

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜM HAVUZLARINA YERLEŞTİRİLEN
FARKLI TİP ENERJİ KIRICI BLOKLARIN ENERJİ
SÖNÜMLEME ORANLARININ
SAYISAL ANALİZİ**

Şule VAROL

Tez Yöneticisi
Yrd. Doç. Dr. Nihat KAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ELAZIĞ, 2007

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜM HAVUZLARINA YERLEŞTİRİLEN
FARKLI TİP ENERJİ KIRICI BLOKLARIN ENERJİ
SÖNÜMLEME ORANLARININ
SAYISAL ANALİZİ**

Şule VAROL

Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Bu tez, 24.01.08 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Nihat KAYA

Üye: Doç. Dr. M. Emin EMİROĞLU

Üye: Yrd. Doç. Dr. Haydar EREN

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

TEŐEKKÖR

Tezimi hazırlamamda ve çalıőmalarım esnasında, bana her türlü konuda yardımcı olan danışman hocam Sayın *Yrd. Doç. Dr. Nihat KAYA'ya*, Fluent programı ile ilgili bilgilerini esirgemeyen *İnşaat Y. Mühendisi Seçkin AYDIN'a (DSİ 21. Bölge Müdürlüğü/AYDIN)* ve değerli arkadaşım *İnşaat Y. Mühendisi Mücella ÖZDEM'e (Adıyaman Üniversitesi)*, gerekli bilgi ve dökümana ulaşmamda yardımcı olan *DSİ 9.Bölge Müdürlüğü (ELAZIĞ) ve DSİ 12. Bölge Müdürlüğü (KAYSERİ)'ne* teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca, çalıőmalarım süresince bana destek olan sevgili *aileme* sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

őüle VAROL

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	III
TABLOLAR LİSTESİ	VIII
SİMGELER LİSTESİ	IX
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ	1
2. CFD ANALİZİ İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR	3
3. ENERJİ KIRICI YAPILAR	5
3.1. Hidrolik Sıçrama	5
3.1.1. Sıçrama Derinliği	5
3.1.2. Sıçramanın Uzunluğu	7
3.1.2.1. Sıçrama uzunluğunu veren ampirik formüller	7
3.1.2.2. Sıçrama uzunluğunu veren deneysel diyagramlar	9
3.1.3. Sıçrama Sırasında Yer Alan Yük Kayıpları	10
3.1.4. Sıçrama Şekilleri	12
3.2. Düşüm Havuzları	13
3.2.1. Enerji Kırıcı Havuz Elemanları	18
3.2.1.1. Şut blokları	19
3.2.1.2. Enerji kırıcı bloklar	19
3.2.1.3. Çıkış eşikleri	19
3.3. Havaya Fırlatmalı Enerji Kırıcılar	20
3.4. Yuvarlak Uçlu Enerji Kırıcılar	22
3.5. Çarpmalı Havuz Tipi	23
3.6. Batık Göl Tipi	24
3.7. Serbest Düşümlü Akımlarda Enerji Kırıcılar	26
3.7.1. Dikdörtgen Havuz Tipi	26
3.7.2. Çarpma Engelli Tip	26
3.7.3. Dişli Izgara Tipi	26
3.8. Basıncılı Çıkışlar İçin Enerji Kırıcılar	26
3.8.1. Serbest Jet Tipi	27
3.8.2. Sakinleştirme Kuyuları	27
3.9. SAF (St. Antony Falls) Tipi Düşüm Havuzu	27

4.CFD YAZILIMLARI.....	30
4.1. Fluent CFD Yazılımı (Fluent v5.3).....	30
4.2. Fluentin Yapısı.....	32
4.3. Fluentin Özellikleri	32
4.4. Fluentte Çok Fazlı Akım Problemlerinin Modellenmesi (Multiphase Flows).....	33
4.4.1. Dağınık Faz Modeli (Dispersed Phase Model-DPM)	33
4.4.2. Akışkan Hacmi (Volume of Fluid-VOF) modeli	34
4.4.2.1. Hacim oranı.....	36
4.4.3. Cebirsel Kayma Karışım Modeli (Algebraic Slip Mixture Model-ASMM).....	37
4.4.4. Kavitasyon Model (Cavitation Model)	39
5. MODELLERİN ANALİZİ.....	40
5.1. Çalışmada Kullanılan Enerji Kırıcı Blok Modelleri	42
5.2. Sayısal Modelin Geometrisi.....	46
5.3. Çözüm Parametreleri	47
5.4. k-ε Türbülans Modeli.....	47
5.5. Türbülanslı Akımda Cidar Pürüzlülüğü	47
5.6. Sınır Şartları (Boundary Condition).....	47
5.7. İşletme Durumları (Operating Condition).....	48
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	49
6.1. Hız Grafikleri ve Ölçüm Alınan Yerler.....	49
6.2. Enerji Kırıcı Havuza Ait Faz, Hız ve Basınç Görünümleri	76
6.3. Hız ve Enerji Mukayeseleri.....	100
7. SONUÇLAR.....	102
KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Sıçramanın şeması	5
Şekil 3.2. Sıçramanın memba ve mansap derinliklerini veren eğri.....	7
Şekil 3.3. Memba derinliğinin fonksiyonu olarak sıçrama uzunluğu	9
Şekil 3.4. Mansap derinliğinin fonksiyonu olarak sıçrama uzunluğu.....	9
Şekil 3.5. Sıçramada yer alan yük kaybı.....	10
Şekil 3.6. Sıçramanın karakteristikleri.....	11
Şekil 3.7. Froude sayısına bağlı olarak özgül enerjinin değişimi	11
Şekil 3.8. Değişik sıçrama şekilleri.....	12
Şekil 3.9. USBR IV. Tip düşüm havuzu	14
Şekil 3.10. USBR IV. Tip düşüm havuzunun minimum mansap su derinliği	14
Şekil 3.11. USBR IV. Tip düşüm havuzunun sıçrama uzunluğu.....	14
Şekil 3.12. USBR III. Tip düşüm havuzu	15
Şekil 3.13. USBR III. Tip düşüm havuzunun minimum mansap su derinliği	16
Şekil 3.14. USBR III. Tip düşüm havuzunda blok ve mansap eşiği yüksekliği	16
Şekil 3.15. USBR III. Tip düşüm havuzunda sıçrama yüksekliği	16
Şekil 3.16. USBR II. Tip düşüm havuzu	17
Şekil 3.17. USBR II. Tip düşüm havuzunun minimum mansap su derinliği.....	18
Şekil 3.18. USBR II. Tip Düşüm Havuzunda Sıçrama Uzunluğu	18
Şekil 3.19. Enerji kırıcı havuzdaki elemanların yerleşimi	19
Şekil 3.20. Havaya fırlatmalı enerji kırıcının şematik olarak gösterilişi.....	20
Şekil 3.21. Havaya fırlatmalı enerji kırıcılarda: a)Formülasyon için notasyonlar b) L_1/L_0 oranı ile V_0 arasındaki bağıntı	21
Şekil 3.22. Yuvarlak uçlu enerji kırıcılar : a)Tek parçalı, b)Dişli tip	22
Şekil 3.23. Çarpmalı havuz tipi ve boyutlandırılma kriterleri	25
Şekil 3.24. Sakinleştirme kuyusu örnekleri	27
Şekil 3.25. SAF (St. Antony Falls) Tipi düşü havuzu.....	28
Şekil 4.1. Temel program yapısı.....	32
Şekil 4.2. Dağınık faz modeli	34
Şekil 4.3. Serbest yüzeyli akım modeli	34
Şekil 4.4. Cebirsel kayma karışım modelinin Fluent 5 yazılımında çözümü	37
Şekil 4.5. Kavitasyon modeli.....	39
Şekil 5.1. Enerji kırıcı havuz ve blok boyutları	41
Şekil 5.2. Akımın düşüm havuzundaki hareketi	42

Şekil 5.3. Model 1'in görünümü	42
Şekil 5.4. Model 2'nin görünümü	42
Şekil 5.5. Model 3'ün görünümü	43
Şekil 5.6. Model 4'ün görünümü	43
Şekil 5.7. Model 5'in görünümü	43
Şekil 5.8. Model 6'nın görünümü	44
Şekil 5.9. Model 7'nin görünümü	44
Şekil 5.10. Model 8'in görünümü	44
Şekil 5.11. Model 9'un görünümü	45
Şekil 5.12. Model 10'un görünümü	45
Şekil 5.13. Model 11'in görünümü	45
Şekil 5.14. Meshli görüntü.....	46
Şekil 6.1. Model 1 için ölçümlerin alındığı noktalar	49
Şekil 6.2. KM:0+320,64'te ölçülen hız değerlerinin su yüksekliği ile olan değişimi	50
Şekil 6.3. KM:0+353,64'te ölçülen hız değerlerinin su yüksekliği ile olan değişimi	50
Şekil 6.4. KM:0+379,33'te ölçülen hız değerlerinin su yüksekliği ile olan değişimi	50
Şekil 6.5. Bloksuz düşüm havuzunun görünümü ve ölçüm alınan noktalar	52
Şekil 6.6. Bloksuz düşüm havuzuna ait memba hız grafiği	53
Şekil 6.7. Bloksuz düşüm havuzuna ait mansap hız grafiği.....	53
Şekil 6.8. Model 1'in görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar	54
Şekil 6.9. Model 1'in memba hız grafiği	55
Şekil 6.10. Model 1'in mansap hız grafiği.....	55
Şekil 6.11. Model 2'nin görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar	56
Şekil 6.12. Model 2'nin memba hız grafiği	57
Şekil 6.13. Model 2'nin mansap hız grafiği.....	57
Şekil 6.14. Model 3'ün görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar	58
Şekil 6.15. Model 3'ün memba hız grafiği	59
Şekil 6.16. Model 3'ün mansap hız grafiği.....	59
Şekil 6.17. Model 4'ün görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar	60
Şekil 6.18. Model 4'ün memba hız grafiği	61
Şekil 6.19. Model 4'ün mansap hız grafiği.....	61
Şekil 6.20. Model 5'in görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar	62
Şekil 6.21. Model 5'in memba hız grafiği	63
Şekil 6.22. Model 5'in mansap hız grafiği.....	63
Şekil 6.23. Model 6'nın görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar	64

Şekil 6.24. Model 6'nın memba hız grafiği	65
Şekil 6.25. Model 6'nın mansap hız grafiği.....	65
Şekil 6.26. Model 7'nin görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar	66
Şekil 6.27. Model 7'nin memba hız grafiği	67
Şekil 6.28. Model 7'nin mansap hız grafiği.....	67
Şekil 6.29. Model 8'in görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar	68
Şekil 6.30. Model 8'in memba hız grafiği	69
Şekil 6.31. Model 8'in mansap hız grafiği.....	69
Şekil 6.32. Model 9'un görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar	70
Şekil 6.33. Model 9'un memba hız grafiği	71
Şekil 6.34. Model 9'un mansap hız grafiği.....	71
Şekil 6.35. Model 10'un görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar	72
Şekil 6.36. Model 10'un memba hız grafiği	73
Şekil 6.37. Model 10'un mansap hız grafiği.....	73
Şekil 6.38. Model 11'in görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar	74
Şekil 6.39. Model 11'in memba hız grafiği	75
Şekil 6.40. Model 11'un mansap hız grafiği.....	75
Şekil 6.41. Model 1'e ait faz görünümü	76
Şekil 6.42. Model 2'ye ait faz görünümü	76
Şekil 6.43. Model 3'e ait faz görünümü	77
Şekil 6.44. Model 4'e ait faz görünümü	77
Şekil 6.45. Model 5'e ait faz görünümü	77
Şekil 6.46. Model 6'ya ait faz görünümü	78
Şekil 6.47. Model 7'ye ait faz görünümü	78
Şekil 6.48. Model 8'e ait faz görünümü	78
Şekil 6.49. Model 9'a ait faz görünümü	79
Şekil 6.50. Model 10'a ait faz görünümü	79
Şekil 6.51. Model 11'e ait faz görünümü	79
Şekil 6.52. Bloksuz havuza ait faz görünümü.....	80
Şekil 6.53. Model 1'e ait hız görünümü	80
Şekil 6.54. Model 2'ye ait hız görünümü	81
Şekil 6.55. Model 3'e ait hız görünümü	81
Şekil 6.56. Model 4'e ait hız görünümü	81
Şekil 6.57. Model 5'e ait hız görünümü	82
Şekil 6.58. Model 6'ya ait hız görünümü	82

Şekil 6.59. Model 7'ye ait hız görünümü	82
Şekil 6.60. Model 8'e ait hız görünümü	83
Şekil 6.61. Model 9'a ait hız görünümü	83
Şekil 6.62. Model 10'a ait hız görünümü	83
Şekil 6.63. Model 11'e ait hız görünümü	84
Şekil 6.64. Bloksuz havuza ait hız görünümü.....	84
Şekil 6.65. Model 1'e ait toplam basınç görünümü	85
Şekil 6.66. Model 2'ye ait toplam basınç görünümü	85
Şekil 6.67. Model 3'e ait toplam basınç görünümü	85
Şekil 6.68. Model 4'e ait toplam basınç görünümü	86
Şekil 6.69. Model 5'e ait toplam basınç görünümü	86
Şekil 6.70. Model 6'ya ait toplam basınç görünümü	86
Şekil 6.71. Model 7'ye ait toplam basınç görünümü	87
Şekil 6.72. Model 8'e ait toplam basınç görünümü	87
Şekil 6.73. Model 9'a ait toplam basınç görünümü	87
Şekil 6.74. Model 10'a ait toplam basınç görünümü	88
Şekil 6.75. Model 11'a ait toplam basınç görünümü	88
Şekil 6.76. Bloksuz havuza ait toplam basınç görünümü	88
Şekil 6.77. Model 1'deki bloğa ait dinamik basınç görünümü	89
Şekil 6.78. Model 1'e ait dinamik basınç grafiği.....	89
Şekil 6.79. Model 2'deki bloğa ait dinamik basınç görünümü	90
Şekil 6.80. Model 2'ye ait dinamik basınç grafiği.....	90
Şekil 6.81. Model 3'deki bloğa ait dinamik basınç görünümü	91
Şekil 6.82. Model 3'e ait dinamik basınç grafiği.....	91
Şekil 6.83. Model 4'deki bloğa ait dinamik basınç görünümü	92
Şekil 6.84. Model 4'e ait dinamik basınç grafiği.....	92
Şekil 6.85. Model 5'deki bloğa ait dinamik basınç görünümü	93
Şekil 6.86. Model 5'e ait dinamik basınç grafiği.....	93
Şekil 6.87. Model 6'daki bloğa ait dinamik basınç görünümü	94
Şekil 6.88. Model 6'ya ait dinamik basınç grafiği.....	94
Şekil 6.89. Model 7'deki bloğa ait dinamik basınç görünümü	95
Şekil 6.90. Model 7'ye ait dinamik basınç grafiği.....	95
Şekil 6.91. Model 8'deki bloğa ait dinamik basınç görünümü	96
Şekil 6.92. Model 8'e ait dinamik basınç grafiği.....	96
Şekil 6.93. Model 9'daki bloğa ait dinamik basınç görünümü	97

Şekil 6.94. Model 9’a ait dinamik basınç grafiği	97
Şekil 6.95. Model 10’daki bloğa ait dinamik basınç görünümü	98
Şekil 6.96. Model 10’a ait dinamik basınç grafiği	98
Şekil 6.97. Model 11’deki bloğa ait dinamik basınç görünümü	99
Şekil 6.98. Model 11’e ait dinamik basınç grafiği	99
Şekil 6.99. Modellere ait enerji sönümleme oranları grafiği	100

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 6.1. Alibey Barajı dolusavak hesapları sonucu ile Fluent programı ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması	51
Tablo 6.2. Modellere ait hız ve enerji mukayeseleri	100

SİMGELERİN LİSTESİ

A	: Blokların mansap tarafındaki yüzeylerin alanı (m^2).
B	: Çarpmalı havuz tipinde havuz genişliği (m).
c	: SAF düşüm havuzunun uzunluğu (m).
C_{ks}	: Pürüzlülük sabiti
d_1	: Sıçramadan önceki derinlik (m).
d_2	: Sıçramadan sonraki derinlik (m).
E_1	: Sıçramadan önceki akımın enerji yüksekliği (m).
E_2	: Sıçramadan sonraki akımın enerji yüksekliği (m).
ϵ_k	: k fazın hacim oranı
ϵ_2	: İkincil fazın hacim oranı
F	: Kuvvet (t/m^2).
F	: Froude sayısı.
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2).
H	: Kapak arkasındaki su yüksekliği (m).
H_p	: Hava payı (m).
h	: Çarpmalı havuz tipinde havuz girişindeki su yüksekliği (m).
h	: Fırlatmalı enerji kırıcılarda saptırıcı ucun çıkışındaki su derinliği (m).
h_v	: Fırlatmalı enerji kırıcılarda fırlatma ucundaki su derinliği (m).
h_{kr}	: Kritik akım derinliği (m).
h_1	: Kapaktan sonraki akım yüksekliği (m).
h_2	: Hidrolik sıçrama yüksekliği (m).
h_2'	: SAF düşüm havuzundan sonraki akım yüksekliği (m).
h_3	: Enerji kırıcı blok yüksekliği (m).
h_4	: Eşik yüksekliği (m).
(h_1+h_{v1})	: Havuza giren suyun spesifik enerjisi (m).
j_t	: Kanalin taban eğimi.
k_s	: Pürüzlülük yüksekliği (m)
K	: Yüzey eğriliği
K	: Fırlatmalı enerji kırıcılarda bir katsayı.
L	: Hidrolik sıçrama uzunluğu (m).
L	: Düşüm havuzu uzunluğu (m).
L_0	: Fırlatmalı enerji kırıcılarda suyun teorik fırlatma uzaklığı (m).
L_1	: Fırlatmalı enerji kırıcılarda hava dirençli suyun fırlatma uzaklığı (m).

L_{II}	: Düşüm havuzu uzunluğu (m).
N	: Güç (kg.m/s).
n	: Akışkan sayısı
P	: Blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde oluşan dinamik basınç (Pa).
P	: Fırlatmalı enerji kırıcılarında tabanda oluşan dinamik basınç.
Q	: Debi (m^3/s).
q	: Birim debi (m^3/s).
R	: Fırlatmalı enerji kırıcılarında fırlatma yüzeyinin eğrilik yarıçapı (m).
S_{rk}	: Kaynak terimi
U_i	: Hız vektörleri
u_m	: Karışımın ortalama hızı (m/s).
u_{dk}	: Sürüklenme hızları (m/s).
v_1	: Kapaktan sonraki akımın hızı (m/s).
V_0	: Fırlatmalı enerji kırıcılarında su jetinin ilk çıkış hızı (m/s).
V	: Çarpmalı havuz tipinde havuz girişindeki suyun hızı (m/s).
V_1	: Enerji kırıcı bloklardan önceki hız (m/s).
V_2	: Eşikten sonraki hız (m/s).
X_i	: Yön vektörleri
w	: Şut bloklarında max. dış genişliği.
γ	: Suyun özgül ağırlığı (t/m^3).
θ	: Fırlatmalı enerji kırıcılarında çıkıştaki su jetinin yatayla yaptığı açı.
θ	: Savak sırt eğrisi teğet açısı.
θ_0	: Katı cidarla yüzey teğeti arasındaki ikincil faz içinde ölçülen temas açısı.
Δh	: Çarpmalı havuz tipinde kırılması gereken enerji yüksekliği (m).
σ_s	: Yüzey gerilmesi
ρ_m	: Karışımın yoğunluğu (kg/m^3).
α_k	: k akışkanının hacim oranı.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÜŞÜM HAVUZLARINA YERLEŞTİRİLEN FARKLI TİP ENERJİ KIRICI BLOKLARIN ENERJİ SÖNÜMLEME ORANLARININ SAYISAL ANALİZİ

Şule VAROL

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2007, Sayfa: 103

Bir su yapısında, yüksek hızla çıkan suyun enerjisini kırarak çevredeki yapılara zarar vermeden suyu emniyetli bir şekilde mansaba aktarmak gerekmektedir. Bu amaçla enerji kırıcı düşüm havuzları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, 2,10 m blok yükseklik ve genişliğine sahip farklı geometrilerdeki 11 adet enerji kırıcı bloklardan oluşan ve bir adet de enerji kırıcı bloksuz modelden oluşan, toplam 12 adet model tasarlanmıştır. Tasarlanan modeller, ilkönce üç boyutlu çizim programı olan Gambit programında hazırlanmıştır. Bir CFD yazılımı olan Fluent programına gerekli veriler girilip analizler yapılarak; hız değişimleri, enerji sönmleme oranları ve bloklara etki eden dinamik kuvvetler incelenmiştir. Böylece, tasarlanan modeller arasında akımın enerjisini en fazla kırabilen model de tespit edilmeye çalışılmıştır.

Sonuç olarak, tasarlanan modeller içerisinde enerjiyi en fazla kırabilen modelin, üçgen geometriye sahip olan modelin olduğu (Model 3) ve elde edilen verilerin oldukça memnun edici olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Enerji kırıcı blok, Düşüm havuzu, Hidrolik sıçrama, CFD yazılımı, Fluent, Sayısal analiz.

ABSTRACT

Master Thesis

NUMERICAL ANALYSIS OF ENERGY DISSIPATION RATIOS OF DIFFERENT TYPE ENERGY DISSIPATOR BLOCKS IN STILLING BASINS

Şule VAROL

Firat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

2007, Page: 103

In a hydraulic structure, it is necessary that the energy of water with high velocity must decrease to prevent the damage at the region structures. For this aim, energy dissipated stilling basins is widespreadly used in the application.

In this study, 11 models having different geometries are selected and their dimensions are 2.1 m height and 2.1 m width. In addition to this, for without baffle block stilling basin is also made a model. Thus, sum of model was 12. The first, using three dimensional Gambit drawing program was prepared the models. Then, the Fluent package program has been used for analysis of the velocity variations, energy dissipation and the dynamical forces acting on blocks. Thus, the model that is dissipate the most energy was investigated among the models tested.

As a result, model having triangular geometry (i.e. Model 3) was found that had the best performance among 12 models tested. It was shown that the results obtained are very satisfactory for stilling basin design projects.

Key Words: Baffle block, Stilling basin, Hydraulic jumping, CFD, Fluent, Numerical Analysis.

1. GİRİŞ

Akarsu yapılarının çoğunda yapıdan sonra akarsuya bırakılan ve yüksekten düşen suyun önemli bir miktarda hidrolik enerjisi vardır. Bu enerji akımda yüksek hızlar meydana getirir. Bu yüksek hızlar ise büyük basınç ve sürtünme kuvvetleri meydana getirerek, akarsu yatağında oyulma ve aşınmaya yol açarlar. Bunun sonucu olarak hidrolik yapılar yıkılabilmektedir. Bir su yapısında yüksek hızla çıkan suyun enerjisini kırarak yapıya ve çevredeki yapılara zarar vermeden suyu mansaba aktaran tesisler enerji kırıcı yapılar olarak isimlendirilmektedir. Söz konusu tesisler, literatürde düşüm yatakları, düşüm havuzları ya da sakinleştirme havuzları olarak da geçmektedir.

Enerji kırıcı yapılar, bir sulama kanalında boşaltım kanalından düşen, bir hareketli bağlamanın kapak altından geçen, bir baraj dip savağından boşalan, bir bağlama ya da baraj dolu savağından dökülen ve benzeri durumlarda suyun enerjisini kırmak için kullanılırlar.

Enerji kırıcı yapılar, dolusavakların en son bölümünde yer alan, en önemli elemanlardan birisidir. Bu yapılar, dolusavak iletim kanalı sonunda oldukça yüksek hızlara sahip akışın enerjisini; baraja, dolusavak yapısına, baraj mansabına ve mansap bölgesindeki yerleşim yerlerine zarar vermeyecek şekilde sönmüleyip, akımı sakinleştirmektedirler.

Büyük düşümlerde, özellikle yüksek barajların sularını akıtan dolusavaklarda çok büyük enerjilerin kırılması gerekmektedir. Söz gelişi Atatürk Barajı dolusavağının maksimum taşkın debisi, yani Q_{10000} , değeri $16800 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir. Düşüm yüksekliği 166 m olduğuna göre ortaya çıkacak güç $N=\gamma QH=1000 \times 16800 \times 166=2.7$ milyar kg.m/s olmaktadır. Bu ise yaklaşık 27 milyon kilovat olmaktadır. Bu barajın kurulu gücü 2 milyon kilovat olduğuna göre dolusavaktan boşaltılan suyun oluşturduğu güç, kurulu gücün 13.5 katı kadardır. Başka bir ifade ile burada kırılması gereken enerji, 27 nükleer santral ünitesinin üreteceği enerjiye eşdeğerdir.

Enerji kırıcı yapılar, esas olarak proje yerine bağlı oldukları için bu konuda birçok araştırma yapılmış olmakla birlikte bunların proje standartları henüz tamamlanmamıştır. Bir enerji kırıcının projelendirilmesi topografyanın yanında ana yapı, akım durumu, jeoloji ve ekonomi gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu bakımdan böyle bir yapının kesin projesi hazırlanmadan önce model araştırmaları ile hidrolik çalışmasının incelenmesi gerekir. Enerji kırmada, suyun çarpma, türbülans oluşturma, dağılma meydana getirme veya su ve hava ile sürtünme sağlama şeklindeki ana ilkeler kullanılarak pek çok değişik tipte yapı yapılabilir. Yapılabilecek yapı türlerini yalnız mühendisin hayal gücü ve yapıcının mali imkânları sınırlar. Şüphesiz enerji kırıcıların projelendirilmesi büyük çalışma ve beceri gerektirir [1].

Günümüzde artık deneysel çalışmalar yerini bilgisayara bırakarak CFD (Computational Fluid Dynamics, Hesaplamalı Akışkan Dinamiği) yazılımının kullanılmasını gerektirmektedir.

Bu yazılım, son yıllarda birçok hidrolik yapıların projelendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu paket program, akışkan mekaniği ile ilgili olarak etkin bir şekilde kullanım alanı bulmaktadır. Az hata oluşması, daha kısa zamanda sonuca ulaşması ve ekonomik olması gibi avantajlarından dolayı araştırmacıların CFD yazılımlarına olan ilgisi daha da artmaktadır.

Bu çalışmada, Alibey Barajı enerji kırıcı havuz boyutları kullanılarak, farklı geometrilere sahip enerji kırıcı bloklar üç boyutlu çizim programı olan Gambit programında modellenmiş, bir CFD yazılımı olan Fluent programı ile gerekli veriler girilerek, hız değişimleri ve bloklara etki eden dinamik kuvvetler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalar yapılarak en uygun model tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. CFD ANALİZİ İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Teknolojinin gelişmesiyle beraber çalışmalar bilgisayar ortamında yapılmaya başlanmıştır. Yapılan bu çalışmalarda CFD yazılımları kullanılmaktadır. Bu çalışmalar:

Savge ve Johnson (2001), Ogee dolusavak üzerindeki analizlerle hata oranının çok az olduğunu görmüşlerdir. Yüksek, orta ve düşük akım koşullarında basınç değerlerini karşılaştırmışlardır. Fiziksel modellerle sayısal modeller arasında çok fazla bir farkın olmadığını tespit etmişlerdir [2].

Behr (2001), yaptığı çalışma ile CFD yazılımlarının çalışma prensibinin sonlu elemanlar yöntemi olduğunu açıklamıştır ve bu gibi yazılımlarda Navier-Stokes denklemlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle kullanıldığını belirtmiştir [3].

Ho, Boyes ve diğ. (2003), çalışmalarında dolusavak modellerini ilk olarak iki boyutlu daha sonra da üç boyutlu olarak modelleyip incelemişlerdir. New South Wales'daki Hume Barajı dolusavağı ve Victoria'daki Buffalo Barajı dolusavağını CFD analizi ile çözmüşler ve sonuçları hidrolik model sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır [4].

Chatila ve Tabbara (2004), da çalışmalarında $k-\epsilon$ modelini kullanarak Ogee profilili dolusavağı üç boyutlu olarak modelleyip, savaklar üzerinde farklı su yüklerinde yüzeydeki su profillerinin x ve y koordinatlarını bulup hidrolik modelle elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile serbest yüzeyli akımların karakteristik özelliklerini kolayca belirlemişlerdir [5].

Nguyen ve Nestmann (2004), $k-\epsilon$ modeli ve VOF metodunu kullanarak Avrupa'nın önemli akarsularından olan ve 1320 km uzunluğundaki Rhine akarsuyunu modelleyerek akarsuyun farklı mesafelerinde su derinliklere göre hızını ve türbülans durumunu incelemiştir [6].

Aydın ve diğ. (2005), Kars Barajı yandan alıslı dolusavak teknesinde üç boyutlu analiz uygulaması ile Fluent yazılımında modellerini oluşturmuş ve elde ettikleri verilerle, hidrolik modelle elde edilen verileri karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada sonuçların birbirine yakın değerlerde olduğunu görmüşler ve su yüzeyinde görülen türbülans yoğunluğu dağılımı ve kanal tabanındaki basınç dağılımının rahatlıkla görüldüğünü tespit etmişlerdir [7].

Tabbara ve diğ. (2005), 2004 yılında yaptıkları ogee profilili dolusavak üzerindeki çalışmalarını, ADINA yazılımını kullanarak basamaklı dolusavaklar üzerinde yapmışlardır. Farklı basamak modellerini sunarak basamaklı dolusavak üzerinde akımın karakteristik özelliklerini incelemişlerdir [8].

CFD yazılımları sadece İnşaat Mühendisliği çalışmalarında değil, Makine Mühendisliğindeki birçok çalışmada da kullanılmaktadır.

Çelik ve Güner (2005), nozullu pervaneler için modellerini Gambit programında hazırlamış ve Fluent programını kullanarak çözüme ulaşmışlardır. Bu çalışmalarında hareketli meshleme'yi kullanmışlardır [9].

Yapılan bu çalışmalar, kolaylık ve avantaj sağlaması nedeniyle CFD yazılımlarının kullanılmasının yaygınlaşmasında bir etken olmaktadır.

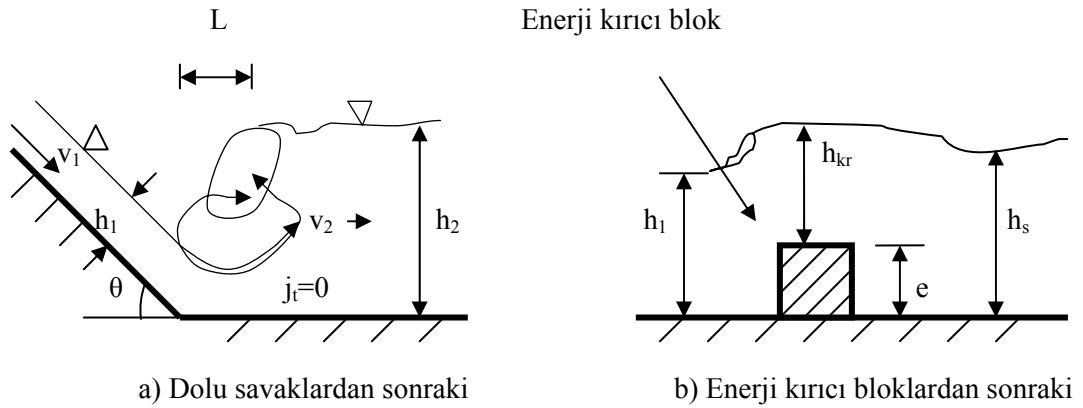
3. ENERJİ KIRICI YAPILAR

3.1. Hidrolik Sıçrama

Hidrolik prensiplerini uygulayarak enerji kaybetmenin en iyi yolu hidrolik sıçramadır. Hidrolik sıçrama, akımın sel rejiminden nehir rejimine geçtiği yerde meydana gelen ve su yüzünde ani bir yükselme oluşturan bir olaydır. Olay sırasında kısa bir mesafede önemli miktarda enerji kaybı ortaya çıktığı için, hidrolik sıçramanın oluşması sağlanarak enerji kırılması yoluna gidilir. Bu şekilde enerji kıran yapılara hidrolik sıçrama havuzları denir. İyi bir hidrolik sıçrama için yan duvarların düşey ve düşeye yakın olması gereklidir.

3.1.1. Sıçrama Derinliği

Sonsuz genişlikteki eğimli bir kanalda yer alan bir akımı inceleyelim (Şekil 3.1)



Şekil 3.1. Sıçramanın şeması

Suyun derinliği h_1 , kanalın taban eğimi j_t , bu eğime tekabül eden açı θ olsun. v_1 hızıyla hareket eden akım yatay tabanlı bir kanala intikal ediyorsa burada çok eskiden beri bilinen bir olay yer alır; su aniden derinliğini arttırır, enerjisini büyük ölçüde kaybeder ve daha yavaş bir akıma geçer. Bu olaya sıçrama olayı denilmektedir. v_1 hızı arttıkça sıçrama mansap yönünde yer değiştirir. Hızın değeri değiştiği kesite kadar gelir (Şekil 3.1.a). Bu çeşit basit bir sıçramada v_1 hızı biliniyorsa h_1 ve h_2 derinlikleri arasındaki orantıyı hesap etmek mümkündür, momentum prensibi uygulanarak

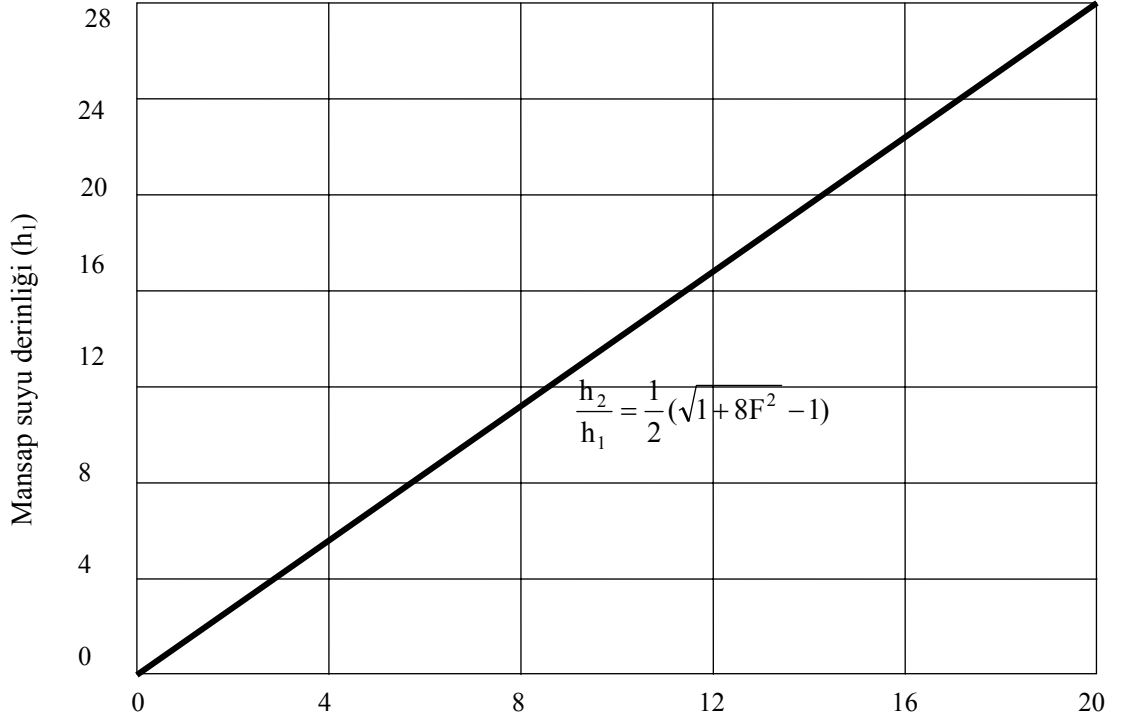
$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1) \quad (3.1)$$

denklemleri elde edilir. Bu sonuç bütün klasikleşmiş hidrolik kitaplarında bulunduğundan burada ayrıca matematiksel yönü üzerinde durulmayacaktır. Şekil 3.1'den görüldüğü gibi h_2 mansap suyu derinliği, h_1 memba suyu derinliği, $F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}}$ Froude sayısı ve v_1 memba kanalındaki suyun hızıdır. Genellikle mansap suyu derinliği bilindiğinden yukarıdaki bağıntıdan h_1 derinliğine geçmek mümkün olur. $h_1 < h_{kr}$ 'dir ($h_{kr} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$).

(3.1) bağıntısı pek çok deney yapılarak irdelenmiştir. Şekil 3.2'de gerek bunlardan bir kısmının sonuçları gerekse (3.1) formülü beraberce gösterilmiştir. Froude sayısının çok küçük değerleri müstesna geri kalan için tatmin edici bir mutabakat vardır. Dolayısıyla $F_1 > 2$ için sıçrama olayını bu yönde incelemek mümkündür. $F_1 < 2$ için temsilci doğru bir eğri parçasına dönüşür.

Görülüyor ki yatay tabanlı bir kanalda sıçramayı oluşturmak suretiyle enerji kaybetmek olanağı vardır. (3.1) numaralı bağıntı sıçramanın derinlikleri hakkında bilgi vermektedir. Bunun yanında bilinmesi gerekli olan hususlar da vardır. Bunlar sırasıyla, sıçramanın uzunluğu ve sıçramada yer alan yük kayıplarıdır.

Şekil 3.1.b'de sıçrama olması için bloktan önceki özgül enerjinin, blok üstündeki min. özgül enerji ve blok yüksekliğinin toplamından küçük olması gerekmektedir.



Şekil 3.2. Sıçramanın memba ve mansap derinliklerini veren eğri

3.1.2. Sıçramanın Uzunluğu

Teorik yollardan sıçramanın uzunluğuna erişmek mümkün değildir. Tavsiye edilen yollar denendiğinde her zaman tatmin edici sonuçlar alınmamaktadır. Gerçekte gerek laboratuarda, gerekse tabiatda sıçramanın boyunu ölçmek oldukça güçtür. Bu bakımdan konu günümüze kadar karanlık kalmaya devam etmiştir. Son senelerde değişik ülkelerde çalışan araştırmacılar birçok ampirik denklemler yayınlamışlar veya grafikler vermişlerdir.

3.1.2.1. Sıçrama uzunluğunu veren ampirik formüller

Sıçramanın uzunluğunu hesaplamakta kullanılan pek çok formül vardır. Bunlardan bir kısmı örnek teşkil etmesi bakımından aşağıda gösterilecektir.

$$\text{Pawlofsky formülü; } \frac{L}{h_2 - h_1} = \frac{2.375(-1 + \sqrt{1 + 8F_1^2}) - 2.5}{0.5(-3 + \sqrt{1 + 8F_1^2})} \quad (3.2)$$

$$\text{Certussov formülü; } \frac{L}{h_2 - h_1} = \frac{20.6(F_1 - 1)^{0.81}}{-3 + \sqrt{1 + F_1^2}} \quad (3.3)$$

Ludin formülü;
$$\frac{h_2 - h_1}{L} = \frac{1}{4.5} - \frac{1}{6F_1} \quad (3.4)$$

Pietrowski formülü;
$$L = 5.9h_1F_1 = 4.33h_2 \quad (3.5)$$

Basitleştirilmiş Einwachter formülü;

$$L = (15.2 - 0.241 \frac{h_2}{h_1}) (Ah_1 - Bv_1^2)$$

$$A = (\frac{h_2}{h_1} - h_1) \quad (3.6)$$

$$B = \frac{\frac{h_2}{h_1} - 1}{(\frac{h_2}{h_1})^2 g}$$

Basitleştirilmiş Woycicki formülü;

$$L = (8 - 0.05 \frac{h_2}{h_1}) (h_2 - h_1) \quad (3.7)$$

Mazmann formülü;
$$L = \frac{(h_2 + h_1)(h_2 - h_1)}{2h_1} \quad (3.8)$$

Bachmeteff formülü;
$$L = (\frac{5.4h_1}{h_2} - 0.06)[(\frac{h_2}{h_1})^2 - 1] \quad (3.9)$$

Safronetz formülü;
$$\frac{L}{h_2 - h_1} = \frac{12}{-3 + \sqrt{1 + 8F_1^2}} \quad (3.10)$$

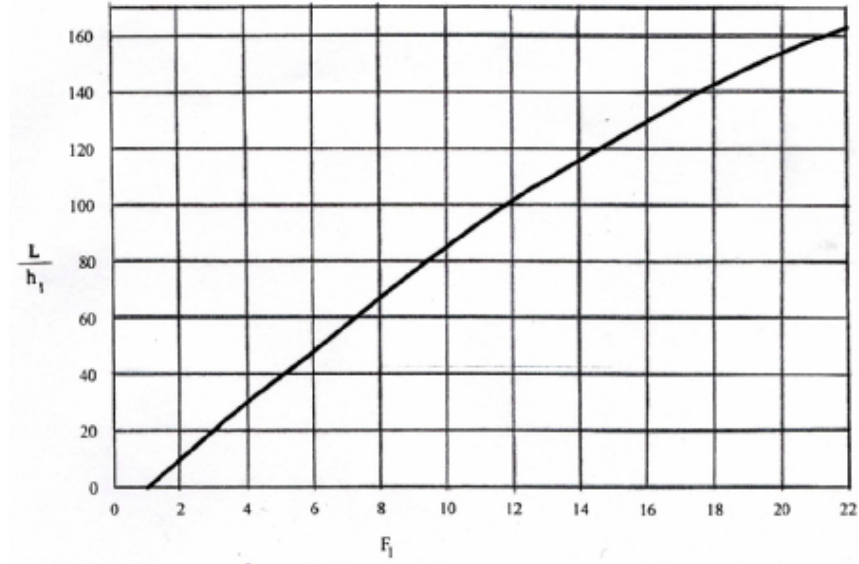
Smetana formülü;
$$\frac{L}{h_2 - h_1} = 6 \text{ veya } L = 4.5h_2 \quad (3.11)$$

Yukarıda yazılan bu bağıntılar daha da arttırılabilir, burada örnek teşkil etmeleri için yazılmıştır. Düşü havuzunun boyunun tespitinde esas sıçrama boyu olacaktır.

3.1.2.2. Sıçrama uzunluğunu veren deneysel diyagramlar

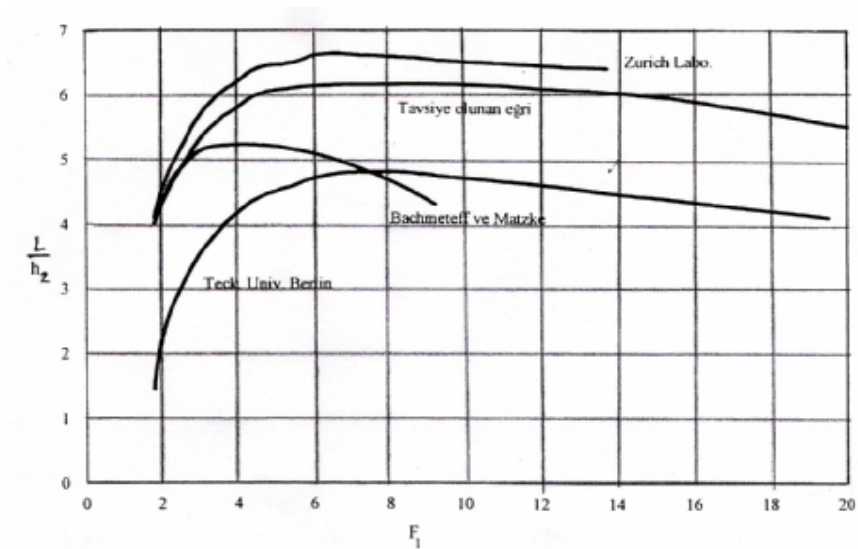
Bu tip diyagramlar daha ziyade Amerikan yayınlarında bulunmaktadır. Şekil 3.3’de

$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gh_1}}$ Froude sayısının fonksiyonu olarak $\frac{L}{h_1}$ gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Memba derinliğinin fonksiyonu olarak sıçrama uzunluğu

Şekil 3.3’te Bachmeteff’in, Berlin Teknik Üniversitesi’nin ve Zürih ETH laboratuvarlarının verdikleri sonuçlar beraberce gösterilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri Bureau of Reclamation’nın sonuçları ise ortalama bir değer olarak görülmektedir.



Şekil 3.4. Mansap derinliğinin fonksiyonu olarak sıçrama uzunluğu

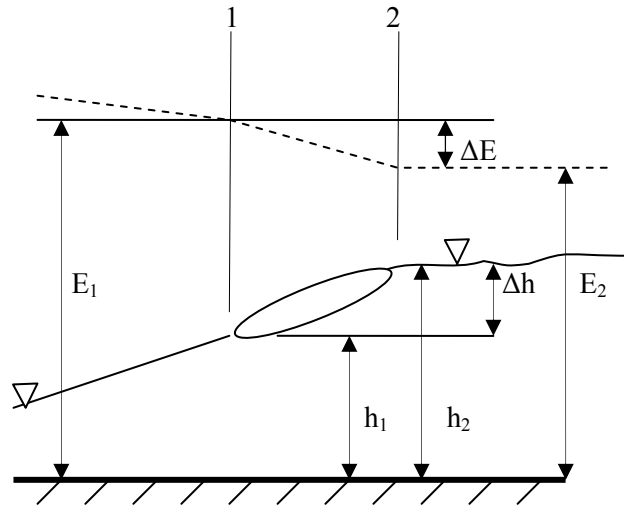
3.1.3. Sıçrama Sırasında Yer Alan Yük Kayıpları

Sıçrama sırasında yer alan yük kayıplarının hesabı, kaybedilecek enerjinin saptanması bakımından önemlidir.

Yatay bir kanalda enerji kaybı bilindiği gibi,

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2} \quad (3.12)$$

bağıntısıyla verilmektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Sıçramada yer alan yük kaybı

Şekil 3.6'da ise yatay bir kanalda yer alan sıçramanın karakteristikleri gösterilmiştir.

$\frac{\Delta E}{E_1}$ orantısının değişimi buradan izlenilebilmektedir.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (3.13)$$

orantısına sıçramanın randımanı ismi verilmiştir.

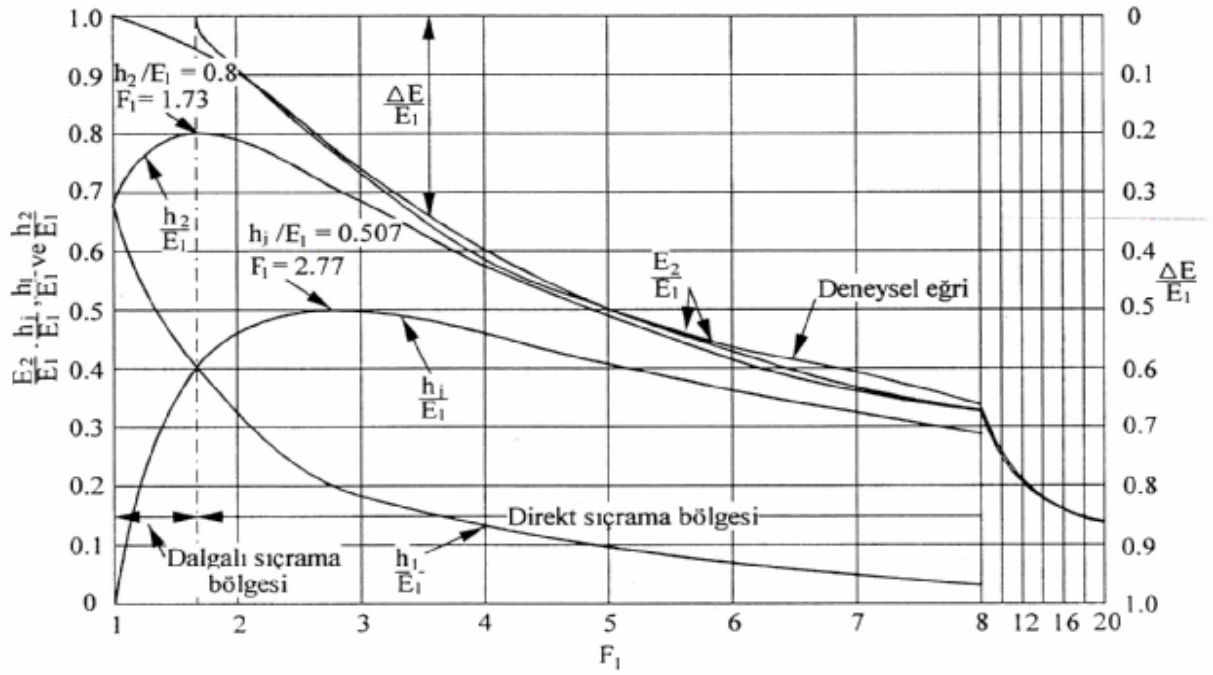
$$\frac{(\Delta h)}{E_1} = \frac{h_2}{E_1} - \frac{h_1}{E_1} \quad (3.14)$$

bağıntısı ise sıçramanın yüksekliğinin sıçramaya giriş enerjisine oranıdır.

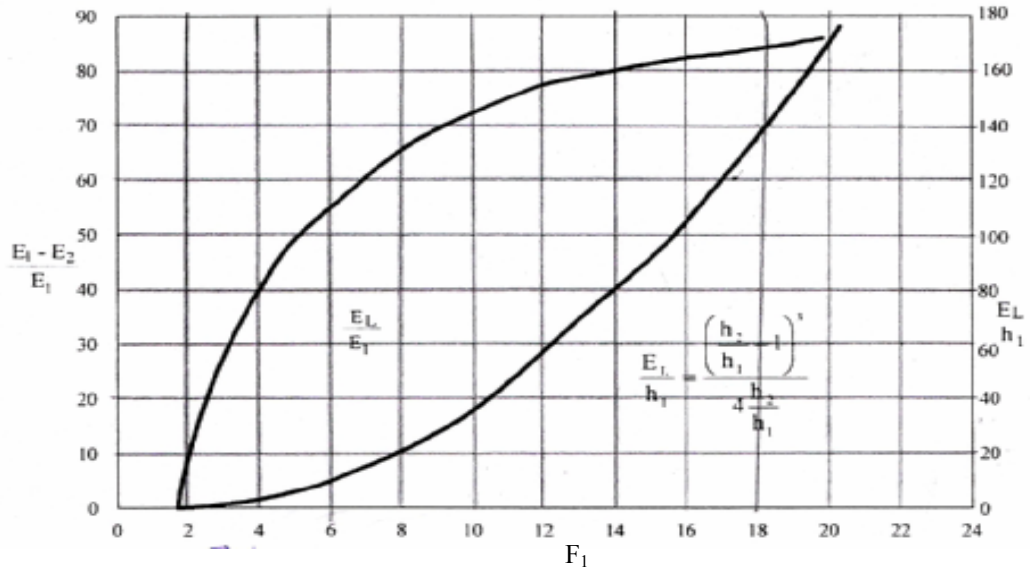
$$\frac{(\Delta h)}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3}{F_1^2 + 2} \quad (3.15)$$

şekli altında boyutsuz hale getirilebilir.

Bu değişik karakteristikler Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekil 3.7 ise $\frac{E_1 - E_2}{E_1}$ oranısının F_1 , Froude sayısına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



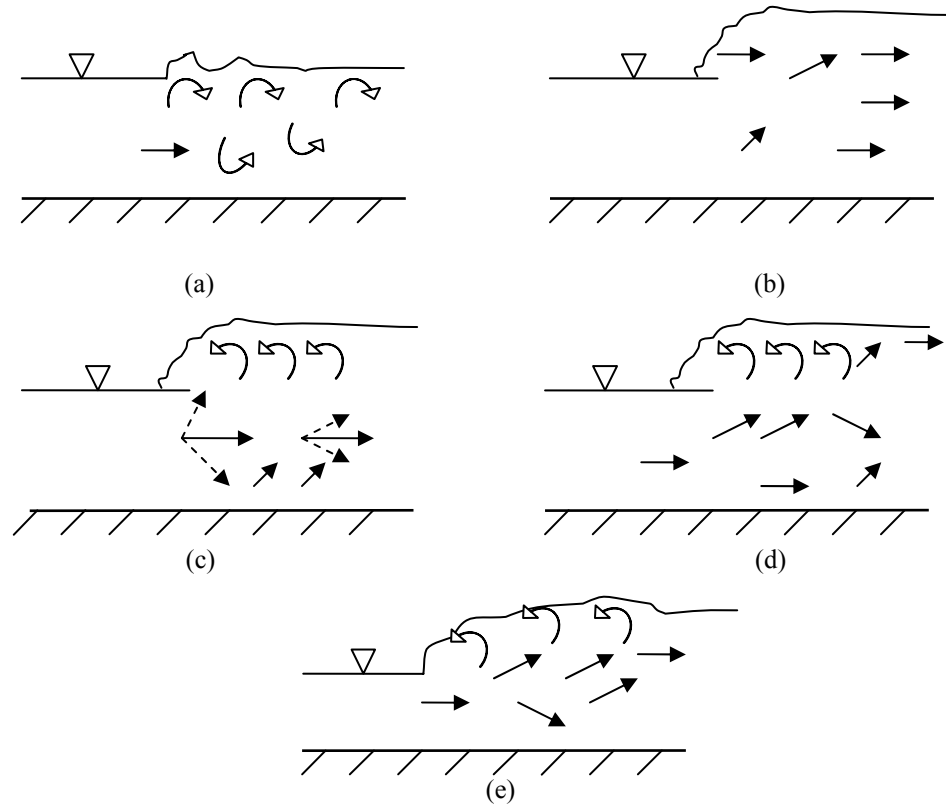
Şekil 3.6. Sıçramanın karakteristikleri



Şekil 3.7. Froude sayısına bağlı olarak özgül enerjinin değişimi

3.1.4. Sıçrama Şekilleri

Sıçrama, Froude sayısına göre tarif edilmiştir. Şekil 3.8’de değişik sıçrama şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Değişik sıçrama şekilleri

$F_1=1$ ise akım kritik rejimdedir, sıçrama olmaz.

Şekil 3.8.a’daki sıçramada $1 < F_1 < 1.7$ ’dir. Bu durumda su yüzünde hafif sallantılar vardır ve basit havuzlar ile kontrol altına alınabilen dalgalı sıçramalardır.

Şekil 3.8.b’deki sıçramaya sıçrama öncesi hal ismi verilir. $1.7 < F_1 < 2.5$, zayıf sıçramanın şartıdır ve enerji kaybı az olur. Bu tip sıçramada sıçrama havuzu özellik göstermez.

Şekil 3.8.c’deki sıçramada $2.5 < F_1 < 4.5$ ’dir. Mühendislik alanına giren ilk sıçramadır. Enerji kaybı orta derecededir. Bazı hallerde bir çeşit rezonans doğurduğundan tehlikeli olabilir. Kontrol altına alınması için muntazam mühendislik yapılarına ihtiyaç gösterir.

Şekil 3.8.d’deki sıçramada $4.5 < F_1 < 9.0$ ’dur. Barajların düşü havuzlarında karşılaşılan kuvvetli sıçramaların şartıdır. Mühendislik yapıları yardımıyla kolaylıkla kontrol altına alınabilir.

Şekil 3.8.e’deki sıçramada $F_1 > 9.0$ ’dur. Çok kuvvetli sıçramanın şartıdır. Dikkatle incelenmesi gereken sıçramadır. Bu taktirde sıçratma uçları düşünülebilir [10].

3.2. Düşüm Havuzları

Düşüm havuzları suyun hızını azaltarak enerjiyi kırarlar. Boşaltım kanalından çıkan suyun saptırma dişleri, çıkış eşikleri, çıkış dişleri ve ortada çarpma blokları kullanılmak suretiyle hidrolik sıçramayla enerjisinin kırıldığı havuzlardır. Aşağıda sıçramadan önceki akımın Froude sayısına göre düşüm havuzlarının sınıflandırılması yapılmıştır [11].

1) Froude sayısı 1.7'den küçük ise;

Froude sayısı 1.7'den küçük olduğu zaman eşlenik sıçrama derinliği h_2 , yaklaşım derinliğinin hemen hemen iki katına eşit veya kritik derinlikten %40 kadar büyüktür. Çıkış hızı v_2 , yaklaşım hızının aşağı yukarı yarısına eşit veya kritik hızdan %30 kadar daha azdır. Kanal kaplaması uzunluğu, derinliğinin değişmeye başladığı noktadan itibaren $4h_2$ 'den küçük değilse ve gelen akımın Froude sayısı 1.7'den küçükse akımı sakinleştirecek düşü havuzuna ve enerji kırıcı bloklara gerek yoktur. Bu tip US Bureau of Reclamation tarafından USBR I. Tip olarak standartlaştırılmıştır.

2) Froude sayısı 1.7 ile 2.5 arasında ise;

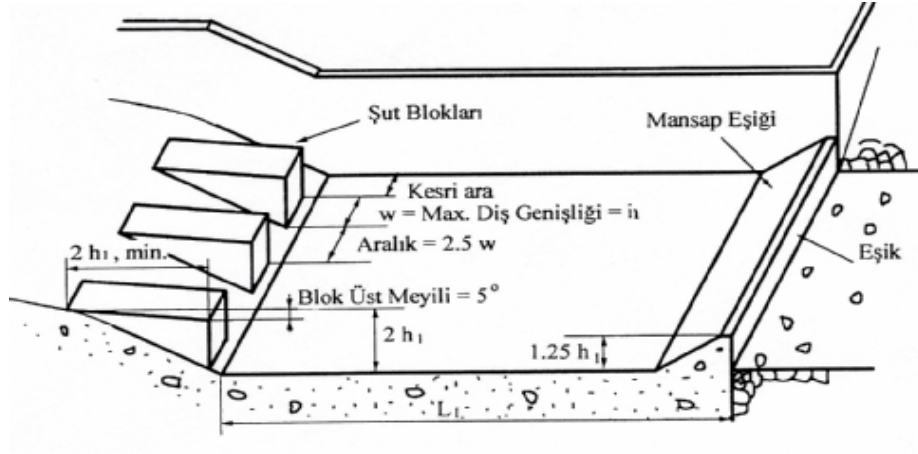
Froude sayısı 1.7 ile 2.5 arasında iken akım Şekil 3.8.b'de görüldüğü gibi sıçrama öncesi hal şeklinde olur. Bu tip akımlarda etkin türbülans olmadığı için eşik ve enerji kırıcı bloklara gerek yoktur. Bu durum sıçrama öncesi safhasıdır. Burada da havuz tipi USBR I. Tip şeklinde düzenlenir.

3) Froude sayısı 2.5 ile 4.5 arasında ise;

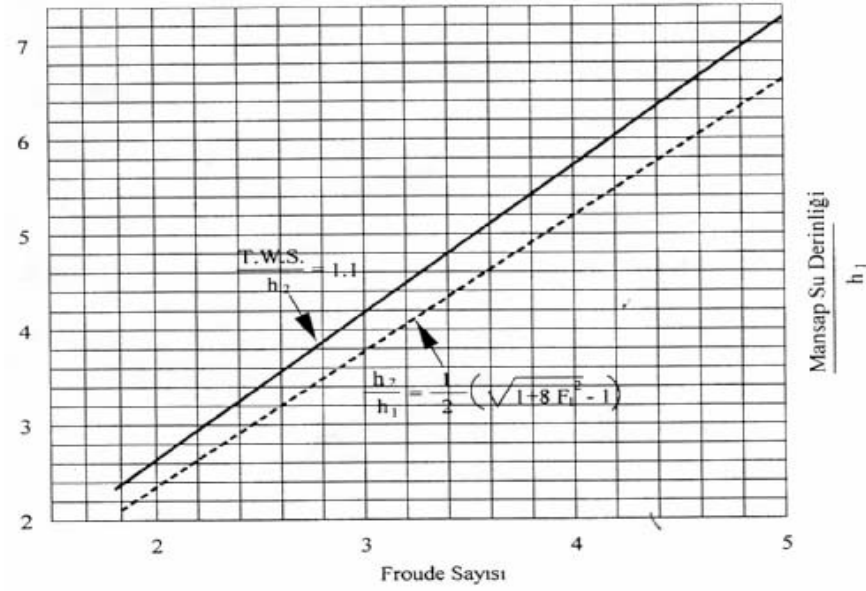
Froude sayısı 2.5 ile 4.5 arasında iken tam bir hidrolik sıçrama gelmediği için geçiş akım safhasına tekabül eder, mevcut dalga hareketi düz döşemeli dinlenme havuz tertibatı ile kontrol edilemediği için enerji kırılmasında en az etkili olanıdır. Dalgalar havuz sonunun ötesinde de etkisini gösterdiği için havuzdan ayrı tertiplerle dalgaların enerjisini kırmak gerekmektedir.

Froude sayısı 2.5 ile 4.5 arasında iken akımı sakinleştirici bir tertip gerekli olduğu zaman Şekil 3.9'da gösterilen USBR IV.Tip kullanılmaktadır. Bu tipin, akım enerjisinin büyük bir kısmını kırmada, düz döşemeli havuza nazaran daha tesirli olduğu görülmüştür. Bununla birlikte salınan akımın meydana getirdiği dalga hareketi tamamıyla sönmelenemez.

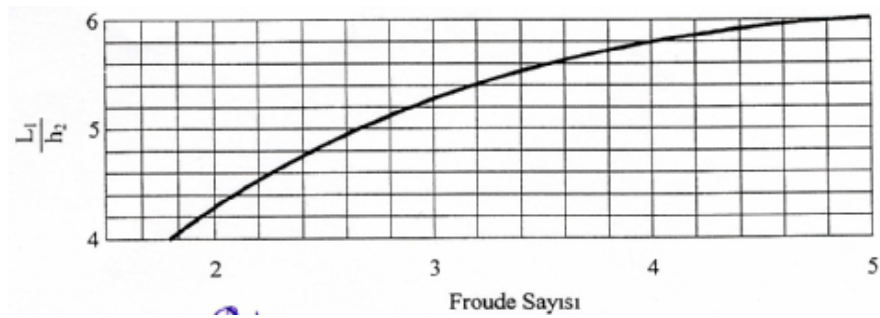
Mansap su seviyesini düzleştirmek için, bazen yardımcı enerji kırıcı bloklara ihtiyaç vardır.



Şekil 3.9. USBR IV. Tip düşüm havuzu



Şekil 3.10. USBR IV. Tip düşüm havuzunun minimum mansap su derinliği



Şekil 3.11. USBR IV. Tip düşüm havuzunun sıçrama uzunluğu

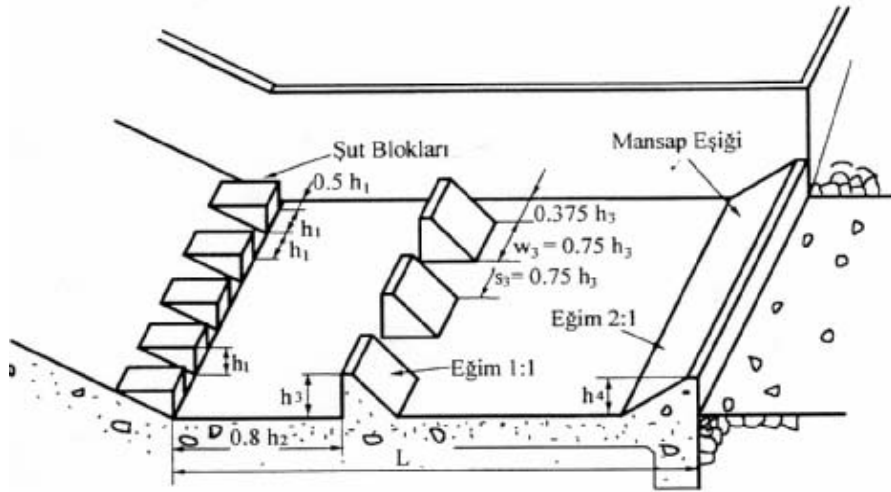
Havuzdaki mansap su derinliği, hesaplanan eşlenik sıçrama derinliğinden %10 fazla olmalıdır. Böylece sıçramanın havuz sınırları içinde olması ve dalga hareketinin kısmen sönümlenmesi sağlanmış olur. IV. Tip havuz kullanılmasından kaçınılmak istenirse havuz genişliği öyle seçilmelidir ki, akım şartları, geçiş akımı alt ve üst sınırlarının dışına çıkmasın.

Fakat havuz genişliğinin seçimi bir hidrolik performans kadar ekonomi meselesidir de.

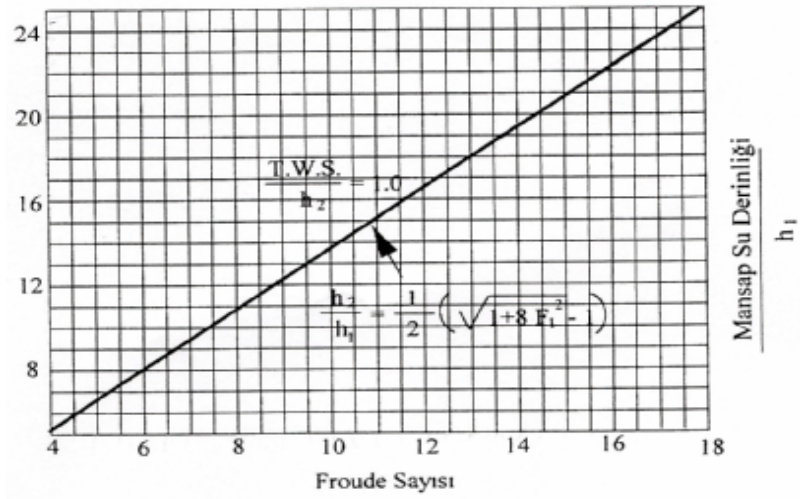
4) Froude sayısı 4.5'den fazla ise

Froude sayısı 4.5'den büyük olduğu zaman gerçek bir sıçrama meydana gelir. Şut blokların, enerji kırıcılar ve eşiklerin havuz tabanı boyunca yapılması, sıçrama uzunluğunu kısalttığı gibi mansap su seviyesinin düşük olduğu durumlarda da sıçramanın mansaba doğru kaymasına karşı bir emniyet katsayısını da temin eder.

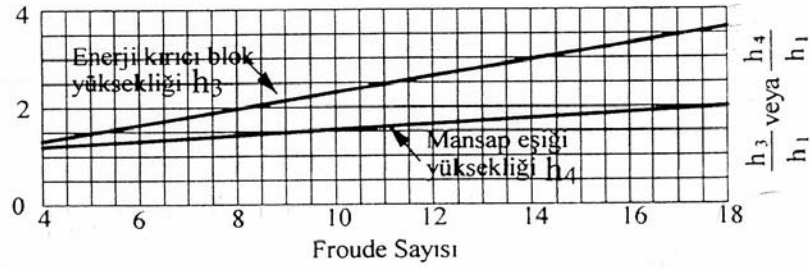
Şekil 3.12'de verilen USBR III. Tip havuz yaklaşım hızının 15 m/sn'den az olduğu durumlarda kullanılabilir. Bu tip havuz sıçrama boyunu kısaltmak ve yüksek hızlı akımın enerjisini kırmak için şut bloklarına, enerji kırıcı bloklara ve mansap eşğine sahiptir. Enerjinin kırılması, enerji kırıcı bloklara ve sıçrama ile meydana gelen türbülansın tesirliğine bağlıdır. III. Tip havuzun kullanılması, hızla gelen akımın enerji kırıcı bloklar üzerinde meydana getireceği çarpma kuvvetinin büyüklüğü, havuz tabanı ve blok yüzeyleri üzerinde kaviteasyon (oyulmanın) meydana gelme ihtimali dolayısıyla yaklaşım hızının 15 m/sn'den az olduğu durumlarla sınırlandırılmıştır.



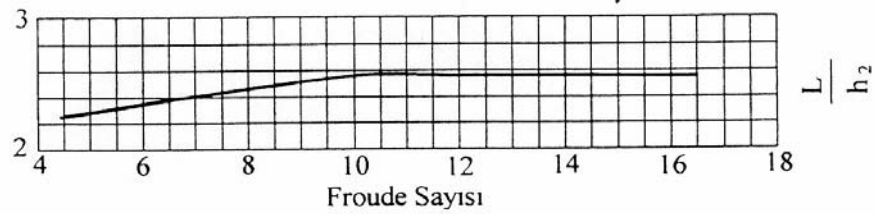
Şekil 3.12. USBR III. Tip düşüm havuzu



Şekil 3.13. USBR III. Tip düşüm havuzunun minimum mansap su derinliği



Şekil 3.14. USBR III. Tip Düşüm havuzunda blok ve mansap eşiği yüksekliği



Şekil 3.15. USBR III. Tip düşüm havuzunda sıçrama yüksekliği

Enerji kırıcı blokların memba tarafındaki yüzlerinde, suyun çarpmasından meydana gelen dinamik kuvvetlerin, havuz tabanında ilave kuvvetler meydana getireceği bilinmelidir. Bu F dinamik kuvveti, yaklaşık olarak, akıma dik bir yüzey üzerinde su jetinin çarpmasından doğan kuvvete eşittir.

$$F = 2\gamma A(h_1 + h_{v1}) \quad (3.16)$$

F: Kuvvet (t/m^2)

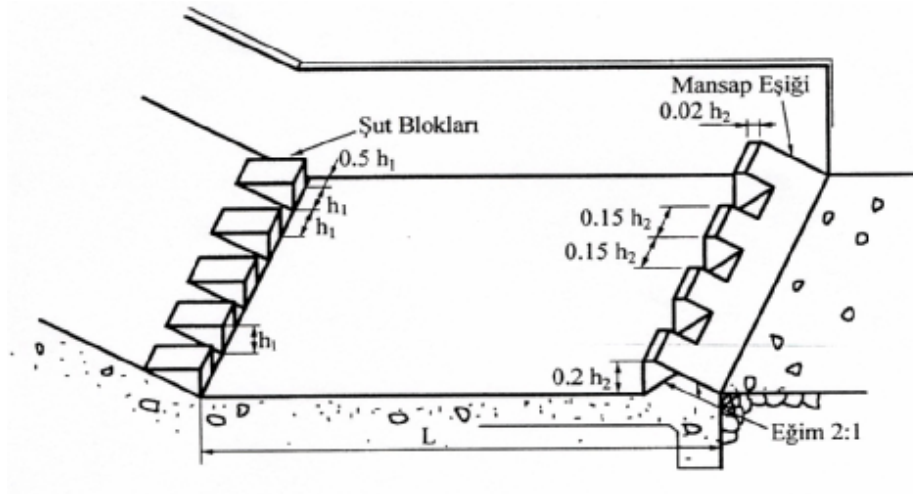
γ : Suyun özgül ağırlığı (t/m^3)

A: Blokların mansap tarafındaki yüzeylerin alanı (m^2)

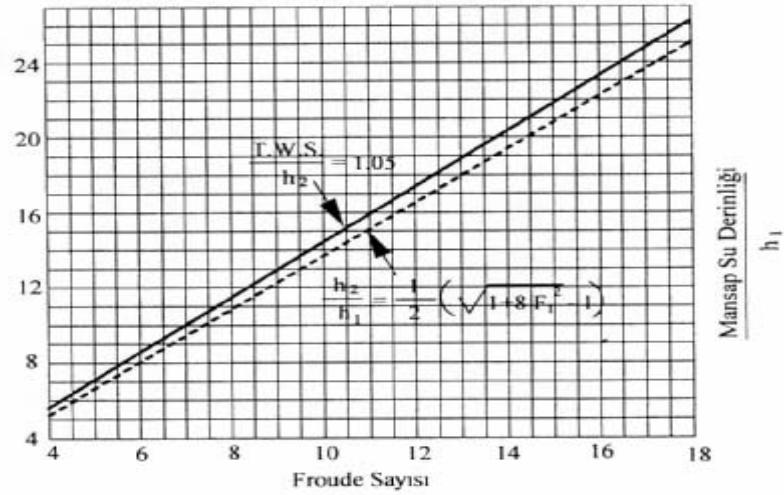
(h_1+h_{v1}) : Havuza giren suyun spesifik enerjisi (m)'dir.

Blokların mansap tarafındaki yüzlerinde meydana gelen eksi basınç (çekme), toplam kuvveti daha da artırır. Bununla birlikte bloklar sıçramanın başladığı yerden $0.8 h_2$ mesafesinde yapıldığı için gelen su jeti bloklara gelinceye kadar tesirinin bir kısmını kaybeder ve yukarıda (3.16)'da verilen bağıntı değerinden daha az bir kuvvetle bloklara çarpar. F değerini bulmak için (3.16) bağıntısı kullanıldığı zaman eksi basınç değeri ihmal edilebilir.

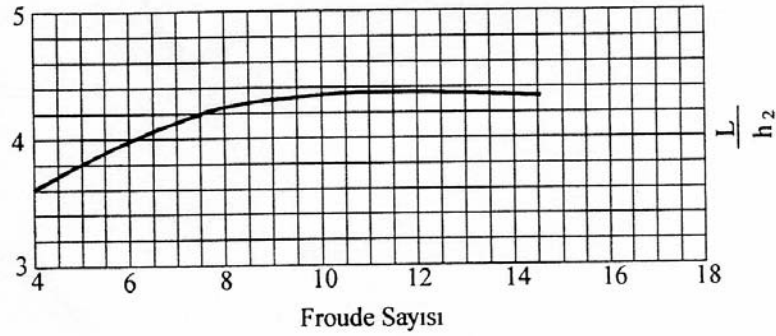
Yaklaşım hızının 15 m/sn 'yi aştığı veya enerji kırıcı blokların yapılmadığı durumlarda Şekil 3.16'da verilen USBR II. Tip havuz kullanılabilir. Enerji kırılması daha ziyade hidrolik sıçrama ile temin edildiğinden II. Tip havuz uzunluğu, III. Tip havuz uzunluğundan büyük olacaktır. Bununla birlikte şut blokları ve dişli mansap eşiğinin bulunması durumunda havuz boyu, şut blokları ve dişli mansap eşiği olmadığı zaman gerekli havuz boyuna nazaran oldukça kısalmaktadır. Bu taktirde sıçramanın havuz dışında meydana gelmesi ihtimalini azaltmak için havuzdaki su derinliği, hesaplanan eşlenik sıçramadan %5 kadar büyük alınmalıdır [1, 11, 12].



Şekil 3.16. USBR II. Tip düşüm havuzu



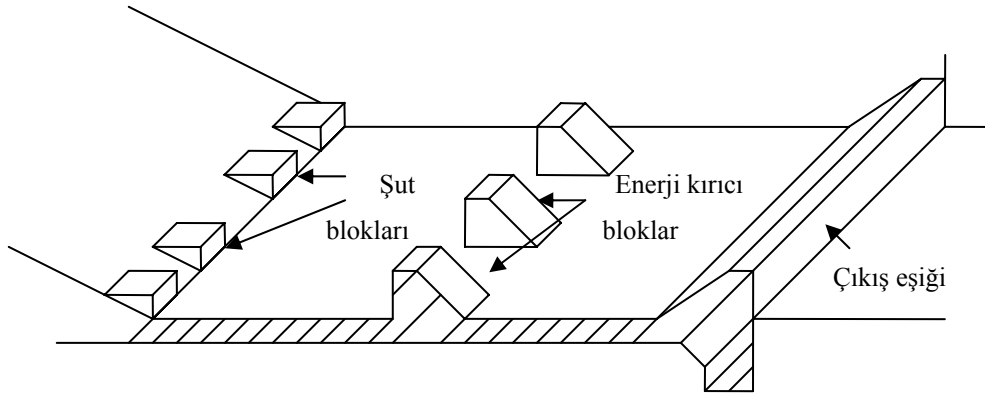
Şekil 3.17. USBR II. Tip Düşüm havuzunun minimum mansap su derinliği



Şekil 3.18. USBR II. Tip düşüm havuzunda sıçrama uzunluğu

3.2.1. Enerji Kırıcı Havuz Elemanları

Bir enerji kırıcı havuzun performansını arttırmaya yardımcı olmak için düşüm engelleri, enerji kırıcı engeller ve çıkış eşikleri yapılır. Ek olarak, onlar akımın dengelenmesinin, türbülansın artışının ve hızın dağılımının bütün bölgede daha düzenli olmasına yardımcı olurlar [13]. Enerji kırıcıların yeni tasarımları eski tasarımlara göre daha iyidir, daha kısa ve sık düşüm havuzlarını ve daha az mansap su derinliğini gerektirir. Böylece daha ekonomik düşüm havuzları inşa edilmiş olur [14]. Şekil 3.19 bir enerji kırıcı havuzda yer alan elemanların genel yerleşimini göstermektedir.



Şekil 3.19. Enerji kırıcı havuzdaki elemanların yerleşimi

3.2.1.1. Şut blokları

Şut blokları akarsu girişinin etkili derinlik artışının olduğu düşü havuzu girişine kurulur. Enerjiyi kırmak için gerekli türbülansı yaratmaya yardımcı olurlar. Akarsular, önemli miktarda aşınma ve çarpma etkisiyle bloklara zarar verebilen sediment, buz, yığıntı taşıdıklarında düşüm engelleri buna karşı koyabilecek durumda olmalıdır.

3.2.1.2. Enerji kırıcı bloklar

Enerji kırıcı engeller, enerji kırıcı havuzlarda enerji kırmaya yardım etmek amacıyla, türbülansın artışını ve sıçrama oluşumunu dengelemek için inşa edilirler.

Düşük akımlar için, enerji kırıcı engeller mansap suyu yetersizliğini karşılamada yardımcı olurlar. Yüksek akımlar için de akımı nehir yatağından uzağa saptırmada yardımcı olurlar [13].

Enerji kırıcı bloklar, akımın aşırı hızını engelleyerek, akım için uygun bir hız sağlarlar. Birçok enerji kırıcı blok yapılmış ve yerinde test edilmiştir. Varolan yapıların bazıları özel yapılar için hazırlanmış hidrolik model testlerinden elde edilerek geliştirilmiştir [15].

3.2.1.3. Çıkış eşikleri

Bir çıkış eşiği enerji kırıcı havuzun mansap sonuna yapılmış düşey, basamaklı, eğimli veya dişli bir duvardır. Çıkış eşiğinin amacı nehir yatağı akımını yükseltmek ve ters akım yaratmaktır. Eşik aynı zamanda akımı dengeler, akımı nehir tabanından uzağa saptırır. Laboratuar çalışmaları eşiğin bölgenin randımanını arttırdığını gösterir.

Enerji kırıcı havuzların tasarımında kullanılan çıkış eşiklerinin 7 tipi mevcuttur; dikdörtgen, trapez, üçgen, Hornsby, Smetana, Schoklitsch ve Rehbock dişli eşikleridir. Rehbock

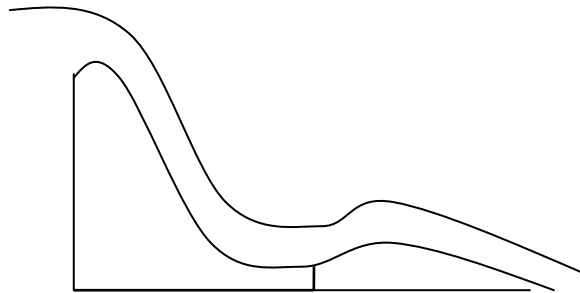
dişli eşiğinin, eşik tipleri arasında en önemli yere sahip olduğu bir takım çalışmalarla kanıtlanmıştır. Özelliği, suyu dişlerin düşey yüzleri tarafından yukarı saptırmak ve eşik altında düz bir taban çevrintisi üretmektir.

Eşiklerin en önemli ölçüsü yükseklikleridir. Eğer, eşik yeterince yüksek değilse, dalga ve kabarma yardımıyla akım kolayca eşikten diğer tarafa geçebilir. Diğer yandan eşik gereğinden fazla yüksekse, hareket içinde şiddetli dönmeler olacaktır ve bu dönüşler bölge içerisinde malzemeleri biriktirecektir [13].

Sıçratmalı enerji kırıcılar oldukça basit ve kolayca tasarlanırlar. Fakat yatak erozyonuna, silt taşınımına ve güç tesislerinde problemlere sebep olabilirler. Bu problemler yeni ve gelişmiş tasarımların yapılmasına olanak sağlar. Yapılan araştırmalar yeni tasarımların eskilere oranla düşü havuzu uzunluğunu %50-60 oranında, havuz derinliğini de %20-40 oranında azalttığını göstermektedir. Ayrıca gelişmiş tasarımlarla daha az mansap oyulması ve üniform bir akım sağlanmış olur. Bu durum şut blokları ve çıkış eşiklerinin yüzeyinde kavitasyon oluşumunu azaltır [14].

3.3. Havaya Fırlatmalı Enerji Kırıcılar

Yapıdan çıkan su, akarsu yatağına ulaşmadan bir saptırıcı eşik vasıtası ile yapıdan yeterince uzağa fırlatılır. Suyun fırlatıldığı yerde ayrı bir düşüm havuzu bulunmamaktadır. Şekil 3.20’de şematik olarak havaya fırlatmalı bir enerji kırıcı gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Havaya fırlatmalı enerji kırıcının şematik olarak gösterilişi

Fırlatılan jetin yörüngesi, eğik atış prensibine göre hesaplanabilir. Havanın direnci ihmal edilerek çıkış hızı ve çıkış açısına bağlı olarak teorik fırlatma uzaklığı

$$L_0 = \frac{V_0^2}{g} \sin 2\theta \quad (3.17)$$

şeklinde yazılabilir. Burada V_0 jetin ilk çıkış hızı, θ ise çıkıştaki suyun yatayla yaptığı açıdır.

Hava direncinden dolayı gerçek fırlatma uzaklığı (L_1) biraz daha küçüktür. Fırlatma hızı 20 m/sn'ye kadar olan hızlarda $L_1/L_0 \approx 1$ alınabilir. Hıza bağlı olarak gerçek uzaklaşma uzunluğunun bulunuşu Şekil 3.21'de gösterilmiştir.

Tam çıkış noktası koordinat eksenini başlangıcı olarak gerçek yörünge denklemi

$$y = x \tan \theta - \frac{x^2}{K[4(h + h_v)\cos^2 \theta]} \quad (3.18)$$

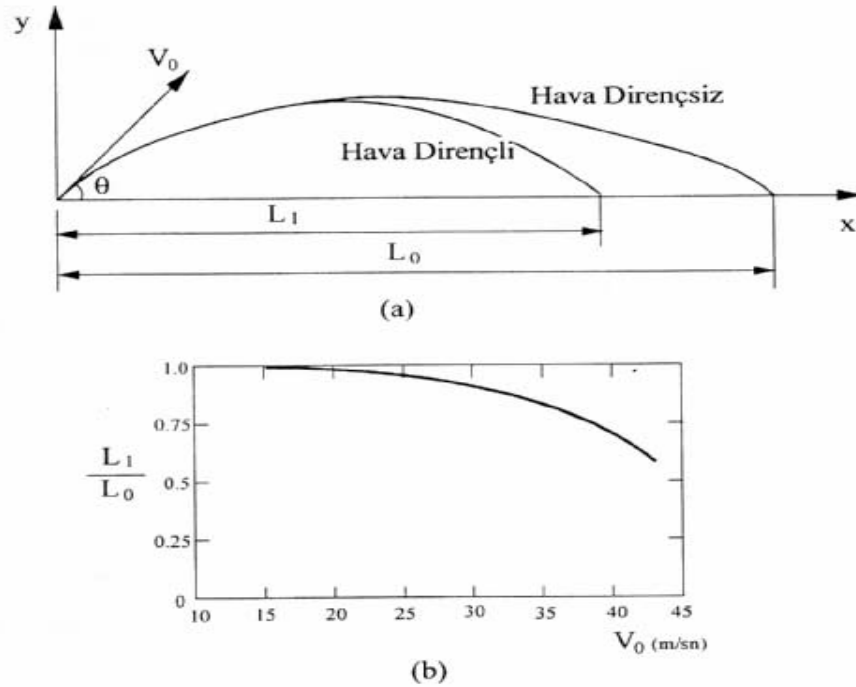
şeklinde yazılır. Burada K bir katsayıdır. Teorik jette bu katsayı 1 olarak alınır. Hava direnci ve iç türbülans kayıplarını karşılamak için $K=0.9$ alınmaktadır. h saptırıcı uçtan çıkıştaki su derinliği, h_v ise aynı noktadaki hız yüksekliğidir.

Çıkış hızında jetin uzaklaşma mesafesi $y=0$ için $x=L_1$ yazılarak ve $2\tan\theta \cos^2\theta$ yerine $\sin 2\theta$ yazılarak

$$L_1 = 2K(h + h_v)\sin 2\theta \quad (3.19)$$

şeklinde yukarıdaki (3.17) bağıntısından biraz farklı bir bağıntı elde edilir. (3.19) bağıntısında h ihmal edilirse (3.17) bağıntısı elde edilir.

45° için L_1 en büyük değerini alır. Bu değer $2K(h+h_v)$ olur. Bununla birlikte çıkış açısı, fırlatma yüzeyinin eğrilik yarıçapına ve onun en alt noktasına göre ucun yüksekliğine de bağlıdır. Genellikle bu açı 30° ile sınırlıdır.



Şekil 3.21. Havaya fırlatmalı enerji kırıcılarında: a) Formülasyon için notasyonlar, b) L_1/L_0 oranı ile V_0 arasındaki bağıntı

Fırlatma yüzeyinin eğrilik yarıçapı $R > 5h$ şartını sağlayacak şekilde belirlenir. Aynı zamanda suyun akışına uyması için minimum eğrilik yarıçapı

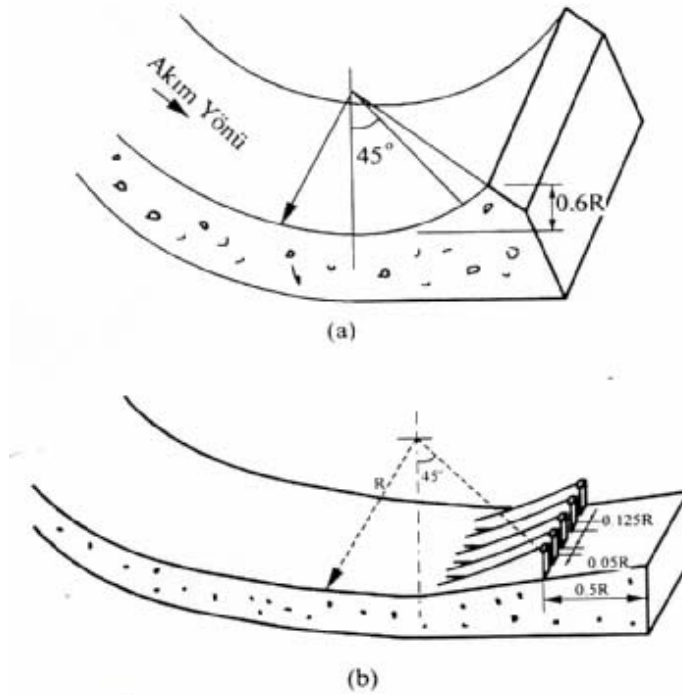
$$R = \frac{2hV^2}{P} \quad (3.20)$$

bağıntısından belirlenebilir. Burada P tabandaki dinamik basınçtır.

Konsol şeklinde yapılan fırlatma yüzeyinin dinamik yükler altında dengesinin kontrol edilmesi gerekir.

3.4. Yuvarlak Uçlu Enerji Kırıcılar

Mansap su derinliği, bir hidrolik sıçrama oluşmayacak kadar çok büyük olan durumlarda batmış halde çalışan yuvarlak uçlu enerji kırıcılar etkili bir şekilde kullanılabilir. Bu enerji kırıcılarda esas olarak iki türlü çevri oluşur. Bunlardan biri yüzeydedir ve saat ibresinin tersine döner. Ötekisi ise tabandadır ve saat ibresi yönünde döner. Bu çevrilerden dolayı bu yapılara bazen çevri yapan enerji kırıcılar denir.



Şekil 3.22. Yuvarlak uçlu enerji kırıcılar: a) Tek parçalı, b) Dişli tip

Şekil 3.22’de görüldüğü gibi iki tip yuvarlak uçlu enerji kırıcı geliştirilmiştir. Bu iki tip arasında bir takım küçük akış farkları vardır.

Tek parçalıda yüksek hızla yuvarlak uçtan çıkan su yukarı yönelir. Bu ise su yüzünde çalkantı meydana getirir. Ayrıca akım tabanda şiddetli çevrilere sebep olur. Bu çevriler tabanda

gevşek halde bulunan malzemeyi yapıya doğru yani yukarı sürükler. Tek parçalı tip genellikle tercih edilmez. Çünkü tabandaki çevriler yuvarlak uç üstüne malzeme sürükler. Bu ise beton yüzeylerinin aşınmasına sebep olur. Ayrıca yüzeyde oluşan çalkantılar daha aşağılara sürüklenerek akarsuyun kenarlarına zarar verebilir.

Dişli tipte ise yüksek hızlı su, yapının ucunu daha yatık olarak terk eder ve bunun yalnız bir kısmı su yüzüne doğru ilerler. Bunun için hem yüzeyde daha az çalkantılar meydana gelir hem de tabanda yavaş bir akım oluşur. Dişli tipte mansap su seviyesi az ise, atılan su, yatağı daha kolay aşıp geçebilir. Ayrıca büyük mansap su seviyelerinde bir takım batmış durumlar ve oyulmalar oluşur. Oysa bu durumlar tek parçalıda yoktur. Sonuç olarak mansap anahtar eğrisinin sınırlamalarının karşılanabildiği durumlarda tek parçalı tip kullanılmamalıdır. Bu bakımdan dişli tip daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Dişli tipin minimum ve maksimum eğrilik yarıçapları Froude sayısına bağlı olarak verilebilir.

3.5. Çarpmalı Havuz Tipi

Bu tip, mansap su derinliğine bağlı olmayan etkili bir enerji kırıcıdır. Böyle bir yapının kapasitesini sadece yapının fizibilitesi veya akımın geliş hızının 18 m/sn'yi geçmiş olması sınırlar. Aslında bu tip bir enerji kırıcı hem açık hem de basınçlı sistemlerde kullanılabilir. Şekil 3.23'de gösterilen tip yaklaşık 11 m³/sn'lik debiler için yeterlidir. Daha büyük debilerde bunlardan birkaç tane yan yana kullanılabilir. Bu sistemde, jetin düşey olarak asılı olan bir engele çarpması ile ve engele çarpan suyun yön değiştirmesi sonucu ortaya çıkan çevrilerle enerji kırılır.

En iyi hidrolik çalışma, mansap su seviyesinin, engel yüksekliğinin yarısında olduğu, fakat bu seviyeyi aşmadığı durumda sağlanır. Ayrıca iyi bir çalışma, engelin tabanı, memba kanal veya borusuyla aynı seviyede tutulmasıyla gerçekleşir.

Şekil 3.23'de çarpmalı havuz tipinin boyutlandırma kriterleri verilmiştir. Bu tipte büyük dinamik yükler ve türbülanslar olduğundan konacak engeller kaymaya karşı dayanıklı olmalıdır. Ayrıca bütün yapı titreşimlere dayanmalıdır. Tesisin sonuna oyulmalara engel olmak için taş dolgu koymak gerekir.

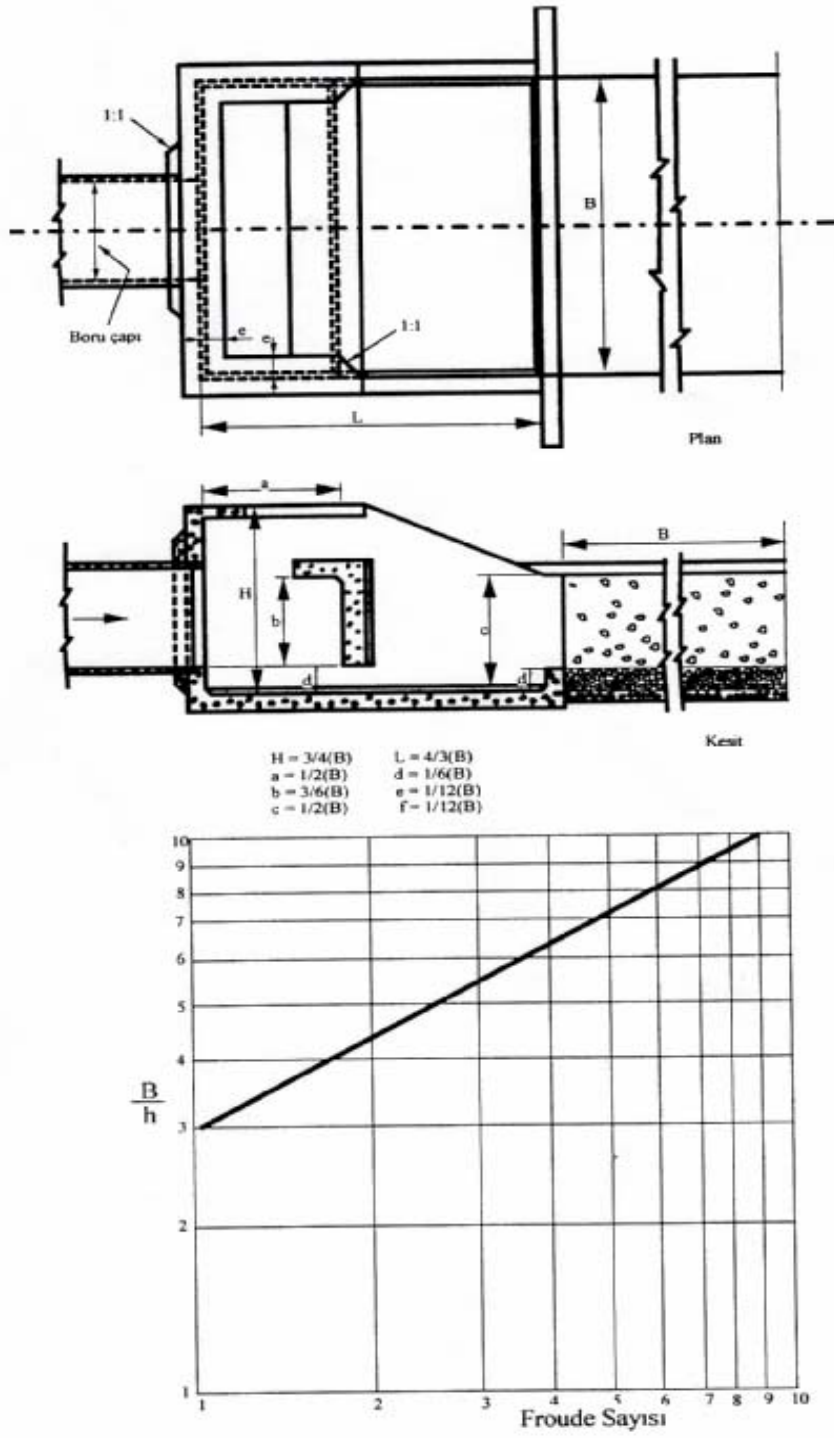
Çarpmalı havuz tipinde boyutlar havuz genişliğine göre belirlenir. B havuz genişliği ise akımın Froude sayısına göre Şekil 3.23'den bulunur. Bu şekildeki h havuza girişteki su derinliğidir. $F = \frac{V}{\sqrt{gh}}$ bağıntısından hesaplanır. V havuza girişteki suyun hızıdır ve teorik olarak $V = \sqrt{2g\Delta h}$ bağıntısından bulunur. Burada Δh kırılması gereken enerji yüksekliğidir. h

ise, boru çıkışında su jeti kare kabul edilerek $h = \left(\frac{Q}{V} \right)^{0.5}$ 'den hesaplanabilir. Şekil 3.23'den görüldüğü gibi $B/h=3$ için Froude sayısı 1 olduğundan, B/h 'ın 3'den küçük değerlerinin pratikte bir anlamı yoktur. Kavitasyon olmaması için düşümdeki V hız değeri 15 m/sn'yi geçmemelidir. Boru çapı, boru içinde hız 3.5 m/sn alınarak belirlenir.

Bu şekilde belirlenen B en az olması gereken değerdir. Genellikle bu değerden biraz daha büyük değer seçilir. B belirlendikten sonra H , L , A , b , c , d , e ve f değerleri B 'ye bağlı olarak bulunur. Taş kaplama en az B kadar olmalıdır.

3.6. Batık Göl Tipi

Serbest düşümlü bir su napı, akarsu yatağında bulunan bir göle düşey olarak düşerse, göl tabanı oyulabilir. Bu oyulmanın derinliği, düşme yüksekliği ve akımın büyüklüğüne bağlıdır. Oyulma derinliği başlangıçta, taban malzemesinin çapı ve oyulabilirliği ile ilgilidir. Fakat uzun bir süre sonra bu oyulmalar kararlı bir değere ulaşır. Bu son oyulma derinliği başlangıçta göz önüne alınarak batık göl tipinde bir enerji kırıcı tesis planlanır.



Şekil 3.23. Çarpmalı havuz tipi ve boyutlandırma kriterleri

3.7. Serbest Düşümlü Akımlarda Enerji Kırıcılar

Serbest düşümlü havuzlarda, su belli bir yerden açık havaya düşürülür ve tabanda bir enerji kırıcı yapılarak enerjisi kırılır. Bu tip kırıcılar;

- a) Dikdörtgen havuz tipi
- b) Çarpma engelli havuz tipi
- c) Dişli ızgara tipi

olarak yapılabilirler. Bunların akım kontrolü keskin kenarlı, kalın kenarlı veya standart olarak düzeltilmiş bir savak vasıtasıyla yapılabilir. Kontrol biçimi enerji kırma açısından önemli değildir.

3.7.1. Dikdörtgen Havuz Tipi

Bu tip daha önce incelenmiş olan hidrolik sıçrama havuzlarına çok benzer. Burada sıçramanın başladığı nokta kolaylıkla bulunamaz. Bu nokta düşme derinliğine ve napın altında bulunan su derinliğine göre belirlenir. Sıçramanın başladığı noktadan sonra USBR'nin II, III veya IV. Tipindeki hidrolik sıçrama havuzları ve biçimleri kullanılabilir. En uygunu III. Tiptir.

3.7.2. Çarpma Engelli Tip

Bu tip ancak alçak düşümlü savaklarda kullanılır. Burada enerji, ilke olarak türbülans yardımıyla kırılır. Gelen su çarpma engellerine vurur. Burada mansap su derinliği ile düşme yüksekliği hemen hemen birbirinden bağımsızdır.

3.7.3. Dişli Izgara Tipi

Bu tip de bir önceki gibi alçak düşülerde kullanılır. Bu tipler tabanda Froude sayısının 2.5 ile 4.5 arasında olması durumlarında kullanılırlar. Burada üstte bir levha dişli bir biçimde ve ince, uzun kısımlara ayrılmıştır. Hidrolik çalışmayı iyileştirmek için sonuna bir eşik konur.

3.8. Basınçlı Çıkışlar İçin Enerji Kırıcılar

Serbest yüzeyli akımlar için uygun olan havaya fırlatmalı, hidrolik sıçrama havuzları, çarpmalı havuz tipi enerji kırıcılar, basınçlı çıkışlar için de kullanılabilir. Sözü geçen bu tiplere

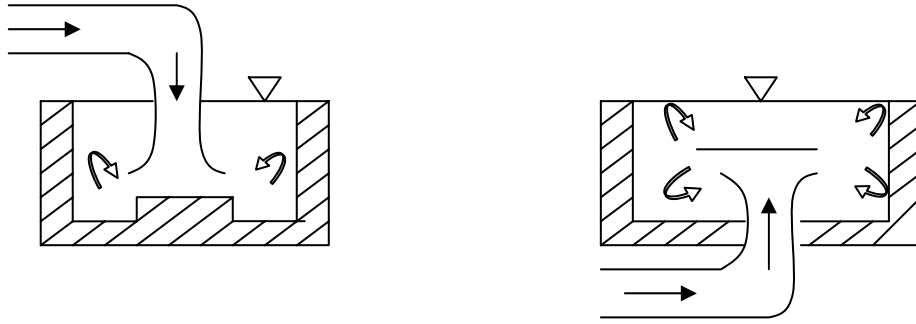
daha önce değinilmişti. Burada basınçlı çıkışlarda kullanılmakta olan serbest jet tipi ve sakinleştirme kuyuları görülecektir.

3.8.1. Serbest Jet Tipi

Bunlara bazı kaynaklarda batmış havuz tipi de denmektedir. Bu tipler ancak jetin önce havaya sonra aşağı doğru yönelebildiği durumlarda kullanılır. Bu tipte, jetin yere çarpma açısı çok yatık olursa jet ileriye doğru gider ve su yüzünde hızlı bir akım oluşur. Bu durum bir takım dalgalanmalar ve çevriler meydana getirerek kenarlarda aşınmalara sebep olur. Ayrıca çıkışta yüksek bir hız oluşur. Havuz derinliği, memba su seviyesi ile mansap su seviyesi arasındaki farkın 1/10'u alınabilir. Minimum taban genişliği, gelen jetin genişliği kadar olmalıdır veya havuz çıkışında suyun hızı 1 m/sn'yi geçecek şekilde seçilir.

3.8.2. Sakinleştirme Kuyuları

Bunların boyutları model testleri ile belirlenir. Enkesit alanı içindeki akımın hızı 0.3 ile 1m/sn arasında kalacak şekilde seçilir. Burada enerji kırılması türbülans ve dağılma ile sağlanır. Tesisin düşey bir kuyusu vardır. Suyun girişi yatay veya düşey olabilir. Çıkış genellikle yataydır [1].



Şekil 3.24. Sakinleştirme kuyusu örnekleri

3.9. SAF (St. Antony Falls) Tipi Düşü Havuzu

Bu tip havuzlar $1.7 < F_1 < 17$ limitleri arasında denenmiştir. Froude sayısının 17'den büyük değerleri için de kullanılmışlardır. Enerji kırıcı dişler havuzun başında, ortasında ve çıkışında mevcuttur. Bu tertip, kuyruk suyu derinliğinden iktisat etmek için düşünülmüştür. Laboratuvar sonuçlarına göre %15'e varan bir indirim de vardır. Fakat tabiatla yapım limit

değerler için çalıştırılmamalıdır. Ayrıca enerji kırıcı dişler civarında vakum ve kavitasyon olayları da iyice incelendikten sonra gerekli karar alınmalıdır.

Şekil 3.25’de SAF tipi düşüm havuzunun şekli gösterilmektedir. Düşüm havuzu düzenlenirken göz önüne alınması gereken noktalar burada şöyle sıralanmıştır:

1. $F_1 > 3$ için havuz uzunluğu

$$L_H = 4.5 \frac{h_1}{F_1^{0.38}} \quad (3.21)$$

2. Havuz girişi ve havuz ortası dişlerin yükseklikleri h_1 ’e eşittir ve aralarındaki açıklıklar yaklaşık olarak $3/4h_1$ olarak alınabilir. Dişlerin şaşırtmacalı olması şart değildir.

3. Havuz ortası dişlerini projelendirmek için kullanılacak olan kriterler şunlardır;

- * Dişlerin havuz girişine mesafesi $L_H/3$
- * Dişlerin havuz yan duvarından olan açıklığı en az $3/8h_1$ ’dir.
- * Dişlerin havuz genişliğinin %40-%55’ini kaplaması gereklidir.
- * Havuz trapez şekilli ise yani mansaba doğru genişliyorsa bu taktirde yukarıda verilen

boyutlar orantılı olarak arttırılmalıdır.

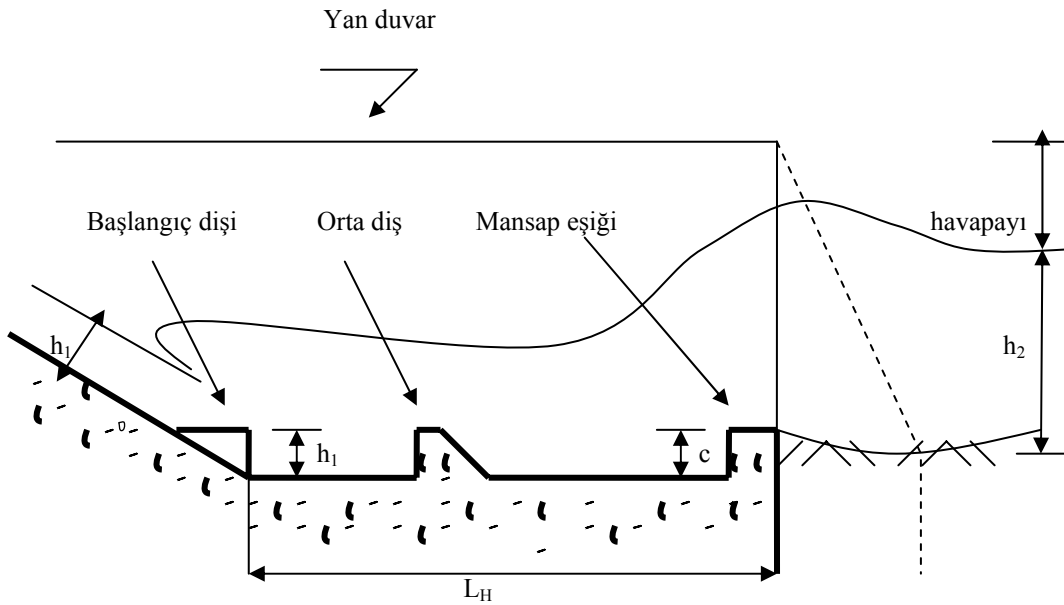
- * Dişler dikdörtgen kesitli olabileceği gibi memba mansap yönünde kesilmiş olabilir.

- * Mansap dişi yüksekliği

$$c = 0.07 h_2 \quad (3.22)$$

- * Düşü havuzu mansabında su derinliği en az;

$$h_2 = 1.4 F_1^{0.45} h_1 \quad (3.23)$$



Şekil 3.25. SAF (St. Antony Falls) tipi düşü havuzu

* Hava payı

$$\text{Hava payı} = \frac{1}{3} h_2 \quad (3.24)$$

* Kanal duvarları havuz nihayetinde başlamalı, 1/1'lik şevle tabii zemine saplanmalı ve akım doğrultusu ile 45°'lik bir açı yapmalıdır.

* Havuzun diğer unsurları Su Mühendisliği'nin bilinen kuralları uygulanarak düzenlenmelidir [10].

4. CFD YAZILIMLARI

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics-CFD) akışkan akımlarının bünye denklemlerini bilgisayar yardımıyla çözmekte kullanılan bir tekniktir. Bu tekniğin önemi akışkanlar mekaniği ile ilgili çalışan araştırmacıların ilgisini her geçen gün arttırmaktadır. Akışkanların hareketini belirlemek için, temel denklemlerden yola çıkılarak geliştirilmiş bu tekniklerle kompleks modellerin sayısal çözümlemesi, ancak bilgisayar desteğiyle sonlu elemanlar gibi yöntemlerin uygulanmasıyla mümkün olabilmektedir. Hidrolikteki birçok problemin üç boyutlu incelenmesi gerekmesine rağmen, yapılan sayısal modellemelerin birçoğu işlem zamanı düşünülerek iki boyutlu olarak hazırlanmaktadır. Üç boyutlu modellerde hassas çözüm için sonlu eleman sayısı çok fazla artacağından, çözüm zamanı ve zorluğu da 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 [17].

4.1. Fluent CFD Yazılımı (Fluent v5.3)

Bu çalışmada, özellikle hava-su karışımı gibi çok fazlı, serbest yüzeyli ve türbülanslı akımların çözümünde, gün geçtikçe kullanımı yaygınlaşan ve bir CFD yazılımı olan Fluent programı 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 [17]. Bu program ile akım alanı oluşturulup akımın gerçeğe yakın özellikleri incelenebilir. Programla akışkanın hareketini incelemek mümkündür. Akımın özelliğini belirleyen hız değişimi, kesme kuvveti ve suyun hareketinden kaynaklanan çalkantıların miktarı tespit edilebilir. Böylece, akımın nasıl davranacağı anlaşılmış olur. Analitik olarak türbülanslı akımın hareketini incelemek zordur, fakat Fluent programının denklemleri sistematik olarak çözmeye açısından kolaylık sağlaması bu durumu ortadan kaldırmaktadır. Türbülanslı akımın özellikleri için Reynolds-Ortalama Navier Stokes denklemlerini kullanır [18]. 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

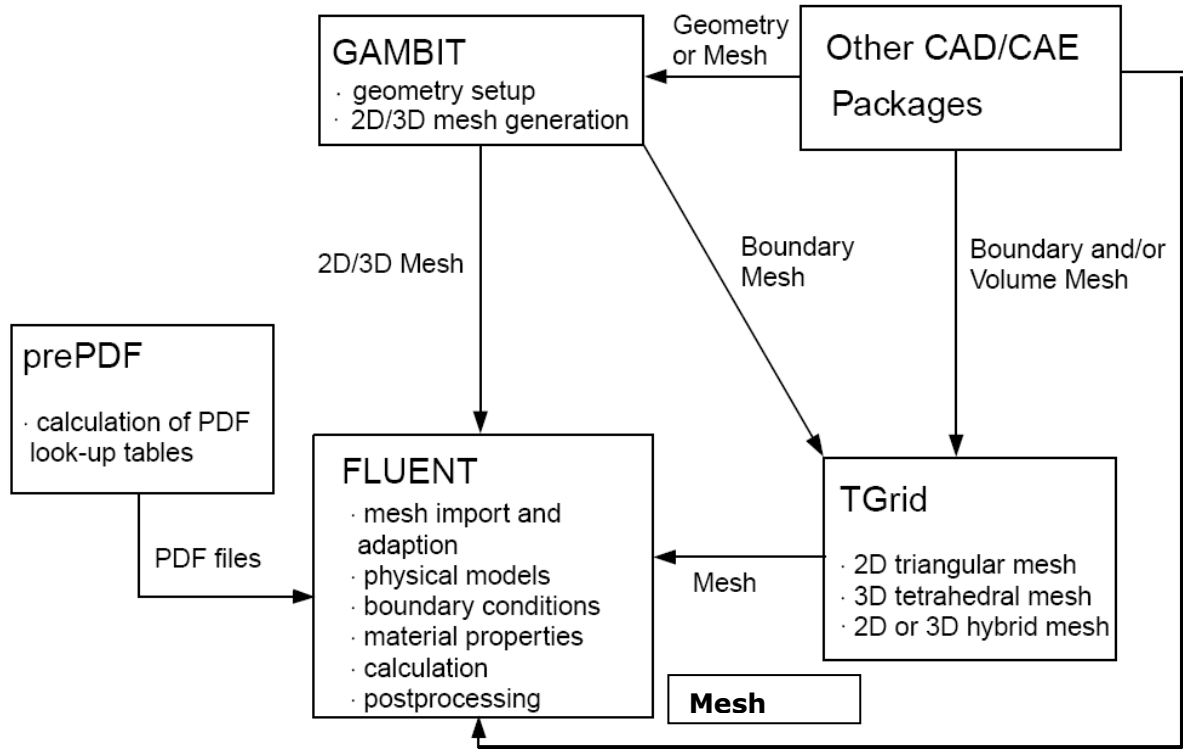
Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve Sonlu Elemanlar (SE) analizlerinde kullanılabilen genel amaçlı bir ön işlemcidir.

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, kullanıcıya kaliteli bir çözüm için gerekli ilk şart olan kaliteli sayısal ağa 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 kullanıcıya büyük bir esneklik sağlar.

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 ağın 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.

Fluent gibi CFD yazılımlarının en büyük dezavantajı çözüm zamanı ve yüksek kapasiteli bilgisayar gereksinimidir. Özellikle üç boyutlu modellerin hassas çözümlerinde modeli 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 [17]. Hatta bazı problemlerin sayısal çözümlemesi için sadece bir PC yeterli olmayıp, işlemci ve bellek kapasitesi çok yüksek birden fazla bilgisayarın paralel çalıştırıldığı sistemler gerekebilmektedir [19]. 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 [17].

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.
- Uniform ve non-uniform olmayan akımlar.
- Sürekli ve sıkıştırılabilen akımlar, bütünlük rejimlerini kapsar (dönüşüm, sesten hıza, sesten ok hıza).
- 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 [17].

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.

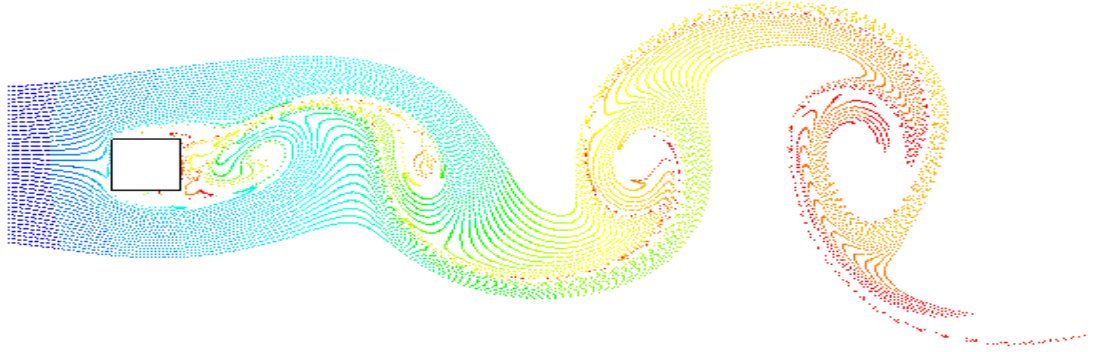
Fluent’te çok fazlı akımlar genelde, birincil faz sürekli ortam akışkanı, diğeri ise bu akışkan içine dağılmış olan ikincil faz olarak tanımlanır. Atmosfere açık serbest yüzeyli akımlar için, sürekli ortam akışkanı hava, ikincil faz ise su olarak alınır. Fluent 5’te çok fazlı akışkan için 4 farklı model 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***)
- Kavitasyon Modeli (***Cavitation Model***)

[17].

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.



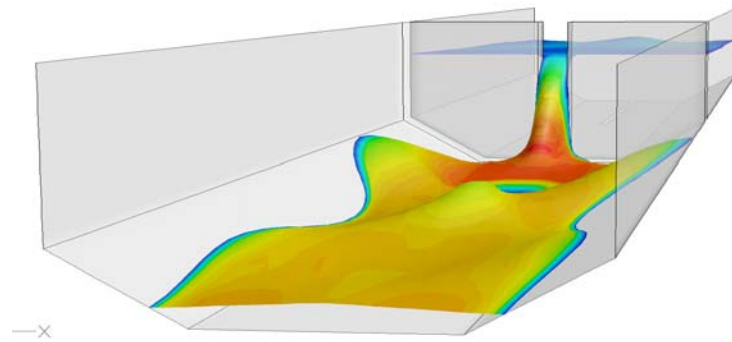
Şekil 4.2. Dağınık faz modeli

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 (kabarıkaların 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 [17].

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.



Şekil 4.3. Serbest yüzeyli 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 birincil 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 fazının 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 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 denklemine 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:

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

(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. [20] 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:

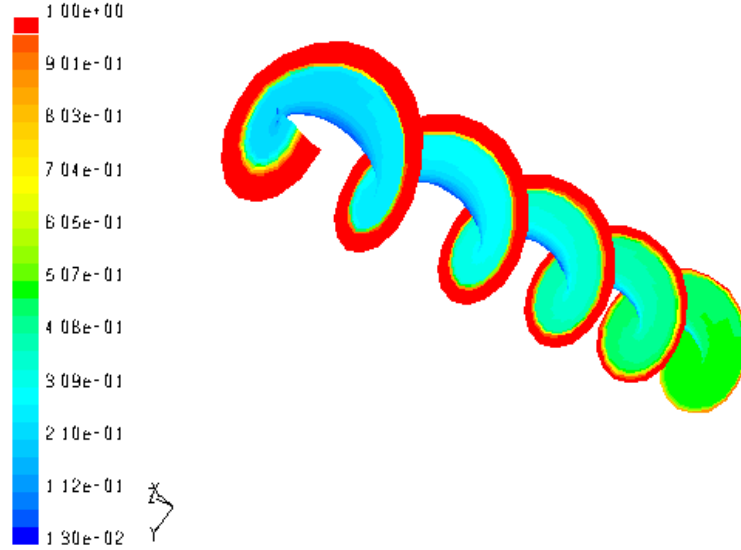
$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \text{ ve } \text{div}(\mathbf{n}) = \nabla \cdot \mathbf{n} \quad (4.8)$$

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 [17].

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. Bu nedenle akıma hava karışımının etkisinin önemli olduğu problemlerde akım modellemesinin ASMM ile yapılması daha uygun olacaktır. Akışkan fazları arasında VOF model gibi net bir ara yüzey elde edilmez [16]. 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 sıkıştırılmaz olmalıdır.
- Tüm kontrol hacimleri tek bir akışkan fazıyla veya iki fazın birleşmesiyle doldurulmalı boş hacim bırakılmamalıdır [17].

Karışımın süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m u_{m,i}) = 0 \quad (4.9)$$

Karışımın momentum denklemi iki ayrı faz için momentum denkleminin toplamıyla elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_{mj} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho_m u_{m,i} u_{m,j} = \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu_m \left(\frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{m,j}}{\partial x_i} \right) + \rho_m g_j + F_j + \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_{Dk,i} u_{Dk,j}$$

(4.10)

Burada; n: Faz sayısı, g: Yerçekimi ivmesi, ρ_m : Karışımın yoğunluğu, u_m : Karışımın ortalama hızı, u_{Dk} : Sürüklenme hızları, α_k : k akışkanının hacim oranını, μ_m : Karışımın viskozitesi, μ_k : k akışkanının viskozitesi, p: Basınç ve F_j : Ek terimdir. Karışımın yoğunluğu:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$$

Karışımın viskozitesi:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$$

Karışımın ortalama hızı:

$$\vec{u}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{u}_k}{\rho_m}$$

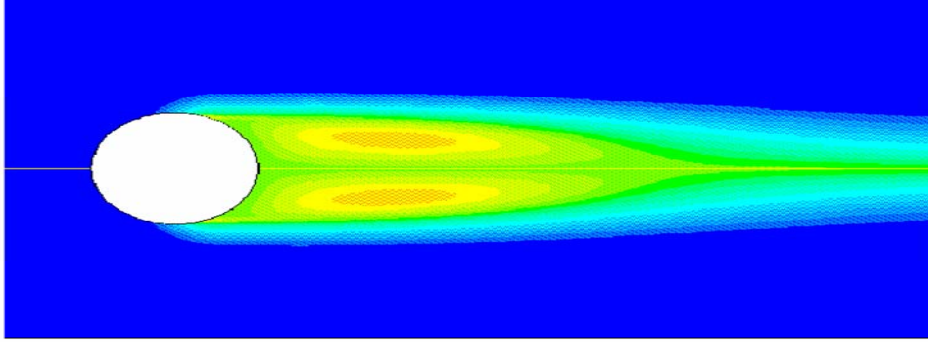
Sürüklenme hızı:

$$\vec{u}_{Dk} = \vec{u}_k - \vec{u}_m$$

denklemleriyle hesaplanır [16].

Akımın enerji kırıcı bloklara çarpıp sıçraması göz önünde bulundurularak, akışkan fazlarının birbirine karışması söz konusu olduğundan, akıma karışan havayı da modelleyebilmesine olanak sağlayan ASM modelin bu çalışmada kullanılması uygun görülmüştür.

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. Kavitasyon modelde ise yalnızca iki faz modellenebilir. 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 [17].

5. MODELLERİN ANALİZİ

Gelişen bilgisayar teknolojisi ile yurtdışı ve ülkemizdeki çalışmalarda 2000 yılından bu yana CFD yazılımlarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu çalışmada da enerji kırıcı blokların geometrilerinde değişiklikler yapılarak belirli debilerdeki akımların oluşturduğu basınç ve hız değerleri incelenmiştir. CFD yazılımları hidrolik alanında birçok konuda çalışmaya olanak sağlamaktadırlar. Bunlar arasında; enerji kırıcı yapılar, havalandırıcılar, pervaneler ve akarsu hidroliği gibi birçok konu gösterilebilir.

Bu çalışmada, Alibey Barajı'nın dolusavak hesapları, düşüm havuzu ve enerji kırıcı blok boyutları dikkate alınmıştır. Enerji kırıcı blok boyutları değiştirilmeden farklı geometrilere sahip modeller hazırlanarak analizleri yapılmış ve birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Enerji Kırıcı Havuzun Boyutlandırılması:

$$Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$B = 30 \text{ m}$$

$$d_1 = 1,39 \text{ m (sıçramadan önceki derinlik)}$$

$$V_1 = 18,98 \text{ m}$$

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \times d_1}} \quad F_1 = \frac{18,98}{\sqrt{1,39 \times 9,81}} = 5,14$$

$$F_1 = 5,14 \rightarrow \frac{d_2}{d_1} = 6,75 \quad d_2 = 6,75 \times 1,39 = 9,38 \text{ m (sıçramadan sonraki derinlik)}$$

$$F_1 = 5,14 \rightarrow \frac{L_{II}}{d_2} = 2,35 \quad L_{II} = 2,35 \times 9,38 = 22,04 \approx 22 \text{ m}$$

$$V_2 = \frac{Q}{b_2 \times d_2} = \frac{500}{9,38 \times 18,95} = 2,813 \text{ m/s}$$

$$h_{v_2} = \frac{V_2^2}{2g} = \frac{2,813^2}{19,62} = 0,40 \text{ m}$$

$$9,38 + 0,40 = 9,78 \text{ m}$$

[21].

Enerji Kırıcı Havuzda Hava Payı Hesabı:

$$H_p = 0,1(V_1 + d_2) = 0,1(18,98 + 9,38) = 2,84 \text{ m} \quad \text{seçilen} \rightarrow 1,62 \text{ m}$$

Enerji Kırıcı Havuzda Duvar Üst Kotu:

$$9,38 + 1,62 = 11,0 \text{ m}$$

$$F_1 = 5,14 \rightarrow \frac{h_3}{d_1} = 1,50 \rightarrow h_3 = 1,50 \times 1,39 = 2,09 \approx 2,10 \text{ m seçildi.}$$

$$0,2h_3 = 0,2 \times 2,09 = 0,42 \text{ m}$$

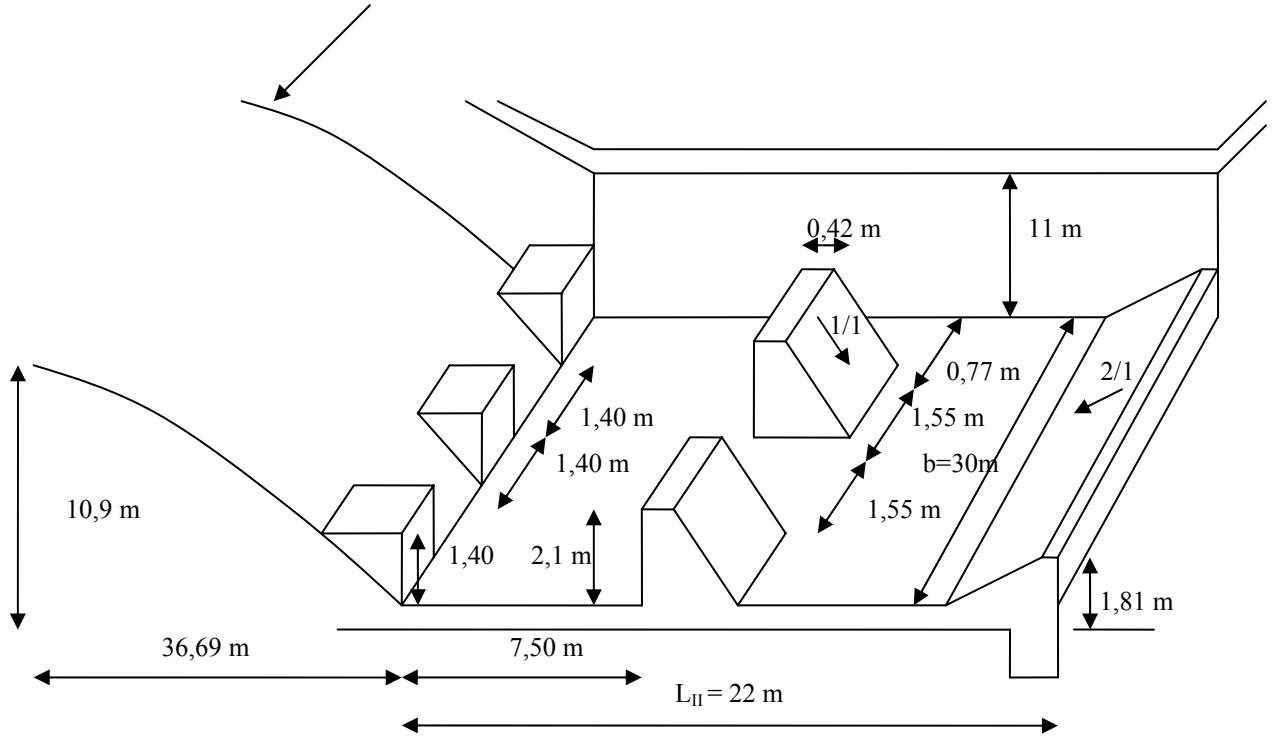
$$0,375h_3 = 0,375 \times 2,09 = 0,78 \text{ m } 0,77 \text{ m alındı}$$

$$0,75h_3 = 0,75 \times 2,09 = 1,57 \text{ m } 1,55 \text{ m alındı}$$

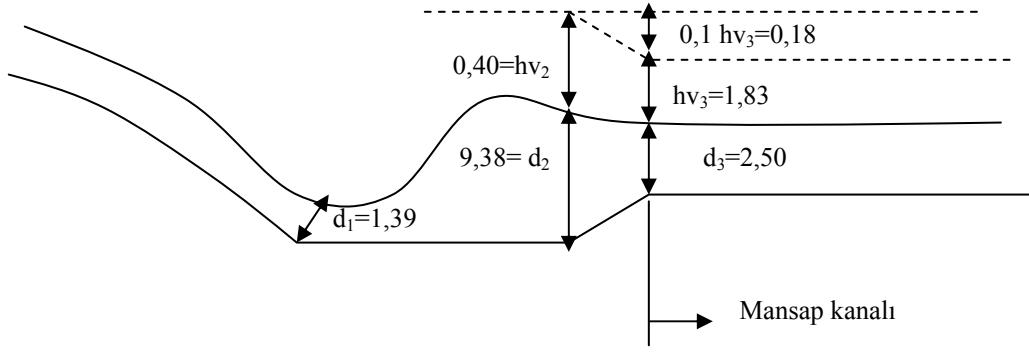
$$F_1 = 5,14 \rightarrow \frac{h_4}{d_1} = 1,30 \rightarrow h_4 = 1,30 \times 1,39 = 1,81 \text{ m}$$

$$0,8d_2 = 0,8 \times 9,38 = 7,50 \text{ m}$$

Parabolün denklemi $-y = 0,0076886 x^2 + 0,015 x$ [21].

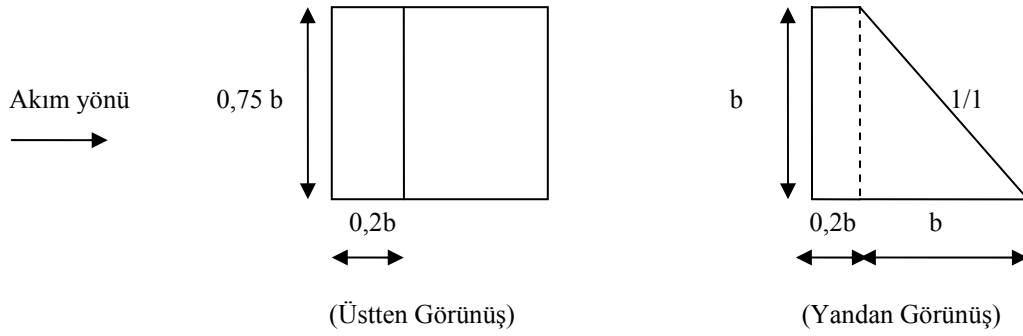


Şekil 5.1. Enerji kırıcı havuz ve blok boyutları

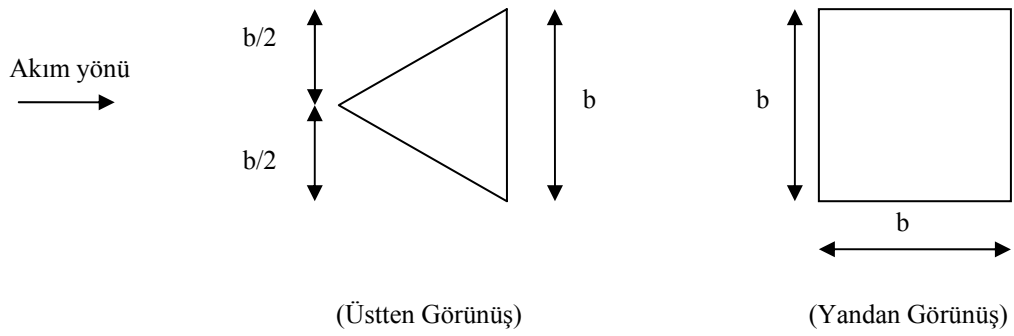


Şekil 5.2. Akımın düşüm havuzundaki hareketi

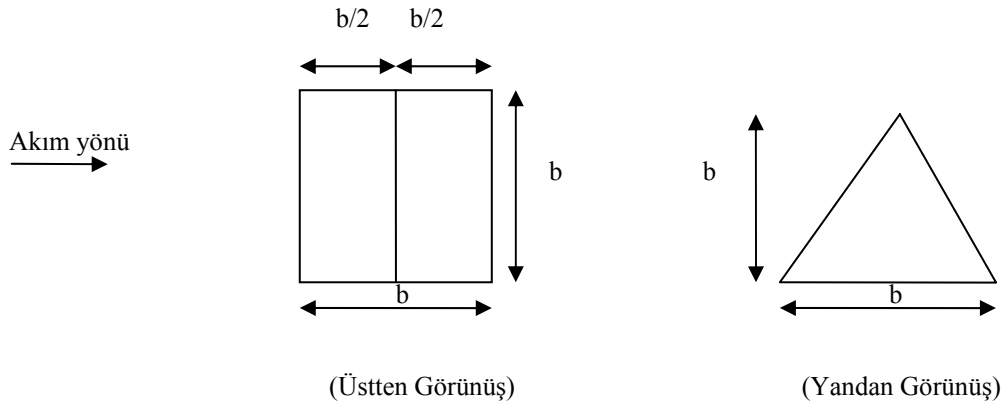
5.1. Çalışmada Kullanılan Enerji Kırıcı Blok Modelleri



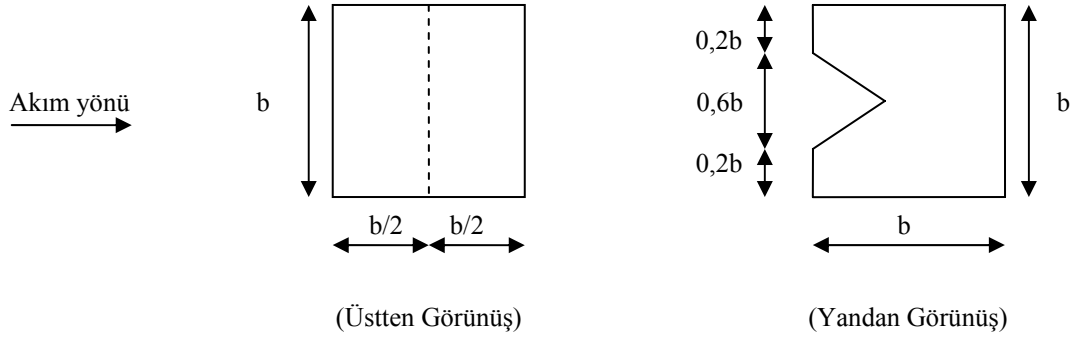
Şekil 5.3. Model 1'in görünümü



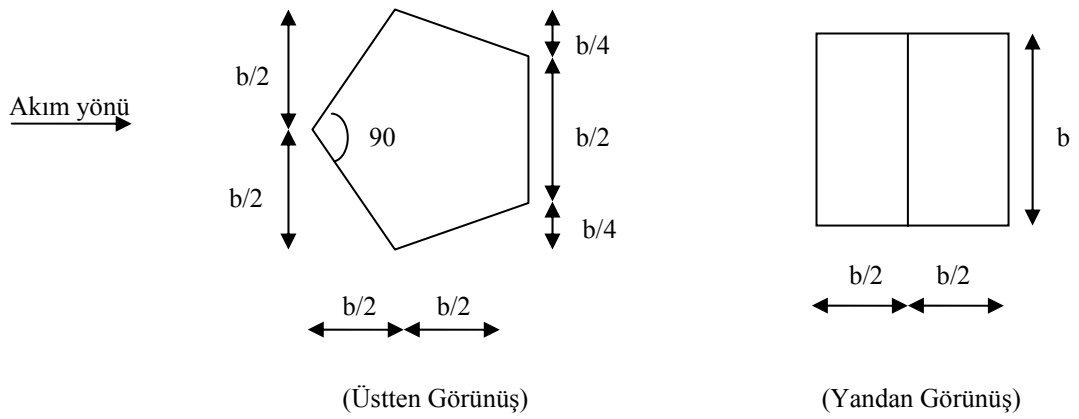
Şekil 5.4. Model 2'nin görünümü



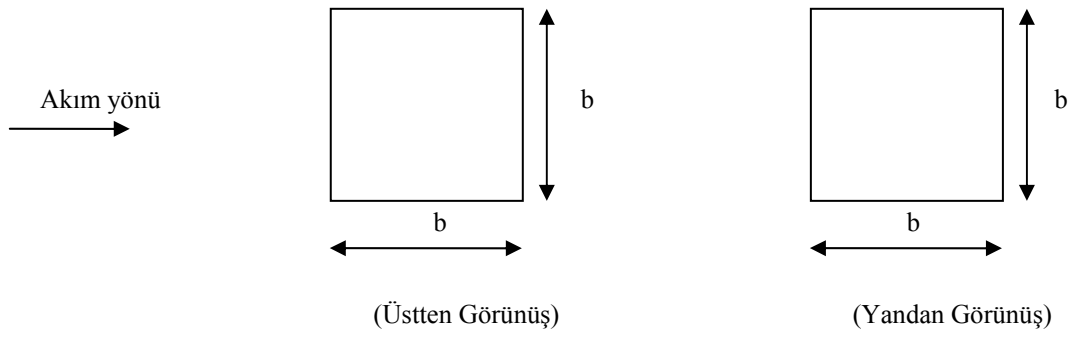
Şekil 5.5. Model 3'ün görünümü



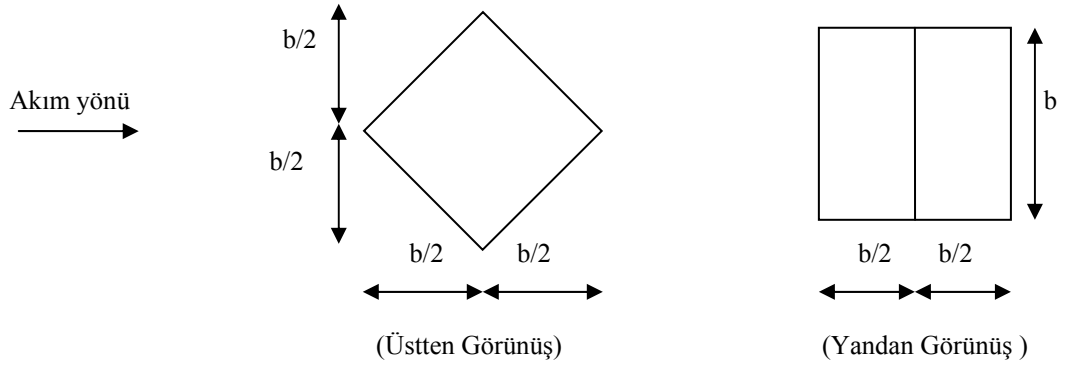
Şekil 5.6. Model 4'ün görünümü



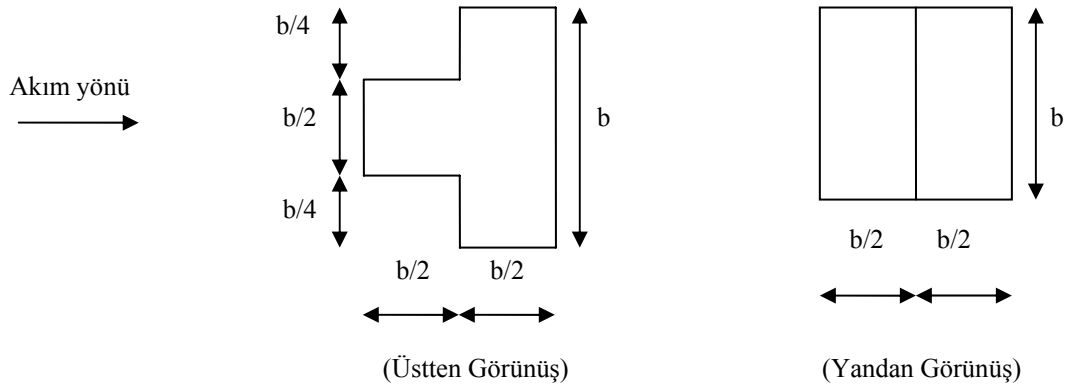
Şekil 5.7. Model 5'in görünümü



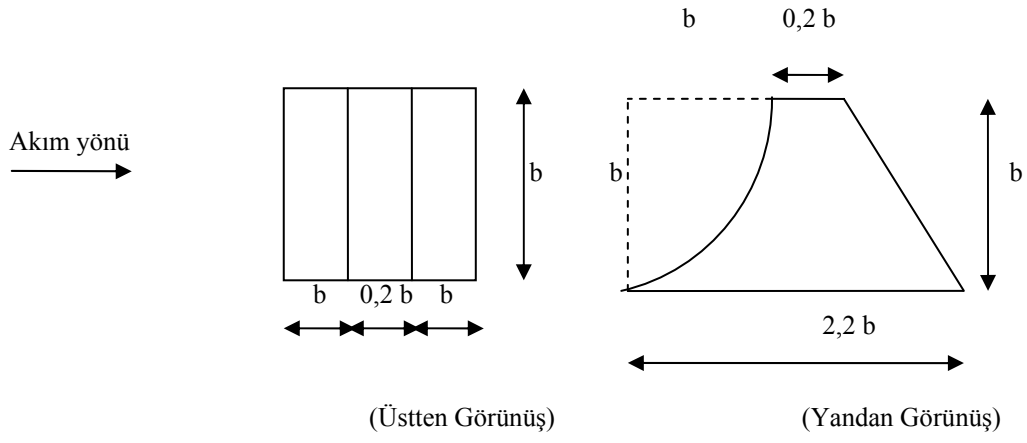
Şekil 5.8. Model 6'nın görünümü



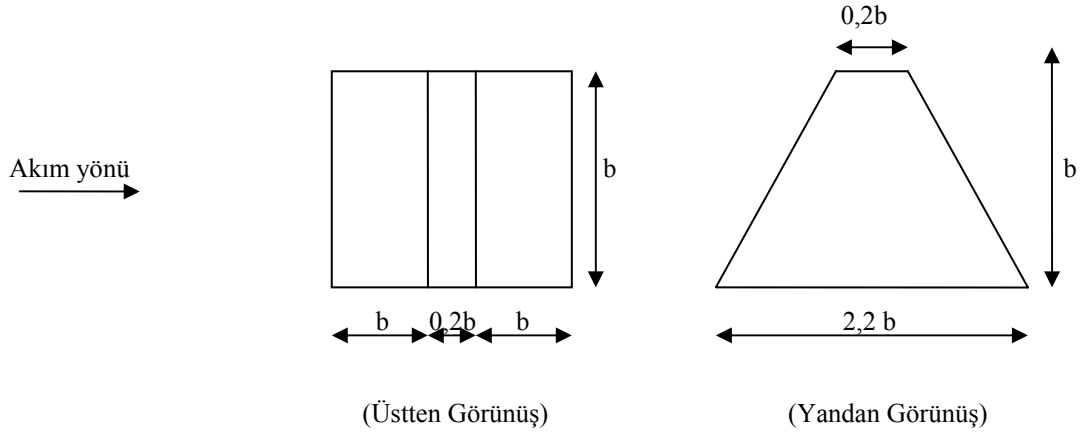
Şekil 5.9. Model 7'nin görünümü



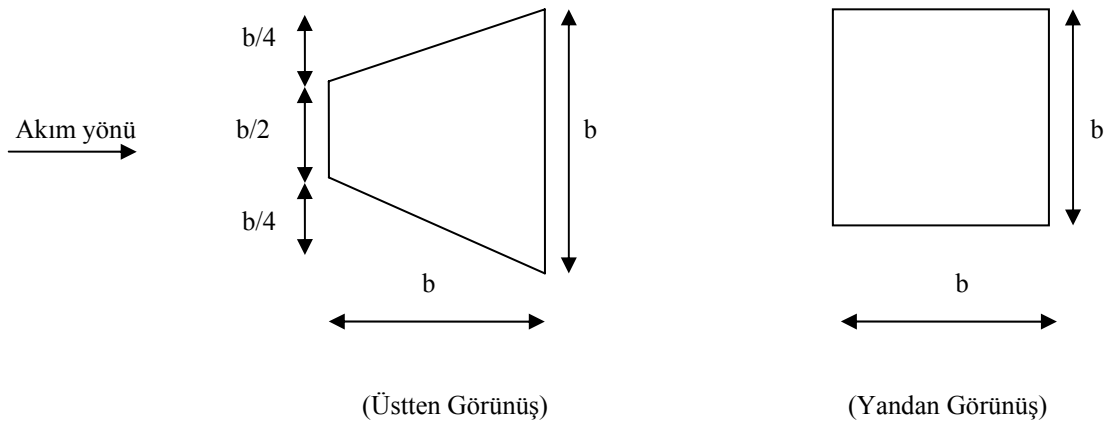
Şekil 5.10. Model 8'in görünümü



Şekil 5.11. Model 9'un görünümü



Şekil 5.12. Model 10'un görünümü

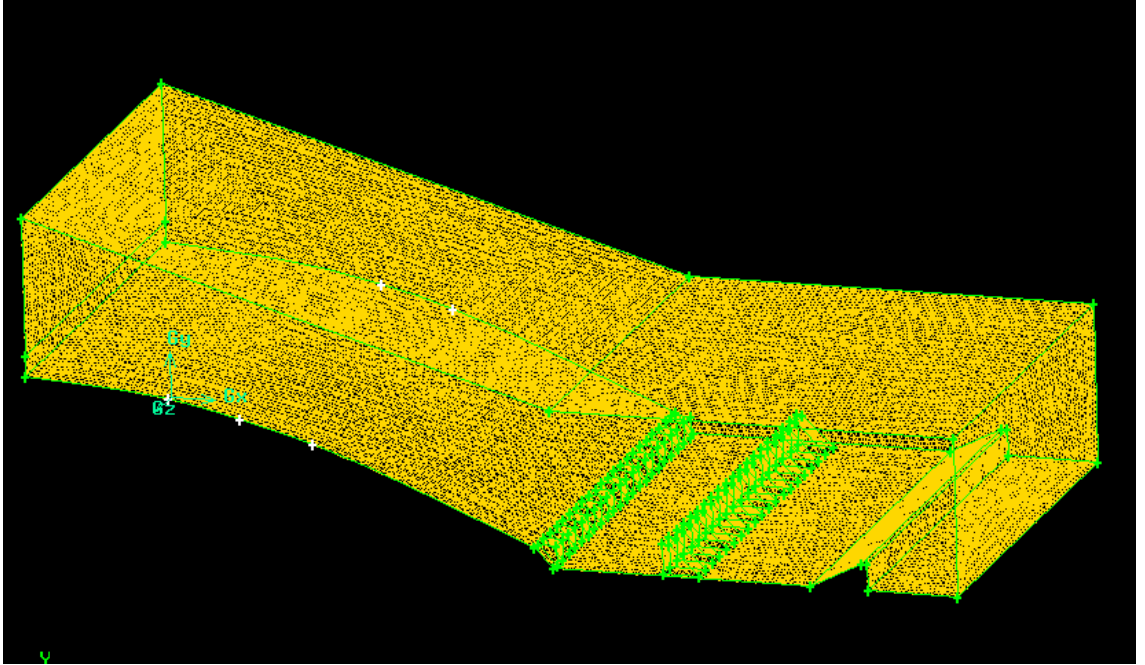


Şekil 5.13. Model 11'in görünümü

5.2. Sayısal Modelin Geometrisi

Modelin geometrisini oluşturmada Gambit programı kullanılmış ve modeller 3 boyutlu olarak hazırlanmıştır. Model 1’de 2.1 m yüksekliğinde, 1.5 m genişliğinde 10 adet enerji kırıcı blok, Model 2, Model 3, Model 4, Model 5, Model 6, Model 7, Model 8, Model 9, Model 10 ve Model 11’de de 2.1 m yüksekliğinde ve 2.1 m genişliğinde 6 adet blok hazırlanmış ve modeller içine yerleştirilmiştir. Ayrıca bloksuz model de oluşturulmuştur.

Modeller  boyutlu hacim oluşturulduktan sonra sonlu elemanlar yöntemiyle 395000 ile 400000 arasında Tet/Hybrid elemana meshlenmiştir. Modelin meshli görünümü şekil 5.14’deki gibidir.



şekil 5.14. Meshli görüntü

Meshleme yapıldıktan sonra modelin sınır şartları belirlenmiştir. Bu sınırlar; hız girişi, atmosfer girişi ve katı cidardır.

Gambitte oluşturulan  boyutlu modeller Fluent programına export edilerek çözüm parametreleri girilmiştir.

5.3. Çözüm Parametreleri

Fluente aktarılan modeller için; üç boyutlu (3D), ayrılmış (Segregated), zamanla değişen akım (unsteady) çözüm modeli seçilmiştir. Modelimiz ASMM (Algebraic Slip Mixture Model) cebirsel kayma karışım modelidir. 1. faz; su, 2. faz; hava olarak kabul edilmiştir. Bu iki fazın fiziksel özellikleri tanıtılmıştır. Yerçekimi (g), yüzey kuvvetleri, katı cidar sürtünmeleri dikkate alınmıştır. ASMM modelinde k - ϵ türbülans modeli kullanılmıştır.

5.4. k - ϵ Türbülans Modeli

Düşüm havuzlarındaki akım türbülanslı bir akımdır. Bu türbülanslı modelleyebilmek için, Fluent programındaki 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 [17].

5.5. 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 [17].

5.6. Sınır Şartları (*Boundary Condition*)

Modeldeki sınır şartları her bir eleman için ayrı ayrı belirtilmiştir:

- **Katı Cidar (*Wall*):** Düşüm havuzu tabanı, yan duvarlar, eşik yüzeyleri, enerji kırıcı bloklar, şut blokları, eşik sonundaki duvar programda Wall olarak tanıtılmıştır. Beton yüzeyler için pürüzlülük $k_s=0.001$ m, $C_{Ks}=0.5$ sabit olarak alınmıştır.
- **Basınç girişleri (*Pressure Inlets*):** Modelin atmosfere açık olan üst kısmı, eşikten sonraki su çıkış kısmı basınç girişi olarak tanıtılmıştır. Çalışmada rölatif basınçla çalışılmış ve atmosfer basıncı 0 alınmıştır.
- **Hız girişleri (*Velocity Inlets*):** Suyun girdiği $h=1,4$ m su yüksekliği her bir modelin çözümünde hız girişi olarak verilmiştir. $V=12,3$ m/s lik hızla çözüm başlatılmıştır.

5.7. İşletme Durumları (*Operating Condition*)

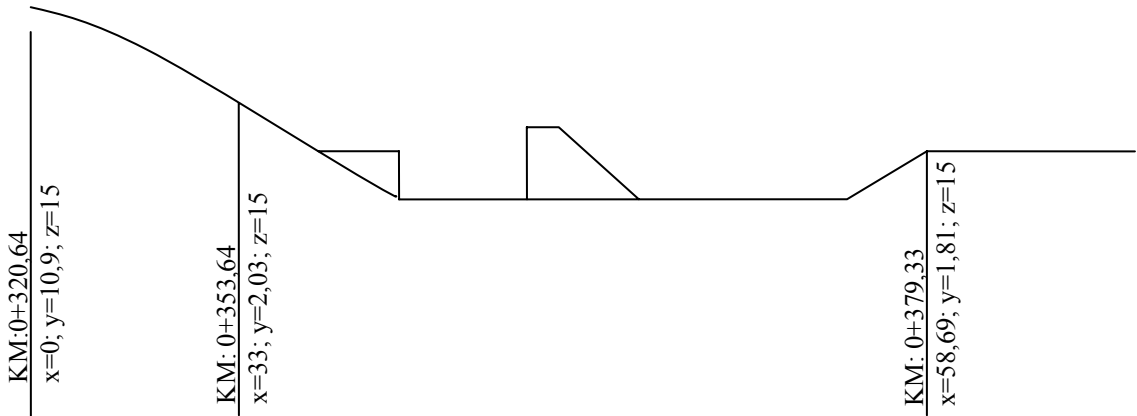
Bu alanda modelimizin, işletme basıncı, yerçekimi ivmesi, ortam yoğunluğu gibi parametreler tanıtılır. Modellerde rölatif basınçlarla çalışmak işimizi kolaylaştırdığından atmosfer basıncı 0 olarak alınmıştır. Yerçekimi ivmesi $g= 9.81$ m/s² ve ortamı çeviren hava kütlelerinin yoğunluğu $\rho_a = 1,225$ kg/m³ olarak alınmıştır.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Hız Grafikleri ve Ölçüm Alınan Yerler

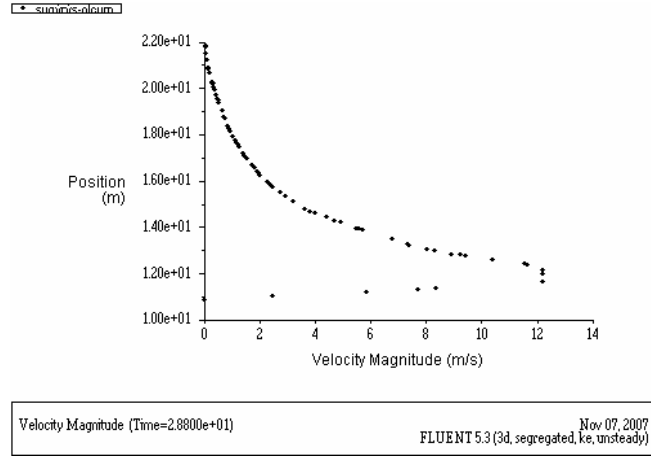
Bu çalışmada; dolu savağın $x=0$ ve $y=10,9$ koordinatlarından itibaren su hızı $V=12,3$ m/s olarak başlatılmıştır. Tüm modellerde belirli koordinatlarda ölçümler alınarak bloklardan önceki ve eşikten sonraki hızlar tespit edilmeye çalışılmış, bu hızların değişimleri incelenmiştir.

Model 1 'de karşılaştırma olanağı sağlamak amacıyla Alibey Barajına ait enerji kırıcı havuz geometrisi aynen kullanılmış ve programla elde edilen hız değerleri ile gerçekte hesapla bulunan hız değerleri karşılaştırılmıştır. Diğer modellerde kullanılan blok geometrileri teknik olarak barajlarda kullanılmadığından gerçek verilerle kıyaslanma imkânı bulunamamıştır.

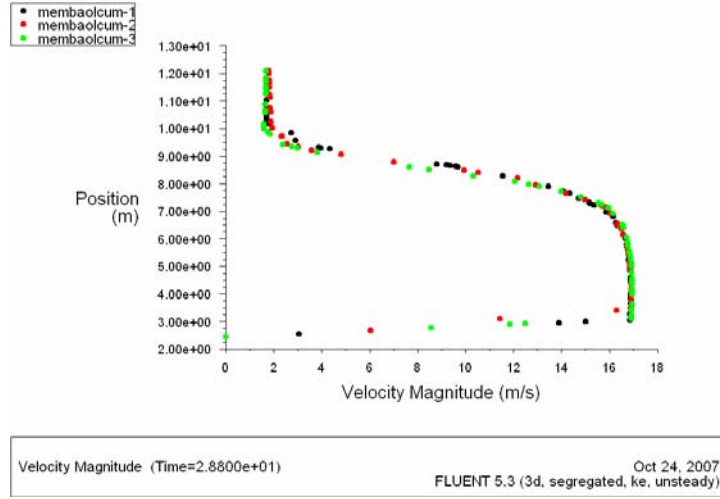


Şekil 6.1. Model 1 için ölçümlerin alındığı noktalar

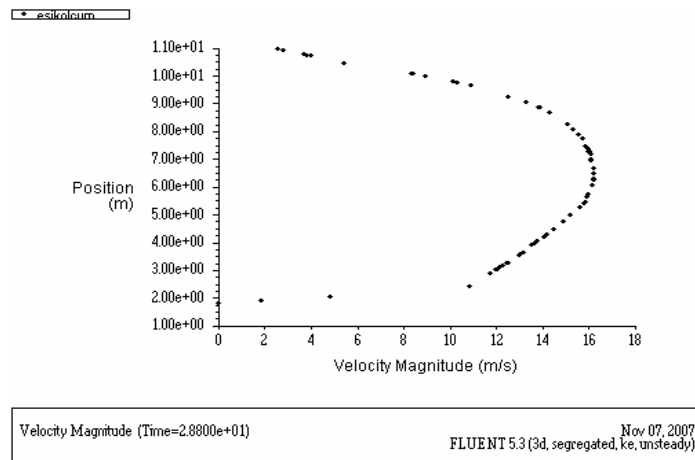
Alibey Barajı Dolusavak Hesaplarında KM: 0+320,64 te su yüksekliği $d=2,15$ m, $V=12,3$ m/s, KM: 0+353,64 de $d=1,5$ m, $V=17,56$ m/s, KM: 0+379,33 de ise $d=2,5$ m, $V=6,66$ m/s olarak hesaplanmıştır. Aşağıdaki grafiklerde aynı noktalarda Fluent programı ile elde edilen hız değerlerinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.2. KM:0+320,64 'te ölçülen hız değerlerinin su yüksekliği ile olan değişimi



Şekil 6.3. KM:0+353,64 'te ölçülen hız değerlerinin su yüksekliği ile olan değişimi



Şekil 6.4. KM:0+379,33 'te ölçülen hız değerlerinin su yüksekliği ile olan değişimi

Şekil 6.2’de bulunan grafikte $d=2,15+10,9=13,05$ m ‘deki su yüksekliğine bakıldığında buradaki hız değerinin yaklaşık $V=11$ m/s olduğu görülmektedir.

Şekil 6.3’te bulunan grafikte $d=1,5+2,03=3,53$ m deki su yüksekliğine bakıldığında bu değerin yaklaşık $V=17$ m/s olduğu görülmektedir.

Şekil 6.4’te bulunan grafikte ise $d=2,5$ m deki su yüksekliğinde hız değerinin yaklaşık $V=10$ m/s olduğu görülmektedir.

Model 1 için Alibey Barajına ait dolusavak hesaplarındaki veriler ile Fluent programından elde edilen veriler Tabloda 6.1’de karşılaştırılmıştır.

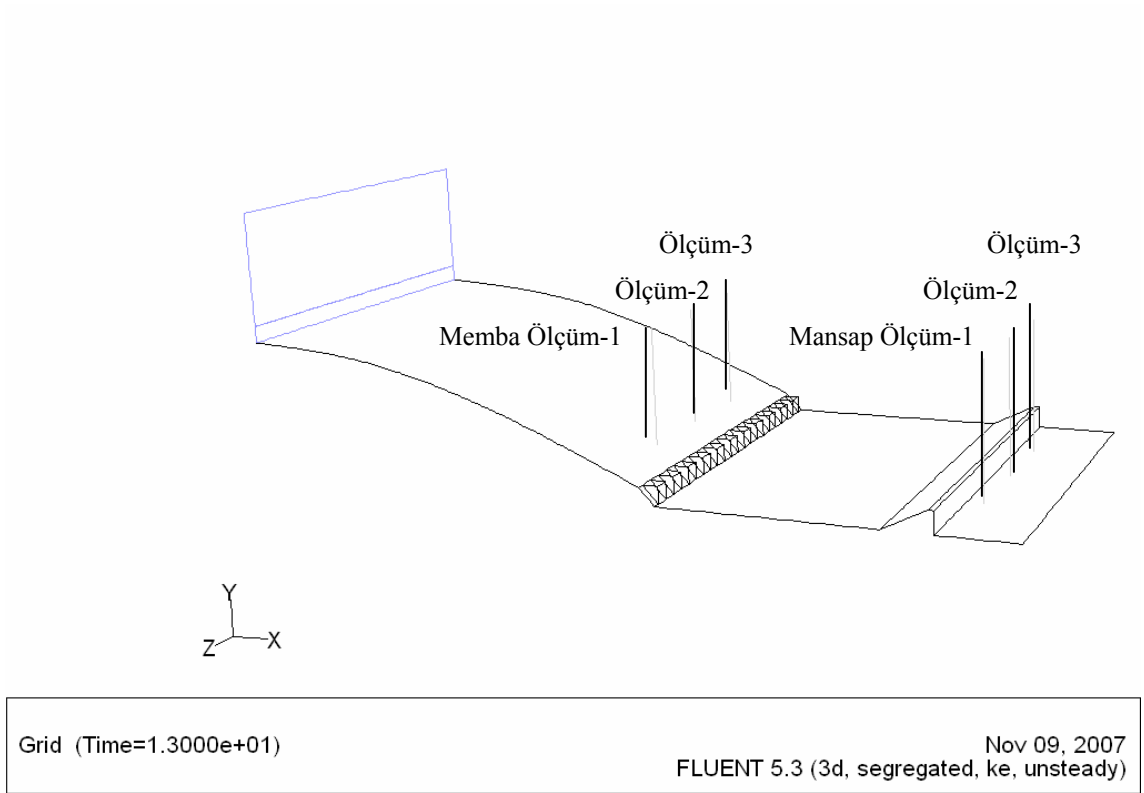
Tablo 6.1. Alibey Barajı dolusavak hesapları sonucu ile Fluent programı ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması

KM	d (m) (su yüksekliği)	V (m/s) (Alibey Barajı Dolusavak Hesaplarına Göre)	V (m/s) (Fluent Programına Göre)
0+320,64	2,15	12,3	11,0
0+353,64	1,50	17,56	17,0
0+379,33	2,50	6,66	10

Tablo 6.1’de anlaşılabacağı üzere Alibey Barajı Dolusavak Hesaplarından elde edilen verilerle, aynı koordinatlarda Fluent programından elde edilen veriler birbirine çok yakın çıkmıştır. Bu durum, çok fazla zaman harcanarak laboratuvar ortamında hazırlanan modeller yerine, bir CFD yazılımı olan Fluent programı kullanarak da gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir.

Bütün modellerde başlangıç hızı 12,3 m/s, memba ölçüm noktalarındaki su yüksekliği $d_1=3,53$ m ve mansap ölçüm noktalarındaki su yüksekliği $d_2=2,5$ m olarak alınmıştır.

Şekil 6.5 bloksuz haldeki düşüm havuzunda oluşturulan ölçüm noktalarını göstermektedir. Bloksuz düşüm havuzu ve diğer modeller için; 3 adet bloklardan önce (KM: 0+353,64 memba ölçümler), 3 adet eşikten sonra (KM: 380,64 mansap ölçümler) olmak üzere, toplam 6 noktada ölçüm yapılmıştır.



Şekil 6.5. Bloksuz düşüm havuzunun görünümü ve ölçüm alınan noktalar

KM:0+353,64

Memba ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=7,5$; $z_2=7,5$

Memba ölçüm 3: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Memba ölçüm 2: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=2,03$

$z_1=15$; $z_2=15$

KM:0+380,64

Mansap ölçüm 1: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=7,5$ $z_2=7,5$

Mansap ölçüm 3: $x_1=60$; $x_2=60$

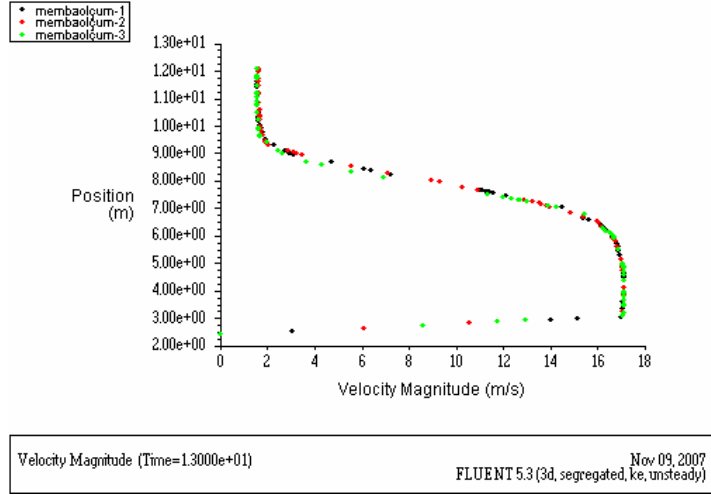
$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

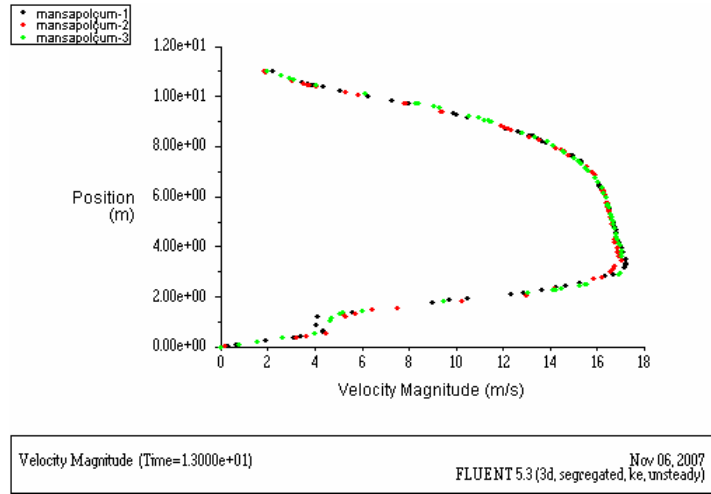
Mansap ölçüm 2: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=15$; $z_2=15$

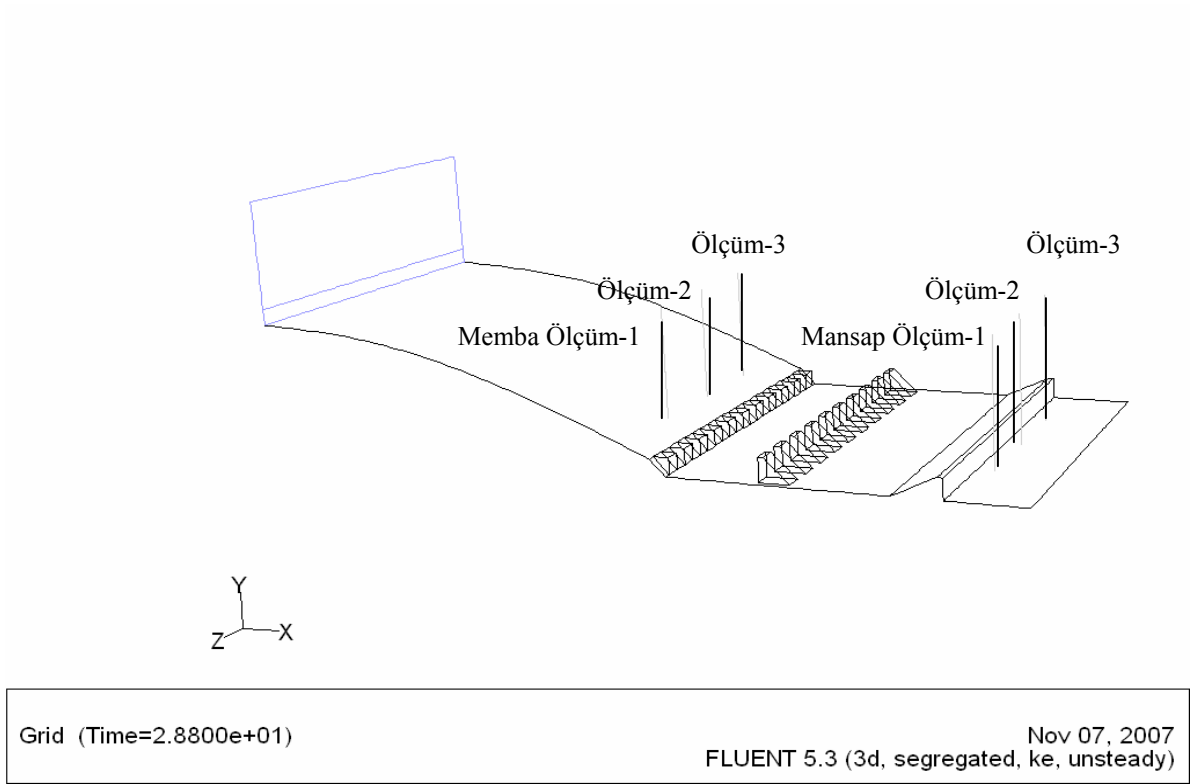


Şekil 6.6. Bloksuz düşüm havuzuna ait memba hız grafiği



Şekil 6.7. Bloksuz düşüm havuzuna ait mansap hız grafiği

Şekil 6.6'daki grafikte $d_1 = 3,53$ m su yüksekliğindeki ortalama hız değeri yaklaşık $V_1 = 17$ m/s'dir. Şekil 6.7'deki grafikte $d_2 = 2,5$ m su yüksekliğinde ortalama hız değeri $V_2 = 14,5$ m/s olarak bulunmuştur.



Şekil 6.8. Model 1'in görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar

KM:0+353,64

Memba ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=7,5$; $z_2=7,5$

Memba ölçüm 3: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

KM:0+380,64

Mansap ölçüm 1: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=7,5$ $z_2=7,5$

Mansap ölçüm 3: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Memba ölçüm 2: $x_1=33$; $x_2=33$

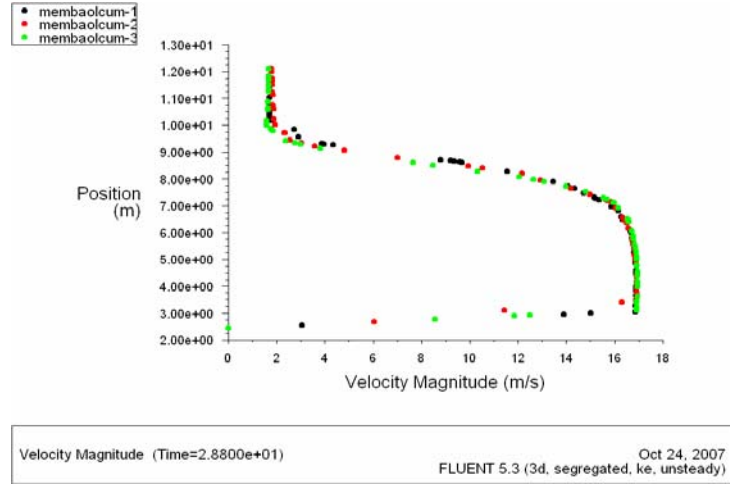
$y_1=2,03$; $y_2=2,03$

$z_1=15$; $z_2=15$

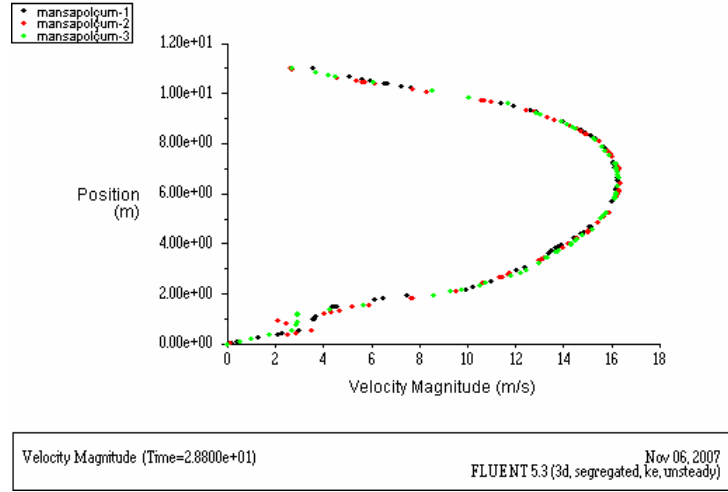
Mansap ölçüm 2: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=15$; $z_1=15$

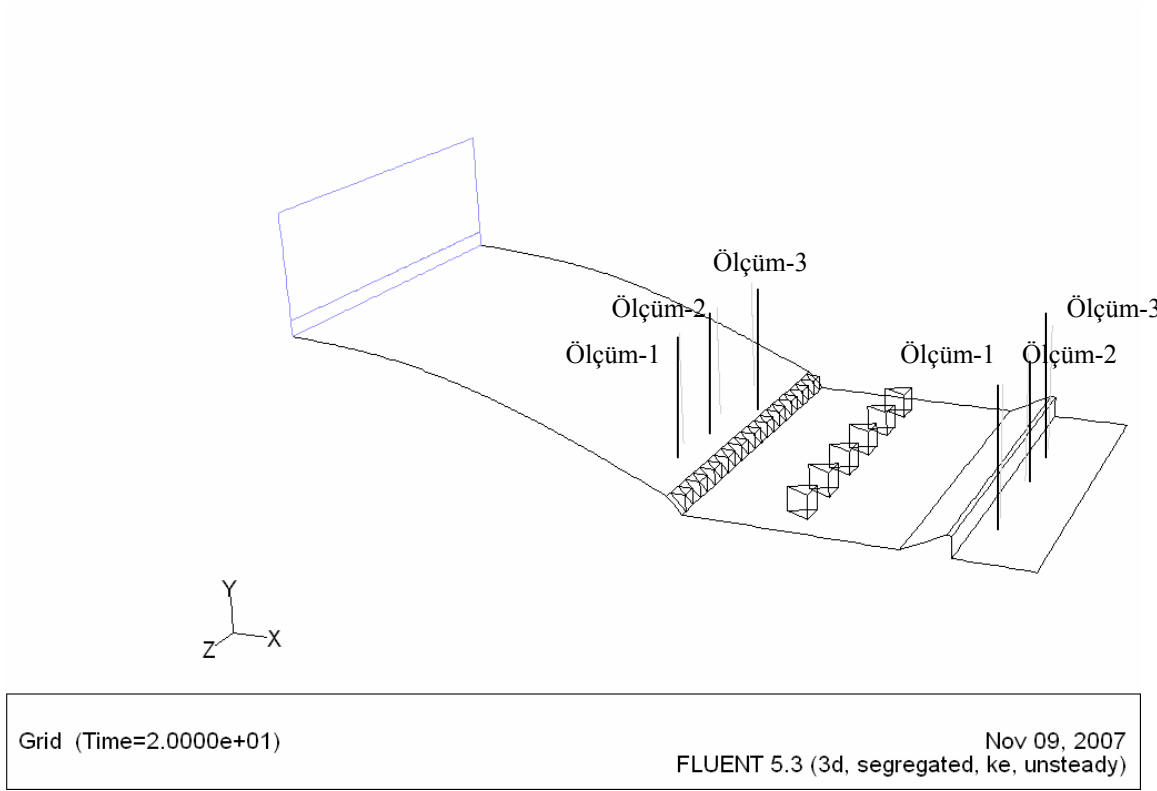


Şekil 6.9. Model 1'in memba hız grafiği



Şekil 6.10 Model 1'in mansap hız grafiği

Şekil 6.9'daki grafikte $d=3,53$ m su yüksekliğinde ortalama hızın $V_1=17$ m/s olduğu ve Şekil 6.10'da $d=2,5$ m su yüksekliğinde ise ortalama hızın $V_2=10,8$ m/s olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.11. Model 2'nin görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar

KM:0+353,64

Memba ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=7,5$; $z_2=7,5$

Memba ölçüm 3: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

KM:0+380,64

Mansap ölçüm 1: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=7,5$ $z_2=7,5$

Mansap ölçüm 3: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Memba ölçüm 2: $x_1=33$; $x_2=33$

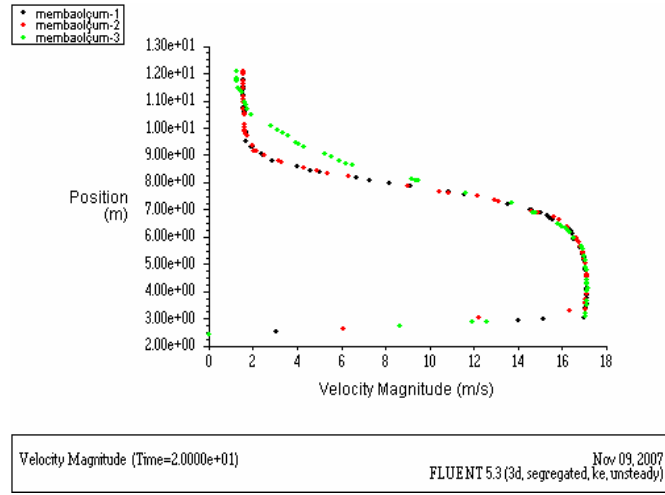
$y_1=2,03$; $y_2=2,03$

$z_1=15$; $z_2=15$

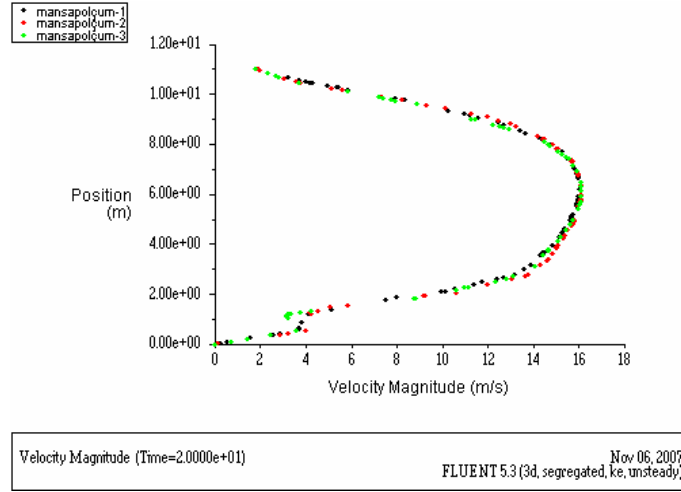
Mansap ölçüm 2: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=15$; $z_2=15$

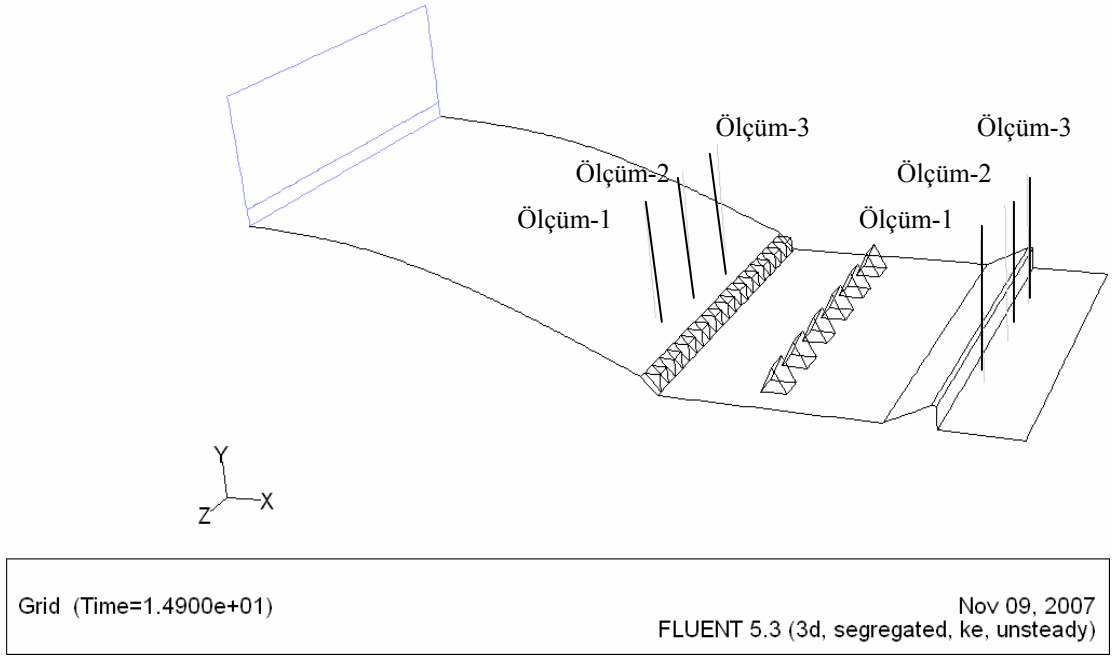


Şekil 6.12. Model 2'nin memba hız grafiği



Şekil 6.13. Model 2'nin mansap hız grafiği

Şekil 6.12'deki grafikte $d=3,53$ m su yüksekliğinde ortalama hızın $V_1=17$ m/s olduğu, Şekil 6.13'te $d=2,5$ m su yüksekliğinde ise ortalama hızın $V_2=11$ m/s olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.14. Model 3'ün görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar

KM:0+353,64

Memba ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=15$
 $z_1=7,5$; $z_2=7,5$

Memba ölçüm 3: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=15$
 $z_1=22,5$; $z_2=22,5$

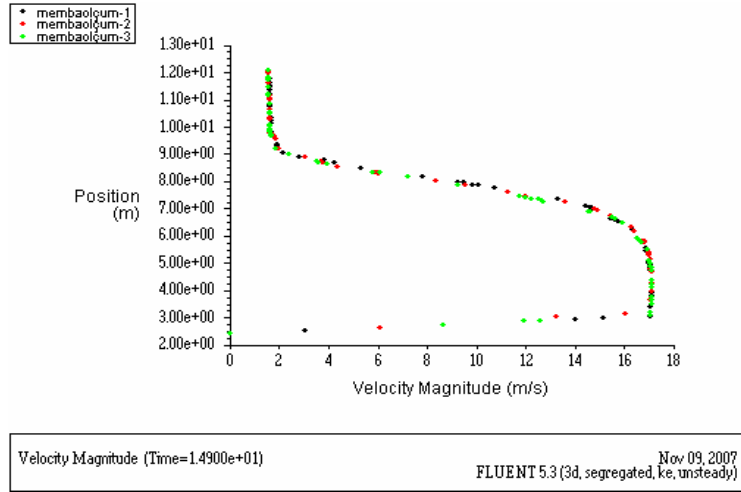
KM:0+380,64

Mansap ölçüm 1: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=7,5$ $z_2=7,5$

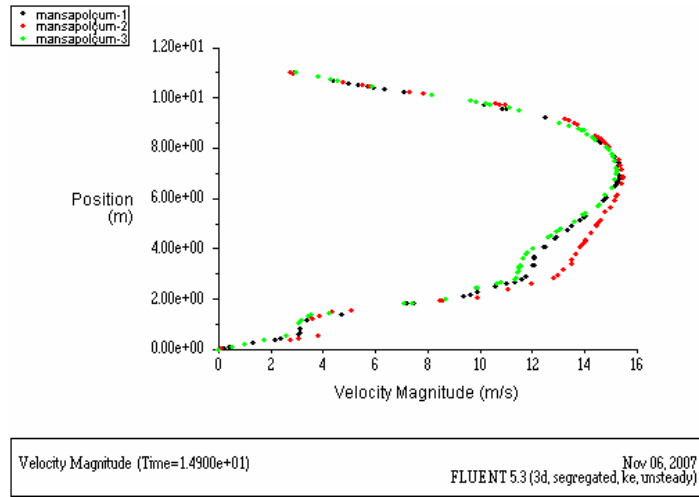
Mansap ölçüm 3: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Memba ölçüm 2: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=2,03$
 $z_1=15$; $z_2=15$

Mansap ölçüm 2: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=15$; $z_2=15$

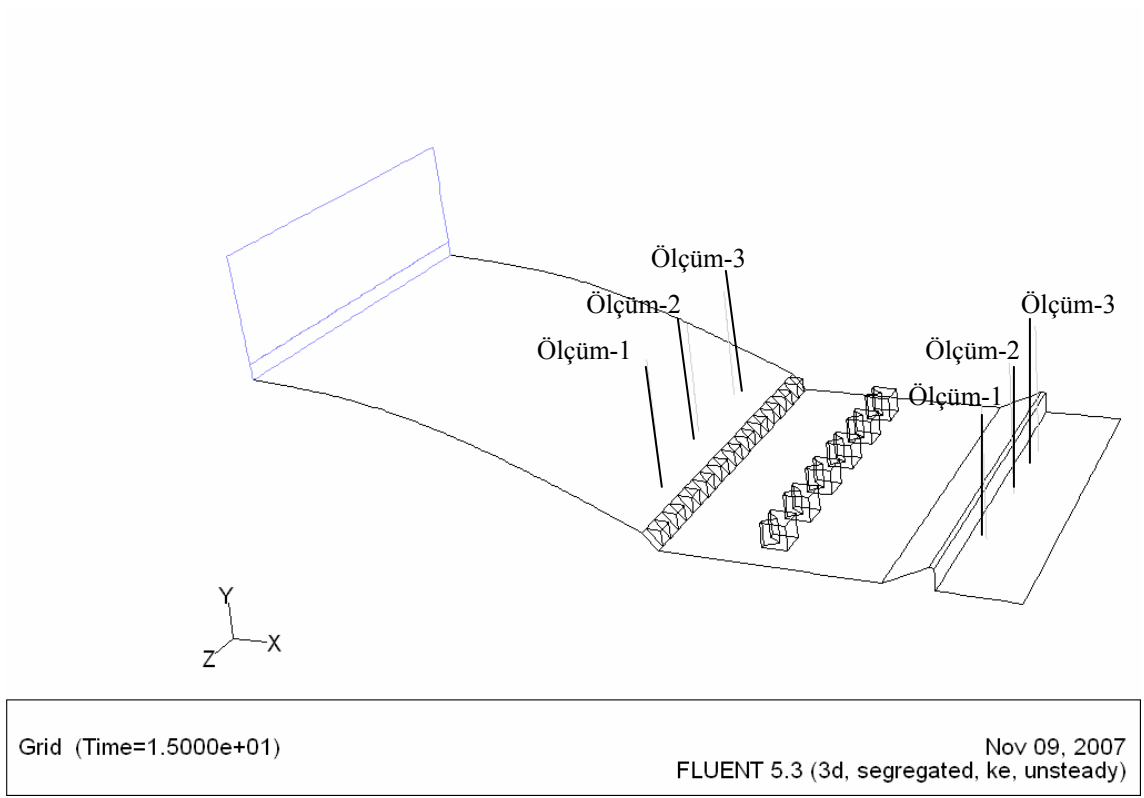


Şekil 6.15. Model 3'ün memba hız grafiği



Şekil 6.16. Model 3'ün mansap hız grafiği

Şekil 6.15'deki grafikte $d=3,53$ m su yüksekliğinde ortalama hızın $V_1=17$ m/s olduğu, Şekil 6.16'da $d=2,5$ m su yüksekliğinde ise ortalama hızın $V_2=9,8$ m/s olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.17. Model 4'ün görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar

KM:0+353,64

Memba ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=15$
 $z_1=7,5$; $z_2=7,5$

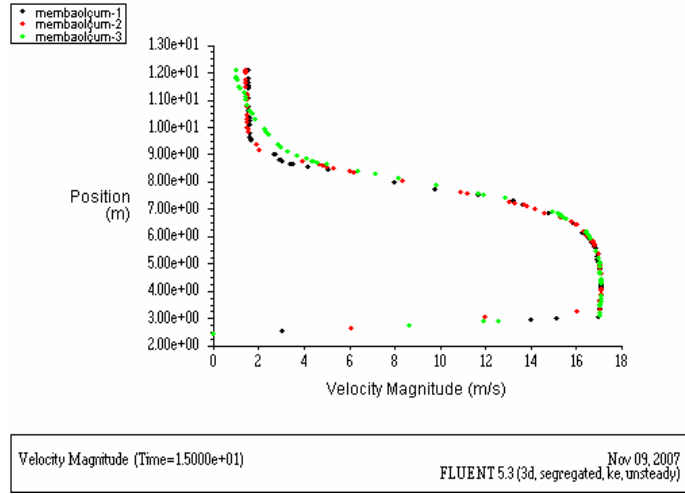
Memba ölçüm 3: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=15$
 $z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Memba ölçüm 2: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=2,03$
 $z_1=15$; $z_2=15$

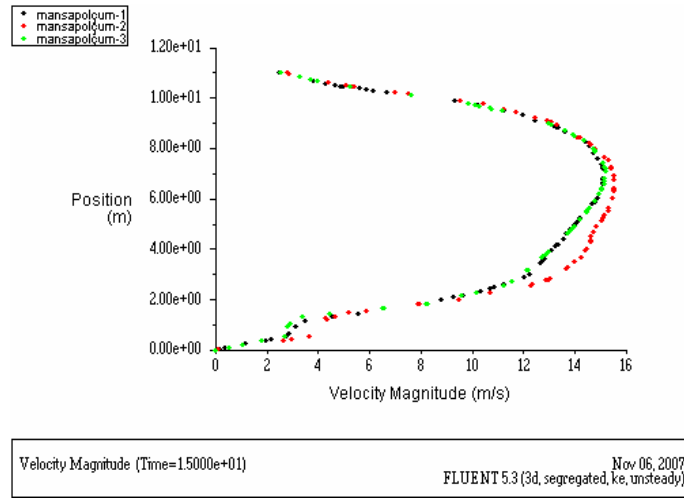
KM:0+380,64

Mansap ölçüm 1: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=7,5$ $z_2=7,5$
Mansap ölçüm 3: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Mansap ölçüm 2: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=15$; $z_1=15$

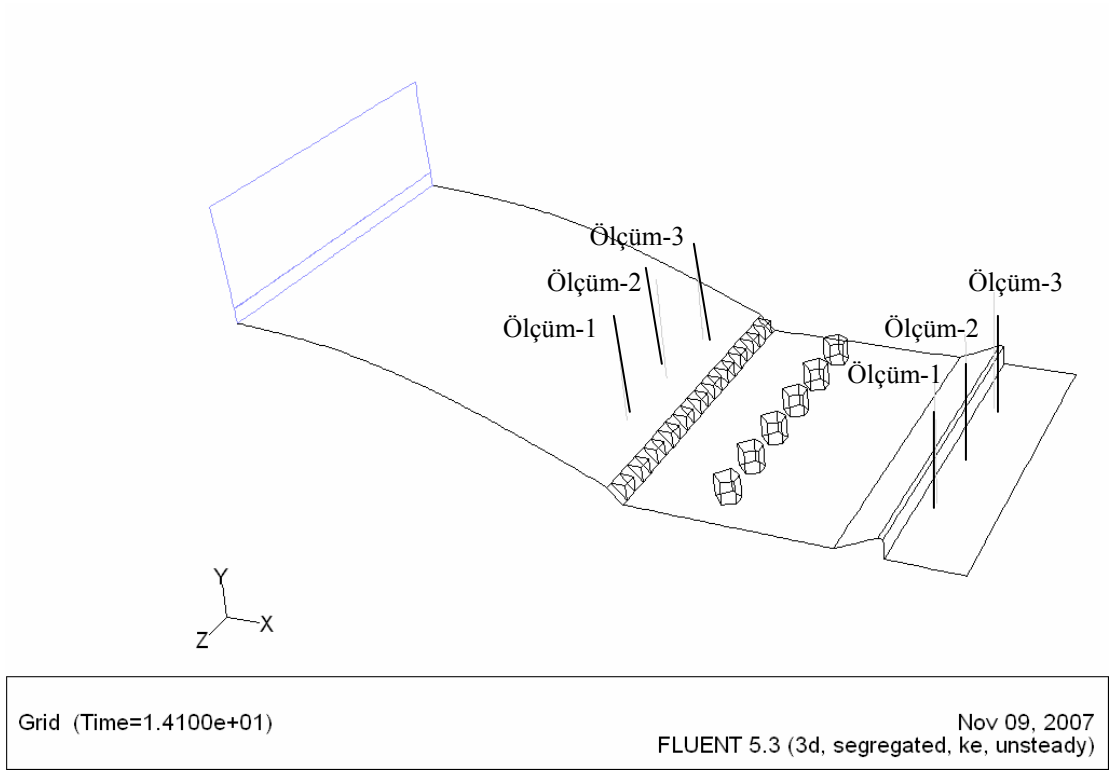


Şekil 6.18. Model 4'ün memba hız grafiği



Şekil 6.19. Model 4'ün mansap hız grafiği

Şekil 6.18'deki grafikte $d=3,53$ m su yüksekliğinde ortalama hızın $V_1=17$ m/s olduğu, Şekil 6.19'da $d=2,5$ m su yüksekliğinde ise ortalama hızın $V_2=10,5$ m/s olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.20. Model 5'in görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar

KM:0+353,64

Memba ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=7,5$; $z_2=7,5$

Memba ölçüm 3: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

KM:0+380,64

Mansap ölçüm 1: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=7,5$ $z_2=7,5$

Mansap ölçüm 3: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Memba ölçüm 2: $x_1=33$; $x_2=33$

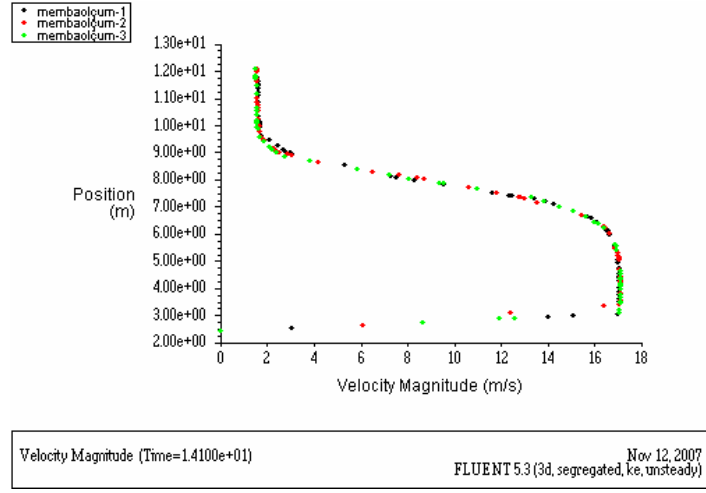
$y_1=2,03$; $y_2=2,03$

$z_1=15$; $z_2=15$

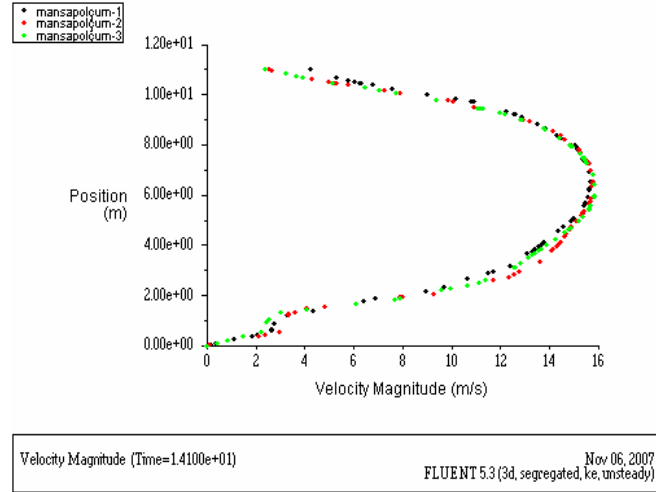
Mansap ölçüm 2: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=15$; $z_2=15$

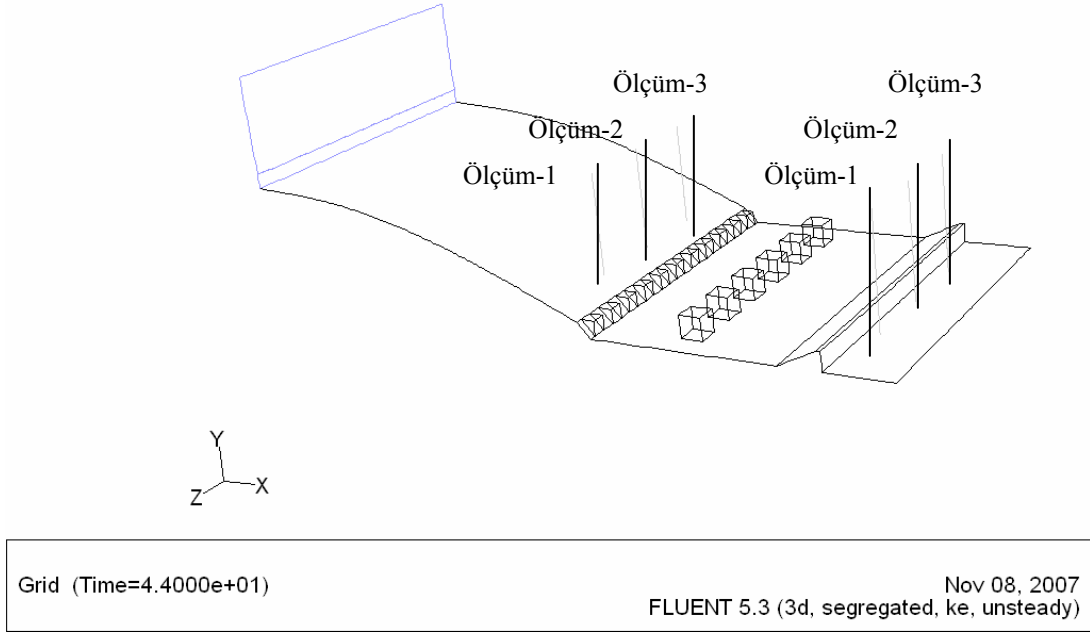


Şekil 6.21. Model 5'in memba hız grafiği



Şekil 6.22. Model 5'in mansap hız grafiği

Şekil 6.21'deki grafikte $d=3,53$ m su yüksekliğinde ortalama hızın $V_1=17$ m/s olduğu, Şekil 6.22'de $d=2,5$ m su yüksekliğinde ise ortalama hızın $V_2=10,4$ m/s olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.23. Model 6'nin görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar

KM:0+353,64

Memba ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=7,5$; $z_2=7,5$

Memba ölçüm 3: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

KM:0+380,64

Mansap ölçüm 1: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=7,5$ $z_2=7,5$

Mansap ölçüm 3: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Memba ölçüm 2: $x_1=33$; $x_2=33$

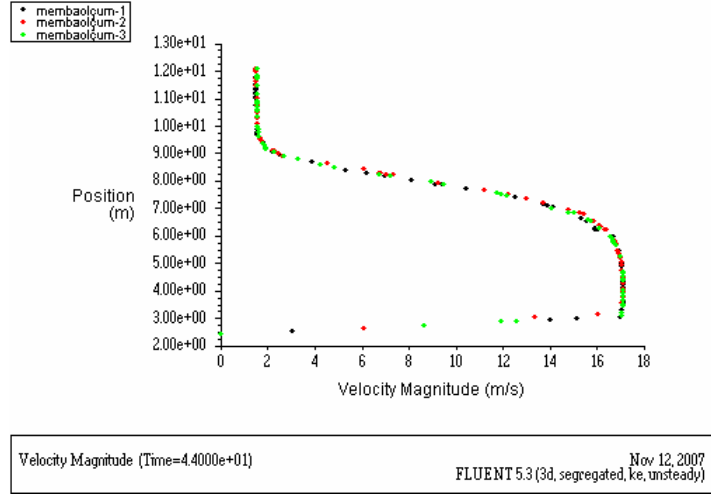
$y_1=2,03$; $y_2=2,03$

$z_1=15$; $z_2=15$

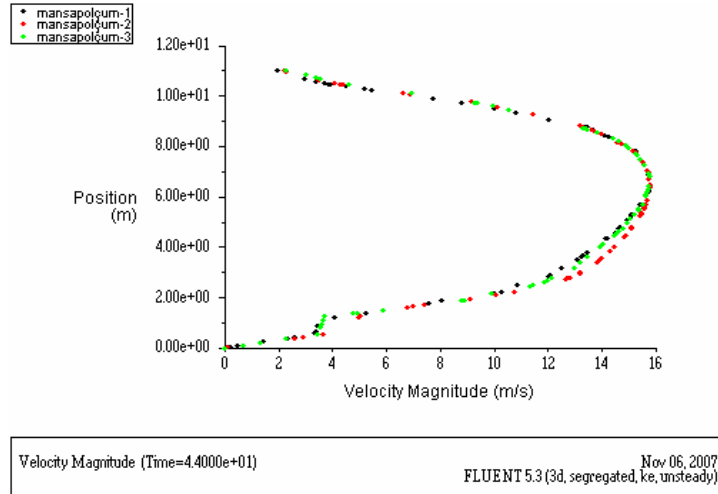
Mansap ölçüm 2: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=15$; $z_1=15$

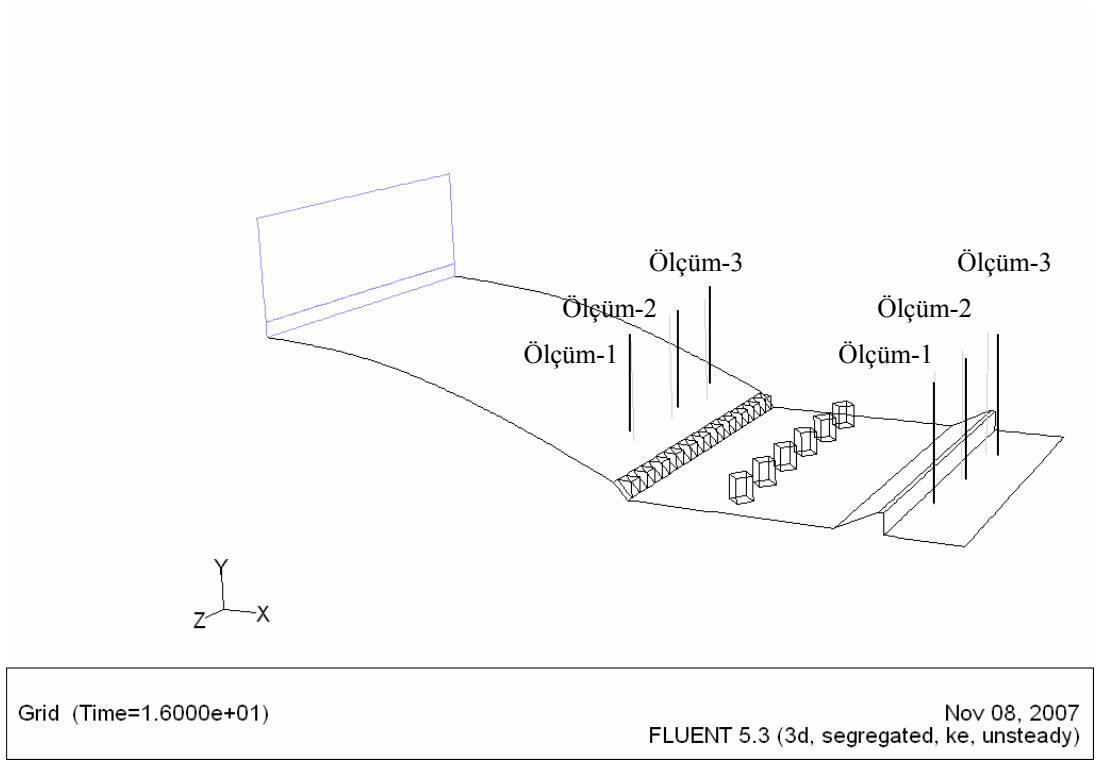


Şekil 6.24. Model 6'nın memba hız grafiği



Şekil 6.25. Model 6'nın mansap hız grafiği

Şekil 6.24'deki grafikte $d=3,53$ m su yüksekliğinde ortalama hızın $V_1=17$ m/s olduğu, Şekil 6.25'de $d=2,5$ m su yüksekliğinde ise ortalama hızın $V_2=12$ m/s olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.26. Model 7'nin görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar

KM:0+353,64

Memba ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=15$
 $z_1=7,5$; $z_2=7,5$

Memba ölçüm 3: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=15$
 $z_1=22,5$; $z_2=22,5$

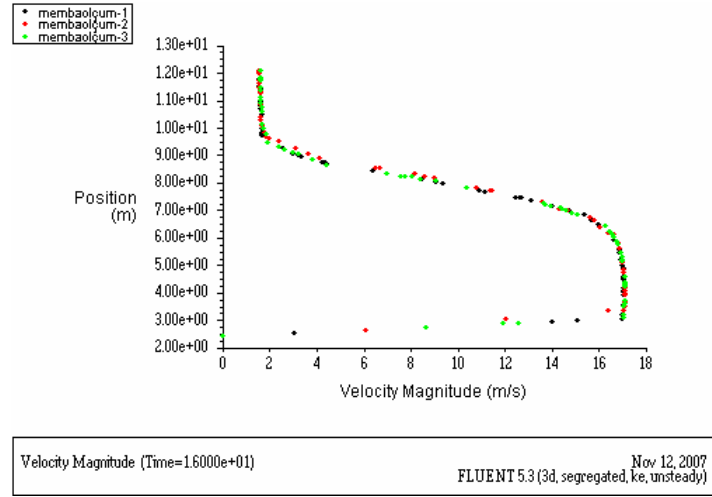
KM:0+380,64

Mansap ölçüm 1: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=7,5$ $z_2=7,5$

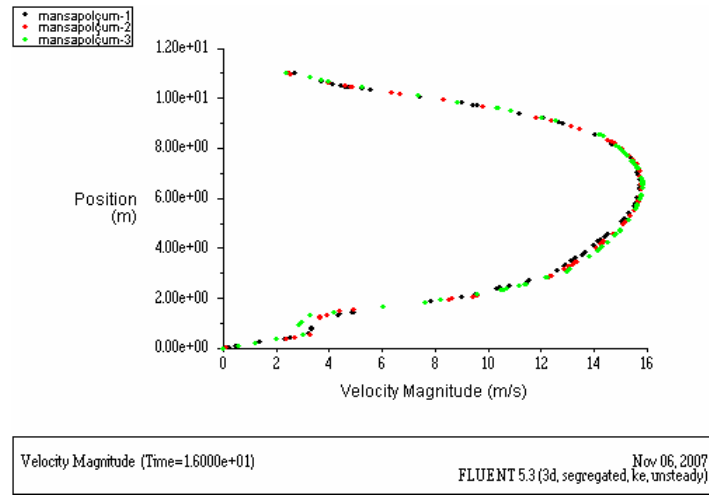
Mansap ölçüm 3: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Memba ölçüm 2: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=2,03$
 $z_1=15$; $z_2=15$

Mansap ölçüm 2: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=15$; $z_2=15$

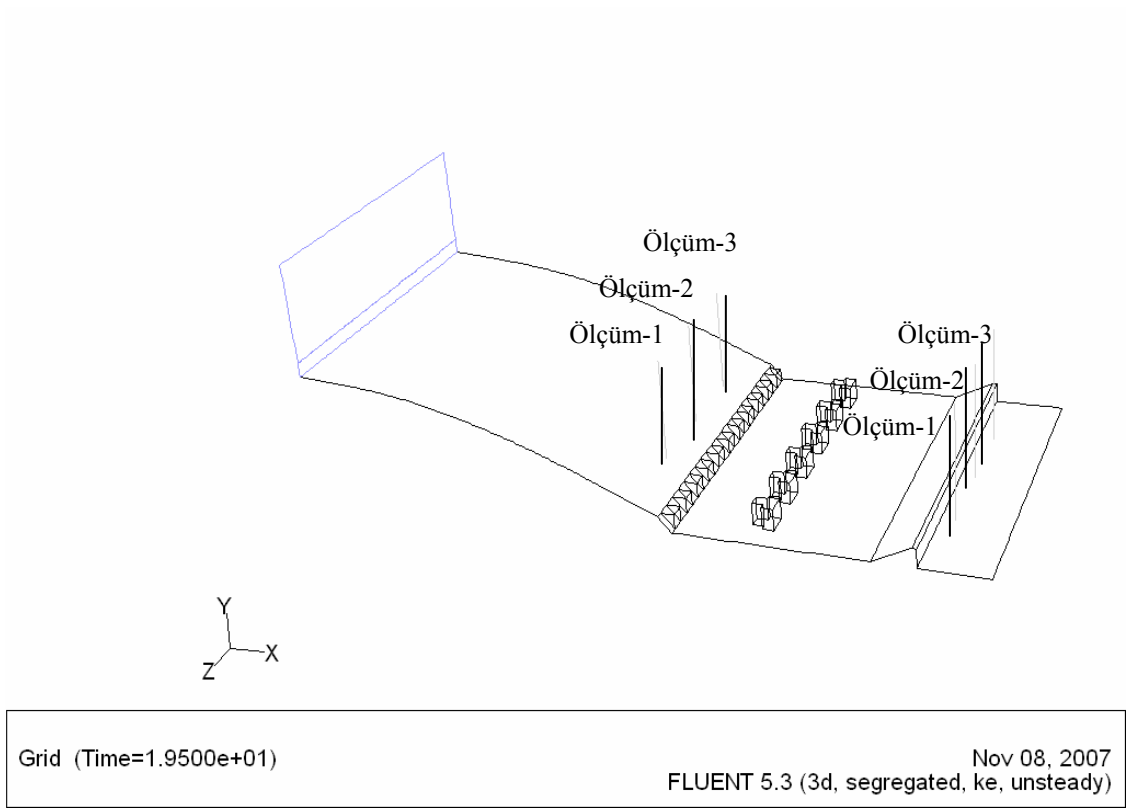


Şekil 6.27. Model 7'nin memba hız grafiği



Şekil 6.28. Model 7'nin eşikten sonraki hız grafiği

Şekil 6.27'deki grafikte $d=3,53$ m su yüksekliğinde ortalama hızın $V_1=17$ m/s olduğu, Şekil 6.28'de $d=2,5$ m su yüksekliğinde ise ortalama hızın $V_2=11,5$ m/s olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.29. Model 8'in görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar

KM:0+353,64

Memba ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=15$
 $z_1=7,5$; $z_2=7,5$

Memba ölçüm 3: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=15$
 $z_1=22,5$; $z_2=22,5$

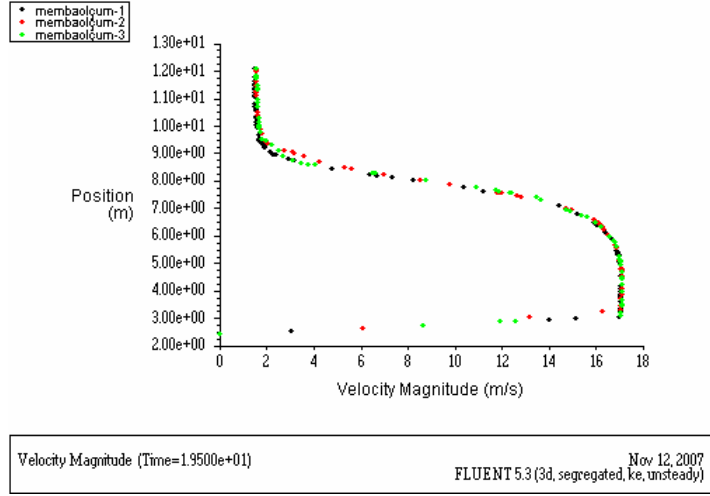
KM:0+380,64

Mansap ölçüm 1: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=7,5$ $z_2=7,5$

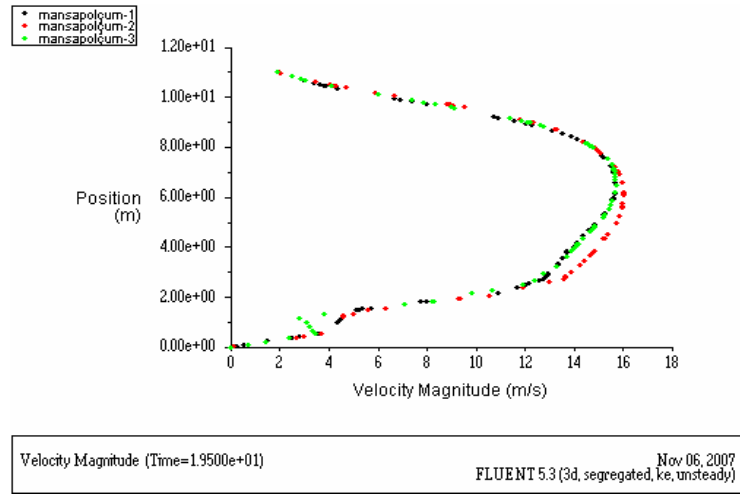
Mansap ölçüm 3: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Memba ölçüm 2: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=2,03$
 $z_1=15$; $z_2=15$

Mansap ölçüm 2: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=15$; $z_2=15$

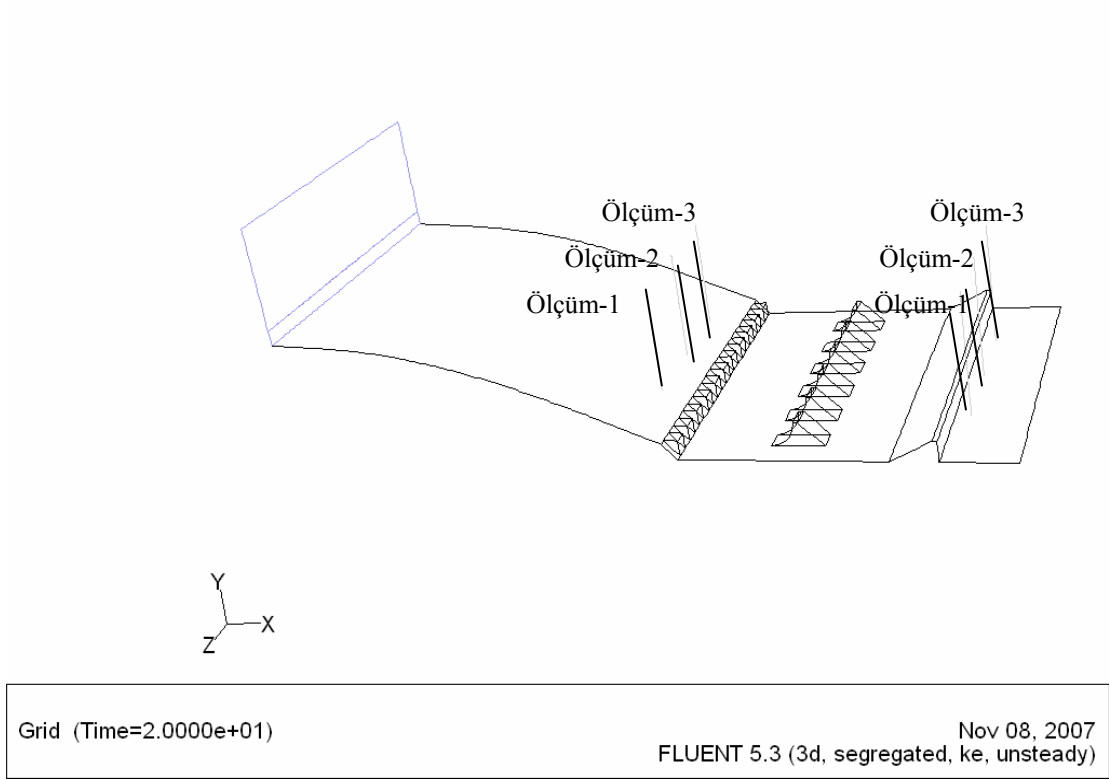


Şekil 6.30. Model 8'in memba hız grafiği



Şekil 6.31. Model 8'in mansap hız grafiği

Şekil 6.30'daki grafikte $d=3,53$ m su yüksekliğinde ortalama hızın $V_1=17$ m/s olduğu, Şekil 6.31'de $d=2,5$ m su yüksekliğinde ise ortalama hızın $V_2=12$ m/s olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.32. Model 9'un görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar

KM:0+353,64

Memba ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=7,5$; $z_2=7,5$

Memba ölçüm 3: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

KM:0+380,64

Mansap ölçüm 1: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=7,5$ $z_2=7,5$

Mansap ölçüm 3: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Memba ölçüm 2: $x_1=33$; $x_2=33$

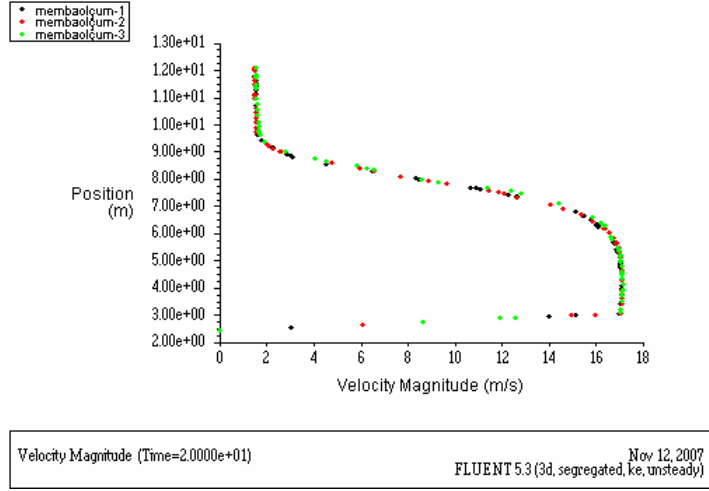
$y_1=2,03$; $y_2=2,03$

$z_1=15$; $z_2=15$

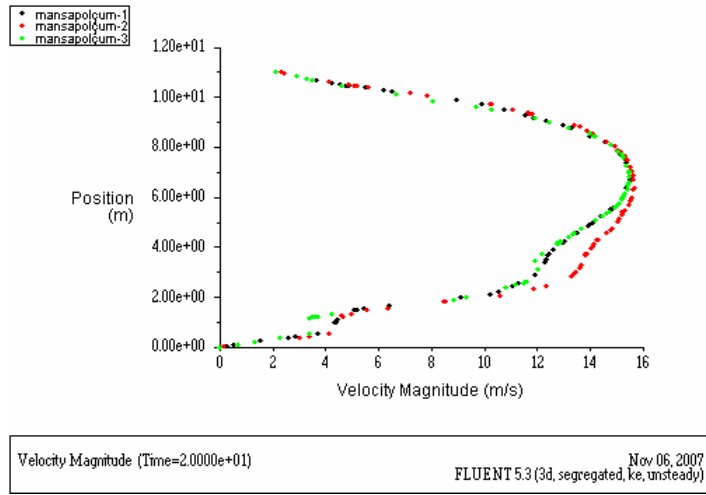
Mansap ölçüm 2: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=15$; $z_1=15$

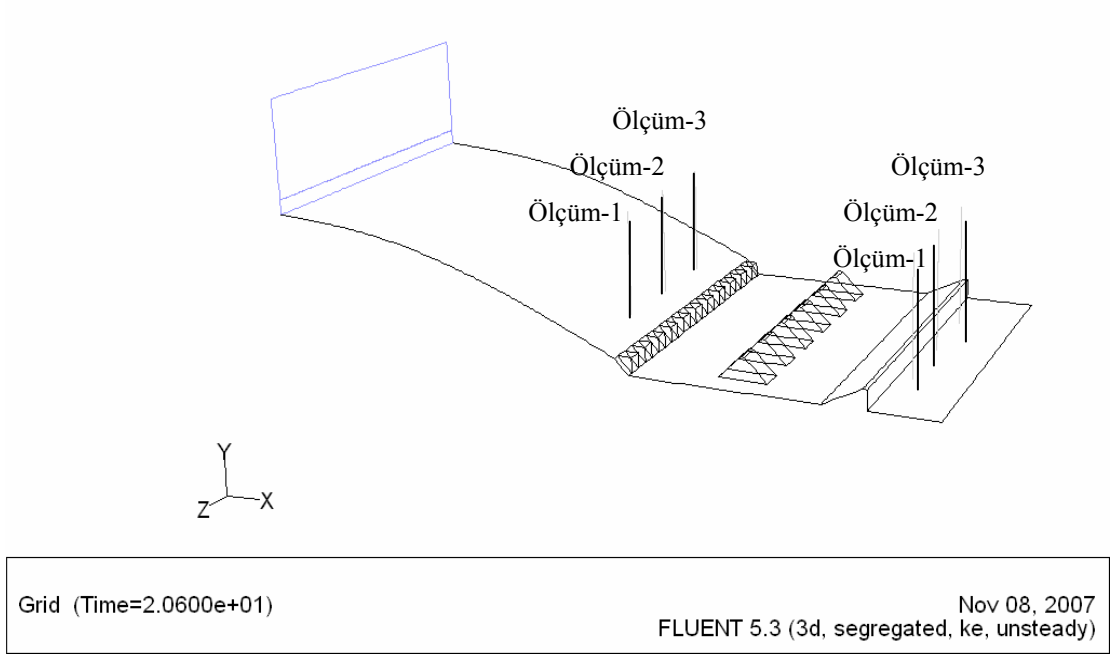


Şekil 6.33. Model 9'un memba hız grafiği



Şekil 6.34. Model 9'un mansap hız grafiği

Şekil 6.33'teki grafikte $d=3,53$ m su yüksekliğinde ortalama hızın $V_1=17$ m/s olduğu, Şekil 6.34'te $d=2,5$ m su yüksekliğinde ise ortalama hızın $V_2=11$ m/s olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.35. Model 10'un görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar

KM:0+353,64

Memba ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=15$
 $z_1=7,5$; $z_2=7,5$

Memba ölçüm 3: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=15$
 $z_1=22,5$; $z_2=22,5$

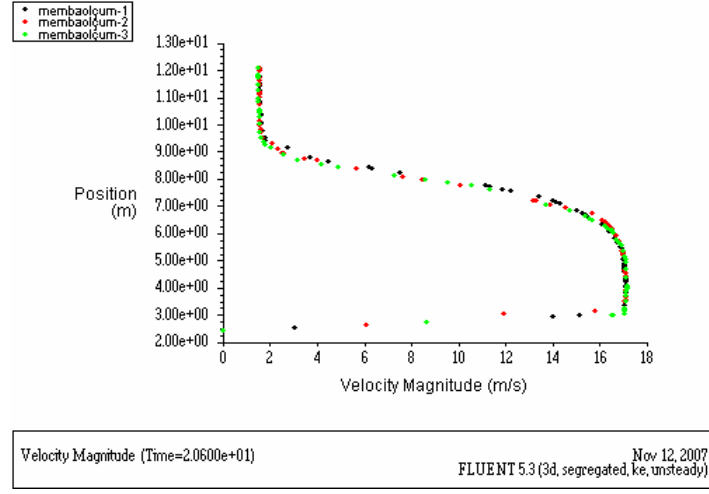
KM:0+380,64

Mansap ölçüm 1: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=7,5$ $z_2=7,5$

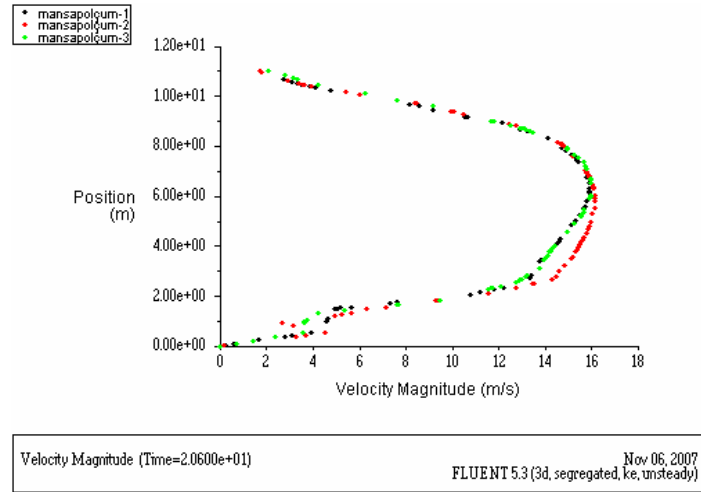
Mansap ölçüm 3: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Memba ölçüm 2: $x_1=33$; $x_2=33$
 $y_1=2,03$; $y_2=2,03$
 $z_1=15$; $z_2=15$

Mansap ölçüm 2: $x_1=60$; $x_2=60$
 $y_1=0$; $y_2=15$
 $z_1=15$; $z_2=15$

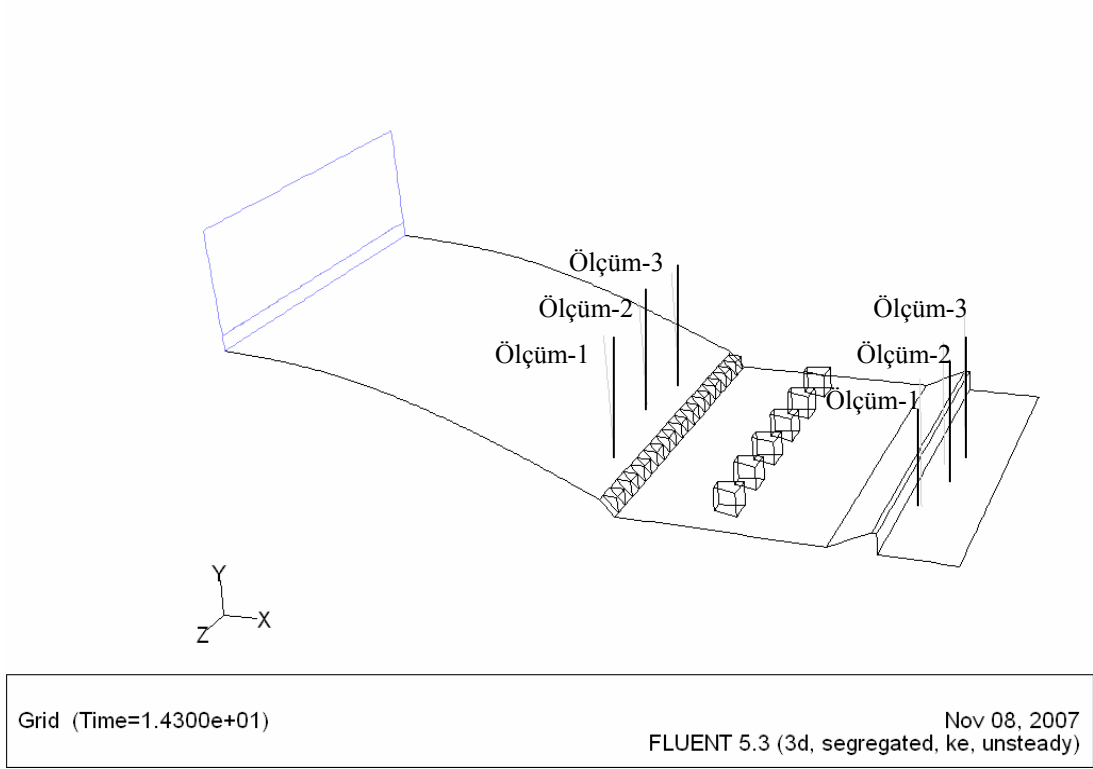


Şekil 6.36. Model 10'un memba hız grafiği



Şekil 6.37. Model 10'un mansap hız grafiği

Şekil 6.36'daki grafikte $d=3,53$ m su yüksekliğinde ortalama hızın $V_1=17$ m/s olduğu, Şekil 6.37'de $d=2,5$ m su yüksekliğinde ise ortalama hızın $V_2=12,5$ m/s olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.38. Model 11'in görünümü ve ölçüm alınan koordinatlar

KM:0+353,64

Memba ölçüm 1: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=7,5$; $z_2=7,5$

Memba ölçüm 3: $x_1=33$; $x_2=33$

$y_1=2,03$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

KM:0+380,64

Mansap ölçüm 1: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=7,5$; $z_2=7,5$

Mansap ölçüm 3: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=22,5$; $z_2=22,5$

Memba ölçüm 2: $x_1=33$; $x_2=33$

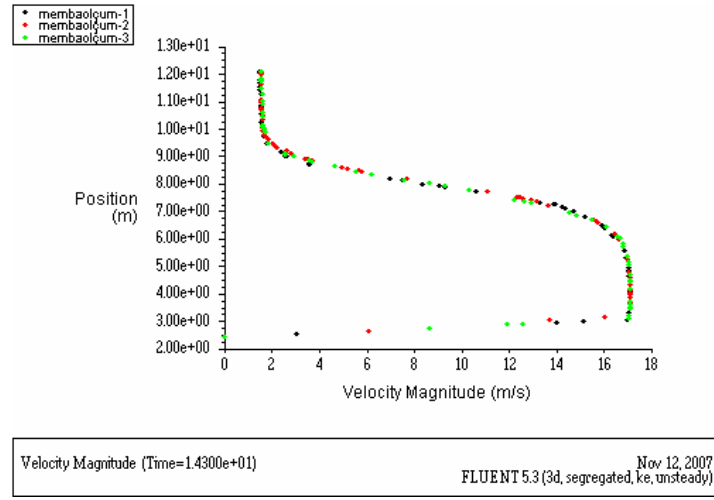
$y_1=2,03$; $y_2=2,03$

$z_1=15$; $z_2=15$

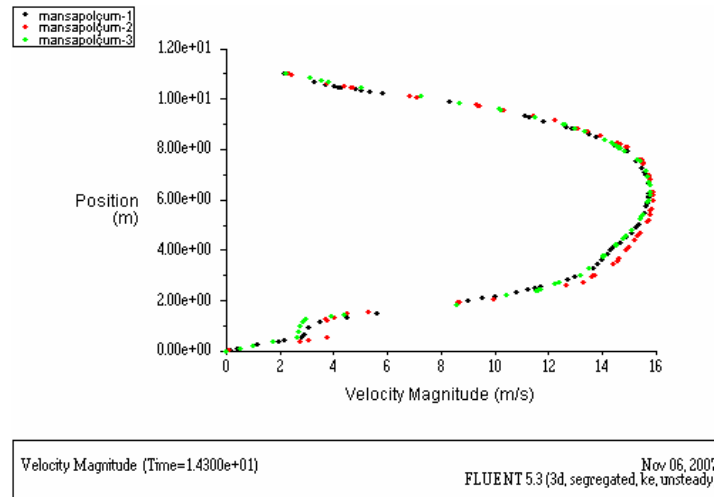
Mansap ölçüm 2: $x_1=60$; $x_2=60$

$y_1=0$; $y_2=15$

$z_1=15$; $z_2=15$



Şekil 6.39. Model 11'in memba hız grafiği

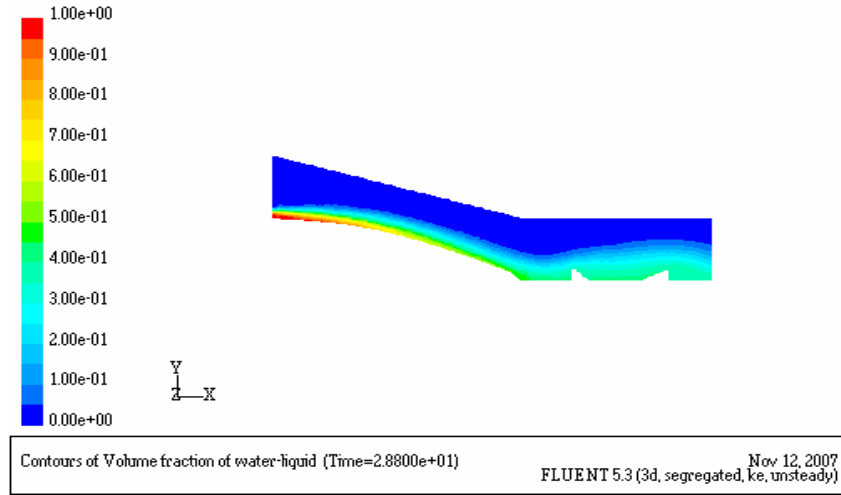


Şekil 6.40. Model 11'in mansap hız grafiği

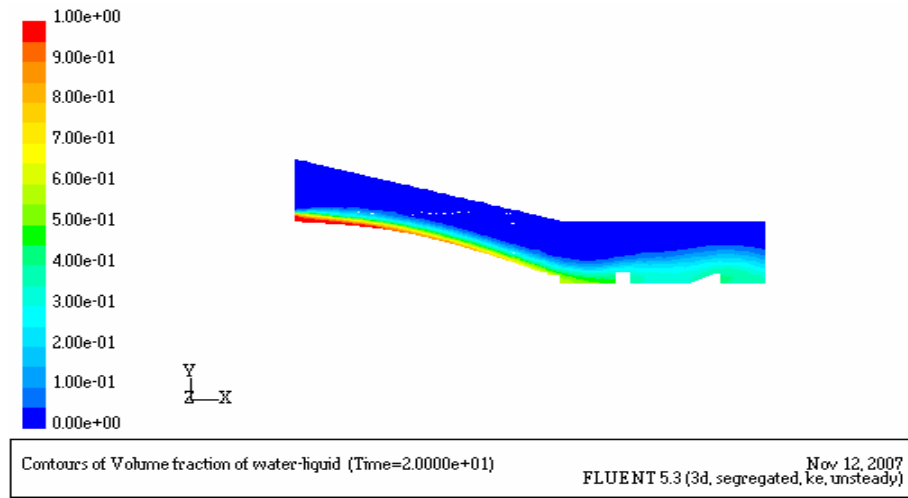
Şekil 6.39'daki grafikte $d=3,53$ m su yüksekliğinde ortalama hızın $V_1=17$ m/s olduğu, Şekil 6.40'ta $d=2,5$ m su yüksekliğinde ise ortalama hızın $V_2=11,5$ m/s olduğu tespit edilmiştir.

6.2. Enerji Kırıcı Havuza Ait Faz, Hız ve Basınç Görünümleri

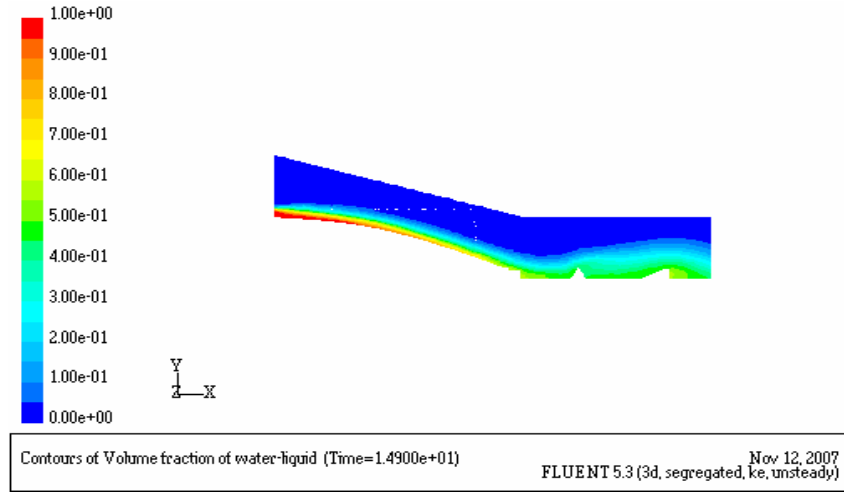
Aşağıdaki şekillerde, düşüm havuzunda akım tamamlandıktan sonra $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lık debi için faz görünümüleri verilmiştir. Bu şekiller için modellerin tam ortasından kesitler alınmıştır.



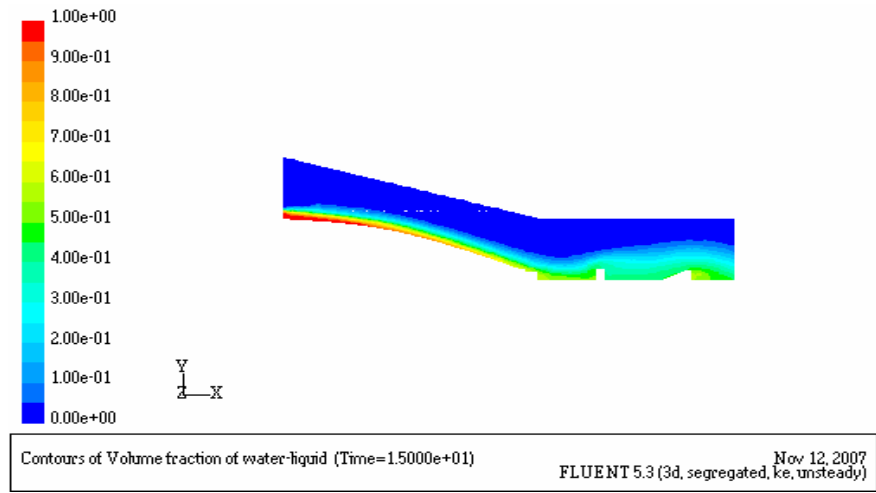
Şekil 6.41. Model 1 'e ait faz görünümü



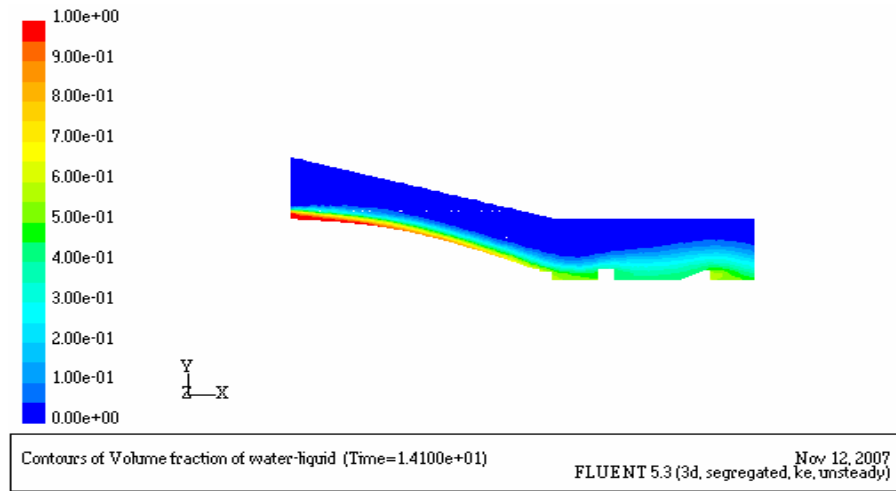
Şekil 6.42. Model 2 'ye ait faz görünümü



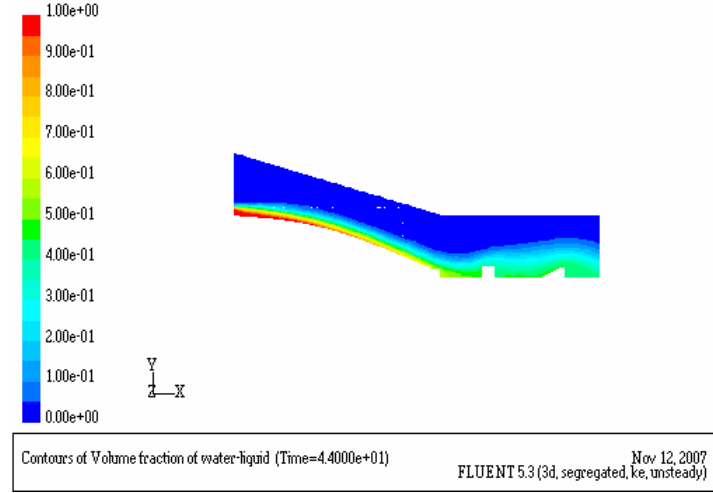
Şekil 6.43. Model 3 'e ait faz görünümü



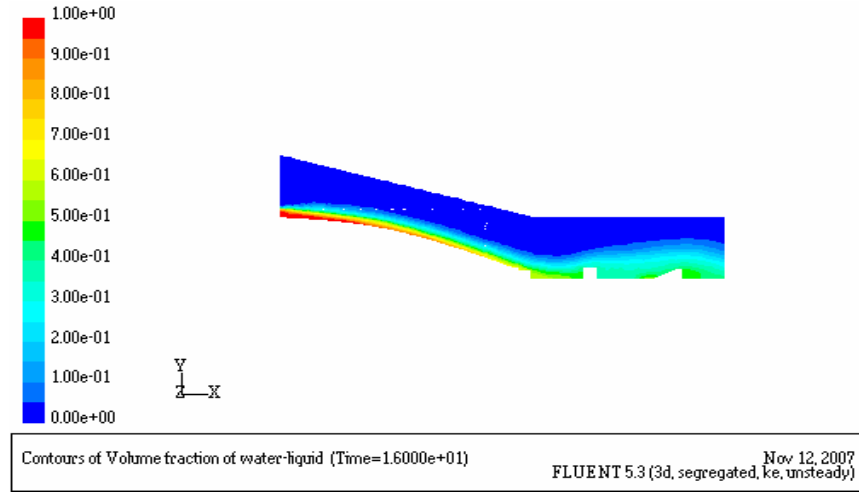
Şekil 6.44. Model 4 'e ait faz görünümü



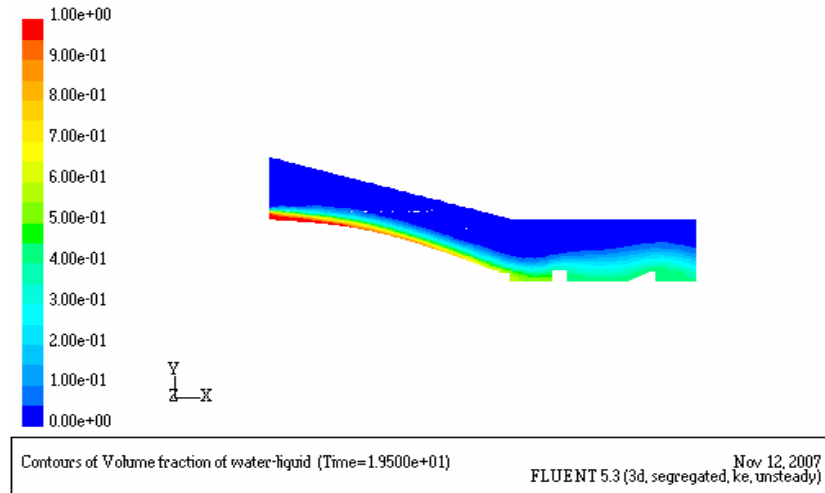
Şekil 6.45. Model 5 'e ait faz görünümü



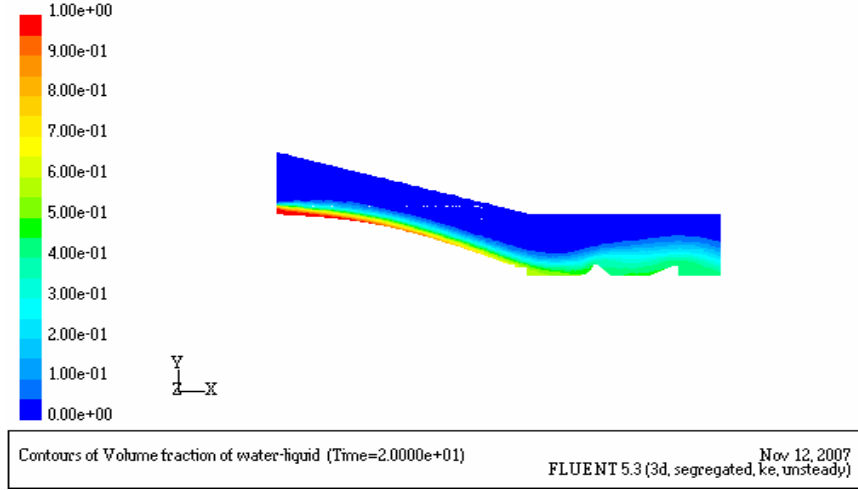
Şekil 6.46. Model 6 'ya ait faz görünümü



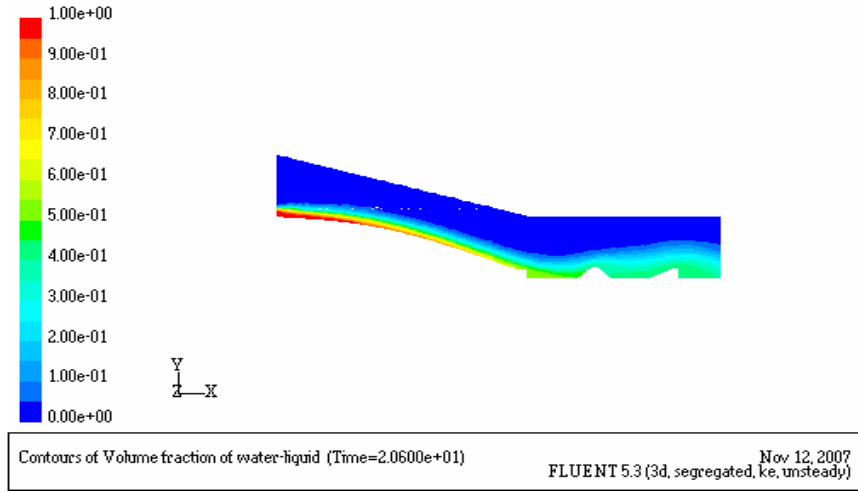
Şekil 6.47. Model 7 'ye ait faz görünümü



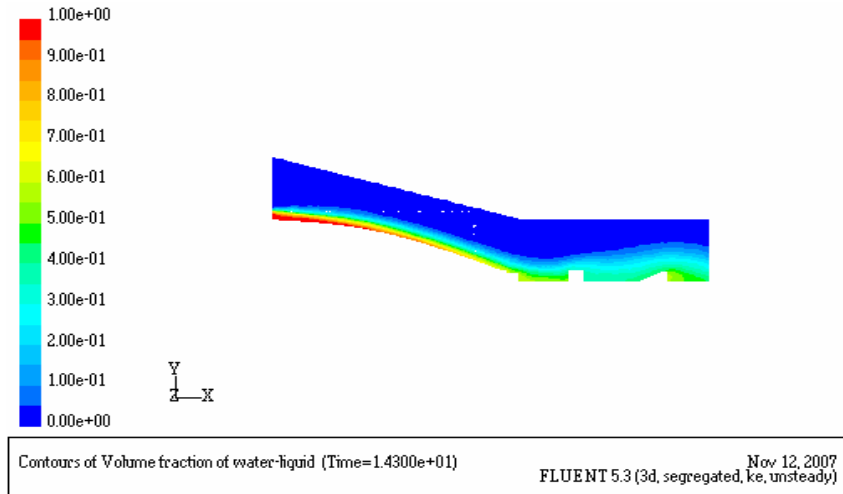
Şekil 6.48. Model 8 'e ait faz görünümü



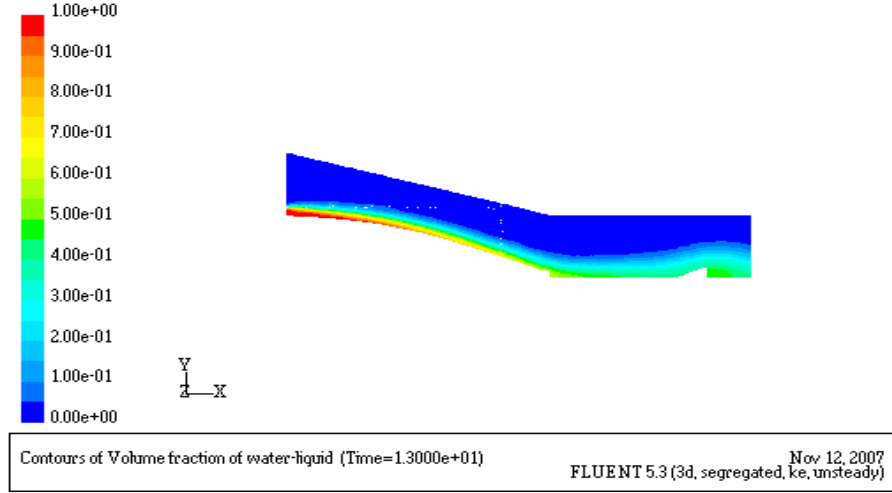
Şekil 6.49. Model 9 'a ait faz görünümü



Şekil 6.50. Model 10 'a ait faz görünümü



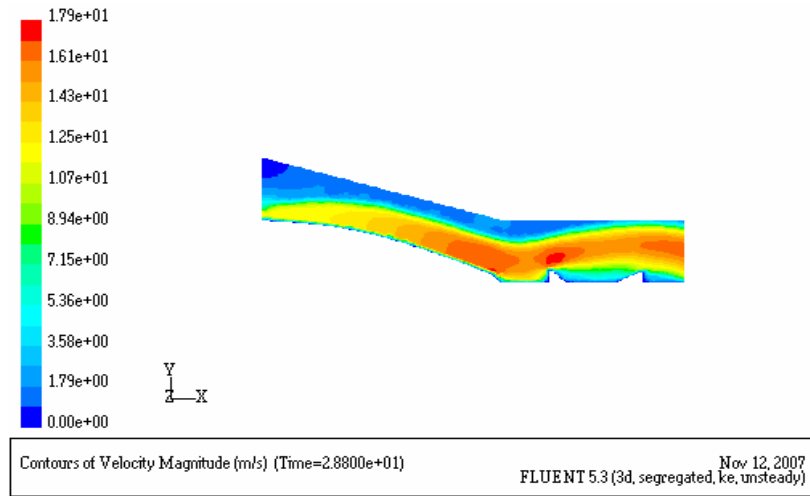
Şekil 6.51. Model 11 'e ait faz görünümü



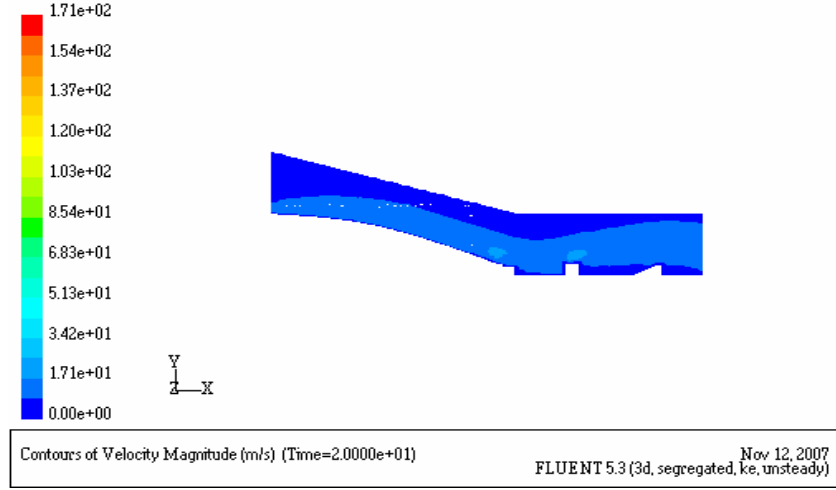
Şekil 6.52. Bloksuz havuza ait faz görünümü

Şekilde görüldüğü gibi akımlar düzgün bir şekilde tamamlanmıştır ve modellerde herhangi bir sorun yaşanmamıştır.

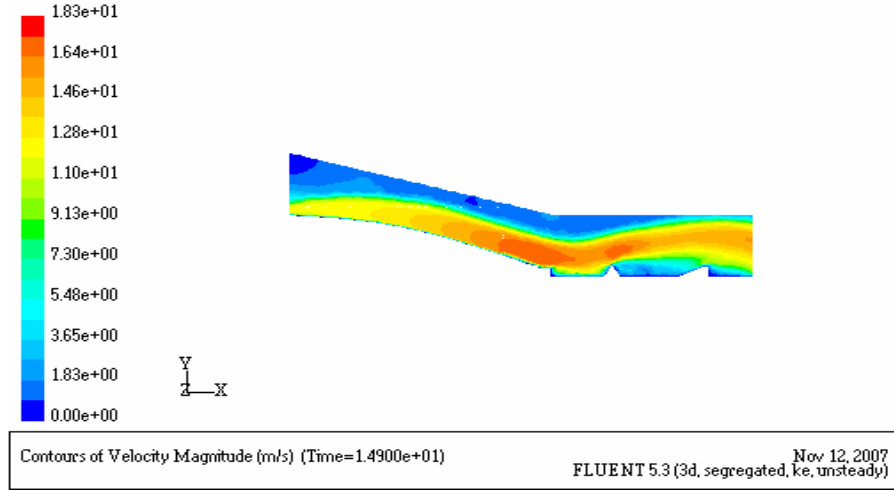
Modellerdeki hız görünümünü verecek olursak;



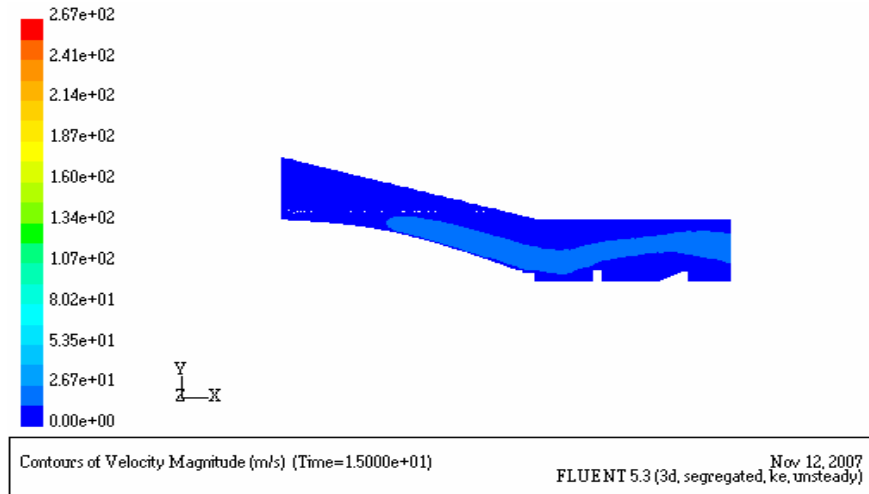
Şekil 6.53. Model 1'e it hız görünümü



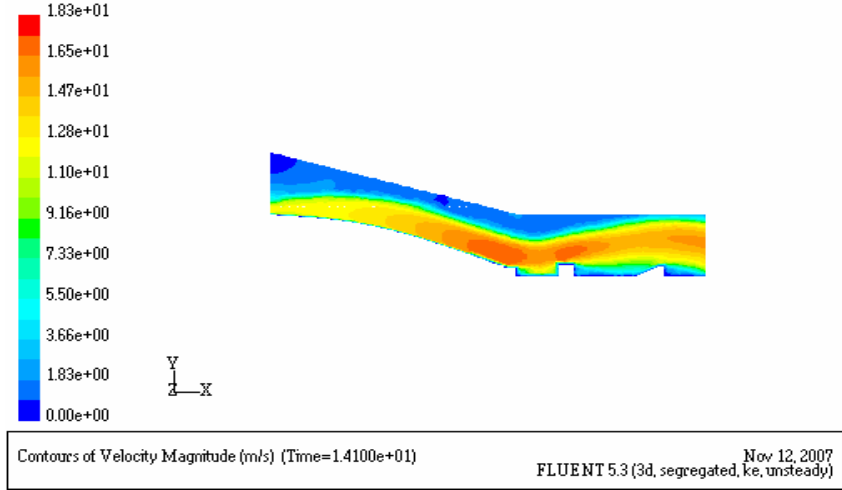
Şekil 6.54. Model 2'ye ait hız görünümü



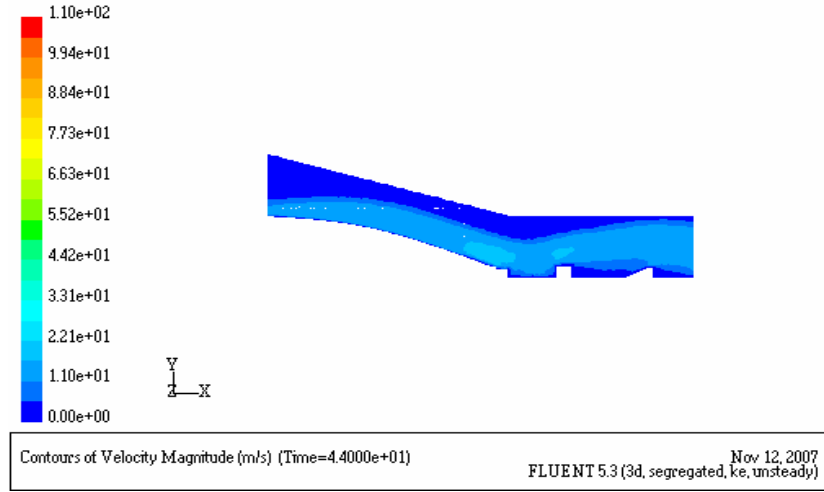
Şekil 6.55. Model 3'e ait hız görünümü



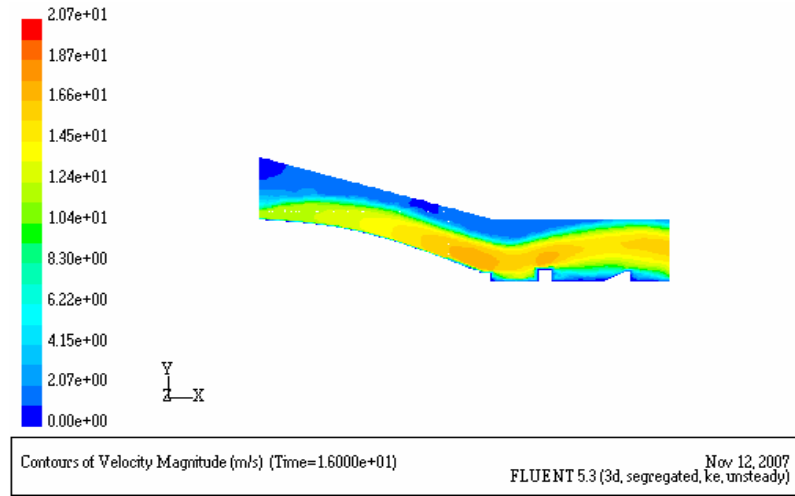
Şekil 6.56. Model 4'e ait hız görünümü



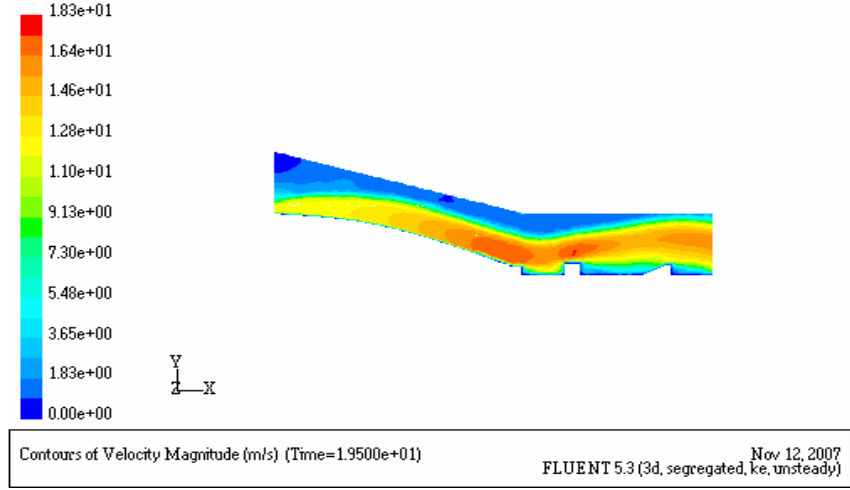
Şekil 6.57. Model 5'e ait hız görünümü



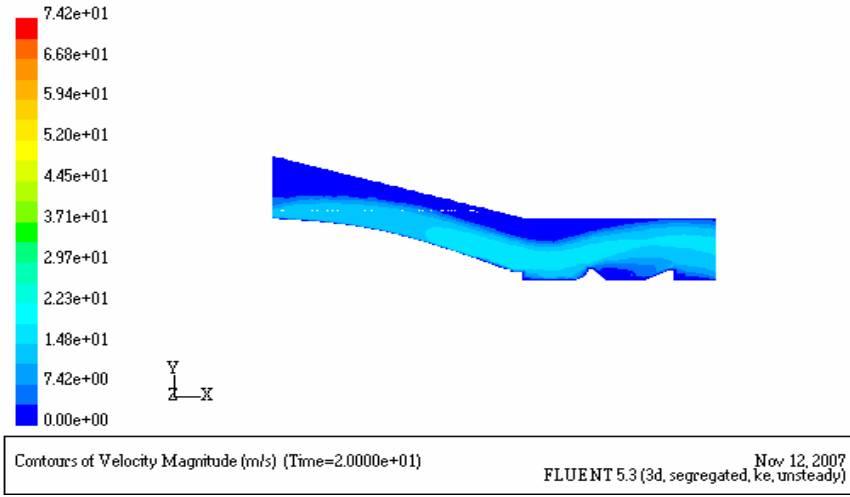
Şekil 6.58. Model 6'ya ait hız görünümü



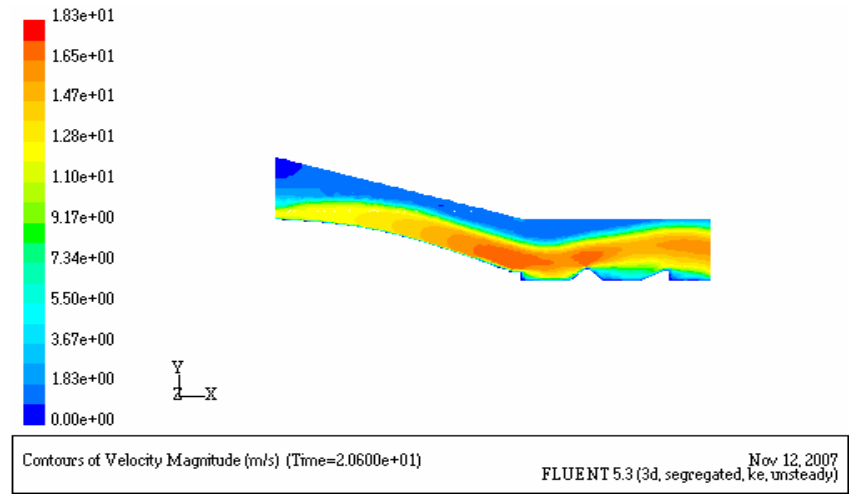
Şekil 6.59. Model 7'ye ait hız görünümü



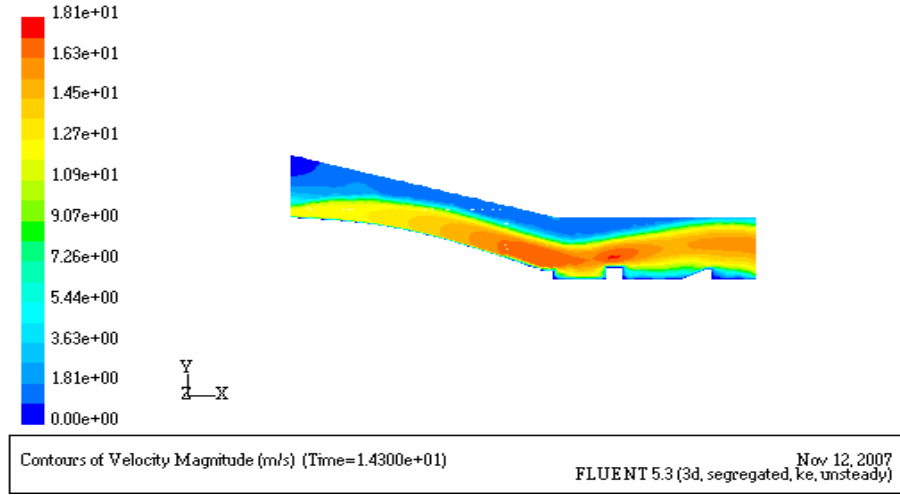
Şekil 6.60. Model 8'e ait hız görünümü



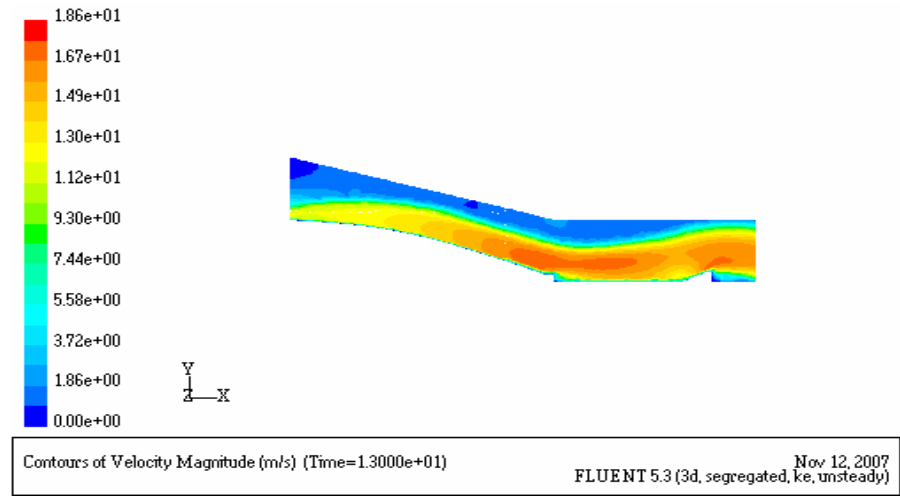
Şekil 6.61. Model 9'a ait hız görünümü



Şekil 6.62. Model 10'a ait hız görünümü

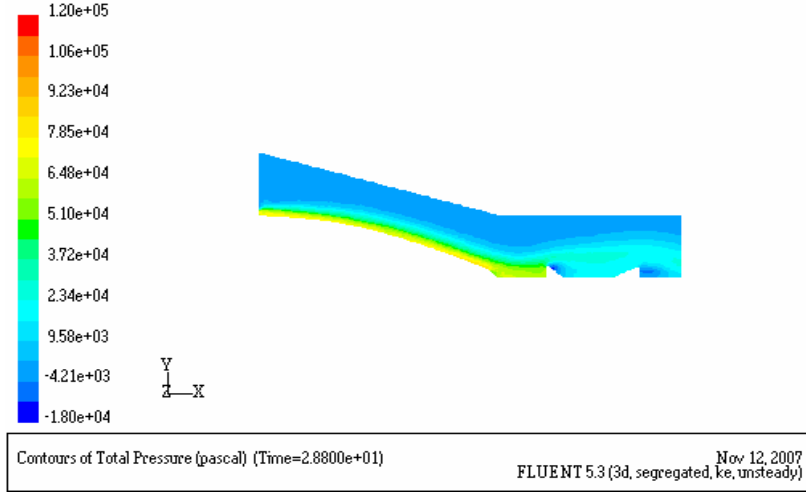


Şekil 6.63. Model 11'e ait hız görünümü

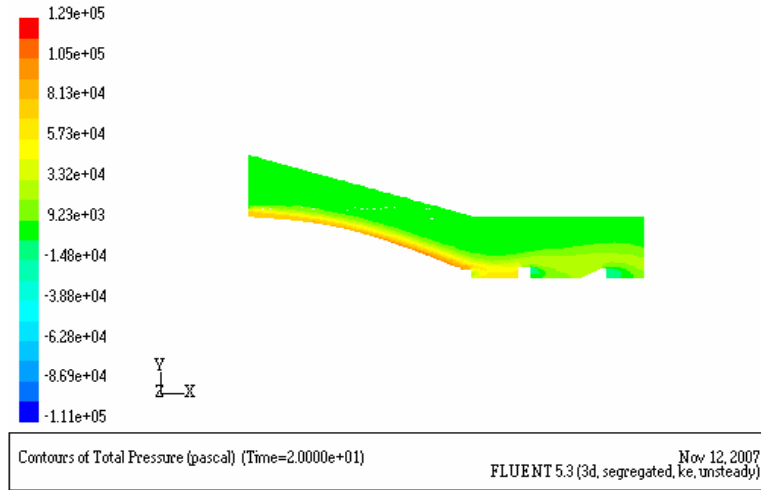


Şekil 6.64. Bloksuz havuza ait hız görünümü

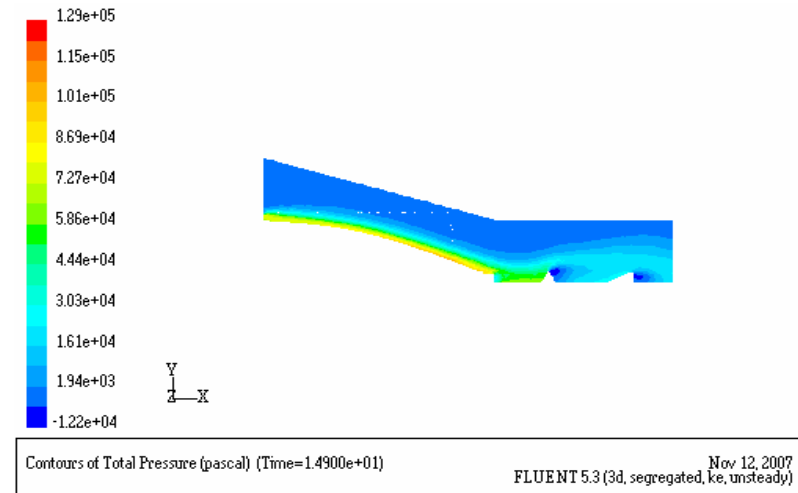
Modellerdeki basınç görünümleri;



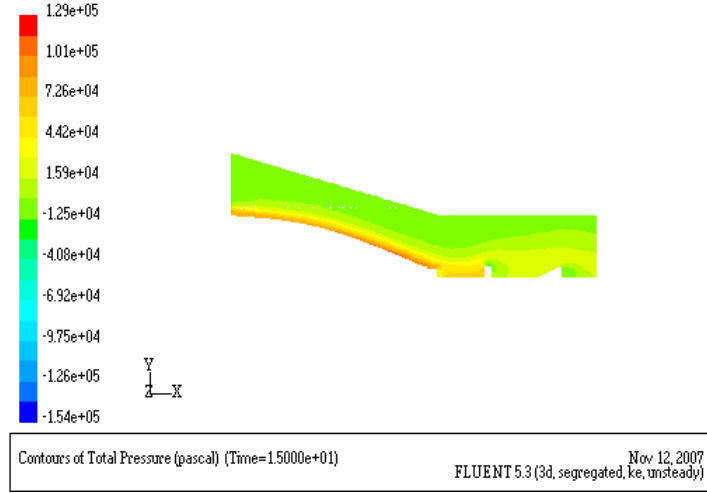
Şekil 6.65. Model 1'e ait toplam basınç görünümü



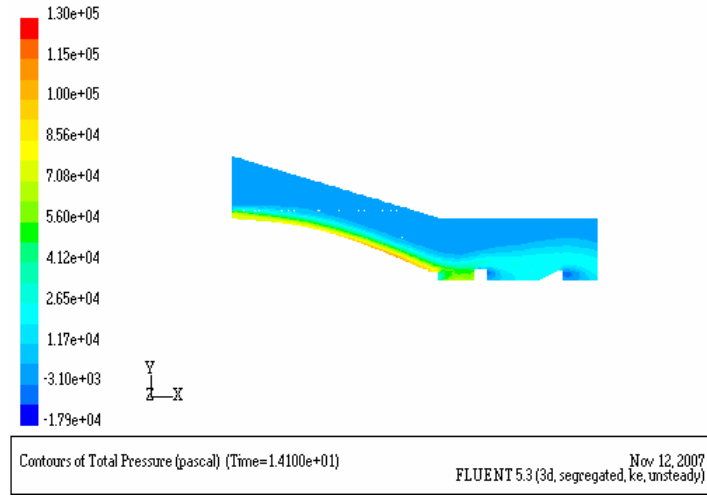
Şekil 6.66. Model 2'ye ait toplam basınç görünümü



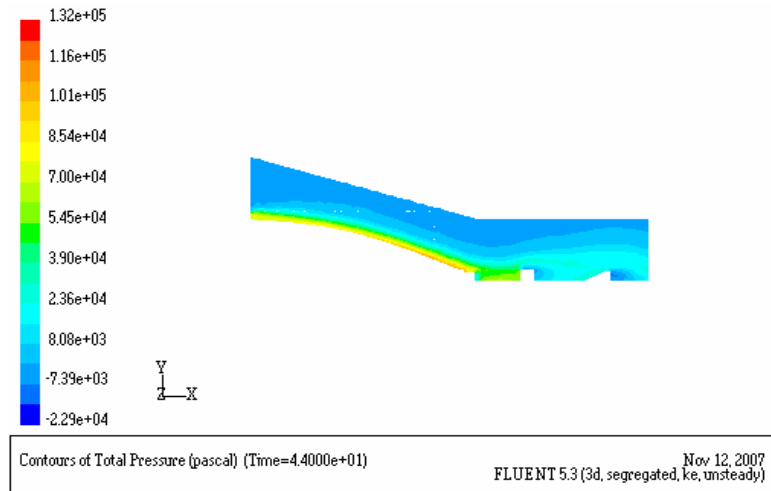
Şekil 6.67. Model 3'e ait toplam basınç görünümü



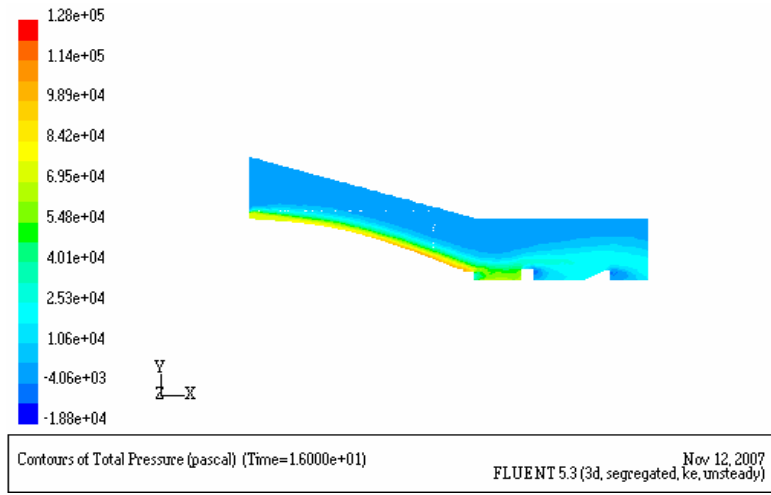
Şekil 6.68. Model 4'e ait toplam basınç görünümü



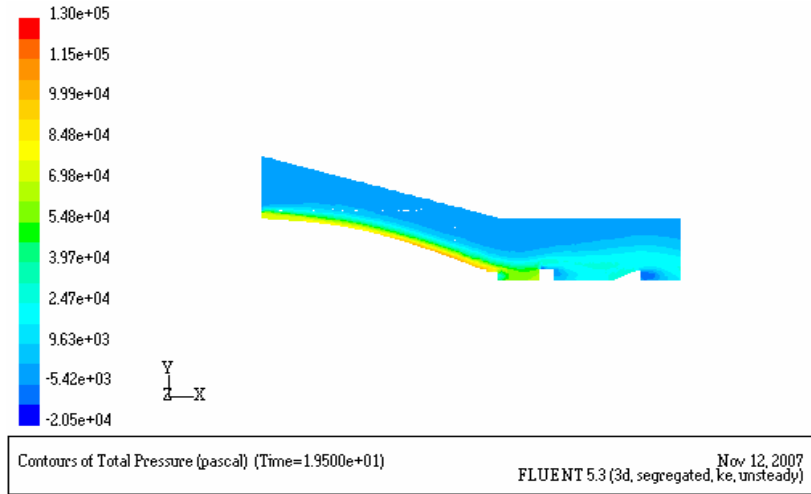
Şekil 6.69. Model 5'e ait toplam basınç görünümü



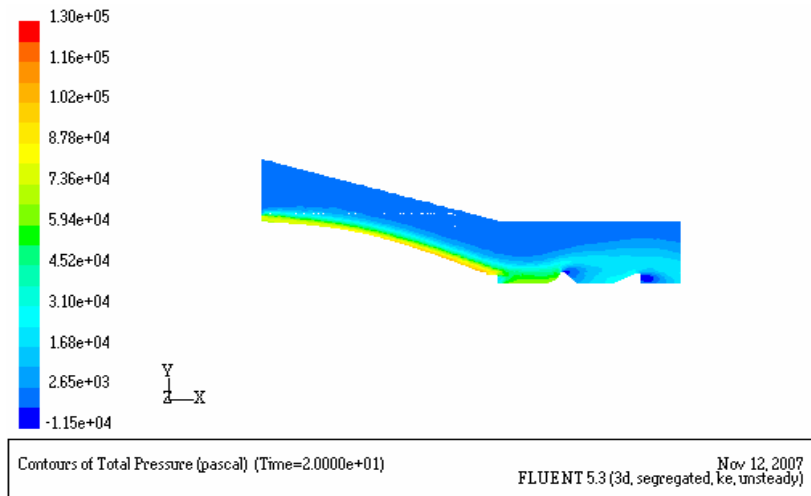
Şekil 6.70. Model 6'ya ait toplam basınç görünümü



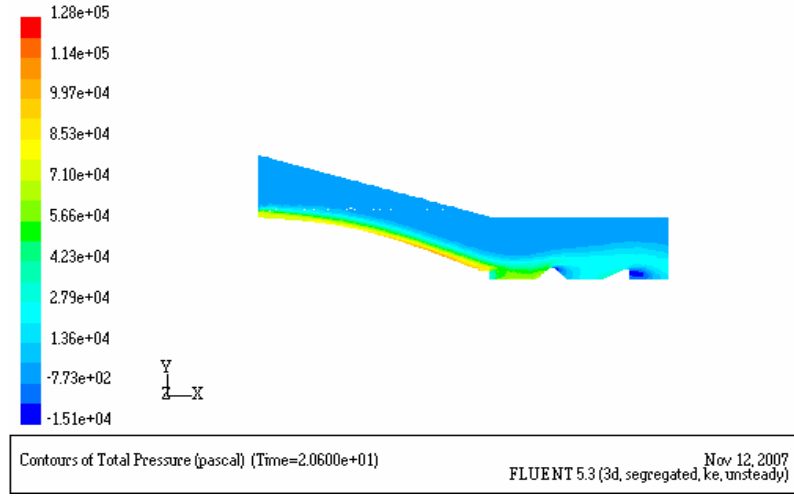
Şekil 6.71. Model 7'ye ait toplam basınç görünümü



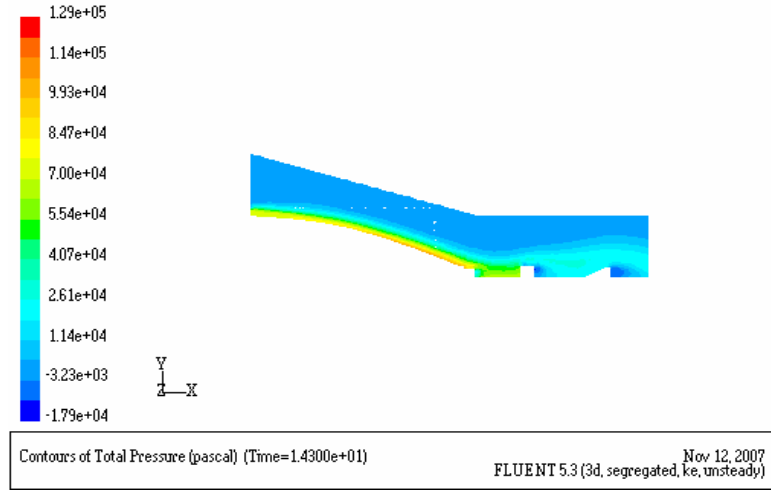
Şekil 6.72. Model 8'e ait toplam basınç görünümü



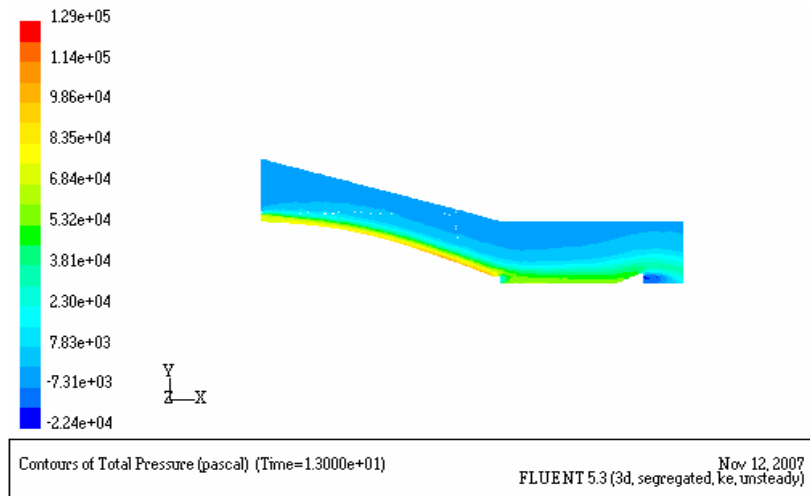
Şekil 6.73. Model 9'a ait toplam basınç görünümü



Şekil 6.74. Model 10'a ait toplam basınç görünümü



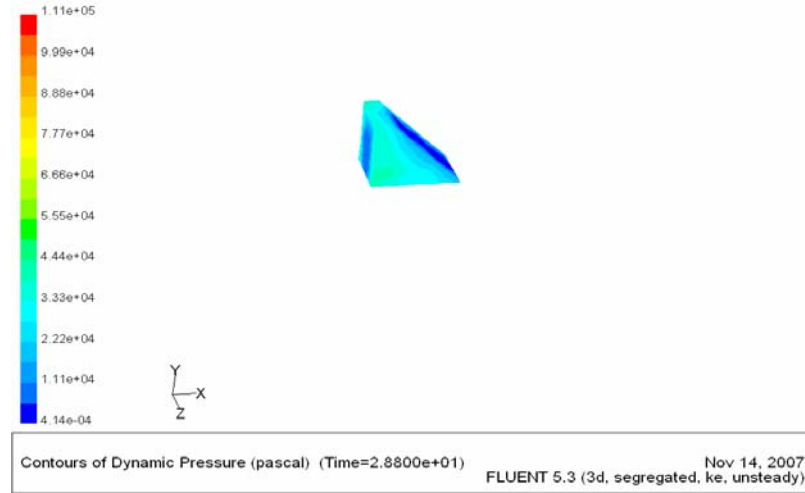
Şekil 6.75. Model 11'e ait toplam basınç görünümü



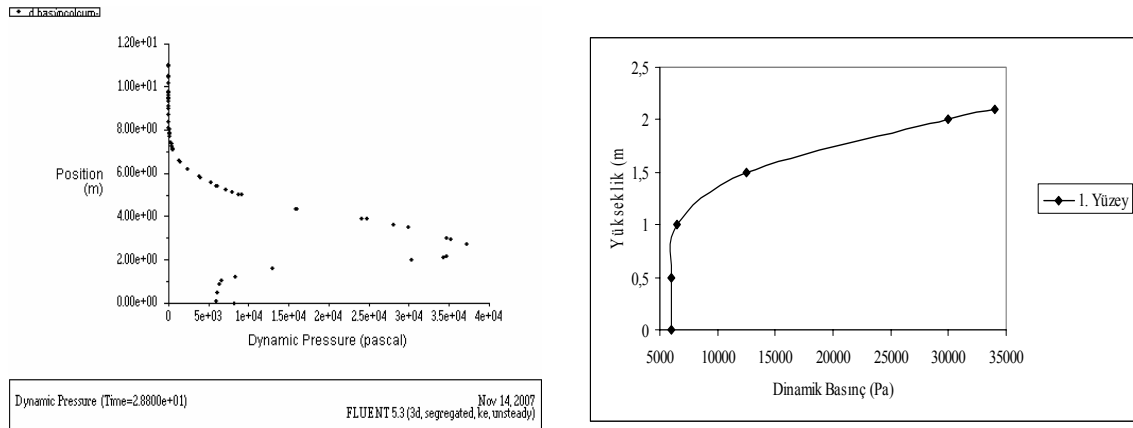
Şekil 6.76. Bloksuz havuza ait toplam basınç görünümü

Modellerdeki dinamik basınç görünümüleri:

Blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde oluşturulan ölçümlere göre dinamik basınçlar tespit edilmiştir. Aşağıdaki şekil ve grafikler her modelde tek bir blok için oluşturulmuştur.



Şekil 6.77. Model 1’deki bloğa ait dinamik basınç görünümü



(a)

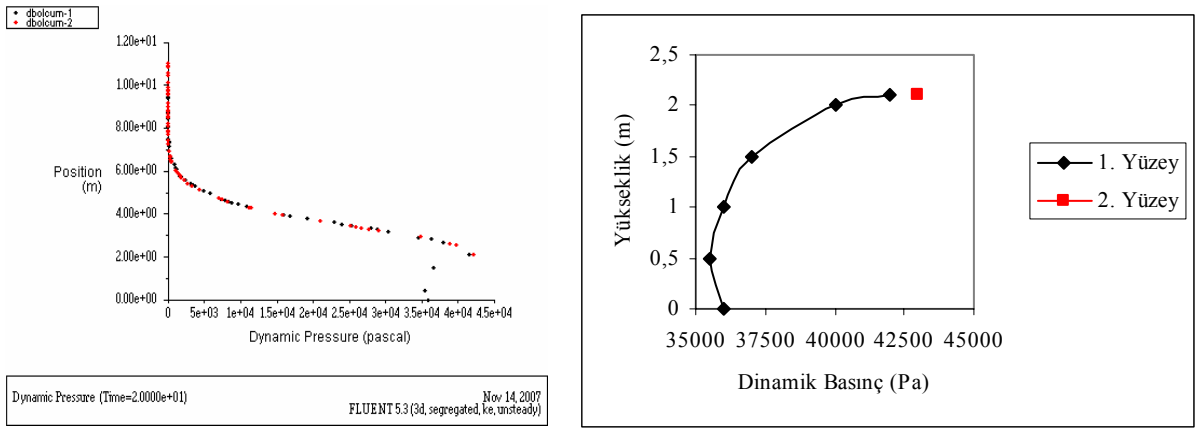
(b)

Şekil 6.78. Model 1 ‘e ait dinamik basınç grafiği

Model 1’deki bloklarda akım yönüne bakan bir yüzey bulunmaktadır. Şekil 6.78 (a)’daki grafikte enerji kırıcı bloklar üzerinde alınan ölçümlere göre 11 m ye kadar olan dinamik basınçlar görülmektedir. Enerji kırıcı blok yüksekliği $h=2,1$ m olduğundan Şekil 6.78 (b)’de bu yükseklik dikkate alınarak yeniden grafik oluşturulmuştur. Grafiğe göre, blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde aritmetik ortalama olarak $P=15833$ Pa değerinde dinamik basınç oluşmaktadır.



Şekil 6.79. Model 2'deki bloğa ait dinamik basınç görünümü

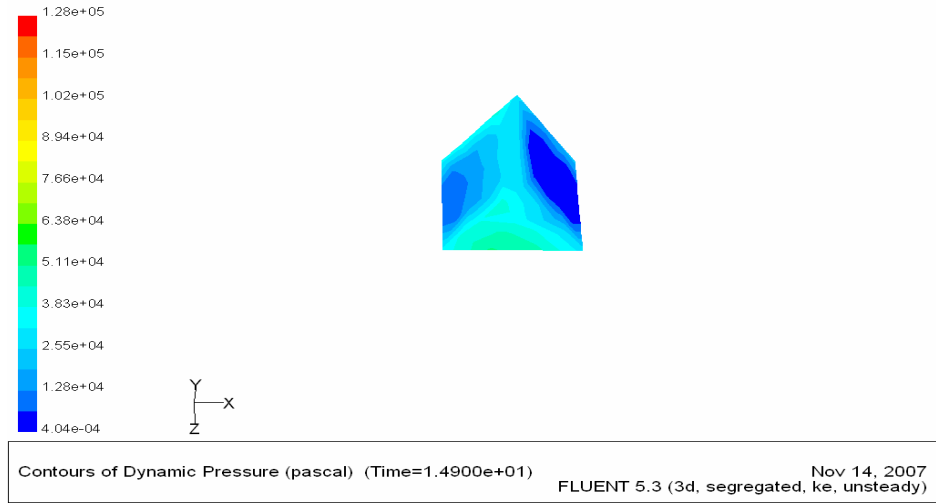


(a)

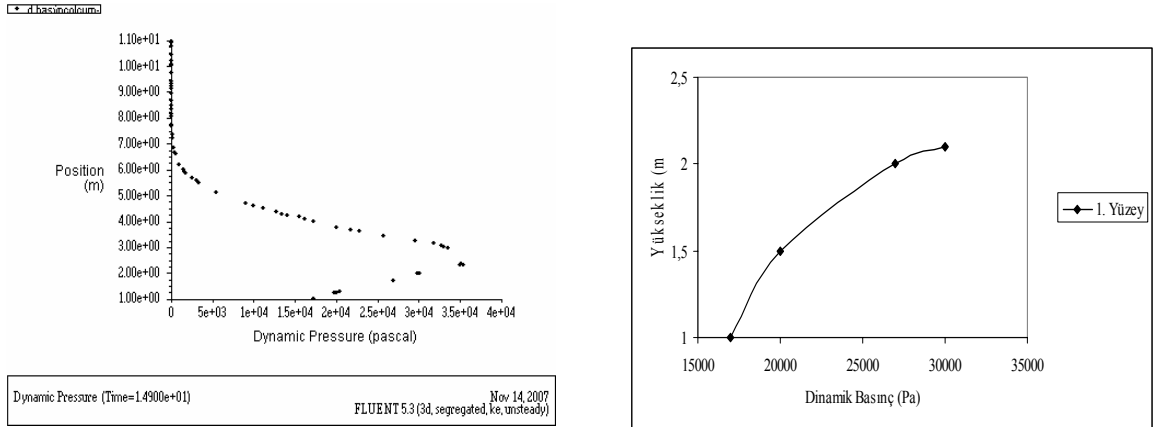
(b)

Şekil 6.80. Model 2 'ye ait dinamik basınç grafiği

Model 2'deki bloklarda akım yönüne bakan iki yüzey bulunmaktadır. Şekil 6.80 (a)'da ki grafikte enerji kırıcı bloklar üzerinde alınan ölçümlere göre 11 m'ye kadar olan dinamik basınçlar görülmektedir. Enerji kırıcı blok yüksekliği $h=2,1$ m olduğundan, Şekil 6.80 (b)'de bu yükseklik dikkate alınarak yeniden grafik oluşturulmuştur. Grafiğe göre, blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde aritmetik ortalama olarak $P=80750$ Pa değerinde dinamik basınç oluşmaktadır.



Şekil 6.81. Model 3'deki bloğa ait dinamik basınç görünümü

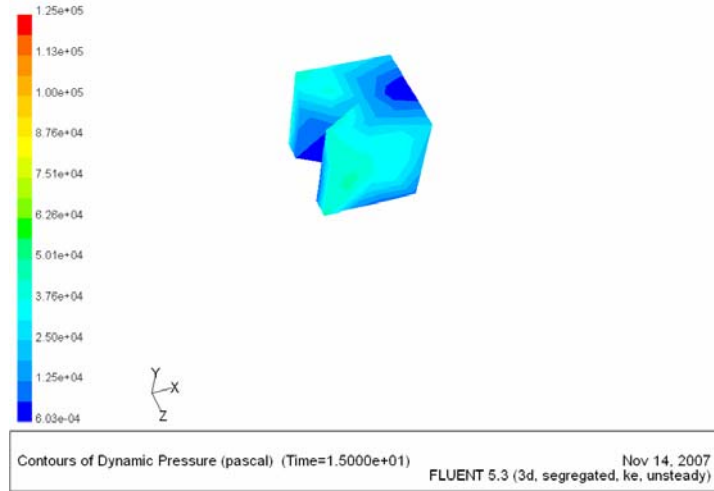


(a)

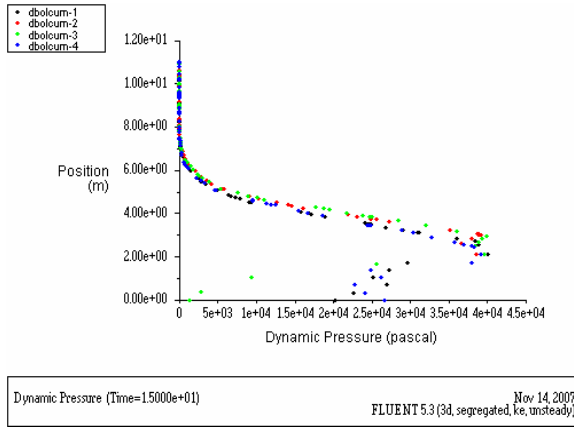
(b)

Şekil 6.82. Model 3 'e ait dinamik basınç grafiği

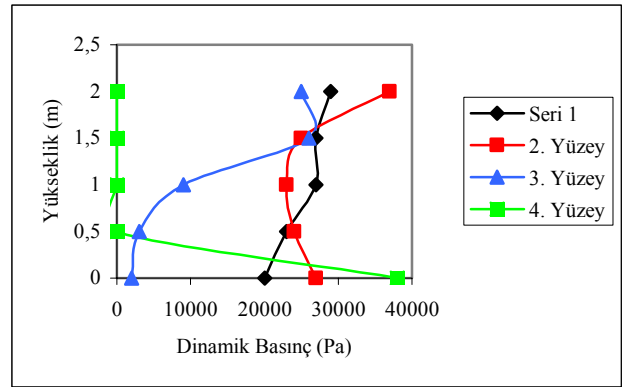
Model 3'deki bloklarda akım yönüne bakan bir yüzey bulunmaktadır. Şekil 6.82 (a)'daki grafikte enerji kırıcı bloklar üzerinde alınan ölçümlere göre 11 m ye kadar olan dinamik basınçlar görülmektedir. Enerji kırıcı blok yüksekliği $h=2,1$ m olduğundan, Şekil 6.82 (b)'de bu yükseklik dikkate alınarak yeniden grafik oluşturulmuştur. Grafiğe göre, blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde aritmetik ortalama olarak $P=23500$ Pa değerinde dinamik basınç oluşmaktadır.



Şekil 6.83. Model 4'deki bloğa ait dinamik basınç görünümü



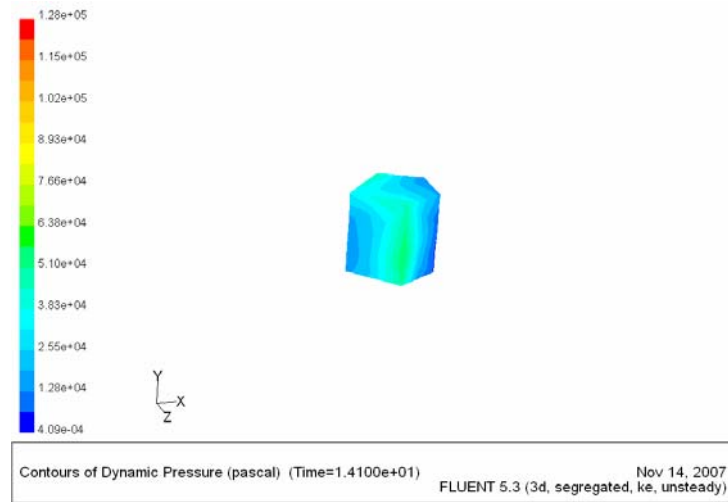
(a)



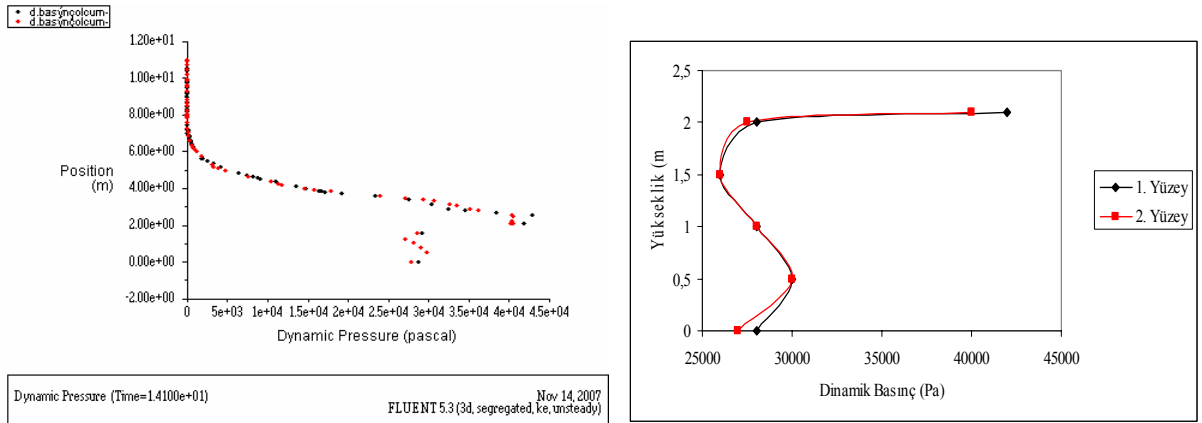
(b)

Şekil 6.84. Model 4 'e ait dinamik basınç grafiği

Model 4'deki bloklarda akım yönüne bakan dört yüzey bulunmaktadır. Şekil 6.84 (a)'daki grafikte enerji kırıcı bloklar üzerinde alınan ölçümlere göre 11 m ye kadar olan dinamik basınçlar görülmektedir. Enerji kırıcı blok yüksekliği $h=2,1$ m olduğundan, Şekil 6.84 (b)'de bu yükseklik dikkate alınarak yeniden grafik oluşturulmuştur. Grafiğe göre, blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde aritmetik ortalama olarak $P=103400$ Pa değerinde dinamik basınç oluşmaktadır.



Şekil 6.85. Model 5’deki bloğa ait dinamik basınç görünümü

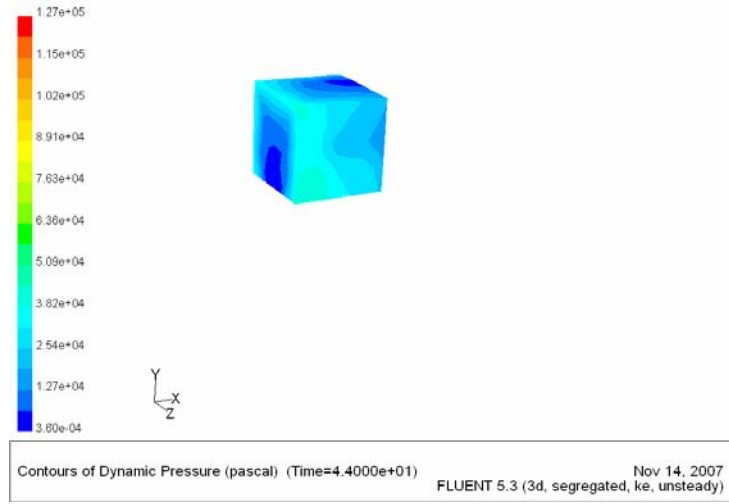


(a)

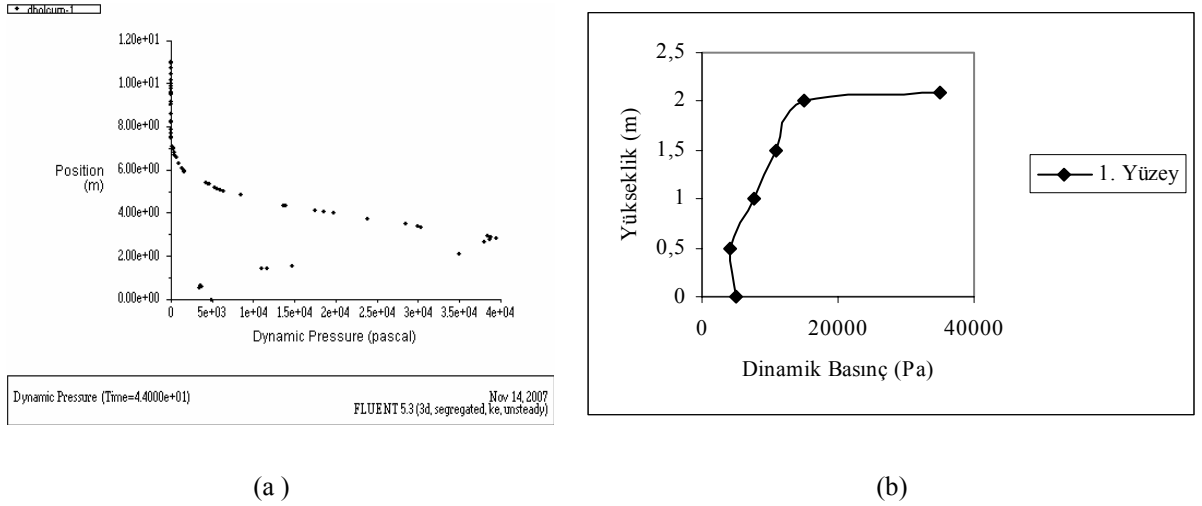
(b)

Şekil 6.86. Model 5 ‘e ait dinamik basınç grafiği

Model 5’deki bloklarda akım yönüne bakan iki yüzey bulunmaktadır. Şekil 6.86 (a)’daki grafikte enerji kırıcı bloklar üzerinde alınan ölçümlere göre 11 m ye kadar olan dinamik basınçlar görülmektedir. Enerji kırıcı blok yüksekliği $h=2,1$ m olduğundan, Şekil 6.86 (b)’de bu yükseklik dikkate alınarak yeniden grafik oluşturulmuştur. Grafiğe göre, blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde aritmetik ortalama olarak $P=60083,33$ Pa değerinde dinamik basınç oluşmaktadır.



Şekil 6.87. Model 6'daki bloğa ait dinamik basınç görünümü

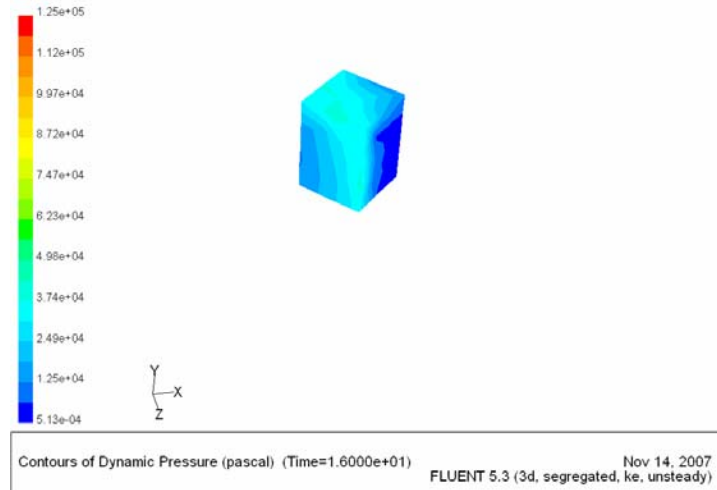


(a)

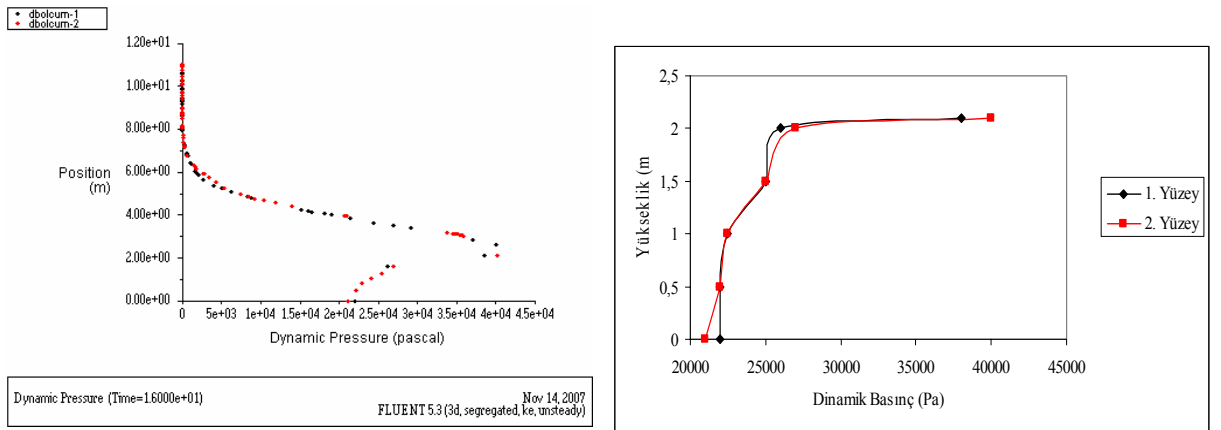
(b)

Şekil 6.88. Model 6 'ya ait dinamik basınç grafiği

Model 6'deki bloklarda akım yönüne bakan bir yüzey bulunmaktadır. Şekil 6.88 (a)'daki grafikte enerji kırıcı bloklar üzerinde alınan ölçümlere göre 11 m ye kadar olan dinamik basınçlar görülmektedir. Enerji kırıcı blok yüksekliği $h=2,1$ m olduğundan, Şekil 6.88 (b)'de bu yükseklik dikkate alınarak yeniden grafik oluşturulmuştur. Grafiğe göre, blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde aritmetik ortalama olarak $P=12917$ Pa değerinde dinamik basınç oluşmaktadır.



Şekil 6.89. Model 7’deki bloğa ait dinamik basınç görünümü

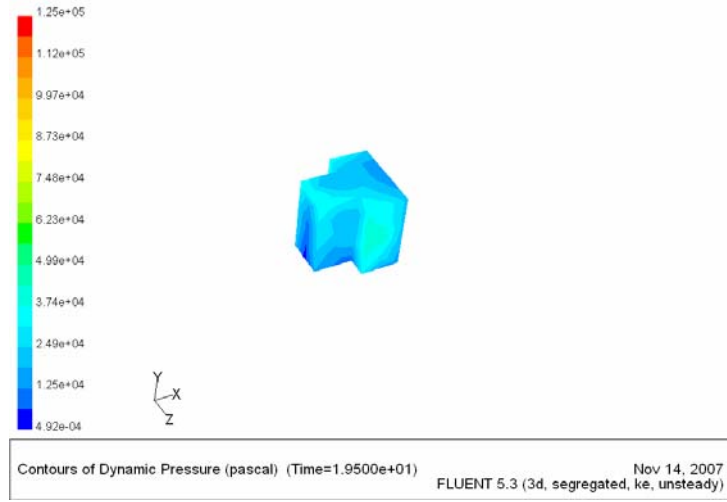


(a)

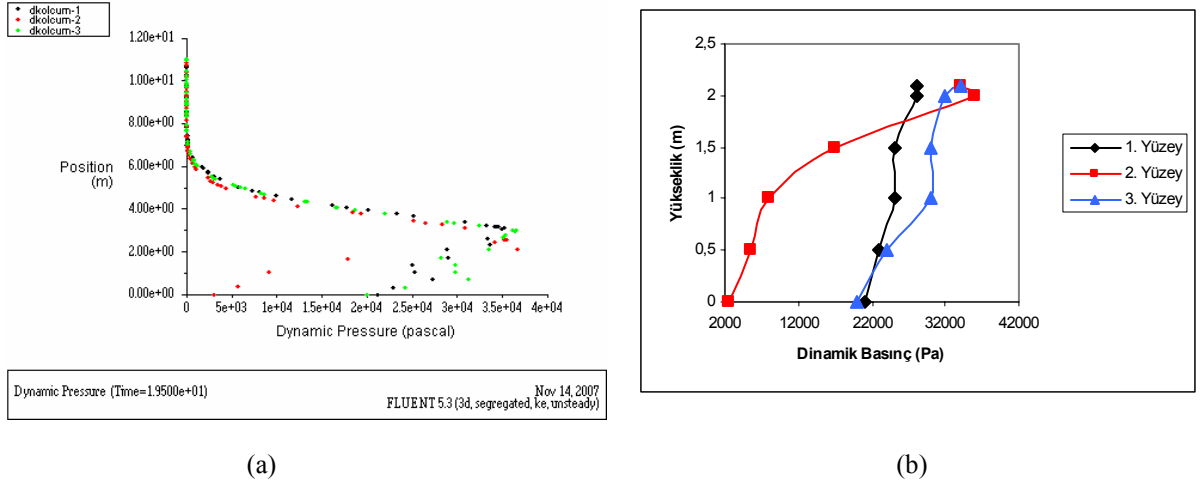
(b)

Şekil 6.90. Model 7 ‘ye ait dinamik basınç grafiği

Model 7’deki bloklarda akım yönüne bakan iki yüzey bulunmaktadır. Şekil 6.90 (a)’daki grafikte enerji kırıcı bloklar üzerinde alınan ölçümlere göre 11 m ye kadar olan dinamik basınçlar görülmektedir. Enerji kırıcı blok yüksekliği $h=2,1$ m olduğundan, Şekil 6.90 (b)’de bu yükseklik dikkate alınarak yeniden grafik oluşturulmuştur. Grafiğe göre, blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde aritmetik ortalama olarak $P=52167$ Pa değerinde dinamik basınç oluşmaktadır.

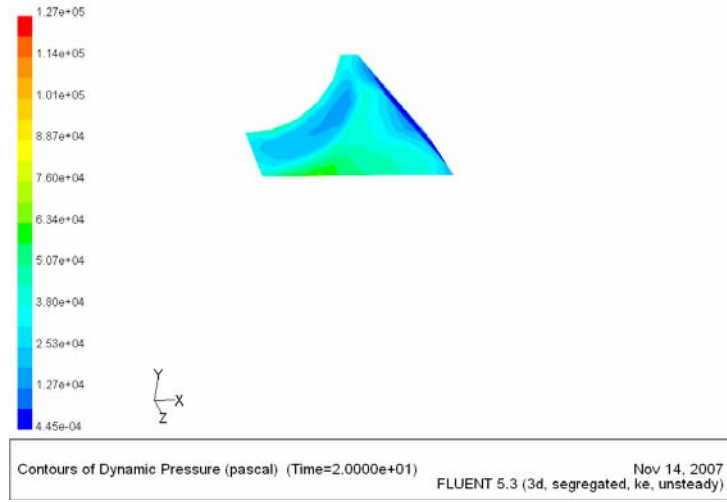


Şekil 6.91. Model 8'deki bloğa ait dinamik basınç görünümü

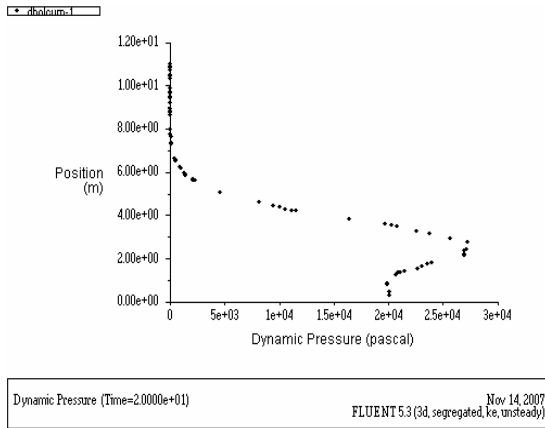


Şekil 6.92. Model 8'e ait dinamik basınç grafiği

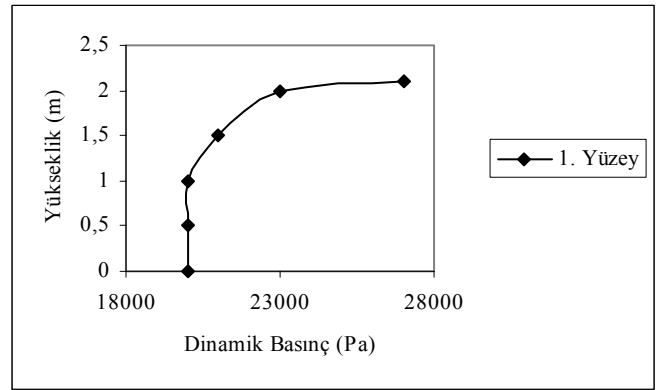
Model 8'deki bloklarda akım yönüne bakan üç yüzey bulunmaktadır. Şekil 6.92 (a)'daki grafikte enerji kırıcı bloklar üzerinde alınan ölçümlere göre 11 m ye kadar olan dinamik basınçlar görülmektedir. Enerji kırıcı blok yüksekliği $h=2,1$ m olduğundan, Şekil 6.92 (b)'de bu yükseklik dikkate alınarak yeniden grafik oluşturulmuştur. Grafiğe göre, blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde aritmetik ortalama olarak $P=70500$ Pa değerinde dinamik basınç oluşmaktadır.



Şekil 6.93. Model 9'daki bloğa ait dinamik basınç görünümü



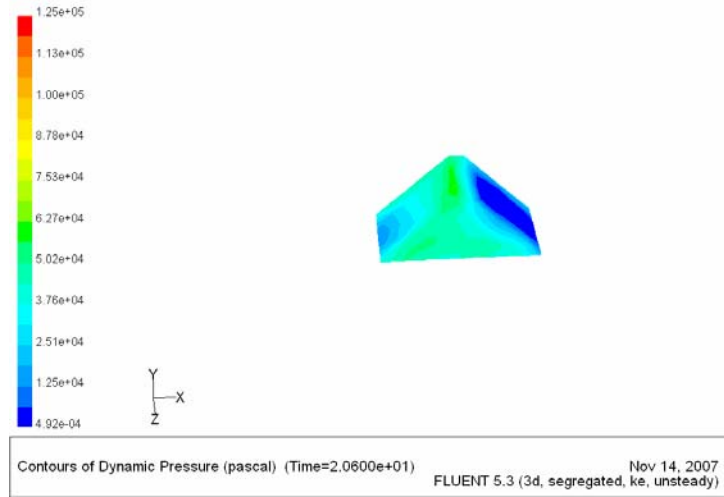
(a)



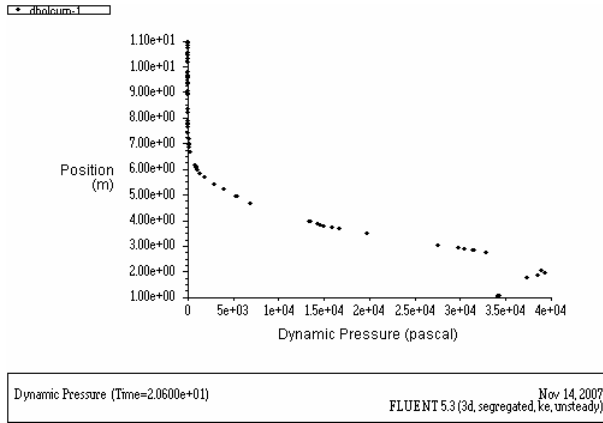
(b)

Şekil 6.94. Model 9'a ait dinamik basınç grafiği

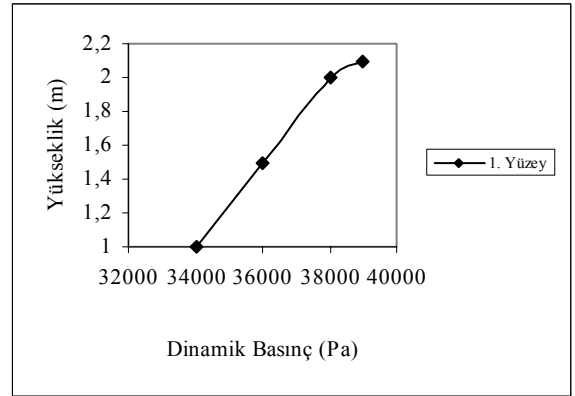
Model 9'daki bloklarda akım yönüne bakan bir yüzey bulunmaktadır. Şekil 6.94 (a)'daki grafikte enerji kırıcı bloklar üzerinde alınan ölçümlere göre 11 m ye kadar olan dinamik basınçlar görülmektedir. Enerji kırıcı blok yüksekliği $h=2,1$ m olduğundan, Şekil 6.94 (b)'de bu yükseklik dikkate alınarak yeniden grafik oluşturulmuştur. Grafiğe göre, blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde aritmetik ortalama olarak $P=21833$ Pa değerinde dinamik basınç oluşmaktadır.



Şekil 6.95. Model 10'daki bloğa ait dinamik basınç görünümü



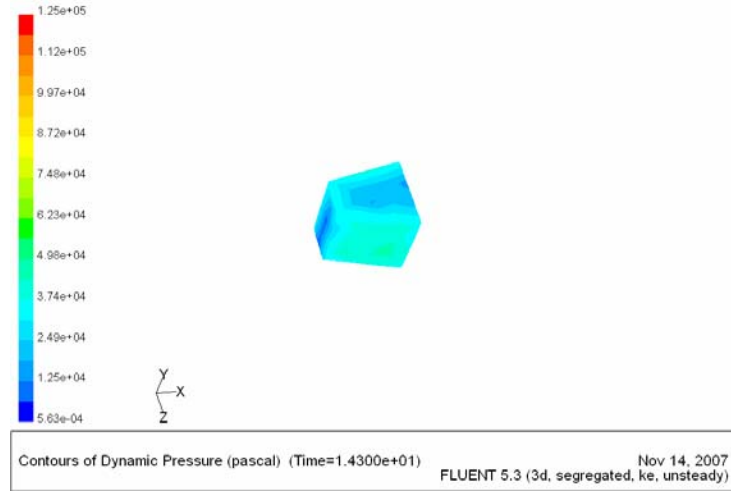
(a)



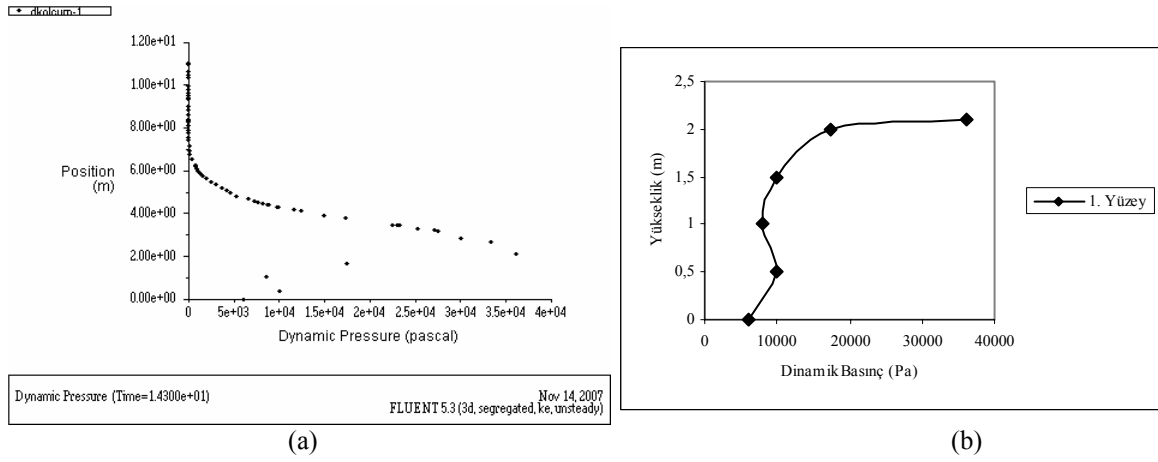
(b)

Şekil 6.96. Model 10'a ait dinamik basınç grafiği

Model 10'daki bloklarda akım yönüne bakan bir yüzey bulunmaktadır. Şekil 6.96 (a)'daki grafikte enerji kırıcı bloklar üzerinde alınan ölçümlere göre 11 m ye kadar olan dinamik basınçlar görülmektedir. Enerji kırıcı blok yüksekliği $h=2,1$ m olduğundan, Şekil 6.96 (b)'de bu yükseklik dikkate alınarak yeniden grafik oluşturulmuştur. Grafiğe göre, blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde aritmetik ortalama olarak $P=36750$ Pa değerinde dinamik basınç oluşmaktadır.



Şekil 6.97. Model 11'deki bloğa ait dinamik basınç görünümü



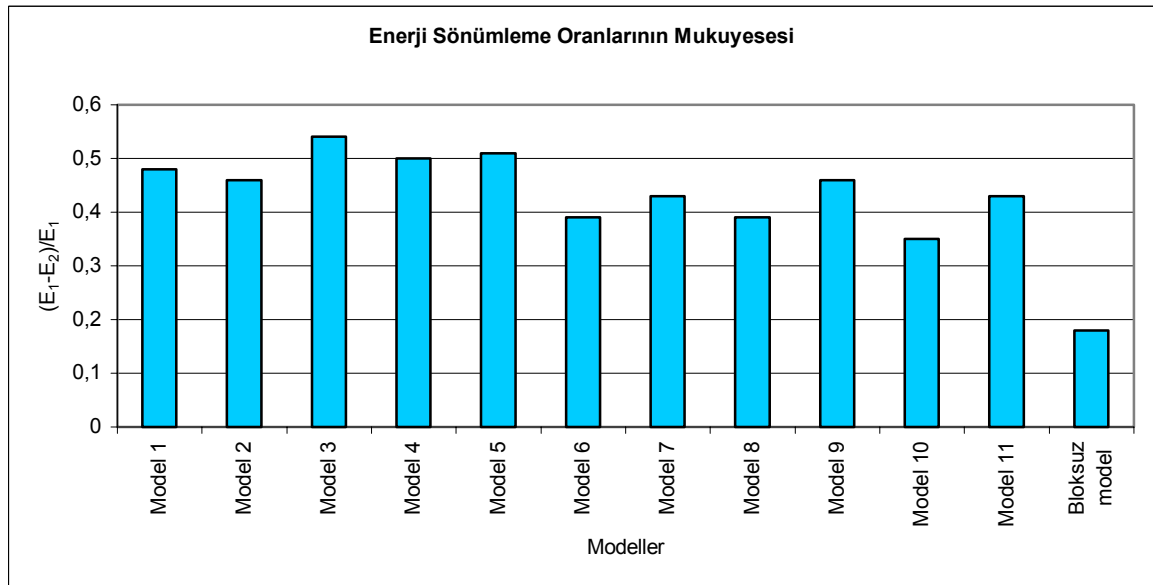
Şekil 6.98. Model 11'e ait dinamik basınç grafiği

Model 11'deki bloklarda akım yönüne bakan bir yüzey bulunmaktadır. Şekil 6.98 (a)'daki grafikte enerji kırıcı bloklar üzerinde alınan ölçümlere göre 11 m ye kadar olan dinamik basınçlar görülmektedir. Enerji kırıcı blok yüksekliği $h=2,1$ m olduğundan, Şekil 6.98 (b)'de bu yükseklik dikkate alınarak yeniden grafik oluşturulmuştur. Grafiğe göre, blokların akım yönüne bakan yüzeylerinde aritmetik ortalama olarak $P=14583,83$ Pa değerinde dinamik basınç oluşmaktadır.

6.3. Hız ve Enerji Mukayeseleri

Tablo 6.2. Modellere ait hız ve enerji mukayeseleri

Model No:	$h_1(m)$ Bloklardan önceki su yüksekliği	$V_1(m/s)$ Bloklardan önceki hız	$h_2(m)$ Eşikten sonraki su yüksekliği	$V_2(m/s)$ Eşikten sonraki hız	$E_1(m)$ $E_1 = \frac{V_1^2}{2g} + h_1$ Enerji miktarı	$E_2(m)$ $E_2 = \frac{V_2^2}{2g} + h_2$ Enerji miktarı	$(E_1-E_2)/E_1$
Model 1	1,5	17	2,5	10,8	16,23	8,44	0,48
Model 2	1,5	17	2,5	11	16,23	8,66	0,46
Model 3	1,5	17	2,5	9,8	16,23	7,40	0,54
Model 4	1,5	17	2,5	10,5	16,23	8,12	0,50
Model 5	1,5	17	2,5	10,4	16,23	8,01	0,51
Model 6	1,5	17	2,5	12	16,23	9,84	0,39
Model 7	1,5	17	2,5	11,5	16,23	9,24	0,43
Model 8	1,5	17	2,5	12	16,23	9,84	0,39
Model 9	1,5	17	2,5	11	16,23	8,66	0,46
Model 10	1,5	17	2,5	12,5	16,23	10,46	0,35
Model 11	1,5	17	2,5	11,5	16,23	9,24	0,43
Bloksuz model	1,5	17	2,5	14,5	16,23	13,2	0,18



Şekil 6.99. Modellere ait enerji sönümlenme oranları grafiği

Tablo 6.2’de bloklardan önceki hız ve enerji miktarlarıyla, eşikten sonraki hız ve enerji miktarları gösterilmiştir. Model 3’de eşikten sonra hız $V_2=9,8$ m/s’ye düşmüştür. Şekil 6.99’da modellere ait enerji sönümleme oranlarının değişimi grafiksel olarak verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı gibi seçtiğim modeller arasından, Model 3’ün enerjiyi kırmada en iyi performansı sağlayan model olduğu, bloksuz modelin ise iyi performans sağlamadığı görülmektedir.

7. SONUÇLAR

Düşüm havuzundaki enerji kırıcı bloklar farklı geometrilerde tasarlanarak en iyi performansı sağlayan model, CFD yazılımı kullanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen hız, basınç, dinamik kuvvetlerin dağılımı ve enerji sönümleme oranlarına ait sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Model 1’de, Alibey Barajı’na ait düşüm havuzu ve enerji kırıcı blok boyutları kullanılarak, Fluent programı ile elde edilen değerler projedeki gerçek değerlerle karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine yakın çıktığı ve aynı eğilimde oldukları görülmüştür.
- Bütün modellerde enerji kırıcı blok geometrileri değiştikçe, hız değerleri, enerji kırma oranları ve bloklara gelen kuvvetlerin de değiştiği görülmüştür.
- Hızı en fazla azaltan ve enerjiyi en fazla kırabilen model, üçgen geometriye sahip olan Model 3 olarak tespit edilmiştir.
- En az enerji sönümleme oranı bloksuz düşüm havuzuna ait modelde gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- Model 5, beşgen geometriye sahip model olup, Model 3’ten sonra en iyi enerji sönümleme performansını gösteren ikinci model olarak belirlenmiştir.
- En az enerji sönümleme performansı, trapez kesitli enerji kırıcı bloklardan oluşan Model 10’da gerçekleşmiştir.
- Tüm modellerde toplam basınç grafiklerine bakıldığında, genellikle enerji kırıcı blokların üst ve arka yüzeylerinde, düşüm havuzu sonundaki eşiğin ise arka yüzeyinde negatif basınçların oluştuğu görülmüştür. Blokların bu kısmında aşınma riskinin olacağını söylenebilir.
- Bloklara etki eden dinamik basınçlar incelendiğinde; en fazla basıncın 103400 Pa ile Model 4’te, en az basıncın ise 12917 Pa ile Model 6’da oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum, akımın ilk temas ettiği blok yüzeyinin artmasıyla dinamik kuvvetin de arttığını göstermektedir.
- Hidrolik modellerde karşılaşılan zaman problemi ve ekonomik sıkıntılar, CFD yazılımında söz konusu olmadığından bu tür hidrolik problemlerinin çözümünde etkin bir şekilde kullanılacağını bu tez göstermiştir.

KAYNAKLAR

1. Erkek, C. ve Ağıraltıoğlu, N., 2002, “Su Kaynakları Mühendisliği”, Beta Basım A.Ş., Dördüncü Baskı, İstanbul, 360s.
2. Savage, B.M., Johnson, M.C., 201, “ Flow over ogee Spillway: Physical and numerical model case study”, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 127(8), 640-649.
3. Behr, M., 2001, “ Stabilized space-time finite element formulations for free- surface flowws”, Communications in numerical Methods in engineering, 17: 813-819, Houston, USA.
4. Ho, D., Boyes, K., Donohoo, S. and Cooper, B., 2003, “ Numerical flow analysis for spillways”, 43rd ANCOLD Conference, Hobart, Tasmania.
5. Chatila, J., Tabbara, M., 2004, “ Computational modeling of flow over on ogee spillway”, Comput Struct, 82: 1805-12
6. 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.
7. Aydın, M.C., Aydın, S., 2005, “Kars Barajı Yandan Alışlı Dolusavak Teknesinde Üç Boyutlu Analiz Uygulaması”, II. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, İzmir.
8. Tabbara, M., Chatila, J., Awwad, R., 2005, “ Computational simulation of flow over stepped spillways”, Comput Struct, 83: 2215-2224.
9. Çelik, F., Güner, M., 2005, “ Computational Fluid Dynamics (CFD) application for ducted propeller”, Journal of Engineering and Natural Sciences, syf. 127–136, İstanbul.
10. Şentürk, F., 1988, “Barajların Projelendirilmesinde Hidrolik Esaslar”, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Birinci Baskı, Ankara.
11. Kaya, N., 2003, “Enerji Kırıcı Havuzlarda Farklı Tip Enerji Kırıcı Blokların Enerji Sönümlleme Oranlarının İncelenmesi” Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 102s.
12. DSI, 1988, “Regülatör Projesi Kriterleri”, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, İkinci Baskı, Ankara, 93s.
13. Elevatorski, E. A., 1959, “Hydraulic Energy Dissipators”, Mc Graw-Hill Book Company, London, 214p.
14. Yang, S.L., 1994, “Dispersive – Flow Energy Dissipator”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 120, No.12, pp.1401–1408.

15. Peterka, A. J., 1964, "Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators", A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph No. 25, USBR, Denver, Colorado.
16. Aydın, M.C., Aydın, S., 2006, "Dolusavaklarda Hidrolik Karakteristiklerin Sayısal Analiz Yöntemi ile Belirlenmesi", Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 18(4), 521–533.
17. Özdem, M., 2007, "Dolusavaklar Üzerinde Oluşan Akım Özelliklerinin Sayısal Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 88 s.
18. FLUENT Analysis, [http:// eswserver.cee.cornell.edu/aguacalara/documents/reports/spring07/PDF/FLUENT](http://eswserver.cee.cornell.edu/aguacalara/documents/reports/spring07/PDF/FLUENT)
19. Aydın, S., Aydın, M.C., 2007, "Oyuk Barajı Dolusavak Havalandırıcısı Tasarımının Sayısal Analiz Yardımı ile Değerlendirilmesi", III. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, Gümüşdör/İzmir.
20. Aydın, M.C., 2005, "Altan Alışlı Dolusavak Havalandırıcılarının CFD Analizi", T.C. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 141.
21. DSİ, 1974, "Alibey Barajı Dolusavak Hesapları", Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

22.03.1982 Elazığ doğumluyum. Lise öğretimimi Elazığ Balakgazi Lisesi'nde 1999 yılında tamamladım. Lisans öğrenimini 2000–2004 tarihleri arasında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamladım. Yüksek Lisans öğrenimine 2005 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik Bilim Dalı'nda başladım. Şu anda DSİ 12. Bölge Müdürlüğü Planlama Başmühendisliğinde İnşaat Mühendisi olarak görevime devam etmekteyim.