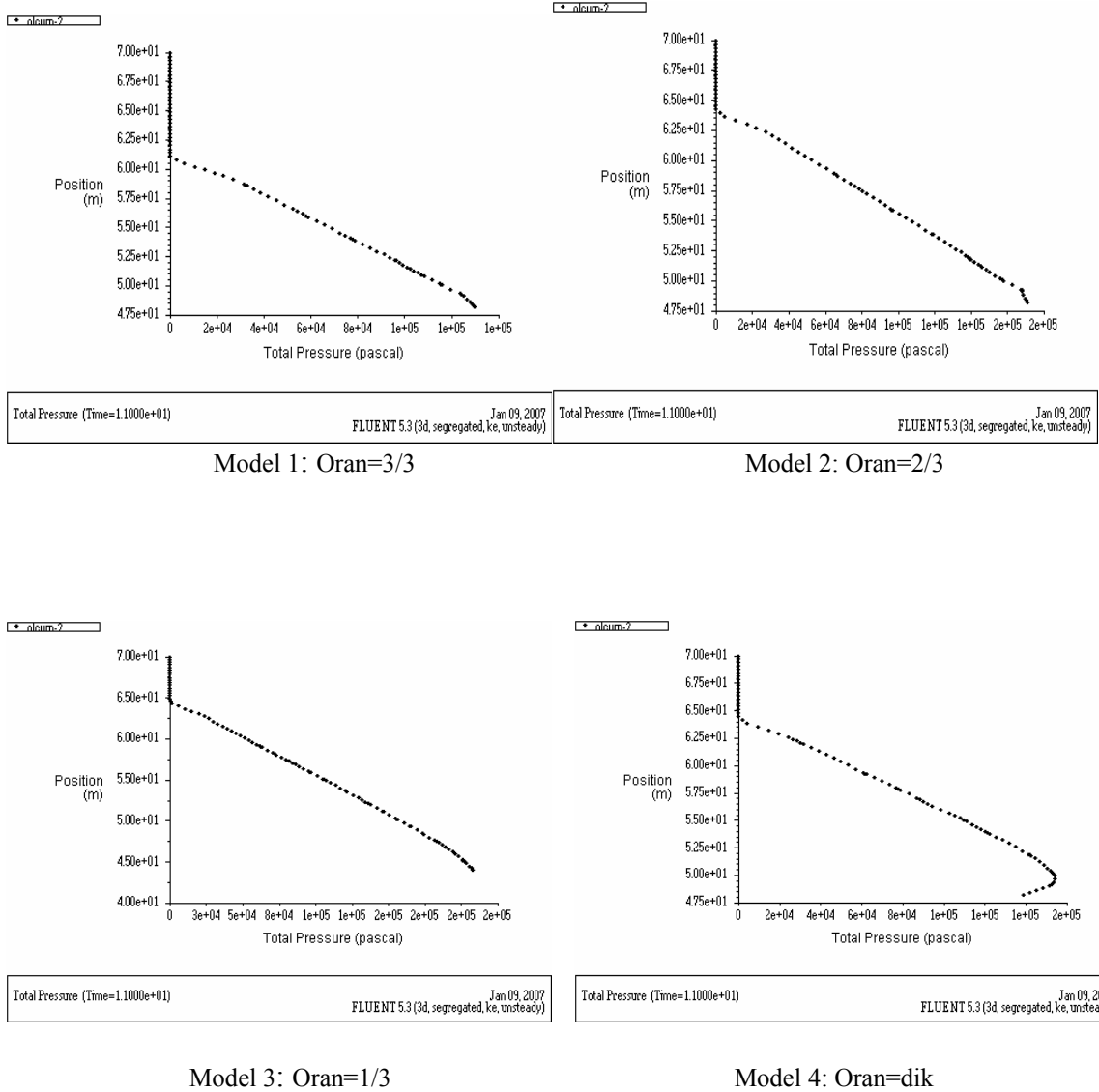
Model 3: Oran=1/3



Velocity Magnitude (Time=1.1000e+01) Jan 09, 2007
FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke, unsteady)

Model 4: Oran=dik

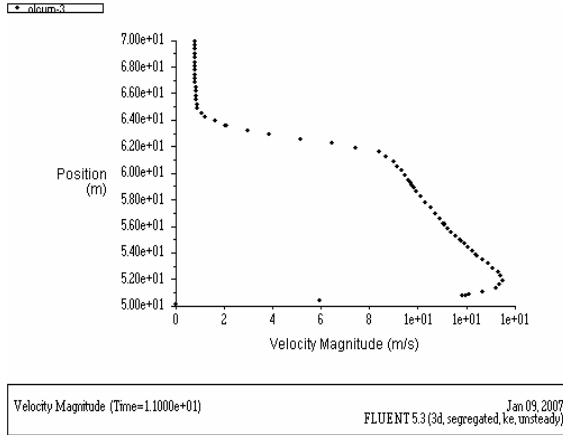
Şekil 6.29. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; Ölçüm 2 için Hız-H grafiği



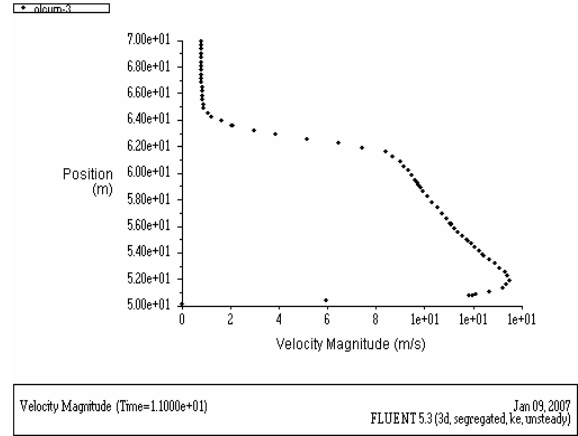
Şekil 6.30. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; Ölçüm 2 için Basınç-H grafiği

Şekil 6.29’da ki grafikte hız değerleri Model 1’den, Model 4’e gittikçe artmaktadır. Model 4’te ki $V=13.6 \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur. Model 1’de ise $V=8.2 \text{ m/s}$ dir.

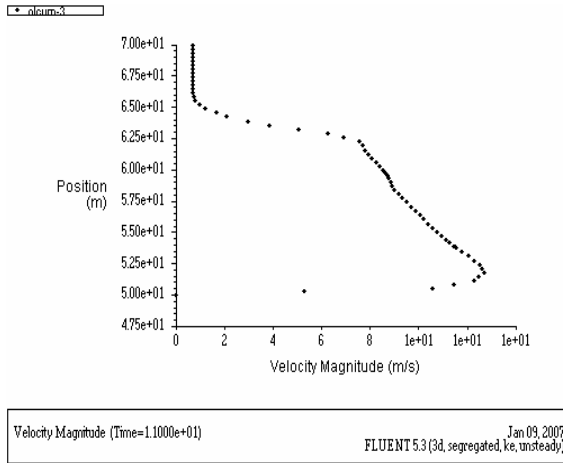
Şekil 6.30’da basınç değerlerine baktığımızda, basınç değerlerinin hıza oranla azaldığı görülmektedir. Model 1’de değeri $1.37 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ iken ve Model 4’te ise $1.85 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ olarak bulunmuştur.



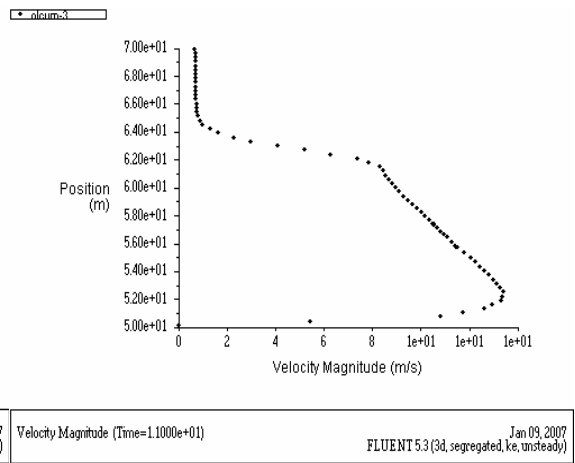
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3

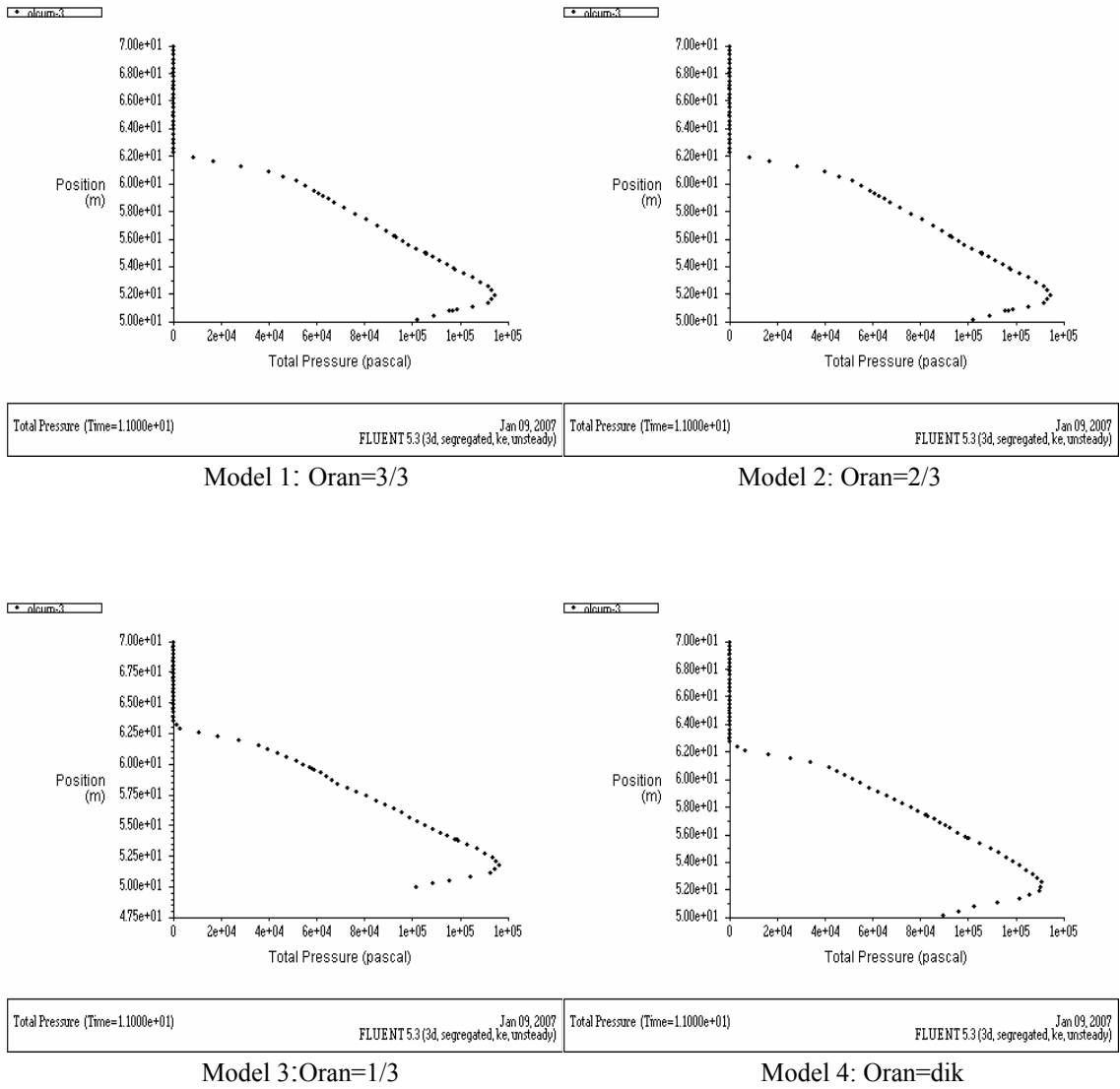


Model 3: Oran=1/3



Model 4: Oran=dik

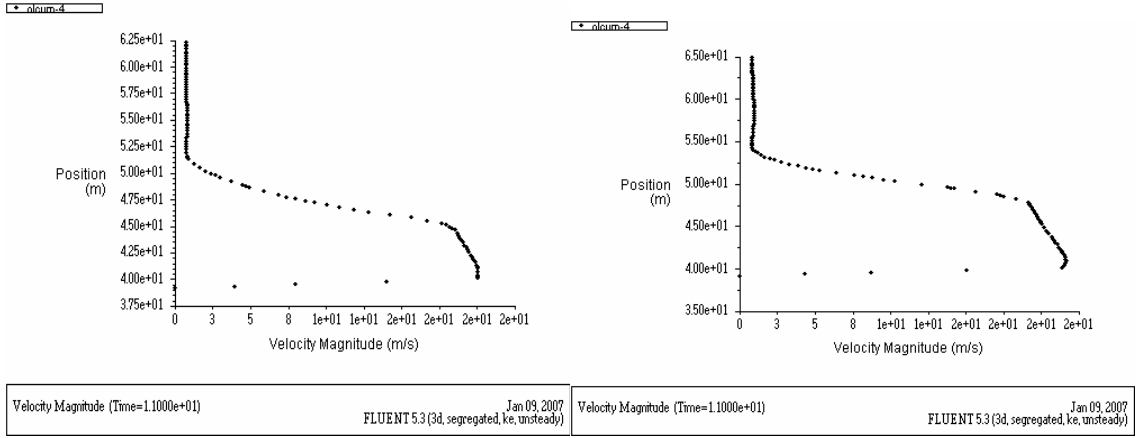
Şekil 6.31. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; Ölçüm 3 için Hız-H grafiği



Şekil 6.32. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; Ölçüm 3 için Basınç-H grafiği

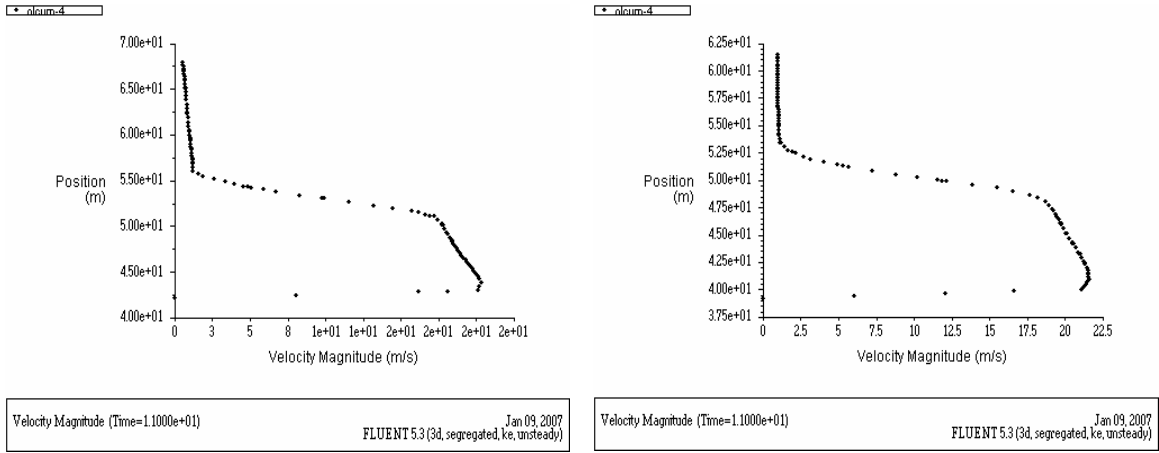
Şekil 6.31 Ölçüm 3 için hız değerlerini incelediğimiz zaman hız değerinin artığını görüyoruz. Hız değeri Model 4'te $\max V=14.7 \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur.

Şekil 6.32'de de basınç değerlerine baktığımızda basınç değerlerinin hız değerlerine oranla azaldığını görüyoruz. Model 4'te basınç $1.35 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ olarak bulunmuştur.



Model 1: Oran=3/3

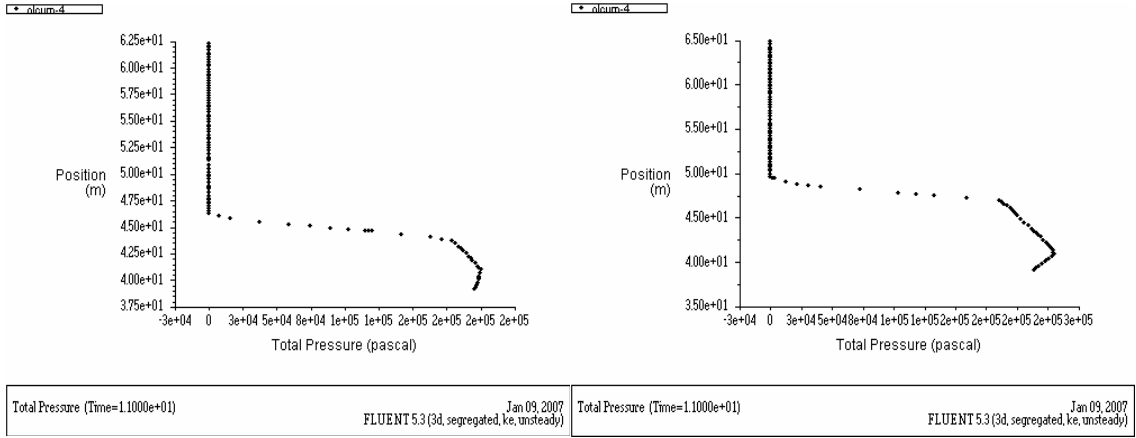
Model 2: Oran=2/3



Model 3: Oran=1/3

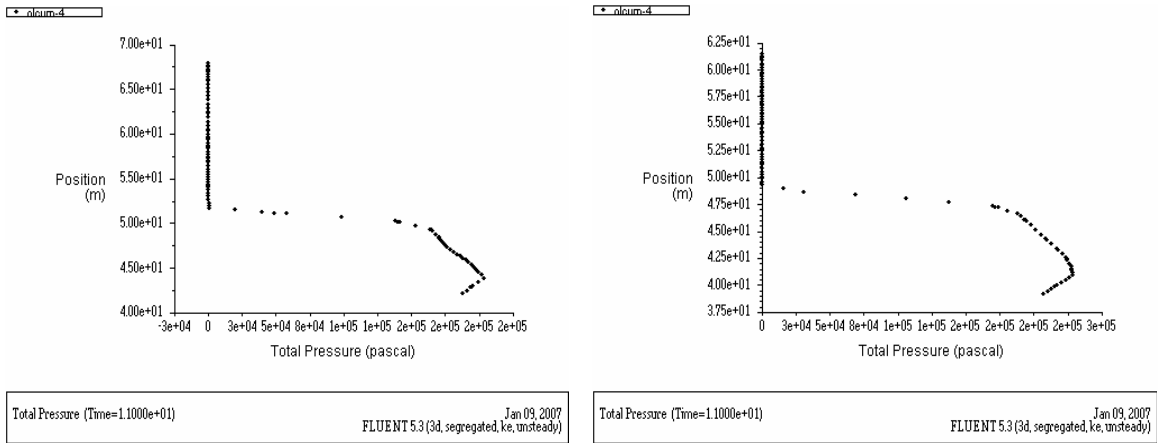
Model 4: Oran=dik

Şekil 6.33. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; Ölçüm 4 için Hız-H grafiği



Model 1:Oran=3/3

Model 2: Oran=2/3

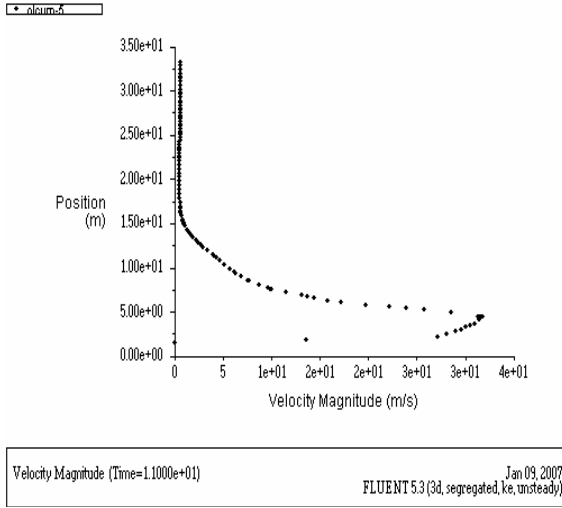


Model 3: Oran=1/3

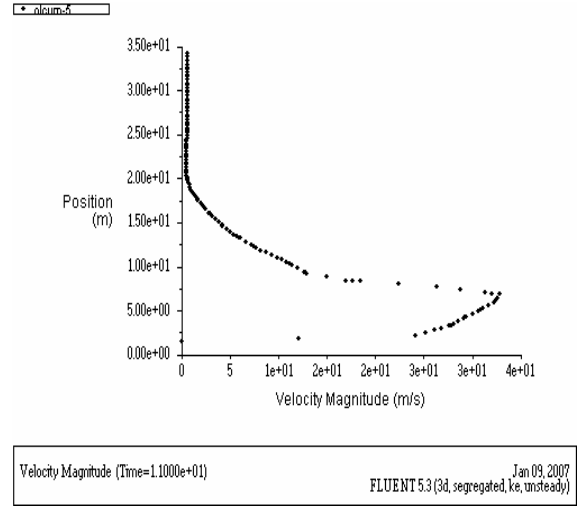
Model 4: Oran=dik

Şekil 6.34. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; Ölçüm 4 için Basınç-H grafiği

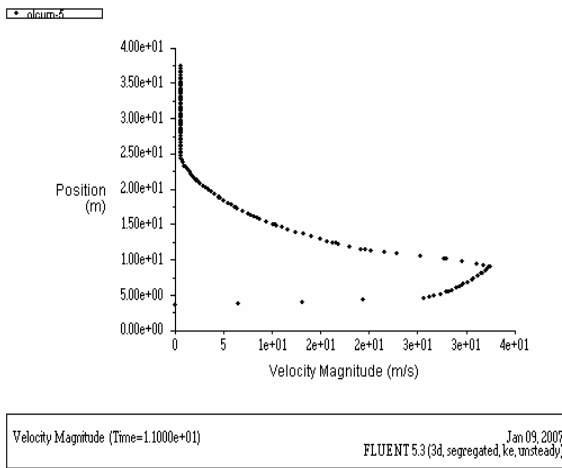
Şekil 6.33’de görüldüğü gibi hız değerinin azaldığı görülmektedir. En büyük hız Model 2’de meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak basınç değerleri ise Şekil 6.34 ‘e bakıldığı zaman, Model 1’den Model 3’e doğru değerlerin arttığı görülmektedir.



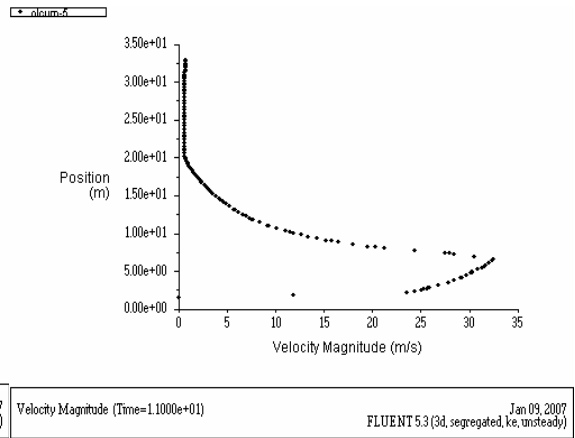
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3

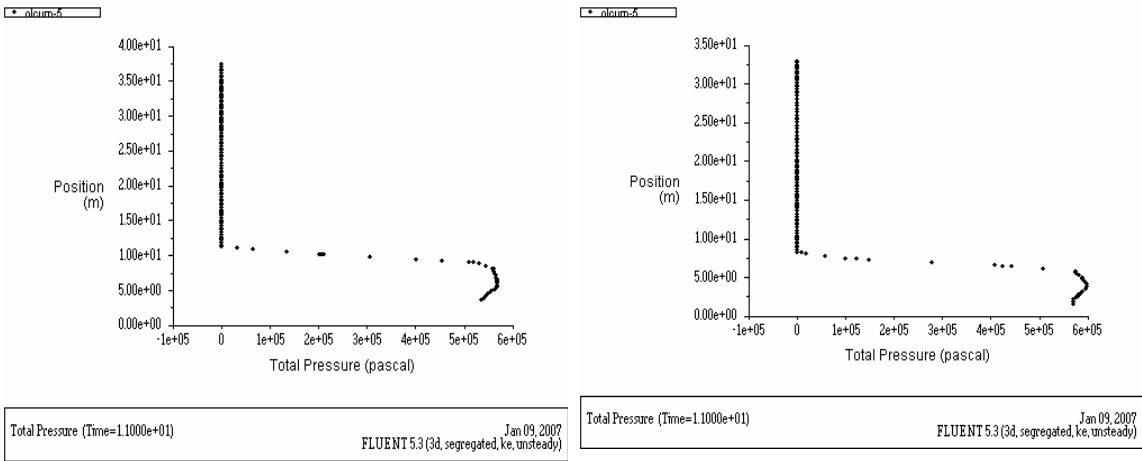
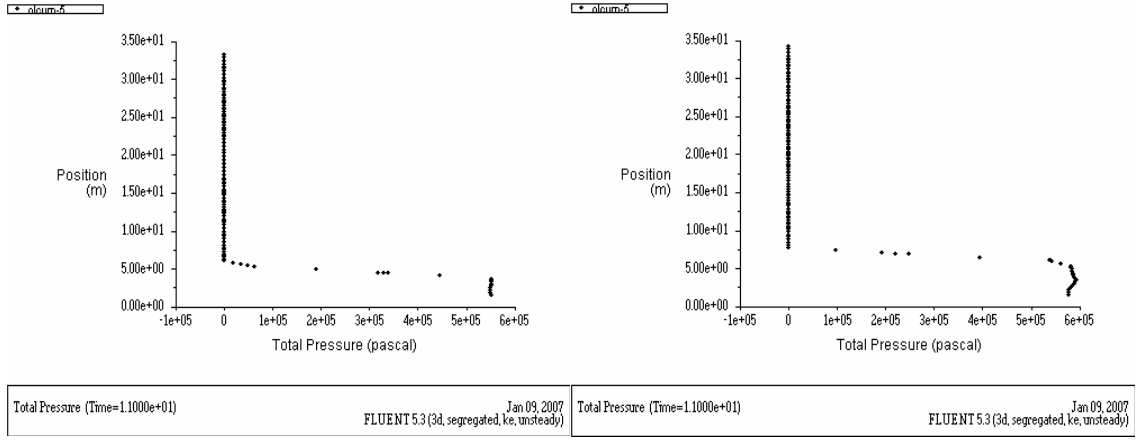


Model 3: Oran=1/3



Model 4: Oran=dik

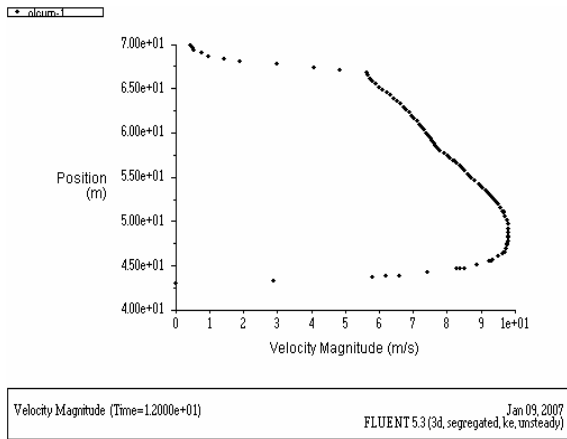
Şekil 6.35. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; Ölçüm 5 için Hız-H grafiği



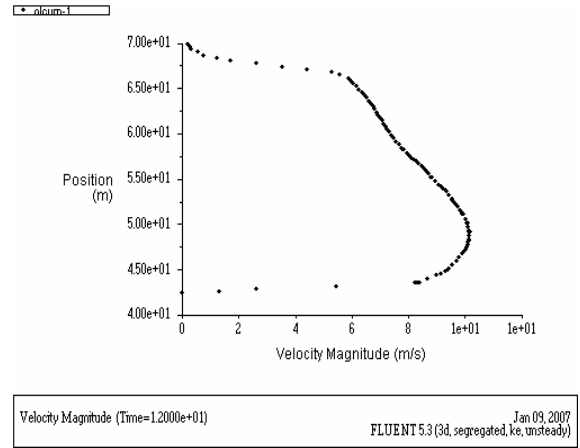
Şekil 6.36. $Q_2=1345 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_2=10\text{m}$; Ölçüm 5 için Basınç-H grafiği

Şekil 6.35'e baktığımızda hızların hemen hemen aynı değerlerde olduğunu, Şekil 6.36'da ise basınç değerlerinin Model 1'den Model 4'e gittikçe arttığı görülmüştür.

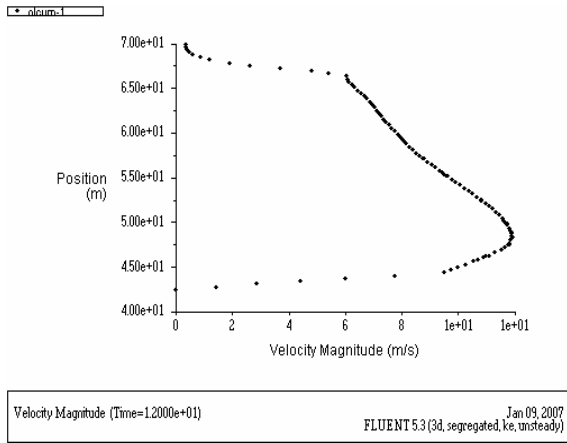
Diğer grafiklerde de olduğu gibi dolusavağın mansaba yakın kısmında her model için basınç ve hız değerleri yaklaşık olarak aynıdır.



Model 1: Oran=3/3

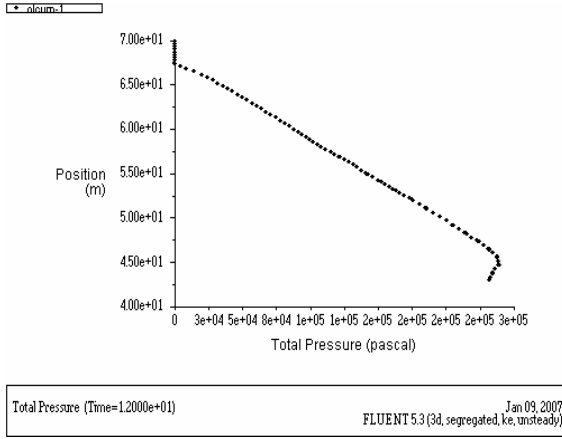


Model 2: Oran=2/3

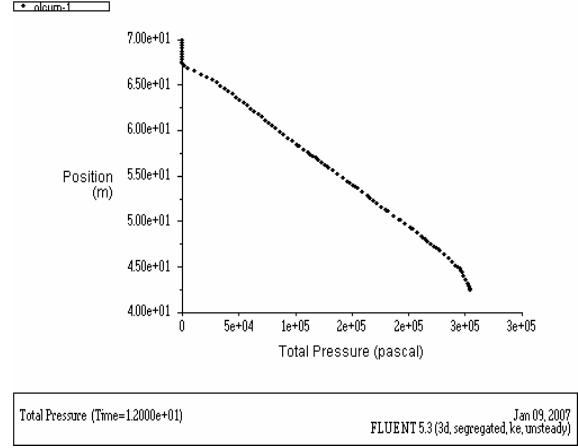


Model 3: Oran=1/3

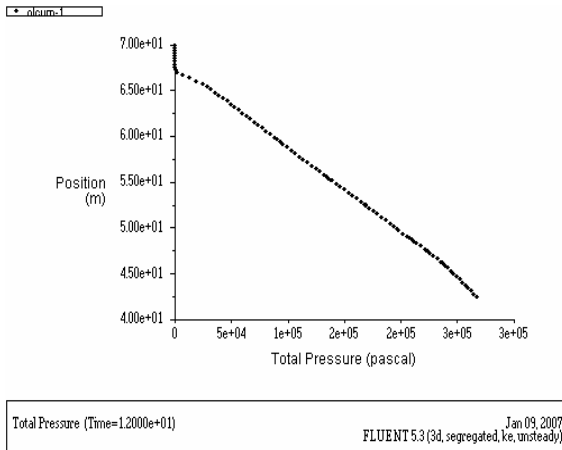
Şekil 6.37. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; Ölçüm 1 için Hız-H grafiği



Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3



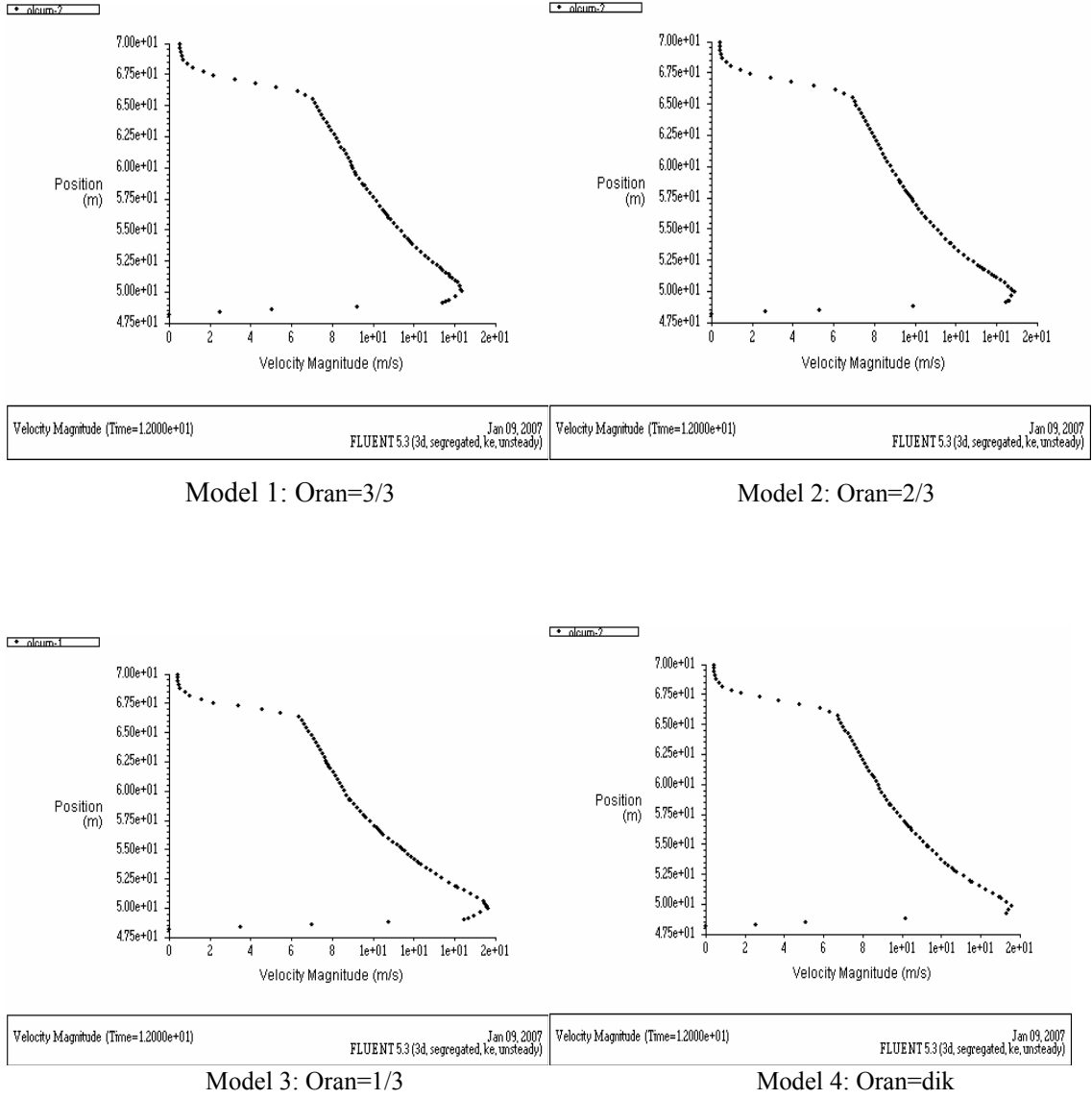
Model 3: Oran=1/3

Şekil 6.38. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; Ölçüm 1 için Basınç-H grafiği

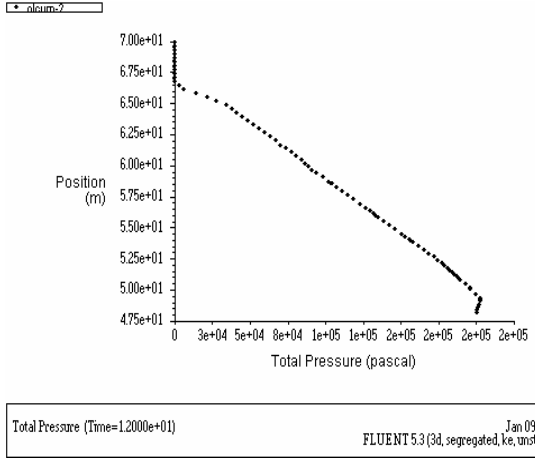
Tüm modellerde, cidarda $V=0 \text{ m/s}$, cidardan uzaklaştıkça hızda artmakta ve zeminde itibaren 47. m de hız max oluyor $V=11 \text{ m/s}$ olmaktadır. Hızlar Model 1'den Model 3'e doğru artmaktadır.

Şekil 6.38'de basınç grafiklerine baktığımızda dolusavak üzerindeki en yüksek basınç Model 3'de çıkmış ve değeri $3.3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ dır. Model 1'de ise $2.9 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ olarak bulunmuştur.

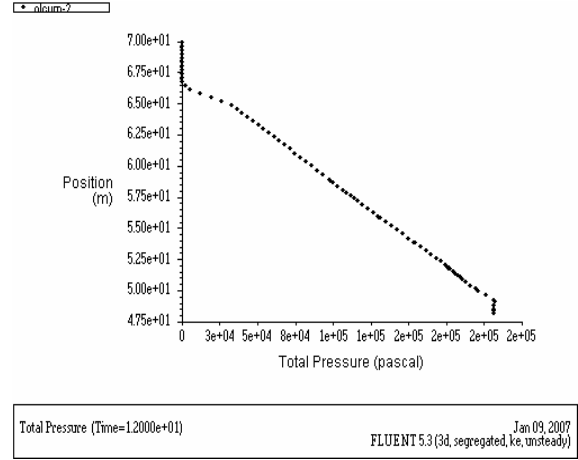
Genel olarak hız ve basınç grafiklerine baktığımızda Model 1'den, Model 3'e doğru gidildiğinde dolusavak üzerindeki hızların arttığı, basınç değerlerin in'de arttığı görülmüştür.



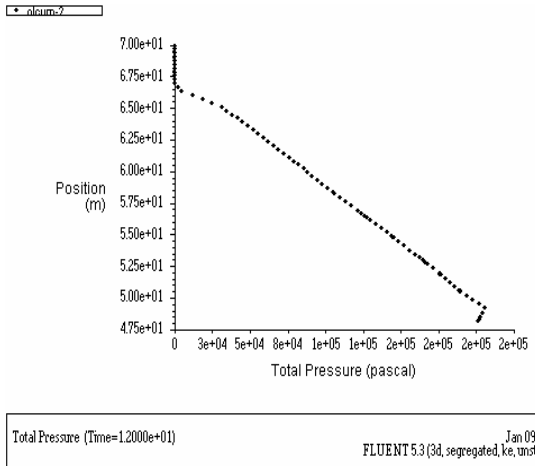
Şekil 6.39. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; Ölçüm 2 için Hız-H grafiği



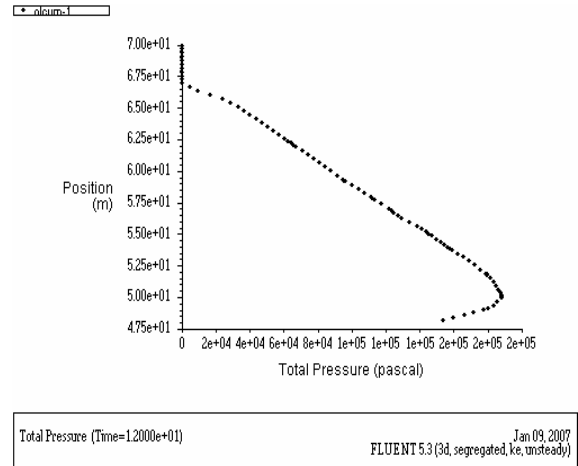
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3



Model 3: Oran=1/3



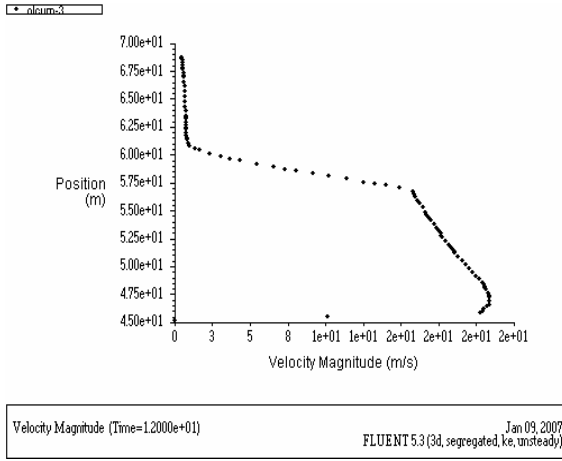
Model 4: Oran=dik

Şekil 6.40. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; Ölçüm 2 için Basınç-H grafiği

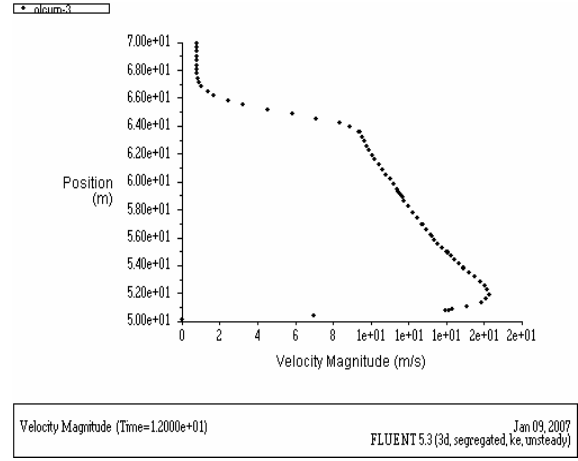
Şekil 6.39’u incelediğimizde hızların birbirine yakın olduğu görülse de, Model 4’te hızın arttığı görülmektedir. Hız $V=20 \text{ m/s}$ olarak göstermektedir.

Şekil 6.40’da basınçlara baktığımızda ise basınçta düşme meydana gelmiştir. Model 4’te basınç $2.4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ olarak bulunmuştur. Model 3’de ise $2.60 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ dır.

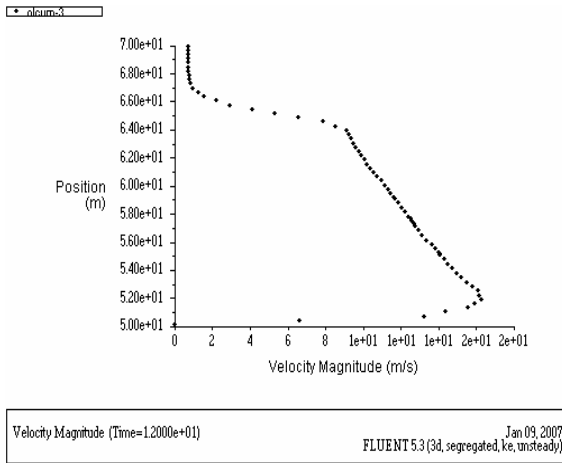
Hız ve basınç grafiklerine baktığımızda, hızın arttığı, buna bağlı olarak basıncın azaldığı görülmüştür.



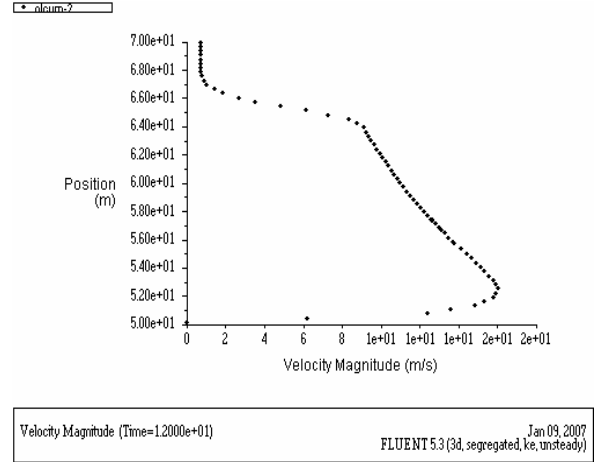
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3

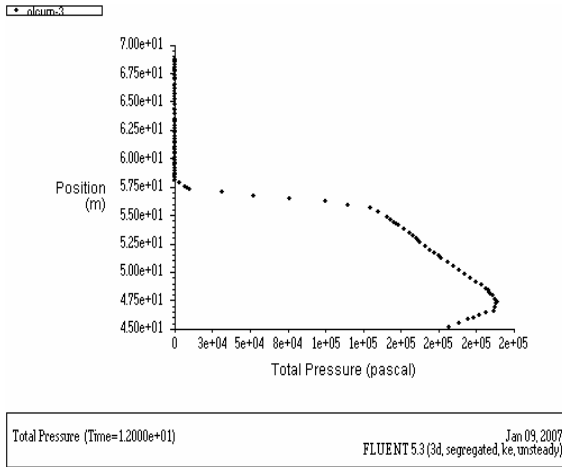


Model 3: Oran=1/3

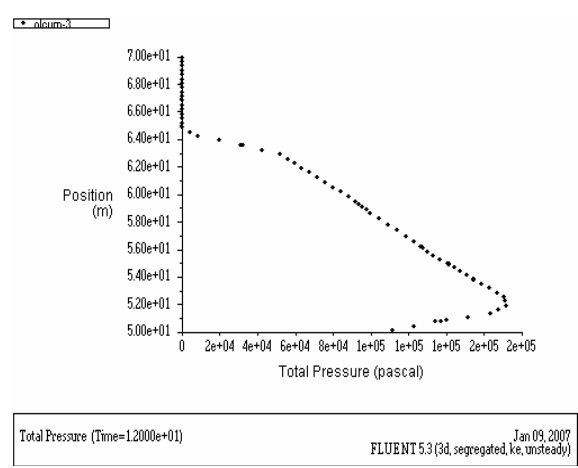


Model 4: Oran=dik

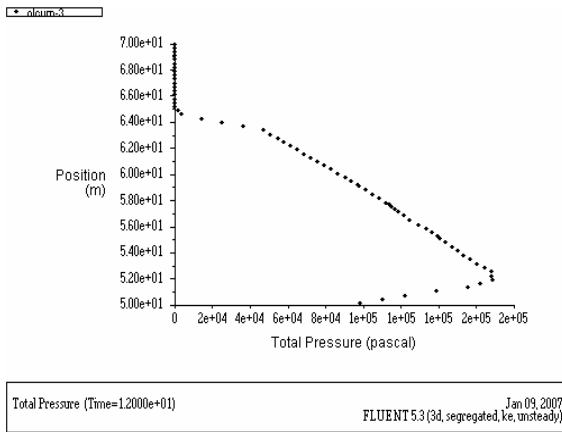
Şekil 6.41. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; Ölçüm 3 için Hız-H grafiği



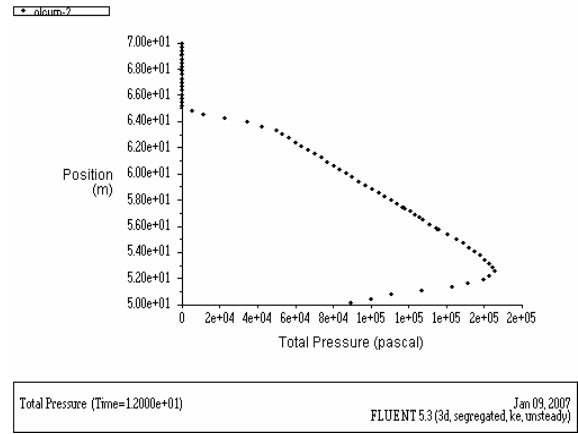
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3



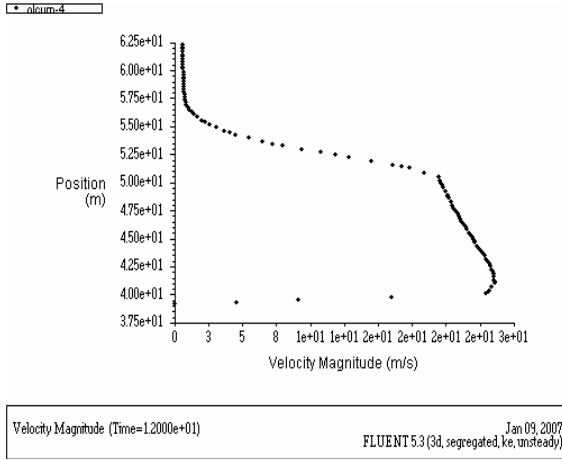
Model 3: Oran=1/3



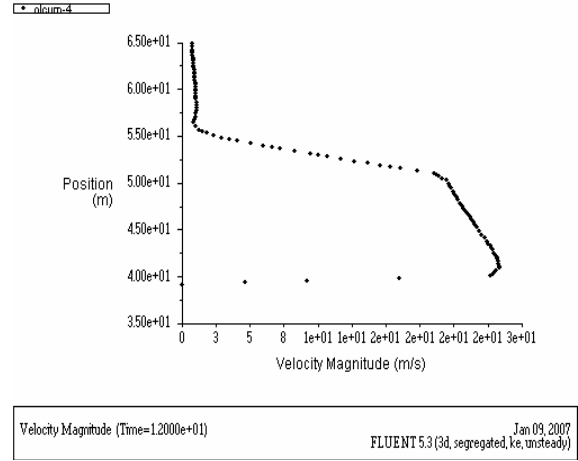
Model 4: Oran=dik

Şekil 6.42. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; Ölçüm 3 için Basınç-H grafiği

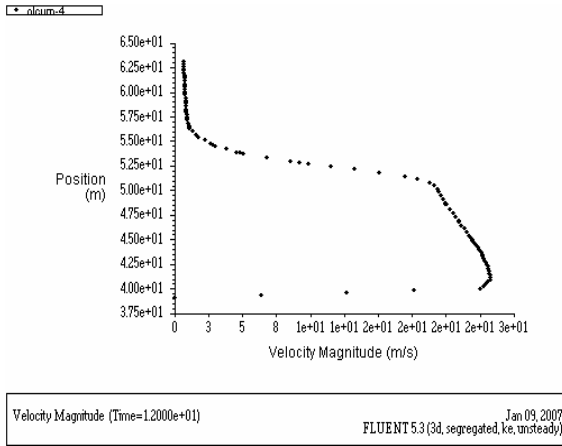
Şekil 6.41 ve Şekil 6.42'e bakıldığında, hızın arttığı, fakat basıncı Model 1'den Model 4'e gidildikçe basıncın azaldığı görülmüştür.



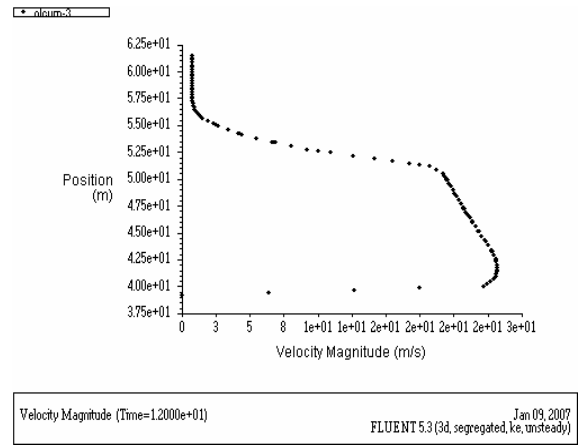
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3

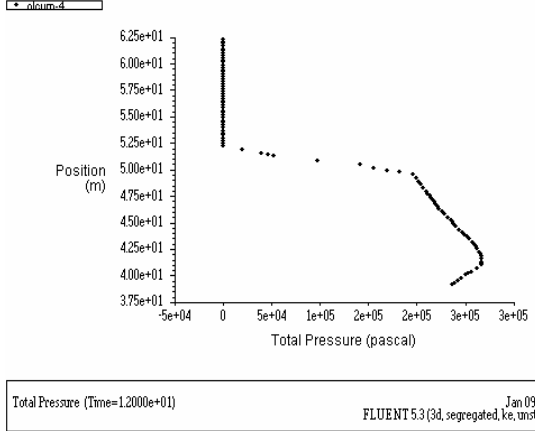


Model 3: Oran=1/3

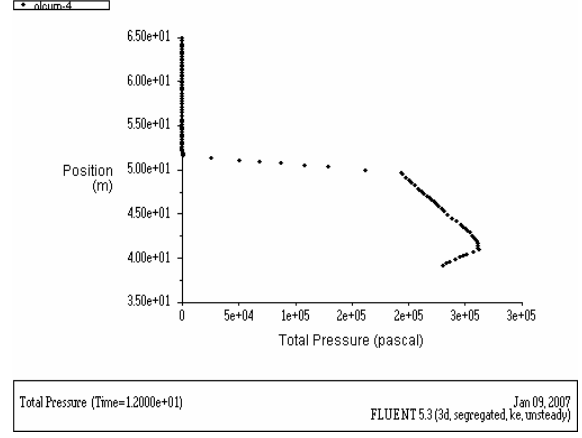


Model 4 : Oran=dik

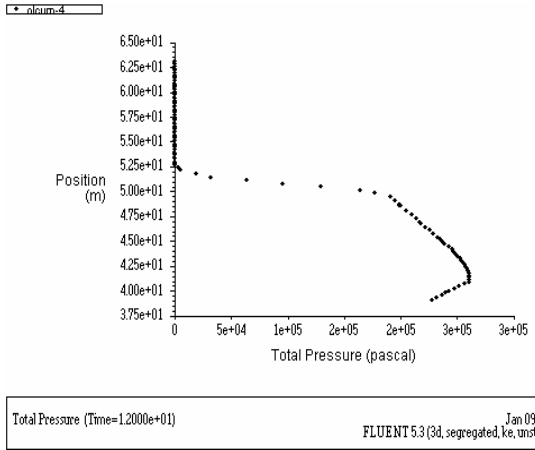
Şekil 6.43. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; Ölçüm 4 için Hız-H grafiği



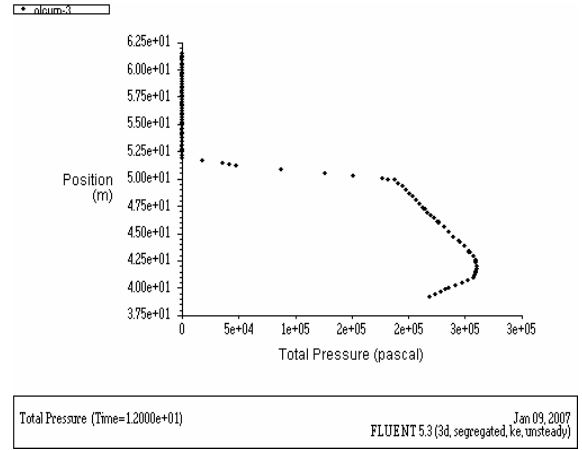
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3



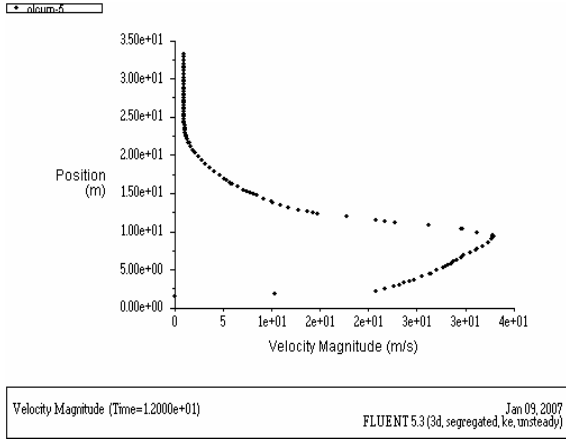
Model 3: Oran=1/3



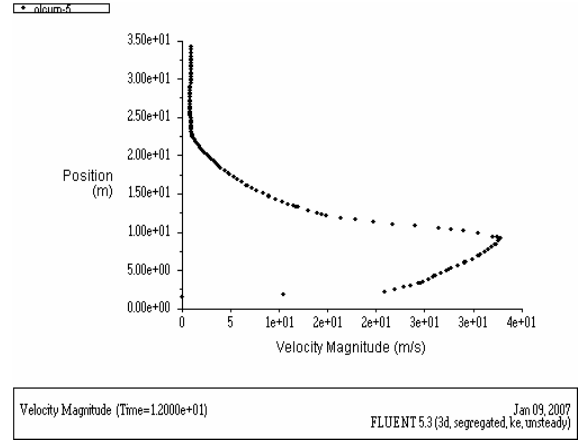
Model 4: Oran=dik

Şekil 6.44. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; Ölçüm 4 için Basınç-H grafiği

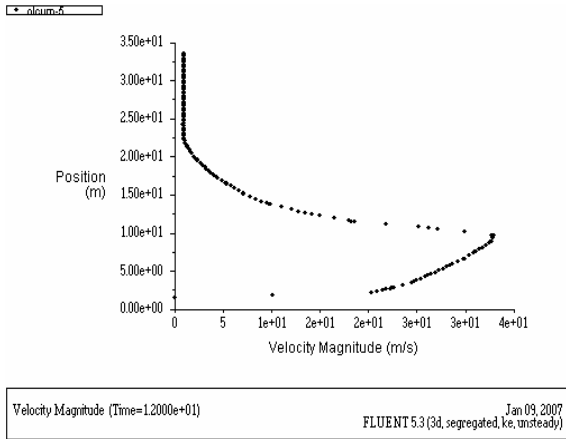
Şekil 6.43'te hız grafiklerine baktığımızda hızların yaklaşık olarak birbirine yakın olduğu görülmektedir. Şekil 6.44'te ise basınç değerleri yine aynı şekilde birbirine yakın olarak çıkmıştır.



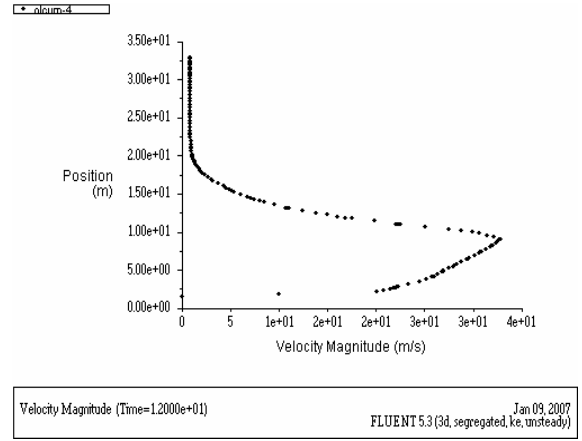
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3

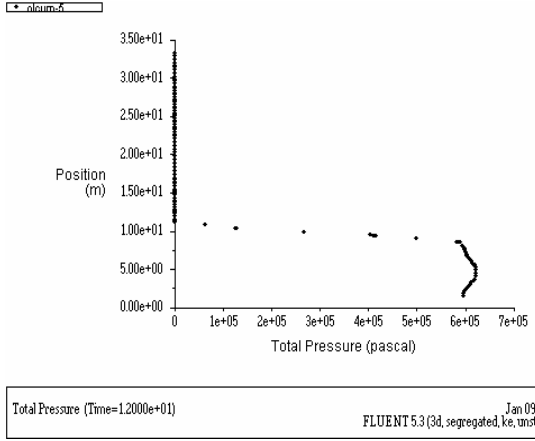


Model 3: Oran=1/3

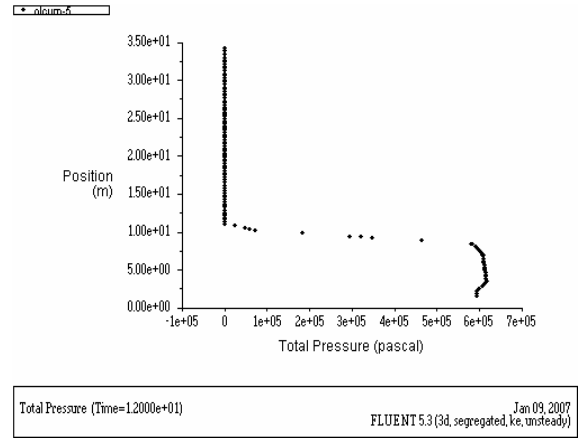


Model 4: Oran=dik

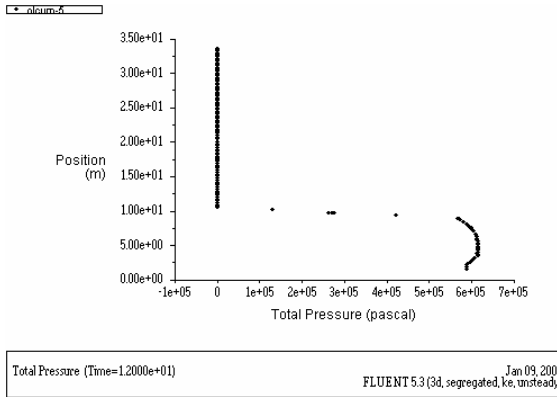
Şekil 6.45. $Q_3=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_3=18\text{m}$; Ölçüm 5 için Hız-H grafiği



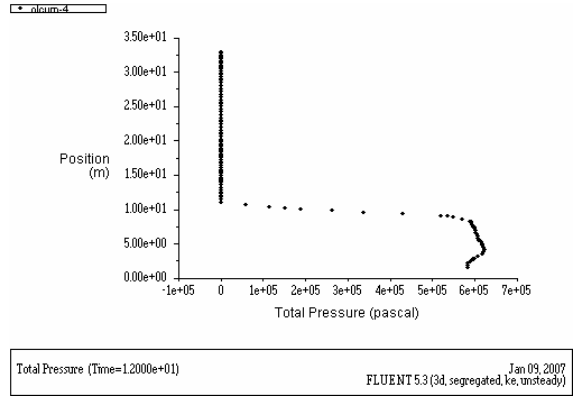
Model 1: Oran=3/3



Model 2: Oran=2/3



Model 3: Oran=1/3



Model 4: Oran=dik

Şekil 6.46. $Q_1=2833,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_1=18\text{m}$; Ölçüm 5 için Basınç-H grafiği

Şekil 6.45 ve Şekil 6.46'da görüldüğü gibi hız ve basınç değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Burada şunu söyleyebiliriz ki dolusavak gövdesinin mansaba yakın kısımlarında her model'de hız ve basınç değerleri birbirine yakındır.

7.SONUÇLAR

Yaptığımız çalışmada, dolusavak üzerinde suyun giriş kısmını farklı oranlarda tasarlayarak (Oran=3/3, Oran=2/3, Oran=1/3 ve Oran=dik) en emniyetli kısımda kalanı CFD yazılımında belirlemeye çalıştık.

Bu inceleme, dolusavak üzerinde oluşan basınç ve hız dağılımlarının belirlenmesi yönünde olmuştur.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- 1. Ölçüm kesitinde modeller arasında karşılaştırma yaptığımızda Model 1, Model 2, Model 3'e göre Model 4'te hız ve basınç değerlerinin daha fazla arttığı görülmüştür.
- 2. Ölçüm kesitinde ise modeller arasında ki karşılaştırmada Model 1, Model 2, Model 3'e göre Model 4'te hız değerlerinde daha fazla artış, basınç değerlerinde ise daha fazla düşme gözlenmiştir.
- 3. Ölçüm kesitinde ise modeller arasında Model 1, Model 2, Model 3'e göre Model 4'te hız daha fazla artmakta, basınç değeri daha fazla düşüş göstermiştir.

Yani Model 4'te daha fazla alt basınç oluşmaktadır. Bu da dolusavak üzerindeki kavitasyon riskini artırmaktadır. Diğer modeller Model 4'e göre daha emniyetli tarafta kalmaktadır.

- Modellerimizin Ölçüm 4 ve Ölçüm 5 noktalarındaki grafiklere baktığımızda, her su yükü için modellerin hız ve basınç değerleri birbirine yakındır.

Burada daha iyi bir yorum yapabilmek için kretlerimizin deşarj katsayılarını incelersek; Deşarj katsayılarına baktığımızda tek açıklıktan çıkan debiler için elde edilen katsayılar;

$Q=223.33 \text{ m}^3/\text{s}$, $h=2\text{m}$ için;

Model 1'de $C=1.95511$; Model 2'de $C=1.49802$; Model 3 için $C=2.70225$; Model 4 için ise $C=1.96873$ dür.

$Q=1345 \text{ m}^3/\text{s}$, $h=10\text{m}$ için;

Model 1 için $C=3.9751$; Model 2 için $C=3.9056$; Model 3 için $C=3.9695$; Model 4 için ise $C=3.9679$ değerleri bulunmuştur.

$Q=2833.33 \text{ m}^3/\text{s}$, $h=18 \text{ m}$ için;

Model 1 için $C=2.3874$; Model 2 için $C=2.3249$; Model 3'te $C=2.3659$; Model 4'te $C=2.3742$ dir.

Elde edilen bu deşarj katsayılarına göre, son modele kadar oran yüzü deşarj katsayısını azaltma meyilindedir. Fakat Model 4'te ise deşarj katsayısı Model 2 ve Model 3'e göre büyük çıkmıştır. Aynı açıklık ve aynı hidrolik yük altında Model 1 ve Model 4 daha fazla debi geçirmektedir. Küçük debilerde Model 4, büyük debilerde ise Model 1.

İki model arasında, Model 4'te daha düşük basınçlar oluşmakta ve bu da kavitasyon riskini artırmaktadır. Bu risk tasarımcı gözü ile bir ekonomiklik mukayesesi yapıp kabul edilebilir. Bir beton hasarı veya beton çekme mukavemeti sınırları ile tasarıma gidilebilir.

Emniyet yönünden incelenirse Model 1'de kavitasyon riski Model 4'e göre daha az olduğu için daha elverişli bir model tipi olarak ön plana çıkmaktadır.

- $h=2m$ su yükü için yapılan analizlerde, rezervuarda ölü hacim dediğimiz bölge diğer analizlere göre daha büyük çıkmıştır.
- Çalışmamızda kullandığımız CFD yazılımını da yorumlayacak olursak, diğer hidrolik modellerde oluşan ölçek etkileri, zaman sorunu ve ekonomik sıkıntılar beklenmez. CFD analizlerinde kabul edilen bazı varsayımlar prototiplerde oluşan sorunları gidermektedir.
- Ayrıca CFD yazılımları ile çok fazlı akımlar, serbest yüzeyli akımlar, üç boyutlu modeller kolaylıkla incelenebilir.
- Dünya çapında yapılan çalışmalar CFD yazılımlarının güvenilirliği ve hidrolik konularında kolaylık sağlaması yönünde hem görüştür.

KAYNAKLAR

1. Aydın, M.C., Aydın, S., 2005, ‘‘Kars Barajı yandan alışlı dolusavak teknesinde üç boyutlu analiz uygulaması’’, II. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, İzmir.
2. Chatila, J., Tabbara, M., 2004, ‘‘ Computational modeling of flow over on ogee spillway’’, Comput Struct, 82: 1805-12
3. Ho, D., Boyes, K., Donohoo, S. and Cooper, B., 2003, ‘‘ Numerical floww analysis for spillways’’, 43rd ANCOLD Conference, Hobart, Tasmania.
4. Savage, BM., Johnson, M.C., 201, ‘‘ Flow over ogee Spillway: Physical and numerical model case study’’, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 127(8), 640-649.
5. Tabbara, M., Chatila, J., Awwad, R., 2005, ‘‘ Computational simulation of flow over stepped spillways’’, Comput Struct, 83: 2215-2224.
6. Behr, M., 2001, ‘‘ Stabilized space-time finite element formulations for free- surface flowws’’, Communications in numerical Methods in engineering, 17: 813-819, Houston, USA.
7. Nguyen, V.T., Nestmann, F., 2004, ‘‘ Applications of CFD in hydraulics and river engineering’’, International Journal of Computational Fluid Dynamics, vol. 18(2), pp. 165-174, Germany.
8. Çelik, F., Güner, M., 2005, ‘‘ Computational Fluid Dynamics (CFD) application for ducted propeller’’, Journal of Engineering and Natural Sciences, syf. 127-136, İstanbul.
9. Dr. Şentürk, Fuat, 1988, ‘‘Barajların Projelendirilmesinde Hidrolik Hesaplar’’, T.C. Bayındırlık ve İşkan Bakanlığı DSİ, Ankara.
10. Maitre R., 1960, ‘‘ Note surles Depressions aux Ouvertures Partielles des Vannes Dans les Evavuatorours DEversant et de Position des Vannes’’, Labo, National d’Hydrauliquede Chatoux.
11. Chow, V.T., 1959, ‘‘open channel hydroulics’’, Mc Graw-Hill Book Comp.
12. Scimemi, E., 1937, ‘‘ It Preofilo dele Dighe Sfioronti’’, Energia Elettica.
13. Brudenell, R.N., 1935, ‘‘ Flow over Rounded Grests’’, Engineering News Records, V.115, NO.3
14. Laeufer, 1936, ‘‘ Ecoulement dans les Canaux a Radier Incurves’’, Wassakraft und Wasser witschaft, Fransızca çeviri.
15. Fluent CFD yazılımı Yardım menüsü
16. www.Fluent.comT
17. Aydın, M.C., 2005, ‘‘Altan Alışlı Dolusavak havalandırıcıların CFD Aanalizi’’, T.C. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 141.