

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAN SAVAK SİFONLARDAKİ AKIMIN KIVRIMLI BİR
KANAL BOYUNCA İNCELENMESİ**

Ahmet YÜCEL

Tez Yöneticisi:
Yrd. Doç. Dr. Mualla ÖZTÜRK

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2008

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAN SAVAK SİFONLARDAKİ AKIMIN KIVRIMLI BİR KANAL BOYUNCA İNCELENMESİ

Ahmet YÜCEL

Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, 05 / 03 / 2008 tarihinde aşağıda belirtilen juri tarafından oybirliği ile başarılı olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mualla ÖZTÜRK

Üye: Doç. Dr. M. Emin EMİROĞLU

Üye: Doç. Dr. Ahmet BAYLAR

Üye: Yrd. Doç. Dr. Nilüfer (NACAR) KOÇER

Üye: Yr. Doç. Dr. Z. Fuat TOPRAK

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

TEŞEKKÜR

Bu tezin önerilmesi, yönlendirilmesi ve tamamlanmasında yardım ve alakalarını esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Mualla ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca çalışmam sırasında yardımlarını aldığım Doç. Dr. M. Emin EMİROĞLU'na ve Yrd. Doç. Dr. Cengiz POLAT'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİLLER LİSTESİ	III
TABLolar LİSTESİ	V
EKLER LİSTESİ	VI
SİMGELER LİSTESİ	VII
ÖZET	IX
ABSTRACT	X
1.GİRİŞ	1
2. SİFON SAVAKLARIN HİDROLİĞİ	4
2.1. Dolu Savaklar	4
2.1.1. Serbest Yüzeyli Dolu Savaklar.....	4
2.1.2.Kapaklı Serbest Yüzeyli Savaklar.....	4
2.1.3. Şaft (Kuyu) Savaklar.....	4
2.1.4 Sifon Savaklar.....	5
2.2. Sifon Savakların Sınıflandırılması.....	6
2.3. Sifon Savakların Genel Esasları.....	9
2.3.1. Bir Sifonun Çalışma Prensipleri.....	10
2.3.2. Bir Sifonun Yemlenme Yüksekliği ve Buna Etkiyen Faktörler.....	13
2.3.3. Sifonun Durma Yüksekliği ve Buna Etkiyen Faktörler.....	15
2.3.4. Sifon Akımın Stabilitesi ve Sifonda Meydana Gelen Vibrasyon.....	16
2.3.5. Sifon Savakların, Serbest Yüzeyli Savaklarla Karşılaştırılması.....	16
2.4. Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	17
2.4.1. Sifon Savakların Hidrolik Yönden İncelenmesi.....	17
2.4.2. Sifonun Tam Kapasite İle Çalışmasının (Sifonik Akımın) Hidrolik Yönden İncelenmesi.....	27
2.4.3. Hız Dağılımının Belirlenmesi.....	33
2.4.4. Basınç Dağılımının Belirlenmesi.....	38
2.4.5. Sifon Tepesindeki Kaviteasyon Olayı.....	40
2.4.6. Bir Sifonun Boyutlandırma Esasları.....	42
2.4.7. Bir Sifonun Debi Katsayısının Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar.....	45
3. KIVIRIMLI KANALLARIN HİDROLİĞİ	48
3.1. Kıvrımlı Kanallarla İlgili Çalışmalar.....	48
4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	67

4.1. Deney Kanalı Düzeneği.....	67
4.2. Sifon Modelinin Hazırlanması.....	72
4.3. Dikdörtgen Savak Anahtar Eğrisinin Elde Edilmesi.....	74
4.4. Deney Kanalındaki Sifonun Yemlenme ve Durma Şartlarının Belirlenmesi.....	75
4.5. Deneysel Çalışmada Etkili Parametrelerin Belirlenmesi.....	83
4.6. Kanaldaki Akımın Sifonun Debi Katsayısına Olan Etkisinin Araştırılması.....	86
4.7. Yan Savak Boyunca Hız Dağılımları Profilleri.....	88
4.8. Yan Savak Boyunca Su Yüzü Profilleri.....	97
4.9. Sifon Savakların Debi Katsayılarının Belirlenmesi.....	103
5. SONUÇLAR.....	115
KAYNAKLAR.....	117
ÖZGEÇMİŞ.....	120
EKLER.....	121
Ek-1.....	121
Ek-2.....	142

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Ters sifon.....	7
Şekil 2.2. Eğrisel kanatlı sifon.....	8
Şekil 2.3. Basamaklı sifon.....	8
Şekil 2.4. Maramsilli yardımcı (mini) sifon.....	9
Şekil 2.5. Bir sifonun başlıca elemanları ve otomatik sifonların çalışma prensibinin esasları...	11
Şekil 2.6. Hava deliği olmayan ve giriş ağzı batmış bir otomatik sifonun tipik çalışma eğrisi.	12
Şekil 2.7. Hava deliği kontrollü veya giriş ağzı batmamış bir otomatik sifonun tipik çalışma eğrisi.....	13
Şekil 2.8. Sifonun çıkış kesitinden giren havanın, sifonun yemlenmesini sağlayan hava boşaltıcı nap'a olan etkisi.....	14
Şekil 2.9. Bir otomatik sifonun çalışmaya başlaması sırasında görülen başlıca akım safhaları.	18
Şekil 2.10. Serbest yüzeyli savakla sifon savağın eğrisel şekli.....	20
Şekil 2.11. Sifon modeli.....	21
Şekil 2.12. Sifon savak.....	23
Şekil 2.13. Sifon savak kesiti.....	26
Şekil 2.14. En genel haldeki bir otomatik sifondaki enerji ve piyezometre çizgileri	28
Şekil 2.15.a Basınçlı pozitif dirsek	33
Şekil 2.15.b Basınçlı negatif dirsek.....	33
Şekil 2.16. V_i/V_m , V_d/V_m ve x_m/d değerlerinin, d/r_i inin fonksiyonu olarak hesaplanmış şekli...	37
Şekil 4.1. Deney kanalı plan ve detayları.....	69
Şekil 4.2. Deney kanalı genel görünüşü.....	70
Şekil 4.3. Toplama kanalı ve ayar kapağı genel görünüşü.....	70
Şekil 4.4. Dinlendirme havuzu ve üçgen savak genel görünüşü.....	71
Şekil 4.5. Hareketli seviye ve hız ölçüm arabası	71
Şekil 4.6. Otomatik model sifonun detayı.....	74
Şekil 4.7. Dikdörtgen savak anahtar eğrisi.....	75
Şekil 4.8. Yan savak sifonunun plan ve kesiti.....	76
Şekil 4.9.a Sifonun yemlenme başlangıcı.....	78
Şekil 4.9.b Sifonun yemlenmesi.....	79
Şekil 4.10.a Tam sifonik akım.....	80
Şekil 4.10.b Tam sifonik akım.....	81
Şekil 4.11. Sifon girişinde meydana gelen yüzeysel.....	82
Şekil 4.12. Sifon yan savak halinde, kanaldaki hız dağılımları.....	88
Şekil 4.13. $\alpha = 30^0$ Yan savaktan $Q=30$ L/s'lik debinin aktif savaklanması halinde teğetsel	

hız dağılımları.....	89
Şekil 4.14. $\alpha = 30^0$ Yan savaktan $Q=100\text{L/s}$ 'lik debinin aktif savaklanması halinde teğetsel hız dağılımları.....	92
Şekil 4.15. Sifon yan savak halinde, kanaldaki su yüzü profilleri.....	97
Şekil 4.16. $\alpha = 30^0$, $Q=20\text{ L/s}$ 'de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri.....	99
Şekil 4.17. $\alpha = 60^0$, $Q=20\text{ L/s}$ 'de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri....	100
Şekil 4.18. $\alpha = 90^0$, $Q=20\text{ L/s}$ 'de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri.....	101
Şekil 4.19. $\alpha = 0^0$ (düz kanal) , $Q=20\text{ L/s}$ 'de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri.....	102
Şekil 4.20. Kanal ve sifonun plan ve kesiti.....	103
Şekil 4.21. $\alpha = 30^0$ 'lik savak bölgesinde yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimi.....	109
Şekil 4.22. $\alpha = 60^0$ 'lik savak bölgesinde yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimi.....	110
Şekil 4.23. $\alpha = 90^0$ 'lik savak bölgesinde yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimi.....	110
Şekil 4.24. $\alpha = 0^0$ 'lik savak bölgesinde yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimi.....	110
Şekil 4.25. $\alpha = 0^0, 30^0, 60^0, 90^0$ 'lik yan savak bölgelerinde yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimi.....	111
Şekil 4.26. Sifonun girişinden 47.5 cm menbada kanaldaki Froude sayısı ile sifonun debi katsayısının değişimi.....	113

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Yan savak akımına etki eden parametreler.....	83
Tablo 4.2. Yan savak katsayısına etki eden parametreler için boyut analizi.....	84
Tablo 4.3. $\alpha = 0^0$ (Düz Kanal) Otomatik model sifon savağın Froude sayıları, debi katsayıları ve sifon savak debileri.....	105
Tablo 4.4. $\alpha = 30^0$ Otomatik model sifon savağın Froude sayıları, debi katsayıları ve sifon savak debileri.....	106
Tablo 4.5. $\alpha = 60^0$ Otomatik model sifon savağın Froude sayıları, debi katsayıları ve sifon savak debileri.....	107
Tablo 4.6. $\alpha = 90^0$ Otomatik model sifon savağın Froude sayıları, debi katsayıları ve sifon savak debileri.....	108

EKLER LİSTESİ

EK-1 Teğetsel Hız Dağılımları.....	121
EK-2 Su Yüzü Profilleri.....	142

SİMGELER LİSTESİ

FRL	: Dolu rezervuar seviyesi
FSL	: Dolu sifon seviyesi
H_p	: Yemlenme yüksekliği
D	: Sifon boğazı kesit yüksekliği
b	: Sifon boğazı kesit genişliği (kret genişliği)
A_0	: Çıkış kesit alanı
H	: İşletim yüksekliği
R	: Eğrilik yarıçapı
R_1	: Sifonun kret yarıçapı
R_2	: Sifonun tepe yarıçapı
q	: Sifonun birim genişlikten geçen debisi
q'	: Sifondan su napı vasıtasıyla atılan havanın debisi
Δp	: Sifondaki basınçla atmosfer basıncı farkı
Δh	: Sifon kreti ile rezervuar su seviyesi farkı
ζ_g	: Sifon girişindeki yük kaybı katsayısı
Δh_0	: Sifonik akımın başladığı andaki Δh değeri
Δh_g	: Sifon giriş ağzı üst seviyesi veya havalandırma deliğinin sifon kretinden olan yüksekliği
Δh_p	: Sifondan napı vasıtasıyla havanın boşaltılmaya başladığı (serbest yüzeyli savak akımının sonu, yemlenme başlangıcı) anda, kretle rezervuar su seviyesi arasındaki fark
q_p	: Δh_p su yüküne karşı gelen potansiyel yemlenme debisi
h_g	: Sifon tepesi ile sifon sonu arasındaki düşey mesafe
μ	: Sifon akım katsayısı
A	: Sifon çıkışındaki kesit alanı
λ	: Sürtünme faktörü

l	: Sifon uzunluğu
d	: Sifon çapı
$\sum k$	: Bölgesel kayıp katsayıları toplamı
$\frac{P_0}{\gamma}$	: Atmosfer basınç yüksekliği
$\frac{P_v}{\gamma}$	: Suyun buhar basıncı
h	: Sifon çıkış kesiti eksenine üst su seviyesi arasındaki fark (sifonun çalışma yüksekliği)
P_{oA}/γ	: Üst su yüzeyinde atmosfer basıncı yüksekliği
P_{oE}/γ	: Sifon çıkış kesitindeki atmosfer basıncı yüksekliği
$\sum_0^E h_k$	: Sifon girişinden çıkış kesitine kadar olan toplam yük kaybı
K_1	: Sifon girişindeki yük kaybı katsayısı
K_2	: Sifon giriş dirseğindeki dirsek yük kaybı katsayısı
K_3	: Sifonun tepe dirseğinin yük kaybı katsayısı
K_4	: Saptırıcı bir tip sifonda saptırıcıdaki yük kaybı katsayısı
K_5	: Sifon çıkış dirseğine ait yük kaybı katsayısı
K_6	: Sifon çıkışındaki çıkış kaybı katsayısı
V_m	: Ortalama hız değeri
α	: Hız yüksekliğini denkleştirme katsayısı
h_b	: Suyun buharlaşma basıncı yüksekliği
h_{vac}	: Boşluk basınç yüksekliği
H_p	: Yemlenme yüksekliği
H_i	: Sifonun kretindeki mevcut enerji yüksekliği
V_{xy}	: xy planındaki ortalama hız vektörü
V	: En kesitteki ortalama hız
V_z	: Eğrilik merkezinden r radyal uzaklıktaki kıvrımdaki teğetsel hız
C_s	: Serbest vorteks hareketindeki sirkülasyon sabiti
r_0	: Dış kıyı eğrilik yarıçapı
r_i	: İç kıyı eğrilik yarıçapı
V_r	: Kıvrımdaki radyal hız bileşeni
V_θ	: Silindirik koordinatlarda teğetsel hız bileşeni

g	: Yerçekimi ivmesi
J_r	: Radyal doğrultudaki su yüzü eğimi
ε	: Eddy viskozitesi
r	: Kıvrım eğrilik yarıçapı
x	: Von Karman sabiti
J''	: Sekonder akım tarafından yaratılan enerji gradyanı
C	: Chezy katsayısı
r_c	: Eğrilik yarıçapı
F_{r1}	: Froude sayısı
D	: Silindirik ayak çapı
ξ	: Vorteks bileşeni
ε	: Difüzyon katsayısı
$V_{\theta m}$	: Akım derinliklerine göre ortalama teğetsel hız
u^*	: Taban kayma hızı
η	: Akım içindeki herhangi bir noktanın rölatif derinliği
u^*	: Ortalama taban kayma gerilmesi
J_r	: Enine su yüzü eğimi
J_θ	: Teğetsel su yüzü eğimi
C_θ	: Yersel teğetsel su yüzü eğimi katsayısı
r_c	: Kıvrımdaki eksensel olan eğrilik yarıçapı
H_s	: Kıvrımda iç ve dış kıyı arasındaki maksimum su yüzü yükseklikleri farkı
K	: Su yüzü yanal değişim katsayısı
b_d	: Daralma oranı
θ_f	: Toplam kıvrım açısı
α_0	: Ortalama merkezkaç kuvveti katsayısı
τ_{r0}	: Taban kayma gerilmesi radyal bileşeni
b_f	: Yaklaşım kanalı mansap genişliği
Q_w	: Savaklanma oranı
h_w	: Rölatif yük
a_* ve b_*	: Akarsuyun kıvrım tipine bağlı sabit sayılar
Re	: Reynolds sayısı

ν	: Suyun kinematik viskozitesi
L	: Akarsuyun iki bükülme noktası arasındaki kıvrım boyu
h	: Nap yükü
h_o	: Ana kanal su yüksekliği
v_0	: Ana kanal su hızı
h_2	: Toplama kanal su yüksekliği
h_{nap}	: Toplama kanalı nap su yüksekliği
q_s	: Sifon savağın gerçek debisi
q_t	: Sifon savağın teorik debisi
Q	: Ana kanal toplam debisi
C_d	: Debi katsayısı
L	: Savak uzunluğu

ÖZET

Doktora Tezi

YAN SAVAK SİFONLARDAKİ AKIMIN KIVRIMLI BİR KANAL BOYUNCA İNCELENMESİ

Ahmet YÜCEL

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2008, Sayfa: 192

Yan savaklar, kanallardan ihtiyaç duyulan debinin temini veya fazla debinin çevreye zarar vermeden uzaklaştırılması için sulama, arazi drenajı, kanalizasyon sistemleri, barajlardaki yan dolu savaklar, çökeltim havuzları vb. yerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ise bir açık kanalda yan savak yerine, bir otomatik sifon kullanılmıştır. Kullanılan bu otomatik sifon kıvrımlı bir kanalın değişik açılara (30^0 , 60^0 ve 90^0) ve düz kısmına (0^0) yerleştirilerek değişik debilerde ayar kapağı farklı kademelerde açılıp kapatılarak seviye ve hız ölçümleri yapılmıştır.

Bu ölçümler sonunda; su yüzü profilleri ve teğetsel hız dağılımları bulunarak şekiller üzerinde gösterilmiş ve Froude sayıları, sifon savağın debileri ve debi katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca sifon savağın yemlenme ve durma şartları, helikoidal akımlar araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sifon savak, Yan savak, Otomatik sifon, Yemlenme ve durma, Teğetsel hız dağılımları, Su yüzü profilleri.

ABSTRACT

PhD Thesis

THE INVESTIGATION OF SIDE-WEIR SIPHONS FLOW ALONG A CURVED CHANNEL

Ahmet YÜCEL

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

2008, Page: 192

Side weirs are being used commonly in irrigation, field drainage, sewage systems, side channel spillway dams, settling basins to supply needed discharge or put away excess discharge without giving harm to the environment.

In this study, self-priming siphon was used instead of side weir. Settled in the different angels (30^0 , 60^0 and 90^0) of a curved channel and flat side (0^0), water level and velocity were measured by opening and closing of the regulating level gate in different discharges and levels.

At the result of these measurements, water surface profiles and depth averaged velocities were found and showed in figures. Froude numbers, siphon spillway discharge and discharge coefficients were calculated. In addition, siphon spillway and priming, depriming and helicoidal flow were investigated.

Keywords: Siphon spillway, Side weir, Self-priming siphon, Priming and depriming, Depth averaged velocities, Water surface profiles.

1. GİRİŞ

Bir baraj, düzenleme haznesi, yükleme odası, çökeltim havuzu, atık su kanallarında veya geniş anlamda, herhangi bir maksat için teşkil edilmiş bir rezervuara giren feyezan sularının emniyetle boşaltılabilmesi için bir tertibatın olması gereklidir. Özellikle, barajlara kısa süre içinde giren büyük miktardaki feyezan sularının atılması işi, baraj ve civarının emniyeti yönünden çok önemlidir. Bu amaçla baraj tipine ve arazi şartlarına göre gövde üzerinde veya gövdenin haricinde bir yere inşa edilen ve genel anlamda dolu savak olarak adlandırılan yapılar inşa edilmiştir.

Sulama, hidroelektrik ve diğer hidrolik yapıların su temini amaçlı tesislerin iletim kanalları ihtiyaç ve ekonomi göz önüne alınarak optimum kapasiteye göre projelendirilir. Kanala giren fazla suyun taşarak çevreye zararlı olmaması için gerekli yerlere yan savaklar yapılır. Bu savaklar bazen kanalın bir veya iki yanına bazen de çökeltim havuzu gibi tesislerin yan tarafına yapıldıkları için yan savak olarak adlandırılır. Meskun bölgelerdeki birleşik kanalizasyon sistemlerinde de yan savaklar oldukça sık kullanılır.

Bileşik kanalizasyon sistemlerinde yağmur suyunun da taşınması istendiğinde boru çapları büyük seçilir. Fakat arıtma tesisi, sadece normal zamanlarda gelen atık suları tasfiye edecek şekilde dizayn edildiklerinden yağışlı zamanlarda fazla yüklenirler. Bu yüklenme sırasında kapasite fazlası yağmur suları yan savaklarla tahliye edilerek arıtma tesisinin normal kapasite ile çalışmasını sağlar. Vadi yamaçlarından geçirilen kanallarda, havzadan yüzeysel akış yoluyla gelecek fazla sular da yan savaklarla deşarj edilebilirler.

Sifonların serbest yüzeyli savaklara oranla birçok üstünlükleri vardır. Ayrıca sifonlar dolu savak olarak geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bir kanal veya rezervuardan suyun uzaklaştırılması amacıyla tanımlanan yan savak terimi iki tip hidrolik yapıda kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi klasik yan savaktır. Klasik yan savaklar belirli bir su seviyesi elde etmek veya akımın belli bir kısmını uzaklaştırmak için kullanılır. İkincisi ise dolu savaklardır. Dolu savaklar rezervuarlardan taşkın debisinin uzaklaştırılmasına kullanılır. Bunlar; serbest yüzeyli dolu savaklar, kapaklı serbest yüzeyli savaklar, shaft (kuyu) savaklar ve sifon savaklardır. Sifon savakların serbest yüzeyli savaklara göre birçok üstünlükleri olup, dolu savak olarak da geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

Yan savak kreti genellikle kanal eksenine paralel veya belli bir açı yapacak şekilde yerleştirilir. Yan savak olarak genellikle dikdörtgen, üçgen veya trapez kesitler kullanılmaktadır. Yanal akım nedeniyle savak ile ana kanal arasındaki akım yapısı tedrici değişken bir karakter göstermektedir. Savaklanan akım miktarının doğru bir şekilde tespit

edilmesi teorik olarak çok zordur. Bu nedenle akım şartlarının iyi tespit edilmesi için deneysel çalışmalar tercih edilmektedir.

Hız dağılımları da genellikle kanal en kesit tipine bağlıdır. Araştırmacılar trapez, yarı dairesel vb. kanal en kesitlerinde çalışmalarına rağmen, literatürde kıvrımlı kanallara yerleştirilen yan savaklar ve özellikle de kıvrımlı kanallarda yan savak olarak sifonların kullanılması üzerine hiç çalışma yoktur.

Bir sifon için en karakteristik değerlerden birisi, debi katsayısıdır. Debi katsayılarının mümkün olduğu kadar büyük olması arzu edilir. Bunun için ise sifon konstrüksiyonunu ve boyutlandırmalarını tespit ederken, debi katsayı değerlerinin büyük olmasına özen gösterilir. Sifonun bütün boyutlarının doğrudan doğruya matematiksel olarak hesaplanması ise imkansızdır. Kesin proje değerleri ancak model deneylerle tespit edilebilir.

Bu çalışmada, kıvrımlı açık kanallarla seviye kontrol tesisi olarak kullanılan serbest yüzeyli klasik yan savakların yerine, bilinen avantajlarından dolayı sifon yan savaklar kullanılmıştır. Böylece özellikle savak boyunun sınırlı olduğu hallerde, sifon yan savak uygulanarak su seviyesini istenen değerde tutmak mümkün olacaktır. Aynı zamanda su alma amacıyla teşkili halinde de, kanaldaki belli bir su seviyesinde istenen miktarda suyun alınması mümkün olacaktır. Ayrıca açık kanallarda olduğu gibi hidroelektrik tesislerindeki çökeltim havuzlarında en kesitteki katı madde konsantrasyonu dikkate alındığında, su yüzeyinden temiz su savaklayan serbest yüzeyli klasik yan savaklara karşı, giriş ağzı tabana yakın teşkil edilebilen ve katı madde konsantrasyonu yüksek olan suyu savaklayan bir sifon yan savağın avantajıdır. Yine sifon yan savağın giriş ağzının menbasında kanalda meydana gelecek sekonder akım, katı maddelerin özellikle sifondan atılmasına yardımcı olacaktır.

Serbest yüzeyli bir akımın meydana geldiği bir isale kanalı ve çökeltim havuzu gibi tesislerden su almak veya işletme fazlası suyu dışarı atmak için sifonların kullanılması oldukça faydalı olacağı görülmektedir.

Bu çalışmanın birinci bölümünde, giriş yapılmış ve sifon savaklar, kıvrımlı kanallar ve bu konuda yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde, sifon savakların hidroliği incelenmiş ve konuya ilişkin literatür verilmiştir. Üçüncü bölümde, kıvrımlı kanallar ve literatür çalışmaları hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde, deneysel çalışmalar ve sonuçları incelenmiştir. Beşinci bölümde ise deneysel sonuçlar verilmiştir.

Bu çalışmada, kıvrımlı bir açık kanalda yan savak olarak otomatik sifon savakların kullanılması halinde oluşun su seviyeleri, akımın hidroliği, hız dağılımları, sifon savağın debileri ve çalışma şartları deneysel olarak araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar 180^0 lik bir kıvrımlı kanal düzeneği üzerinde yapılmıştır. Bu kanal düzeneği ana kanal ile toplama kanalından oluşmaktadır. Akımın kolayca gözlemlenebilmesi için ise kanalın dış yüzeyleri pleksiglas ile kaplanmıştır. Yine aynı amaçla otomatik sifon da pleksiglasdan yapılmıştır.

Kanalın önce 0^0 'lik düz kısmında, sonra kıvrımlı bölgede sırasıyla 30^0 'lik, 60^0 'lik ve 90^0 'lik kısımlarında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sifon savak olarak dikdörtgen kesitli otomatik sifon kullanılmıştır.

Yan savak boyunca su yüzü profilleri çıkarılması amacıyla yapılan deneylerde $Q=20$ L/s ile $Q=100$ L/s arasındaki debiler kullanılmıştır. Ayrıca bu debilerin değişik kademelerinde (su seviyelerinde) deneyler yapılmıştır. Ana kanal sonunda bulunan 2 parçalı ayar kapağının değişik kademelerde açılıp kapatılması ile istenilen su seviyeleri elde edilmiştir.

Yan savak boyunca teğetsel hız dağılımlarının belirlenmesi amacıyla ise, iki farklı debi ($Q=30$ L/s ve $Q=100$ L/S) kullanılmıştır. $Q=30$ L/s'lik debide düşük hızlarda deneysel çalışmalar yapılmıştır. $Q=100$ L/s'lik debide ise yüksek hızlarda deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Bu ölçümler sonunda elde edilen verilerden ise her kıvrım açısında ve düz kısımda Froude sayıları ile debi katsayıları hesaplanmıştır. Ölçüm yapılan her kesitteki su yüzü profilleri grafiksel olarak şekillerle gösterilmiştir. Yine aynı şekilde, ölçüm yapılan kesitlerdeki hız dağılımları grafiksel olarak şekillerle gösterilmiştir. Sifon savaktan sifonlanan debi ise toplama kanalı çıkışında ölçülen seviye değerlerinin dikdörtgen savak anahtar eğrisi yardımı ile hesaplanmıştır.

2. SİFON SAVAKLARIN HİDROLİĞİ

2.1 Dolu Savaklar

Sifonların serbest yüzeyli savaklara oranla birçok üstünlükleri vardır. Ayrıca sifonlar dolu savak olarak geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Dolu savak olarak adlandırılan başlıca yapımlar şöyle özetlenebilir:

2.1.1 Serbest Yüzeyli Dolu Savaklar

Sabit bir kret kotunu haiz olan bu savaklarda ancak bu kret kotuna tekabül eden biriktirme hacminden faydalanılabilir. Bu tip bir savağın debisi, savağın uzunluğu ve kret üzerindeki su yükü ile ilgilidir. Dolayısıyla, mevcut maksimum feyezan suyunun akıtılabilmesi için, baraj gövdesinde maksimum su seviyesine tekabül eden ilave bir yükselme gerekir. Bu ise, barajın gövde maliyetinin ve istismak edilecek sahanın büyümesine sebep olacaktır. Ayrıca, her ne kadar savak boyunu büyütme suretiyle aynı debi için kret üzerindeki su yükünü azaltmak mümkünse de, yine de çok küçük bir savak yükünde bile büyük miktarda biriktirme hacmi kaybedilmiş olmaktadır. Kaldı ki her zaman savak boyunu uzun yapma imkanı da bulunamaz [1].

2.1.2 Kapaklı Serbest Yüzeyli Savaklar

Serbest yüzeyli savakların mahsurlarından olan kret üzerindeki biriktirilmiş su hacmini kaybetmek problemini halletmek için teşkil edilen bir dolu savak tipidir. Açık savak üzerine konan bir kapakla (radyal, silindirik veya düzlemsel) savak kreti üzerinde biriken feyezan hacminden azami derecede istifade edilmeye çalışılır. Feyezan durumuna göre kapak gereği kadar açılarak suyun savaklanması temin edilir. Ancak, mekanik veya hareketli olarak teşkil edilen bu kapakların bir arıza halinde açılmaması gibi büyük tehlikesi vardır. Ayrıca kapağın ani açılması halinde mansapta tehlikeli feyezan dalgası meydana gelir [1].

2.1.3 Şaft (Kuyu) Savaklar

Sabit kretli ve serbest yüzeyli savakların kuyu tipinde inşa edilen bir şeklidir. Genellikle daire şeklinde bir kretle kuyu şeklinde bir shafta haiz olup, şartların elverişli olması halinde anroşman barajlar için tercih edilmektedir. Esas itibarıyla savak debisi yine kret üzerindeki su

yükünün bir fonksiyonudur. Serbest yüzeyli dolu savaklara oranla aynı su yükü için daha fazla debi geçirirler [1].

2.1.4 Sifon Savaklar

Serbest yüzeyli klasik dolu savakların birçok mahsurlarına karşı bunların uygulanmasına imkan olmaması halinde genellikle sifon savak tercih edilir. Rezervuarda yükselen su seviyesi, sifon kreti seviyesine çıkınca konstrüksiyon gereği sifonun giriş ağzı yada hava giriş deliği kapanır. Sifon kretinden serbest olarak savaklanan su, sifonun içindeki havayı emerek dışarı atar ve rezervuar su seviyesinin üstünde olan sifon tepesindeki basınç, atmosfer basıncının altına düşünce sifon tam kapasiteyle çalışmaya başlar. Su seviyesi düşünce, sifona hava girer ve sifonun çalışması durur.

Sifon savaklar, kret üzerindeki küçük bir su yükünde büyük miktarda debi geçirmelerinden dolayı, aynı debi ve seviye için serbest yüzeyli savaklardan daha az yer işgal ederler. Dolayısıyla savak uzunluğunun ve su seviyesinin sınırlı olduğu hallerde, genellikle sifon savaklar tercih edilir. Benzer avantajlar otomatik kapaklarla da elde edilirse de, sifonun mekanik bir aksamının bulunmayışı ve bakım masraflarının olmaması nedeniyle çok daha uygun bir yapı teşkil ederler. Özellikle rezervuarlardaki su seviyesinin ani yükselmesine karşı kolaylıkla uyum gösterirler. Bilhassa türbinlerin ani kapanmaları sırasında meydana gelen ani su seviyesi yükselmelerinde, açık savaklara nazaran daha iyi sonuç verirler. Rezervuarların haricinde kanaletle sulama şebekelerinde, kanaletten su almak için taşınabilir portatif sifonlar geniş ölçüde kullanılmaktadır. Ayrıca zeminde teşkil edilmiş bir açık kanaldan sulama suyu dağıtımının kontrolü için de sifonlar kullanılmaktadır.

Sifon savakların bu belirgin avantajlarına karşı kısa süre içinde mansaba büyük miktarda debi geçirip ve ani durması mansapta bir feyezan dalgası meydana getireceğinden, balıkçılık ve diğer yönlerden bir mahsur teşkil etmektedir. Aynı zamanda kapalı bir konstrüksiyon oluşu nedeniyle ağaç dalları ve buzların sifonu tıkaması tehlikesi yanında, münferit olarak bir serbest yüzeyli savağa nazaran inşası da zor ve pahalıdır.

Sifonun belirtilen bu mahsurlarına karşı, baraj gövdesi üzerine farklı kotlara birden fazla sifon yerleştirmek suretiyle mansaptaki feyezan dalgasını ve giriş ağzını mümkün mertebe derine daldırarak buz ve ağaç dallarının girmesini önlemek mümkündür. Aynı şekilde inşaa masrafına karşılık bakım masrafının olmaması ve baraj gövdesinde serbest yüzeyli savaklara oranla bir zayıflama meydana getirmediği için de avantajlı sayılabilir.

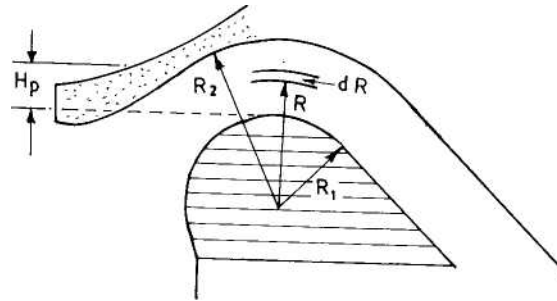
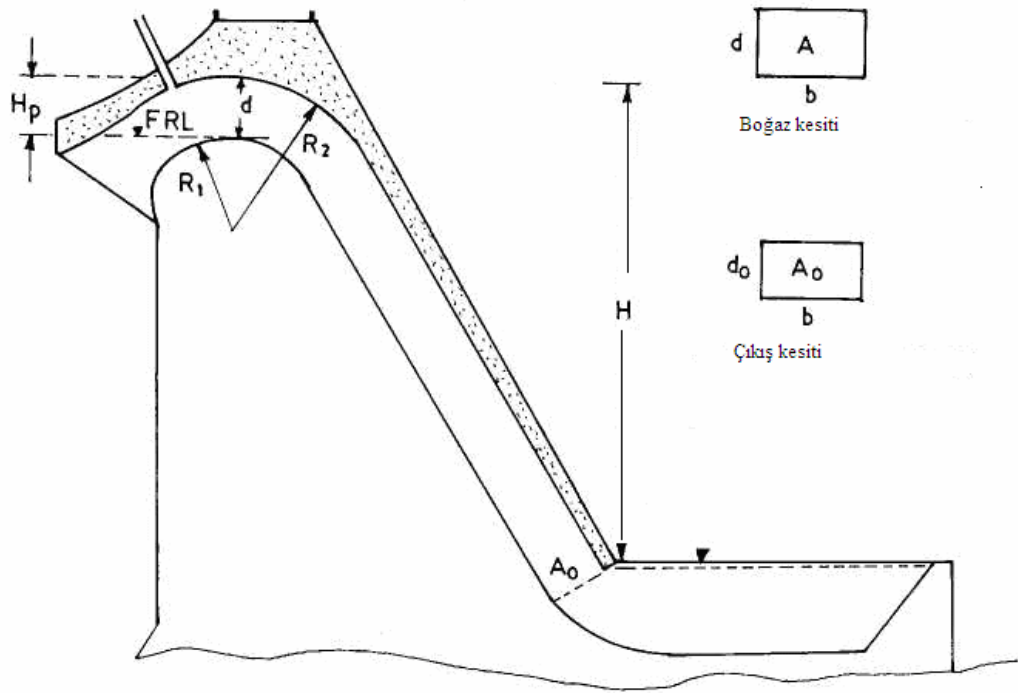
Sifon savakların bu avantajlarına rağmen, eskiden bunların boyutlandırılması için hidrolik yönden güvenilir bir etüt yapılmamış ve proje kriterler tam tespit edilememiş

olduğundan, uzun süre önemsenmemişlerdir. Ancak son senelerde yapılan araştırmalar neticesinde özellikle savak olarak geniş çapta uygulama olanağı bulmuştur.

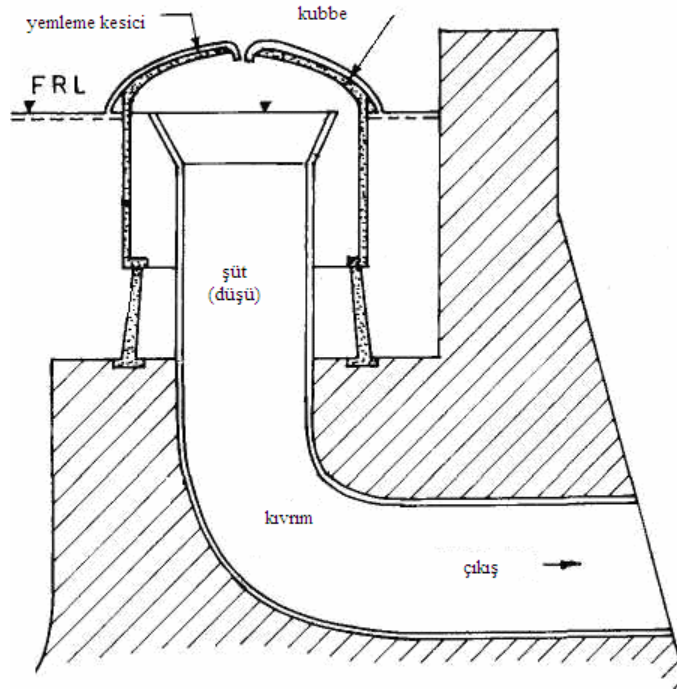
Sifondaki akımın sifonun çalışmaya başlamasından durmasına kadar her safhada değişik parametrelere bağlı olması ve olayın çok karmaşık olması nedeniyle, detayıyla ilgili problemler matematiksel olmaktan çok deneysel olarak incelemeyi gerektirmektedir. Aynı zamanda bir sifon savağın boyutlandırılması için verilen amprik ifadelerden de yararlanılarak, öncelikle model araştırmasıyla proje kriterlerinin tespiti gerekmektedir.

2.2. Sifon Savakların Sınıflandırılması

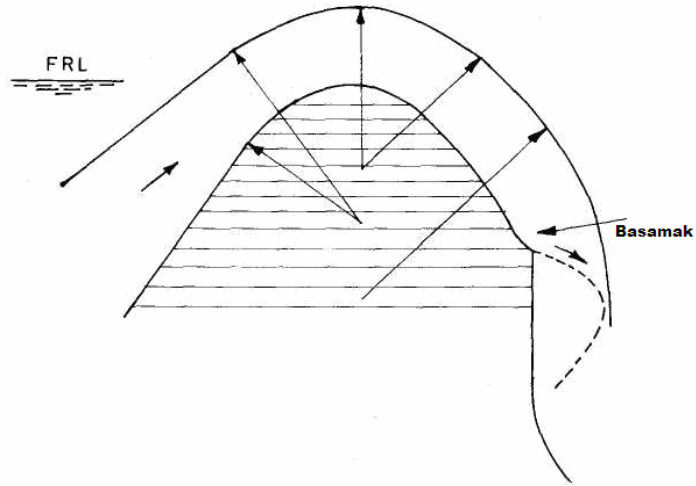
1. Konfigürasyona göre
 - a) Ters sifon (Şekil 2.1)
 - b) Eğrisel kanatlı sifon (Şekil 2.2)
2. İşletim yüksekliğine göre
 - a) Düşük basınçlı sifon (yükü 10 m den daha az olan durumlarda kullanılıyor)
 - b) Yüksek basınçlı sifon (yükü 10 m den daha fazla olan durumlarda kullanılıyor)
3. Yemlenmenin düzenlenmesine göre
 - a) Hava kesici tipli
 - b) S tipli
 - c) Maramsilli yardımcı (mini) sifon (Şekil 2.4)
 - d) Basamak tipli (Şekil 2.3)
4. Düzenlemeye göre
 - a) Düzensiz
 - b) Hava düzenleyicili [2].



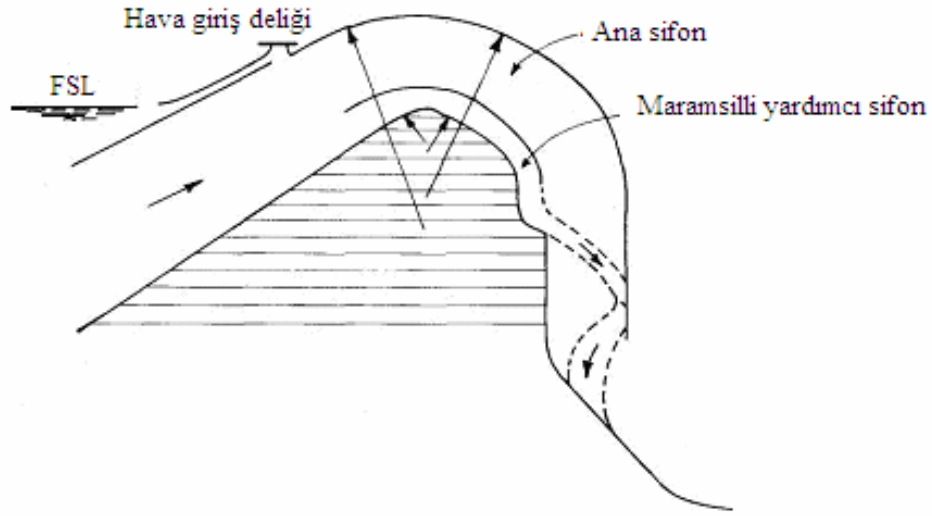
Şekil 2.1 Ters sifon [2].



Şekil 2.2 Eğrisel kanatlı sifon [2].



Şekil 2.3 Basamaklı sifon [2].



Şekil 2.4 Maramsilli yardımcı (mini) sifon [2].

Şekillerde;

FRL: dolu rezervuar seviyesi

FSL: dolu sifon seviyesi

H_p : yemlenme yüksekliği

d : sifon boğazı kesit yüksekliği

b : sifon boğazı kesit genişliği

A_0 : çıkış kesit alanı

H : işletim yüksekliği

R : eğrilik yarıçapı

R_1 : sifonun kret yarıçapı

R_2 : sifonun tepe yarıçapı [2].

2.3 Sifon Savaklarının Genel Esasları

Sifon, esasında rölatif piyezometre çizgisinin üzerine konan bir kapalı deşarj tesisidir. En kesiti daire, kare veya dikdörtgen olabilmektedir. Genellikle seri imalatla hazırlanan ve kanaletlerde su almak için kullanılan portatif sifonlarda dairesel kesit; dolu savak sifonlarda ise daha uygun bir yükseklik – genişlik oranı verdiği için dikdörtgen kesit tercih edilir. Aynı zamanda kare ve dikdörtgen kesitlerin inşası da kolay olmaktadır.

Bir sifonun çalışmaya başlayabilmesi için giriş kesitinin tamamen suya batmış olması ve sifonun tepe kesitindeki havanın herhangi bir metotla dışarı atılarak atmosfer basıncının

altına düşürülmesi gerekir. Aynı zamanda sifon akımının durdurulması için de yine herhangi bir metotla sifona hava girmesini temin etmek gerekir.

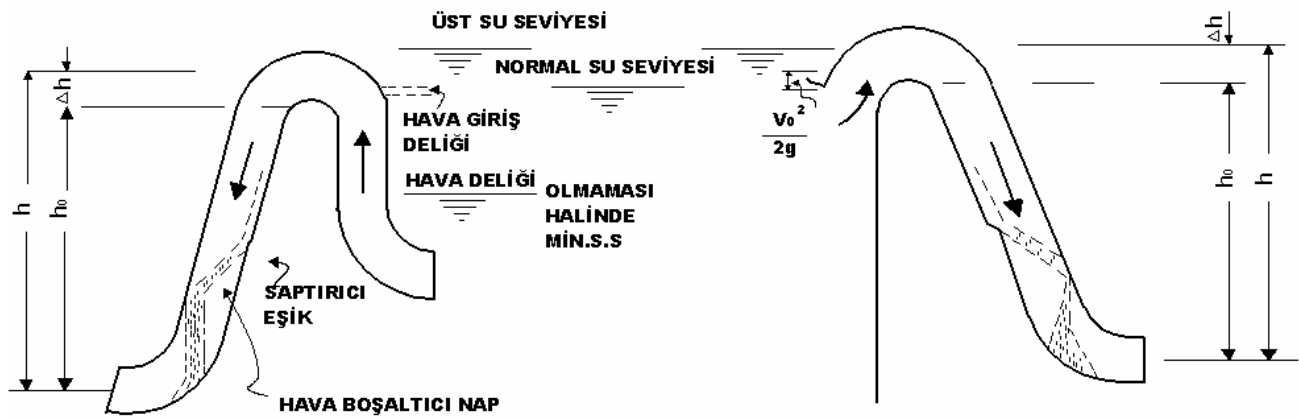
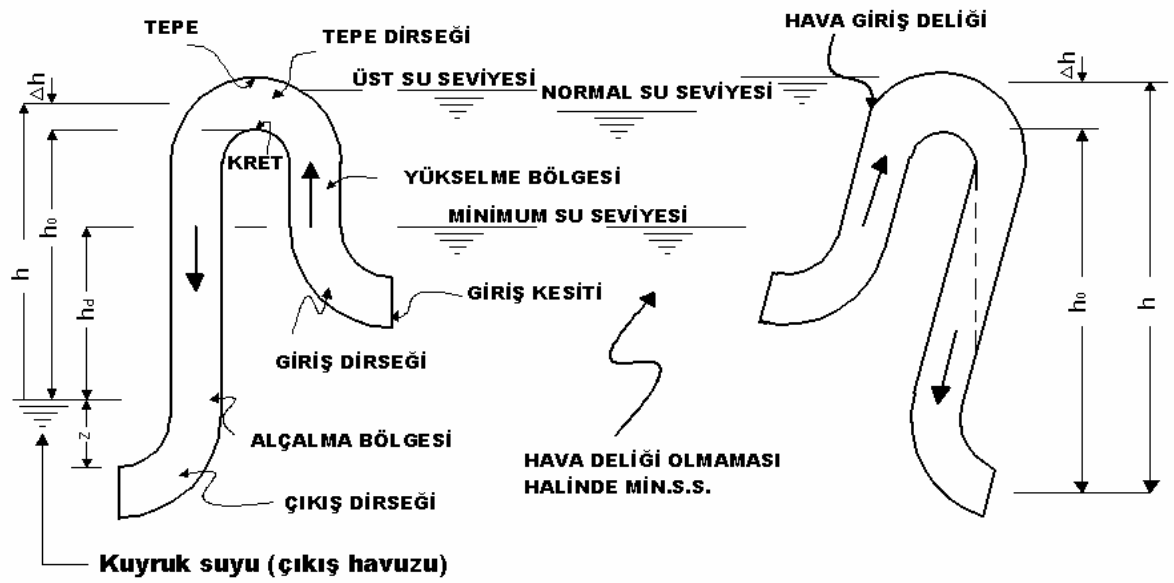
Sifonlar genel olarak hareketli kısımları olmayan ve sabit bağlamalar gibi su seviyesini düzenleyen tesislerdir. Sifonlarda sabit bağlama gövdesi üzerine bir başlık oturtularak tamamen kapalı dikdörtgen kesitli bir kapalı mecra elde edilir. Sifon yemlendikten sonra içinden büyük debi geçer. Sifon ile memba su seviyesi sabit tutulmaya çalışılır. Buz ve yüzen maddelerin geçişi için sifonların emniyetinin araştırılması özel bir önem taşır. Ayrıca sifonda yemlenme esnasında darbe etkisi oluşmaması ve çalışması esnasında titreşim meydana gelmemesi sağlanmalıdır.

Sifonlar birim genişlikte geçen debi $15-20 \text{ m}^3/\text{s}$ geçmeyecek şekilde boyutlandırılır. Normal şartlarda birim genişlikten geçen debi $7 < q < 10 \text{ m}^3/\text{s/m}$ olarak belirlenir [3].

2.3.1 Bir Sifonun Çalışma Prensipleri

Sifonlar klasik ve otomatik olmak üzere ikiye ayrılır. Sifonun kreti, rezervuardaki normal su seviyesindedir. Hazne su seviyesindeki yükselmeyle sifon kreti üzerinden serbest savaklanma başlar. Kret üzerindeki su yükünün artması ile savaklanan suyun miktarı ve hızı da artar. Savaklanan bu su, sifon kreti üzerindeki havanın bir kısmını akımla beraber dışarı atar. Tepe kesitindeki havanın azalmasına uygun olarak sifondan geçen debi artar ve havanın tamamen atılmasını müteakip sifon tam kapasite ile çalışmaya başlar. Buna sifonun “yemlenmesi (priming)” denmektedir. Sifonun dolu olarak akması halindeki akıma ise “sifonik akım” denmektedir.

Şekil 2.5’de kret seviyesine yerleştirilen bir hava deliği mevcut veya giriş ağzı üst kotu kret seviyesine yakın teşkil edilmiş bir otomatik sifonla, giriş ağzı iyice batmış hava deliksiz bir sifonun çalışma prensibi görülmektedir. Sifondaki debi, üst su seviyesinde bir düşme meydana getirir. Fakat giriş su seviyesi, sifon tipine göre hava deliği veya sifon giriş ağzı seviyesine ininceye kadar sifonik akım devam eder. Sifona hava girişiyle akımın debisi azalmaya başlar ve hava-su karışımı muayyen bir değere erişince sifon tamamen durur. Bu hal ise “sifonun durması (depriming)” olarak adlandırılır [1].



Şekil 2.5 Bir sifonun başlıca elemanları ve otomatik sifonların çalışma prensibinin esasları [1].

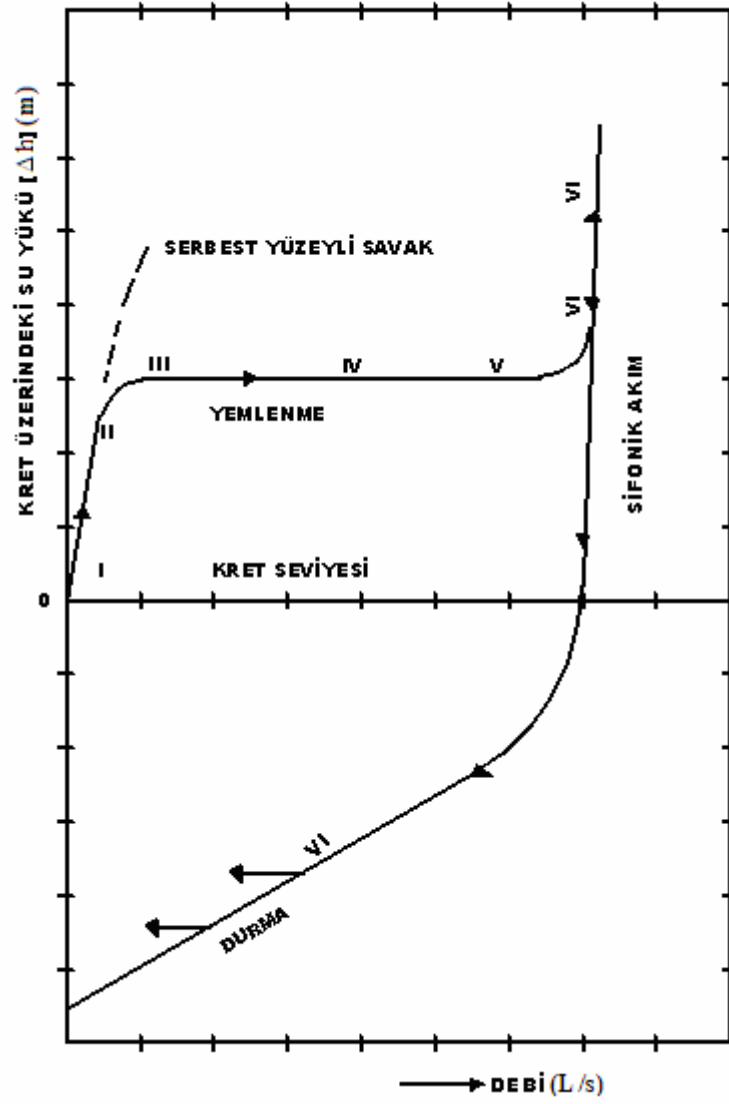
Burada;

h : sifonun çalışma yüksekliği

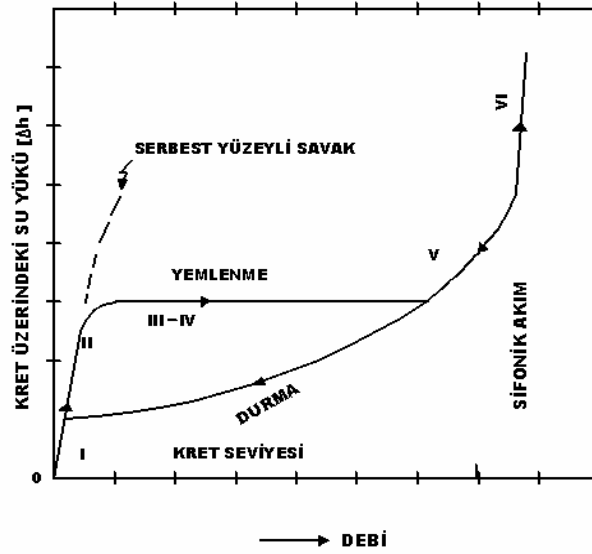
h_d : sifonun durma yüksekliği

h_o : sifon kreti ile çıkış su seviyesi arasındaki yükseklik

Δh : sifon kreti ile rezervuar su seviyesi farkıdır.



Şekil 2.6 Hava deliği olmayan ve giriş ağız batmış bir otomatik sifonun tipik çalışma eğrisi [1].



Şekil 2.7 Hava deliği kontrollü veya giriş ağzı batmamış bir otomatik sifonun tipik çalışma eğrisi [1].

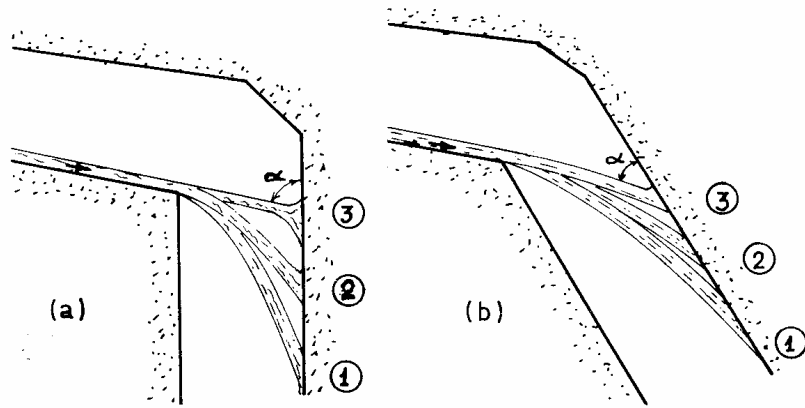
2.3.2 Bir Sifonun Yemlenme Yüksekliği ve Buna Etkiyen Faktörler

Yemlenme (sifonun harekete geçmesi) olayı, bir sifonun en karakteristik özelliğidir. Dolayısıyla bir sifon için yemlenme süresi ve yemlenme yüksekliği büyük önem taşır. Sifon kreti üzerindeki çok küçük bir su yükünde ve kısa süre içinde yemlenmenin başlaması arzu edilir. Bu ise sifon tepesindeki havanın çok çabuk boşaltılmasıyla mümkün olur. Bu amaçla kullanılan yemlenme tertibatları muhtelif şekillerde olmakla beraber, esas Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de gösterilmektedir.

Bir sifondaki yemlenme olayı, birçok parametrelere bağlı karmaşık bir problemdir. Dolayısıyla yemlenme yüksekliğini ifade etmek zordur. Bu sebeple sifonun diğer kriterleri yanında yemlenme yüksekliği de genellikle model deneyleriyle tespit edilir. Bu amaçla Davies [4], çıkış kesiti atmosfere açık ve dikdörtgen tepe kesitli sifonlar üzerinde yaptığı deneyler sonucunda, minimum yemlenme yüksekliğinin, tepe kesiti yüksekliğinin yaklaşık olarak $2/3$ ’ü değerinde olduğunu göstermiştir. Ayrıca iyi teşkil edilmiş bir sifon konstrüksiyonu ve uygun bir yemlenme tertibatı ile bu oran $1/3$ ’e düşürülebileceğini belirtmektedir. Ancak Inglis [5], tarafından $1/8$ ölçekli sifon modeli üzerinde yapılan deneysel çalışma ve daha sonra prototipteki ölçümler, modeldeki yemlenme yüksekliğinin prototiptekinden daha büyük olduğunu göstermiştir.

Genel olarak bir sifonun yemlenme yüksekliğine etki eden faktörler şöyle özetlenebilir:

- a) Sifon giriş ağzının suya batma miktarı veya havalandırma deliğinin tespit edildiği seviye: Sifonun giriş ağzı kret seviyesinden ne kadar aşağıda olursa, yemlenme o kadar erken olur. Havalandırma deliğinin yeri için de aynı şey söylenebilir.
- b) S tipi veya saptırıcı tip bir otomatik sifonda havayı boşaltacak olan su napının konumu: Bu napın simetrik ve düzgün olarak sifonun karşı cidarına çarpmasının temini gerekir. Bunun için de kret ve sifonun iç cidarındaki eşiğin düzgün olması gerekir. Aksi halde asimetrik bir nap, sifon çıkışından giren havayla hemen delinebilir ve etkinliğini kaybeder. Ayrıca bu su napının karşı cidara çarpma açısı da uygun bir değerde olmalıdır.
- c) Sifon çıkışının batmış olup olmayışı: Sifon çıkışının batmış olması yemlenmeyi olumlu yönde etkiler. Çıkışın atmosfere açılması halinde, napla sifon tepesindeki hava dışarı atılırken, mansaptan giren hava, napı yukarı doğru kaldıracak ve karşı cidara etkin çarpma açısını değiştirecektir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Sifonun çıkış kesitinden giren havanın, sifonun yemlenmesini sağlayan hava boşaltıcı nap'a olan etkisi [1].

Ayrıca sifon çıkışından ilave hava girmesi ihtimali belirecektir. Bu nedenle, mümkün olduğu sürece sifon çıkışının batmış olması temin edilmelidir. Ancak bu batma miktarının uygun bir değerde olması gerekir. Batmışlık miktarı az olursa, sifona hava girebilir; fazla olursa sifondan atılan hava mansap havuzunu zor terk eder. Bu ise yemlenme süresi ve yüksekliğini arttırır.

- d) Girişteki su seviyesi ne kadar çabuk yükselirse, yemlenme süresi ve yüksekliği o nispette azalır.

- e) Sifonun en kesit boyutlarının tesiri: Genel olarak en kesit küçüldükçe yüzeysel gerilimin tesiri artar ve bu da yemlenmeyi olumsuz yönde etkiler. Bu sebeple özellikle model çalışmalarında sifon tepe en kesitinin belli bir değerden küçük olmaması gerekir. Bu, aynı zamanda model benzerliği için Gibson [6], tarafından verilen kriterlerle de sınırlandırılmıştır. En kesit alanının yanında, en kesit şekli ve nispetleri de yemlenme yüksekliği üzerinde etkili olmaktadır. En uygun en kesit şekli, uygun bir genişlik-yükseklik bağıntısı vermesi bakımından dikdörtgen olmaktadır.

Tepe en kesitlerinden başka, sifonun alçalma bölgesinde tepeden çıkışa doğru en kesitin küçültülmesi de sifonun yemlenmesini çabuklaştırır. Ayrıca sifon çıkış kesitinin daraltılması, tepe kesitinde (kritik bölge) piyezometre çizgisinin yeterli miktarda yüksek tutulmasını da sağlar [1].

2.3.3 Sifonun Durma Yüksekliği ve Buna Etkiyen Faktörler

Bir sifondaki sifonik akım devam ederken rezervuara giren suyun debisi, o anda sifonun debisinden küçük ise, rezervuardaki su seviyesi düşmeye başlar. Su seviyesinin sifon giriş ağzı veya havalandırma deliği girişinden muayyen bir yüksekliğe kadar alçalmasıyla sifona suyla beraber hava girmeye başlar. Ancak, su seviyesi yemlenme seviyesine düşüncüye kadar sifondaki akım, debisi azalarak devam eder ve içeriye yeteri kadar (sifon tepesindeki basıncın atmosfer basıncı değerine erişmesine kadar) havanın girmesiyle sifon aniden durur. Henüz kret seviyesinin üzerinde olan giriş su seviyesi, kret seviyesine düşüncüye kadar serbest olarak savaklanma devam eder (Şekil 2.7). Sifonik akımın durması anında kret üzerindeki mevcut su yüküne “sifonun durma yüksekliği” denir. Şayet sifonun giriş ağzı kret seviyesinden çok aşağıya kadar batırılmış ve hava deliği de mevcut değilse (S tipi sifon), durma seviyesi, kretin altında ve giriş ağzına yakın bir değerde olacaktır (Şekil 2.6). Bu haldeki sifonun durması, genellikle girişte meydana gelen vortex vasıtasıyla giren havayla olmaktadır.

Sifonun yemlenme olayı gibi durması da büyük önemi haiz olup, bir sifonun boyutlandırılmasında ayrıca etüt edilmeyi gerektirmektedir. Burada da arzu edilen, durma yüksekliğinin minimum olması ve böylece sifonun işletme seviyesine yakın bir değere kadar tam kapasite ile çalışmasıdır. Bunun haricinde, sifondaki vibrasyonu minimuma indirmek için, durma esnasında havanın sifona tedrici ve tüm en kesite üniform olarak yayılacak şekilde girmesini temini gerekmektedir.

Sifonun durma yüksekliği de ancak model deneyleriyle tespit edilebilmektedir. Şayet sifonun durması hava deliğiyle sağlanıyorsa, bu hava giriş kesiti alanının, sifonun tepe kesitinin 1/24'ünden daha az olmaması gerekmektedir.

Sifonun durma yüksekliğini, konstrüksiyon ve havalandırma şartlarından başka, sifon kesiti ve çıkış şartları da etkilemektedir. Nitekim Whittington ve Ali [7]'nin kare ve dairesel kesitli muhtelif boyuttaki sifonlar üzerinde yaptıkları deneyler bunu göstermektedir.

2.3.4 Sifon Akımın Stabilesi ve Sifonda Meydana Gelen Vibrasyon

İyi projelendirilmiş bir sifonda kret üzerindeki su seviyesi uygun bir değere varmadan yemlenme olmaması gerekir. Aynı şekilde su seviyesi uygun bir seviyeye düşmeden sifon akımı durmamalıdır. Bu yemlenme ve durma olaylarının tedrici olarak cereyan etmesi arzu edilir. Aksi halde, özellikle yüzey alanı küçük bir rezervuarda sifon kretindeki su yükü, stabil bir sifonik akım oluşturacak bir değere varmadan yemlenme başlayacak ve bu esnada rezervuara giren işletme fazlası suyun debisi, sifonun maksimum debisinden küçük olduğu için de su seviyesinde süratle bir düşme olacaktır. Giriş su seviyesindeki düşmeyle sifona hava girmeye başlar. Giren hava sifon akımını durduracak düzeyde olmakla beraber, sifonun debisini azaltacağından giriş su seviyesinde tekrar bir artışa sebep olur. Dolayısıyla sifon girişinde yemlenme ve durma seviyeleri arasında devamlı bir salınımla beraber sifon akımın stabilesi de bozulmuş olur. Ayrıca sifonun kesintili olarak büyük miktarda hava yutması sonucu sifonda şiddetli şekilde vibrasyon meydana gelir. Bu ise arzu edilmeyen bir durumdur [1].

2.3.5 Sifon Savakların, Serbest Yüzeyli Savaklarla Karşılaştırılması

Sifon savakların serbest yüzeyli savaklara göre üstünlükleri:

- a) Rezervuardaki su seviyesi, sifon savakla çok küçük limitler arasında kontrol edilebilir.
- b) Serbest yüzeyli savaklarda savak debisi, kretin üzerindeki su yüküne bağlıdır ve küçük yükselmeler dahi önemlidir.
- c) Sifon savaklarda kret üzerinde çok küçük bir su yükü ile büyük miktarda debi savaklamak mümkündür.
- d) Menba su seviyesindeki ani yükselmelere karşı sifon savaklar çok uygun sonuçlar verir.
- e) Bir sifon savak, kapaklı serbest yüzeyli savaklara oranla herhangi bir hareketli veya aşınabilir bir kısım ihtiva etmediği için ihmal edilebilecek bir bakım masrafı gerektirir.

f) Baraj gövdesi üzerinde herhangi bir zayıflatmaya lüzum kalmadan, sifon bir eyer gibi gövde üzerine oturtulabilir.

g) Serbest yüzeyli savağın kret boyunun sınırlı olduğu yerlerde, birden fazla sayıda sifon savak tertip etmek suretiyle bu problemi çözmek mümkündür.

h) Özellikle sifonların açık kanallarda ve çökeltim havuzlarında kullanılması halinde, sürüntü madde konsantrasyonu yüksek olan suyu savaklamaları nedeniyle, yüzeyden temiz suyu savaklayan serbest yüzeyli savaklara nazaran bunlara ayrı bir üstünlük sağlamaktadır.

Sifon savakların serbest yüzeyli savaklara göre mahsurları:

a) Çalışma prensibinin gereği olarak sifon savağın debisinin kısa süre içinde sıfırdan maksimum değere erişmesi, mansapta bir feyezan dalgasının meydana gelmesine sebep olur.

b) Sifon yemlenmeye başladıktan sonra, üst su seviyesindeki çok fazla bir yükselmeye karşılık sifon debisinde çok az bir artma olur.

c) Sifon konstrüksiyonlarının inşası pahalıdır.

d) Soğuk iklimli ve ormanlık bölgelerde sifon kesiti buz veya ağaç dallarıyla tıkanabilir.

e) Sifon savağın inşa edildiği ana yapının kütlesi küçükse, sifondaki vibrasyon gövde stabilitesine tesir edebilir [1].

2.4 Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar

2.4.1 Sifon Savakların Hidrolik Yönden İncelenmesi

Bir otomatik sifondaki akım altı safhada toplanabilir. Bu safhalar şöyle özetlenebilir:

1) Sifon girişindeki su seviyesi, sifonun kret seviyesinde olup, bu halde sifonda akım yoktur.

2) Rezervuarda su seviyesinin biraz yükselmesiyle sifon kreti üzerinden serbest savaklanma başlar. Bu halde sifon alçalma bölgesindeki nap, henüz cidara çarparak içeriden hava boşaltacak güçte olmadığı için sifondaki akım, normal serbest yüzeyli savak akımı özelliğindedir. Bunun için de bu safhadaki akıma sadece “savak akımı” denir.

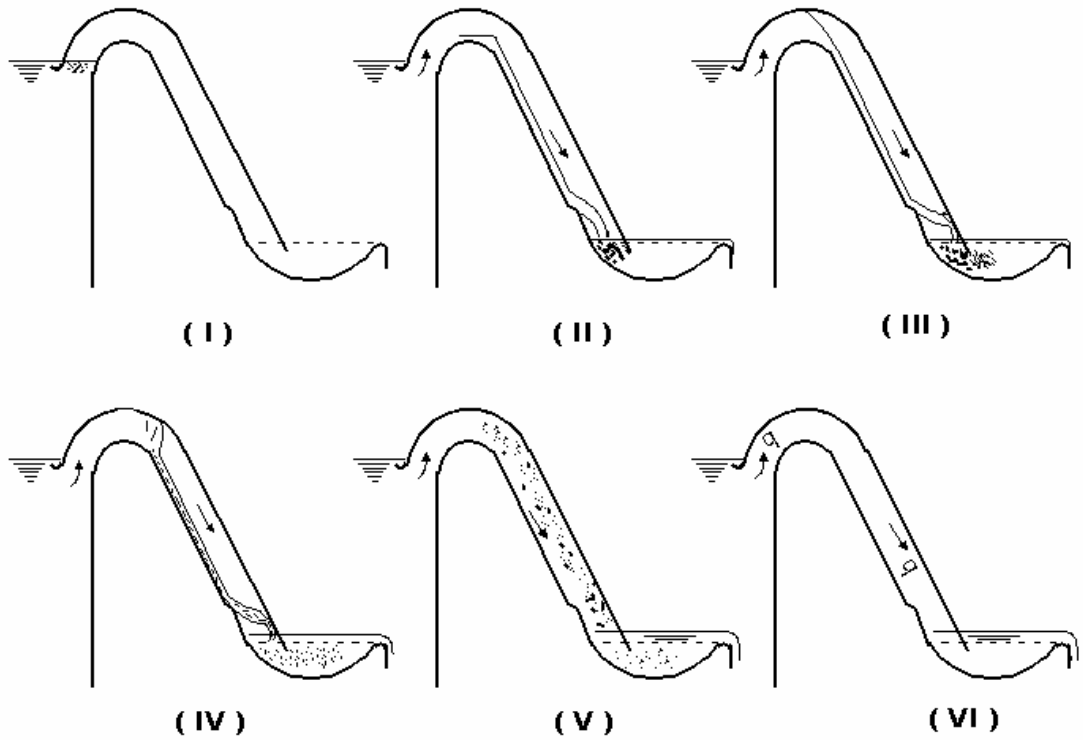
3) Rezervuardaki yükselme, sifonun yemlenme yükünü arttıracak, dolayısıyla debide bir artma meydana gelecektir. Ancak, henüz tam yemlenme olmamıştır. Sifonun tepesinde ve alçalma bölgesinde, atmosfer basıncının altında bir basınç mevcuttur. Bu safhadaki akımla 2. safhadaki akım arasında büyük bir benzerlik vardır. Fakat içerdeki basınç azalmasına uygun olarak bu halde sifon kreti üzerindeki su yüzeyi kotu, rezervuardaki seviyeden daha büyüktür. Bu safhada sifonun alçalma bölgesindeki eşik vasıtasıyla su, bir perde şeklinde karşı cidara

çarparak içerideki havayı boşaltmaktadır. Bu hal, “saptırılmış bir nap’a sahip ve su yüzeyinde atmosfer basıncının altında bir basınç olan savak akımı” olarak tanımlanabilir.

4) Bu safhada 3. safhaya benzer olarak debi az da olsa bir miktar artar. Fakat debinin bu safhadaki değeri, napın şeklini bozarak sifonun tam dolu akmasını temin edememektedir. Bu halde de hala atmosfer basıncından küçük bir yüzey basıncına sahip savak akımı mevcuttur.

5) Sifondan geçen suyun miktarındaki daha fazla bir artış, içeride kalan havanın kabarcıklar halinde suyla karışarak sifonu terk etmesine sebep olacaktır. Akımın bu şekline ise “kısmi sifonik akım” denir.

6) Sifon içindeki havanın (kabarcıklar halinde) tamamen boşaltılmasıyla sifon suyla tam dolu olarak akmaya başlar (yemlenme tamamlanmıştır). Diğer bir deyişle “sifonik akım” başlamıştır [1].



Şekil 2.9 Bir otomatik sifonun çalışmaya başlaması sırasında görülen başlıca akım safhaları [1].

Akımın teşekkülü yönünden 2. ve 6. safha arasında beş safha halinde izah edilen sifondaki akım, hidrolik yönden üç bölümde toplanmaktadır:

a) 2. safhadaki normal serbest yüzeyli savak akımı: Su yüzeyindeki basınç atmosfer basıncı olup geçen debi, serbest yüzeyli savak akımının tabi olduğu hidrolik hesap metotlarına göre hesaplanır.

b) 3. ,4. ve 5. safhalardaki (yemlenme safhasındaki) akım: Bu safhalardaki akım, yine serbest yüzeyli savak akımı şeklinde ise de, artık su yüzeyi atmosfer basıncını değil, bundan küçük ve değeri zamanla azalan bir basınç değerine sahiptir. Dolayısıyla bu bölümde sifondan geçen debi, direkt olarak serbest yüzeyli savaklardaki metotla hesaplanamaz.

c) 6. safhadaki sifonik akım: Artık sifondaki akım, serbest yüzeyli olmaktan çıkıp basınçlı hale geçmiştir. Dolayısıyla basınçlı akımların kanunları burada geçerlidir [1].

Sifondaki akımın sıfırdan başlayarak maksimum değere erişmesi sırasında sifonun düzenli bir yemlenme yapması için, özellikle küçük satırlı rezervuara giren debinin sifonun yemlenmesi için gerekli minimum debiye eşit ve ondan büyük olması gerekir.

Yemlenme safhasındaki akım, $(q, q', \frac{\Delta p}{\gamma}, \Delta h, \zeta_g)$ gibi başlıca altı fiziksel büyüklükle karakterize edilebilir [8]. Burada q sifondan geçen akımın debisini, q' sifondan su napı vasıtasıyla atılan havanın debisini, Δp sifondaki basınçla atmosfer basıncının farkını, Δh sifon kreti ile rezervuar su seviyesi farkını ve ζ_g de sifon girişindeki yük kaybı katsayısını göstermektedir.

Serbest yüzeyli dolu savak akımı için debi ifadesi,

$$q = m.b.\sqrt{2.g} . \Delta h^{2/3} \quad (2.1)$$

şeklindedir. Burada m , savak konstrüksiyonu ve menba-mansap şartlarına bağlı olan debi katsayısı, b ise savak kretinin genişliğidir. Buna göre,

$$m.\sqrt{2.g} = C$$

şeklinde gösterilerek (2.1) ifadesinde yerine yazılırsa

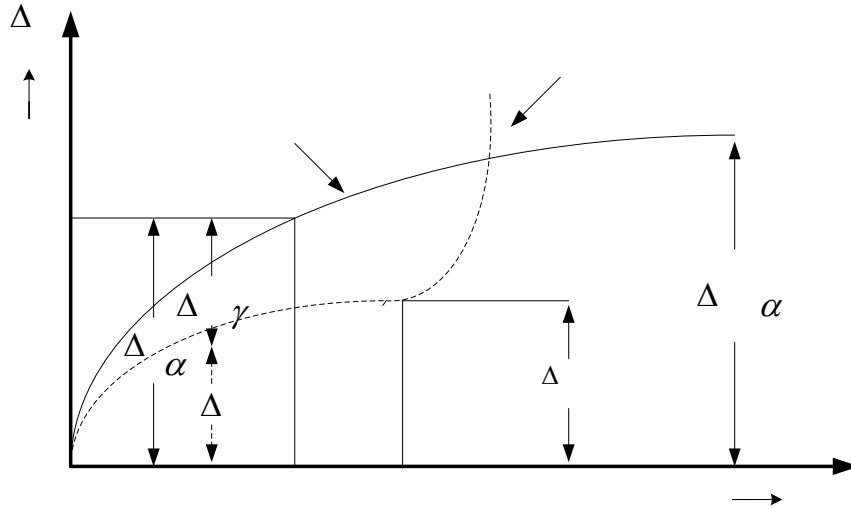
$$q = C.b.\Delta h^{2/3} \quad (2.2)$$

elde edilir.

Borelli [8], sifonun yemlenme safhasındaki akımın debisi için (2.1) ifadesine, sifon içindeki basınçla atmosfer basıncının farkına karşılık gelen $\Delta p/\gamma$ basınç yüksekliği terimini ilave ederek,

$$q = m.b \sqrt{2.g} \left(\Delta h + \frac{\Delta p}{\gamma} \right)^{3/2} \quad (2.3)$$

şeklinde bir bağıntı verilmiştir. Bu ifadenin doğruluğu Şekil 2.10 ‘da bir serbest yüzeyli savakla sifon savağın $q = f(\Delta h)$ ve $q = f(\Delta h, \Delta p/\gamma)$ eğrileri incelendiğinde daha iyi görülmektedir.



Şekil 2.10 Serbest yüzeyli savakla sifon savağın eğrisel şekli [38].

Şekildeki notasyonlardan Δh sifonun yemlenme safhasında herhangi bir q debisi için rezervuar su seviyesiyle sifon kreti arasındaki farkı, $\Delta p/\gamma$ aynı debi ve Δh için sifondaki basınçla atmosfer basıncı farkına, Δh_0 sifonik akımın başladığı andaki Δh değerini, $\Delta h_0 \alpha$ serbest yüzeyli savakta aynı debiyi temin edecek su yükünü ve $\Delta h_0 \alpha$ da q_0 debisine karşı gelen Δh_0 değerini göstermektedir.

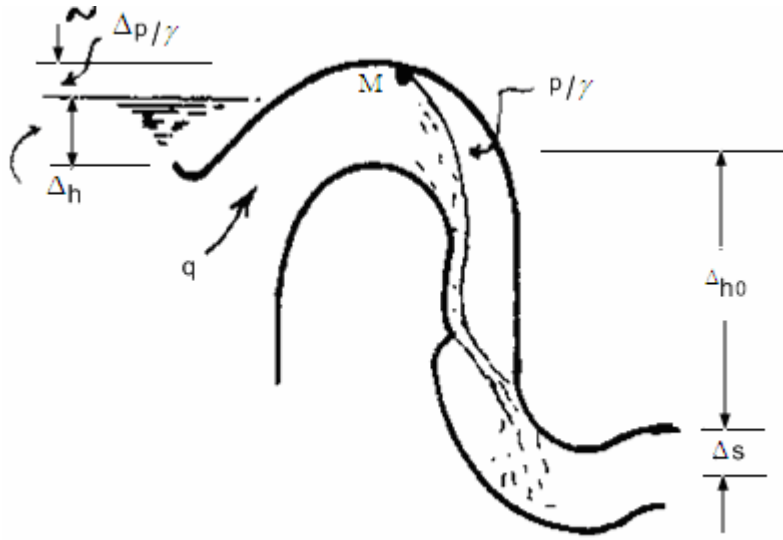
h

(2.3) bağıntısından m için

**Serbest Yüzlü
Dolu savak**

$$m = \frac{q}{b\sqrt{2g}\left(\Delta h + \frac{\Delta p}{\gamma}\right)^{3/2}} \quad (2.4)$$

şeklinde bir eşitlik elde edilir. Borelli [8], Şekil 2.11’de şematik olarak görülen tipteki bir sifon modeli üzerinde, sabit bir debi için Δh ve $\Delta p/\gamma$ değerlerini değiştirerek yaptığı deneylerde, debinin sabit bir değerine karşı gelen m katsayısını göstermiştir. Bu ise (2.4) eşitliğinde de görüldüğü gibi $(\Delta h + \Delta p/\gamma)$ toplamının, belli bir debi için daima sabit kaldığını gösterir.



Şekil 2.11 Sifon Modeli [8].

(2.1) formülüne göre sifondan geçen q debisi, Δh ve $\Delta p/\gamma$ parametrelerinin bir fonksiyonudur. Bu $q = f(\Delta h, \Delta p/\gamma)$ bağıntısını belirlemek için (2.1) formülünden Δh değeri için,

$$\Delta h = \frac{q^{2/3}}{(2gb^2)^{1/3} \cdot m^{1/3}} - \frac{\Delta p}{\gamma} \quad (2.5)$$

elde edilir. Kret genişliği (b) sabit olan bir sifon için

$$(2gb^2)^{1/3} = k = \text{sabit}$$

olacağından (2.5) ifadesi,

$$\Delta h = \frac{q^{2/3}}{k.m^{2/3}} - \frac{\Delta p}{\gamma} \quad (2.6)$$

olur.

(2.6) bağıntısından görüldüğü üzere $\Delta p/\gamma$ nın sabit değerleri için $(q, \Delta h)$ bağıntısı parabolik bir eğri ailesi meydana getirir.

Sifondaki akımın bu safhası için önerilen hesap şekillerinden birisi Crump ve Ackers [9], tarafından teklif edilen bir metottur. Bu araştırmacılar, bir sifonun giriş ağzı üst seviyesi ya da havalandırma deliğinin kret seviyesine göre yerini tayin etmek için bir hesap esası getirmek üzere çalışmalar yapmışlardır. Bunun için de yine serbest yüzeyli savak formülünden hareket edilmiştir:

Δh_g : Sifon giriş ağzı üst seviyesi veya havalandırma deliğinin sifon kretinden olan yüksekliği,

Δh_p : Sifondan nap vasıtasıyla havanın boşaltılmaya başladığı (serbest yüzeyli savak akımının sonu, yemlenme başlangıcı) anda, kretle rezervuar su seviyesi arasındaki fark.

(Δh_p değerine, “potansiyel yemlenme yükü” denmektedir).

b : Kret genişliği

q_p : Bu safhada Δh_p su yüküne karşı gelen potansiyel yemlenme debisi olmak üzere, $\Delta h_p > \Delta h_g$ hali için,

$$\Delta h = \left(\frac{q}{C.b} \right)^{2/3} \quad (2.7)$$

şeklinde bir formül verilmektedir. Bu bilinen (2.2)’deki klasik serbest yüzeyli savak formülüdür. Sadece, bu akım şartları için C değerinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Potansiyel yemlenme anında (2.7) formülü,

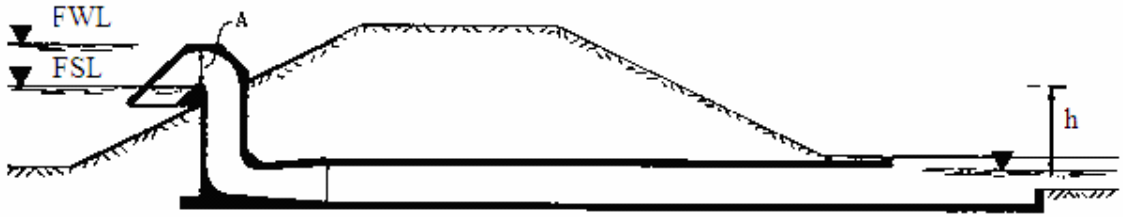
$$\Delta h_p = \left(\frac{q_p}{C.b} \right)^{2/3}$$

(2. 8)

olur. Crump ve Ackers [9], bir sifon modeli üzerinde yaptıkları deneylerden C'nin değerini 5.31 olarak bulmuşlardır. Ayrıca yaklaşık bir değer olarak genellikle kullanılan $C = 4$ için (2.7) formülünden hesaplanan Δh_p değeri, deneysel olarak tespit edilen değerden yaklaşık %4 kadar büyük bir sonuç verdiği gösterilmiştir.

Δh_p potansiyel yemlenme yüksekliği, sifonun stabil bir şekilde yemlenme yapabilmesi için çok önemli bir giriş ağzı veya hava deliğinin yerini tespit etmekte büyük önem taşır.

Kovari [10] ise, yaptığı çalışmalarda, şekil 2.12'de görülen sifon üzerinde çalışmıştır.



Şekil 2.12 Sifon savak [10].

$$Q = C.A.\sqrt{2.g.h} \quad (2.9)$$

burada, C debi katsayısı, A giriş kıvrımındaki kesit alanı, h ise sifonun çalışma yüksekliğidir (giriş ve çıkış çalışma yüksekliği arasındaki fark).

Enerji kayıpları göz önüne alınarak bir sifonun kapasitesi Erkek ve Ağiroğlu [3]'na göre ise;

$$Q = \mu.A.\sqrt{2.g.h_g}$$

eşitliği ile hesaplanır.

h_g : Sifon tepesi ile sifon sonu arasındaki düşey mesafe,

μ : Sifon akım katsayısı ($\mu = 0.7 - 0.8$),

A : Sifon çıkışındaki kesit alanıdır [3].

Debi katsayısı ise,

$$C = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda \cdot \frac{1}{d} + \sum k}} \quad (2.10)$$

burada,

λ = sürtünme faktörü (beton için 0.03, çelik için 0.02)

l = sifon uzunluğu

d = sifon çapı

$\sum k$ = bölgesel kayıp katsayıları toplamı

izin verilen sifonun basınç yüksekliği ise,

$$\frac{P}{\gamma} = 0.9 \frac{P_0}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} - 1 \quad (2.11)$$

burada,

$\frac{P_0}{\gamma}$ = atmosfer basınç yüksekliği

$\frac{P_v}{\gamma}$ = suyun buhar basıncıdır.

Sifonun maksimum emiş yüksekliği ise,

$$H_T \leq \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \sum h_{l_i} \quad (2.12)$$

burada, v borudaki suyun hızı, $\sum h_{l_i}$ borunun mansap kayıpları toplamıdır.

Babaeyan-Koopaei, Valentine ve Ervine [11] ve [12], ise İngiltere’de 1930 yılında inşa edilen bir barajdaki fazla suları güvenilir bir şekilde boşaltmak amacıyla sifon modelleri üzerine fiziksel model çalışmaları yapmışlardır. Mevcut baraja 1936 yılında yapılan iki sifon ile fazla sular uzaklaştırılmaktaydı. Fakat bu sifonlar daha sonra yetersiz kalmaya başlamıştı.

Hidrolik model çalışma 1994 yılında Newcastle Üniversitesi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada standart fiziksel modelleme teknikleri kullanılmıştır. Ayarlanabilen hava girişli çan ağızlı ile tek bir sifonun modeli, aşağıya doğru akış şartlarını ve su deposunu temsil eden 2 tank arasına takılmıştır. Her tank içinde su seviyesi kontrolü

sağlanmıştır. Sifonun iki yanı gözlem ve ölçümlere izin verecek şekilde açık bırakılmıştır. Model 1:10'nun geometrik ölçeği ile inşa edilmiştir. Bu boyutların sonuçları Froude ölçekleme kurallarını tatmin etmiştir ve standart malzeme parça boyutlarının avantajını sağlamıştır. Ayrıca havalandırmanın yan etkilerini minimize etmede uygun bir ölçek olduğu belirtilmiştir[11].

Mevcut çan ağızlı sifon sistemi 3 m³/s civarındaki ani boşaltımında sifonların boşaltılmasına uygun değildir. Bu sifon tepesinden bir hava boşluğunun ani kalkmasından dolayı oluşur. Modelin testi iki aşamada uygulanmıştır.

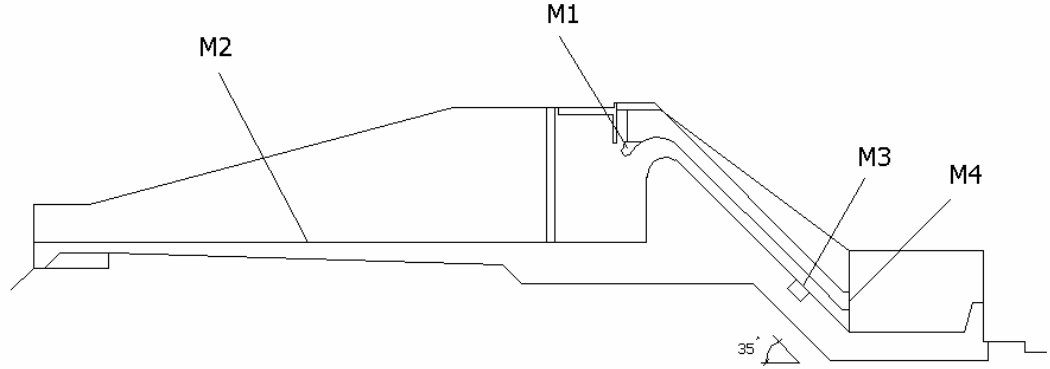
İlk aşamada var olan geometri incelenmiş, var olan sifon konfigürasyonunun hazırlanması için su rezervuar seviyeleri kurulmuştur. Deneylerin 1. aşamasının sonuçlarına göre, hava girişine yeniden düzenlenme gerektiği ve hava düzenlemelerinin geliştirilmesi için değişik seçenekler düşünülmesi sonucuna varılmıştır.

İkinci aşamada, hava girişinin yeniden düzenlenmesi için değişik seçenekler ve tüm boşaltma sınırları üzerinde bir sabit sifon performansı düşünülmüştür. En istikrarlı şartlar, bir oluğun savak başlığının içinde uygun seviyede kesilmesi ile bulunmuştur. Bu geometri, mükemmel bir hava düzenleme durağanlığı, zarar görmemiş savak kapasitesi, kuyruk suyu seviyesine ve savak içindeki dalga şartlarına duyarlıdır.

Sonuçta Brent su rezervuar içindeki mevcut çan ağızlı sifon savağın ani yemlenme ve sel taşkınlarının önlenmesinde yeterli olmadığını anlamıştır[11].

Hardwick ve Grant [13] ise, Pargau hidroelektrik projesinde kullanmak üzere hava düzenleyicili sifon savaklar üzerine çalışmalarda bulunmuştur. Bunun için, nehrin alt ucuna 1.5x10⁶ m³ kapasiteli bir gölet yapılmıştır. Bu bentten taşkın suları veya fazla suları uzaklaştırmak için 140 m³/s kapasiteli hava düzenleyicili sifon savaklar yerleştirmiştir. Çok sayıda deneyler sonucu bu savaklar geliştirilmiştir ve bu savağın prototipi üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Bu sifon İmperial Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında pleksiglas malzemeden 1/10 ölçeğinde yapılmıştır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Sifon savak kesiti [13].

Şekilde;

M1: Yükleme havuzu girişi akış yolu: Perdeli hava düzenleyiciler ile ilk deneyler düşük yüklü, kısıtlanmış hava teminli sifonlar için geliştirildi. Böylece göletteki yüzey dalgalanmaları ve debideki istenmeyen dalgalanmaları yönlendirmektedir. Bu model bulunana kadar birçok deneme yapılmıştır.

M2: Yükleme havuzu girişi ters seviyesi: Maksimum akış debisi $141 \text{ m}^3/\text{s}$ ve giriş hızı 2.5 m/s dir. Bu hızda, girişteki keskin yön değişiklikleri sifon debilerindeki dengesizliğe neden olur ve akışlar ayrışır.

M3: Saptırıcının modife edilmesi: Yatay saptırıcılar ile yapılan ilk deneyler sadece düşük akışlar için uygundur. Saptırıcının yüksek debilerde hafif eğri yörüngenin akışının ayırıştırması ile yukarı akım basınç dalgalanmaları tarafından güçlü bir şekilde etkilenir ve çalkalanmaya sebep olur. Saptırıcıya yukarı doğru 30° eğim verilmiştir.

M4: Şüt çıkış kenarı: deneyler göstermiştir ki; şüt çıkış kenarının devam eden alt eğiminde kapanma geliştirilebilir ve düşük debilerdeki aşağı akımı hava girişinde yatay kesit yok edilebilir.

Model sifonun performansında ise, değişik hava boşluk kesit alanları için yük debi eğrileri gösterilmiştir ve dört değişik akış tanımlanmıştır. Bunlar;

a. Bent akımı

Bend akışı gölet seviyesinin 121.80 m' den 121.95 m' ye kadar olan seviyelerinde oluşur.

b. Geçişken akım

Yaklaşık $2 \text{ m}^3/\text{s'}$ yi geçen akışlar için şüt alt yüzeye karşı saptırıcı jet kapanır ve hava boşaltma başlar. Başlıktaki basıncın düşmesi başlığın içindeki su seviyesinin yükselmesine sebep olur ve iç hava boşluklarının geçici kapanmasına sebep olur. Aynı zamanda akış oranı hızlıca artar ve laboratuvar tankının seviyesinde düşüşe sebep olur. Sonra debi düşer ve hava

boşluklarına yeniden maruz kalınır. Bu davranış prototip debisinin $8 \text{ m}^3/\text{s}$ seviyesine kadar devam eder.

c. Hava düzenleyicili akım

Debisinin $8 \text{ m}^3/\text{s}$ seviyeyi aşmasında gerçek hava düzenleyicili akış başlar. Yemlenme işleminde, hava saptırıcıdan boşalır ve su debisinde ani artış ile birlikte şüt boyunca ani su seviyesinin yükselmesine sebep olur. Sifonun içerisindeki basıncın düşmesi sonucunda boşluklardaki hava çekilir.

$70 \text{ m}^3/\text{s}$ den $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 'e kadar olan akışlar için boşluklardan hava girişi yukarı kısmın su seviyesinin yükselmesi ile engellenir.

d. Tek fazlı akım

Yaklaşık $170 \text{ m}^3/\text{s}$ kadar olan akışlarda boşluklar su altında öyle derinde kalır ki hava regülasyonu kesilir ve tek fazlı akım başlar.

Avcı [1], ise klasik ve otomatik sifon savaklar üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda klasik ve otomatik sifonları dolu savak ve yan savak olarak düz kanallara yerleştirerek akımları incelemiştir. Bu çalışmada 50 cm genişlik ve 45 cm yüksekliğindeki dikdörtgen kesitli deney kanalı kullanılmıştır. Ayrıca yan savak sifon deneylerinde akım hızını büyük tutmak amacıyla kanal genişliği 25 cm'e düşürülerek de deneyler yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan klasik ve otomatik sifonlar, akımların gözlenebilmesi için pleksiglas malzemeden yapılmıştır. Hazırlanan model sifonlar, önce kanalın mansap ucunda akım doğrultusunda, sonra da yan tarafında akım doğrultusuna dik olarak yerleştirilerek deneyler yapılmıştır.

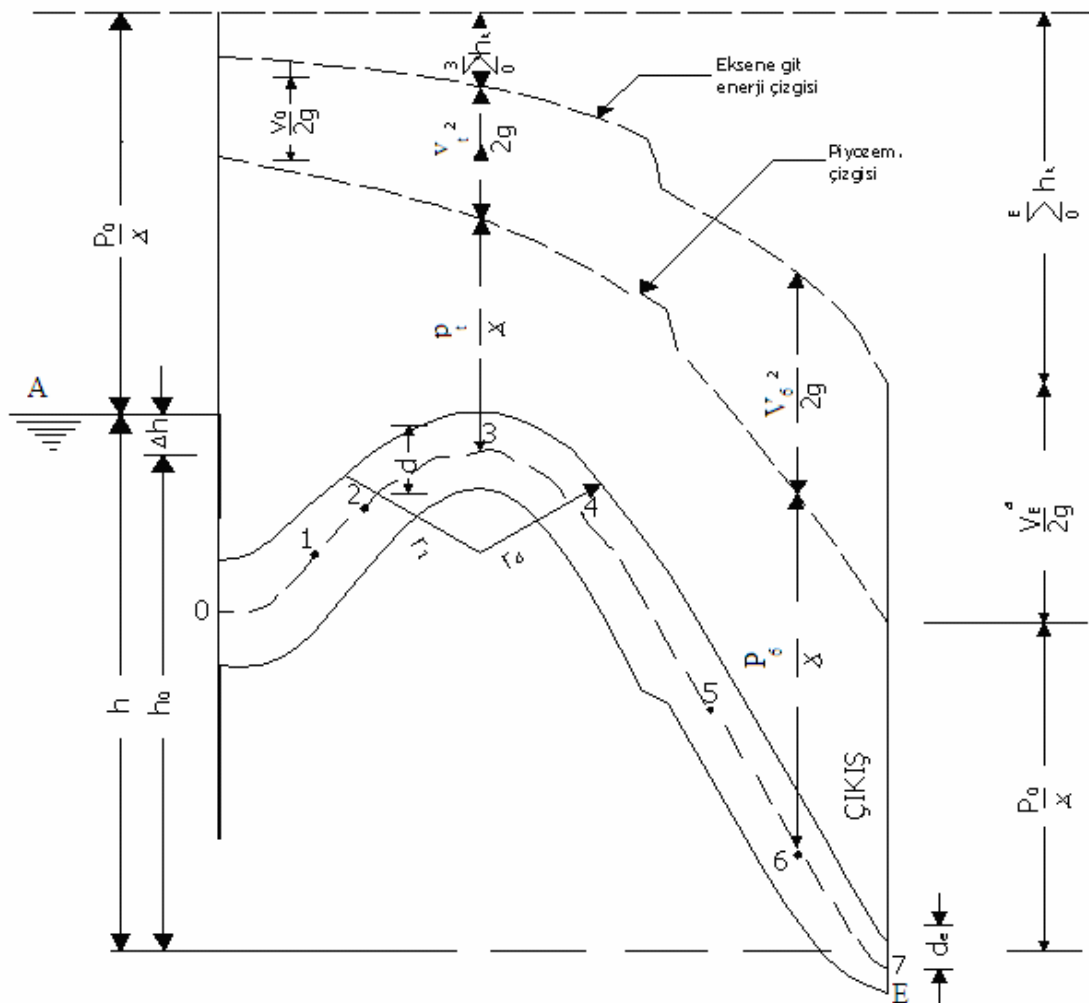
Bu çalışmada, önce sifonun genel çalışma prensipleri, yemlenme ve durma olayları, kavitasyon olayı, helikoidal akımlar, kanaldaki akımın sifona etkilerini, sifon yan savağın kanaldaki akıma etkisini, kanaldaki hız dağılımlarını, seviye ölçümlerini, Froude sayılarını, debi katsayılarını araştırmıştır.

Bu çalışmada, su yüzü profilleri ile hız dağılımları grafikleri şekiller ile gösterilmiştir.

2.4.2 Sifonun Tam Kapasite İle Çalışmasının (Sifonik Akımın) Hidrolik Yönden İncelenmesi

Sifonda yemlenme tamamlanıp “sifonik akım” başladığı andan itibaren sifondaki akım serbest yüzeyli olmaktan çıkmış ve basınçlı hale gelmiştir. Bu safhadaki akımın hidrolik yönden incelenmesi, sifon debisinin belirlenmesi gayesine yöneliktir.

Şekil 2.14'de hesap için esas alınan bir sifonda, en kesit genişliği sifon boyunca sabit olup yüksekliği girişten çıkışa doğru azalmaktadır.



Şekil 2.14 En genel haldeki bir otomatik sifondaki enerji ve piyezometre çizgileri [1].

28

$$h + \frac{P_{0A}}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2.g} = 0 + \frac{P_{0E}}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2.g} + \sum_0^E h_k \quad (2.13)$$

Burada h , sifon çıkış kesiti ekseniyile üst su seviyesi arasındaki fark; P_{0A}/γ üst su yüzeyinde, P_{0E}/γ da sifon çıkış kesitindeki atmosfer basıncı yüksekliği; V_A üst su seviyesindeki yaklaşım hızı; V_E sifon çıkış kesitine ait ortalama hız ve $\sum_0^E h_k$ ise sifon girişinden çıkış kesitine kadar olan toplam yük kaybıdır.

Bu değerlerden V_A yaklaşım hızı rezervuar boyutlarına bağlı olmakla beraber denklemdeki diğer değerlere göre çok küçük olup genellikle;

$$\frac{V_A^2}{2.g} \cong 0$$

kabul edilir. Aynı şekilde aralarında çok küçük bir fark olan P_{0A}/γ ve P_{0E}/γ değerlerinin de birbirine eşit olduğu kabul edilir. Bu durumda (2.13) eşitliğinden

$$V_E = \sqrt{2.g \left(h - \sum_0^E h_k \right)} \quad (2.14)$$

elde edilir. Sifon çıkış en kesit alanı $F_E = b \times d_E$ olmak üzere sifondan geçen akımın debisi,

$$q = F_E \sqrt{2.g \left(h - \sum_0^E h_k \right)} \quad (2.15)$$

olur.

(2.15) bağıntısında olduğu gibi, sifondaki akımda enerji kayıplarını da dikkate alarak hesaplanan debiye “sifonun pratik (veya gerçek) debisi” denmektedir. Bu formüldeki toplam yük kayıplarını ifade eden $\sum h_k$ değeri, yersel yük kayıpları ve sürekli yük kayıpları olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. Bu kayıpların her birini, akımın ortalama hız yüksekliği cinsinden ifade ederek belirlemek en fazla tercih edilen bir yoldur. Buna göre,

K_1 : Sifon girişindeki yük kaybı katsayısı,

K_2 : Sifon giriş dirseğindeki dirsek yük kaybı katsayısı,

K_3 : Sifonun tepe dirseğinin yük kaybı katsayısı,

K_4 : Saptırıcı bir tip sifonda saptırıcıdaki yük kaybı katsayısı,

K_5 : Sifon çıkış dirseğine ait yük kaybı katsayısı,

K_6 : Sifon çıkışındaki çıkış kaybı katsayısı,
olmak üzere yersel yük kayıpları toplamı,

$$(K_1+K_2+K_3+K_4+K_5+K_6) \frac{V_E^2}{2.g} \quad (2.16)$$

olur. Ayrıca sürekli yük kayıplarının belirlenmesi için (Şekil 2.13'deki durum için),

Kesitler : $F_0, F_1, F_2, \dots, F_n$

Boyutlar : $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$

$q = F_0.V_0 = F_1.V_1 = \dots = F_n.V_n$ den

$$V_0 = V_n \cdot \frac{F_n}{F_0}, \quad V_1 = V_n \cdot \frac{F_n}{F_1} \text{ olur.}$$

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n$ yukarıdaki kesitler arasındaki sürekli yük kaybı katsayısı olmak üzere sürekli yük kayıpları toplamı:

$$\left[\xi_1 \left(\frac{F_n}{F_1} \right)^2 + \xi_2 \left(\frac{F_n}{F_2} \right)^2 + \dots + \xi_n \right] \frac{V_n^2}{2.g} \quad (2.17)$$

olacaktır. Veya bunu daha kısa bir şekilde,

$$\frac{V_n^2}{2.g} \sum_1^n \left[\xi_i \left(\frac{F_n}{F_i} \right)^2 \right] \quad (2.18)$$

olarak ifade edilir. Şekil 2.14'deki sifon için bu ifade,

$$\frac{V_E^2}{2.g} \sum_1^7 \left[\xi_i \left(\frac{F_E}{F_i} \right)^2 \right] \quad (2.19)$$

şeklinde olur. Buna göre toplam yük kaybı için (2.16) ve (2.19) değerlerini toplayarak,

$$\sum h_k = \left\{ K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + \sum_1^7 \left[\xi_i \left(\frac{F_E}{F_i} \right)^2 \right] \right\} \frac{V_E^2}{2.g} \quad (2.20)$$

elde edilir. Burada parantez içerisindeki değerlerin toplamı belli bir sifon için sabit olacaktır. Dolayısıyla parantez içi,

$$K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + \sum_1^7 \left[\xi_i \left(\frac{F_E}{F_i} \right)^2 \right] = \xi \quad (2.21)$$

şeklinde tek bir sabitle ifade edilebilir.

(2.17) denklemi yeniden ele alınırsa,

$$h = \frac{V_E^2}{2.g} + \xi \frac{V_E^2}{2.g} = (1 + \xi) \frac{V_E^2}{2.g} \quad (2.22)$$

olur. Buradan da çıkış kesitindeki ortalama hız,

$$V_E = \sqrt{\frac{2.g.h}{1 + \xi}} \quad (2.23)$$

olarak ifade edilir. Böylece sifonun gerçek debisini veren ifade,

$$q = V_E \cdot F_E = F_E \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{1 + \zeta}} \quad (2.24)$$

şekline dönüşür.

Sifondaki akışkan ideal bir akışkan kabul edilirse, (2.13) eşitliğindeki yük kayıpları toplamını ifade eden terim $\sum h_k = 0$ olur. Dolayısıyla (2.23) formülündeki ζ değeri de sıfır olacaktır. Bu takdirde (2.23) ifadesi,

$$q = F_E \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2.25)$$

şekline dönüşür. Bu şekilde hesaplanan debiye ise “sifonun teorik debisi” denir. Gerçek debi bundan daha küçüktür. Bu iki debi birbirine oranlanırsa,

$$q_{gerçek} = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}} F_E \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2.26)$$

şeklinde bir bağıntı elde edilir. Aynı şekilde,

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}} = \mu = Sabit \quad (2.27)$$

denilirse (2.22) eşitliği,

$$q_{ger.} = \mu \cdot F_E \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2.28)$$

olarak ifade edilmiş olur. Teorik debinin gerçek debiye oranı olan μ katsayısı, “debi katsayısı” olarak adlandırılmakta olup değeri daima birden küçüktür.

(2.28) formülünde sifon debisi doğrudan doğruya çıkış kesiti (F_E) ve giriş-çıkış su seviyeleri farkı (h)’nin fonksiyonu olduğu görülmektedir. Ayrıca (2.28) eşitliği,

$$q = \mu \cdot F_E \sqrt{2 \cdot g (h_0 + \Delta h)} \quad (2.29)$$

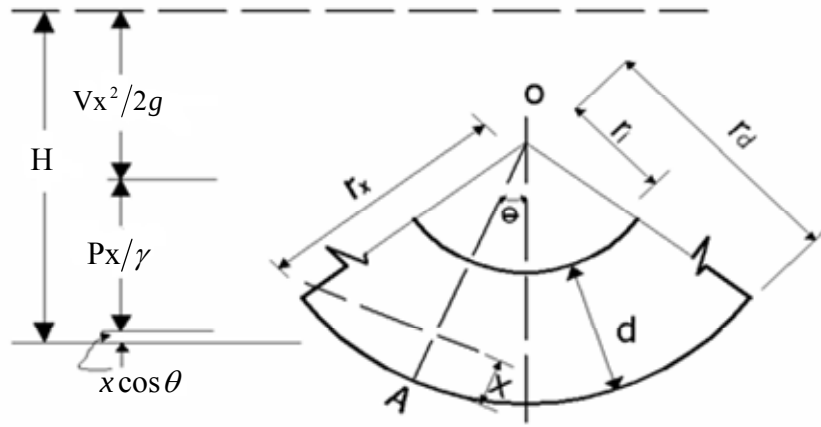
Şeklinde yazılarak (h_0 , sifon çıkış kesiti eksenine kret arasındaki yükseklik ve Δh , kret üzerindeki su yükü) ve Δh değerinin h_0 değerine göre çok küçük olduğu düşünülürse, sifonun debisi için h_0 değerinin büyük önem taşıdığı görülür. Ancak, bu h_0 değeri istenildiği kadar büyük teşkil edilemez. Aksi halde artan hız tesiriyle sifonda önemli miktarda basınç düşmesi olacak ve bunun sonucu, istenmeyen kavitasyon olayı meydana gelecektir[1].

2.4.3 Hız Dağılımının Belirlenmesi

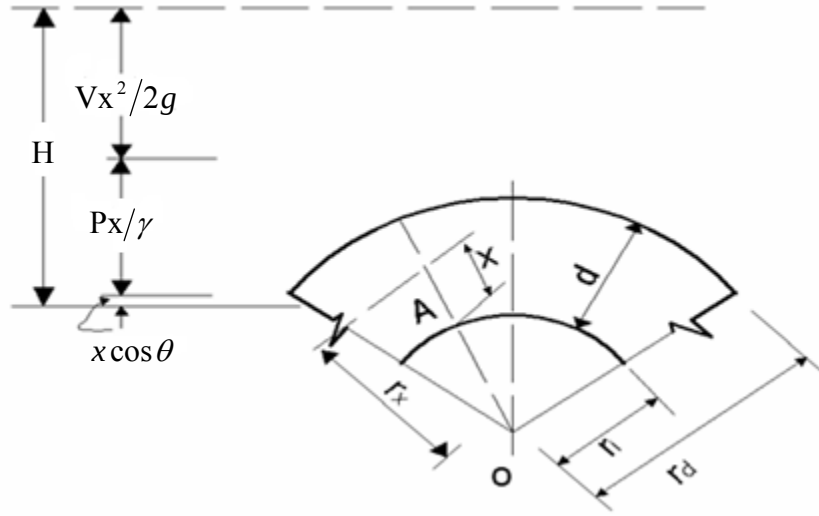
Sifon tepe bölgesi, bir daire parçası olarak kabul edilirse, aynı merkezli dairelerden oluşan bir potansiyel akımda,

$$V_x \cdot r_x = \text{Sabit} = C \quad (2.30)$$

bağıntısı mevcuttur.



Şekil 2.15-a Basıncılı pozitif dirsek [1].



Şekil 2.15-b Basınçlı negatif dirsek [1].

Dikdörtgen kesitli, 1 m genişliğinde ve d yüksekliğinde bir sifonun debisi, süreklilik şartlarından,

$$q_l = \int_0^d V_x d_x = \int_0^d \frac{C}{r_x} d_x = C \int_0^d \frac{d_x}{r_x} \quad (2.31)$$

olur. $r_x = r_i + x$ şeklinde yazılarak,

$$q_l = C \int_0^d \frac{d_x}{r_i + x} = C \cdot \ln(r_i + x) \Big|_0^d$$

$$q_l = C [\ln(r_i + d) - \ln r_i] = C \cdot \ln \frac{r_i + d}{r_i}$$

$$q_l = C \cdot \ln \left(1 + \frac{d}{r_i} \right) \quad (2.32)$$

elde edilir. Bu eşitlikten C sabiti,

$$C = \frac{q_1}{\ln\left(1 + \frac{d}{r_i}\right)} \quad (2.33)$$

olur. Bu C sabitinin dairesel kesiti için değeri,

$$C = \frac{q}{2.\pi.(R - \sqrt{r_d.r_i})} \quad (2.34)$$

şeklindedir. Burada R, dairesel dirseğin eksen çizgisinin yarıçapı ve q da sifon debisidir.

C'nin (2.33)'deki değerini (2.30)'da yerine koyulursa, belirli bir q_1 debisi için dikdörtgen tepe en kesitindeki hız dağılımı ifadesi,

$$V_x = \frac{q_1}{r_x \cdot \ln\left(1 + \frac{d}{r_i}\right)} \quad (2.35)$$

şeklinde belirlenmiş olur.

Genellikle, pratikte en kesite ait ortalama hızlarla hesap yapıldığından, bazen tepe en kesitindeki (2.35) hız dağılımı ifadesinin de ortalama hız cinsinden yazılması uygun olur. Bu amaçla (2.35) denkleminde V_m ortalama hız değeri,

$$V_x = \frac{V_m \cdot d}{r_x \cdot \ln\left(1 + \frac{d}{r_i}\right)}$$

veya

$$\frac{V_x}{V_m} = \frac{d}{r_x} \cdot \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{d}{r_i}\right)}$$

yani

$$\frac{V_x}{V_m} = \frac{1}{\frac{r_i + x}{d}} \cdot \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{d}{r_i}\right)} \quad (2.36)$$

şeklinde bir ifade elde edilir. Dirseğin iç cidarı (kret) için,

$$\frac{x}{d} = 0 \text{ 'dır.}$$

Buna göre kret için (2.36) denklemi,

$$\frac{V_i}{V_m} = \frac{1}{\frac{r_i}{d} \ln \left(1 + \frac{d}{r_i} \right)} \quad (2.37)$$

olur. Aynı şekilde dış cidar (tepe noktası) için de,

$$\frac{x}{d} = 1 \text{ 'den}$$

$$\frac{V_d}{V_m} = \frac{1}{\left(1 + \frac{r_i}{d} \right) \ln \left(1 + \frac{d}{r_i} \right)} \quad (2.38)$$

bulunur.

Diğer bir problem de tepe kesitindeki V_m ortalama hızının yerinin tespiti. En kesitteki ortalama hız dağılımının özelliğinden dolayı, bunun yerinin belirlenmesi, ortalama hız ve basınç değerlerine göre çizilecek enerji ve basınç hattı yönünden önem kazanmaktadır. Bunun tespiti için (2.36) denkleminde hareket edilir. Bu noktada,

$$\frac{V_x}{V_m} = 1$$

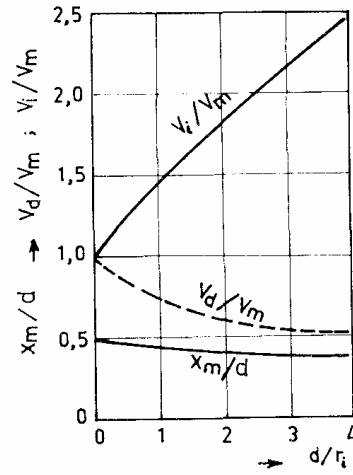
olacaktır ve buna göre,

$$\frac{r_i + x_m}{d} = \frac{1}{\ln \left(1 + \frac{d}{r_i} \right)}$$

$$\frac{x_m}{d} = \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{d}{r_i}\right)} - \frac{r_i}{d} \quad (2.39)$$

şeklinde aranan x_m değeri için bir ifade elde edilir.

V_i/V_m , V_d/V_m ve x_m/d değerleri, d/r_i inin fonksiyonu olarak hesaplanıp çizildiğinde Şekil 2.16'da görülen bağıntı elde edilir.



Şekil 2.16 V_i/V_m , V_d/V_m ve x_m/d değerlerinin, d/r_i inin fonksiyonu olarak hesaplanmış şekli

Burada, tepe iç cidarındaki (krette) V_i hızının değişiminin, d/r_i oranıyla doğru orantılı ve V_d hızı ile x_m/d değerleri ise ters orantılıdır.

Sifondaki yük kayıpları, hız yüksekliği cinsinden ifade edilmektedir. Bunun için ortalama hız yüksekliğinin tespiti gerekmektedir. Buna göre gerçek ortalama hız yüksekliği:

$$h_{VM} = \alpha \cdot \frac{V_M^2}{2.g} = \alpha \cdot h_{vm} \quad (2.40)$$

Burada h_{vm} , ortalama (gerçek) hız yüksekliği; v_m , ortalama hız ve h_{vm} , v_m ortalama hızına ait hız yüksekliği; α ise hız yüksekliğini denkleştirme katsayısıdır. α katsayısı, dirsek iç ve dış yarıçap (r_i ve r_d) değerlerinin bir fonksiyonudur. Bu değer, dikdörtgen veya kare kesitler için,

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\left[\ln \left(\frac{r_d}{r_i} \right) \right]^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{r_i}{r_d} \right)^2}{\left(\frac{1}{\frac{r_d}{r_i} - 1} \right)^2} \quad (2.41)$$

ve dairesel kesit için (R, dirsek eksen çizgisinin yarıçapı ve r_1 ise, dairesel kesitin yarıçapı olmak üzere)

$$\alpha = \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{\left(\frac{R}{r_1} \right)^3} \cdot \frac{1}{\left(\frac{R}{r_i} - \sqrt{\left(\frac{R}{r_i} \right)^2 - 1} \right)^3} \left\{ 1 + 1,5 \cdot \left(\frac{1}{\frac{3}{2} \cdot \frac{R}{r} - 1} \right)^2 \right\} \quad (2.42)$$

değerine sahiptir. Görüldüğü üzere α katsayısı, akım karakteristiklerinden tamamen bağımsız olup yarıçapların oranına bağlıdır.

Diğer taraftan bir kesitteki ortalama basıncı tespit edebilmek için, hızı ortalama hız yüksekliğine uyan akım çizgisinin yerinin bilinmesi gerekir. Bu akım çizgisinin tepe iç cidara olan mesafesi (x_0), dikdörtgen veya kare kesit için,

$$\frac{x_0}{r_i} = \sqrt{\frac{2 \cdot \ln \left(\frac{r_d}{r_i} \right)}{1 - \left(\frac{r_i}{r_d} \right)^2}} - 1 \quad (2.43)$$

şeklinde yine iç cidar yarıçapları oranına bağlı olarak hesaplanır [14].

2.4.4 Basıncı Dağılımının Belirlenmesi

Bir sifonun en kritik kesiti tepe kesitidir. Bu nedenle tepe kesitindeki basınç dağılımının sıhhatli bir şekilde tespit edilmesi gerekir. Ancak bundan sonra sifonda kavitasyon tehlikesinin mevcut olup olmadığı ve sifonun kapasitesinin mevcut şartlarda hangi değere kadar arttırılabileceği belirlenir.

Sifonun tepesindeki basınç dağılımı için, akımın sürtünmesiz olduğu ve dolayısıyla en kesitin her noktasında enerji çizgisi seviyesinin değişmeyeceği düşünülerek, Şekil 2.15-b'ye (Şekil 2.15-a için de geçerlidir) göre herhangi bir en kesitteki x noktası için Bernoulli Enerji Denklemi;

$$H = x \cdot \cos \theta + \frac{P_x}{\gamma} + \frac{V_x^2}{2g} \quad (2.44)$$

olur. V_x hızının (2.35)'deki değerini bu eşitlikte yerine koyarsak,

$$H = x \cdot \cos \theta + \frac{P_x}{\gamma} + \frac{q_1^2}{2g \left[\ln\left(1 + \frac{d}{r_i}\right) \right]^2 (r_i + x)} \quad (2.45)$$

olur. Bu eşitlikten basınç dağılımı için,

$$\frac{P_x}{\gamma} = H - x \cdot \cos \theta - \frac{q_1^2}{2g \left[\ln\left(1 + \frac{d}{r_i}\right) \right]^2 (r_i + x)} \quad (2.46)$$

elde edilir. Bu bağıntı yardımıyla, θ açısıyla gösterilen her hangi bir kesitteki basınç dağılımı belirlenebilir.

Kritik kesit olan tepe en kesiti için $\theta=0$ olacaktır. Kretteki enerji çizgisi yüksekliğine H_i denirse, tepe kesitindeki basınç dağılımı ifadesi,

$$\frac{P_x}{\gamma} = H_i - x - \frac{q_1^2}{2g \left[\ln\left(1 + \frac{d}{r_i}\right) \right]^2 (r_i + x)^2} \quad (2.47)$$

olur.

Bir sifon için (2.47) teorik ifadesinden hesaplanan basınç değerleriyle deneysel sonuçlar arasında %5~10 'luk bir fark bulunduğu ve bu farkın, daha çok ölçüm sırasında su yüzeyinde meydana gelen salınımlardan ileri geldiği araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir[1].

2.4.5 Sifon Tepesindeki Kaviteasyon Olayı

Genel olarak akışkan akımının herhangi bir noktasındaki basıncın belirli bir değerin altına düşmesi halinde, suyun içerisindeki hava, kabarcıklar halinde açığa çıkar. Bu kabarcıkların oluşması, akımda bir süreksizlik meydana getirir. Oluşan hava kabarcıkları, katı cidar üzerinde akışkanı sarar ve çok kısa sürede, akım doğrultusunda yüksek basınçlı bir noktaya hareket ederler. Bu hareketten sonra buhar kabarcıkları tekrar suda erirler ve boş kalan bu kabarcıkların yerine çok hızlı bir sıvı akımı olur. Bu olayın ardışık tekrarı, katı cidarda büyük hasar meydana getirir. İşte bir akışkan akımı içerisinde buhar kabarcıklarının oluşması ile meydana gelen bu olay “kaviteasyon” olarak bilinir.

Akımın herhangi bir noktasında, hızın artmasıyla bu noktadaki basınç azalır. Hızdaki artış belli bir değerin üzerine çıkınca, o noktadaki mutlak basınç, akışkanın mevcut sıcaklığına karşı gelen “buharlaşıma basıncı”nın altına düşecektir. Bu ise, kaviteasyon olayı için kritik bir değerdir.

Kaviteasyon olayının bu zararlı tesirinden korunmak için, teşkil edilen her hidromekanik profilde kaviteasyon araştırması yapmak gerekir. Özellikle sifonlar gibi keskin köşe ve eğrisel kısımlara sahip olan profillerde bu daha da önem kazanmaktadır. Bu nedenle, sifonların hidrolik yönden en kritik kesiti olan tepe kesitindeki basınç değeri için bir kriter tespit etmek gerekir. Bu da, P_c sifon kretindeki mevcut mutlak basınç, P_b suyun mevcut sıcaklıktaki buharlaşma basıncı ve Δ_{p0} da atmosfer basıncının değişimi olmak üzere,

$$\frac{P_c}{\gamma} \geq \frac{P_b}{\gamma} + \frac{\Delta_{p0}}{\gamma} \quad (2.48)$$

şeklindedir [15]. Maitra [16] ise, genel anlamda akımın bir noktasında kaviteasyon olmaması için,

$$\frac{h_A - h_b}{\frac{V_A^2}{2g}} \geq 0,5 \quad (2.49)$$

şartını vermektedir. Burada da h_A , herhangi bir noktadaki mutlak basınç yüksekliği; h_b , mevcut sıcaklıkta suyun buharlaşma basıncı yüksekliği ve $V_A^2/2g$ de noktadaki hız yüksekliğidir.

Bollich [17] ‘e göre kaviteasyonun hesaplanması,

$$\frac{P_k}{\gamma} = -h_{vac} - \frac{V_i^2}{2.g} \quad (2.50)$$

Burada;

h_{vac} = boşluk basınç yüksekliği, yani atmosfer basıncı (P_{atm}) ile buhar basıncı (P_v) farkı

V_i =sifonun tepe kesitindeki hızın kritik değeri olduğuna göre,

$$P_v = - \left[\frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} \right] \quad (2.51)$$

Ayrıca genel bir ifade ile sifon debisi,

$$Q = b.R_1 \cdot \ln \left(1 + \frac{d}{R_1} \right) \sqrt{2.g(H_p - h_1 - h_{vac})} \quad (2.52)$$

Burada;

h_1 = sifonun giriş yük kaybı

b = sifon boğazı kesit genişliği

d = sifon boğazı kesit yüksekliği

H_p = yemlenme yüksekliği

R_1 =sifonun kret yarıçapı olduğuna göre,

$$h_1 = 0.08 \frac{V_i^2}{2g} = 0.08 \frac{Q^2}{2.g.b^2.d^2} \quad (2.53)$$

Bazı durumlarda H_p sıfır kabul edilebilir. Böylece (2.52) eşitliği,

$$Q = b.R_1 \cdot \ln \left(1 + \frac{d}{R_1} \right) \sqrt{2.g \left(0 - 0.08 \frac{Q^2}{2.g.b^2.d^2} - h_{vac} \right)} \quad (2.54)$$

$$\frac{Q^2}{\alpha^2} = 2.g \left(-0.08 \frac{Q^2}{2.g.b^2.d^2} - h_{vac} \right) \quad (2.55)$$

Burada α 'nın değeri,

$$\alpha = b.R_1 \cdot \ln \left(1 + \frac{d}{R_1} \right) \text{ dir.} \quad (2.56)$$

Ayrıca, $V_i = Q/\alpha$ olduğundan,

$$\frac{V_i^2}{2.g} = \frac{Q^2}{2.g.\alpha} \text{ olur.} \quad (2.57)$$

Böylece $P_k/\gamma = -h_{vac} - V_i^2/2.g$ ifadesi Q^2 'nin fonksiyonu olarak yazılırsa,

$$\frac{P_k}{\gamma} = \beta.Q^2 \quad (2.58)$$

elde edilir. Burada bölgesel kavitasyonun başlangıcında,

$$P_k/\gamma \cong -10m \text{ kabul edilir[5].}$$

2.4.6 Bir Sifonun Boyutlandırma Esasları

Bir sifonun hidrolik yönden boyutlandırılmasında kavitasyon önemli bir problemdir. Dolayısıyla (2.24) ifadesinden hareketle bir sifonun kapasitesi, sadece F_E (sifon çıkış kesiti) ve h (sifon üst su seviyesiyle alt su seviyesi arasındaki fark) ile tespit edilemez. Sifon içinde mevcut büyük hızlar dolayısıyla meydana gelecek negatif basınç (lokal atmosfer basıncının altındaki basınç), hiçbir noktada suyun buharlaşma basıncının altına düşmeyecek şekilde boyutlandırma yapılması gerekir.

Bu negatif basıncın limit değeri için, suyun buhar basıncının suyun sıcaklığına bağlı olarak ve atmosfer basıncının da sıcaklık ve enleme göre değişmesini dikkate alarak $p \geq 3 \text{ t/m}^2$ bazen de $p \geq 2 \text{ t/m}^2$ şartı önerilmektedir [18]. Bu değerler de, sabit kesitli bir sifon için h değerinin 7-8 m'den büyük olamayacağını göstermektedir. Sifon kesitini, tepe kesitinden itibaren çıkışa doğru daraltmak suretiyle tepedeki piyezometrik değeri yüksek tutmak mümkündür. Bu hidrodinamik profilde h 'nin değeri 25 m'ye kadar çıkabilmektedir [15].

Pratikte sifonların boyutlandırılmasında şöyle bir metot önerilmektedir [19] ve [14]:
Emniyetle hareket etmek için sifonun tepe kesitinde,

$$\frac{P}{\gamma} = \beta.H_i \quad (2.59)$$

şeklinde bir kalıcı basıncın olması istenir. Burada β , birden küçük bir katsayı ve H_i de sifonun kretindeki mevcut enerji yüksekliği olup Şekil 2.13'e göre,

$$H_i = \frac{P_0}{\gamma} + \Delta h - \sum_0^c h_k \quad (2.60)$$

şeklindedir. (P_0 , üst su seviyesindeki atmosfer basıncı; Δh , kret üzerindeki su yükü ve $\sum_0^3 h_k$ da girişten tepe kesitine kadar olan toplam yük kaybı). Bu durumda, (2.47) ifadesine göre tepe noktası için ($x=d$):

$$\frac{P_d}{\gamma} = \beta H_i = H_i - d - \frac{q_1^2}{2.g \left[\ln \left(1 + \frac{d}{r_i} \right) \right]^2 (r_i + d)^2} \quad (2.61)$$

veya

$$\frac{P_d}{\gamma} = \beta H_i = H_i - d - \frac{q_1^2}{2.g.d^2 \left[\ln \left(1 + \frac{d}{r_i} \right) \left(1 + \frac{r_i}{d} \right) \right]^2}$$

$$\left(1 + \frac{r_i}{d} \right) \ln \left(1 + \frac{d}{r_i} \right) = x \quad (2.62)$$

şeklinde gösterilirse (2.61)

$$\beta H_i = H_i - d - \frac{q_1^2}{2.g.d^2.x^2} \text{ olur.}$$

Eşitliğin her iki tarafı H_i^3 ile bölünerek ifade yeniden düzenlenirse,

$$\frac{q_1^2}{2.g.d^2.x^2.H_i^3} = \frac{H_i \left(1 - \beta - \frac{d}{H_i} \right)}{H_i^3}$$

$$\frac{q_1}{\sqrt{2.g}H_i^{3/2}} = x.\frac{d}{H_i}\sqrt{1-\beta-\frac{d}{H_i}} \quad (2.63)$$

elde edilir.

Benzer şekilde kret için de ($x=0$) :

$$\frac{P_i}{\gamma} = \beta H_i = H_i - \frac{q_1^2}{2.g\left[\ln\left(1+\frac{d}{r_i}\right)\right]^2.r_i^2} \quad (2.64)$$

yazılabilir. Bu ifade,

$$\frac{P_i}{\gamma} = \beta H_i = H_i - \frac{q_1^2}{2.g.d^2\left[\ln\left(1+\frac{d}{r_i}\right)\left(\frac{r_i}{d}\right)\right]^2}$$

şeklinde yazılır ve

$$\frac{r_i}{d}\ln\left(1+\frac{d}{r_i}\right) = w \quad (2.65)$$

denirse ; eşitliğin her iki tarafı H_i^3 e bölünerek düzenlendiğinde:

$$\frac{q_1}{\sqrt{2.g}H_i^{3/2}} = w.\frac{d}{H_i}\sqrt{1-\beta} \quad (2.66)$$

şeklinde bir bağıntı elde edilir. Sifonun tepe en kesiti içindeki (2.63) ve (2.66) denklemlerinin geçerlilik safhası, bu iki denklemin eşitlenmesiyle tespit edilir. $\frac{d}{H}$ 'nın küçük değerleri için (2.66), büyük değerleri için ise (2.63) denklemi geçerlidir.

Krette en düşük basınçlar oluşmaktadır. Bununla beraber sifonun tepesinin, kavitasyon bakımından en tehlikeli nokta olması mümkündür. Çünkü bu noktanın enerji çizgisine olan mesafesi, krete göre daha azdır. Dolayısıyla tepe ve krettteki basınçların farkı, bu iki noktanın

enerji çizgisine olan mesafeleri farkından daha küçük olabilir. Bu nedenle hem kretteki hem de tepedeki basınçları ayrı ayrı hesaplayıp ona göre sifonun maksimum debisinin ne olacağına karar vermek gerekir.

Genel olarak β için 0.20 değeri esas alınmaktadır [19] ve [14]. Sifonun boyutlandırılması için tespiti gereken diğer bir değer de sifonun yemlenme yüksekliği (Δh) dır. Bu ise, sifonun tipine ve kullanma amacına bağlı olmakla birlikte, $\frac{\Delta h}{d} \leq 0.25$ değeri esas alınır.

Bu metot ve kriterlere göre bir sifonun boyutlandırılmasında şu şekilde hareket edilebilir:

d , r , h ve Δh bellidir. (2.51) denkleminde H_i hesaplanır. (2.63) ve (2.66) denklemlerinden q için sınır değeri tespit edilir. Sifon için $q = \mu F_E \sqrt{2gh}$ denkleminde hesaplanan debi, tespit edilen kritik debiden büyük çıkarsa, F_E , h_0 , d veya r_i büyüklüklerinde karşılıklı değişiklikler yapılabilir. Bu dört büyüklük doğru olarak belirlendiği takdirde, sifon her emme yüksekliğine maruz bırakılabilir.

Bu araştırma hesaplarının yanında, kavitasyon tesirini minimuma indirmek için sifon tepe bölgesinin iç cidarının mümkün olduğunca pürüzsüz olması tavsiye edilmektedir.

2.4.7 Bir Sifonun Debi Katsayısının Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar

Sifonların projelendirilmesinde debi katsayıları önemli bir yer tutar. Bu katsayı (2.21) ve (2.27) ifadelerinde görüldüğü gibi, bir sifonun giriş kesitinden çıkışına kadar olan muhtelif yük kaybı bileşenlerini ihtiva eder. İnşa edilecek bir sifonda debi katsayısının mümkün mertebede büyük değeri alması arzu edilir. Bu ise, sifonun tipi ve konstrüksiyonu ile olan değişiminin belirlenmesinde önem taşır.

Gibson [6] ve Whittington, Ali [7], ise bir sifonun debi katsayısının, Reynolds sayısındaki artışı ile tedrici olarak büyüdüğünü ve Reynolds sayısının muayyen bir değerinin üstünde ise debi katsayısındaki yükselmenin çok küçük olduğunu göstermişlerdir. Sifon modellerinde tam bir benzerlikten söz edilmemekle beraber, önemli olan akım çizgileri ve debi katsayısının benzerliği için teşkil edilecek bir sifon modelinde, $Re > 2 \times 10^5$ şartı esas alınarak bir minimum model ölçeği tespit etmektir. Bunun sebebi de;

a) Yüzeysel gerilim kuvvetlerinin etkisini minimuma indirmek için en kesit boyutlarının muayyen bir değerin altına düşmemesini sağlamak,

b) $C_d = C_d(Re)$ değişimindeki kararsız bölgeden (artma yönünde) yeterince uzak olması,

c) Reynolds sayısının büyük değerler ($Re > 2 \times 10^5$) aldığı sifon modellerinde, ağırlık kuvvetleri viskoz kuvvetlere oranla daha önemli olduğu için Froude benzeşimi esas alınması karşısında, debi katsayısının model ve prototipte benzer olabilmelerini sağlamaktır.

Bu gereklilik karşısında Gibson, sifonun tepe kesiti yüksekliği (d) ve üst su seviyesiyle çıkış kesiti eksenini arasındaki yüksekliği (h) parametre olarak, $Re > 2 \times 10^5$ şartından hareketle bir minimum model ölçeği tespiti yoluna gitmiştir:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} > 2 \times 10^5 \quad (2.67)$$

bağntısında V, sifonun çıkış kesitindeki akımın ortalama hızı; ν de suyun kinematik viskozitesidir.

(2.67) de V'nin yerine h cinsinden değeri konursa,

$$Re = \frac{\sqrt{2gh} \cdot d}{\nu} > 2 \times 10^5 \quad (2.68)$$

olur. Yerçekimi ivmesi $g=9.81 \text{ m/s}^2$ alınırsa (2.68) ifadesi,

$$\frac{d\sqrt{h}}{\nu} > 45147 \quad (2.69)$$

Şeklini alır. Buradaki d ve h gibi karakteristik boyutların yanında ν 'de suyun sıcaklığı ile değişmektedir. Ortalama 20 C⁰ deki bir su için $\nu = 1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ alınırsa (2.69) eşitliği,

$$d\sqrt{h} > 45.6 \text{ cm}^{3/2} \quad (2.70)$$

olur.

Gibson, bu son bağıntıyı daha güvenilir olması için,

$$d\sqrt{h} > 47.1 \text{ cm}^{3/2} \quad (2.71)$$

olarak tespit etmiştir. Bu bağıntı, Gibson'un sifonlar için verdiği "minimum model ölçeği şartı" olarak bilinir.

Bir sifon konstrüksiyonunda, debi katsayısının değerini büyük tutmak için şu hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

a) Sifonun çıkış kesitinin suya batmış olması, debi katsayısının değerini artırır. Mümkün oldukça çıkışın daima batmış olması arzu edilir.

b) Sifondaki giriş ve çıkış dirseklerinin varlığı, debi katsayısını olumsuz yönde etkiler. Bu sebeple, mecbur olmadıkça giriş ve çıkış dirsekleri teşkil edilmemelidir.

c) Sifonun tepe dirseği açısı da debi katsayısına etki eden bir parametredir. Dirsek açısı küçüldükçe, artan yük kayıplarına uygun olarak debi katsayısı azalacaktır. Bunun için de mümkün oldukça tepe dirsek açısını büyük tutmak gerekmektedir.

d) Pratik olarak debi katsayısı, R_0 / r (R_0 , sifonun tepe dirseğinin eksen yarıçapı ve r , dairesel sifonun en kesit yarıçapı) değerinden bağımsızdır[1].

3. KIVIRIMLI KANALLARIN HİDROLİĞİ

Kıvrımlardaki akımın en önemli karakteristik özelliklerinden biri helikoidal akım, diğeri de maksimum hız yörüngesinin hareketidir. Helikoidal akım sürtünme, merkezkaç ve atalet kuvvetlerinin birbirlerini etkilemesinden dolayı ortaya çıkmaktadır. Kanal tabanı yakınlarında akışkan zerreciklerinin hızları sınır direnci tarafından büyük ölçüde geciktirilir. Taban yakınlarında daha yavaş hareket eden akışkan, merkezkaç ve basınç kuvvetleri arasında bir denge meydana getirmek için daha keskin eğrisel bir yörüngeyi izlemek zorunda kalırken, daha büyük hızlardan dolayı daha büyük ataletle sahip olan yüzeydeki akışkan zerreciklerinin yörüngeleri kanalın tabanına doğru olacaktır. Akışkan kütesinin sürekliliğini sürdürmesi için su, dış kıyıda tabana doğru hareket eder. Böylece, teğetsel hız bileşenine ilave olarak kanal en kesitine dik radyal hız bileşeni meydana gelir. Bu radyal hız bileşeni en kesit planında sekonder akım oluşturur.

Açık kanallardaki kıvrımlar akım direnci üzerinde değişime sebep olurlar. Akım direncindeki değişim, akarsuyun menbasında derinlik artışına, dolayısıyla hızın azalmasına sebep olur. Kıvrımın dış kıyı menbasında kabarma görülür. Kıvrımlardaki akımın doğrusal kanallardaki akımlardan en önemli farkı helikoidal akım ve maksimum hız yörüngesinin yerinin değişmesidir. Helikoidal akım sürtünme, merkezkaç ve atalet kuvvetlerinin arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır [20].

Doğrusal bir kanalda maksimum hız kanal eksenine civarındadır ve su yüzüne yakındır. 180°'lik bir kıvrımlı kanalda ise, maksimum hız yörüngesi normalinden saparak önce iç kıyıya doğru yönelir. $\theta = 45^\circ$ 'den sonra da dış kıyıya doğru yönelerek, $\theta = 60^\circ$ civarında dış kıyıya yerleşmeye başlar. Dış kıyıya yerleşen maksimum hız yörüngesi $\theta = 120^\circ$ 'den sonra tekrar kanal eksenine yönelerek, kıvrım çıkışında kanal eksenine yakın görülür [21].

Kıvrımlı kanaldaki sekonder akım ve maksimum hız yörüngesinin davranışı, hareketli bir tabanda topografya değişikliklerine yol açarak, dış kıyıda oyulma, iç kıyıda ise yığılma bölgeleri oluşturur. Bu sebeple, kıvrımda su alma yapısı vb. gibi hidrolik yapının yer seçiminde, kıvrımlı kanaldaki akım özelliklerinin önceden bilinmesi gereklidir [22].

3.1 Kıvrımlı Kanallarla İlgili Çalışmalar

Kıvrımlardaki akımın en önemli karakteristik özelliklerinden biri helikoidal akım, ilk defa 1868 yılında Joseph Boussinessq ve bundan birkaç yıl sonra 1876 da James Thomson tarafından analiz edilmiştir. Daha sonra da konu ile ilgili çalışmalar günümüze kadar devam etmiştir [21].

Chow [23]'un belirttiğine göre, Shukry [24], yaptığı deneysel çalışmalarda, helikoidal akımı, kıvrımda oluşan kabarma miktarını ve kıvrımdaki maksimum hız yörüngesini araştırmıştır.

Shukry [24], bu çalışmalarda, helikoidal akımın karmaşık ve üç boyutlu olması sebebiyle pitot küresi olarak isimlendirilen, farklı noktalarda hız bileşenlerini doğrudan ölçebilen özel dizayn edilmiş bir cihaz kullanmıştır.

Shukry [24], değişik akım şartları altında farklı kıvrımlarda, helikoidal akımın etkisini ve büyüklüğünü ifade etmek için, helikoidal hareketin gücü olarak bilinen bir ifade kullanmıştır. Bu ifade, verilen bir en kesitte sekonder hareketin ortalama kinetik enerjisinin, akımın toplam kinetik enerjisine oranı olarak tariflenmiştir. Akımın kinetik enerjisi hızın karesine bağlıdır. Kanal en kesitine göre, helikoidal akımın gücü,

$$S_{xy} = \frac{V_{xy}^2}{V^2} * 100 \quad (3.1)$$

olarak verilir. Burada,

V_{xy} = xy planındaki ortalama hız vektörü,

V = En kesitteki ortalama hız,

dır. Böylece kanal en kesitine paralel bütün akım çizgileri için $S_{xy} = 0$ olacaktır.

Dikdörtgen en kesitli bir kanal kıvrımında, nehir rejimli akım halinde Shukry [24] tarafından elde edilen deneysel sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- 1- S_{xy} , r_c/b (kıvrımın eksen eğrilik yarıçapı / kanal genişliği) oranının artışı ile dereceli olarak azalır ve $r_c/b = 3$ de minimuma ulaşır.
- 2- S_{xy} , yaklaşan akımın küçük Re sayılarında büyüktür, Re sayısı büyüdükçe S_{xy} küçülür.
- 3- S_{xy} , h/b (derinlik /genişlik) oranı arttığında azalır.
- 4- S_{xy} , θ sapma açısı büyüdükçe artar. S_{xy} 'deki artış miktarı, $\theta/180=0.0-0.5$ arasındaki büyüklüklerde, $\theta/180=0.5-1.0$ arasındaki büyüklüklerden yaklaşık iki kat daha büyüktür.
- 5- Kıvrımdaki sekonder akımın kinetik enerjisi, teğetsel akımın kinetik enerjisine kıyasla daha küçüktür ve dolayısıyla kıvrım direncinde meydana gelen enerji kaybında küçük bir kısmı oluşturur.
- 6- Kıvrım direncinde meydana gelen enerji kaybı katsayısı Re , r/b ve θ parametrelerinin her biriyle önemli ölçüde değişir.
- 7- Kıvrım direnç katsayısı $Re > 3 \times 10^4$ için daha büyük değişimler gösterir.

Shukry [24]'nin elde ettiği deneysel sonuçlara göre, kıvrımlı bir kanalda maksimum hız yörüngesi kıvrımın menbasındaki bir kesitte normalinden sapar.

Chow [23]'a göre su yüzü profili ve teğetsel hız dağılımı teoriksel serbest vorteks hız dağılımı ile tahmin edilir. Bu yaklaşım, nehir rejimli akım halinde geçerlidir. Serbest vorteks yaklaşımı ile aşağıdaki ifade elde edilir;

$$V_z = C_s/r \quad (3.2)$$

Burada,

V_z = Eğrilik merkezinden r radyal uzaklıktaki kıvrımdaki teğetsel hız,

C_s = Serbest vorteks hareketindeki sirkülasyon sabiti,

Olarak verilmişlerdir. Herhangi bir kesitteki özgül enerji,

$$E = h + \frac{V_z^2}{2g} \quad (3.3)$$

ile verilirse, buradan ortalama teğetsel hız,

$$V_z = \frac{\int_{r_i}^{r_0} \left(\frac{C_s}{r}\right) * dr}{r_0 - r_i} = \frac{C_s}{r_0 - r_i} * \ln \frac{r_0}{r_i} \quad (3.4)$$

ve ortalama akım derinliği,

$$h_m = \frac{\int_{r_i}^{r_0} h * dr}{r_0 - r_i} = \frac{\int_{r_i}^{r_0} \left(E - \frac{C_s^2}{2.g.r^2}\right) * dr}{r_0 - r_i}$$

veya

$$h_m = E - \frac{C_s^2}{2.g.r_0.r_i} \quad (3.5)$$

bulunur. Eşitliklerde;

r_0 = Dış kıyı eğrilik yarıçapı,

r_i = İç kıyı eğrilik yarıçapı,

E = Herhangi bir kesitte özgül enerji,

h = Eğrilik merkezinden r mesafedeki akım derinliğidir.

Debi için de ;

$$Q = V_z . h_m (r_0 - r_i) = C_s \left(E - \frac{C_s^2}{2 \cdot g \cdot r_0 \cdot r_i} \right) \cdot \ln \frac{r_0}{r_i} \quad (3.6)$$

yazılabilir. Şayet Q, r_0 , r_i ve E verilirse, C_s sabiti belirlenir. Herhangi bir eğrilik yarıçapında hız ve su derinliği (3.2) ve (3.3) eşitliklerinden bulunur. Böylece su yüzeyindeki Δh kabarma miktarı;

$$\Delta h = \frac{C_s^2}{2 \cdot g \cdot r_0^2 - r_i^2} (r_0^2 - r_i^2) \quad (3.7)$$

eşitliğinden elde edilir[22].

Chow [23]'a göre, kıvrımlı kanallardaki kabarma daha az hassas olarak da bulunabilir. Kıvrımdaki bütün teğetsel hızların V_z ortalama hızına eşit olduğu ve bütün akım çizgilerinin r_c eğrilik yarıçapına sahip olduğu farz edilerek ve enine su yüzeyi düz bir çizgi olarak gösterilirse, kabarma için basit olarak,

$$\Delta h = \frac{V_z^2}{g r_c} \quad (3.8)$$

eşitliği verilebilir.

Chow [23]'un belirttiğine göre Grashof, her bir akım çizgisine Newton'un 2. hareket kanununu uygulamış ve kanal kesiti boyunca integre ederek, radyal su yüzü profilini logaritmik bir ifade ile vermiştir. Buna göre kabarma miktarı;

$$\Delta h = 2,30 \frac{V_z^2}{g} \log \frac{r_o}{r_i} \quad (3.9)$$

ile verilmiştir.

Woodward [25]'da dış ve iç kıyılarda hızların sıfır ve eksende maksimum olduğunu kabul ederek, Newton'un 2. kanunundan hareketle kabarma için;

$$\Delta h = \frac{V_{\max}^2}{g} \left[\frac{20}{3} \frac{r_c}{b} - 16 \frac{r_c^3}{b^3} + \left(\frac{4r_c^3}{b^2} - 1 \right) \ln \left(\frac{2r_c + b}{2r_c - b} \right) \right] \quad (3.10)$$

ifadesini vermiştir.

Yukarıdaki verilen (3.8), (3.9) ve (3.10) eşitliklerinden en iyi sonucu (3.10) eşitliği vermektedir. Fakat Chow [23]'a göre en iyi sonuç (3.7) eşitliğinden elde edilmektedir.

Rozovskii [26], çeşitli kabuller yaparak, hareket denklemlerini basitleştirmiş, radyal hız ile ilgili ifadeler vermiştir. Rozovskii [26]'nin yaptığı kabuller aşağıdaki gibidir;

- 1- Akım kararlıdır,
- 2- Kıvrım yeterince uzundur,
- 3- Kanal genişliğinin su derinliğine oranı 10'dan büyüktür,
- 4- Kıvrım eğrilik yarıçapı ve kanal genişliği hemen hemen aynı büyüklüktedir,
- 5- Türbülans kayma gerilmesi, kinematik eddy viskozitesi ε ile verilebilir.

Bu kabullerle, radyal doğrultudaki hareket denklemi silindirik koordinat sisteminde;

$$-\frac{V_\theta^2}{r} + gJr = \frac{\delta}{\delta_z} \left(\varepsilon \frac{\delta V_r}{\delta z} \right) \quad (3.11)$$

ile verilmektedir. Yazarın belirttiğine göre (3.11) eşitliği ilk olarak V.M.Makavev tarafından kullanılmıştır. (3.11) eşitliğinde;

V_r = Kıvrımdaki radyal hız bileşeni,

V_θ = Silindirik koordinatlarda teğetsel hız bileşeni,

g = Yerçekimi ivmesi,

J_r = Radyal doğrultudaki su yüzü eğimi,

r = Kıvrım eğrilik yarıçapı,

ε = Eddy viskozitesi,

olarak verilmektedir.

Yazar $\eta = z/h$ rölatif derinliğini, Prandtl'ın yarı logaritmik düşey hız dağılımını veren,

$$V = V_{\max} + \frac{1}{\kappa} u^* \ln(\eta) \quad (3.12)$$

eşitliğini ve radyal su yüzeyi eğimi için,

$$J_r = \frac{V_{\theta m}^2}{gr} \quad (3.13)$$

eşitliğini kullanarak (3.11) eşitliğinden radyal hız bileşeni için,

$$V_r = \frac{h}{\kappa^2 r} V_\theta \left[F_1(\eta) - \frac{\sqrt{g}}{C_x} F_2(\eta) \right] \quad (3.14)$$

eşitliğini çıkarmıştır. Burada;

κ = Von Karman sabiti,

$$F_1(\eta) = \int_0^1 \frac{2 \ln \eta}{\eta - 1} d\eta,$$

$$F_2(\eta) = \int_0^1 \frac{\ln \eta^2}{\eta - 1} d\eta,$$

olarak verilmektedir. Yazar $\kappa = 0.5$ olarak (3.14) eşitliğini,

$$V_r = 4V_\theta \frac{h}{r} \left[F_1(\eta) - \frac{2\sqrt{g}}{C} F_2(\eta) \right] \quad (3.15)$$

olarak düzenlenmiştir.

Yazar, bir açık kanal kıvrımındaki sekonder akımın sebep olduğu enerji kaybı için de aşağıdaki ifadeyi vermiştir;

$$J'' = \left(12 \frac{\sqrt{g}}{C} + 30 \frac{g}{C^2} \right) \left(\frac{h}{r_c} \right)^2 F_{r1}^2 \quad (3.16)$$

Burada,

J'' = Sekonder akım tarafından yaratılan enerji gradyanı,

g = Yerçekimi ivmesi,

C = Chezy katsayısı,

h = Akım derinliği,

r_c = Eğrilik yarıçapı,

F_{r1} = Froude sayısı, $\left[= V / (\sqrt{gh}) \right]$

V = ortalama akım hızı,

olarak verilmektedir.

Eşitlikteki ilk terim, sekonder akım sonucunda içsel türbülans sürtünmesinin neden olduğu enerji kaybını, ikinci terim radyal sınır kayma gerilmesinin sebep olduğu enerji kaybını ifade etmektedir. Eşitlikten görüldüğü gibi, kanal eğriliğinin neden olduğu enerji kaybı, h/r_c oranı ve Froude sayısı ile orantılıdır ve kanal pürüzlülüğünün artmasıyla daha büyük olur.

Muramoto [27], kıvrımdaki çevrinti hareketini inceleyerek kanal tabanının oluşturduğu vortisitenin viskoz difüzyonundan hareketle,

$$\frac{\delta \xi}{\delta \theta} = -2\eta_s + \frac{r^2}{D} \frac{\delta^2(\varepsilon \xi)}{\delta z} \quad (3.17)$$

eşitliğini elde etmiştir. Burada;

D= Silindirik ayak çapı,

ξ = Vorteks bileşeni,

ε = Difüzyon katsayısı,

olarak verilmiştir.

Yazar bu eşitliği, helikoidal akımın doğuş bölgesi için ele almış ve $\delta\xi/\delta\theta = 0$, $\delta V_\theta / \delta\eta = 0$ ($\eta=1$ için) sınır şartlarını kullanarak,

$$V_r = \frac{Dh}{x^2 r^2} (\ln \eta - 2 \ln \eta + \eta) \quad (3.18)$$

eşitliğini elde etmiştir.

Soliman ve Tinney [28], yaptıkları teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda, momentum momentinden hareket ederek, 180°'lik bir açık kanal kıvrımında oluşan enerji kayıplarını minimum kılmak için aşağıdaki ifadeyi vermişlerdir.

$$\frac{8k}{Fr_1} - \frac{3+k}{(1-k)^3} + \frac{3-k}{(1+k)^3} - 8,4k^{2,2} = 0 \quad (3.19)$$

Burada;

$k = Re(b/2)$,

b = Kanal genişliği,

Re = Reynolds sayısı(=V.h/v),

V= Akım yönündeki ortalama hız,

h = r çapındaki akım derinliği,

v = Kinematik viskozite,

Fr₁ = Froude sayısıdır.

Yazara göre, kıvrım tarafından yaratılan enerji kayıplarını minimum kılmak için, akım çizgilerinin kıvrımlı kanal duvarlarına paralel olması gerekir. Böyle bir akım tam olarak elde etmek zordur. Fakat uygun kıvrım dizaynı ile kabul edilebilir bir yaklaşım sağlanabilir. Yazarlara göre, kıvrımda oluşan toplam yük kaybı üç elemanın bileşimidir. Bunlar;

- 1- Cidar pürüzlülüğü ve akım hızına bağlı olan duvar sürtünmesinin sebep olduğu kayıp,
- 2- Kıvrım iç kıyısında vorteks bozulması ve sınır tabakasından ayrılma sebebiyle oluşan vortisite ve eddy gerilmelerinin neden olduğu kayıp,

3- Kıvrım menbaında dış duvar yakınında akım yönündeki ters basınç gradyanının neden olduğu sınır tabakasından ayrılma ve eddy gerilmelerinin yol açtığı kayıplardır. Ters basınca, merkezkaç kuvveti etkisiyle oluşan kabarma sebep olmaktadır.

Soliman ve Tinney [28], kanaldaki akım hızını dolayısıyla Froude sayısını ayarlayarak ya da yönlendirme perdeleri ile düzenlemeler yaparak, kıvrımdaki kayıpların minimuma indirgenebileceğini belirtmişler ve aşağıdaki sonuçlara ulaşmışlardır;

- 1- Momentumun momenti analizi ile kıvrımda minimum yük kayıplarını verecek kıvrım karakteristikleri ve akım arasındaki ilişkiyi bulmak iyi sonuç verir,
- 2- Dairesel yörüngeli yönlendirme perdeleri akım çizgilerinin sınırlara hemen hemen paralel olmasını sağlayarak kıvrımın geometrisini değiştirir,
- 3- $k \leq 0.15$ ve $Fr_1 \leq 0.6$ olduğunda kıvrımın sebep olduğu kayıplar, doğrusal kanallardaki kayıplara yaklaşır,
- 4- Froude sayısının etkisinden dolayı minimum yük kaybı için sadece kıvrım geometrisini hesaba almak yanlıştır,
- 5- Eğer k ve Froude sayısı büyük seçilirse, kıvrımın mansabında hidrolik sıçrama meydana gelir.

Francis-Asfari [29]'ye göre, kıvrımın giriş kesitinde V_θ teğetsel hızı kesinlikle logaritmik hız dağılımına uymaktadır. Yazarlara göre, bu durumda;

$$\frac{V_\theta - V_{\theta m}}{u^*} = \frac{1}{\chi} (1 + \ln \eta) \quad (3.20)$$

eşitliği yazılabilir. Burada;

V_θ = Silindirik koordinatlarda teğetsel hız bileşeni,

$V_{\theta m}$ = Akım derinliklerine göre ortalama teğetsel hız,

u^* = Taban kayma hızı,

χ = Von karman sabiti,

η = Akım içindeki herhangi bir noktanın rölatif derinliği(=z/h),

$$\text{dir. } u^* = V_{\theta m} \frac{\sqrt{g}}{\chi C} \quad (3.21)$$

ifadesi elde edilir. (3.21) eşitliği (3.20) eşitliğinde yerine konursa, kıvrımdaki akımın herhangi bir kesitindeki teğetsel hız bileşeninin değeri için;

$$V_{\theta} = V_{\theta m} \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{xC} + \ln \eta \right] \quad (3.22)$$

eşitliği elde edilir. Burada C, Chezy katsayısıdır.

Helikoidal akımdan dolayı teğetsel hızda önemli değişimlerin olacağını belirten Francis-Asfari, hesaplanan değişim miktarının (3.21) eşitliğinden elde edilen değere eklenmesi gerektiğini belirtmişlerdir[29]. Yazarlar, değişim miktarının hesabı için de bir yöntem önermişlerdir.

Yazarlara göre, V_r ve V_z hızlarının helikoidal bileşenleri, kıvrımı izleyen akışkan zerreciklerinin deplasmanına dayanır. Eğri boyunca hızların değişimine sebep olan bu gerçek, farklı alanlar arasındaki hareket miktarındaki değişimi belirtmektedir. Cidar etkisi olmayan, büyük genişlikli bir kanaldaki akım hali için hareket denkleminin θ yönündeki bileşeni,

$$V_r \frac{\partial V_{\theta}}{\partial r} + \frac{V_{\theta}}{r} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_{\theta}}{\partial z} + \frac{V_r V_{\theta}}{r} = gJ_{\theta} + \frac{1}{\delta} \frac{\partial \tau_{\theta}}{\partial z} \quad (3.23)$$

şeklinde yazılabilir.

Kıvrımdaki V_{θ} 'daki değişimler $r \Delta_{\theta}$ yayının sınırında aniden oluştuğu yaklaşımı ile her $r \Delta_{\theta}$ yay parçası boyunca ağırlık ve teğetsel kuvvetler arasında bir dengenin olduğu düşünülürse, (3.23) eşitliğinin sağ tarafı sıfır olur. Ayrıca V_r ve V_z hızlarının hesaplanmış değerlerini eşitlikte yerine koyarsak (3.23) eşitliği sonlu farklar yöntemi ile çözülebilir. Çünkü eşitlik;

$$V_r \frac{\Delta V_{\theta}}{\Delta r} + \frac{V_{\theta}}{r} \frac{\Delta V_{\theta}}{\Delta \theta} + V_z \frac{\Delta V_{\theta}}{\Delta z} + \frac{V_r V_{\theta}}{r} = 0 \quad (3.24)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan ΔV_{θ} 'yı çözülürse,

$$\Delta V_{\theta} = -\frac{r \Delta_{\theta}}{V_{\theta}} \left[V_r \frac{\Delta V_{\theta}}{\Delta r} + V_z \frac{\Delta V_{\theta}}{\Delta z} + \frac{V_r V_{\theta}}{r} \right] \quad (3.25)$$

ifadesi bulunur. (3.25) eşitliğinden elde edilen ΔV_{θ} hesaplanabilir. Bu durumda yeni teğetsel hızın değeri;

$$V'_\theta = V_\theta + \Delta V_\theta$$

(3.26)

formülünden bulunur.

Aynı yazarlar, r yarıçaplı, j taban eğimli bir kanalda bir akışkan elemanına etkiyen kuvvetlerin dengesini yazarak, kıvrımlı kanallarda basınç dağılımının yaklaşık olarak hidrostatik basınç dağılımına uyduğunu göstermişlerdir. Söz konusu akışkan elemanına etki eden kuvvetler;

-y doğrultusunda;

$$-\frac{\delta P}{\delta r} + \frac{\rho V_r}{r} = 0 \quad (3.27)$$

-z doğrultusunda;

$$-\frac{\delta P}{\delta z} + \rho g \cos \alpha = 0 \quad (3.28)$$

olarak yazılabilir. (3.27) ve (3.28) eşitlikleri integre edilip sınır şartları göz önüne alınırsa;

$$\frac{P}{\gamma} = \frac{V_r^2}{r} \frac{y}{g} \quad (3.29)$$

ve

$$\frac{P}{\gamma} = z \cos \alpha \quad (3.30)$$

ifadeleri bulunur. (3.29) ve (3.30) eşitliklerinden görüldüğü gibi, kıvrımın iç tarafından dış tarafa doğru gidildikçe su derinliğinin arttığı ve buna karşılık kanaldaki basınç dağılımının yaklaşık olarak hidrostatik kanuna uyduğu görülmektedir.

Yen ve Yen [30], hareket denkleminde faydalananarak su yüzü profili ve kabarmanın, helikoidal akımdan ve kanal taban topografyasından nasıl etkilendiğini araştırmışlardır.

Yazarların, silindirik koordinat sisteminde türbülanslı akımın Reynolds denklemlerinden yararlanarak çıkardıkları radyal ve teğetsel su yüzü eğimini veren ifadeler, sırasıyla;

$$J_r = \frac{1}{gh} \left[-u^{*2} \sin \phi + \int_{z_0}^{z_1} \left(\frac{V_\theta^2}{r} - V_\theta \frac{\delta V_r}{r \delta \theta} \right) dz \right] \quad (3.31)$$

ve

$$J_\theta = \frac{1}{gh} \left[u^{*2} \cos \phi + \int_{z_0}^{z_1} \left(V_\theta \frac{\delta V_\theta}{r \delta \theta} + V_r \frac{\delta V_\theta}{\delta r} + \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\delta V_\theta}{\delta z} \right) dz \right] \quad (3.32)$$

şeklindedir. Burada;

u^* = Ortalama taban kayma gerilmesi,

J_r, J_θ = Sırasıyla, enine ve teğetsel su yüzü eğimleri,

V_r, V_θ, V_z = Sırasıyla r, θ ve z doğrultularındaki geçici ortalama hız bileşenleri,

r = Kıvrım eğrilik yarıçapı,

h = Yersel akım derinliği ($z_1 - z_0$),

$\sin \phi = V_r / V_\theta$ oranı,

olarak verilmektedir. (3.31) eşitliği yerinde yazılırsa;

$$J_r = \frac{V_m^2}{2gr} \left\{ -2 \frac{r}{h} \left(\frac{u^*}{V_m} \right)^2 \sin \phi + \int_{z_0/h}^{z_2/h} 2 \left[\left(\frac{V_\theta}{V_m} \right)^2 - \frac{V_\theta}{V_m} \frac{\delta \left(\frac{V_r}{V_m} \right)}{\delta \theta} \right] d \left(\frac{z}{h} \right) \right\} \quad (3.33)$$

bulunur. Burada V_m , kanalın doğrusal kısmındaki ortalama hızı ifade etmektedir. (3.33)

eşitliğinin sağ tarafındaki parantez içindeki ilk terim, taban kayma gerilmesinin radyal bileşeninin enine su yüzü eğimine etkisini göstermektedir. İkinci terim, teğetsel hızın doğrultusundaki değişimden dolayı radyal ivmenin dikkate alındığını ve son terim de θ doğrultusundaki değişimden dolayı konvektif momentum akısındaki değişimi ifade etmektedir.

Yen ve diğ. [30], (3.33) eşitliğindeki parantez içindeki terimleri sırasıyla

C_{r1}, C_{r2} ve C_{r3} olarak isimlendirmişler ve yersel enine su yüzü eğimi katsayısını,

$$C_r = C_{r1} + C_{r2} + C_{r3} \quad (3.34)$$

olarak tariflemişler ve enine su yüzü eğimini veren (3.33) eşitliğini,

$$J_r = C_r \frac{V_m^2}{2gr} \quad (3.35)$$

şeklinde basitleştirmişlerdir. Yazarlar aynı yaklaşımla, (3.32) eşitliğini,

$$C_\theta = C_{\theta1} + C_{\theta2} + C_{\theta3} + C_{\theta4} \quad (3.36)$$

olarak teğetsel su yüzü eğimi ifadesini,

$$J_\theta = C_\theta \frac{V_m^2}{2gr_c} \quad (3.37)$$

olarak basitleştirmişlerdir. Burada;

C_θ = Yersel teğetsel su yüzü eğimi katsayısı,

r_c = Kıvrımdaki eksensel olan eğrilik yarıçapı,

Apmann [31]'a göre, kayma gerilmesi dağılımı, kanal sınır deformasyonu ve su yüzündeki yanal değişim, bir kıvrım boyunca teğetsel hız bileşeninin değişimine bağlıdır[19]. Araştırmacı daha önceki çalışmalarda belirtilen su yüzeyindeki yanal değişim katsayılarının, b/r_c eğrilik oranlarının küçük değerlerinde birbirleriyle iyi uyum içinde olduğunu fakat b/r_c nin büyük değerlerinde eşitlikler arasında belirgin farklılıkların bulunduğunu ifade etmiştir.

Araştırmacı, dr genişlikli $r d\theta$ uzunluğuna ve dz yüksekliğine sahip sonsuz küçük bir akışkan elemanına etki eden merkezkaç kuvveti, radyal kayma gerilme bileşeni ve basınç kuvvetlerinin (hidrostatik dağılımlı) birbirlerini dengelediklerini kabul ederek, su yüzündeki yanal değişim katsayısı için;

$$K = \frac{5}{4} \tanh\left(\frac{r_c \theta}{b}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right) \quad (3.38)$$

ifadesini vermiştir. Su yüzündeki yanal değişimden hareketle kıvrımdan geçen akım miktarı,

$$Q = A \sqrt{\frac{gH_s}{K}} \quad (3.39)$$

eşitliği ile verilmiştir. Burada,

A= Kabarmanın ölçüldüğü kesitteki radyal enkesit alanı,

H_s = Kıvrımda iç ve dış kıyı arasındaki maksimum su yüzü yükseklikleri farkı,

K = Su yüzü yanal değişim katsayısıdır.

Bu durumda yapılacak hatanın % 8-12 arasında kalacağını belirtmişlerdir.

Choudhary- Narasimhan [32], 180° 'lik bir açık kanal kıvrımında dar ve geniş kanallarda nehir rejimli akım şartlarında, şev ve taban kayma gerilmesi (erozyon kapasitesi) ve helikoidal hareketin gelişimi (taşıma kapasitesi) deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler eksen eğrilik yarıçapı $r_c = 80$ cm, genişliği $b = 96$ cm, derinliği $h = 25$ cm olan bir dikdörtgen kanal kıvrımında gerçekleştirilmiştir. Kıvrımdan önce 10.33 m, kıvrımdan sonra 11.45m'lik doğrusal kanal kısmı mevcuttur. Değişik akım şartlarında dar kanal $b/h = 5$ ve geniş kanal $b/h = 10$ için froude sayılarının 0.2, 0.4 ve 0.6 değerlerinde çalışmışlardır[21].

Araştırmacılar ölçümleri, kıvrımda 15° 'lik radyal aralıklarla, doğrusal kısımda 50cm'lik aralıklarla gerçekleştirmişlerdir. Radyal ve teğetsel hızlar pitot tüpü yardımıyla her en kesitte 5 düşey boyunca, taban ve şev kayma gerilmeleri preston tüpüyle ve boyuna hız bileşeni V'nin kanal en kesitiyle yaptığı β sapması Yaw-Meter ile ölçülmüştür. Su yüzü profilindeki değişimler de yine preston tüpü yardımıyla belirlenmiştir.

Araştırmacılara göre, helikoidal hareket $\theta = 15^\circ$ 'de dış kıyıda başlamakta ve $\theta = 105^\circ$ - 120° civarında maksimuma ulaşmaktadır. Froude sayısındaki artış veya b/h oranındaki azalma, helikoidal hareketin daha erken doğmasına ve daha hızlı gelişmesine yol açmaktadır. Helikoidal hareket $\theta = 135^\circ$ 'de dış kıyı bölgesinde maksimuma ulaşmaktadır. Aynı zamanda, aynı θ civarında dış kıyı yakınlarında büyük kayma gerilmesi mevcuttur ve helikoidal hareketin yönü ve şiddeti taban malzemesini hareket ettirmeye çalışmaktadır. Buna göre koruma çalışmasının, kıvrımın bu bölgesinde yapılması arzu edilmektedir. Merkezi rejim bölgesinde helikoidal hareketin Froude sayısından bağımsız olduğu görülmektedir. Helikoidal hareket $\theta = 120^\circ$ 'den sonra iç kıyıda bozulma başlamakta ve su yüzündeki yanal değişimle aynı anda başlamaktadır. Froude sayısındaki artış ve b/h oranındaki azalmayla helikoidal hareketin bozulma oranı azalmaktadır.

Su yüzündeki maksimum yanal değişim $\theta = 90^\circ$ civarında iç kıyıda minimum su derinliğine ulaşarak maksimum kabarma meydana gelmektedir. Froude sayısındaki artış ve b/h oranındaki azalma su yüzü profili ve kabarmanın yerini etkilemektedir. Aynı araştırmacılar, dar kanallarda $\theta = 75^\circ$ ve $r/r_c = 1.279$ civarında düşük şiddette ikinci bir helikoidal hareketin de yüzey yakınlarında geliştiğini fark etmişlerdir.

Chang [33], nehir rejimli akım şartlarında tam gelişmiş türbülanslı akıma sahip hafif eğrilikli bir açık kanal kıvrımındaki enerji kayıplarını analiz etmiştir. Araştırmacıya göre, kıvrımlı bir kanalda enerji kayıplarındaki artış aşağıdaki sebeplerin sonucunda oluşmaktadır.

- 1- Sekonder akımdan dolayı içsel akışkan sürtünmesi,
- 2- Radyal kayma gerilmesinin sonucunda sınır direnci,
- 3- Keskin kıvrımlarda sınır tabakasındaki ayrılma sonucunda oluşan eddy kaybı,
- 4- Büyük Froude sayılarında oluşan ani sıçramalardan dolayı eddy kaybı.

Vriend ve Struik [34], bir açık kanal kıvrımındaki akımın yapısını aşağıdaki şekilde özetlemiştir.

Kıvrım bölgesine yaklaştıkça akım, akım çizgisinin eğriliğini tedrici olarak arttırmaya çalışan menba tarafındaki basınç yükünün etkisiyle karşılaşır. Kıvrıma girişte, akım çizgisinin eğriliği, kıvrımın iç kıyısında akımın hızlanmasına yol açan (potansiyel akım etkisine yol açan) radyal ve teğetsel basınç gradyanlarına sahiptir. Kıvrıma girişten sonra akım, üniform olmayan derinlik dağılımına tedrici olarak kendini uydurmaya çalışır. Derinlik boyunca ortalama V 'nin radyal dağılımının dışa doğru sapmasına neden olur. Bu dışa doğru sapma, sekonder akımın düşey bileşeninin konvektif ivme etkisini arttırmaya çalışır.

Kıvrım çıkışına doğru ise, akım çizgisinin eğriliği tedrici olarak azalır. Radyal doğrultuda basınç gradyanındaki değişim, kıvrımın iç kıyısında akımı yavaşlatan, dış kıyısında ise hızlandıran teğetsel basınç gradyanlarına neden olur. Bu, kıvrım çıkışına yakın kısımda V 'nin radyal dağılımında dışa doğru daha fazla sapmaya sebep olur. Kıvrım çıkışında da akımdaki bu değişiklikler kendisini taban topoğrafyasına uydurmaya çalışır.

Georgiadou ve Smith [35], genişliği kıvrım boyunca tedricen azalan 90° 'lik bir kıvrımlı yaklaşım kanalındaki akımı teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir.

Araştırmacılar deneysel çalışmalarında, yüzey ve taban akımlarının gözlemlenmesi ve üç boyutlu hız ölçümlerini kapsamaktadır. Kıvrımlı yaklaşım kanalı akımları için uygulanabilir basitleştirilmiş nümerik model geliştirilmişlerdir. Branş kanalı probleminde, branşın mevcudiyetinin ana kanala etkisini belirleyebilmek için deneysel çalışma yapmışlardır.

Georgiadou ve Smith [35], silindirik koordinat sisteminde momentum ve süreklilik denklemlerinden hareketle, çeşitli kabuller yaparak, ortalama teğetsel su yüzü eğimi J_θ ve radyal su yüzü eğimi J_r değerlerini aşağıdaki şekilde vermişlerdir.

$$J_{\theta} = \frac{\delta h}{r \delta \theta} = \frac{\frac{Q^2 h}{gb^2} \left[\frac{\lambda}{2} + \frac{b_0}{b} \frac{1-b_d}{r_c \theta_f} \right]}{\left[h - \frac{Q^2}{gb^2} \right]} \quad (3.40)$$

$$J_r = \frac{\delta h}{\delta r} = \alpha_0 \frac{V_{\theta}^2}{gr} + \frac{\tau_{r0}}{\rho gh} \quad (3.41)$$

burada;

Q = Debi miktarı,

h = En kesitteki ortalama derinlik,

g = Yerçekimi ivmesi,

b = Kanal genişliği,

b₀ = Yaklaşım kanalı menba genişliği,

λ = Darcy sürtünme katsayısı,

b_d = Daralma oranı (b_f/b₀),

r_c = Eksen eğrilik yarıçapı,

r = Eğrilik yarıçapı,

θ_f = Toplam kıvrım açısı,

α₀ = Ortalama merkezkaç kuvveti katsayısı,

V_θ = Ortalama teğetsel hız,

τ_{r0} = Taban kayma gerilmesi radyal bileşeni,

b_f = Yaklaşım kanalı mansap genişliğidir.

Araştırmacılar, λ sürtünme katsayısı ve α₀ ortalama merkezkaç kuvveti katsayısı için de;

$$\lambda = 2g \left[1 + 8.2 \left(\frac{h}{r_c} \right)^2 \right] / (C^2 h) \quad (3.42)$$

ve

$$\alpha_0 = \left(\frac{1}{V_\theta^2} \right) \left(\frac{1}{h} \right) \int_0^h V_\theta^2 dz \quad (3.43)$$

ifadelerini vermişlerdir. Burada C, Chezy katsayısıdır.

Fares ve Herbertson [36], 0.5 m genişliğinde dikdörtgen en kesite sahip 60°'lik bir kıvrımlı kanalın dış kıyısına yerleştirdikleri kalın kenarlı yan savağın, kıvrımdaki akım yapısına olan etkisini deneysel olarak araştırmışlardır.

Düşük savaklanma oranlarında ($Q_w < 0.26$, $h_w < 0.36$) maksimum hız yörüngesi kıvrımın iç kıyısından dış kıyısına doğru yönelmemektedir. Yan savak akımı menba tarafındaki teğetsel hız dağılımına etki etmemektedir. Yan savak boyunca bu etki hala azdır. Burada;

Q_w = Savaklanma oranı (Savaklanan debi/toplam debi),

h_w = Rölatif yük (Savak üzerindeki su derinliği/toplam derinlik),

olarak verilmektedir.

Büyük savaklanma oranlarında ($Q_w > 0.40$, $h_w > 0.36$) ise, maksimum hız yörüngesi yan savak menbaında iç kıyıdan dış kıyıya doğru yönelmekte ve yan savağın hemen menbaında akım hızlanarak, artan kinetik enerjisi ile enine eğimi azalmaktadır. Yan savak boyunca teğetsel hızlar yanal akımdan etkilenerek ayrılma ve durgunluk bölgeleri meydana getirmektedir. Durgunluk bölgesi h_w ve yan savak mansap derinliğine bağlı olmaktadır. Durgunluk bölgesi savağın yarısını kapsamakta, iç kıyıdaki hızlar azalarak akım dış kıyıya doğru yönelmektedir. Yan savak akımı menba tarafındaki teğetsel hız dağılımına çok az etki etmektedir. Kıvrım dış kıyısında taban yakınlarında ters akım meydana gelerek, iç kıyıda gelişen durgunluk bölgesi akım hızında derinlikle değişikliklere neden olmaktadır. Bu da, akımın dış kıyıya doğru yönelmesine yol açarak, yüzeyde rölatif olarak daha büyük hızlar meydana getirmektedir.

Rakonczi ve diğ. [22], kıvrımın geometrik boyutları arasındaki ilişkiyi şu bağıntı ile ifade etmişlerdir. Kıvrım geometrisi bir akarsuyun debi değişimi ve arazinin eğimi ile ilgili ilişkidir.

$$L = a_* \cdot Q^{b_*} \quad (3.44)$$

Burada, a_* ve b_* akarsuyun kıvrım tipine bağılı birer sabit sayıdır. L ise akarsuyun iki bükülme noktası arasındaki kıvrım boyunu ifade etmektedir. Rakonczi ve diğ. [22], çalışmalarında akarsu yataklarında kullanılan aşğıdaki izleme parametrelerini karşılaştırmıştır.

1. Eğim noktaları arasındaki yay uzunluğu
2. Kanal uzunluğu (eğimler arasındaki doğrusal uzunluk)
3. Genişlik
4. Merkez açısı

Kıvrım parametrelerinin bilimsel olarak adlandırılması DIN 4049 ile standartlaştırılmıştır [37].

Akarsuların kanal en kesitlerinde kıvrım içerisinde su derinliği fazla su yüzeyi dalgasız iken, kıvrım çıkışında ve kıvrım geçişlerinde su derinliği sığ, su yüzeyi dalgalıdır [20].

Akarsuların şekli, akım, katı madde hareketi, iklim şartları ve topoğrafik etkilerden dolayı zaman içerisinde sürekli bir değişim içerisinde. Düz bir kanal zaman içerisinde kıvrımlı bir kanal şeklini alabileceği gibi, kıvrımlı bir kanal da düz bir kanal şeklini alabilir [37].

Kıvrımlardaki oyulma ve yığılma sebebi sekonder (iki boyutlu) akımlardır. Sekonder akım akarsuda akım doğrultusunda dik doğrultuda kendi içinde dönüş halinde olan akışkan parçacıklarından oluşur. Bunun sebebi ise kıvrımlarda herhangi bir akışkan parçacığı enine doğrultuda iki farklı kuvvetin etkisi altındadır. Bunlar basınç ve merkezkaç kuvvetidir. Basınç etkisi aynı derinlikteki bir düzlem üzerindeki her noktada aynı değerdedir. Merkezkaç kuvveti ise hız ile doğru orantılıdır. Hız ise yüzey yakınlarında büyük, tabana yakın bölgelerde küçüktür. Bu sebepten, kıvrımlarda merkezkaç kuvveti yüzeyde tabana göre daha büyüktür. Buna göre akışkan parçacıkları yüzeye yakın kısımlarda dışa doğru, tabana yakın kısımlarda ise içe doğru hareket eder [38].

Kıvrımda oluşan sekonder akım asıl akımla bir araya geldiğinde helikoidal akım meydana gelir. Tabanda kıvrımın dışından içine doğru yönelen akım dış taraftaki kıydan olduğu malzemeyi iç kıyıya doğru taşır. Zamanla daha düzgün şekilde akan bir akarsu sekonder akımın etkisiyle kıvrımlı bir hal alır ve menderesler oluşur [38].

Su alma yerinin seçimi katı madde tanelerinin su alma ağzından içeriye girmesini önemli şekilde etkiler. Kıvrımlarda meydana gelen sekonder akım kıvrımın dış kenarında oyulma, iç kenarında ise yığılmaya sebep olur. Su alma ağzı için en uygun yer kıvrımın dış kenarıdır. Dış kenardaki en uygun yer ise kıvrımın tepe noktasından sonraki kısmıdır.

Fakat bazı durumlarda su alma ağzının kıvrımın iç kenarında bulunması zorunlu olabilir. Bu durumlarda su alma ağzı yine kıvrımın dış kenarında bulunmalı ve bu şekilde alınan su bağlama içerisinde kıvrımın iç kenarına aktarılmalıdır. Düz bir kısımdan su alınacağı

zaman, akarsuda inşa edilecek mahmuzlar yardımıyla kıvrımlar oluşturulup öyle alınmalıdır [39] .

Coşar, Ağaçcıoğlu, Üç [40], ise kıvrımlı kanallara yerleştirilen üçgen savakların debi katsayısını deneysel olarak araştırmışlardır. Bu çalışma sonunda, kıvrımlı kanallara yerleştirilen üçgen kesitli ve keskin kenarlı yan savakların debi katsayısının, yan savak menbasında ana kanaldaki Froude sayısına, üçgen savak tepe açısına ve kıvrım açısına bağlı olarak değiştiğini belirlemişlerdir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, sifon modelinin hazırlanması hakkında bilgiler, deney kanalı düzeneği ve kıvrımlı bir açık kanalda yan savak olarak otomatik sifon savakların kullanılması halinde oluşan su seviyeleri, akımın hidroliği, hız dağılımları, sifon savağın debileri ve çalışma şartları deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmadan çıkan sonuçlara göre; Froude sayıları ile debi katsayıları da hesaplanmıştır. Deneyler önce kanalın kıvrımlı kısmında (30^0 'lık, 60^0 'lık, ve 90^0 'lık kısımlarında) , sonra da karşılaştırma yapmak amacıyla düz kısmında (0^0 'lık kısmında) yapılmıştır. Hız dağılımı ölçümleri savaktan 3 cm uzaklıktan başlamış ve 7 değişik ekseninde (A-A, B-B, C-C, D-D, E-E, F-F, G-G) ve her eksen üzerinde 10 noktada Micromuline (0.02—5 m/s) ile yapılmıştır. Seviye ölçümleri ise; 0.01 mm hassasiyetli elektronik limnimetrelerle yapılmıştır. Limnimetreler hareketli, seviye ve hız ölçüm arabası üzerine monte edilerek seviye ölçümleri yapılmıştır. Deneysel çalışmanın safhaları ise resimlendirilmiştir.

4.1 Deney Kanalı Düzeneği

Bu çalışmada deneysel çalışma Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Anabilim Dalı Laboratuvarında bulunan 180^0 'lık kıvrımlı kanalda gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1'de görülen bu kıvrımlı kanal 50 cm genişliğinde ve 50 cm yüksekliğinde ana kanal ile yine aynı boyutlarda (savakların karşısında ayrıca yarım daire şeklinde genişletmeler bulunmaktadır) toplama kanalından oluşmaktadır. Deney kanalı kısımları şunlardır :

1-Ana Depo:

Bodrumda bulunan ana depodaki su 3 adet pompa ile üst katlarda bulunan depoya pompalanmakta ve buradaki depodan ise boru ile istenilen miktardaki su deney kanalına gönderilmektedir. Deney kanalını besleyen dinlendirme havuzuna girmeden önce elektromanyetik debimetre ile gelen suyun debisi ayarlanmaktadır.

2-Deney Kanalını Besleyen Dinlendirme Havuzu ve Üçgen Savak:

Kanalı besleyen dinlendirme havuzu 2.5 m x 0.9 m ve 1 m x 1.30 m boyutunda (L şeklinde) olup 0.7 m yüksekliğindedir. Suyun sakinleştirilmesi için havuzun içerisine delikli ızgaralar yerleştirilmiştir. Havuzun sonunda ise üst genişliği 0.90 m olan bir dik üçgen savak mevcuttur (Şekil 4.4).

3-Savaktan Sonraki Dinlendirme Havuzu:

Üçgen savaktan kanala akan su, 0.9 m x 0.9 m boyutunda ikinci bir dinlendirme havuzunda dinlendirilmektedir. Bu havuzdan sonra yine sakinleştiriciler mevcuttur (Şekil 4.4).

4-Deney Kanalı:

a) Yaklaşım Kanalı

Yaklaşım kanalı, 3.5 m x 1 m'lik doğrusal giriş kanalı, 1m geçiş kanalı ve 10 m uzunluğunda 0.5 m x 0.5 m en kesitli doğrusal ana kanaldan oluşmaktadır. Yaklaşım kanalının dış kısımları camdan yapılmıştır. Dinlendirme havuzundan 4.5m sonra kanalda bir daraltma yapılmaktadır. Bu daraltmadan sonra kanal giren su önce yaklaşım kanalında (düz kısımda) bulunan $\alpha = 0^\circ$ 'lik savağa sonra sırasıyla kıvrımlı kısımda bulunan $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 60^\circ$, $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 120^\circ$, $\alpha = 150^\circ$ 'lik savaklara ulaşmaktadır.

b) Kıvrımlı Kanal

Şekil 4.2'de görülen kıvrımlı kanal, $r = 2.75$ m eksen yarıçaplı 180° 'lik kıvrımlı bir kanaldır. Bu kanal, ana ve toplama kanallarından oluşmakta ve toplama kanalında bulunan savakların karşısına su akışının rahat yapılması ve akışların gözlemlenmesi için yarım daire şeklinde genişletmeler yapılmıştır.

c) Doğrusal Çıkış Kanalı:

3.0 m uzunluklu doğrusal çıkış kanalı sonuna 2 parçalı su seviyesi ayar kapağı yerleştirilmiştir (Şekil 4.3).

d) Yan Savak Ayırma Duvarı:

Ana kanal dış duvarı akışların gözlemlenebilmesi için şeffaf malzemeden (pleksiglasdan) yapılmıştır. Düz kısımlarda ise cam kullanılmıştır. İç duvar ise sacdan yapılmıştır. İç duvar üzerinde kıvrım girişinden sonra menbada ve yan savak eksenleri 30° , 60° , 90° , 120° ve 150° 'lik daire yaylarını görecektir şekilde yan savak yerleri belirlenmiştir (Şekil 4.2).

e) Toplama Kanalı:

Yan savakta toplanan su 0.50 m genişliğindeki toplama kanalından uzaklaştırılmıştır. Toplama kanalı ile ana kanal arasında 20 cm kot farkı vardır. Bu kanalın dış kısmı yine akışların rahat gözlemlenebilmesi için pleksiglasdan yapılmıştır. Toplama kanalının sonunda 0.5 m genişlikli, 7.05 cm eşik yükseklikli bir dikdörtgen savak yerleştirilerek savaklanma debisi belirlenmiştir. Bunun için dikdörtgen savaktan 95 cm mesafeye yerleştirilen elektronik limnimetreden faydalanılmıştır (Şekil 4.2).

f) Boşaltım (çıkış) Kanalı:

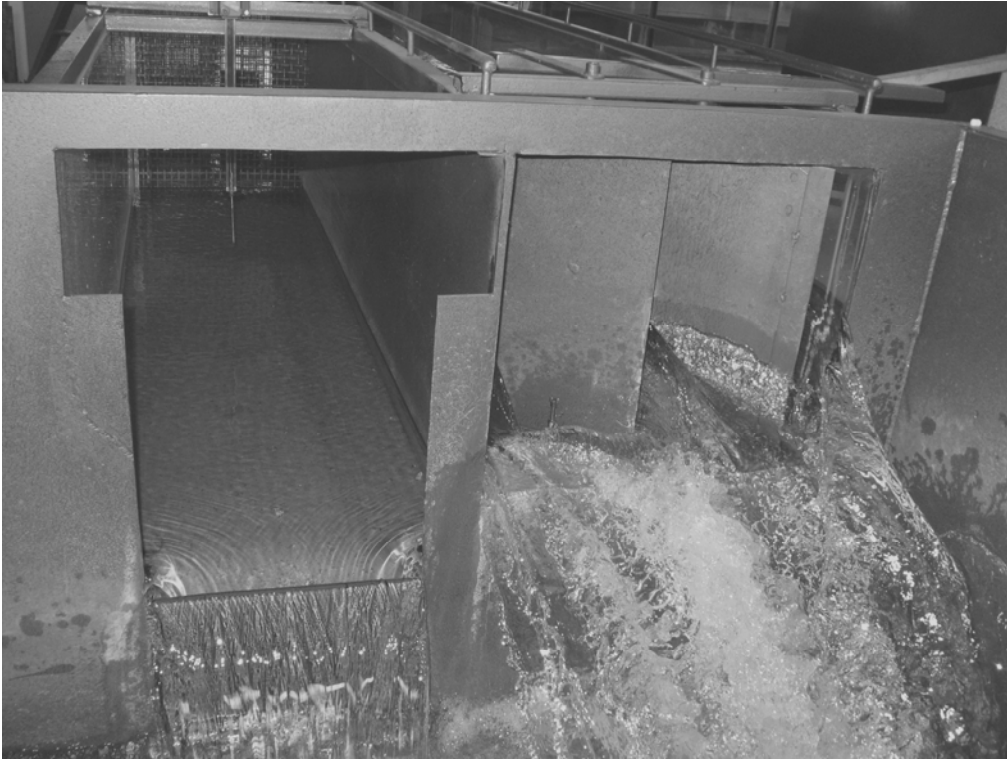
Ana kanalın su seviye ayar kapağından geçen ve toplama kanalından gelen akım, boşaltım (çıkış) kanalına dökülerek ana depoya geri gönderilmiştir.

g) Hareketli, Seviye ve Hız Ölçüm Arabası

Ana kanal üzerinde bulunan borular üzerinde hareket eden ve özel olarak dizayn edilmiş araba yardımı ile hız ve seviye ölçümleri yapılmıştır. Hız ve seviye ölçüm cihazları bu araba üzerine monte edilerek ölçümler yapılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.2 Deney kanalı genel görünüşü



Şekil 4.3 Toplama kanalı ve ayar kapağı genel görünüşü



Şekil 4.4 Dinlendirme havuzu ve üçgen savak genel görünüşü



Şekil 4.5 Hareketli seviye ve hız ölçüm arabası

4.2 Sifon Modelinin Hazırlanması

Bir sifon modeli hava-su karışımıyla çalışacağından, akımın bütün safhaları için tam bir benzerlikten söz etmek mümkün değildir. Buna rağmen model deneyleri, bir sifonun projelendirilmesi için en iyi rehber olarak kabul edilir [41].

Sifon modellerinde esas alınacak benzerlik kanunu, Reynolds sayısının değerine göre tespit edilir [15]. Genel olarak Reynolds sayısı $2 \cdot 10^5$ ' den büyük olan modellerde Froude benzeşimi ve Reynolds sayısı bu değerden küçük olan modeller için ise Reynolds benzeşimi esas alınmaktadır [15]. Bunun sebebi de; büyük Reynolds sayılarında ağırlık kuvvetleri viskoz kuvvetlere oranla daha etkili olurken, yaklaşık $2 \cdot 10^5$ den küçük Reynolds sayılarında viskoz kuvvetlerin daha fazla önem kazanmasıdır.

Benzerlik kanununun tespitinden başka bir de minimum ölçek tespiti gerekmektedir. Bunun için de Gibson [6]'nın verdiği;

$$d\sqrt{h} > 47.1 \text{ cm}^{3/2}$$

veya

$$R_e > 2.08 \cdot 10^5 \cdot C_d$$

kriterleri esas alınır. Bunun nedeni de $f(C_d, R_e)$ değişimindeki kararsız bölgeden yeterince uzak ve daha küçük tepe en kesitlerde yemlenme yüksekliğinin yüzeysel gerilim tesirinden etkilenmemesini sağlamaktır. Burada, “d” sifonun tepe en kesiti yüksekliğini, “h” sifonun çalışma yüksekliğini ve “ C_d ” ise sifonun debi katsayısını göstermektedir. Araştırmacılar, bir sifon modelinde yemlenme yüksekliğinin 1.3 cm’den büyük olması gerektiğini göstermiştir.

Deneyde kullanılan sifon otomatik yemlenmeli sifondur. Bu sifon da akımın gözlenmesi için şeffaf malzemeden (pleksiglas) yapılmıştır. Şekilde detayları verilen sifon için, kullanılacak kanalın geometrik boyutları ile minimum model ölçeği $d\sqrt{h} > 47.1 \text{ cm}^{3/2}$ şartları göz önünde bulundurularak, model boyutları tespit edilmiştir. Bundan sonra sifonun inşası için ahşap kalıplar hazırlanmıştır. Daha sonra pleksiglas malzemesinden yapılan sifonun üst ve alt yüz (kret ve tepe yüzleri) plakaları etüvde ısıtıldıktan sonra ahşap kalıplara konarak gerekli profil verilmiştir. Bu profiller, düz pleksiglas plakadan kesilerek, tesviye edilmiş olan sifon yan yüzü profilleri üzerine özel pleksiglas yapıştırıcısı ve silikon ile yapıştırılarak monte edilmiştir.

Şekil 4.6’da görülen bu model sifon otomatik yemlenmeli olup, giriş kesiti 12x18 cm, tepe kesiti 12x7 cm ve tepe dirseğinden sonra teşkil edilen yemlenme tertibatından çıkışa kadar 12x6 cm boyutlarında dikdörtgen kesitlidir. Tepe dirseği en kesiti yüksekliğiyle alçalma

bölgesinin en kesit yüksekliği arasında 1 cm'lik fark, saptırıcı olarak düşünülmüştür. Ayrıca giriş hız yüksekliğini küçük tutarak, sifonun giriş ağzı için gerekli olan minimum batma miktarını azaltmak amacıyla giriş en kesitinin boyutları büyük tutulmuştur. Bu sayede sifonun giriş dirseği ortadan kaldırılmıştır. Sadece çıkışta 90⁰'lik bir dirsek mevcuttur.

Bu otomatik sifon, bir açık kanalın kıvrımlı kısmı ($\alpha = 30^0$, $\alpha = 60^0$, $\alpha = 90^0$) ile düz kısmında ($\alpha = 0^0$) “yan savak” olarak uygulanarak; hız ve seviye ölçümleri yapılmış, sifonun yemlenme ve durma şartları belirlenmiştir.

Modelin boyutlarını tespit ederken de klasik sifonda olduğu gibi mevcut kanalın geometrik boyutlarıyla Gibson [6]'ın minimum model ölçeği şartları göz önünde bulundurulmuştur. Mevcut geometrik şartlara göre, sifon girişindeki üst su seviyesiyle çıkış kesiti eksenini arasındaki maksimum yükseklik $h = 57.3$ cm, bu çalışma yüksekliği için sifon kreti üzerindeki su yükü $\Delta h = 20$ cm ve sifonun tepe dirseğinin iç yarıçapı $r_i = 6$ cm'dir.

Bu değerlere göre Gibson'nın minimum model ölçeği şartlarına göre sifonun tepe en kesit yüksekliği,

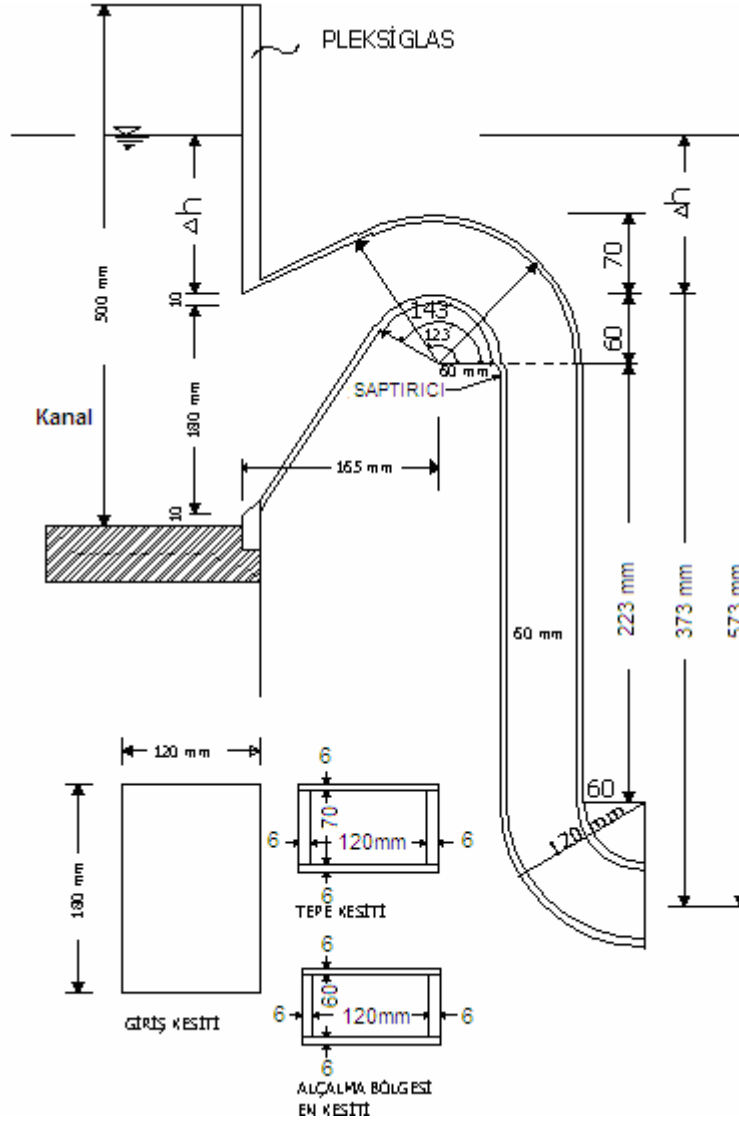
$$d\sqrt{h} > 47.1 \text{ cm}^{3/2}$$

$$d\sqrt{57.3} > 47.1 \text{ cm}^{3/2}$$

$$d > 6.2 \text{ cm}$$

olması gerekmektedir. Teşkil edilen modelde $d = 7$ cm alınmıştır. Dikdörtgen en kesit için en uygun kesit değerini veren genişlik / yükseklik oranı da dikkate alarak, sifonun en kesit genişliği

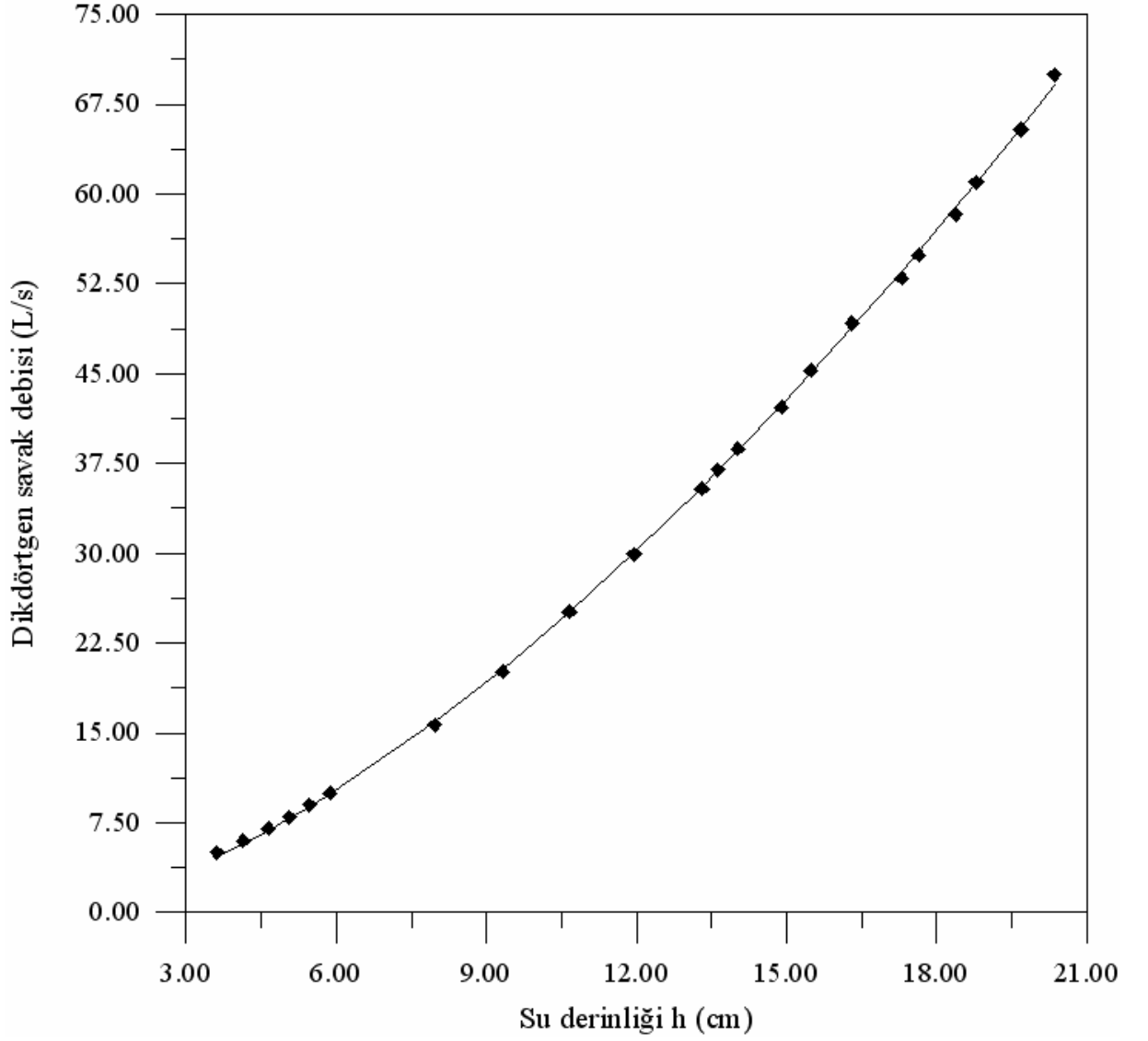
$b = 12$ cm olarak tespit edilmiştir (alçalma bölgesi en kesiti için $\frac{b}{d} = 2$ oranı esas alınmıştır).



Şekil 4.6 Otomatik model sifonun detayı

4.3 Dikdörtgen Savak Anahtar Eğrisinin Elde Edilmesi

Dikdörtgen savak anahtar eğrisi, ana kanaldaki akımın tamamı toplama kanalına verilerek elde edilmiştir. Elektromanyetik debimetreden okunan debiler dikdörtgen savak üzerindeki nap kalınlığı ölçülerek elde edilen anahtar eğrisi Şekil 4.7’de verilmiştir. Toplama kanalı sonundaki dikdörtgen savağa ait eşitlik aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.



Şekil 4.7 Dikdörtgen savak anahtar eğrisi [42].

$$Q = 0,619356.h^{1,564577} \quad (4.1)$$

Burada, Q dikdörtgen savaktan savaklanan debi (L/s), h nap yükü (cm) dir [42].

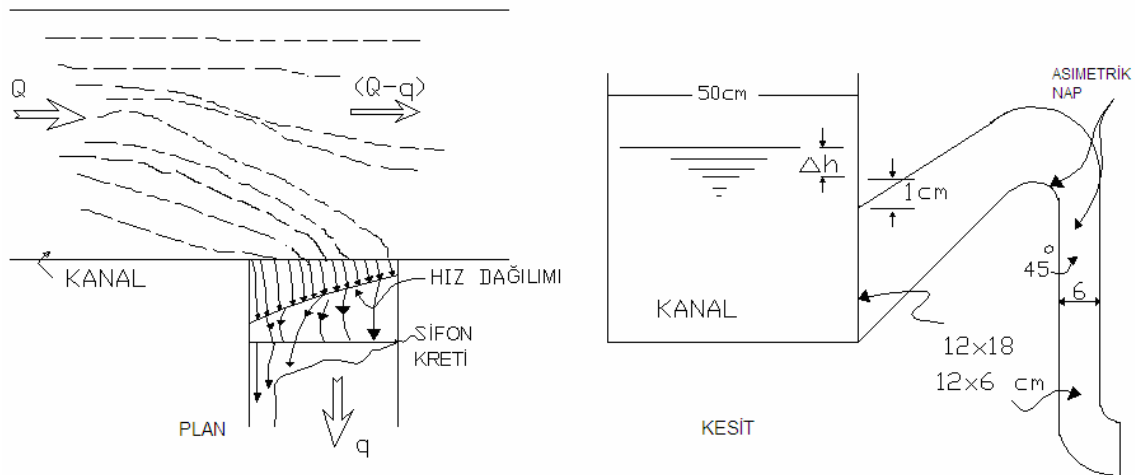
4.4 Deney Kanalındaki Sifonun Yemlenme ve Durma Şartlarının Belirlenmesi

Otomatik yemlenmeli sifonlar için yemlenme yüksekliği çok önemlidir. Yemlenme yüksekliği sifon tepe kesiti yüksekliğinin 1/3'üne eşit bir değerde olması arzu edilmektedir.

Ayrıca, sifonun durması sırasında da durma yüksekliğinin mümkün mertebede küçük olması ve yine bu esnada meydana gelecek vibrasyonun da az olması arzu edilmektedir. Bu sonuçlar da ancak yemlenme sırasında kret üzerinden savaklanan suyun, yemlenme tertibatında (saptırıcıda) simetrik bir nap (veya jet) oluşturması ve yine durma esnasında da, giren havanın tüm sifon en kesitine üniform bir şekilde yayılmasının teminiyle mümkündür.

Bu esas ve kriterler, ancak bir sifonun dolu savak olarak kullanılması halinde geçerlidir. Sifonun yan savak olarak uygulanması halinde yemlenme ve durma şartlarına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir.

Yan savak halindeki bir otomatik sifonda, “yemlenme ve durma” şartlarını belirlemek amacıyla, bir otomatik model sifonu kanalın akım doğrultusuna dik konumda yan savak olarak, kanalın sırasıyla 0° (düz kısım) ve 30° ’lik, 60° ’lik, 90° ’lik kıvrımlı kısımlarına yerleştirilmiş ve değişik debilerde ve su seviye ayar kapağının değişik kademelerinde hız ve seviye deneyleri yapılmış ve bazı hususlar tespit edilmiştir (Şekil 4.9.a, 4.9.b, 4.10.a, 4.10.b).



Şekil 4.8 Yan savak sifonunun plan ve kesiti

Şekilde 4.8’de görüldüğü gibi otomatik sifon kanalın akım doğrultusuna dik yerleştirilmiştir (sifonun düşey eksen düzlemi, kanalın eksen düzlemine diktir). Kanaldaki akımın hızına bağlı olarak sifon kretinde meydana gelen savaklanma, asimetrik bir şekilde olmakta ve bunun sonucu olarak saptırıcıda da asimetrik bir nap teşkil etmektedir. Ayrıca sifonun kanal eksenine dik memba giriş ağzında debi ve hıza bağlı değişiklikler gösteren bir vorteks oluşmaktadır. Bunun sonucunda ise özellikle düşük debilerde ve ayar kapağı fazla açık olduğunda sifona bir miktar hava girmekte ve su seviyesi az miktarda düşmektedir. Bu olay yemlenme başlangıcında da gözlenmektedir.

Oluşan bu nap, sifonun yemlenmesini geciktirmektedir. Dolayısıyla deneylerde kullanılan otomatik sifonda, kanaldaki akım hızına göre değişen bu yemlenme yüksekliğinin tepe kesitine oranı $4/7$ ile $6.5/7$ arasında değerler aldığı tespit edilmiştir.

Sifon girişinden menbaya doğru oluşan vorteks ile kanaldaki su yüzeyi sifonun yemlenme durumunda bir miktar alçalmakta ve sifona hava girmektedir. Sifona giren bu hava, sifon içerisinde yayılmaktadır. Bu olay, yemlenme esnasında olduğu gibi durma esnasında da sekonder ve dolayısıyla helikoidal akımın olumsuz yönde etkilerini göstermektedir. Sonuçta sifonun giriş ağzından sifona giren bu hava en kesitte üniform olarak yayılmadığı için vibrasyon şiddeti daha da artmaktadır.

Kanaldaki su seviyesi $h = 21.8$ cm olduğunda sifonun çalışmaya başladığı gözlemlenmiştir. Tam sifonik akım ise su seviyesinin $h = 25.7$ cm olduğunda gözlemlenmiştir. $h = 21.8$ cm ile $h = 25.7$ cm arasındaki değerlerde ise sifona az miktarda hava girmektedir.

Küçük debilerde ve ayar kapağının fazla açık olduğu durumlarda sifonda durma yüksekliğinin ve süresinin arttığı gözlenmektedir. Bu ise sifondaki akımın stabilitesinin de bozulmasına neden olmaktadır. Yüksek debilerde veya su seviye ayar kapağının küçük kademelerinde ise sifonun ekseninden itibaren mansap tarafına doğru bir kabarma oluşmaktadır (Şekil 4.11).



(a1)



(a2)

Şekil 4.9.a Sifonun yemlenme başlangıcı



(b1)



(b2)

Şekil 4.9.b Sifonun yemlenmesi



(a1)



(a2)

Şekil 4.10.a Tam sifonik akım

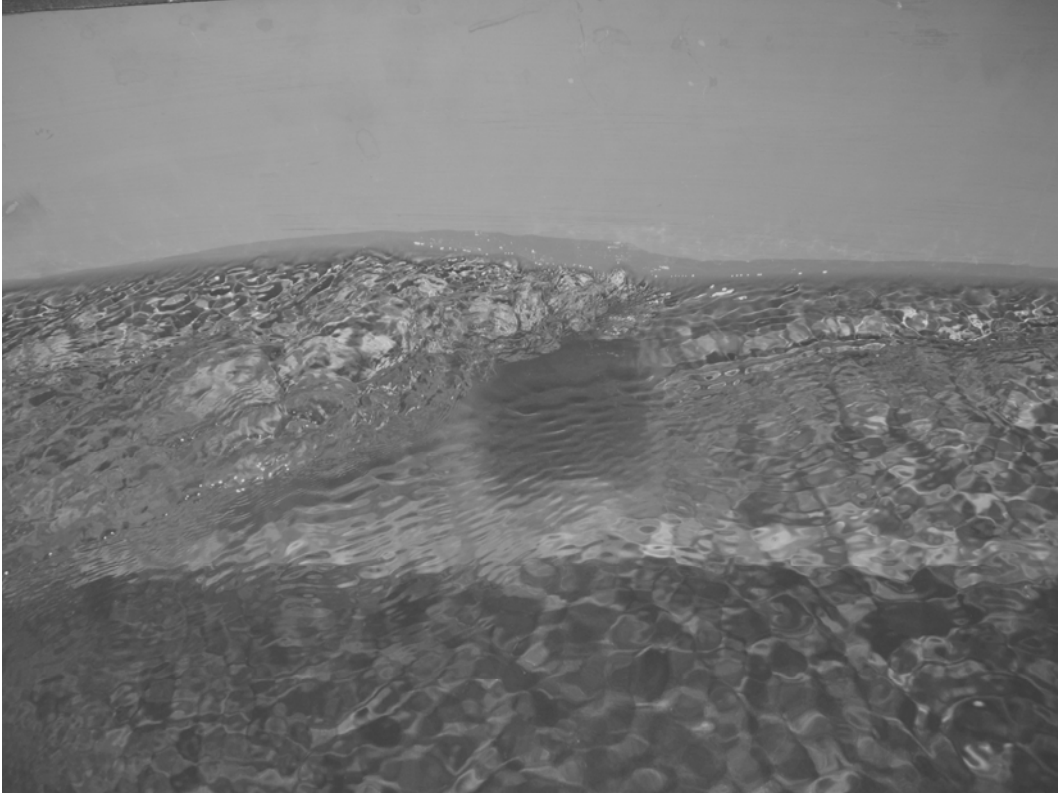


(b1)



(b2)

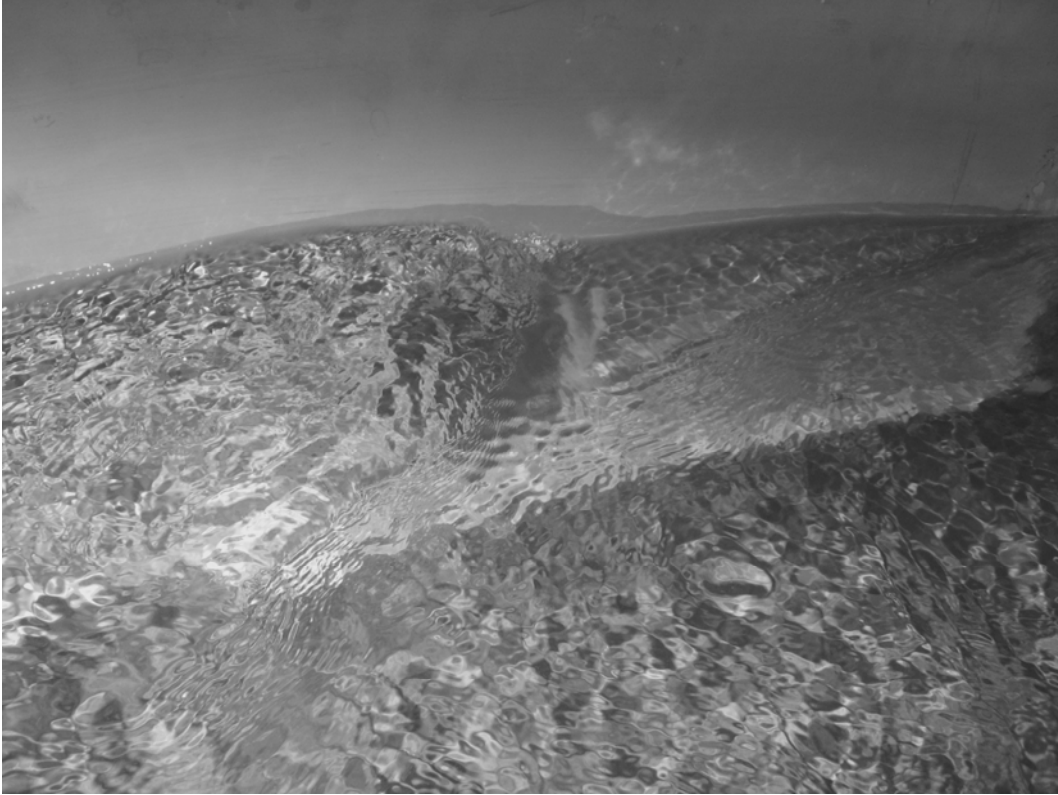
Şekil 4.10.b Tam sifonik akım



Mansap

(a)

menba



mansap

(b)

Menba

Şekil 4.11 Sifon girişinde meydana gelen yüzeysel kabarma

4.5 Deneysel Çalışmada Etkili Parametrelerin Belirlenmesi

Yan savak akımına pek çok parametre etki etmektedir. Bunları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

Tablo 4.1 Yan savak akımına etki eden parametreler

<u>Adı</u>	<u>İşareti</u>	<u>Birimi</u>	<u>Boyutu</u>
1- Kanalı karakterize eden değişkenler			
a) Ana kanal genişliği	B	m	L
b) Kıvrım eğrilik yarıçapı	r	m	L
c) Kıvrım merkez açısı	θ	--	--
d) Kanal taban eğimi	J_0	--	--
e) Kanal pürüzlülüğü	n	--	--
2- Akışkanın karakterize eden değişkenler			
a) Akışkanın özgül kütlesi	ρ	kg/m ³	ML ³
b) Akışkanın dinamik viskozitesi	μ	kg/m.s	ML ⁻¹ T ⁻¹
c) Yerçekimi ivmesi	g	m/s ²	LT ⁻²
d) Yüzey gerilmesi	σ	N/m ²	KL ⁻²
3- Akımı karakterize eden değişkenler			
a) Akım derinliği	h	m	L
b) Yan savak boyunca değişen ortalama akım hızı	V	m/s	LT ⁻¹
c) Ana kanaldaki akımın yan savağa sapma açısı	α	--	--
4- Yan savağı karakterize eden değişkenler			
a) Sifon savak genişliği	b	m	L
b) Sifon savak yüksekliği	d	m	L
c) Sifonun tepe dirseği açısı	R_0	--	--

Boyut Analizi

Yan savak debi katsayısı C_d aşağıdaki parametrelerin fonksiyonudur.

$$f(C_d, B, r, \theta, J_0, n, \rho, \mu, g, \sigma, h, V, \alpha, R_0, b, d) = 0 \quad (4.2)$$

Elemanter bir akım parçacığı için J_0, n, σ, μ etkileri çok küçük olduğundan, olaya etkileri ihmal edilebilir[43]. Dolayısıyla;

$$f(C_d, B, r, \theta, \rho, g, h, V, \alpha, R_0, b, d) = 0 \quad (4.3)$$

şeklinde yazılabilir.

Deneysel çalışmada, olaya etkili değişkenlerin sayısını azaltmak ve deneysel sonuçların bağıntılarını ortaya koymak için g, h tekrarlanan değişkenler olarak seçilerek boyut analizi uygulayalım.

Tablo 4.2 Yan savak katsayısına etki eden parametreler için boyut analizi

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀	K ₁₁
	B	V	b	d	α	r	θ	C _d	g	h	R ₀
L	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	-1	0	0	0	0	0	0	-2	0	0

Bu olayda M tek bir parametrede görünmektedir. Dolayısıyla akım kinematiktir. Tekrarlanan büyüklük olarak g ve h alınmıştır.

Yukarıdaki tablolardan aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$\Pi_1 = g h B$$

$$\Pi_2 = g h V$$

$$\Pi_3 = g h b$$

$$\Pi_4 = g h d$$

$$\Pi_5 = g h \alpha$$

$$\Pi_6 = g h r$$

$$\Pi_7 = g h \theta$$

$$\Pi_8 = g h C_d$$

$$\Pi_9 = g h R_0$$

Π_1 için:

$$\Pi_1 = (L T^{-2})^{x_1} (L)^{y_1} (L) = L^0 T^0 M^0$$

L için :

$$x_1 + y_1 + 1 = 0$$

$$x_1 + y_1 = -1$$

T için:

$$-2x_1 = 0$$

$$x_1 = 0, y_1 = -1 \text{ ise,}$$

$\Pi_1 = g^x h^y B = g^0 h^{-1} B = B/h$ bağıntısı bulunur. Aynı şekilde diğerleri içinde yapılırsa,

$$\Pi_1 = \frac{B}{h}, \Pi_2 = Fr, \Pi_3 = \frac{b}{h}, \Pi_4 = \frac{d}{h}, \Pi_5 = \alpha, \Pi_6 = \frac{r}{h}, \Pi_7 = \theta, \Pi_8 = C_d, \Pi_9 = R_0 \text{ bulunur.}$$

Bu boyutsuz büyüklüklerin daha yararlı olabilmesi için, kendi aralarında bazı işlemler yapılırsa;

$$\frac{\Pi_3}{\Pi_1} = \frac{b}{B} \text{ ve } \frac{\Pi_3}{\Pi_6} = \frac{b}{r} \text{ boyutsuz sayıları elde edilir.}$$

O halde, bu boyutsuz büyüklükler arasında;

$$C_d = f\left(Fr, \frac{b}{B}, \frac{b}{r}, \frac{d}{h}, \alpha, \theta, R_0\right) \text{ elde edilir.}$$

$$\frac{b}{B} = \text{sabit ve } R_0 = \text{sabit olduğu için,}$$

$$C_d = f\left(Fr, \frac{b}{r}, \frac{d}{h}, \theta\right) \quad (4.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada Fr, yan savak başlangıcında kanal ekseninde ölçülen su derinliğine göre bulunan Froude sayısıdır.

Ana kanaldaki salınımlar ve mevcut aletlerin yetersizliği nedeniyle C_d yan savak debi katsayısına etki eden Froude sayısı olarak, yan savak menbaında kanal eksenindeki h su yüksekliğine göre bulunan Froude sayısı dikkate alınmıştır. Gerçekte ise, yan savak boyunca yanal akım sebebiyle Froude sayısı değişmektedir[21]. Bu nedenle, yan savak boyunca değişen Froude sayısının etki ettiği α sapma açısının olaya etkisi dikkate alınmamıştır.

4.6 Kanaldaki Akımın Sifonun Debi Katsayısına Olan Etkisinin Araştırılması

Kanaldaki akım şartları yan savak sifonlarında debi katsayısına etki etmektedir. Bu tip kanallardaki akım şartları ile debi katsayısı arasındaki bağıntıyı tam olarak belirleyen bir matematiksel ifade vermek imkansızdır[1].

Ortalama hız değerlerinden hareketle, sifon girişinin menba tarafında (A-A) kanal en kesiti (akıma dik kesit) ile sifonun çıkış en kesiti ile sifonun çıkış kesiti arasında Bernoulli denklemi yazılırsa;

$$\frac{V_0^2}{2.g} + h + \frac{p_0.A}{\gamma} = \frac{V_E^2}{2.g} + \frac{P_0.E}{\gamma} + \sum_A^E h_k \quad (4.5)$$

elde edilir. Burada, V_0 , kanalın A-A kesitindeki akımın ortalama hızı; h , A-A kesitindeki su seviyesiyle sifon çıkış kesiti arasındaki yükseklik; V_E , sifon çıkış kesitindeki akımın ortalama hızı ve P_0 'da atmosfer basıncıdır.

$P_{0A} \cong P_{0E}$ olduğu dikkate alınırsa sifonun gerçek debisi;

$$V_E = \sqrt{2gh + V_0^2 - 2g \sum_A^E h_k} \quad (4.6)$$

ve F , sifonun çıkış kesitinin alanı olmak üzere

$$q_g = F \sqrt{2gh + V_0^2 - 2g \sum_A^E h_k} \quad (4.7)$$

olur. Sifonun teorik debisi ise;

$$\sum_A^E h_k = 0 \text{ alınarak,}$$

$$q_t = F \sqrt{2gh + V_0^2} \quad (4.8)$$

olur. Bu ifadelerden hareketle sifonun debi katsayısı;

$$\mu = \frac{q_g}{q_t} = \sqrt{1 - \frac{2g \sum_A^E h_k}{2gh + V_0^2}}$$

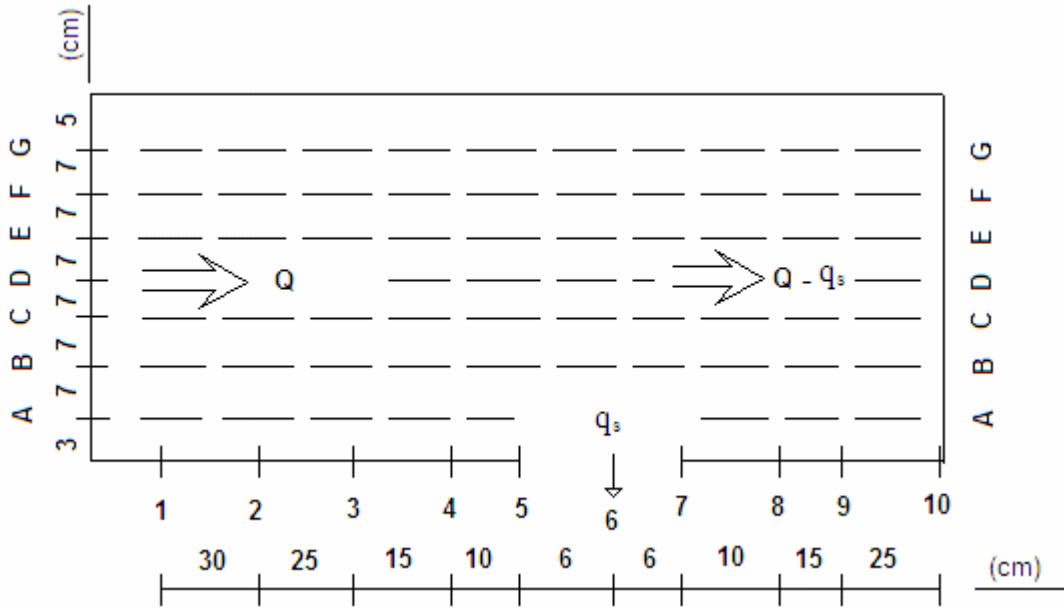
$$\mu = \sqrt{1 - \frac{\sum_A^E h_k}{h + \frac{V_0^2}{2g}}} \quad (4.9)$$

şeklinde yazılır.

Bu eşitlikte görüldüğü gibi debi katsayısının değişimi, yük kayıplarını ifade eden

$\sum h_k$ ile ters, $(h + \frac{V_0^2}{2g})$ ile doğru orantılıdır[1].

4.7 Yan Savak Boyunca Hız Dağılımları Profilleri



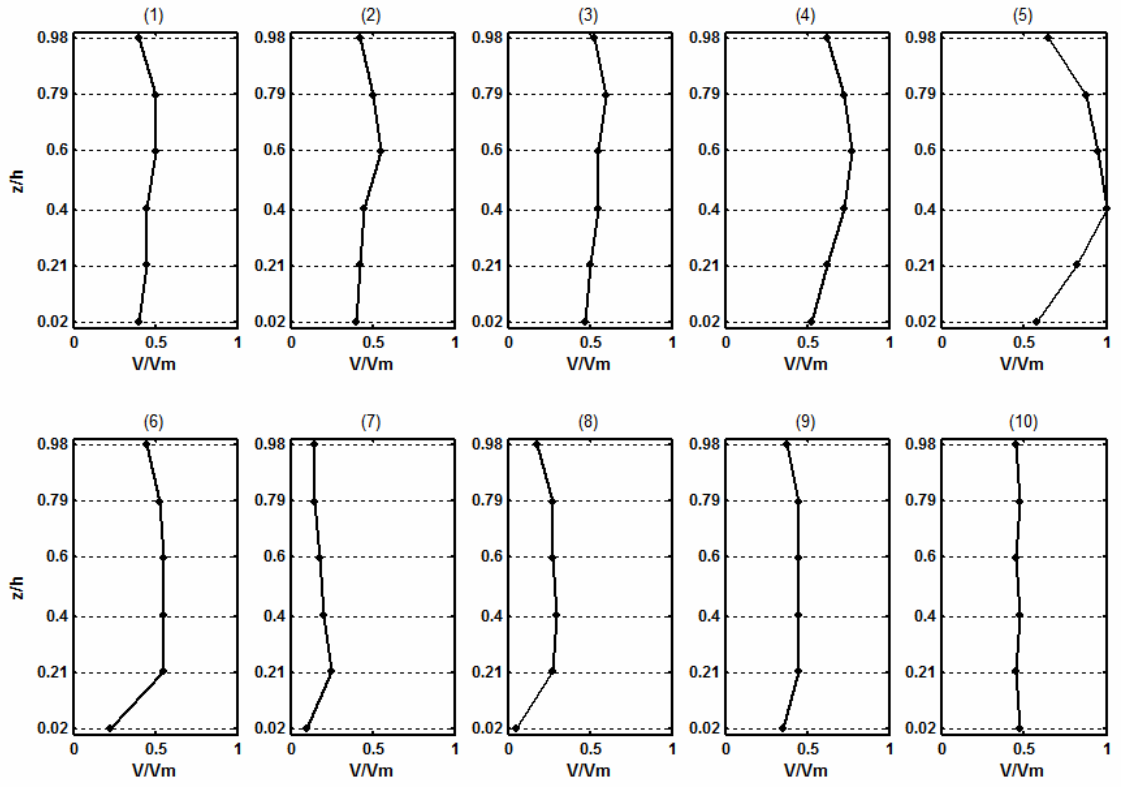
Şekil 4.12 Sifon yan savak halinde, kanaldaki hız dağılımları

Hız dağılımlarının belirlenmesinde Şekil 4.12’de görüldüğü gibi ölçümler her savak için 7 değişik eksen (A-A, B-B, C-C, D-D, E-E, F-F ve G-G) ve her eksen üzerinde 10 değişik noktada yapılmıştır (şekillerde her eksen için 1’den 10’a kadar 10 değişik grafik gösterilmiştir). Otomatik sifon kanal tabanına yerleştirildikten sonra ölçümler Micromuline (0.02 - 5 m/s) ile yapılmıştır. Micromulineler hareketli seviye ve hız ölçüm arabası üzerine monte edilerek akım doğrultusunda ölçümler yapılmıştır. Ölçümler kanal tabanından (0.5 cm’den) su yüzeyine doğru 5 cm aralıklarla yapılmıştır. İlk eksen (A-A eksen) savaktan 3 cm uzaklıktadır.

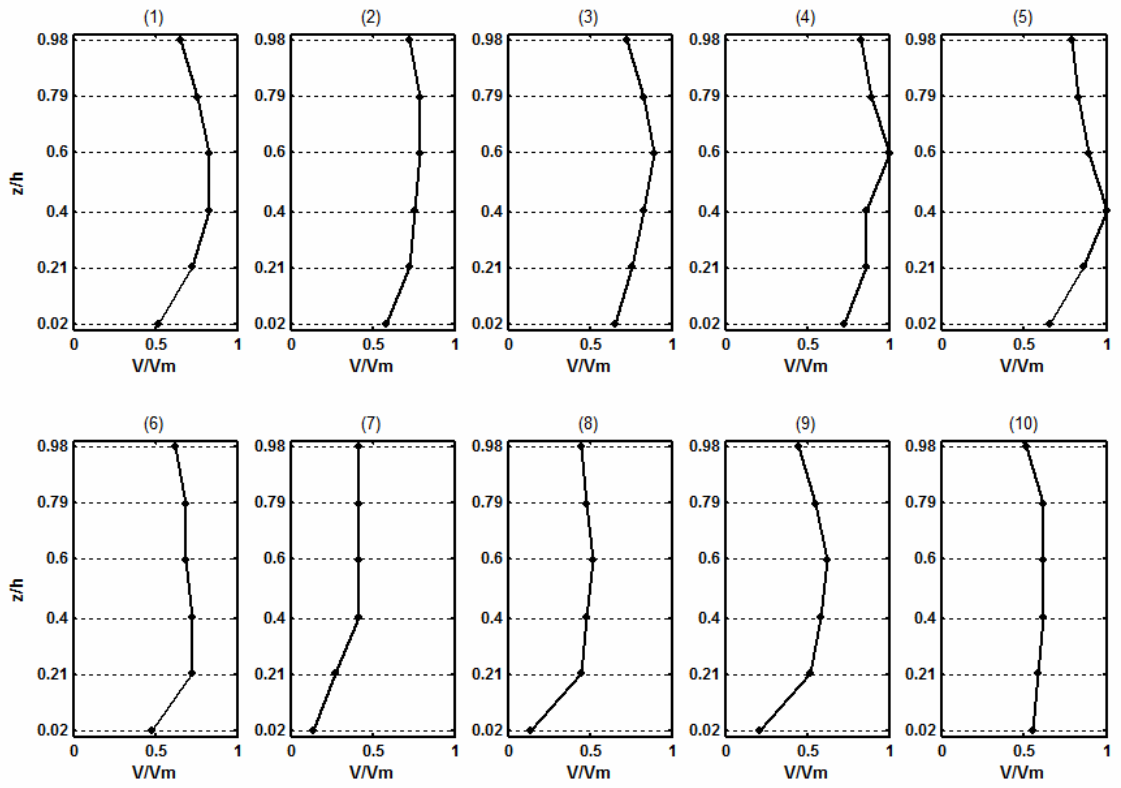
Ölçümler iki farklı debide yani 30 L/s ve 100 L/s’lik debilerde yapılmıştır. 30 L/s’lik debide düşük hızlar ölçülmüş, 100 L/s’lik debide ise ayar kapağı açılarak yüksek hızlar ölçülmüştür.

Ölçümler önce kıvrımlı kısımda yani 30°, 60° ve 90°’lik savaklarda daha sonra da 0°’de yani düz kısımda yapılmıştır. Çıkan sonuçlar boyutsuz olarak aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Daha sonra bunların yorumları yapılmıştır.

Şekillerde: z değeri; kanal tabanından itibaren ölçüm yapılan su yüksekliklerini, h değeri; toplam su yüksekliğini, v değeri; ölçüm yapılan noktadaki hızı, v_m değeri ise, ölçüm yapılan noktadaki maksimum hız değerini göstermektedir.

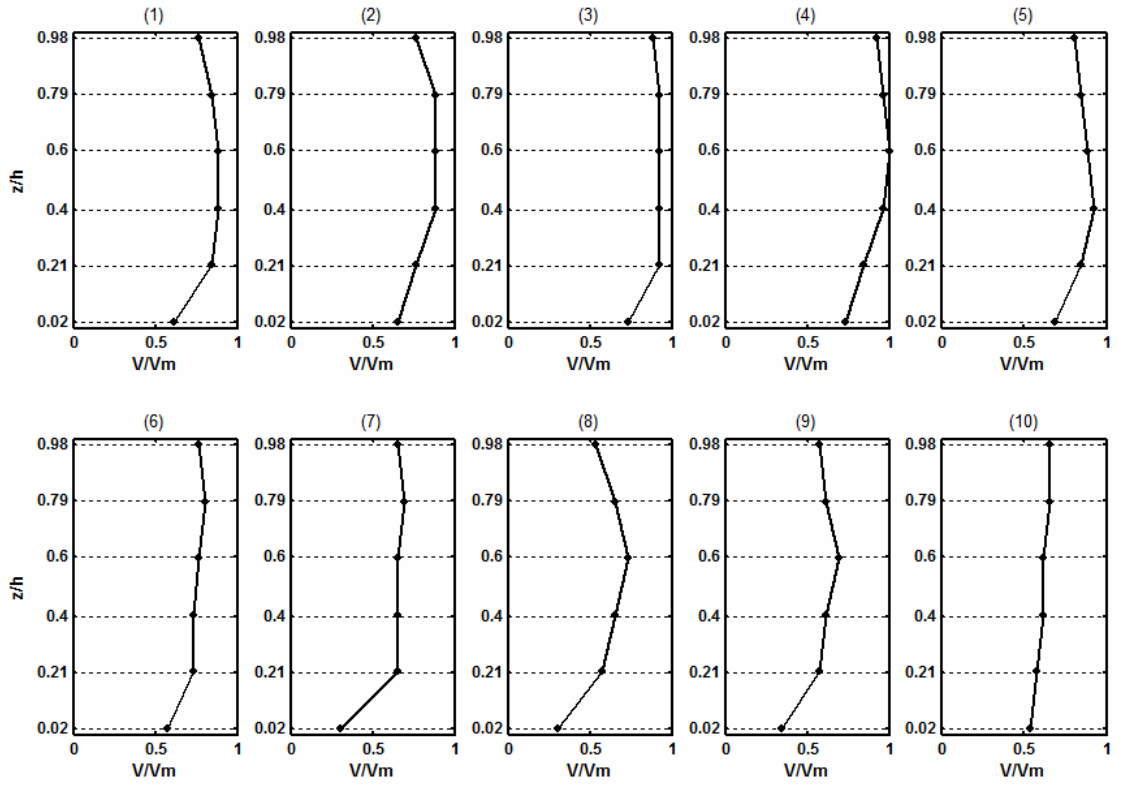


30° , $Q=30$ L/s
A-A eksenı

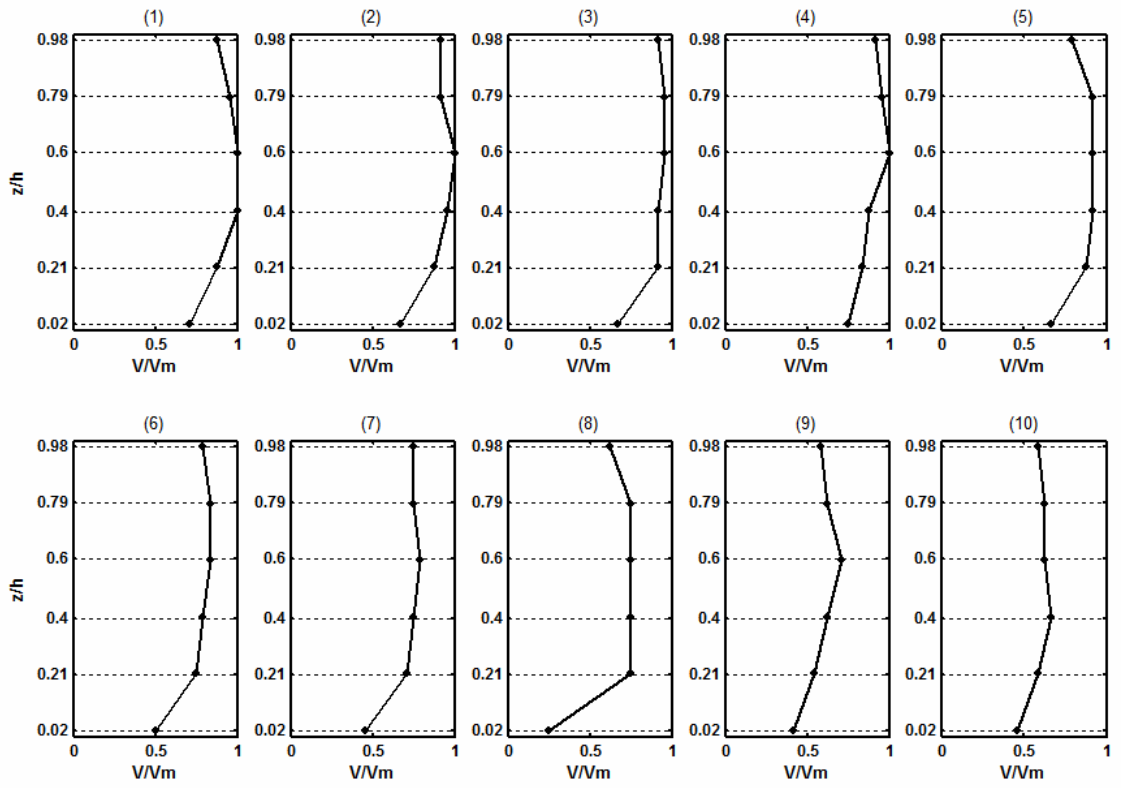


30° , $Q=30$ L/s
B-B eksenı

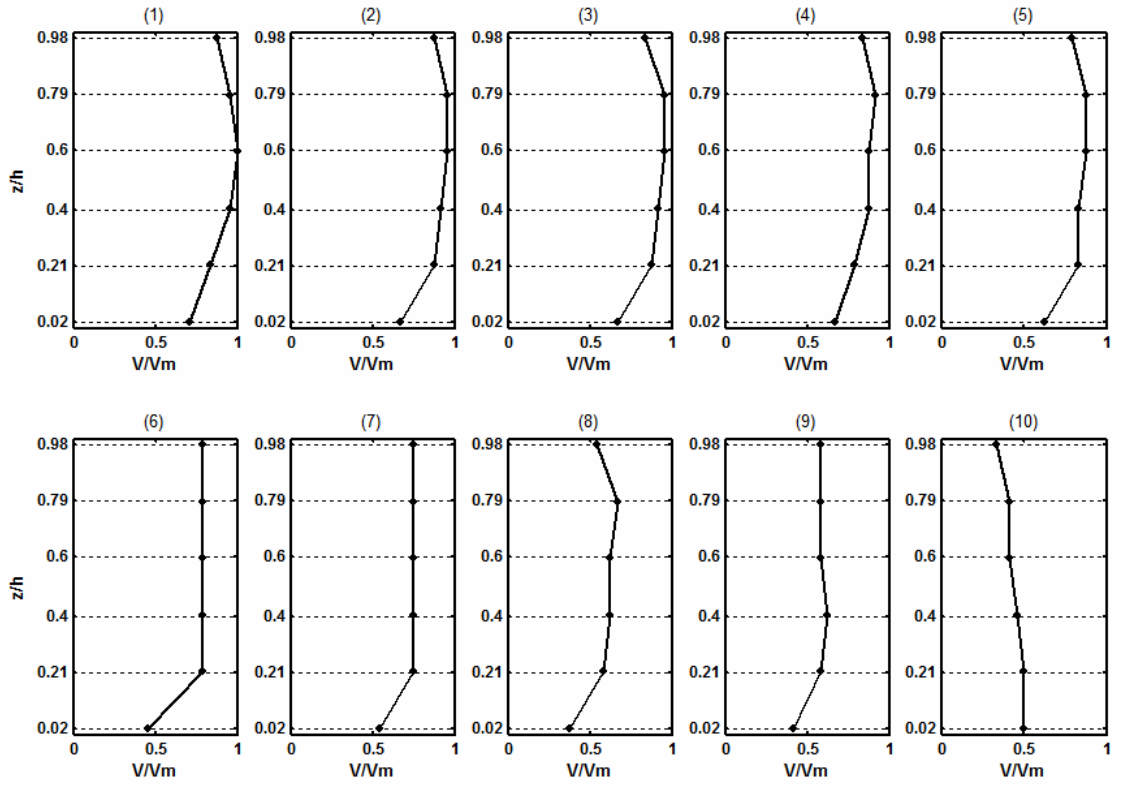
Şekil 4.13 $\alpha = 30^\circ$ Yan savaktan $Q=30$ L/s'lık debinin aktif savaklanması halinde teğetsel hız dağılımları



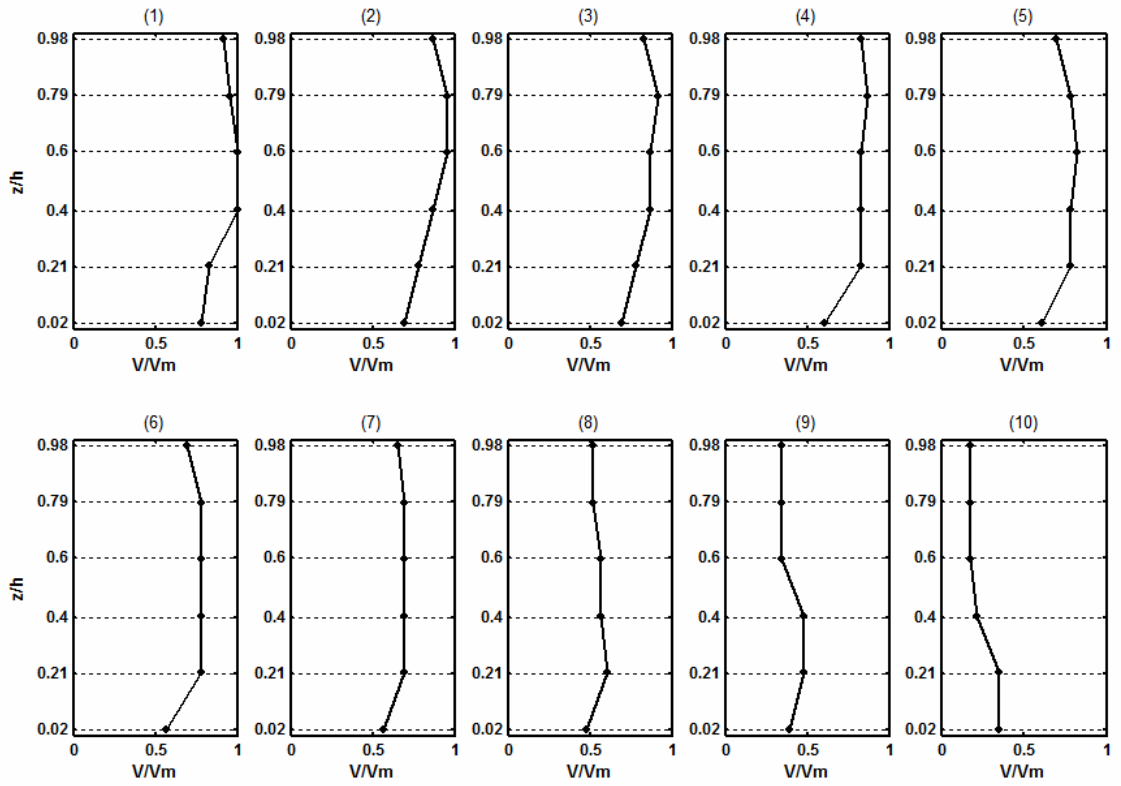
30° , $Q=30$ L/s
C-C eksenini



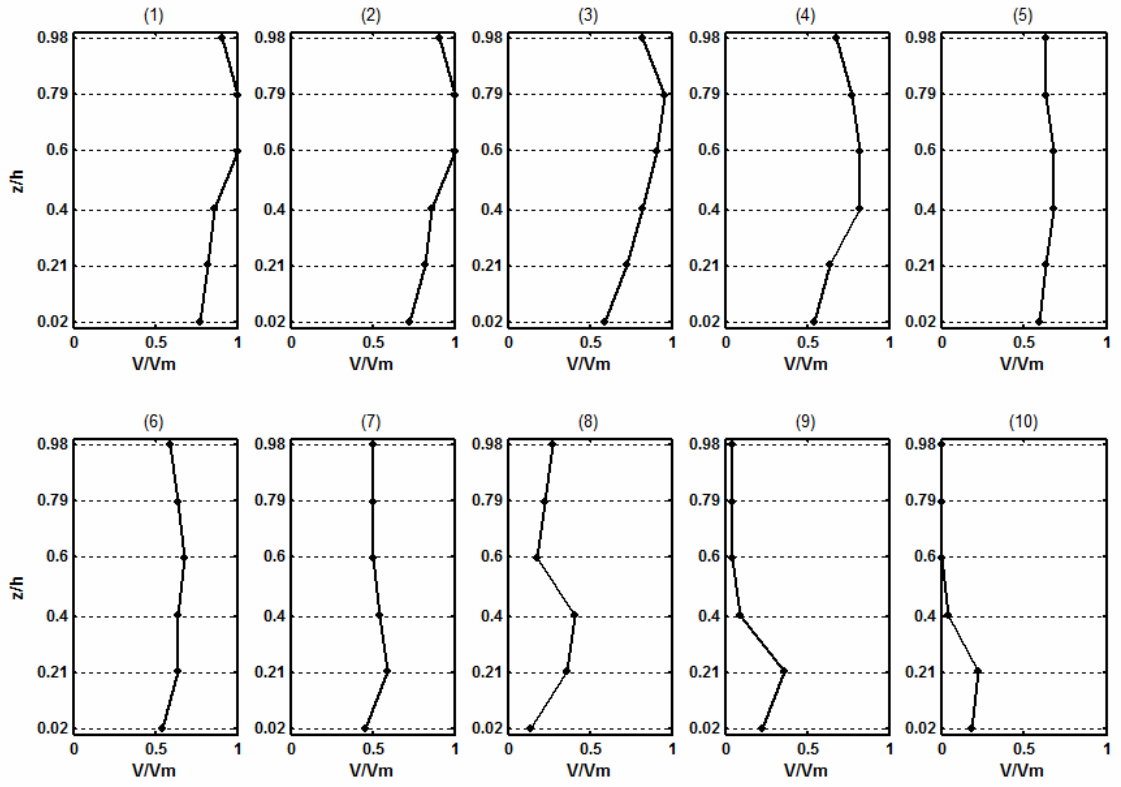
30° , $Q=30$ L/s
D-D eksenini
Şekil 4.13 (devam).



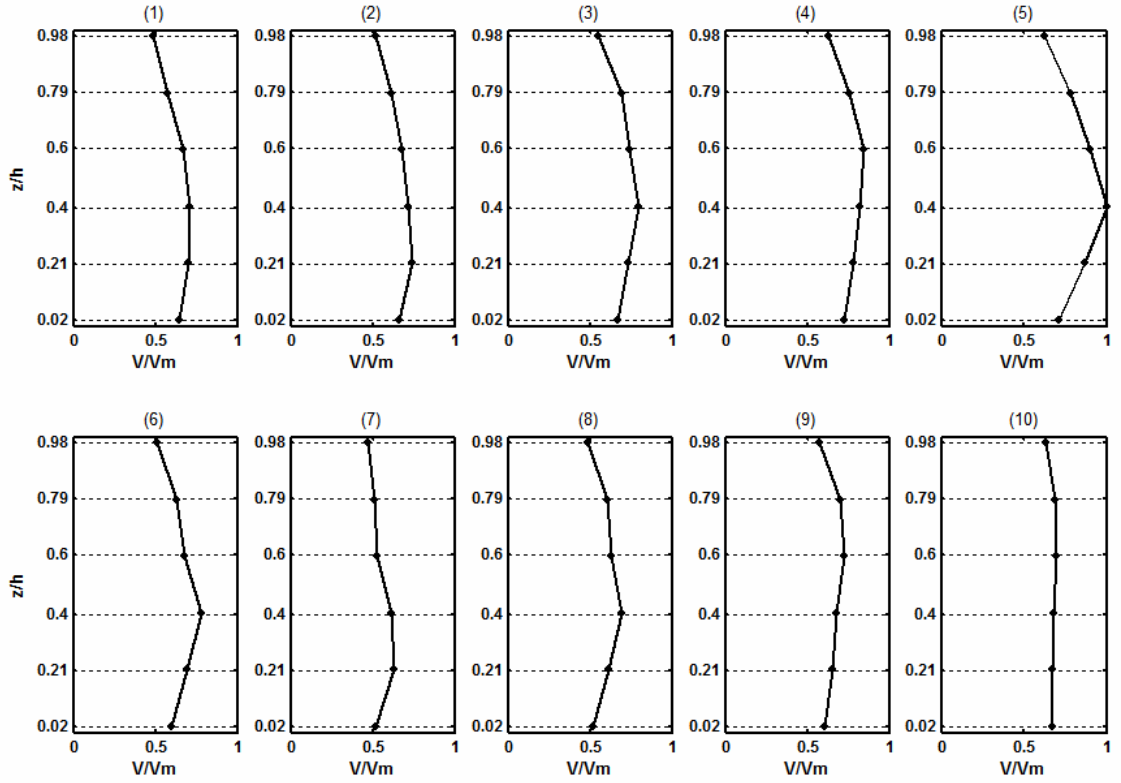
30° , $Q=30$ L/s
E-E eksenini



30° , $Q=30$ L/s
F-F eksenini
Şekil 4.13 (devam).

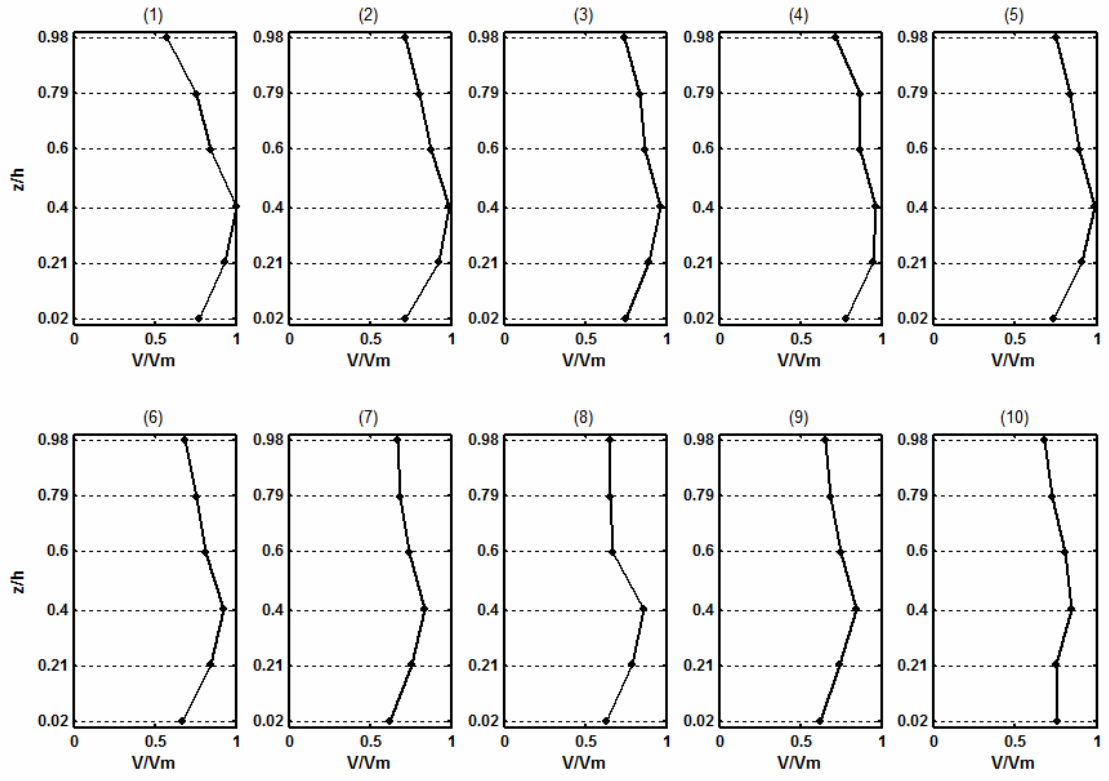


30°, Q=30 L/s
G-G eksenı
Şekil 4.13 (devam).

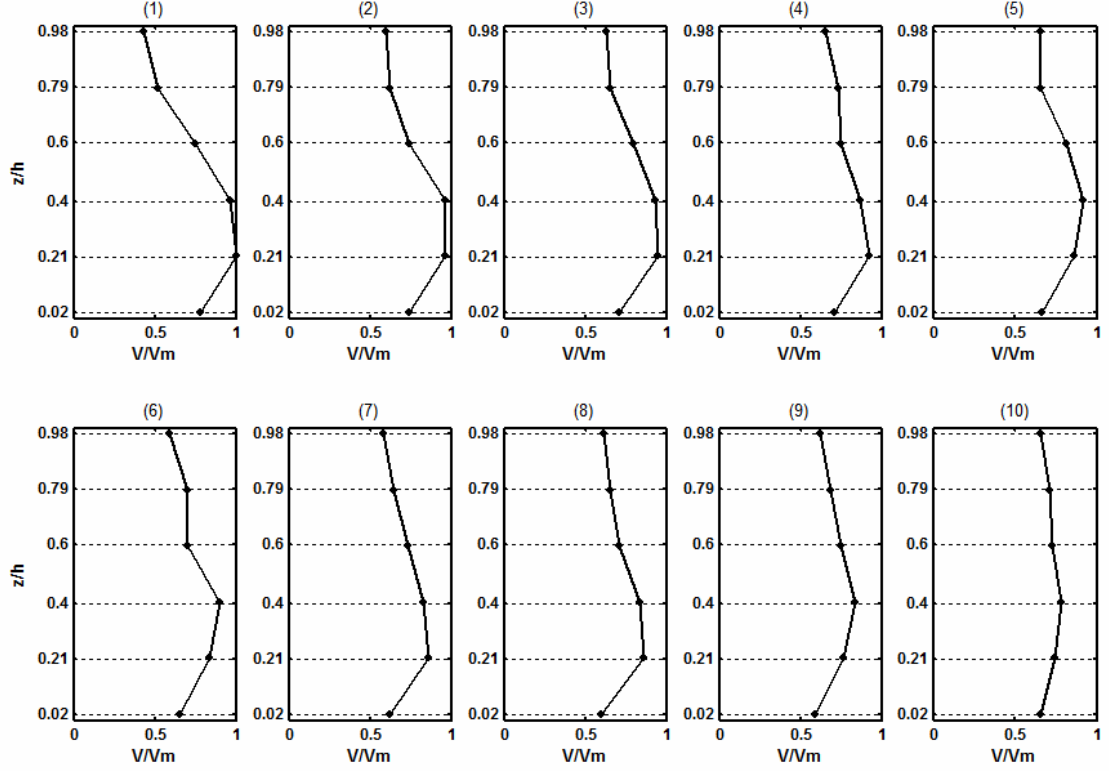


30°, Q=100 L/s
A-A eksenı

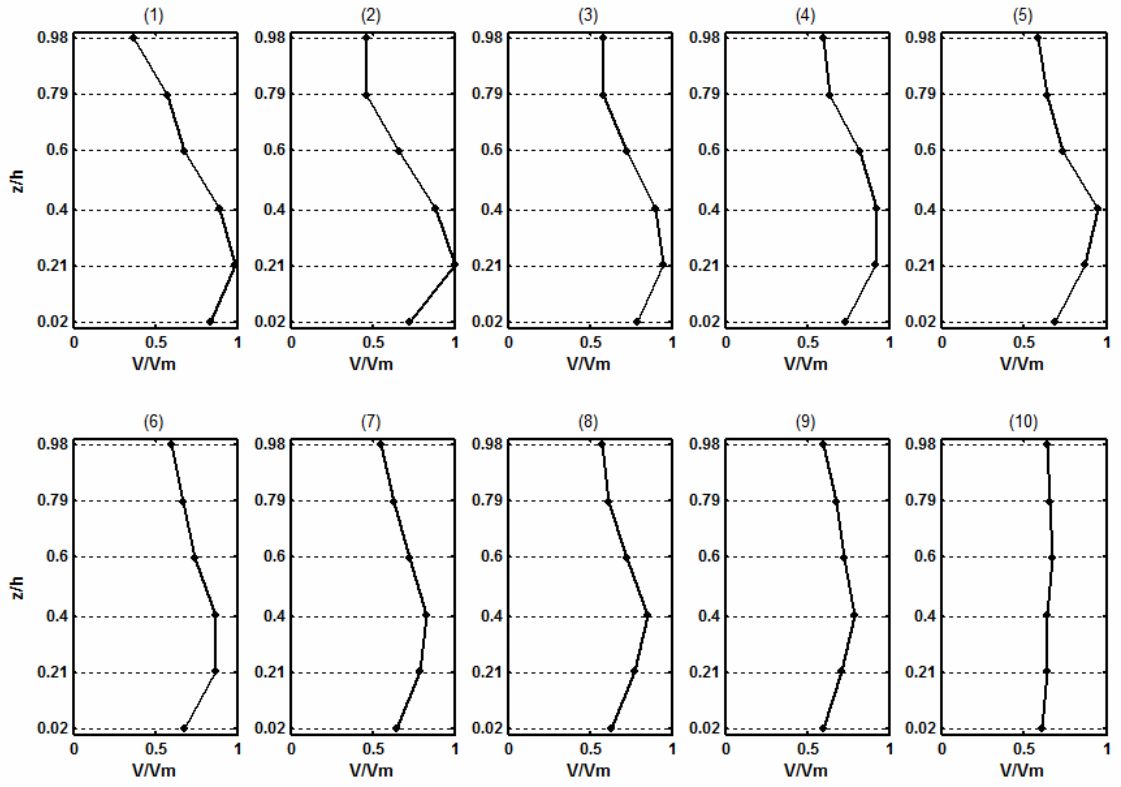
Şekil 4.14 $\alpha = 30^\circ$ Yan savaktan Q=100L/s'lık debinin aktif savaklanması halinde teğetsel hız dağılımları



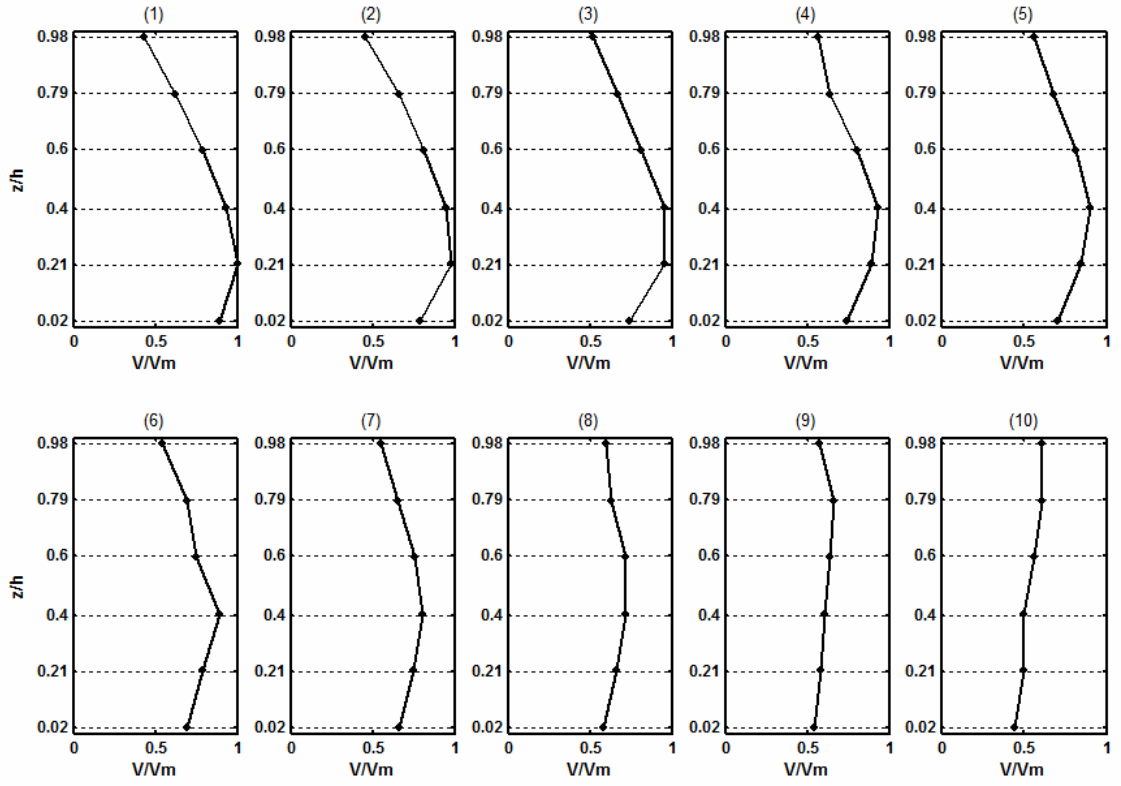
30° , $Q=100$ L/s
B-B eksenı



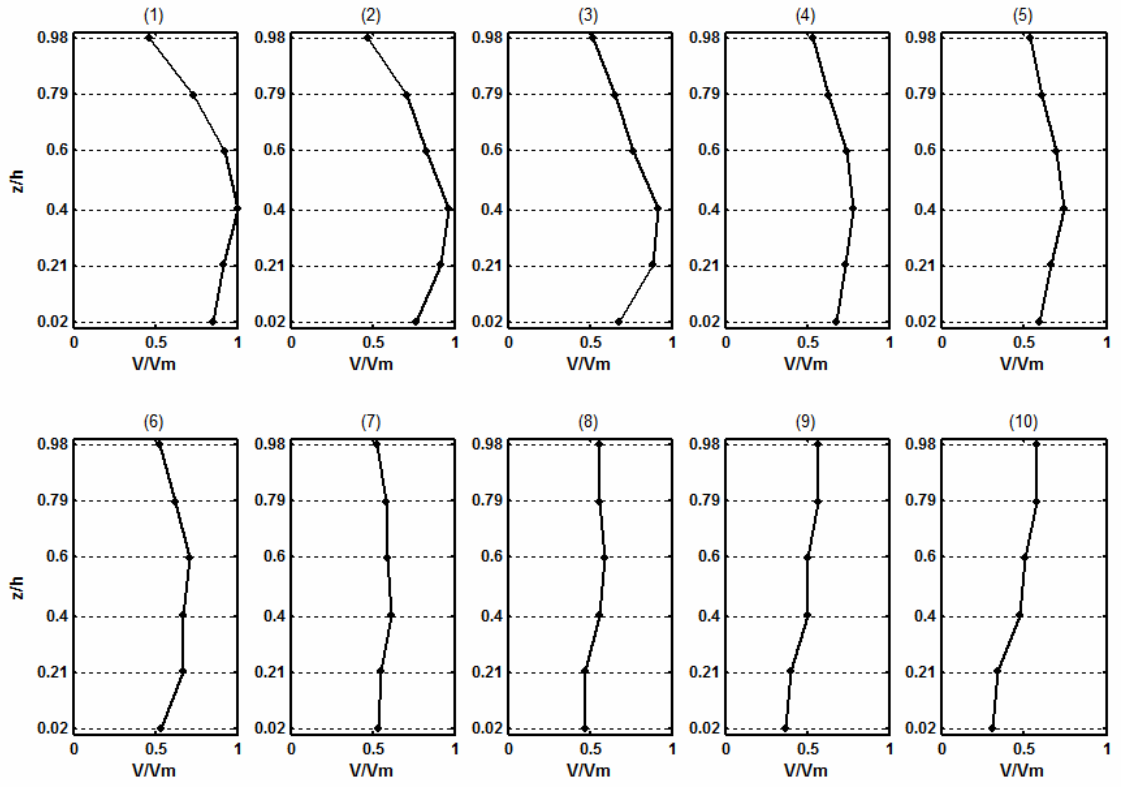
30° , $Q=100$ L/s
C-C eksenı
Şekil 4.14 (devam).



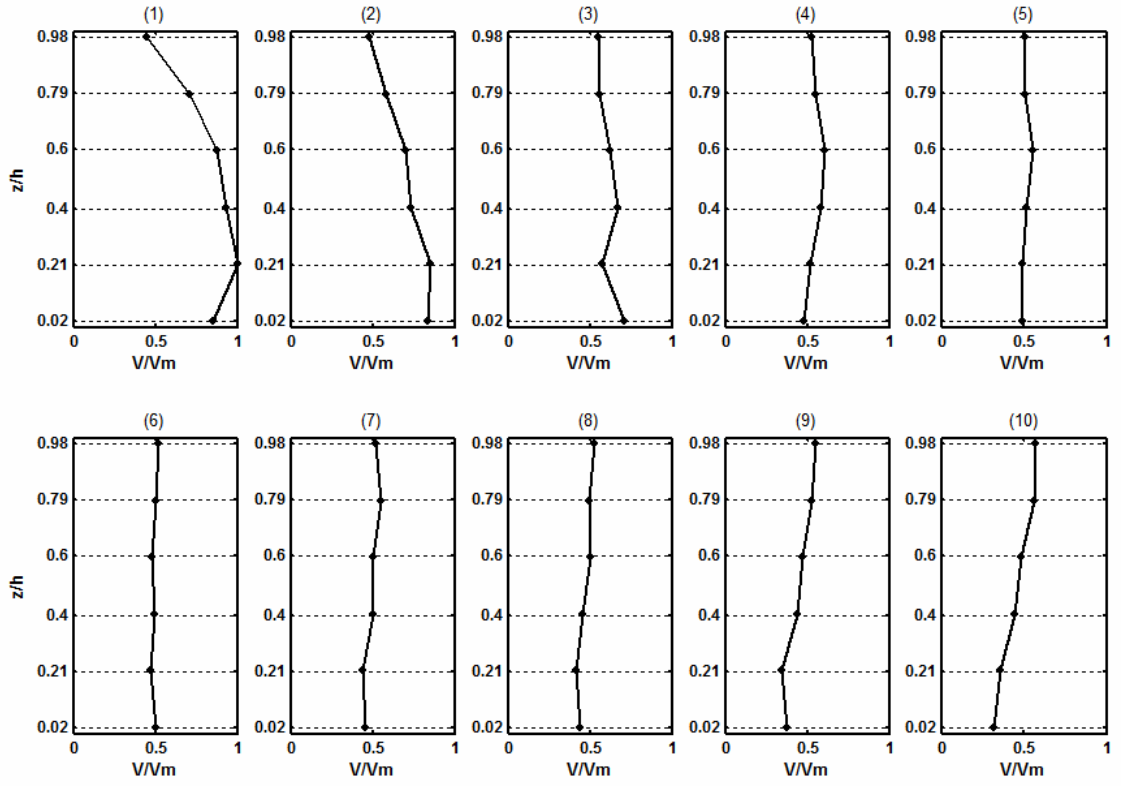
30° , $Q=100$ L/s
D-D eksenı



30° , $Q=100$ L/s
E-E eksenı
Şekil 4.14 (devam).



30° , $Q=100$ L/s
F-F eksenini



30° , $Q=100$ L/s
G-G eksenini
Şekil 4.14 (devam).

Burada sadece 30^0 için boyutsuz teğetsel hız dağılımları verilmiştir. 0^0 , 60^0 ve 90^0 'nin $Q=30$ L/s ve $Q=100$ L/s'lik boyutsuz teğetsel hız dağılımları ekler bölümünde verilmiştir.

Yapılan bu ölçümler neticesinde;

Savaklarda ölçülen hız dağılımlarında genelde en büyük hızlar A-A ekseninde yani sifon savağa en yakın kesitte oluşmaktadır. Burada, A-A eksenini sifon savağa yakınlığından dolayı sifonun ana kanal suyunu hızlı bir şekilde çekmesi ile çok fazla etkilenmektedir. En küçük hızlar ise G-G ekseninde yani sifon savağa en uzak ekseninde oluşmuştur. Burada ise, sifon savağın ana kanala etkisi, G-G ekseninin sifon savağa en uzak eksen olmasından dolayı az etkilenmektedir. Sadece düz kanalda $Q=100$ L/s ile yapılan ölçümlerde maksimum hızlar B-B, C-C ve D-D eksenlerinde oluşmuştur. Burada ise, debinin ve hızın çok fazla olması sebebiyle sifon savağın ana kanala etkisi azalmakta ve en büyük hızlar kanalın orta eksenleri çevresinde oluşmaktadır.

$\alpha = 30^0$ 'lik savakta $Q=30$ L/s'lik debi ile düşük hızlarda yapılan hız ölçümlerinde, A-A eksenini üzerinde en büyük hızlar 5 nolu noktada yani sifon savağın girişinde ölçülmüştür. G-G ekseninin 9 ve 10 noktalarında ise ölü noktalar oluşmuştur yani hız sıfır ölçülmüştür. Genelde hızlar kanal tabanında düşük, orta kısımlarda yüksek ve yüzeye doğru yeniden düşük değerlerdedir. $Q=100$ L/s'lik debi ile yüksek hızlarda yapılan hız ölçümlerinde ise, yine A-A ekseninin 5 nolu noktasında en büyük hız ölçülmüştür. Burada da hızların genelde kanal tabanında düşük, sonra orta kısımlarda yüksek ve yüzeye doğru yeniden düşük değerler aldığı ölçülmesine rağmen F-F ve G-G eksenlerinin 8, 9 ve 10 noktalarında tabandan yüzeye doğru hızların arttığı ölçülmüştür.

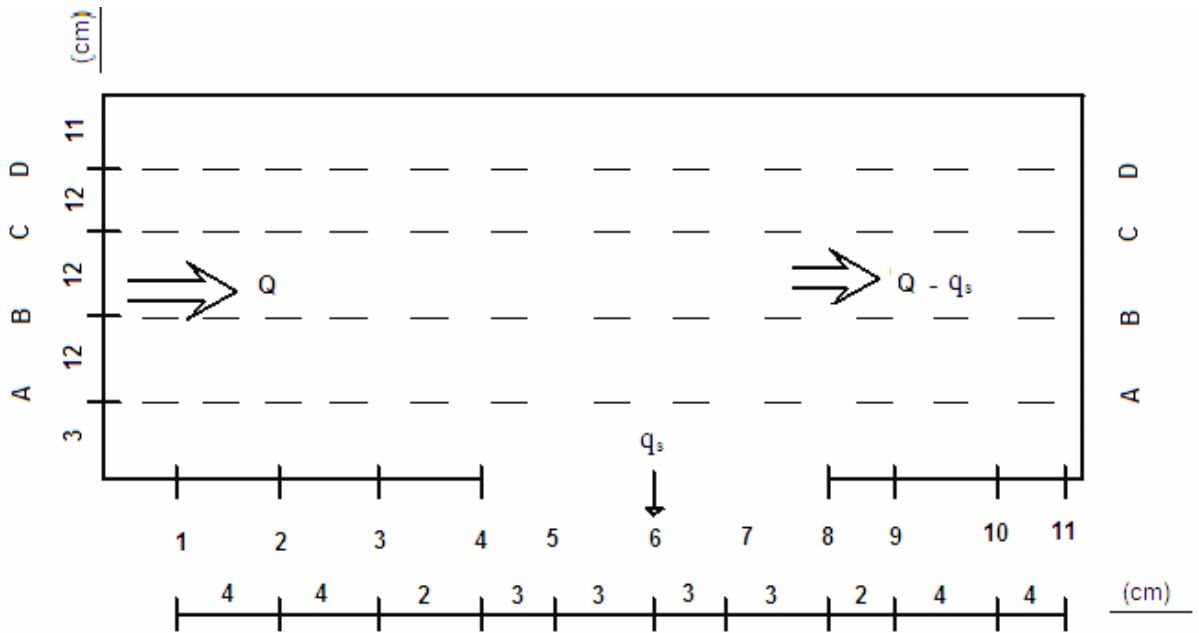
$\alpha = 60^0$ 'lik savakta $Q=30$ L/s'lik debi ile düşük hızlarda yapılan hız ölçümlerinde, A-A eksenini üzerinde en büyük hızlar 5 ve 6 nolu noktalarda sifon savağın girişi ile orta kısımları arasında ölçülmüştür. G-G ekseninin 6, 7, 8, 9 ve 10 noktalarında ise hızlar yüzeye doğru çok azalmıştır. $Q=100$ L/s'lik debi ile yüksek hızlarda yapılan hız ölçümlerinde ise, A-A ekseninin 5 nolu noktasında en büyük hızlar ölçülmüştür. C-C, D-D, E-E, F-F ve G-G eksenlerinde, 5 ile 10 nolu noktalar arasında, kanaldaki su seviyesinin orta kısımlarında (15.5 cm'sinde) minimum hızlar ölçülmüştür. Burada hızlar kanal tabanında yüksek, sonra tabandan 15.5 cm'e kadarki kısımda düşmekte ve yüzeye doğru yeniden yükselmektedir.

$\alpha = 90^0$ 'lik savakta $Q=30$ L/s'lik debi ile düşük hızlarda yapılan hız ölçümlerinde, A-A eksenini üzerinde en büyük hızlar 5 nolu noktada sifon savağın girişinde ölçülmüştür. G-G ekseninin 9 ve 10 noktalarında ise ölü noktalar oluşmaktadır. Genelde hızlar kanal tabanında düşük, sonra orta kısımlarda yüksek ve yüzeye doğru yeniden düşük değerlerdedir. $Q=100$ L/s 'lik debi ile yüksek hızlarda yapılan hız ölçümlerinde ise, A-A ekseninin 5 nolu noktasında en büyük hızlar ölçülmüştür. Burada da $\alpha = 60^0$ 'lik savaktaki kadar belirgin olmasa da bazı

noktalarda hızlar tabanda yüksek, sonra tabandan 15.5 cm'e kadarki kısımda düşmekte ve yüzeye doğru yeniden yükselmektedir.

$\alpha = 0^\circ$ 'lik savakta $Q=30$ L/s'lik debi ile düşük hızlarda yapılan hız ölçümlerinde, A-A eksenini üzerinde en büyük hızlar 5 nolu noktada sifon savağın girişinde ölçülmüştür. Bu savakta kıvrımlı savaklardan farklı olarak yüzeyde hızların daha azaldığı ve B-B, C-C ve D-D eksenlerinin 8 ve 9 noktalarında tabanda hızın çok küçük değerler aldığı ölçülmüştür. G-G ekseninin 9 ve 10 noktalarında ise hızlar çok azalmıştır. $Q=100$ L/s'lik debi ile yüksek hızlarda yapılan hız ölçümlerinde ise en büyük hızlar, kıvrımlı savaklardan farklı olarak B-B, C-C ve D-D eksenlerinin 2 nolu noktasında ölçülmüştür. Burada da hızlar, kanal tabanında düşük, orta kısımlarda yüksek ve yüzeye doğru yeniden düşük değerlerdedir. Bu savakta kıvrımlı savaklardan farklı olarak, hızlar yüzeye doğru belirgin bir şekilde azalmakta ve minimum değerler almaktadır.

4.8 Yan Savak Boyunca Su Yüzü Profilleri



Şekil 4.15 Sifon yan savak halinde, kanaldaki su yüzü profilleri

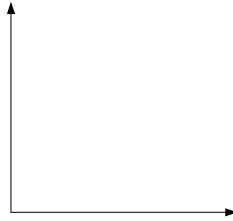
Su yüzü profillerinin belirlenmesinde şekil 4.15'de görüldüğü gibi ölçümler her savak için 4 değişik eksen (A-A, B-B, C-C ve D-D) ve her eksen üzerinde 11 noktada yapılmıştır. Seviye ölçümleri savaktan 3 cm uzaklıktan başlamıştır. Bu ölçümler 0.01 mm hassasiyetli elektronik limnimetrelerle yapılmıştır. Limnimetreler hareketli seviye ve hız ölçüm arabası üzerine monte edilerek yapılmıştır. Seviye ölçümlerinde bazı açılarda ve bazı debilerde

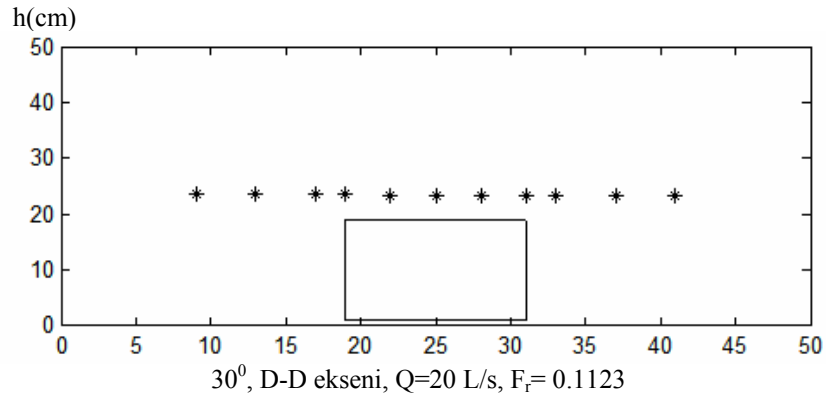
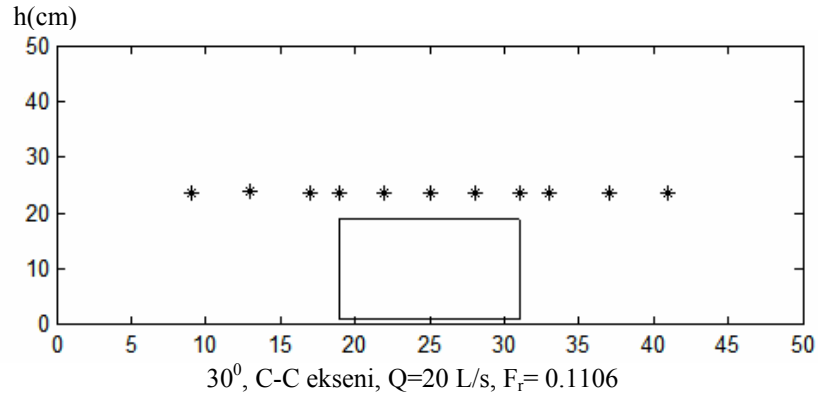
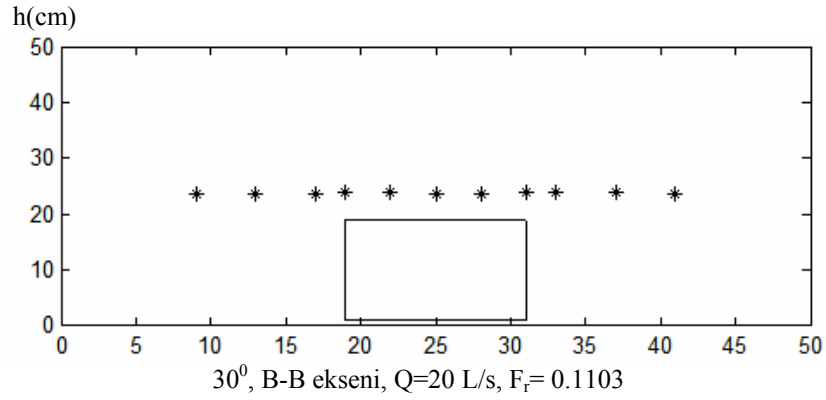
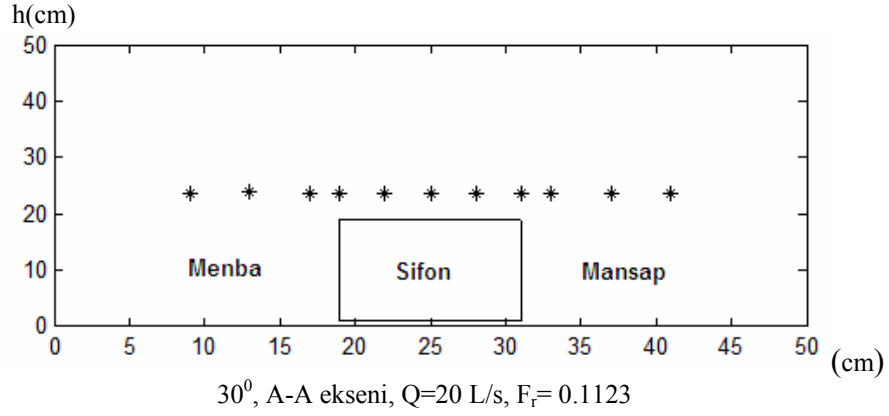
dalgalanmalar oluşmuştur. Bu dalgalanmaları önlemek amacıyla dalga kırıcılar kullanarak ölçümlerin daha rahat yapılması sağlanmıştır.

Ölçümler önce kıvrımlı kısımda yani 30^0 , 60^0 ve 90^0 'lik savaklarda daha sonra da 0^0 'de yani düz kısımda yapılmıştır. Bu ölçümlerde su seviye ayar kapağı tüm savaklarda 20 L/s'lik debilerde kapalı iken (Şekil 4.16, 4.17, 4.18, 4.19), debi arttıkça ayar kapağı kademe kademe açılarak ölçümler yapılmıştır. Yani 25 L/s'de önce su seviye ayar kapağı 1 kademe (yaklaşık 3 cm) açılarak ölçümler yapılmıştır. Daha sonra su seviye ayar kapağı 2 kademe açılarak (su seviyesi düşürülerek) seviye ölçümleri yapılmıştır. Debi arttıkça (kanaldaki su seviyesi yükseldikçe) su seviye ayar kapağı kademeli olarak açılarak, seviye ölçümlerine devam edilmiştir. Seviye ölçümlerinde çıkan su yüzü profilleri aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.16 - 4.19 ile ekler bölümünde) gösterilmiştir.

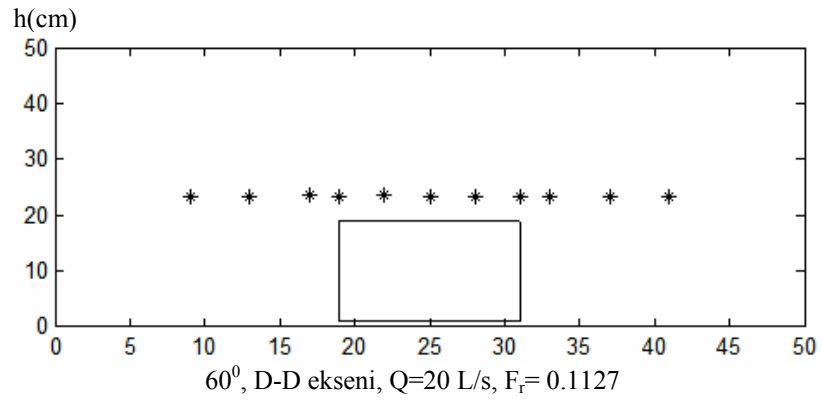
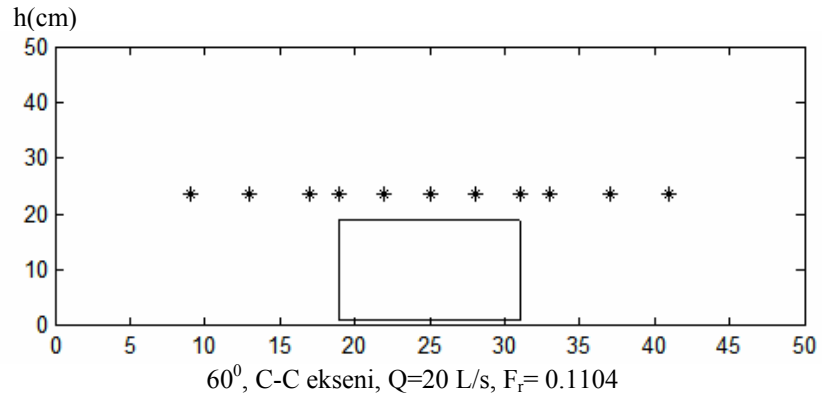
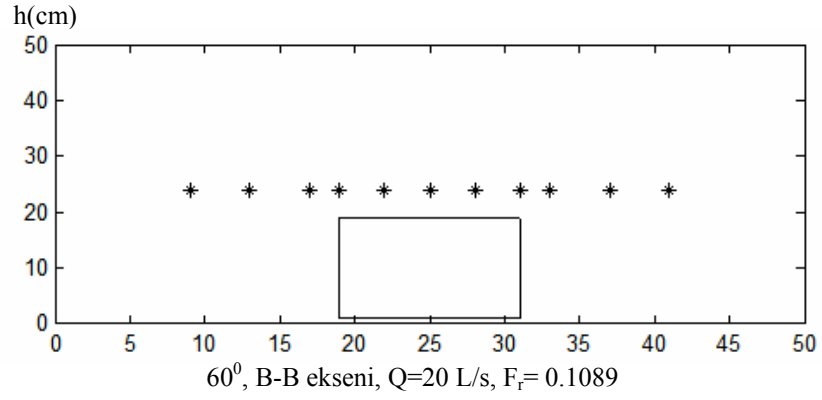
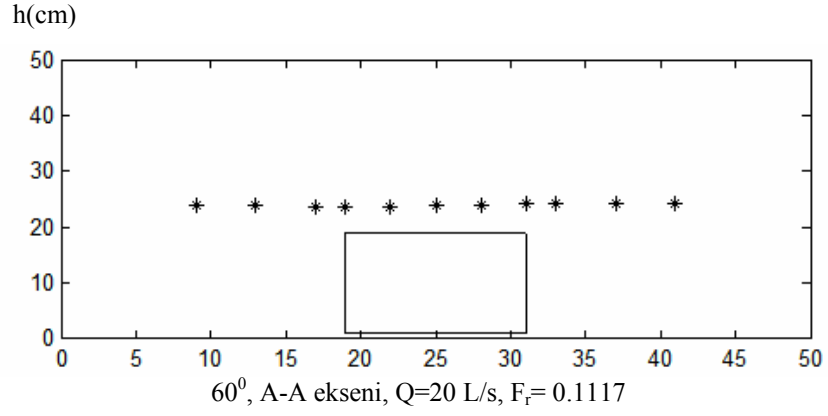
Şekillerdeki yatay ve dikey tüm rakamlar cm cinsindendir. Dikey rakamlar ana kanal yüksekliğini, yatay rakamlar sifon savağı ve sifonun menba ve mansap kısımlarını göstermektedir. * 'lar ise su yüzeyini göstermektedir.

Şekil 4.16'dan itibaren çizilen su yüzü profillerinde, su yükseklikleri ve savak uzunlukları aşağıda verilen şekildeki gibi cm olarak çizilmiştir.

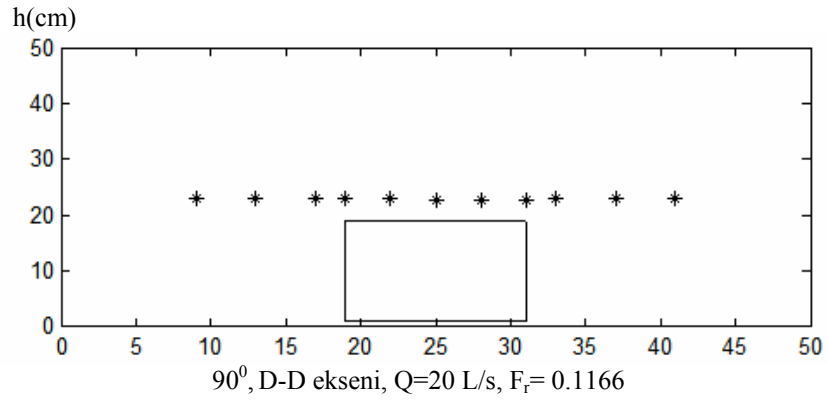
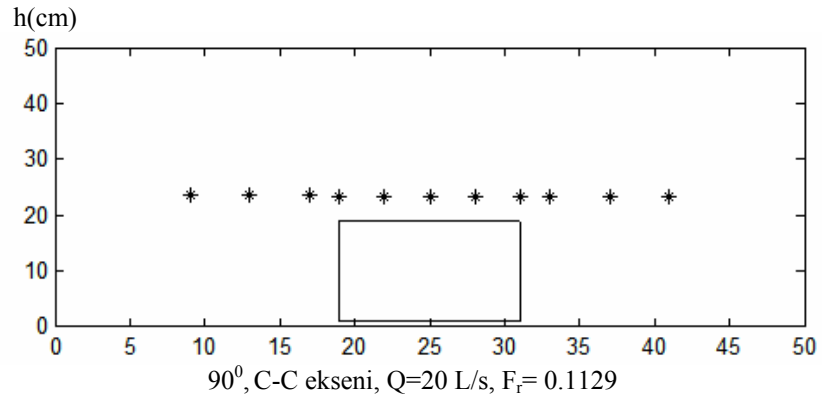
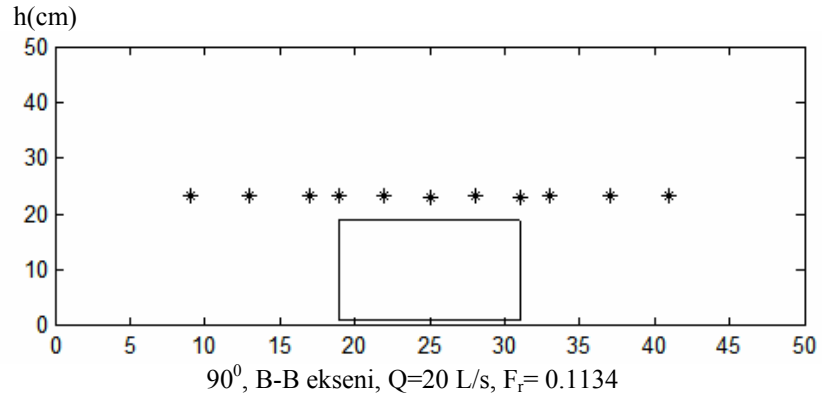
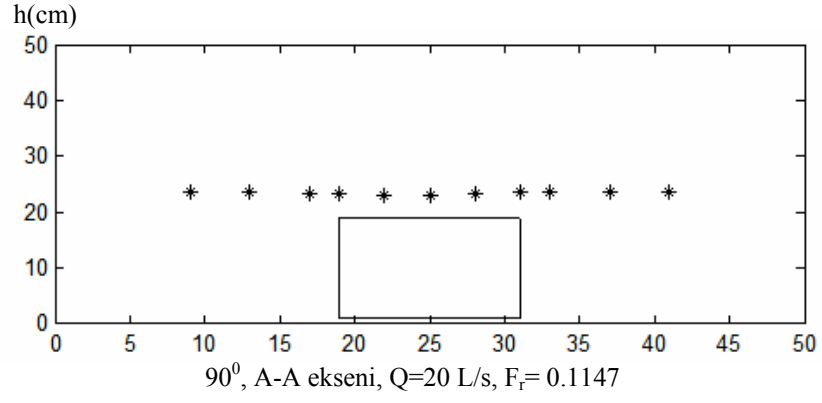




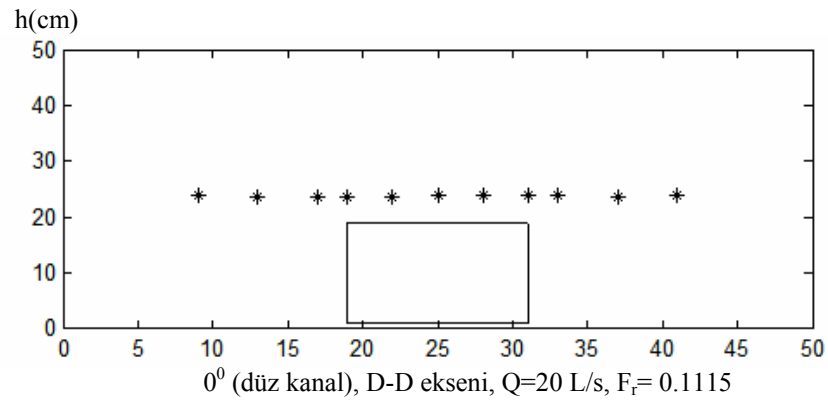
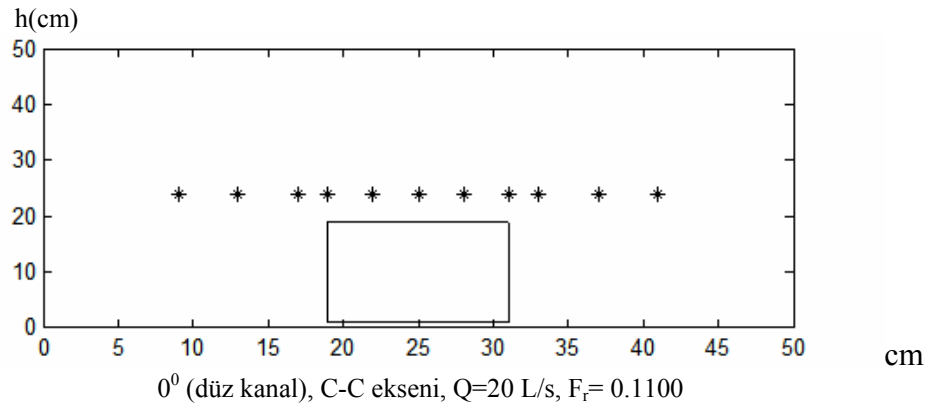
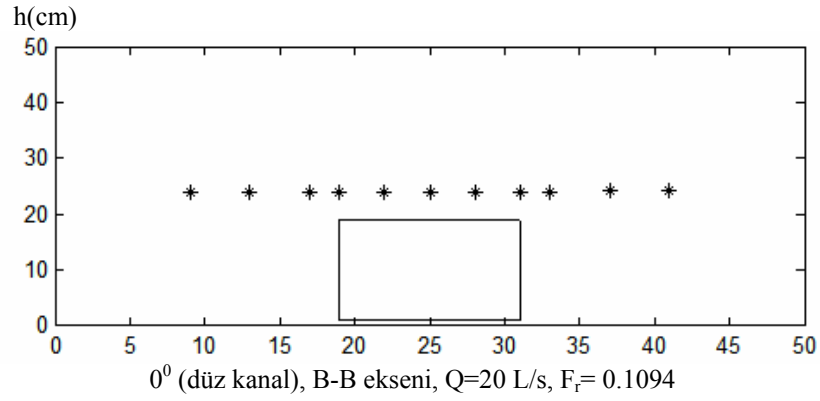
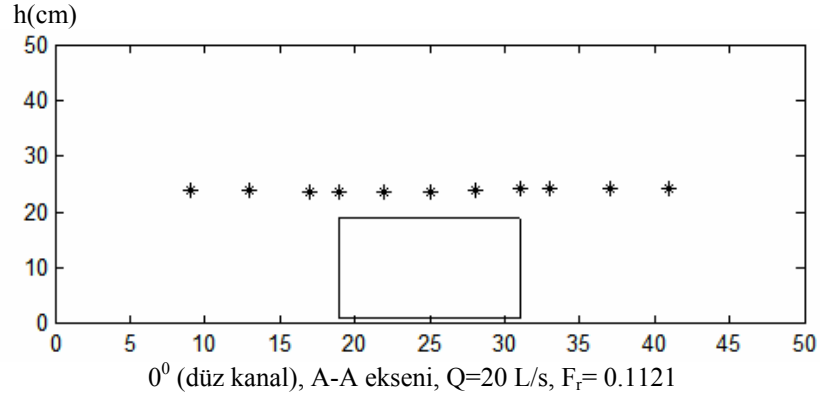
Şekil 4.16 $\alpha = 30^\circ$, $Q=20$ L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri



Şekil 4.17 $\alpha = 60^\circ$, Q=20 L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri



Şekil 4.18 $\alpha = 90^0$, Q=20 L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri



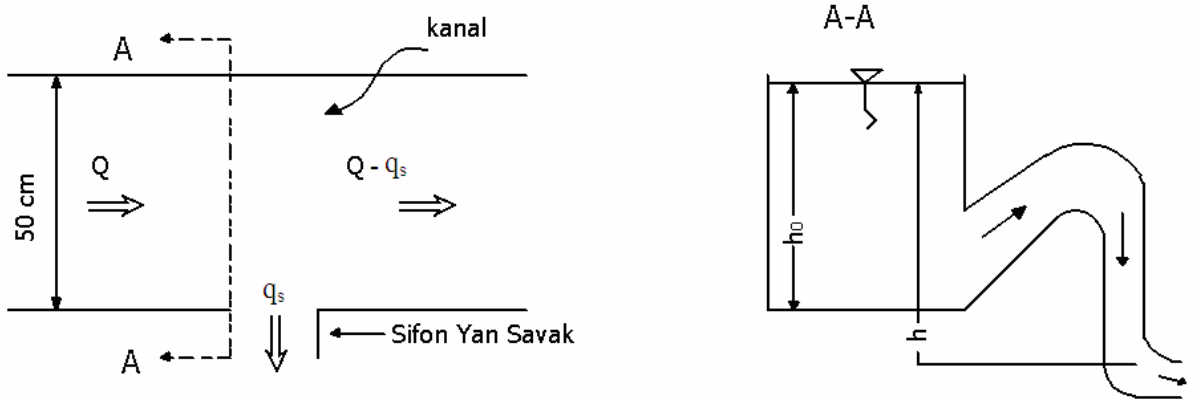
Şekil 4.19 $\alpha = 0^0$ (düz kanal) , $Q=20$ L/s 'de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri

Burada sadece $\alpha = 0^0$, $\alpha = 30^0$, $\alpha = 60^0$ ve $\alpha = 90^0$ için $Q=20$ L/s'lik debilerdeki seviyeler gösterilmiştir. Diğer tüm seviye şekilleri ekler bölümünde gösterilmiştir.

Seviye ölçümlerinde en belirgin özellikler A-A ekseninde yani sifon savağına en yakın eksende görülmektedir. Bu kesitte genelde sifon savak girişinde su seviyesinde bir alçalma olmakta sonra yeniden yükselmektedir.

Düşük su seviyelerinde ve sifonun yemlenmesi esnasında sifona bir miktar hava girdiğinde sifon girişinde vorteksler oluşmaktadır. Sifonun yemlenme süresince bu durum devam etmektedir. Yüksek debilerde A-A ekseninde, 5 ve 6 nolu noktalardan (Şekil 4.15) sonra bir yükselme olmakta ve bu yükseklik devam etmektedir. Şekil 4.11'de bu olay açıkça görülmektedir. Bu olay, yani yükselme başlangıcı, 30^0 ve 60^0 'lik savaklarda 5 nolu noktada, 90^0 'lik savakta ise 6 nolu noktada 0^0 'de ise kıvrımlı bölge kadar açık olmasa da 5 nolu noktadan sonra olduğu gözlemlenmiştir.

4.9 Sifon Savakların Debi Katsayılarının Belirlenmesi



Şekil 4.20 Kanal ve sifonun plan ve kesiti

Şekil 4.20'de görülen şeklin A-A ekseninde yani, sifon savağın menba girişinde Froude sayıları ve debi katsayıları hesaplanmıştır. Sifon savak debileri de toplama kanalı sonunda ölçülen su seviyelerinin (Şekil 4.3), dikdörtgen savak anahtar eğrisinde verilen 4.1 formülünde yerine konularak bulunmuştur. Bu hesaplamalar Tablo 4.3, 4.4, 4.5, 4.6'da gösterilmiştir. Bu tablolarda bulunan Froude sayıları ve debi katsayıları arasındaki ilişki şekiller (Şekil 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25) üzerinde de gösterilmiştir. Bu hesaplar sırasıyla 30^0 , 60^0 , 90^0 ve 0^0 'lik yan savaklarda yapılmıştır.

Tablolarda kullanılan terimler;

h = Sifonun çalışma yüksekliği (giriş ve çıkış su seviyeleri arasındaki fark)

Q = Ana kanal toplam debisi

h_o = Ana kanal su yüksekliği

v_o = Ana kanal su hızı

F_r = Froude sayısı

h_2 = Toplama kanal su yüksekliği

h_{nap} = Toplama kanalı nap su yüksekliği

q = Sifon savağın gerçek debisi

q_t = Sifon savağın teorik debisi

A = Sifon çıkış kesit alanı

C_d = Debi katsayısıdır.

Bu hesaplamalarda Froude sayısı;

$$F_r = \frac{v_o}{\sqrt{g \cdot h_o}} ,$$

h_{nap} yüksekliği;

$$h_{nap} = h_2 - 7.05 ,$$

(7.05 cm yükseklik toplama kanalı çıkışındaki eşik yüksekliğidir)

q_s debisi;

$$q_s = 0.619356 \cdot h_{nap}^{1.564577} ,$$

q_t debi;

$$q_t = A \sqrt{2gh} ,$$

C_d debi katsayısı;

$$C_d = q_s / q_t$$

formülleri ile hesaplamıştır.

Tablo 4.3 $\alpha = 0^0$ (Düz Kanal) Otomatik model sifon savağın Froude sayıları, debi katsayıları ve sifon savak debileri

Sifon Savak Özellikleri: $\alpha = 0^0$ (Düz Kanal)									
h (cm)	Q (L/s)	h ₀ (cm)	v ₀ (cm/s)	F _r	h ₂ (cm)	h _{nap} (cm)	q _s (L/s)	q _t (L/s)	C _d
44.80	20	23.80	16.81	0.1100	13.621	6.571	11.781	21.346	0.552
51.60	25	30.60	16.34	0.0943	14.435	7.385	14.143	22.909	0.617
45.05	25	24.05	20.79	0.1353	13.120	6.070	10.404	21.406	0.486
58.79	30	37.79	15.88	0.0824	14.959	7.909	15.744	24.453	0.644
46.34	30	25.34	23.68	0.1502	14.050	7.000	13.007	21.710	0.599
53.41	35	32.41	21.60	0.1211	14.385	7.335	13.993	23.307	0.600
45.11	35	24.11	29.03	0.1888	13.448	6.398	11.299	21.420	0.527
57.77	40	36.77	21.76	0.1146	14.762	7.712	15.135	24.240	0.624
49.21	40	28.21	28.36	0.1705	14.248	7.198	13.587	22.372	0.607
45.15	40	24.15	33.13	0.2152	13.360	6.310	11.058	21.420	0.517
49.92	60	28.92	41.49	0.2460	14.202	7.152	13.440	22.533	0.596
52.14	75	31.14	48.16	0.2750	14.210	7.160	13.470	23.030	0.585
53.89	100	32.89	60.80	0.3370	14.182	7.132	13.382	23.412	0.571

Tablo 4.4 $\alpha = 30^0$ Otomatik model sifon savağın Froude sayıları, debi katsayıları ve sifon savak debileri

Sifon Savak Özellikleri: $\alpha = 30^0$ Kıvrımlı Kanal									
h (cm)	Q (L/s)	h ₀ (cm)	v ₀ (cm/s)	F _r	h ₂ (cm)	h _{nap} (cm)	q _s (L/s)	q _t (L/s)	C _d
44.71	20	23.71	16.85	0.1106	13.650	6.600	11.863	21.325	0.556
46.70	25	25.70	19.46	0.1225	14.379	7.329	13.976	21.794	0.641
44.56	25	23.56	21.22	0.1396	13.198	6.148	10.616	21.281	0.499
55.43	30	34.43	17.43	0.0948	14.990	7.940	15.841	23.744	0.667
50.05	30	29.05	20.65	0.1223	14.283	7.233	13.690	22.562	0.607
56.09	35	35.09	19.95	0.1063	14.518	7.468	14.393	23.885	0.603
46.50	35	25.50	27.45	0.1736	14.055	7.005	13.021	21.747	0.599
59.77	40	38.77	20.63	0.1058	14.769	7.719	15.156	24.656	0.615
50.04	40	29.04	27.55	0.1632	14.379	7.319	13.946	22.560	0.618
44.13	40	23.13	34.59	0.2296	13.118	6.068	10.401	21.185	0.491
51.91	60	30.91	38.82	0.2293	14.311	7.261	13.773	22.983	0.598
52.83	75	31.83	47.12	0.2665	14.320	7.270	13.799	23.181	0.595
54.80	100	33.80	59.17	0.3240	14.332	7.282	13.835	23.609	0.585

Tablo 4.5 $\alpha = 60^\circ$ Otomatik model sifon savağın Froude sayıları, debi katsayıları ve sifon savak debileri

Sifon Savak Özellikleri: $\alpha = 60^\circ$ Kıvrımlı Kanal									
h (cm)	Q (L/s)	h ₀ (cm)	v ₀ (cm/s)	F _r	h ₂ (cm)	h _{nap} (cm)	q _s (L/s)	q _t (L/s)	C _d
44.74	20	23.74	16.85	0.1104	13.651	6.601	11.865	21.332	0.556
49.49	25	28.49	17.55	0.1049	14.581	7.531	14.583	22.436	0.650
44.72	25	23.72	21.08	0.1382	13.386	6.336	11.129	21.327	0.522
58.44	30	37.44	16.03	0.0836	15.007	7.957	15.894	24.380	0.652
48.59	30	27.59	21.75	0.1322	14.444	7.394	14.170	22.231	0.637
51.73	35	30.73	22.78	0.1312	14.734	7.684	15.049	22.938	0.656
45.89	35	24.89	28.12	0.1800	14.068	7.018	13.059	21.604	0.604
57.37	40	36.37	21.99	0.1164	15.005	7.955	15.888	24.156	0.658
48.68	40	27.68	28.90	0.1754	14.528	7.478	14.423	22.251	0.648
44.33	40	23.33	34.29	0.2266	13.005	5.955	10.100	21.230	0.476
48.97	60	27.97	42.90	0.2589	14.103	7.053	13.152	22.317	0.589
50.98	75	29.98	50.03	0.2910	14.147	7.097	13.289	22.771	0.583
53.89	100	32.89	60.81	0.3381	14.217	7.167	13.495	23.412	0.576

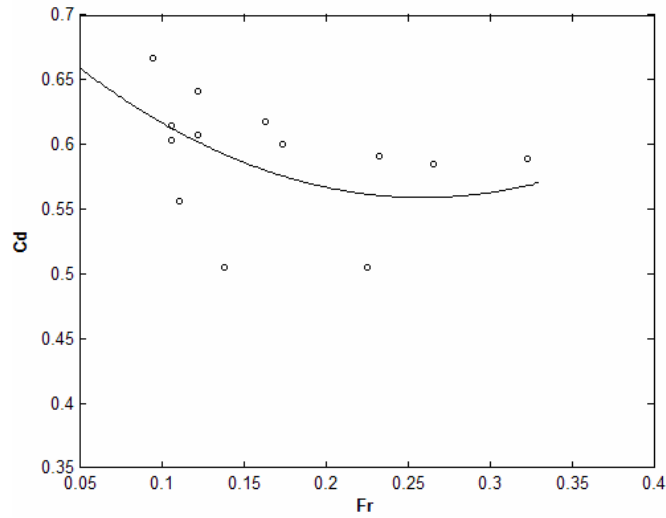
Tablo 4.6 $\alpha = 90^\circ$ Otomatik model sifon savağın Froude sayıları, debi katsayıları ve sifon savak debileri

Sifon Savak Özellikleri: $\alpha = 90^\circ$ Kıvrımlı Kanal									
h (cm)	Q (L/s)	h ₀ (cm)	v ₀ (cm/s)	F _r	h ₂ (cm)	h _{nap} (cm)	q _s (L/s)	q _t (L/s)	C _d
44.39	20	23.39	17.10	0.1129	13.412	6.362	11.200	21.248	0.527
49.81	25	28.81	17.36	0.1032	14.524	7.474	14.411	22.508	0.640
44.50	25	23.50	21.28	0.1401	13.265	6.225	10.825	21.275	0.509
57.90	30	36.90	16.26	0.0855	15.095	8.045	16.170	24.267	0.666
49.05	30	28.05	21.39	0.1289	14.395	7.345	14.023	22.336	0.628
51.65	35	30.65	22.84	0.1317	14.700	7.650	14.945	22.920	0.652
45.29	35	24.29	28.82	0.1867	14.014	6.964	12.902	21.463	0.601
56.66	40	35.66	22.43	0.1199	14.885	7.835	15.514	24.006	0.646
48.35	40	27.35	29.25	0.1786	14.480	7.430	14.278	22.176	0.644
43.36	40	22.36	35.78	0.2415	13.091	6.041	10.329	21.000	0.492
49.98	60	28.98	41.40	0.2455	14.207	7.157	13.465	22.547	0.597
50.95	75	29.95	50.08	0.2920	14.227	7.177	13.524	22.765	0.594
54.17	100	33.17	60.29	0.3342	14.210	7.160	13.460	22.473	0.598

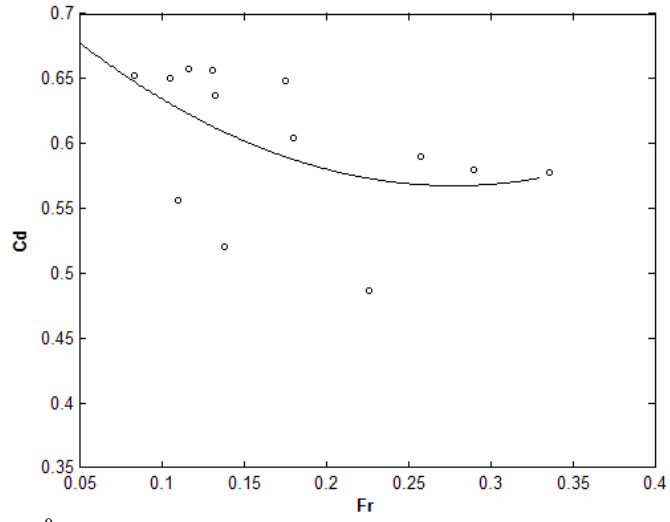
Yan savak halindeki bir sifonun debi katsayısı bir çok parametreye bağlı olup, bunu tam olarak matematiksel bir ifadeyle belirlemek imkansızdır. Kanal ve sifonun giriş şekli ve sifonun konstrüksiyonu gibi faktörlerin bu konuda önemli olacağı ve bunları diğer parametrelerle bir arada ifade etmenin güçlüğü ortadadır. Genel anlamda yan savak halindeki bir sifonda debi katsayısına sadece h ve v_0 değerlerine bağlı olduğu sonucu çıkarılmamalıdır. Belirtilen bu nedenlerle, sifon yan savak halinde debi katsayısının bağlı olduğu parametreler ve bunlarla olan bağıntısı için daha ayrıntılı araştırmalar yapılmalıdır[1].

Tablo 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6 incelendiğinde, ana kanalda su seviyesi yükseldiğinde sifon savağın debisinin ve debi katsayılarının arttığı görülmektedir. Savakların yerleştirilme açıları farklı da olsa bu görünüm hepsinde gerçekleşmektedir.

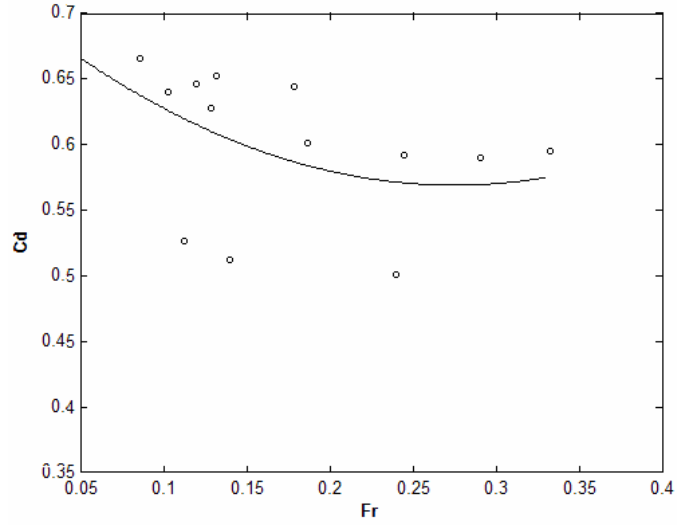
Bölüm 4.5’de yapılan boyut analizinde C_d yan savak debi katsayısına, F_r Froude sayısının etki eden boyutsuz bir parametre olduğu görülmüştür. Buna göre, $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 60^\circ$ ve $\alpha = 90^\circ$ ’de hesaplanan Froude sayıları ile yan savak debi katsayıları arasındaki değişim Şekil 4.21- 4.24 arasında gösterilmiştir. Ayrıca bu şekiller tek bir şekil üzerinde Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Şekil 4.26 ise Avcı [1]’nın bulduğu Froude sayısı ile sifonun debi katsayısı değişimidir.



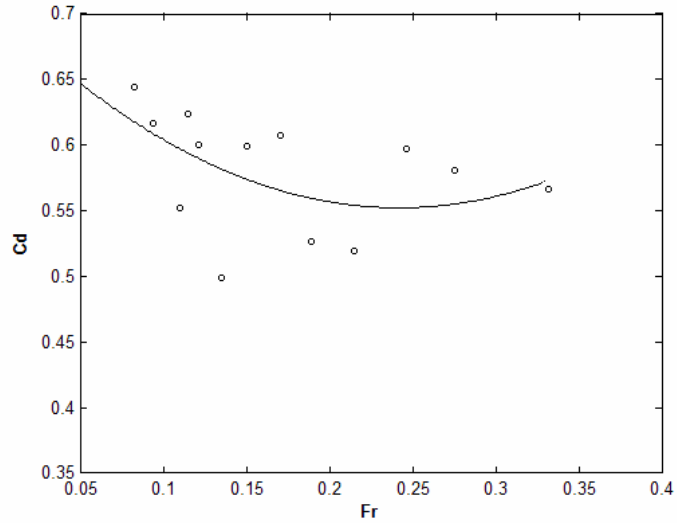
Şekil 4.21 $\alpha = 30^\circ$ 'lik savak bölgesinde yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimi



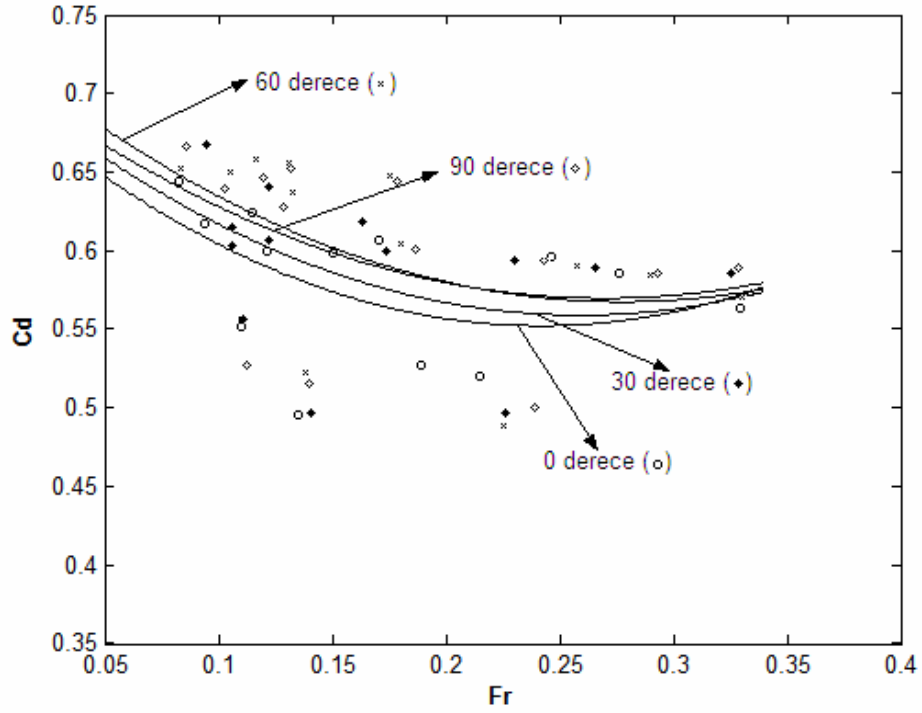
Şekil 4.22 $\alpha = 60^0$ 'lik savak bölgesinde yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.23 $\alpha = 90^0$ 'lik savak bölgesinde yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.24 $\alpha = 0^0$ 'lik savak bölgesinde yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.25 $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 'lik yan savak bölgelerinde yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimi

Kanalın kıvrım açılarındaki savaklarda debi katsayılarının karşılaştırılmasında büyük bir fark olmadığı görülmektedir. $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ile 90° 'nin eğri karakteri birbirine benzemektedir. Hesaplanan tüm debi katsayıları $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 60^\circ$ ve $\alpha = 90^\circ$ savaklarda birbirlerine çok yakın değerlerdedir.

Ana kanal debisinin artması ile Froude sayılarının da arttığı görülmektedir. En büyük Froude sayıları tüm savaklarda 100 L/s'lik debilerde bulunmuştur. 100 L/s'lik debi tüm savaklarda kullanılan en büyük debidir. En küçük Froude sayıları ise tüm savaklarda ayar kapağı kapalı iken 30 L/s'lik debilerde bulunmuştur.

Bu çizimlere göre; küçük F_r sayılarında (0.05 ile 0.17 aralığı) yani akım hızının küçük, akım derinliğinin büyük olduğu durumlarda debi katsayıları tüm savaklarda yüksek çıkmaktadır. F_r sayısının 0.17 ile 0.22 aralığında yani akım derinliğinin biraz daha düştüğü durumlarda 60° 'lik ve 90° 'lik kıvrım açısına sahip savaklar en büyük C_d katsayılarına sahiptir. Bu aralıkta 30° 'lik ve özellikle de 0° 'lik savakta debi katsayıları biraz daha düşük değerlerdedir. F_r sayısının 0.05 ile 0.22 aralığında en büyük debi katsayıları 60° 'lik savaktadır. Bu olay, maksimum hız yörüngesinin $\alpha = 45^\circ$ 'den sonra dış kıyıya yönelmesi ve yerleşmeye başlamasıyla yanal akımı artırıcı etki yapmasından kaynaklanmaktadır. F_r 'nın 0.20'den büyük değerlerinde C_d katsayılarındaki azalma çok yavaşlamaktadır. F_r sayısının 0.22 değerinden itibaren 90° 'lik kıvrım açısına sahip savak en büyük C_d katsayılarına sahiptir. F_r sayısının 0.05

ile 0.32 aralığında en küçük C_d katsayıları 0° 'lik savakta görülmektedir. $\alpha = 0^\circ$ 'lik savakta bulunan debi katsayıları, kıvrım açılarında bulunan değerlerden biraz daha küçüktür.

$\alpha = 30^\circ$ 'lik savakta; ana kanaldaki en yüksek su seviyesi 38.77 cm, en düşük su seviyesi 23.13 cm, en büyük sifon savak debisi 15.841 L/s, en küçük sifon savak debisi 10.401 L/s, en büyük debi katsayısı 0.0948 Froude sayısına karşılık gelen 0.667, en küçük debi katsayısı ise 0.2296 Froude sayısına karşılık gelen 0.491'dir.

$\alpha = 60^\circ$ 'lik savakta; ana kanaldaki en yüksek su seviyesi 37.44 cm, en düşük su seviyesi 23.33 cm, en büyük sifon savak debisi 15.894 L/s, en küçük sifon savak debisi 9.985 L/s, en büyük debi katsayısı 0.1164 Froude sayısına karşılık gelen 0.658, en küçük debi katsayısı ise 0.2266 Froude sayısına karşılık gelen 0.476'dır.

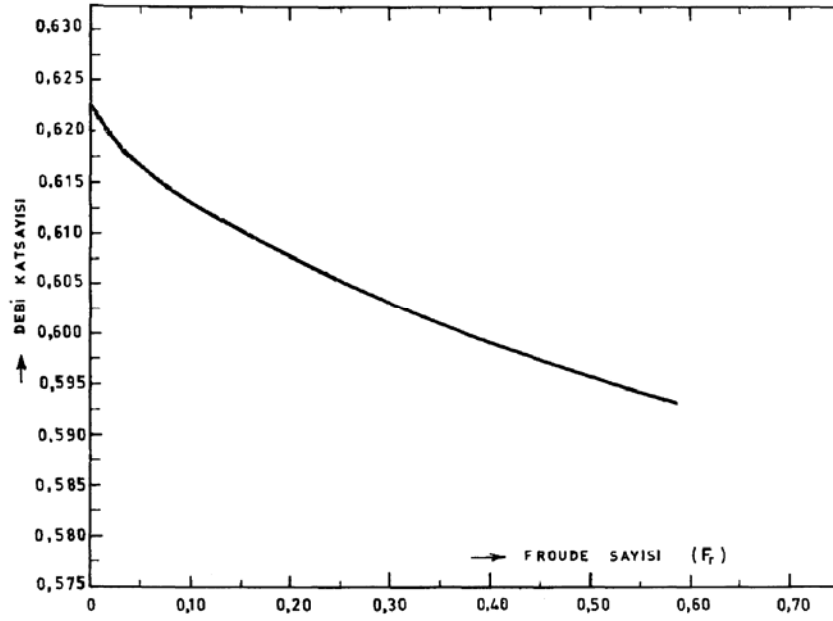
$\alpha = 90^\circ$ 'lik savakta; ana kanaldaki en yüksek su seviyesi 36.90 cm, en düşük su seviyesi 22.36 cm, en büyük sifon savak debisi 16.170 L/s, en küçük sifon savak debisi 10.329 L/s, en büyük debi katsayısı 0.0855 Froude sayısına karşılık gelen 0.666, en küçük debi katsayısı ise 0.2455 Froude sayısına karşılık gelen 0.492'dir.

$\alpha = 0^\circ$ 'lik (düz kanal) savakta; ana kanaldaki en yüksek su seviyesi 37.79 cm, en düşük su seviyesi 23.80 cm, en büyük sifon savak debisi 15.744 L/s, en küçük sifon savak debisi 10.404 L/s, en büyük debi katsayısı 0.0824 Froude sayısına karşılık gelen 0.644, en küçük debi katsayısı ise 0.1353 Froude sayısına karşılık gelen 0.486'dır.

Avcı [1]'nın düz kanallarda yaptığı sifon savaklar çalışması ile bu çalışmanın karşılaştırmasında ortaya çıkan sonuçlar şunlardır;

Avcı [1]'nın 50 cm genişlikteki kanalda, sifon girişinden 47.5 cm menbada bulunduğu Froude sayısı ile sifonun debi katsayısı değişimi Şekil 4.26'da gösterilmiştir.

Avcı [1], bu çalışmada, sifonun yan savak olarak kullanılması halinde, hız dağılımlarını belirlerken düşük ve yüksek debilerde ($Q = 25.46$ L/s ile $Q = 103.56$ L/s), düşük ve yüksek hızlarda çalışmıştır ve kanal en kesitindeki akımın sifondan etkilenme oranının, kanaldaki akım hızının artması ile azaldığını bulmuştur. Bu çalışmada ise, yine düşük ve yüksek debilerde ($Q = 30$ L/s ile $Q = 100$ L/s), düşük ve yüksek hızlarda çalışılmış ve $Q = 30$ L/s ile yapılan ölçümlerde kanal en kesitindeki akımın, $Q = 100$ L/s ile yapılan ölçümlere göre sifondan daha fazla etkilendiği bulunmuştur. Bu olay teğetsel hız dağılım şekillerinin karşılaştırmasında açıkça görülmektedir.



Şekil 4.26 Sifonun girişinden 47.5 cm menbada kanaldaki Froude sayısı ile sifonun debi katsayısı'nın değişimi [1].

Ayrıca, Avcı [1]'nin çalışmasında, kanaldaki akım hızının küçük olduğu durumlarda sifon girişinin mansabında kanal tabanında negatif yani ters yönlü akımlar oluşurken, kanaldaki akım hızının artması halinde ise bu tür bir akımlar meydana gelmemektedir. Bu çalışmada da, sifon girişinin mansabında ve sifona en yakın eksen olan A-A eksenlerinde kanalda düşük hızlı akımlar (sıfıra yakın değerler) oluşurken, kanaldaki akım hızının artması halinde yapılan ölçümlerde ise bu olay gerçekleşmemektedir.

Avcı [1]'nin çalışmasında, düşük hızlarda sifon savağın menba kısmındaki hız dağılımlarında, kanal tabanından yüzeye doğru hızın arttığı görülmektedir. Mansapta ise, kanal tabanda hızın çok daha düşük değerlerde olduğu, yüzeye doğru ise belirgin bir artmanın olduğu görülmektedir. Yüksek hızlarda ise, sifon savağın menba kısmında kanal tabanından yüzeye doğru hızın daha az arttığı ve sifon savağa yakın en kesitlerde ise, kanal tabanından orta kesimlere doğru hızın arttığı, yüzeye doğru ise yeniden azaldığı görülmektedir. Bu olay mansapta kısımda da gözlenmektedir.

Avcı [1]'nin çalışmasından farklı olarak bu çalışmada, kanalın kıvrımlı bölgelerinde ve düşük hızlarda, sifon savağın mansap kısmında sifon savağa en uzak eksen olan G-G ekseninin 9 ve 10 noktalarının yüzeye yakın kısımlarında ölü noktalar yani, hızın sıfır olduğu noktalar bulunmuştur. Yine Avcı'nın çalışmasından farklı olarak, yüksek hızlarda kıvrımlı bölgede, $\alpha = 60^\circ$ 'lik ve $\alpha = 90^\circ$ 'lik savakların mansap kısımlarındaki hız dağılımları; kanal tabanında yüksek, orta kısımda düşük, yüzeyde ise yüksek değerlerdedir. Burada minimum hızlar,

kanaldaki su seviyesinin orta kısımlarındadır. Bu olay $\alpha = 60^{\circ}$ ’lik savakta $\alpha = 90^{\circ}$ ’lik savağa göre daha belirgin bir şekilde görülmektedir.

Avcı [1]’nin çalışmasında, aynı giriş ve çıkış kesitlerindeki sifon savak debileri; 14.30 L/s ile 15.57 L/s arasında değişmesine karşı, bu çalışmada, 10.100 L/s ile 16.170 L/s arasında ölçülmüştür. Tam sifonik akımlardaki ölçülen sifon savak debileri birbirine yakındır.

Her iki çalışmada da, tam sifonik akım başladığında, sifon girişinin menba tarafında kanaldaki su yüzeyi alçalmakta ve hemen sifonun girişinde bir yüzeysel kabarma meydana gelmektedir. Ayrıca bu çalışmada, sifon savağın menba girişinde, sifonun yemlenme başlangıcında vorteksler oluşmaktadır (Şekil 4.11).

Bu çalışmadaki Froude sayıları, Avcı [1]’nin çalışmasında çıkan sonuçlardan biraz büyük değerlerdedir.

Debi katsayıları ise, bu çalışmada 0.476 ile 0.667 arasında değişen değerler hesaplanmasına karşı Avcı [1]’nin çalışmasında, bu değerler 0.593 ile 0.622 arasında hesaplanmıştır. Bu çalışmada hesaplanan küçük debi katsayılarının sebebi, bazı debilerde düşük seviyelerde de çalışılmış olmasıdır, yani bu seviyelerde sifona az miktarda hava girmektedir. Tam sifonik akımlardaki hesaplanan debi katsayıları ise Avcı [1]’nin bulduğu değerlerden çok az da olsa büyüktür. Bunun sebebi ise, bu çalışmada tam sifonik akımda sifon çıkışının batık olarak çalışması olabilir.

Avcı [1]’nin çalışmasında, Froude sayıları ve yan savak debi katsayıları arasında çizilen Şekil 4.26’da görülen eğri ile bu çalışmada bulunan eğriler arasında bazı uyumluluk vardır. Her iki çalışmada da büyük Froude sayılarında yan savak debi katsayıları azalan değerler göstermektedir. Fakat Avcı [1]’nin çalışmasında, büyük Froude değerlerinde yan savak debi katsayılarındaki azalma daha fazladır.

Avcı [1]’nin karşılaştığı sifon savağa çıkış kesitinden hava girmesi olayı bu çalışmada, sifon savağın çıkış kesitinin sifonik akımda batık olmasından dolayı olmamıştır. Sadece yemlenme başlangıcında fazla etkili olmamakla birlikte bu olay görülmüştür.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, bir otomatik sifonun 180°'lik kıvrımlı bir açık kanalın değişik açılarında (30°, 60° ve 90°) ve düz kısmında (0°), ve değişik debilerde (20 L/s, 25 L/s, 30 L/s, 35 L/s, 40 L/s, 60 L/s, 75 L/s, 100 L/s), yan savak olarak kullanıldığı ve yan savak akımının $Fr = 0.0836$ ' dan $Fr = 0.3381$ 'e kadar incelendiğinde ortaya çıkan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Kıvrımlı bir kanalda otomatik sifonun yan savak olarak kullanılması halinde yan savak debi katsayısına etki eden parametreler, boyut analiziyle belirlenmiş ve yan savak debi katsayısının, $C_d = f(Fr, \frac{b}{r}, \frac{d}{h}, \theta)$ boyutsuzlarına bağlı olduğu bulunmuştur.

Ana kanaldaki su seviyeleri ile sifondan savaklanan debiler ve debi katsayıları arasında bir orantı olduğu görülmektedir. Ayrıca, kanaldaki akım hızı arttığında sifon savağın debi katsayısı da azalmaktadır. Bunun nedeni ise, suyun kanaldan sifona giriş şartlarındaki değişme ve sifondaki helikoidal akımın şiddetinin etkisinin artmasındandır.

Kanalın kıvrım açılarındaki savaklarda debi katsayılarının karşılaştırılmasında büyük bir fark olmadığı görülmektedir. Hesaplanan tüm debi katsayıları $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 60^\circ$ ve $\alpha = 90^\circ$ 'lik savaklarda birbirlerine çok yakın değerlerdedir. Küçük F_r sayılarında (0.05 ile 0.17 aralığı) yani akım hızının küçük, akım derinliğinin büyük olduğu durumlarda debi katsayıları tüm savaklarda yüksek çıkmaktadır. F_r sayısının 0.17 ile 0.22 aralığında, akım derinliğinin biraz daha düştüğü durumlarda 60°'lik ve 90°'lik kıvrım açısına sahip savaklar en büyük C_d katsayılarına, 30°'lik ve özellikle de 0°'lik savakta ise C_d katsayıları biraz daha düşük değerlerdedir. F_r sayısının 0.05 ile 0.22 aralığında en büyük debi katsayıları 60°'lik savaktadır. Bu olay, maksimum hız yörüngesinin $\alpha = 45^\circ$ 'den sonra dış kıyıya yönelmesi ve yerleşmeye başlamasıyla yanal akımı artırıcı etki yapmasından kaynaklanmaktadır. F_r 'nın 0.20'den büyük değerlerinde C_d katsayılarındaki azalma çok yavaşlamaktadır. F_r sayısının 0.22 değerinden itibaren 90°'lik kıvrım açısına sahip savak en büyük C_d katsayılarına sahiptir. F_r sayısının 0.05 ile 0.32 aralığında, en küçük C_d katsayıları 0°'lik savakta görülmektedir. $\alpha = 0^\circ$ 'lik savakta bulunan C_d katsayıları, kıvrım açılarındaki bulunan değerlerden biraz daha küçük değerlerdedir.

Sifonun yemlenme tertibatındaki (saptırıcıda) hava boşaltıcı su napının asimetrik olmasından ve fonksiyonunu tam anlamıyla yerine getirememesi (yani sifonun karşı cidarına aynı düzlem içerisinde çarpmaması) sebebi ile sifonun yemlenme ve durma yüksekliğinin büyük, süresinin ise uzun olduğu görülmüştür.

Sifonun tam kapasite ile çalışmaya başlamasından sonra sifon girişinin menba tarafında, kanaldaki su yüzeyi alçalmakta ve hemen sifonun girişinde yüzeysel bir kabarma meydana gelmektedir. Yüksek debilerde, özellikle 75 L/s ile 100 L/s'lik debilerde, kıvrımlı bölgede bu olay net bir şekilde görülmektedir.

Kıvrımlı kısımda ölçülen hız dağılımlarında genelde en büyük hızlar A-A ekseninde, yani sifon savağa en yakın eksende oluşmaktadır. En küçük hızlar ise G-G ekseninde, yani sifon savağa en uzak eksende oluşmuştur. Fakat düz kanalda $Q=100$ L/s ile yapılan ölçümlerde maksimum hızlar, B-B, C-C ve D-D eksenlerinde oluşmuştur. Ayrıca kanalın kıvrımlı bölgelerinde ve düşük hızlarda, sifon savağın mansap kısmında sifon savağa en uzak kesit olan G-G eksenlerinin 9 ve 10 noktalarının yüzeye yakın kısımlarında ölü noktalar oluşmuştur. Kanal en kesitindeki akımın sifondan etkilenme oranının ise, kanaldaki akım hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Hızların genelde kanal tabanında düşük, orta kısımlarda yüksek ve yüzeye doğru yeniden düşük değerler aldığı ölçülmüştür. Fakat bazı yüksek hızlarda tabanda yüksek, ortada düşük, yüzeyde ise büyük değerler de ölçülmüştür.

$\alpha = 30^0$ 'lık savakta $Q=30$ L/s'lik debi ile düşük hızlarda yapılan hız ölçümlerinde, A-A ekseninde en büyük hızlar 5 nolu noktada yani sifon savağın girişinde ölçülmüştür. G-G ekseninin 9 ve 10 noktalarında ise ölü noktalar oluşmaktadır. $Q=100$ L/s'lik debi ile yüksek hızlarda yapılan hız ölçümlerinde ise, yine A-A ekseninin 5 nolu noktasında en büyük hızlar ölçülmüştür. F-F ve G-G eksenlerinin 8, 9 ve 10 nolu noktalarına ise tabandan yüzeye doğru hızlarda bir artma olduğu görülmüştür.

$\alpha = 60^0$ 'lık savakta $Q=30$ L/s'lik debi ile düşük hızlarda yapılan hız ölçümlerinde, A-A ekseninde en büyük hızlar 5 ve 6 nolu noktalarda ölçülmüştür. G-G ekseninin 6, 7, 8, 9 ve 10 noktalarında ise hızlar yüzeye doğru çok azalmıştır. $Q=100$ L/s'lik debi ile yüksek hızlarda yapılan hız ölçümlerinde ise A-A ekseninin 5 nolu noktasında en büyük hızlar ölçülmüştür. C-C, D-D, E-E, F-F ve G-G eksenlerinin 5 ile 10 nolu noktalar arasında kanaldaki su seviyesinin orta kısımlarında (15.5 cm'sinde) minimum hızlar ölçülmüştür. Burada hızlar, kanal tabanında yüksek, orta kısımda düşük, yüzeyde ise yüksek değerlerdedir.

$\alpha = 90^0$ 'lık savakta $Q=30$ L/s'lik debi ile düşük hızlarda yapılan hız ölçümlerinde, A-A ekseninde en büyük hızlar 5 nolu noktada ölçülmüştür. G-G ekseninin 9 ve 10 noktalarında ise ölü noktalar oluşmaktadır. $Q=100$ L/s'lik debi ile yüksek hızlarda yapılan hız ölçümlerinde ise A-A ekseninin 5 nolu noktasında en büyük hızlar ölçülmüştür. D-D ve E-E eksenlerinde ise hızlar yüzeye doğru artarak maksimum değerlere çıkmaktadır.

$\alpha = 0^0$ 'lık savakta $Q=30$ L/s'lik debi ile düşük hızlarda yapılan hız ölçümlerinde, en büyük hızlar A-A ekseninde 5 nolu noktada ölçülmüştür. G-G ekseninin 9 ve 10 noktalarında ise hızlar çok azalmıştır. $Q=100$ L/s'lik debi ile yüksek hızlarda yapılan hız ölçümlerinde ise en büyük hızlar, kıvrımdaki savaklardan farklı olarak, B-B, C-C ve D-D eksenlerinin 2 nolu noktasında ölçülmüştür. Bu savakta kıvrımlı savaklardan farklı olarak, hızlar yüzeye doğru belirgin bir şekilde azalmakta ve minimum değerler almaktadır.

KAYNAKLAR

1. Avcı, İ., 1975, Yan Savak Sifonlar, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 207s.
2. Khatsuria, R.M., 2005, Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. Marcel Dekker, New York, 629p.
3. Erkek C., Ağiroğlu N., 2002, Su Kaynakları Mühendisliği, İstanbul, 240p.
4. Davies, P., 1931, Correspondence on Experiments on Siphon Spillways, Proc. I.C. Engineers, Vol.231, London.
5. Inglis, C.C., 1931, Correspondence on Experiments on Siphon Spillways, Proc. I.C. Engineers, Vol.231, London.
6. Gibson, A.H., Aspey T.H., Tattersal, F., 1930, Experiments on Siphon Spillways, Proc. I.C.E., Part I, Vol.231, London.
7. Whittington, R.B., Ali, K.H.M., 1972, Siphons Some Scale-Effects in Models, Proc. Am. Soc. Civil Engineers, Hy1, pp.45-69.
8. Borelli, M., 1955, Stabilité Des Siphons Areas, Proc. 6 th general Meeting, I.A.H.R., the Hague.
9. Crump, E.S., Ackers, P., 1961, An Exerimental Investigation into the Performance of a Spillway Siphon. D.S.I.R., Hydraulic Research Station, Report No. In 22.
10. Kövari J., 1984, Inland Aquaculture Engineering, ADCP/REP/84/21, Rome,
11. Babaeyan- Koopaei, K., Valentine, E.M., Alan Ervin, D., 2002, Case Study on Hydraulic Performance of Brent Reservoir Siphon Spillway. Journal of Hydraulic Engineering, 128, 562-567.
12. Babaeyan- Koopaei, K., Valentine, E.M., Alan Ervin, D., 2001, Hydraulic Model Study Of Brent Reservoir Siphon Spillway, Proceeding of the Gongress-Interational association For Hydraulic Research, Netherlands, 504-509.
13. Hardwick, J.D., Grant, C.J., 1997, An Adjustable Air-regulated Siphon Spillway. Proc Instn Civ. Wat., Marit. And Energy, 124, 95-103.
14. Knapp, F.H., 1960, Ausfuuss Überfall und Durchfluss im Wasserbau, Verlag, G. B., Karlsruhe. 114p.
15. Wehry, A., 1969, Increase of he Fall and Capacity of Siphon Spillways, 13 Th Congress I.A.H.R., Vol.5-1, Kyoto.
16. Maitra, B., 1957, Cavitation on Siphon Spillways, 7 Th Congress I.A.H.R., Vol.1, Lisbon.
17. Bollrich, G., 1994, Hydraulic Investigations of the High-head Siphon Spillway of Burgkhammer, 16th ICOLD paper Q 71-R2, Durban, 145-146.

18. Webber, N.B., 1971, Fluid Mechanics for Civil Engineers, E.,F.N., Spon Ltd and Science Paperbanks.
19. Schmidt, M., 1957, Gerinnehydraulik, Wiesbaden, 241p.
20. Sepetçioğlu, M.Y., 2005, Katı Madde Hareketine Tesir Eden Faktörlerin Kıvrımlı Bir Kanal Boyunca İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 106s.
21. Ağaçoğlu, H., 1995, Yan Savaklardaki Akımın Kıvrımlı Bir Kanal Boyunca İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 166s.
22. Rakonczai, J., Hargitai, H., Berczi, Sz., 2001, Comparisons of the Ancient Meandering Riverbeds in the Chryse Region, Mars and on the Tisza Flood Basin, Earth Lunar and Planetary Science XXXII.
23. Chow, V.T., 1959, Open Channel Hydraulic., Mc Grew Hill, Chapter 16, pp.439-460.
24. Skury. A., 1950, Flow Around Bends in Open Flume, Transactions, ASCE, Vol.115, pp.751-779.
25. Woodward, S.M., Posey, C.J., 1941, Hydraulics of Study Flow in Open Channels, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp.112.
26. Rozovskii, I.L., 1957, Flow of Water in Bends of Open Channels, Published by the Academy of Sciences of the Ukranian SSR., Kiev.
27. Muramoto, Y., 1967, Secondary Flow in Curved Channels, proc., AHR, Vol. 3., pp.315.
28. Soliman, M.M., Tinney, E.R., 1968, Flow Around 180⁰ Bends in Open Rectangular Channels, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 94., No.HY4, pp.893-908.
29. Francis, J.R.D., Asfari, A.F., 1971, Les Repartition des Vitesses des Courant dans les Canaux a surface Libre Incurves et de Grande Largeur, Journal of IAHR, Vol. 9, pp.73.
30. Yen, L.C., Yen, B.C., 1971, Water Surface Configuration in Channel Bends, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 97., No.HY2, pp.303-321.
31. Apmann, R.P., 1972, Estimation Discharge From Superelevation in Bends, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 99., No. HY1, pp.65-79.
32. Choudhary, U.K., Narasimhan, S., 1977, Flow in 180⁰ Open Channel Rigid Boundary Bends, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Tec. Notes, Vol. 103., No.6, pp.651-657.
33. Chang, H.H., 1983, Energy Expenditure in Curved Open Channels, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 109., No.7
34. Vriend, D., Struiksmas, 1983, Flow and Bed Deformation in River Bends, Delft Hydraulic Laboratory, Pub. No. 317, Netherlands.

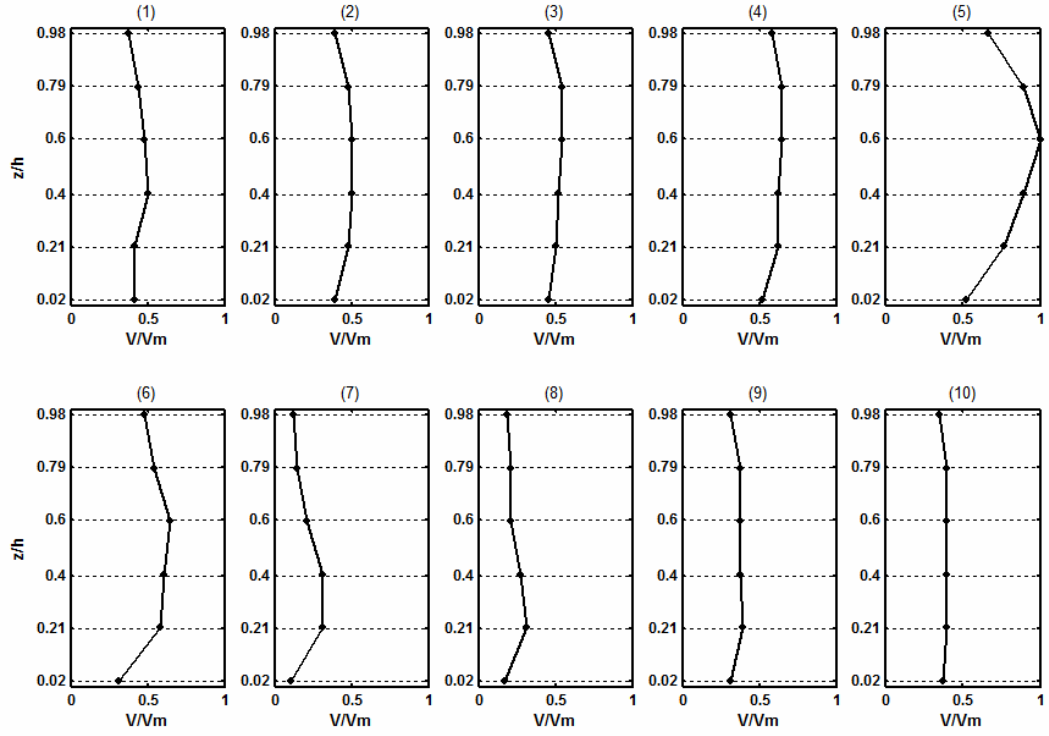
35. Georgiadou, A.D., Smith, A.K., 1986, Flow in Curved Converging Channel, Journal of the Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 112., No. 6, pp.476-496.
36. Fares, Y.R., Herbertson, J.G., 1993, Comportement de l'écoulement Dans un Canal courbe avec un deversior lateral alimentant un canal evacuateur de crue, Journal of Hydraulic Research, Vol. 31 No. 3, pp. 383-401.
37. Mangelsdorf, J., Cheurmann, K., Weip, F-H, 1990, River Morphology-A Guide For Geoscientist and Engineers, Spring-Verlag Berlin Hendelberg.
38. Bayazıt, M., 1971, Hareketli Tabanlı Akımların Hidroliği, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, Yayın No. 835, İstanbul, 250p.
39. Anonymous, 1964, Harşit Su Alma Yeri ve Çökme Havuzu, Rapor, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Hidrolik ve Su Kuvvetleri Kürsüsü, İstanbul.
40. Coşar, A., Ağaçcıoğlu, H., 2004. Discharge Coefficient of a Triangular Side-weir Located on a Curved Channel. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 130(5), 410-423.
41. Charlton, J.A., 1962, Self Priming Spillway Siphons an Appraisal, B.H.R.H. Pub. Sp.725.
42. Emiroğlu, M.E., Öztürk, M., Kaya, N., Labirent Yan Savaklardaki Akımın ve Su Alma Bölgesindeki Oyulmanın Kıvrımlı Bir Kanal Boyunca İncelenmesi, 104M394 nolu Tübitak Proje Raporu, 2007.
43. El- Khashab, A.M.M., 1975. Hydraulics of Flow over Side Weirs, Ph.D. Thessis Presented to the University of Southampton, England.

ÖZGEÇMİŞ

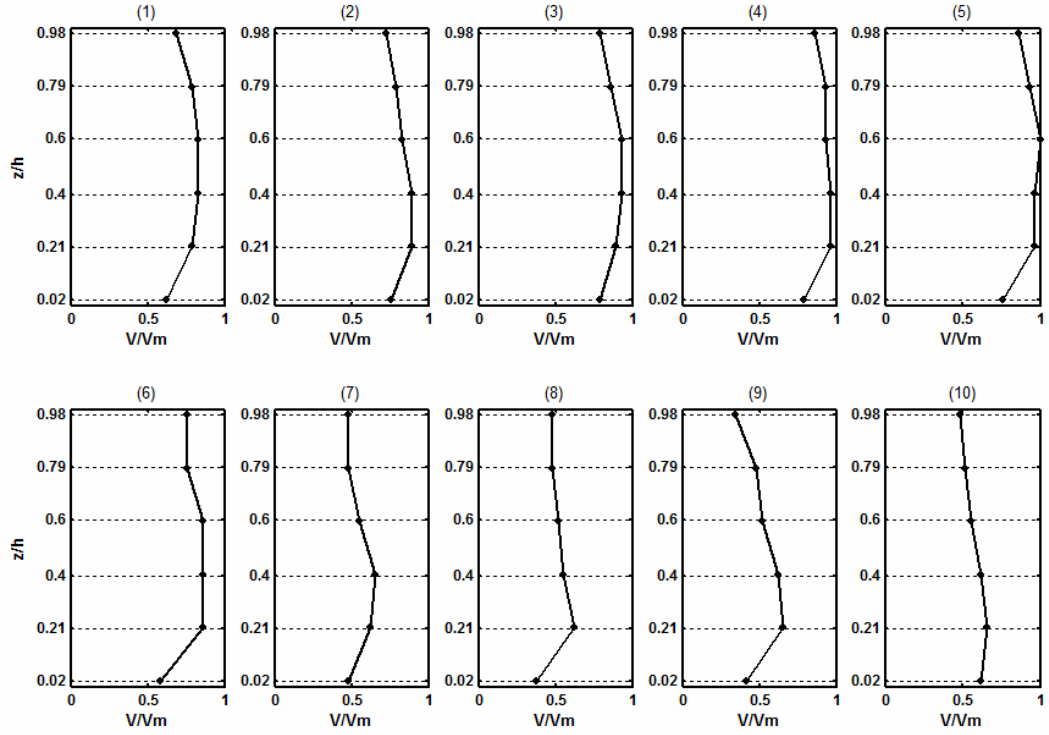
1967 yılında Osmaniye’de doğan Ahmet YÜCEL ilk, orta ve lise tahsilini Osmaniye’de yaptı. 1992 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi (Gaziantep Kampüsü) Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. Yüksek lisansını 2000 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında tamamladı. 2001 yılında aynı bölümde doktora eğitimine başladı. Halen aynı programda doktora çalışmalarını sürdüren aday, Fırat Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O.’unda Öğretim Görevlisi olarak çalışmakta olup evli ve iki çocuk babasıdır.

EKLER

EK-1 Teğetsel Hız Dağılımları

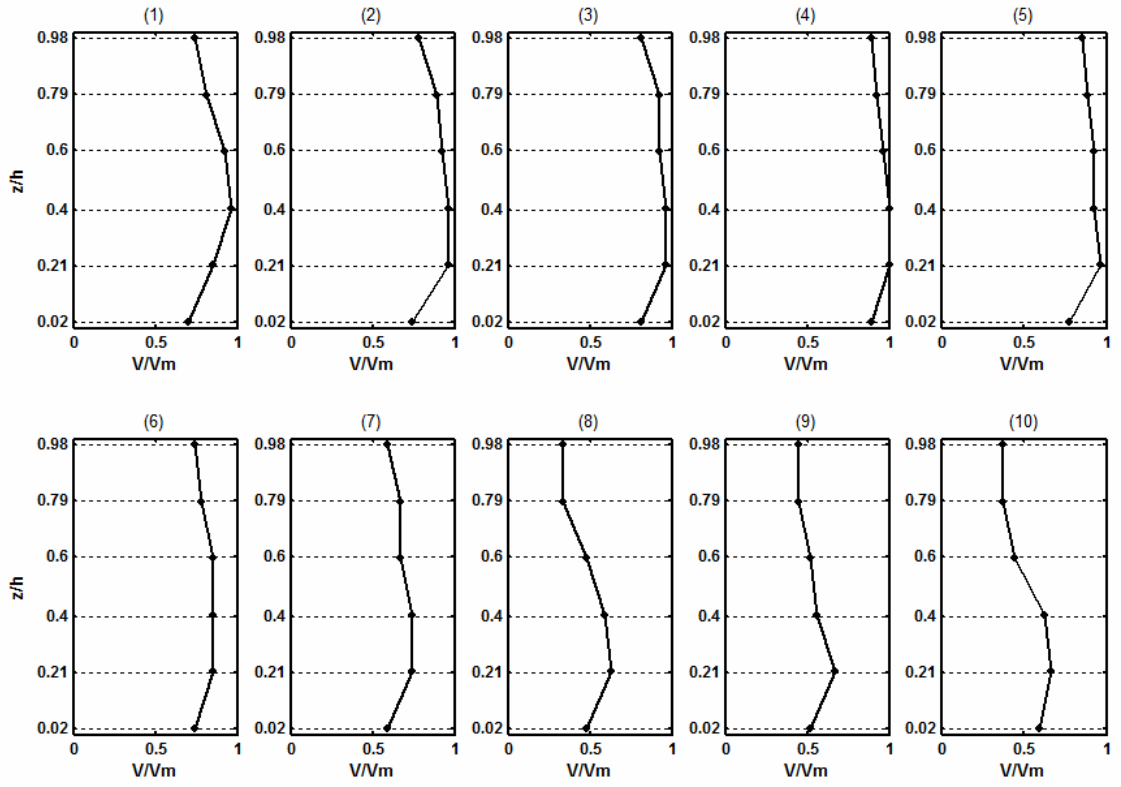


60° , $Q=30$ L/s
A-A eksenı

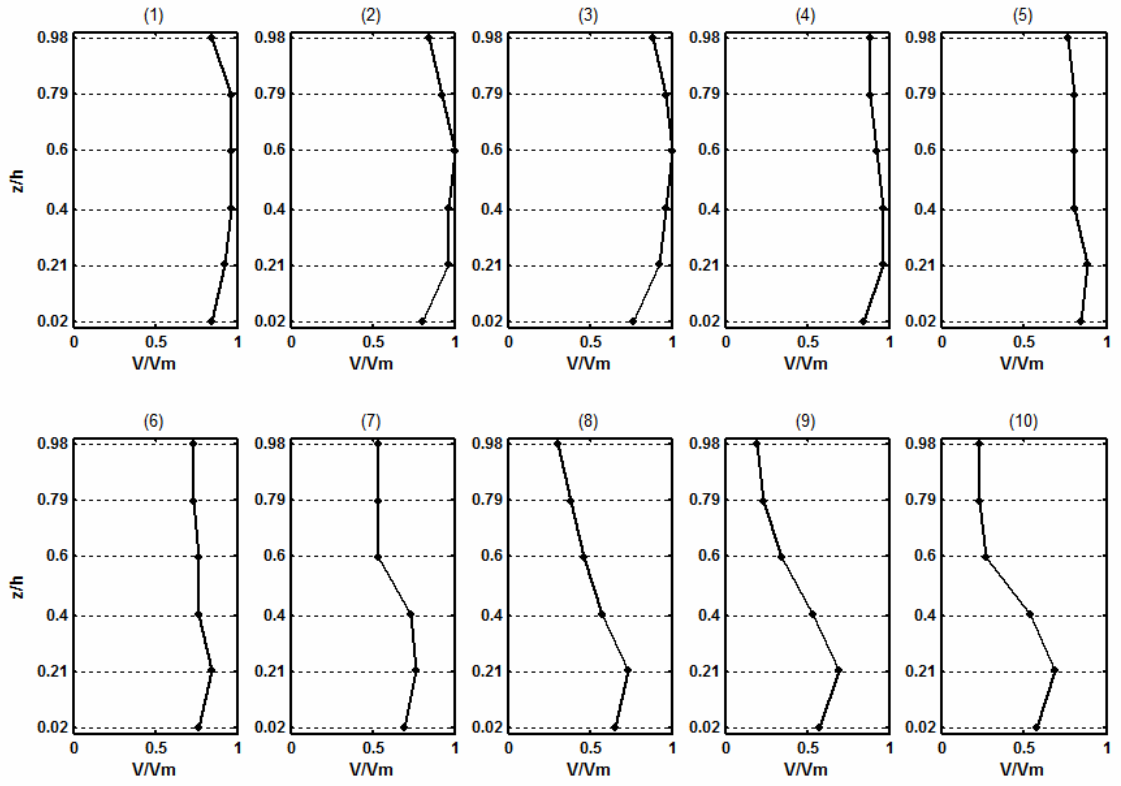


60° , $Q=30$ L/s
B-B eksenı

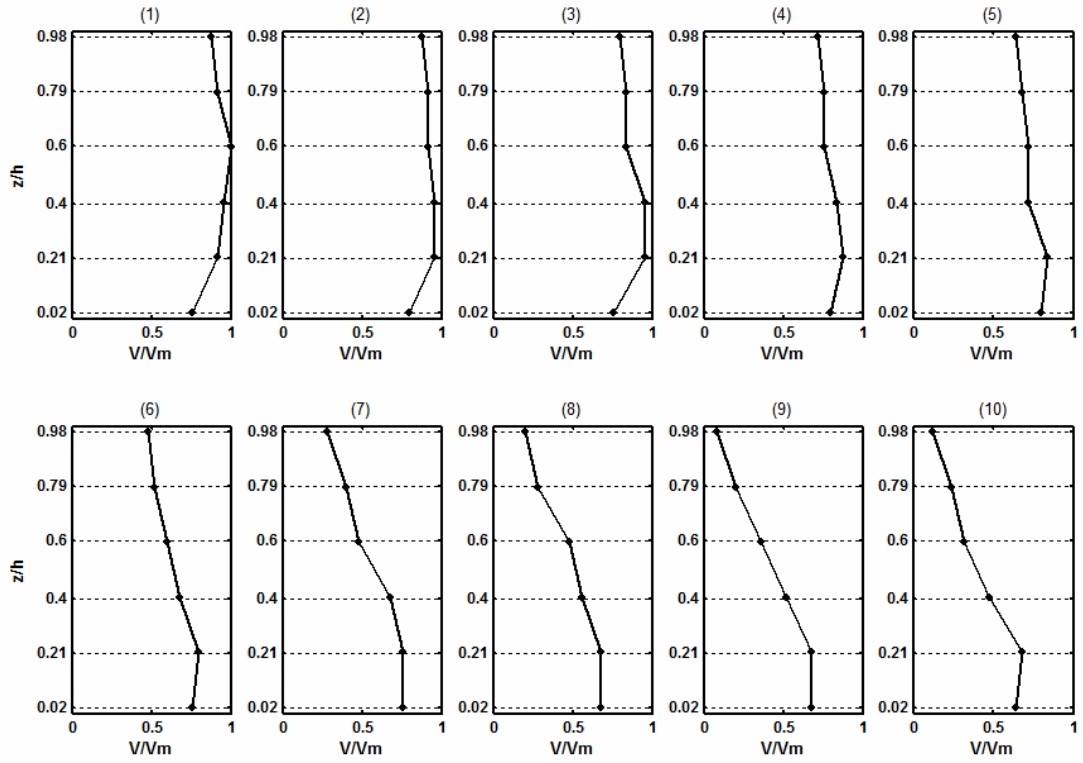
Ek 1.1 $\alpha = 60^\circ$ Yan savaktan $Q=30$ L/s'lik debinin aktif savaklanması halinde teğetsel hız dağılımları



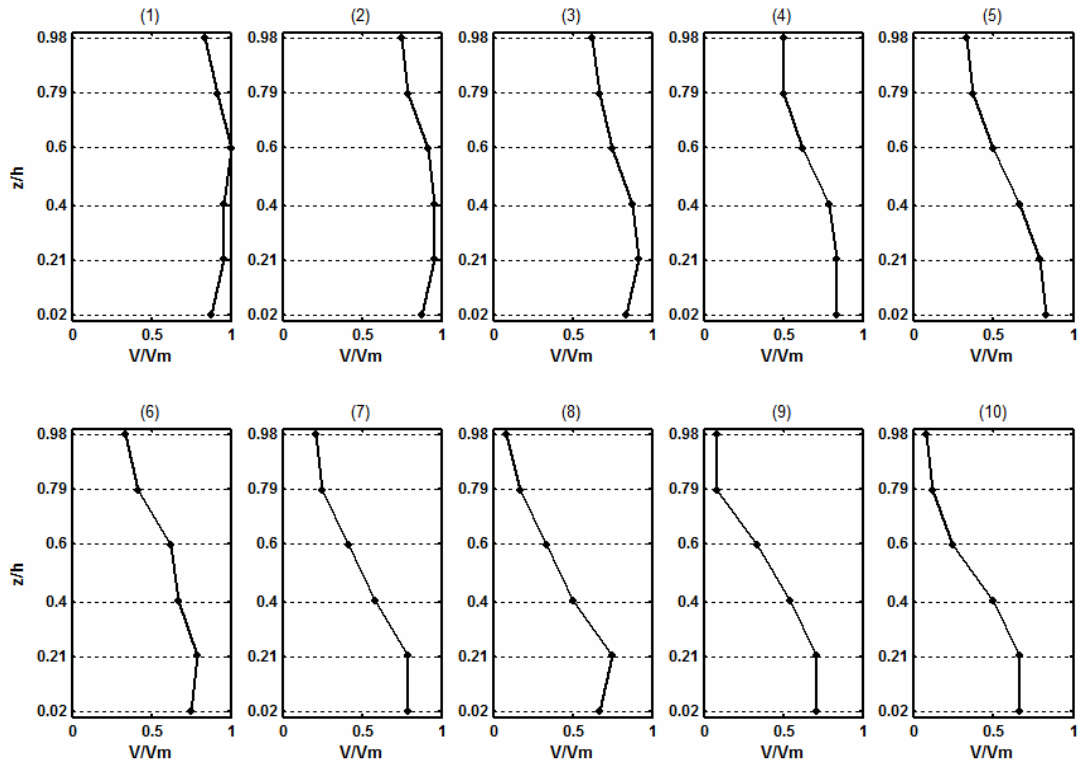
60° , $Q=30$ L/s
C-C eksenini



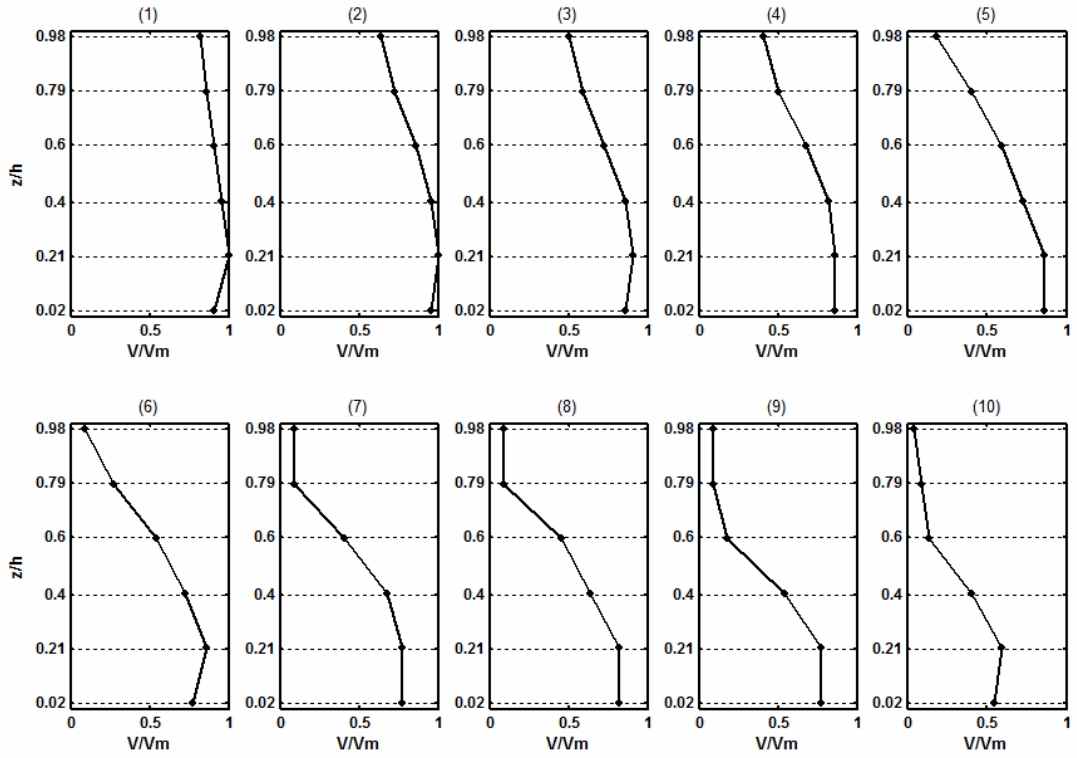
60° , $Q=30$ L/s
D-D eksenini
Ek 1.1 (devam).



60° , $Q=30$ L/s
E-E eksenı



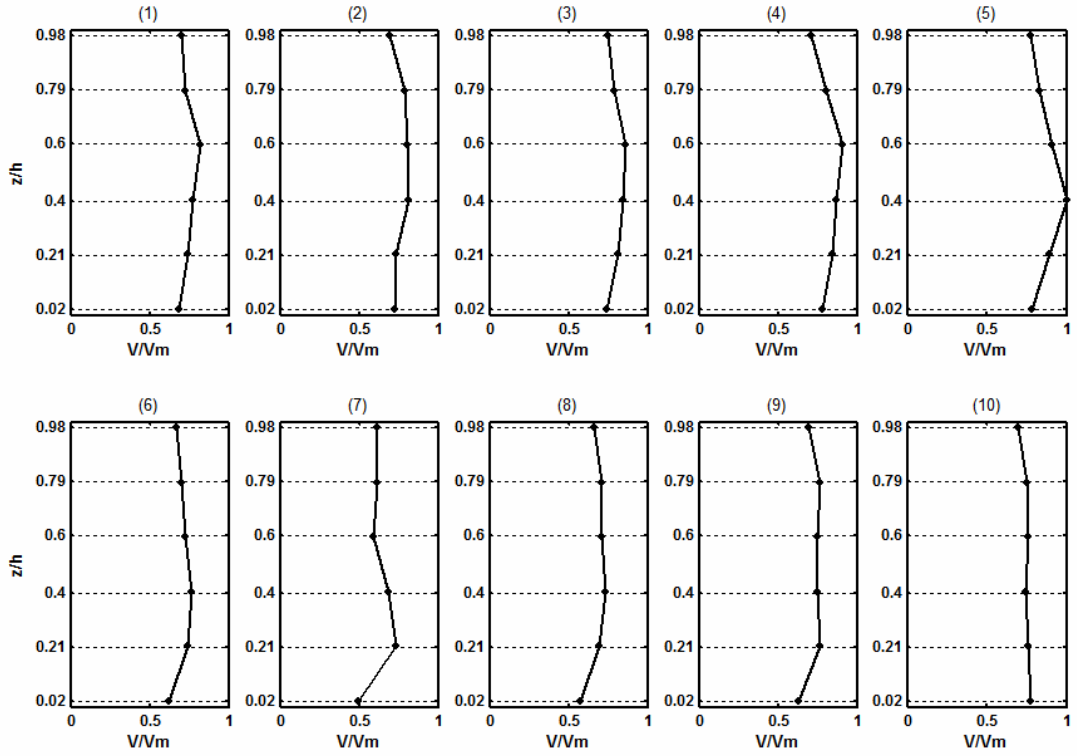
60° , $Q=30$ L/s
F-F eksenı
Ek 1.1 (devam).



60° , $Q=30$ L/s

G-G eksenı

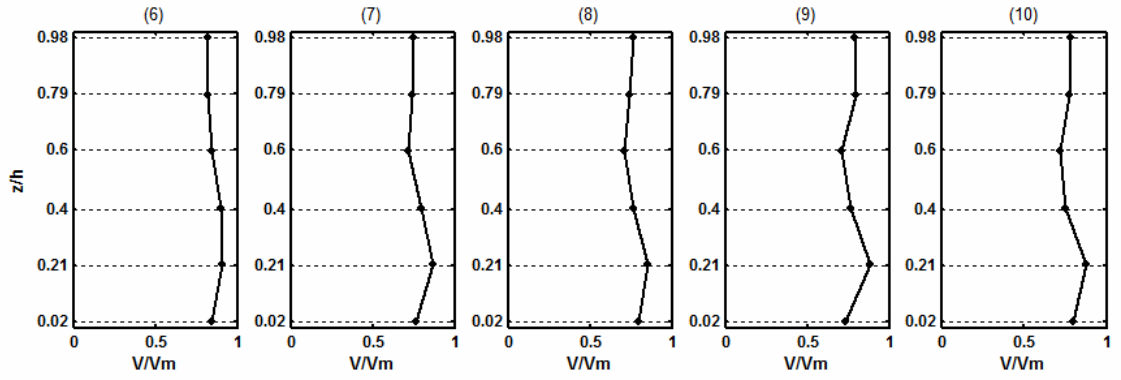
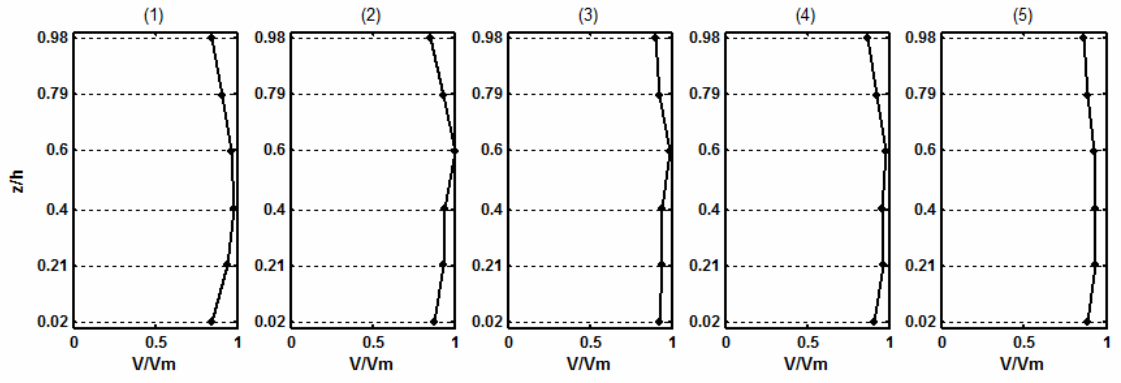
Ek 1.1 (devam).



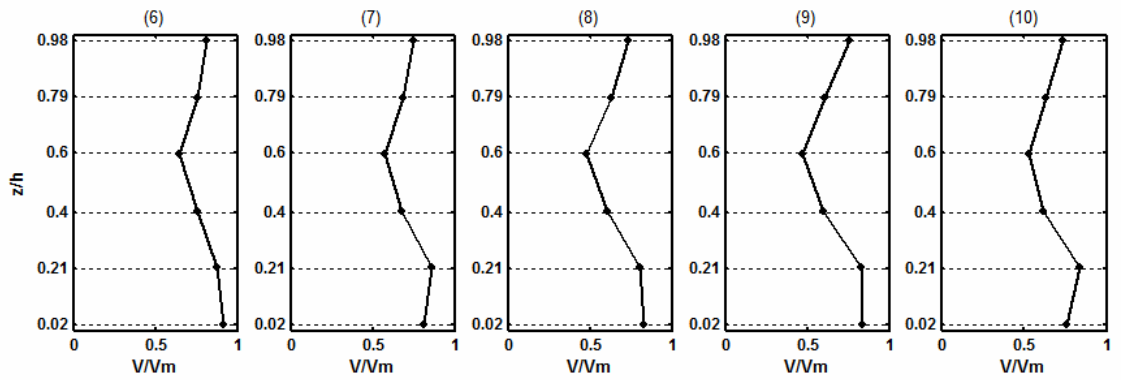
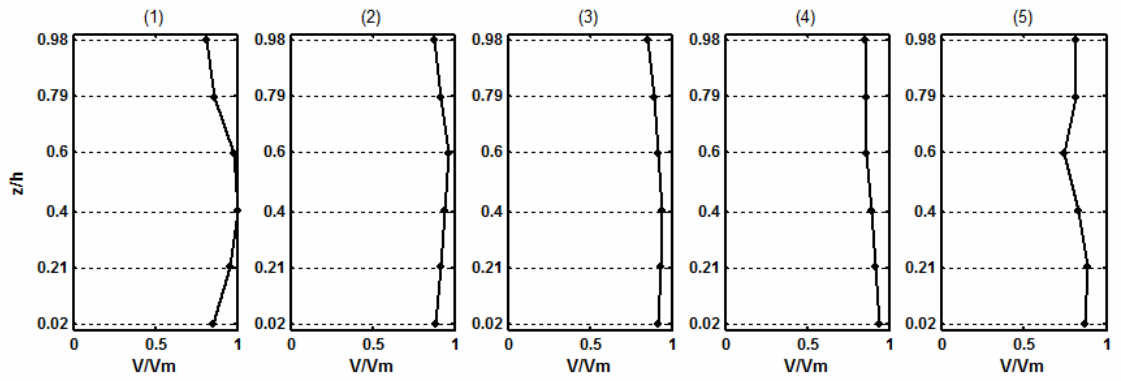
60° , $Q=100$ L/s

A-A eksenı

Ek 1.2 $\alpha = 60^\circ$ Yan savaktan $Q=100$ L/s'lik debinin aktif savaklanması halinde teğetsel hız dağılımları

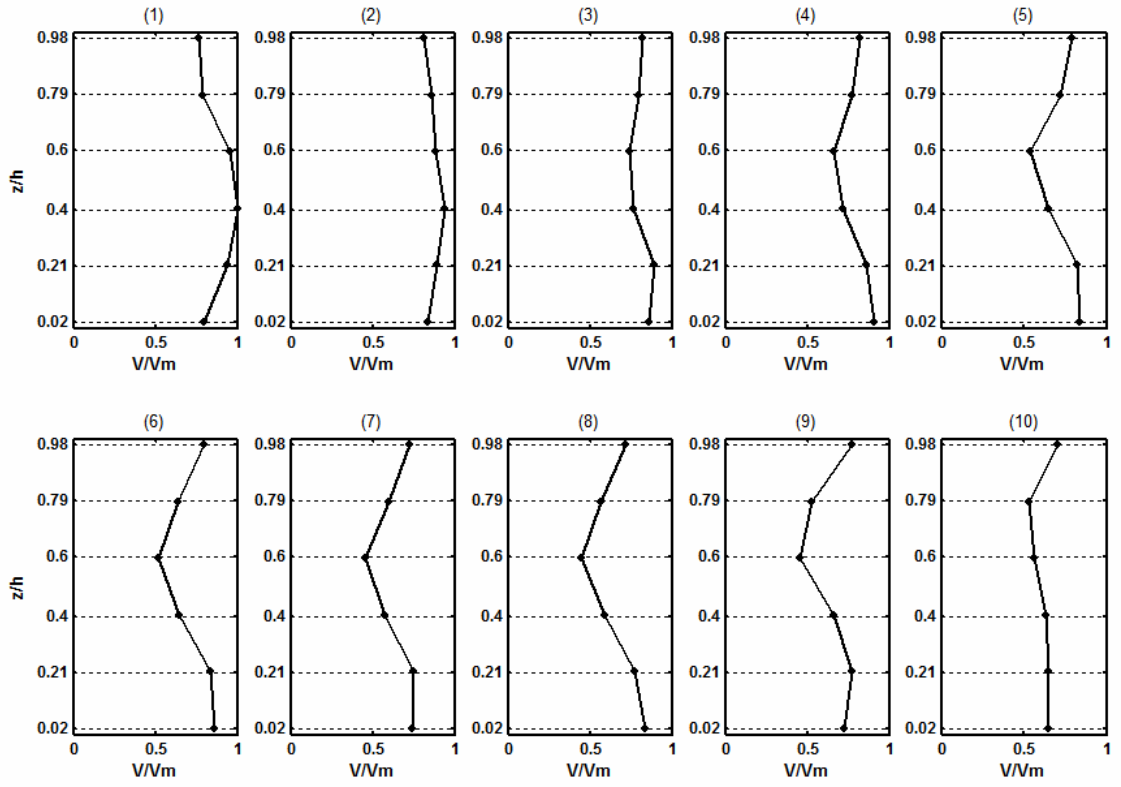


60° , $Q=100$ L/s
B-B eksenini

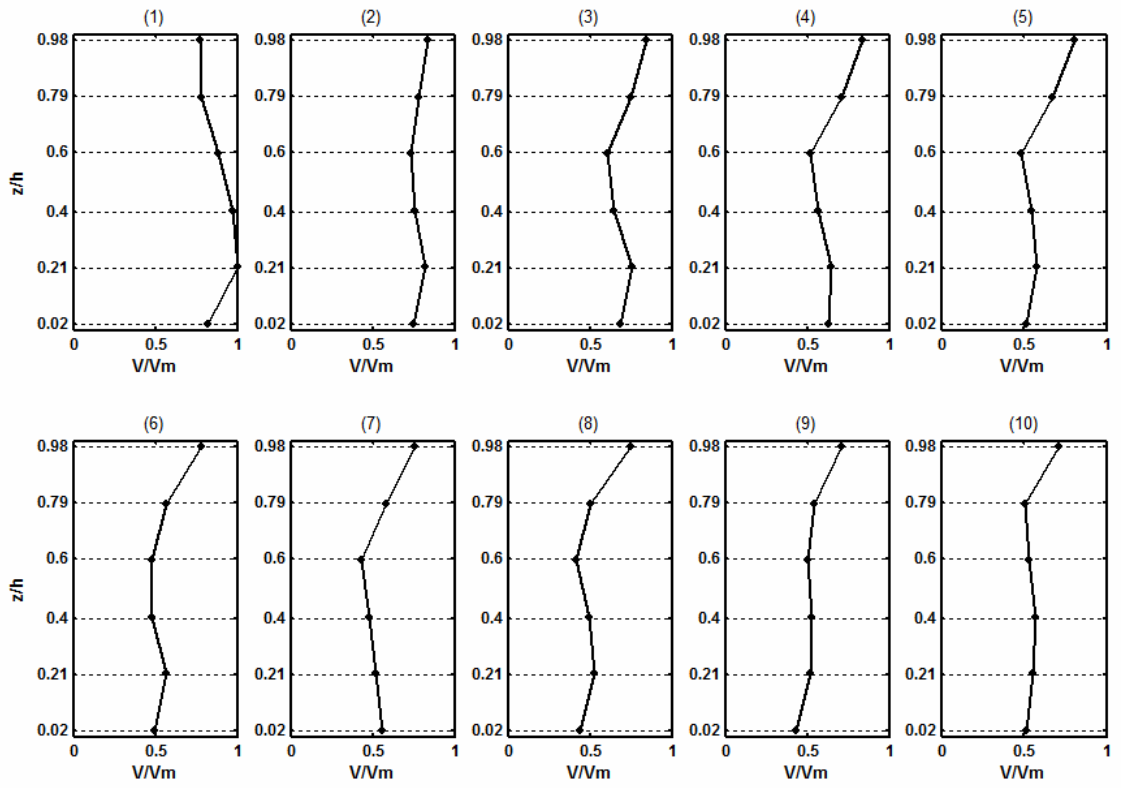


60° , $Q=100$ L/s
C-C eksenini

Ek 1.2 (devam).

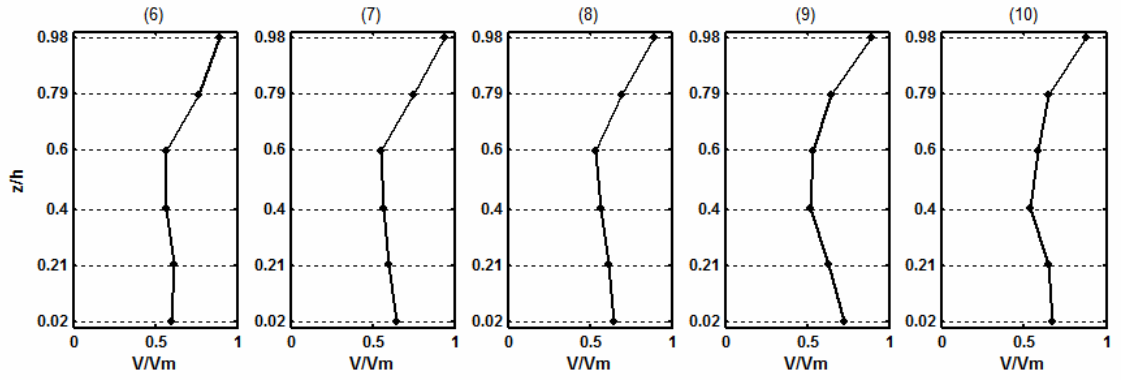
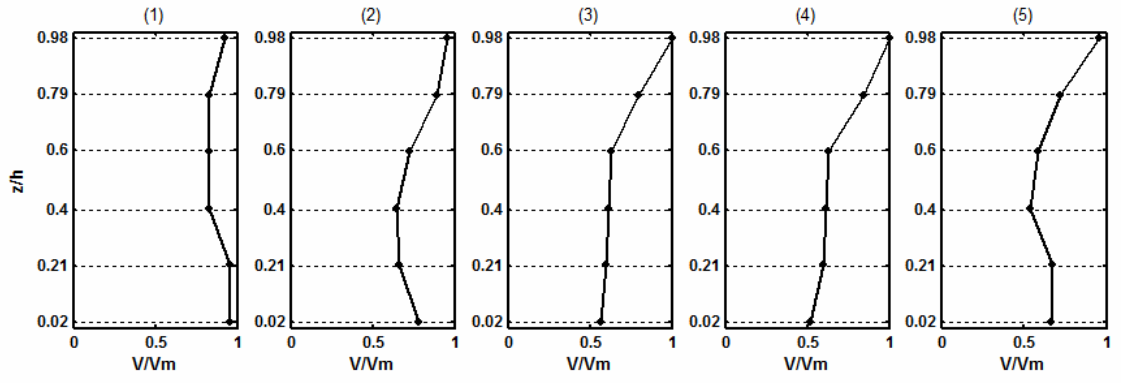


60° , $Q=100$ L/s
D-D eksenı

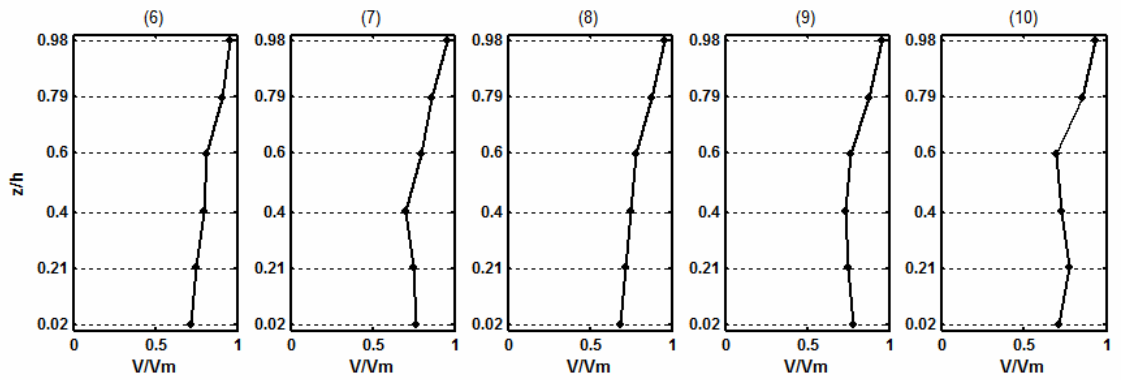
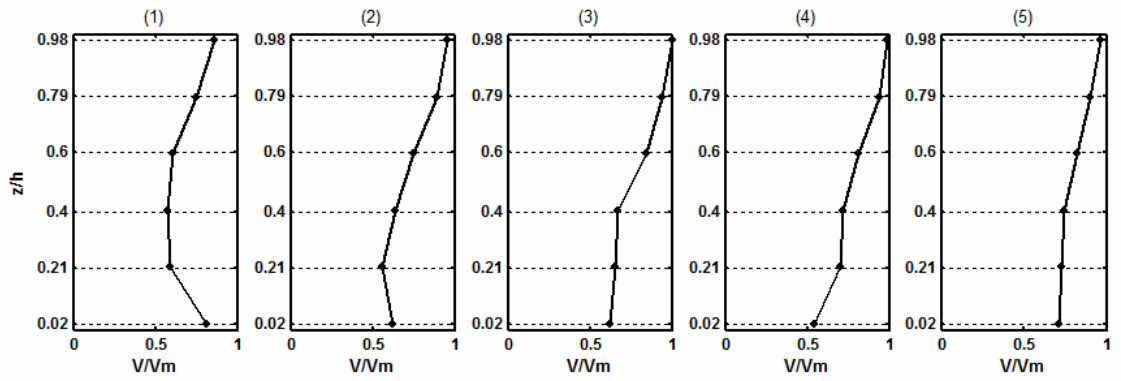


60° , $Q=100$ L/s
E-E eksenı

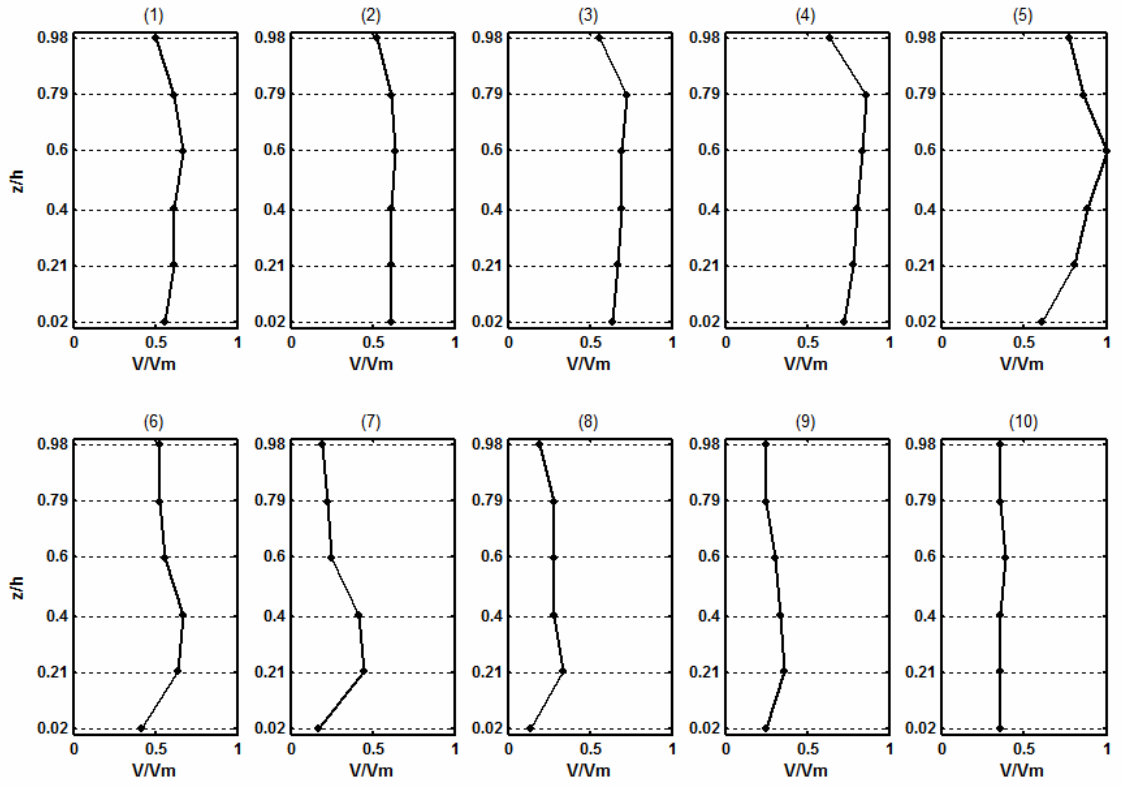
Ek 1.2 (devam).



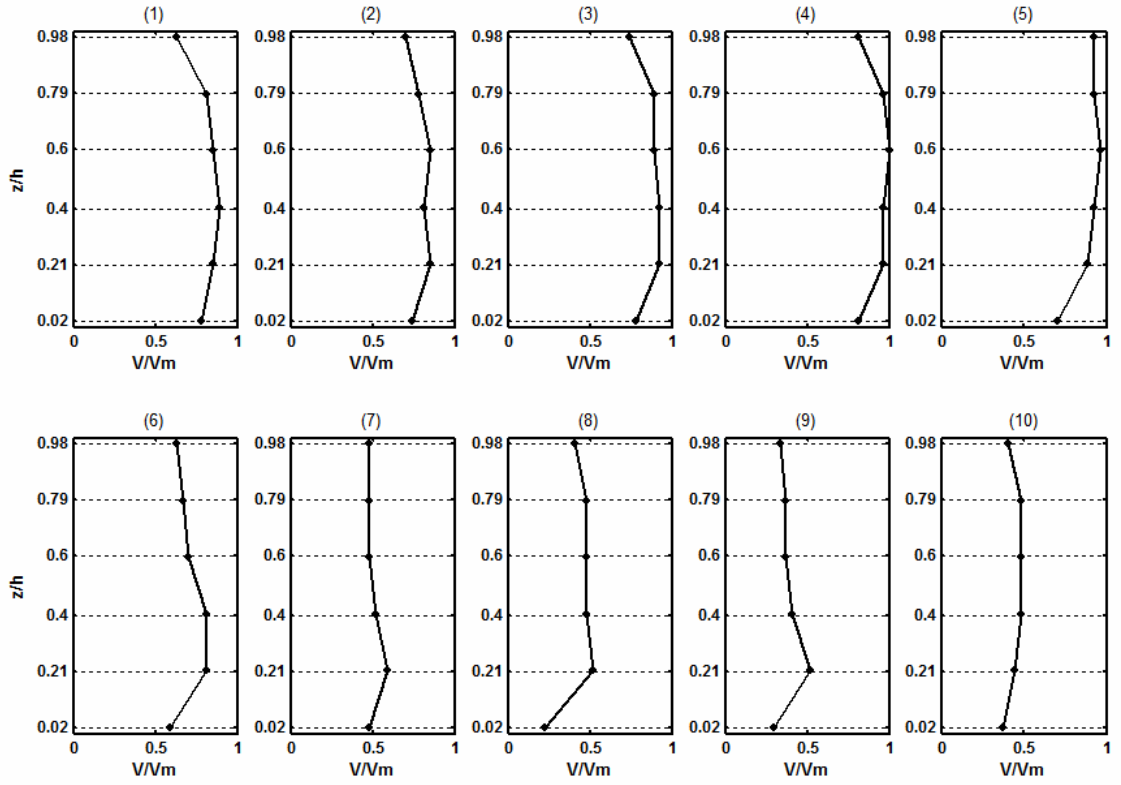
$Q=100$ L/s
F-F eksenli



60° , $Q=100$ L/s
G-G eksenli
Ek 1.2 (devam).

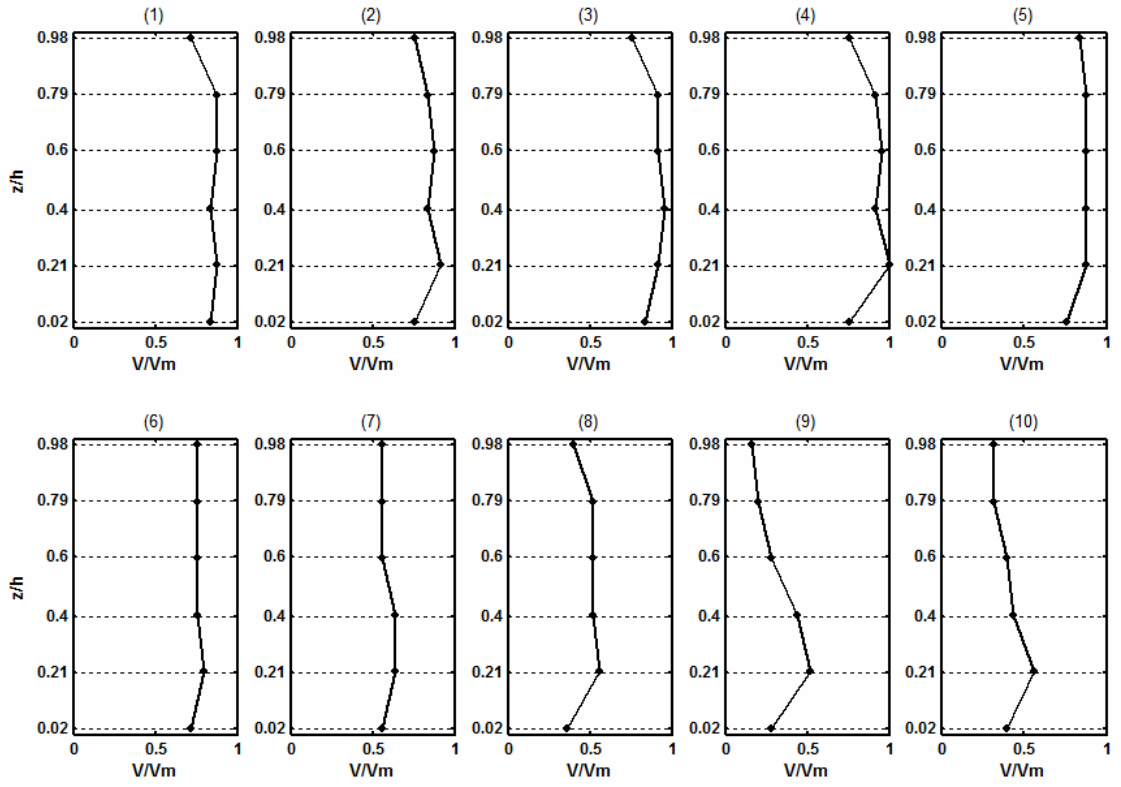


90° , $Q=30$ L/s
A-A eksenı

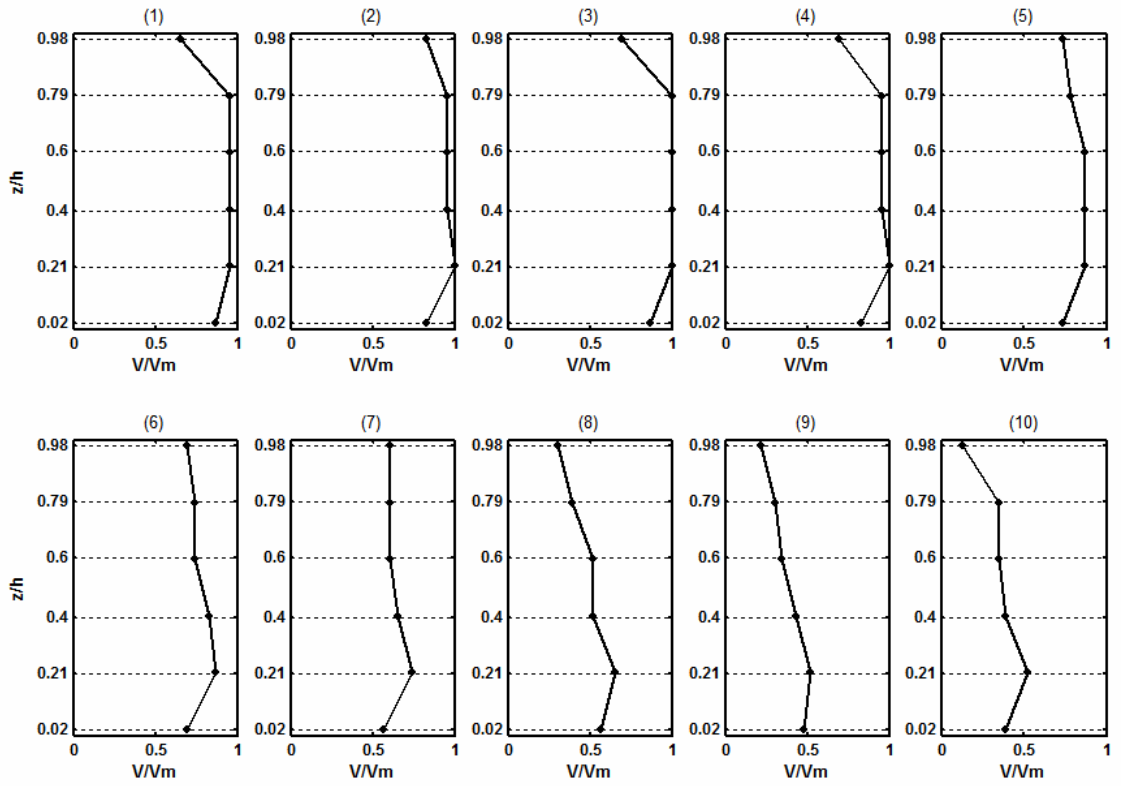


90° , $Q=30$ L/s
B-B eksenı

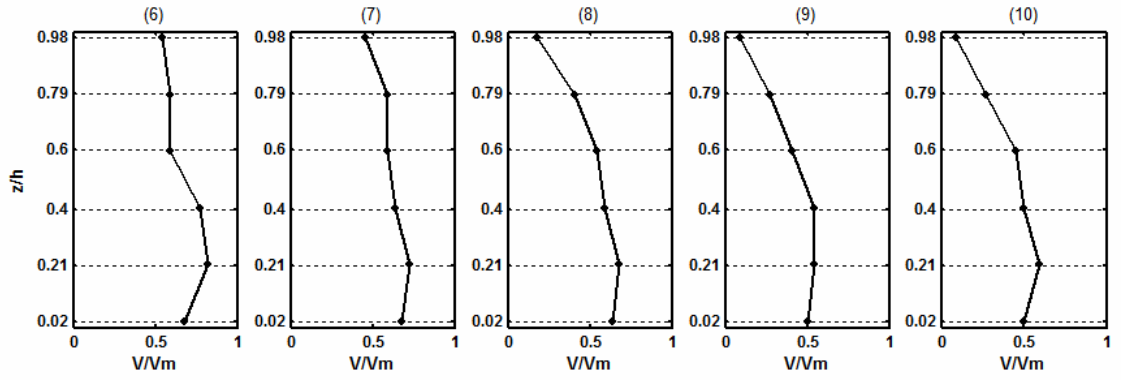
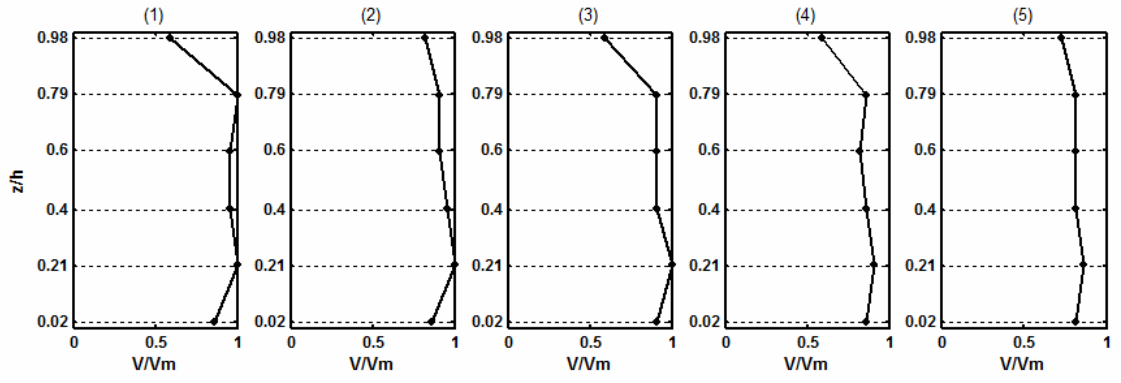
Ek 1.3 $\alpha = 90^\circ$ Yan savaktan $Q=30$ L/s'lik debinin aktif savaklanması halinde teğetsel hız dağılımları



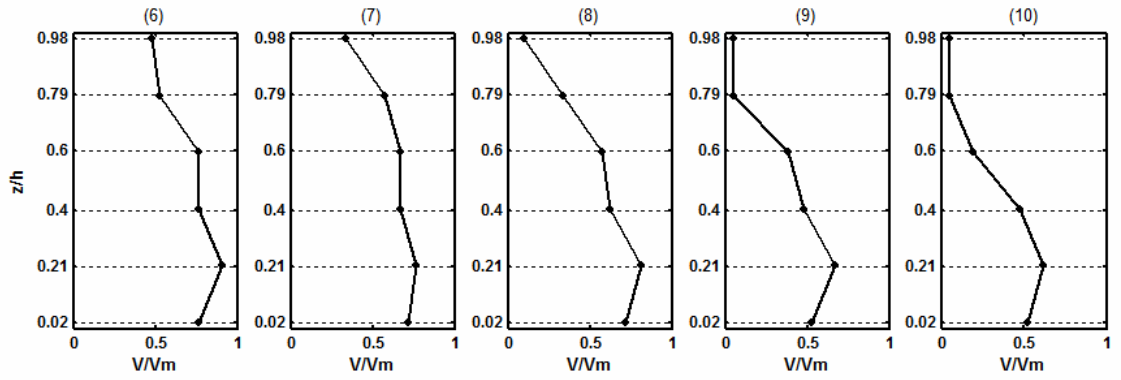
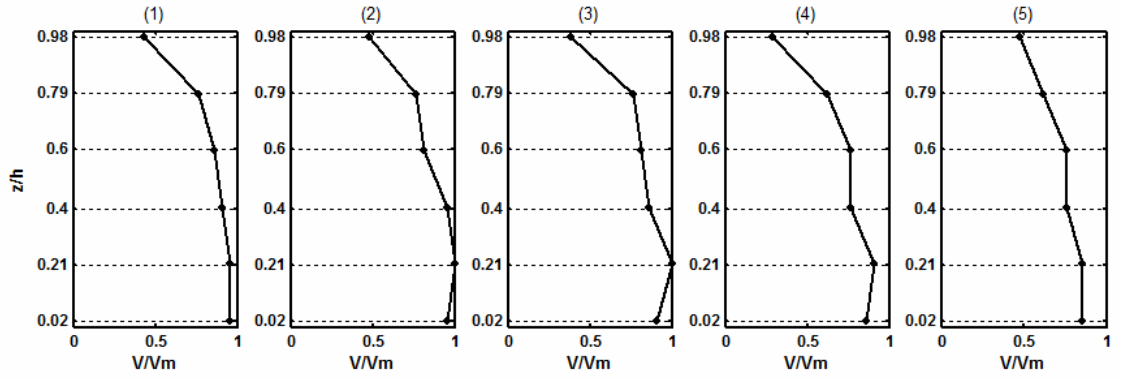
90° , $Q=30$ L/s
C-C eksenini



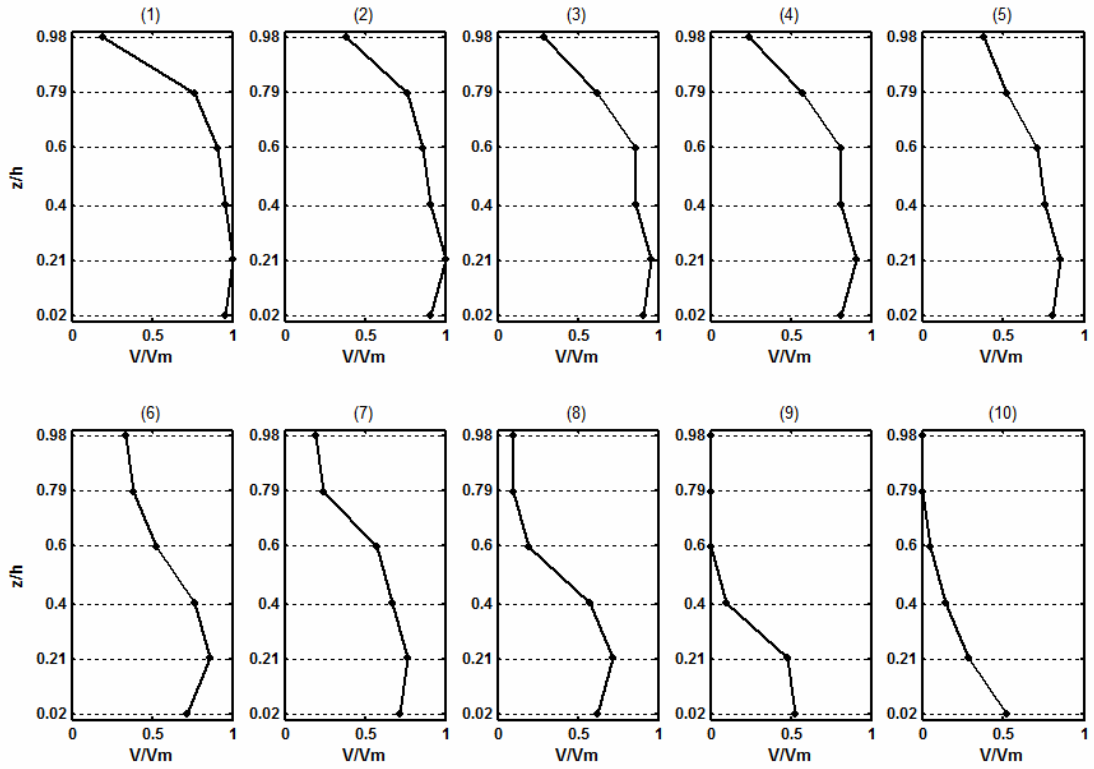
90° , $Q=30$ L/s
D-D eksenini
Ek 1.3 (devam).



90° , $Q=30$ L/s
E-E eksenini



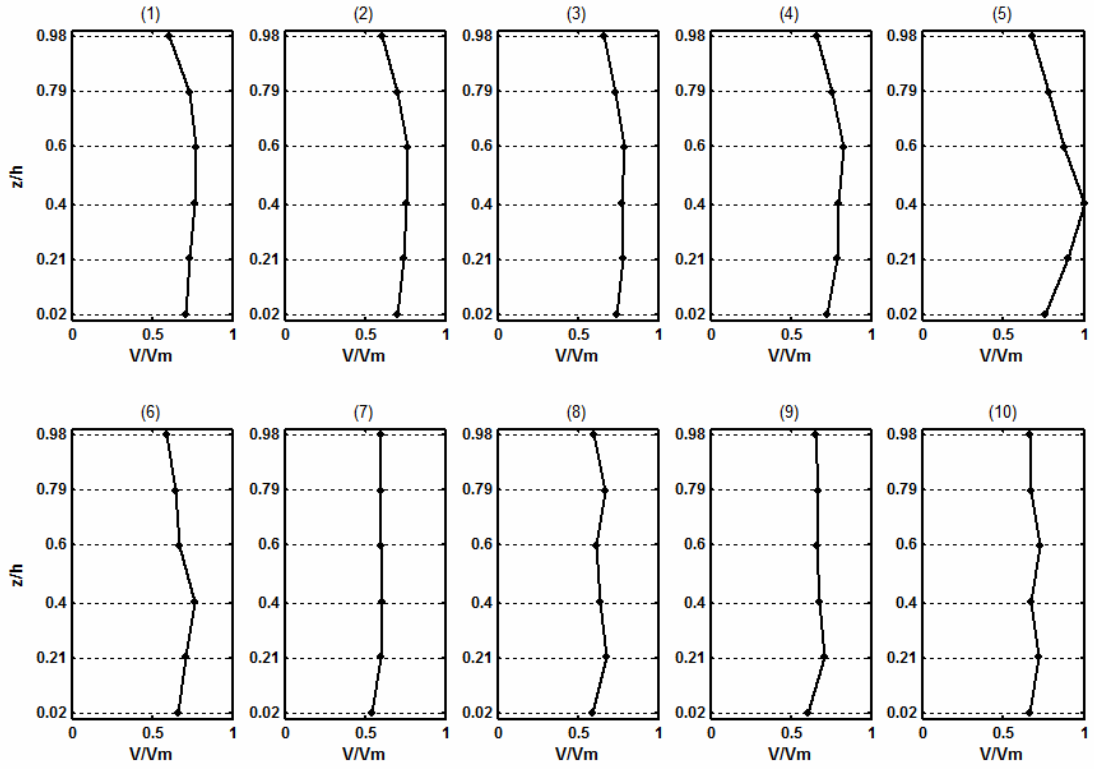
90° , $Q=30$ L/s
F-F eksenini
Ek 1.3 (devam).



90° , $Q=30$ L/s

G-G eksenı

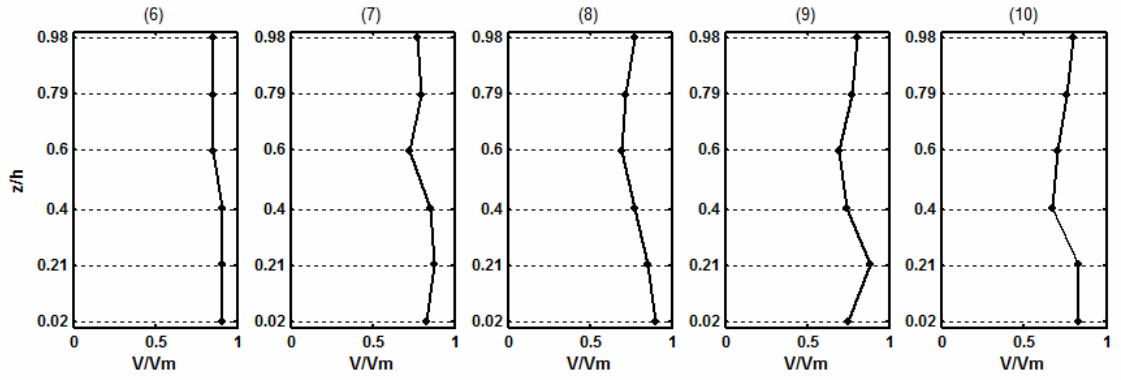
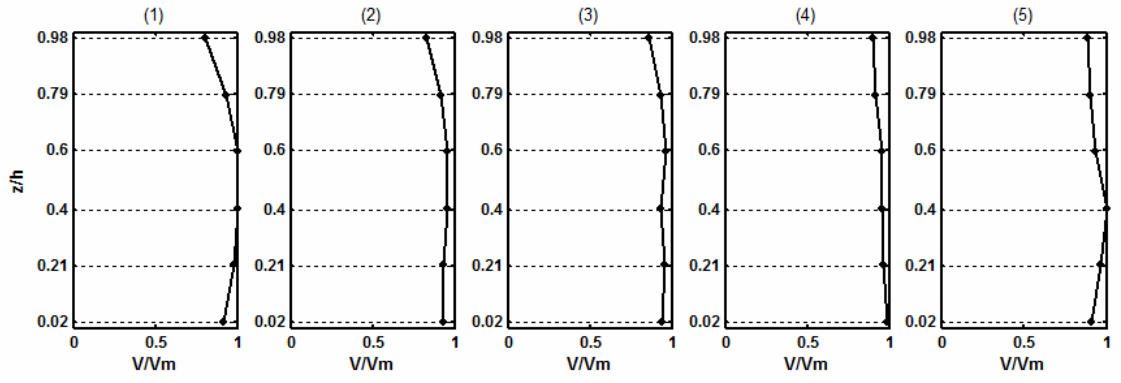
Ek 1.3 (devam).



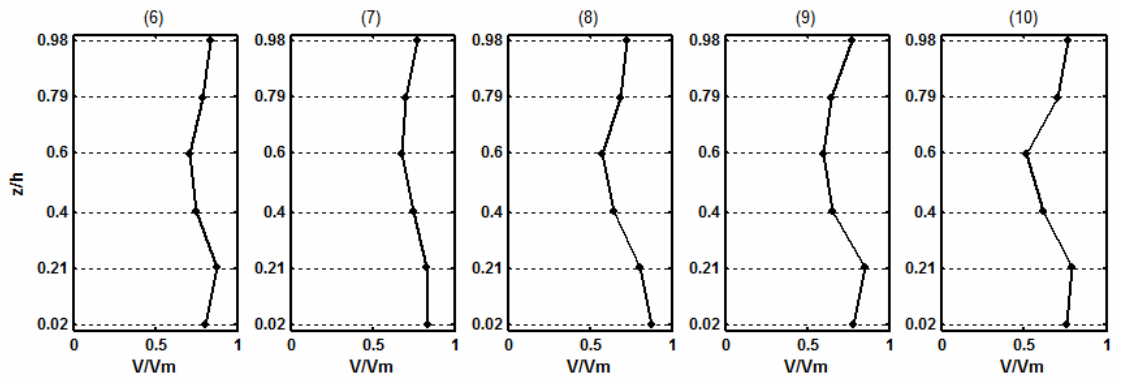
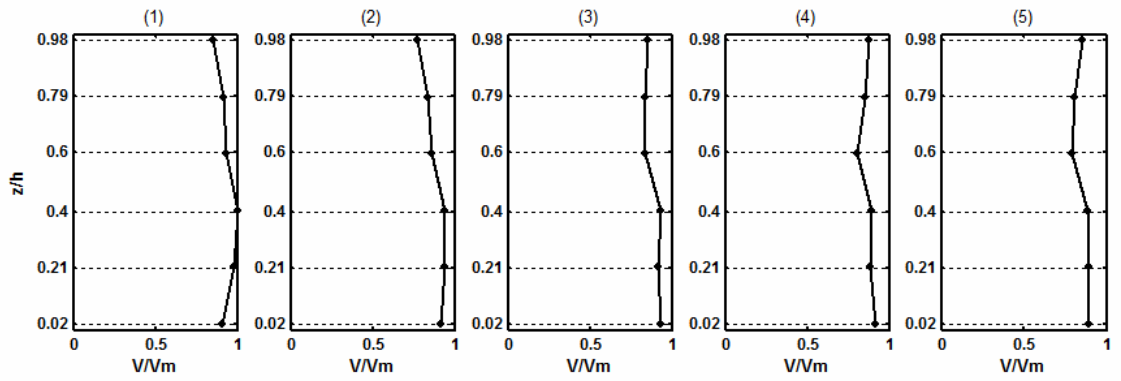
90° , $Q=100$ L/s

A-A eksenı

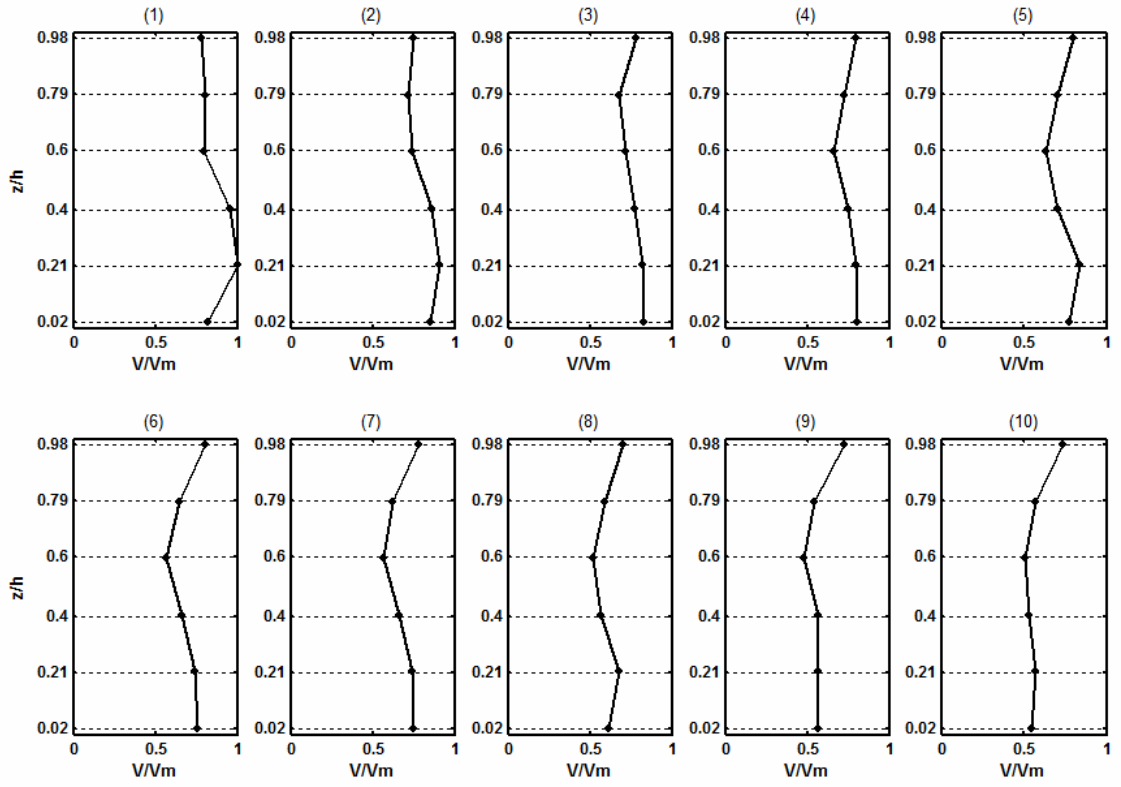
Ek 1.4 $\alpha = 90^\circ$ Yan savaktan $Q=100$ L/s'lik debinin aktif savaklanması halinde teğetsel hız dağılımları



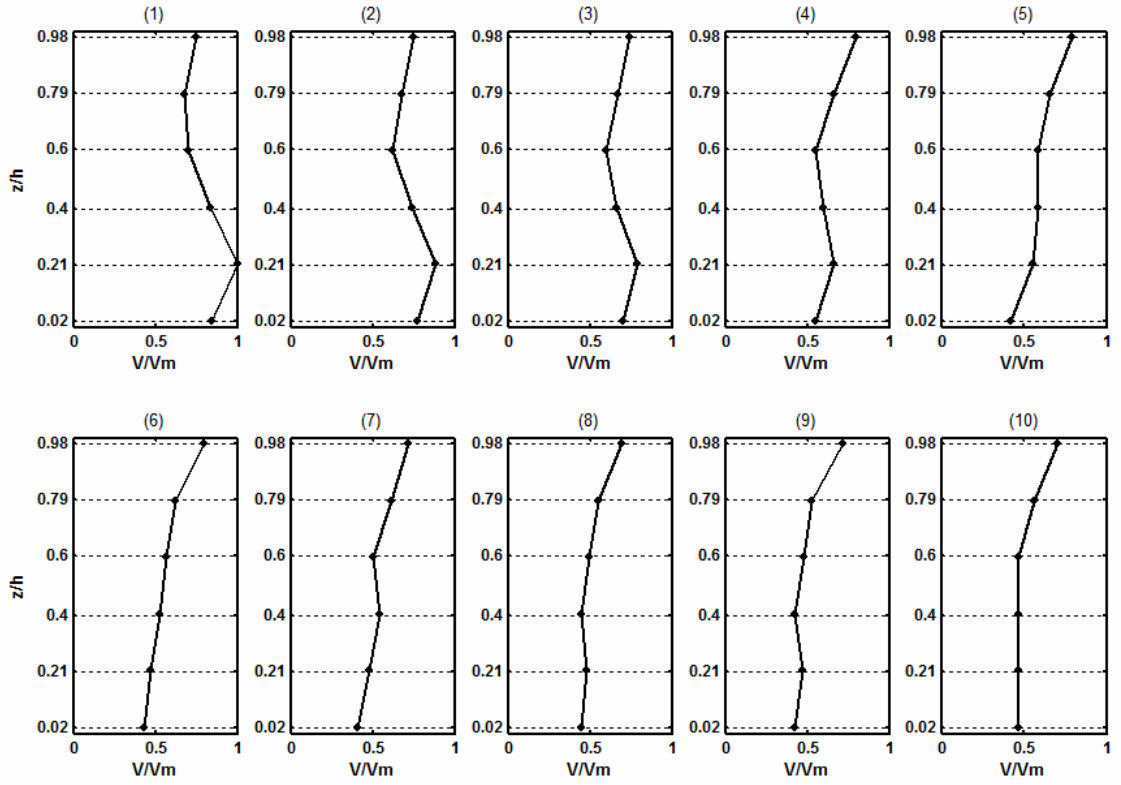
90°, Q=100 L/s
B-B eksenı



90°, Q=100 L/s
C-C eksenı
Ek 1.4 (devam).

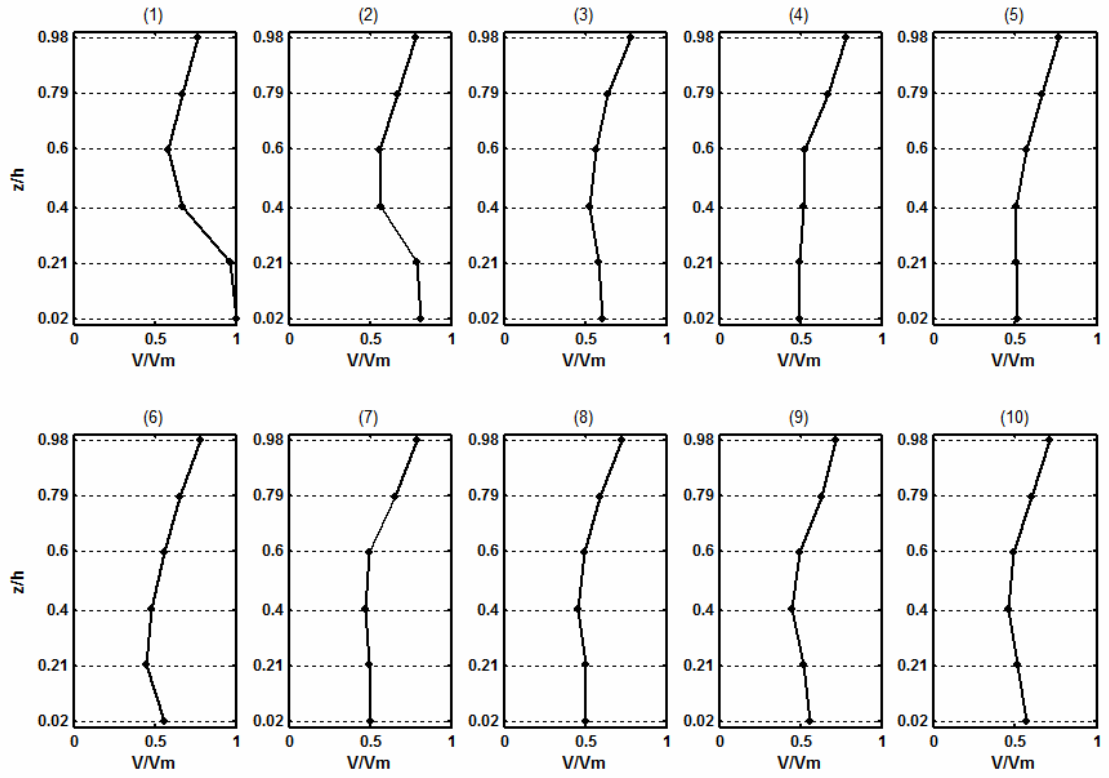


90° , $Q=100$ L/s
D-D eksenı

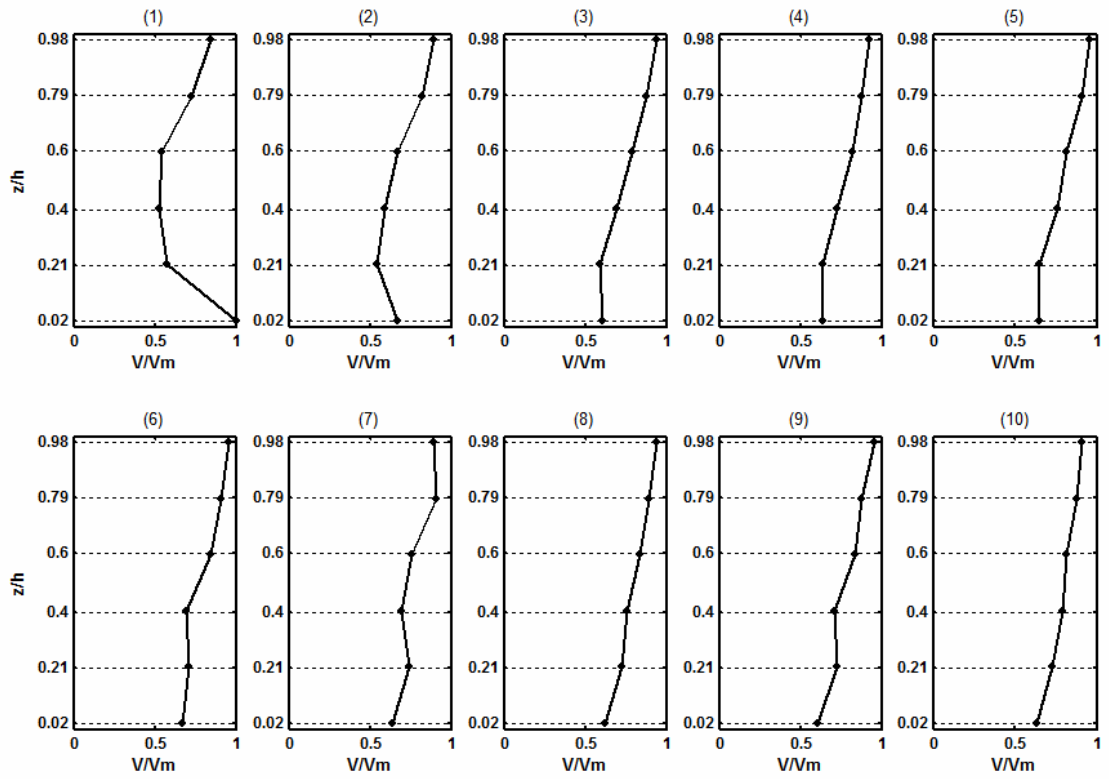


90° , $Q=100$ L/s
E-E eksenı

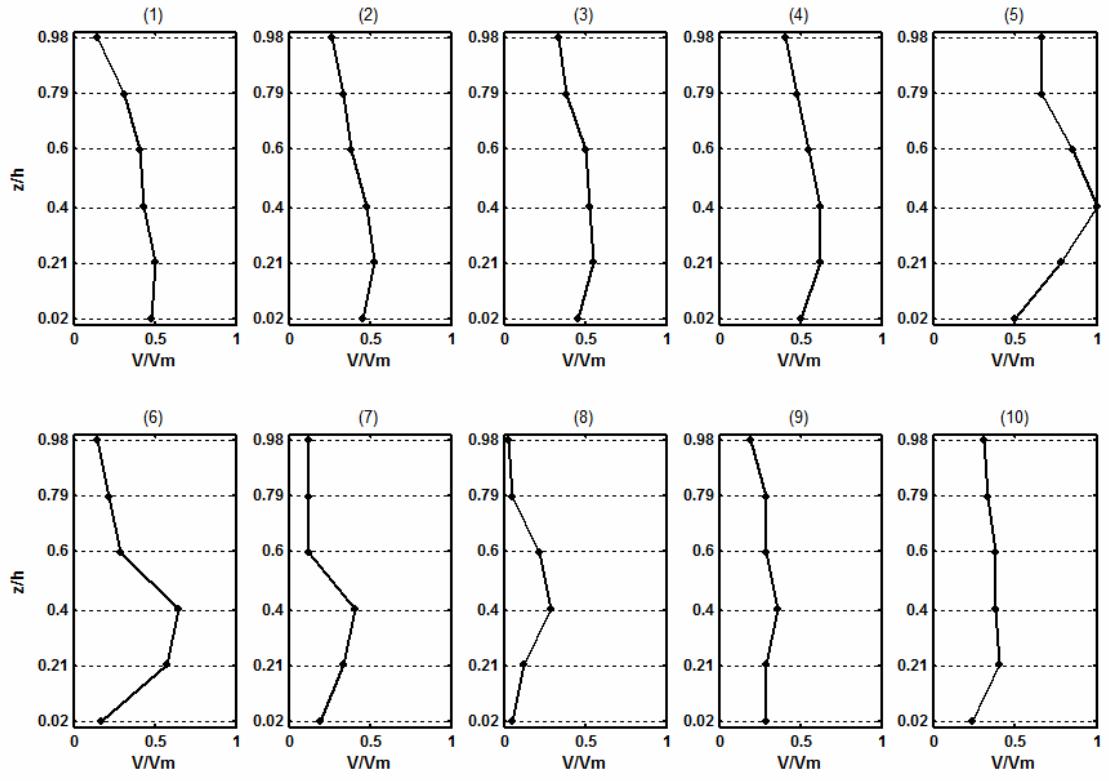
Ek 1.4 (devam).



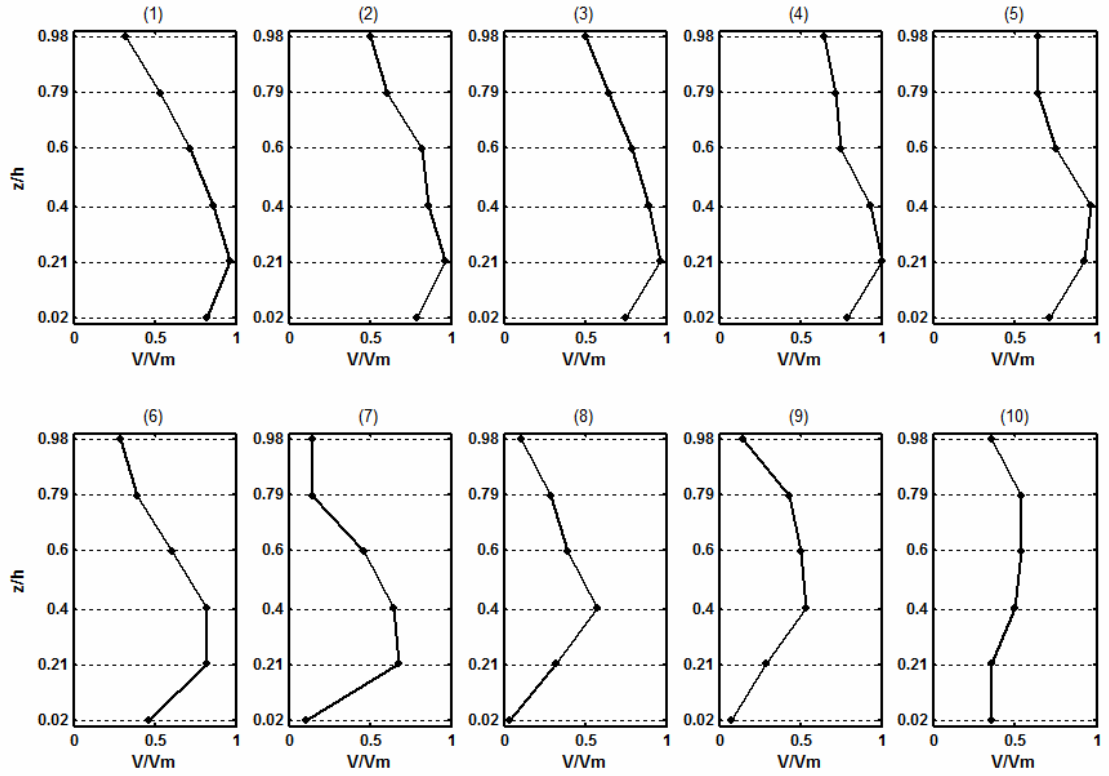
90° , $Q=100$ L/s
F-F eksenini



90° , $Q=100$ L/s
G-G eksenini
Ek 1.4 (devam).

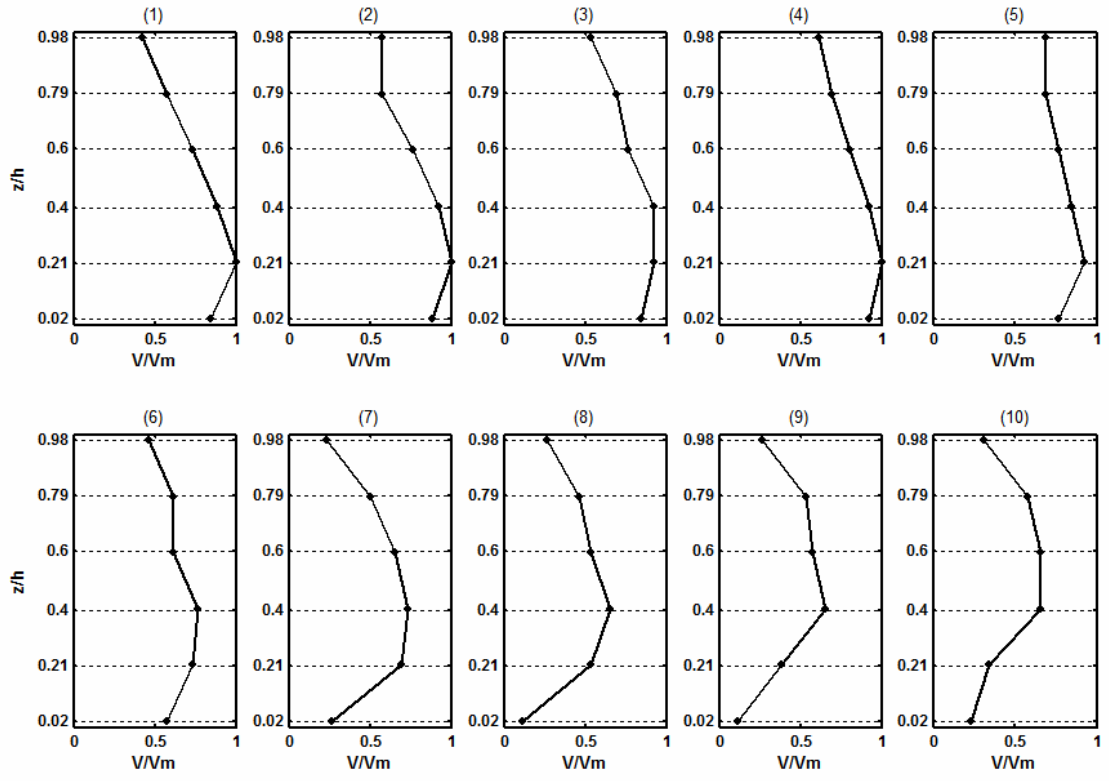


0° , $Q=30$ L/s
A-A eksenı

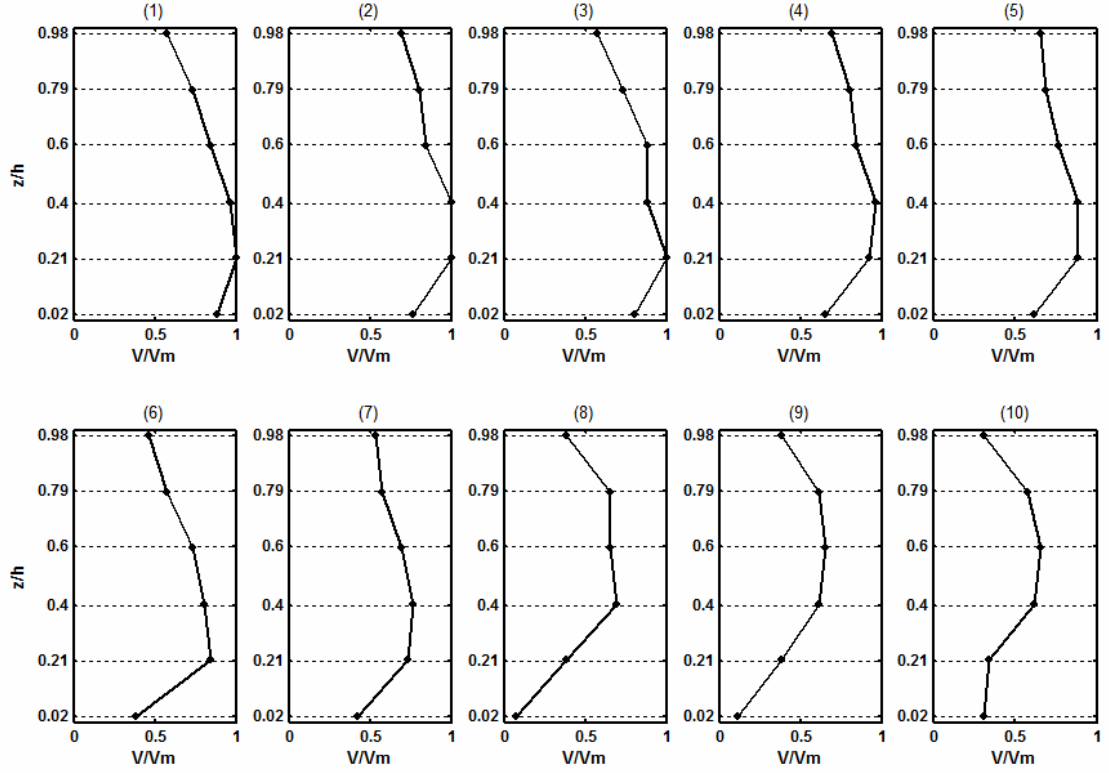


0° , $Q=30$ L/s
B-B eksenı

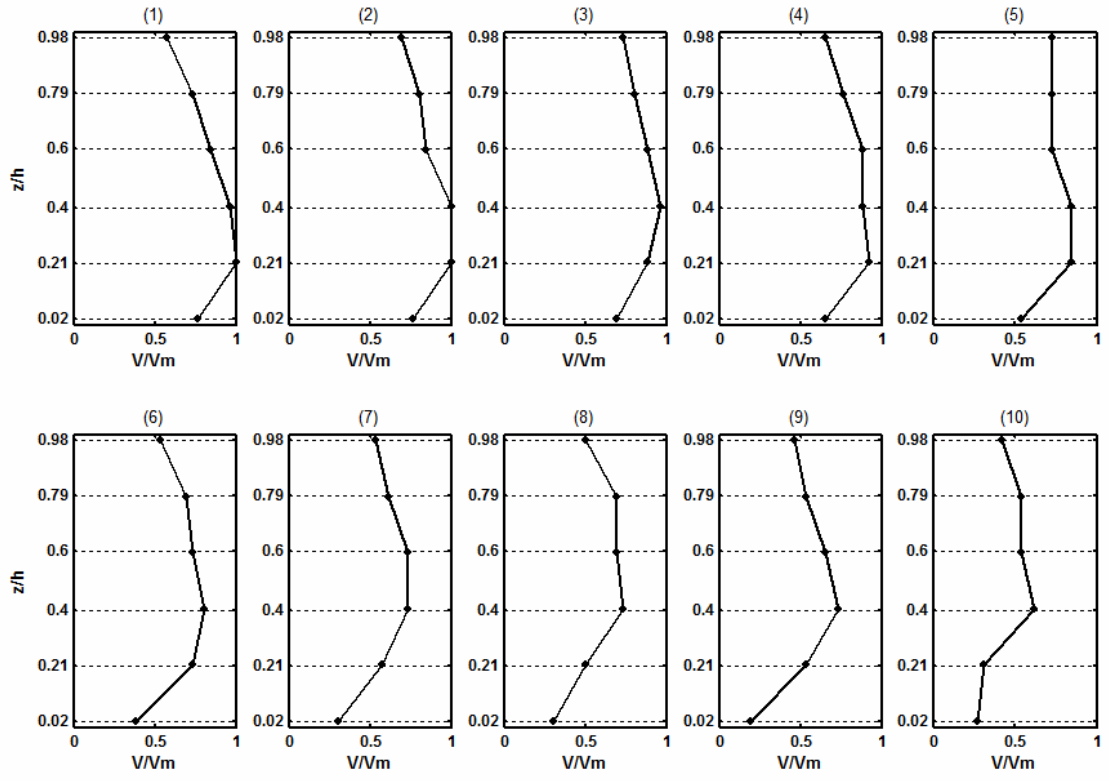
Ek 1.5 $\alpha = 0^\circ$ Yan savaktan $Q=30$ L/s'lık debinin aktif savaklanması halinde teğetsel hız dağılımları



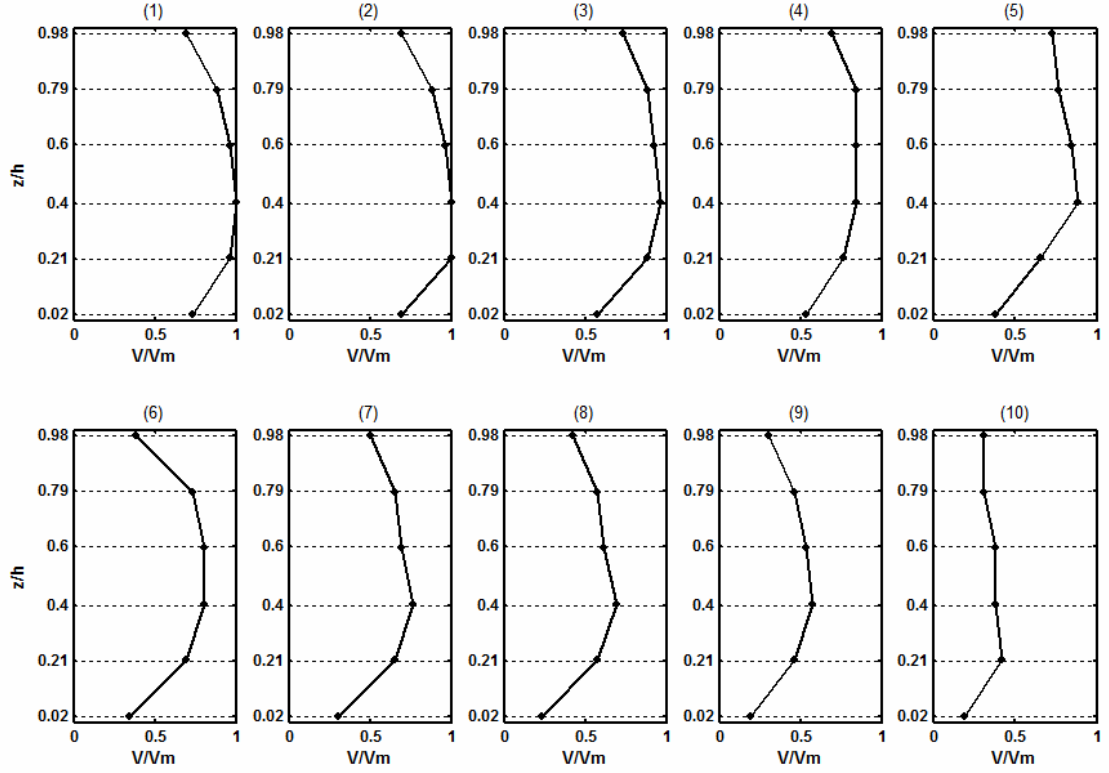
0^0 , $Q=30$ L/s
C-C eksenini



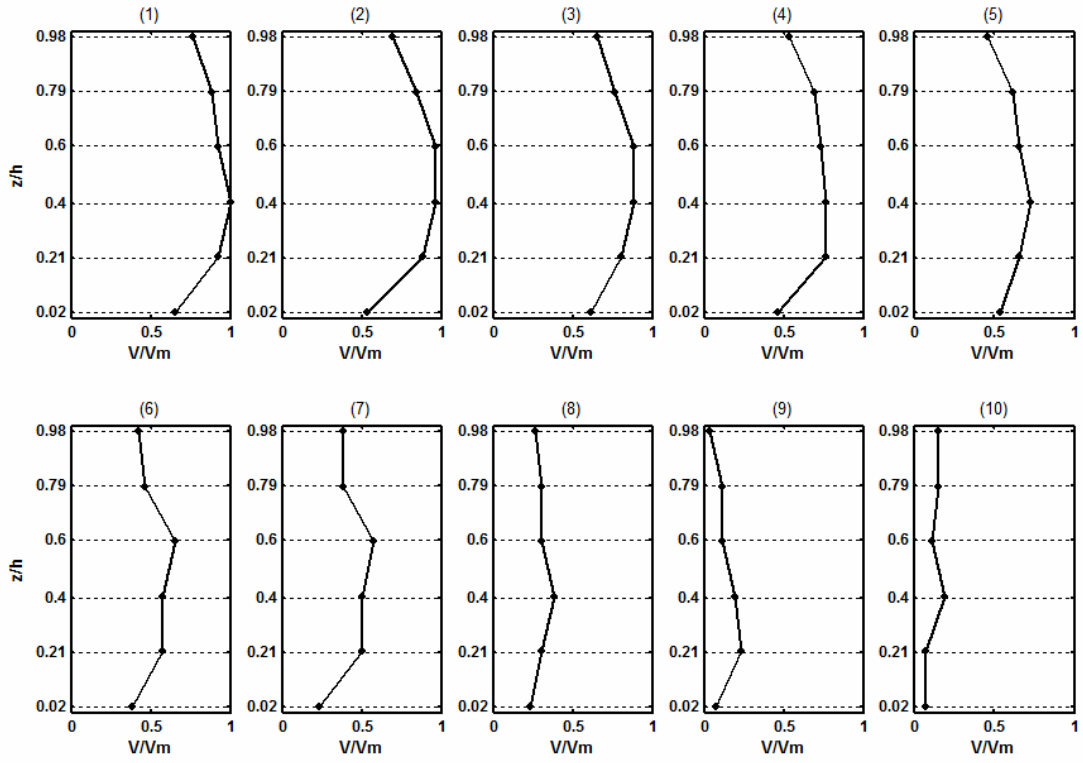
0^0 , $Q=30$ L/s
D-D eksenini
Ek 1.5 (devam).



0° , $Q=30$ L/s
E-E eksenini



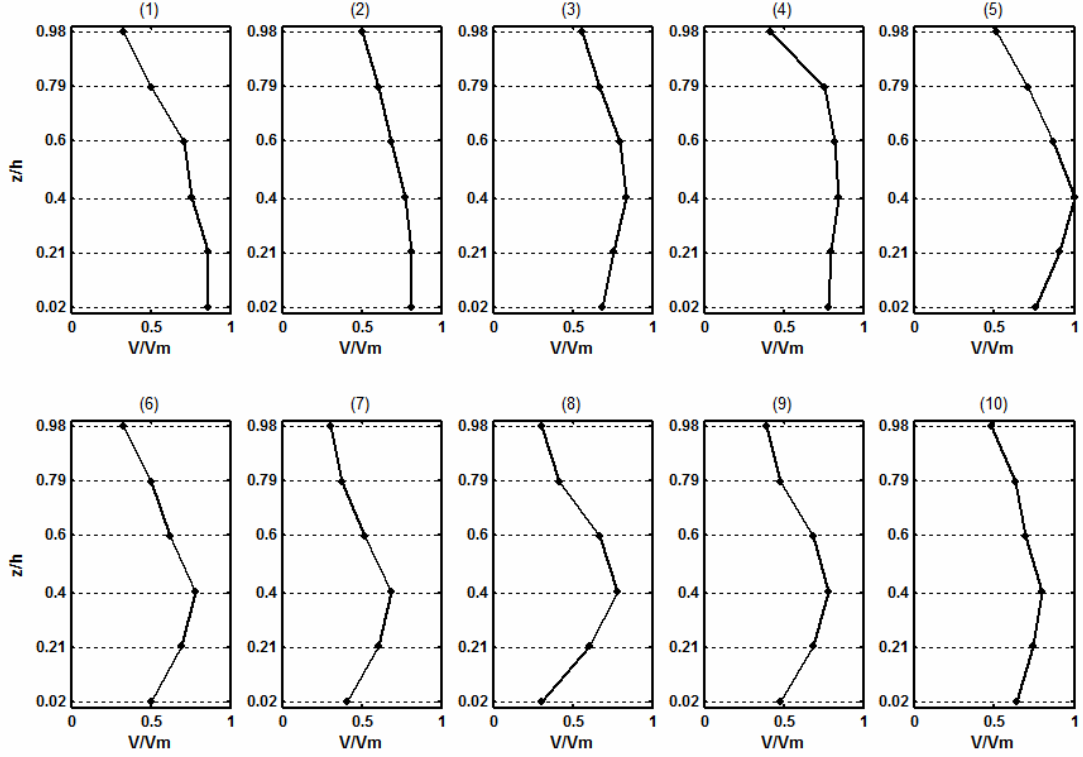
0° , $Q=30$ L/s
F-F eksenini
Ek 1.5 (devam).



0° , $Q=30$ L/s

G-G eksenli

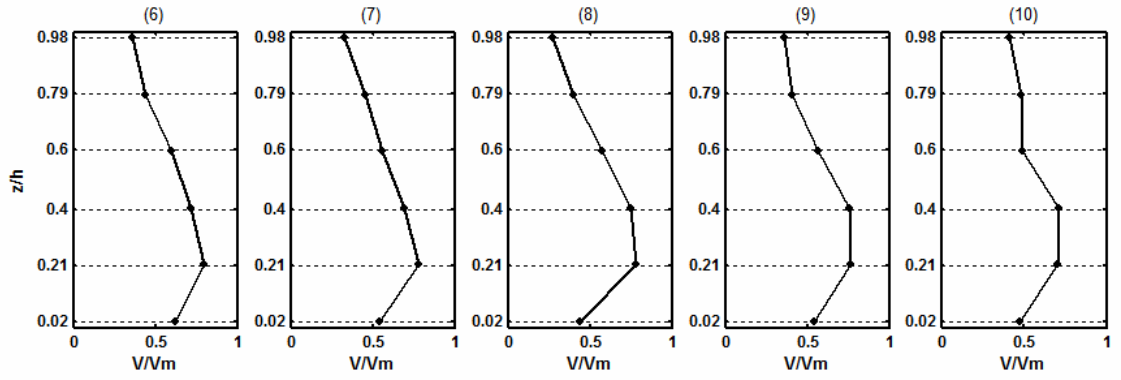
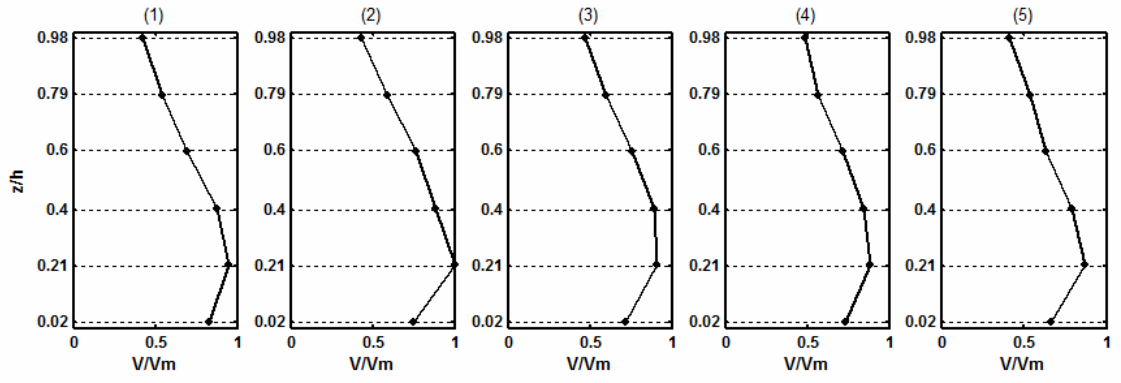
Ek 1.5 (devam).



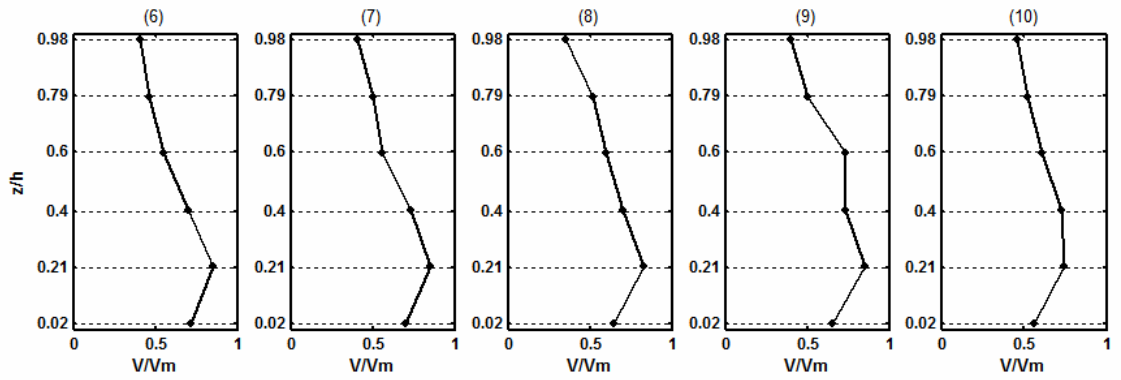
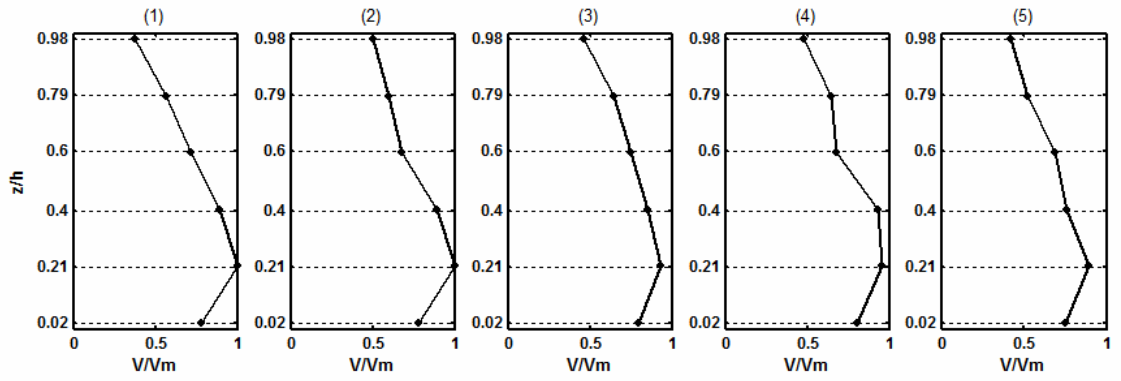
0° , $Q=100$ L/s

A-A eksenli

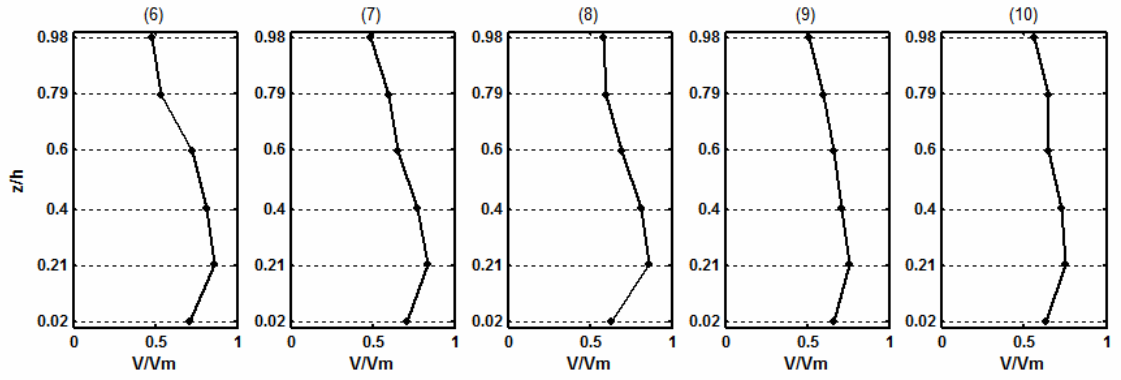
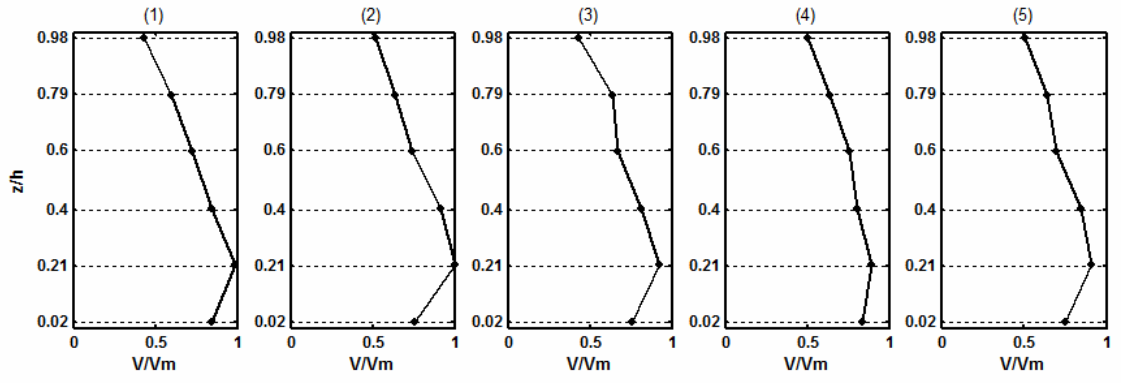
Ek 1.6 $\alpha = 0^\circ$ Yan savaktan $Q=100$ L/s'lik debinin aktif savaklanması halinde teğetsel hız dağılımları



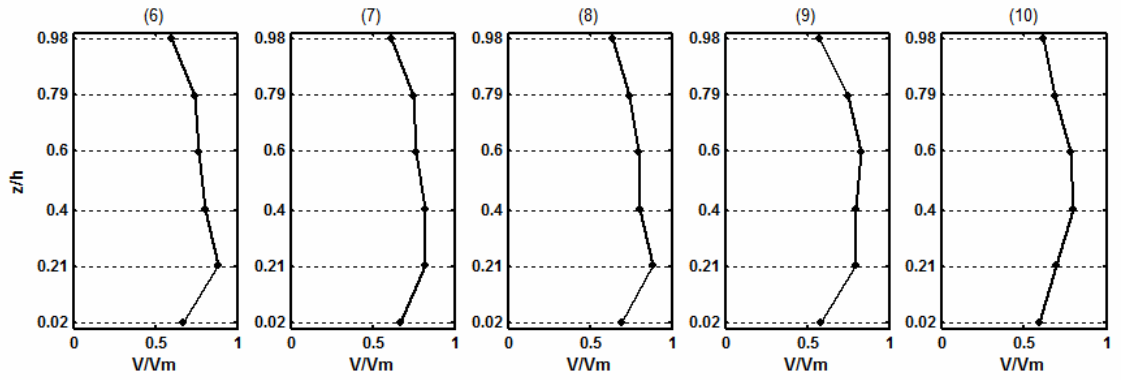
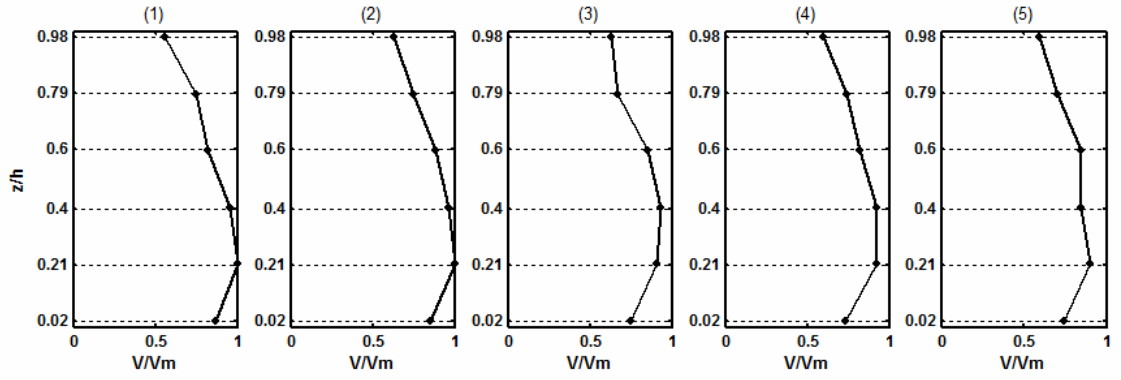
0^0 , $Q=100$ L/s
B-B eksenini



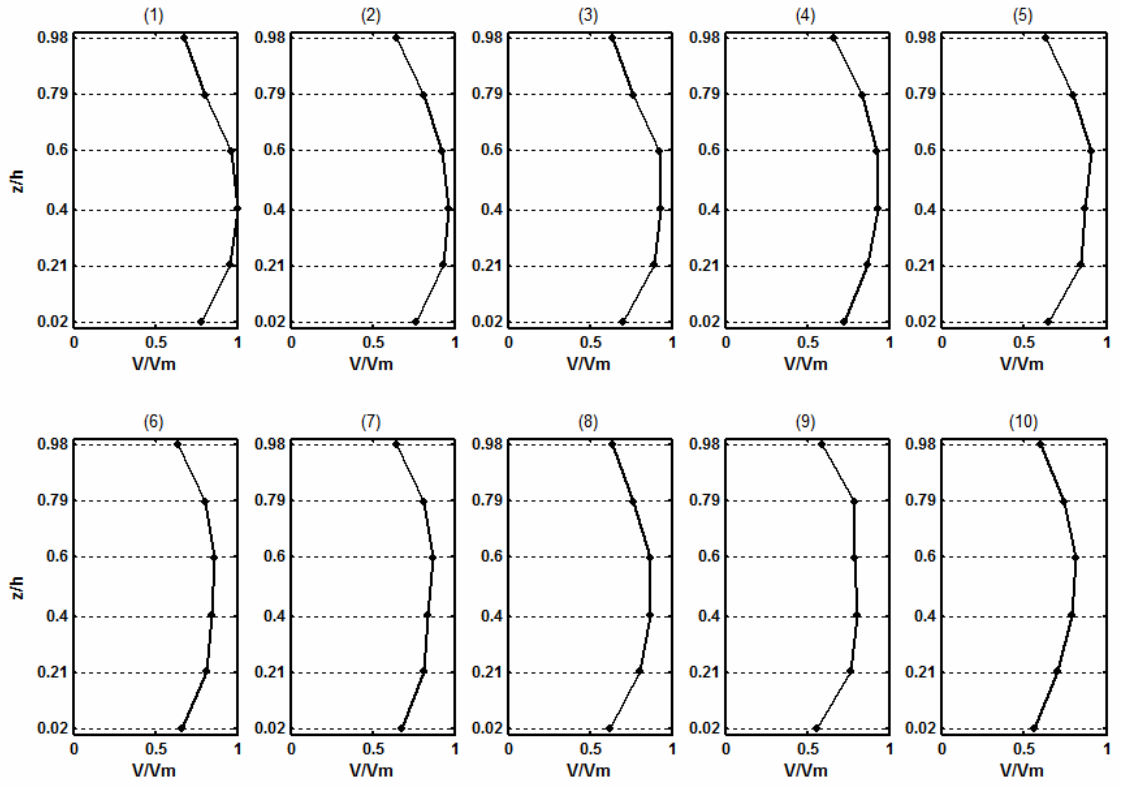
0^0 , $Q=100$ L/s
C-C eksenini
Ek 1.6 (devam).



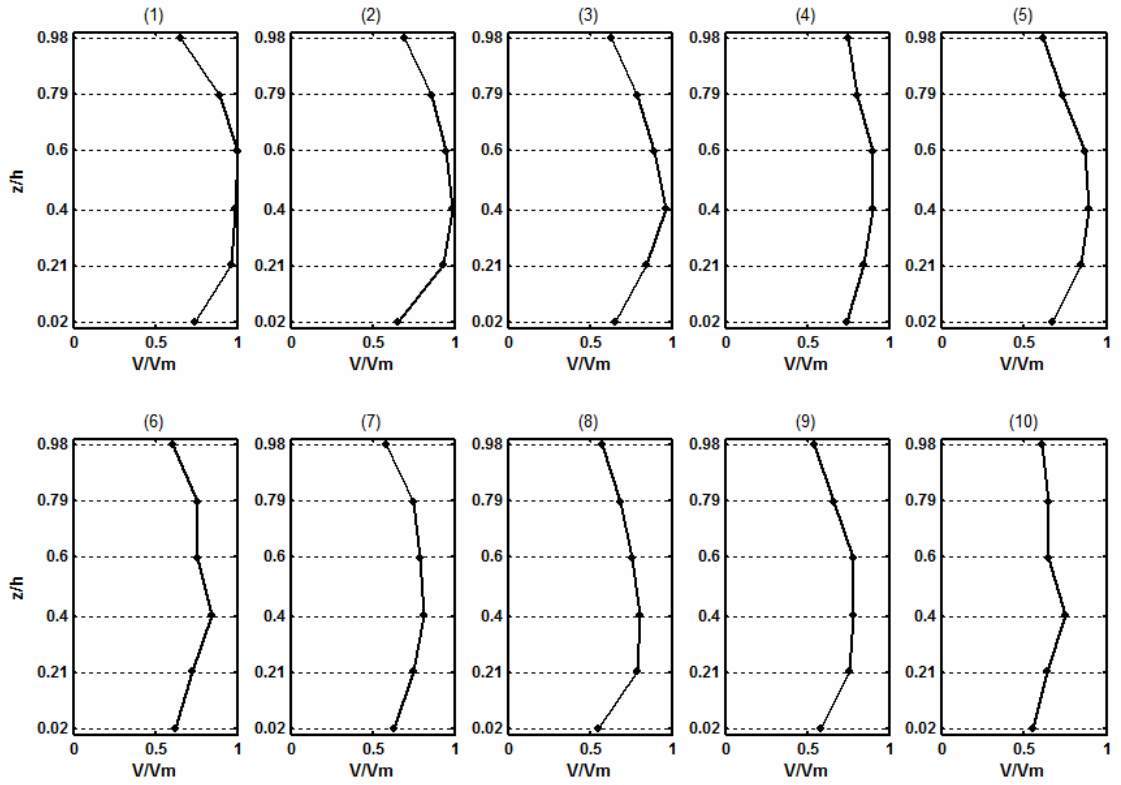
0^0 , $Q=100$ L/s
D-D eksenı



0^0 , $Q=100$ L/s
E-E eksenı
Ek 1.6 (devam).

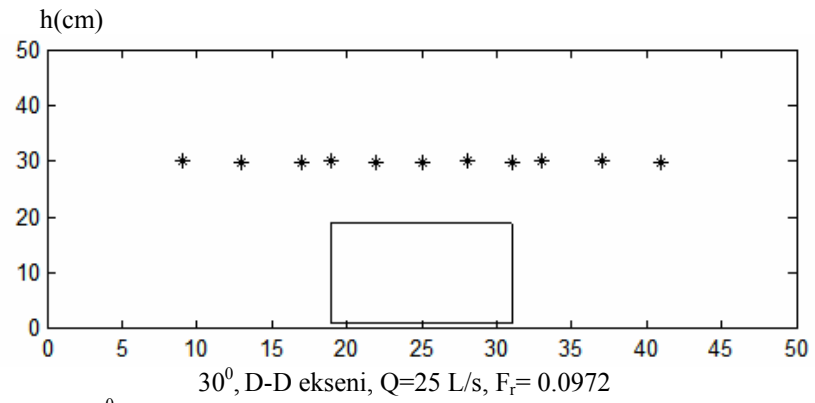
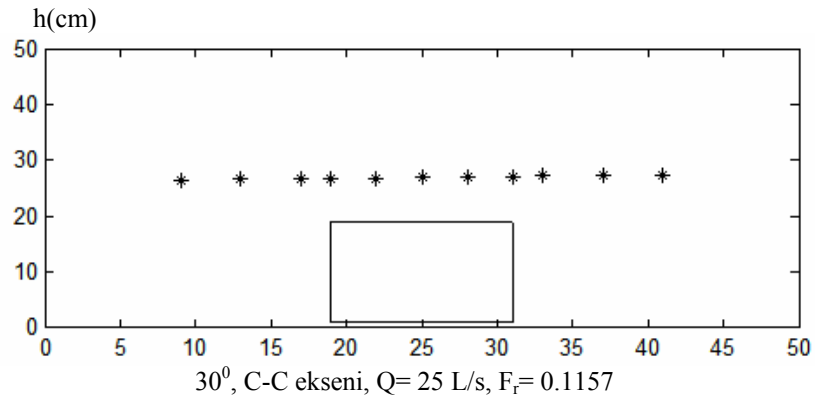
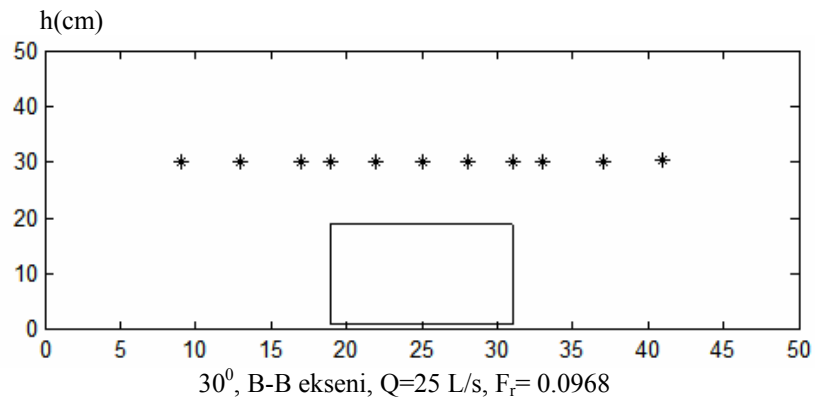
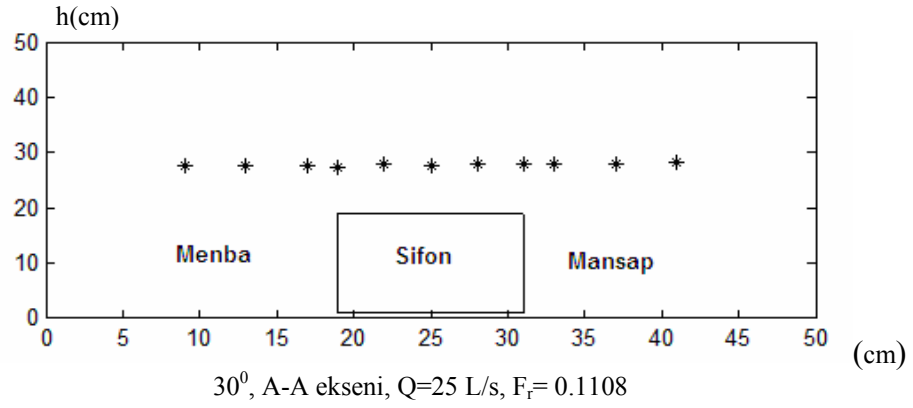


0^0 , $Q=100$ L/s
F-F eksenı

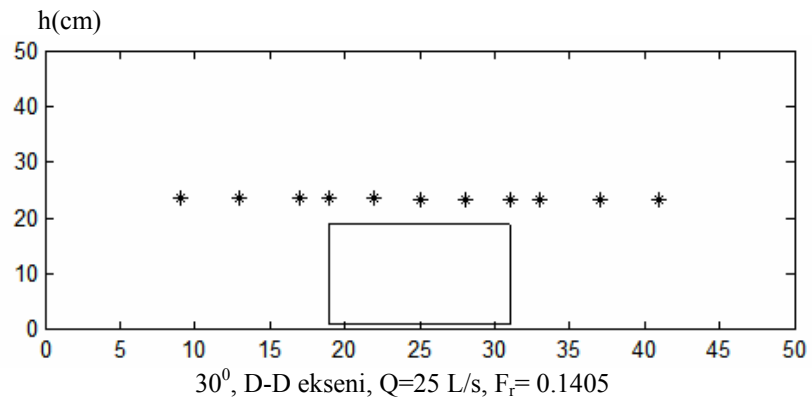
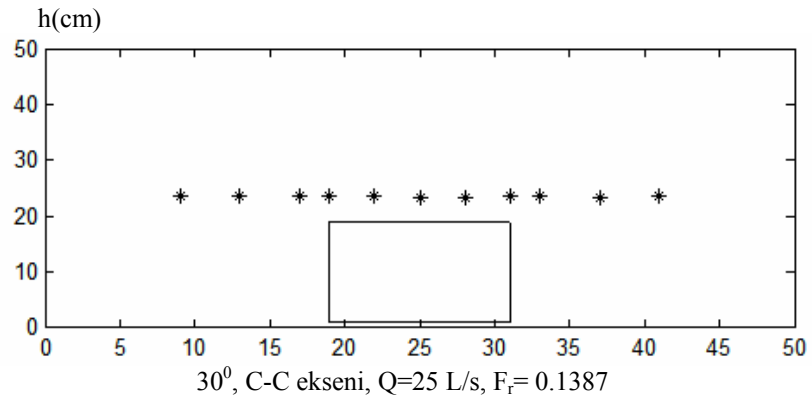
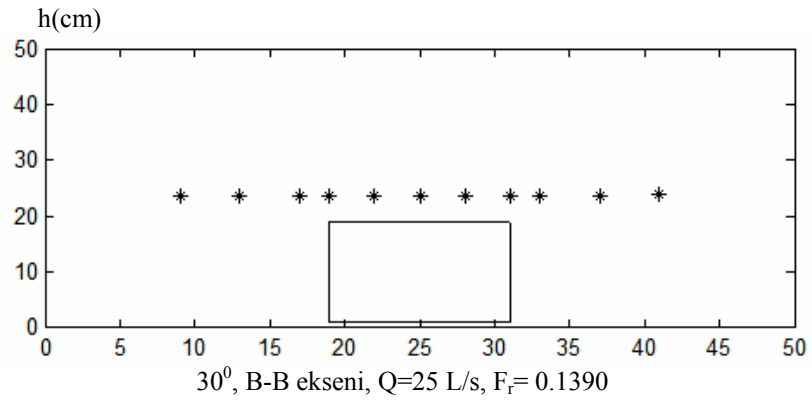
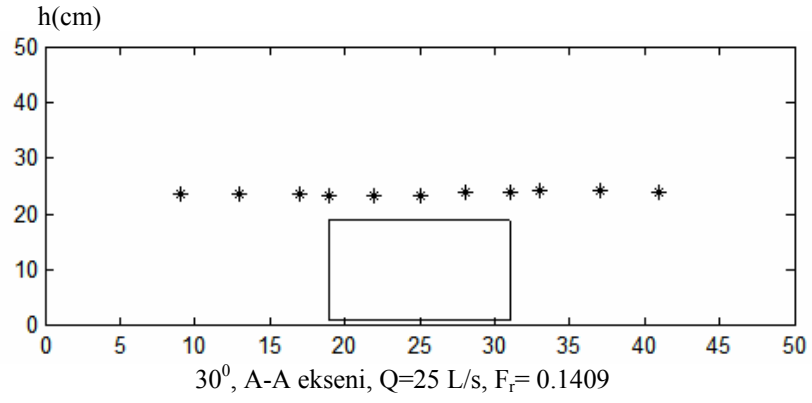


0^0 , $Q=100$ L/s
G-G eksenı
Ek 1.6 (devam).

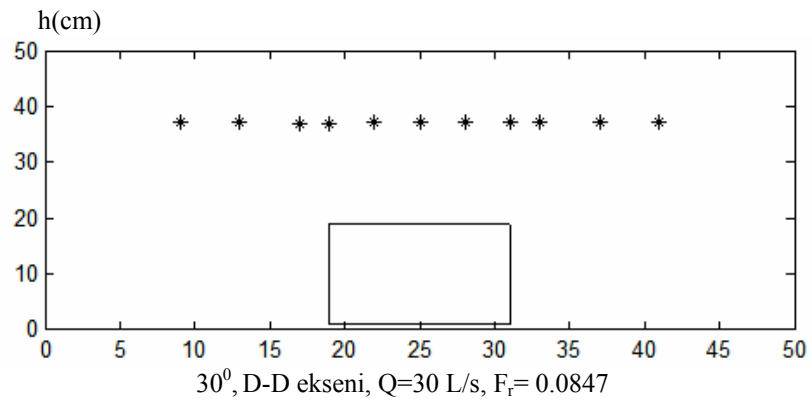
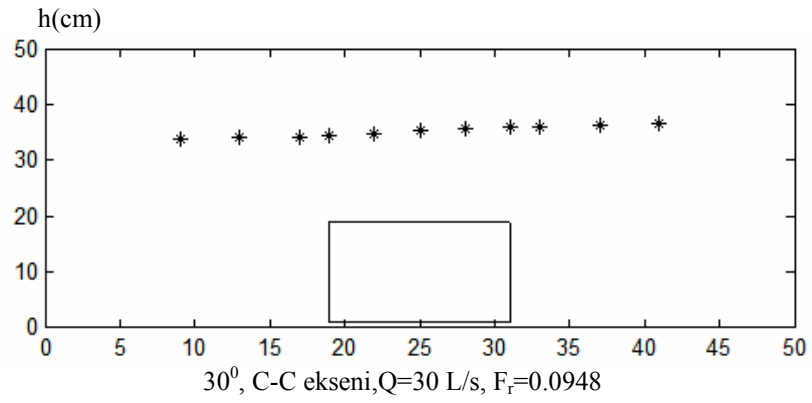
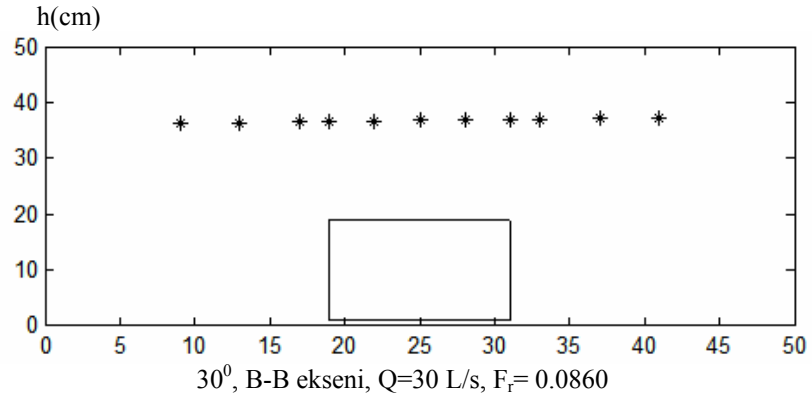
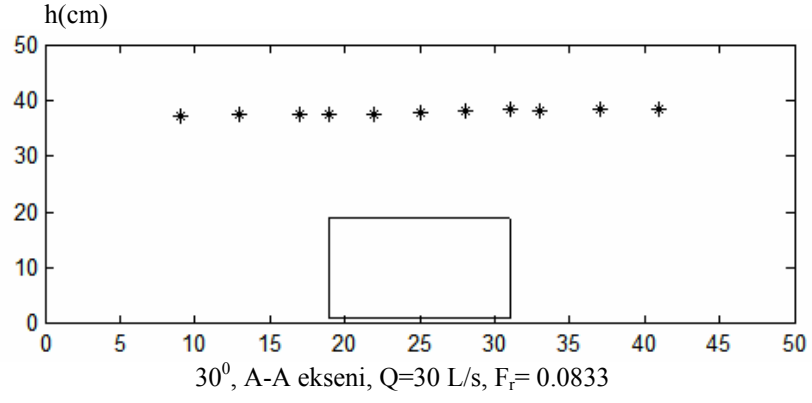
EK-2 Su Yüzü Profilleri



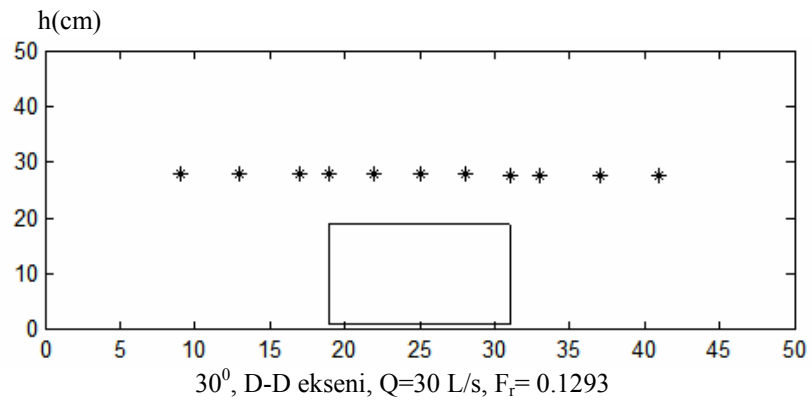
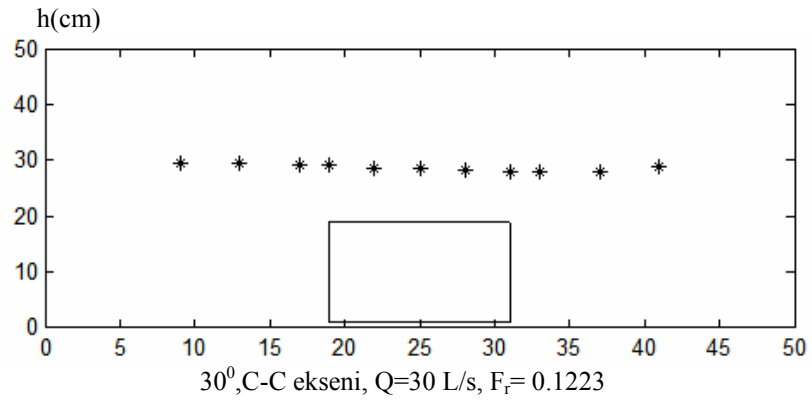
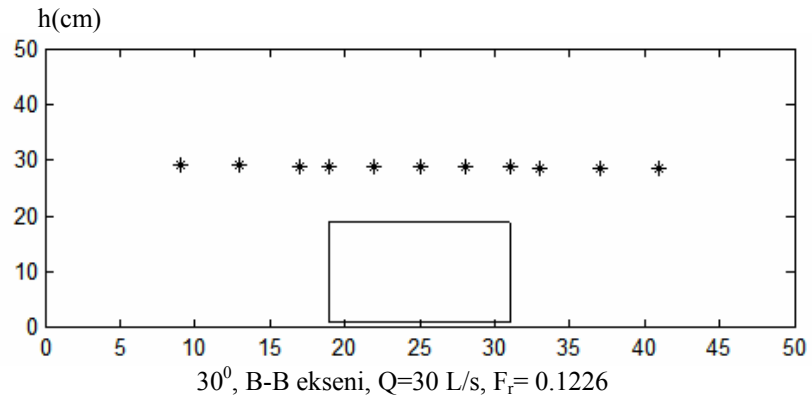
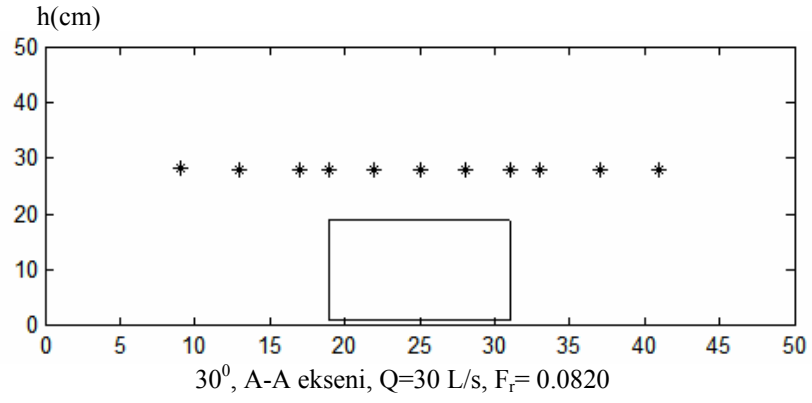
Ek 2.1 $\alpha = 30^\circ$, $Q=25$ L/s 'de yan savak eşiğı boyunca elde edilen su yüzü profilleri



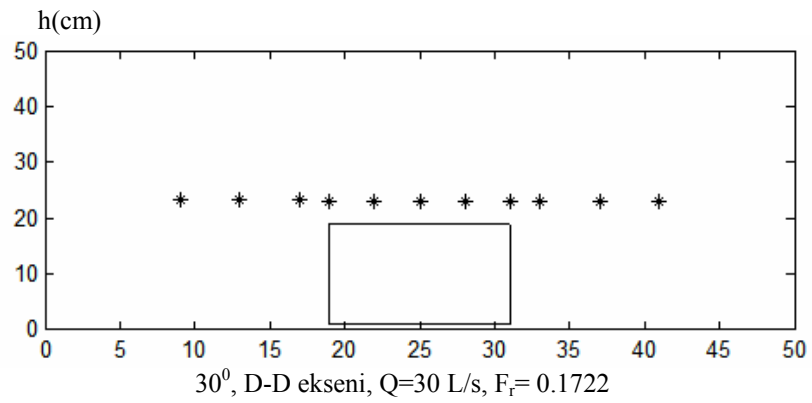
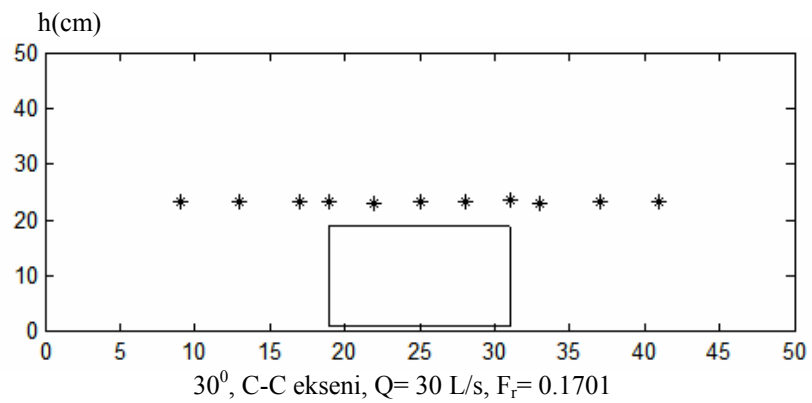
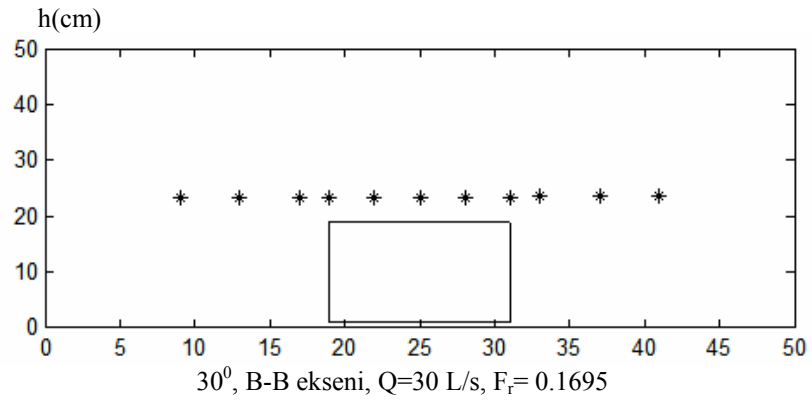
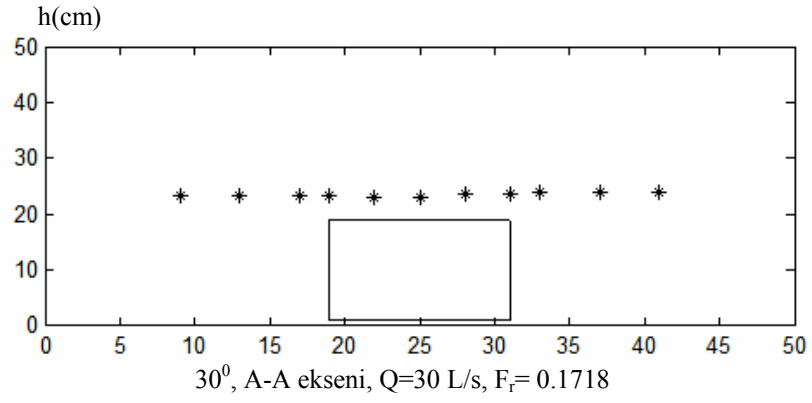
Ek 2.1 (devam).



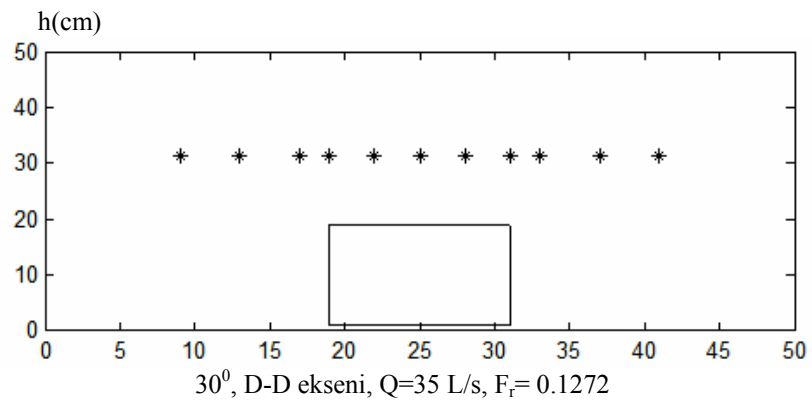
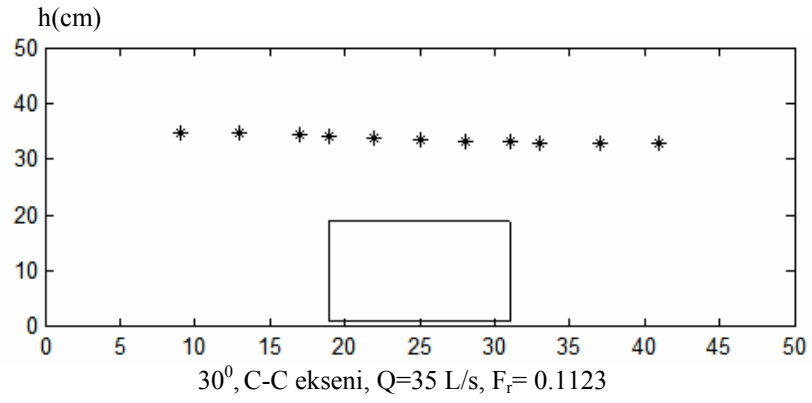
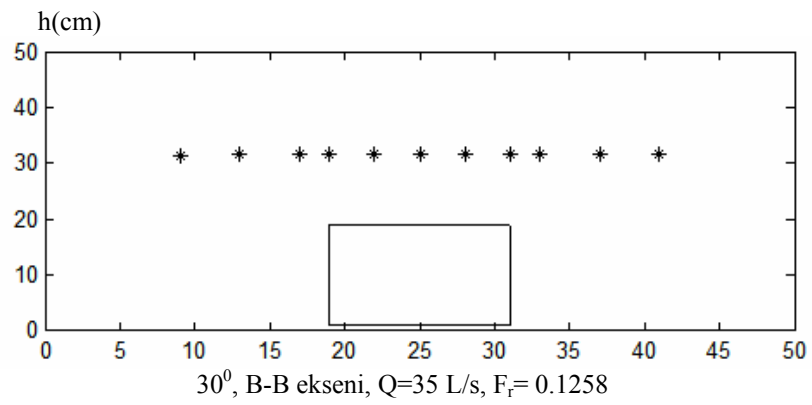
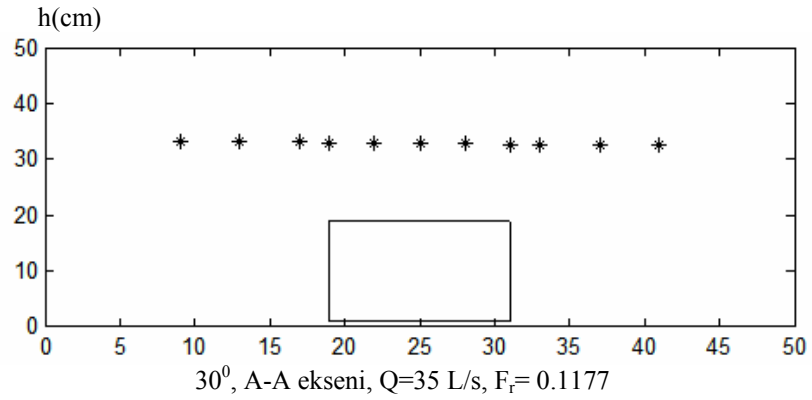
Ek 2.2 $\alpha = 30^0$, Q=30 L/s 'de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yz profilleri



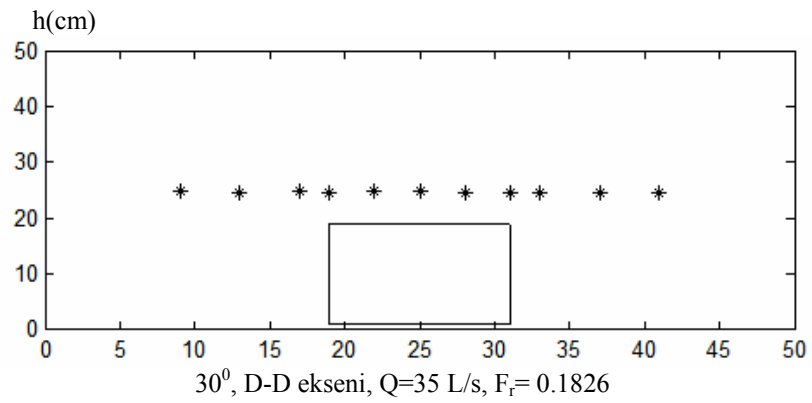
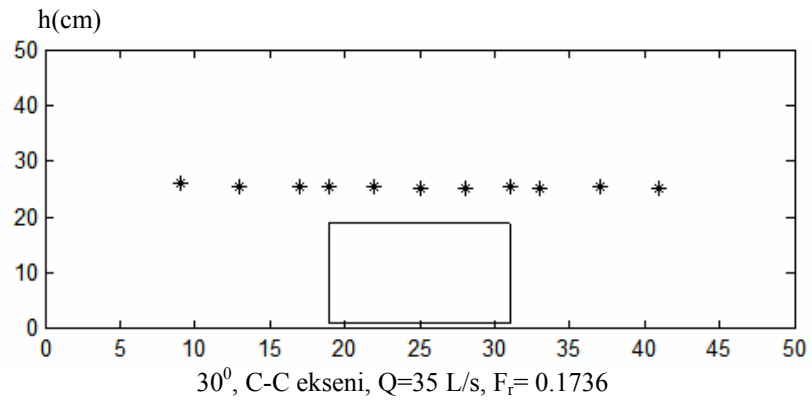
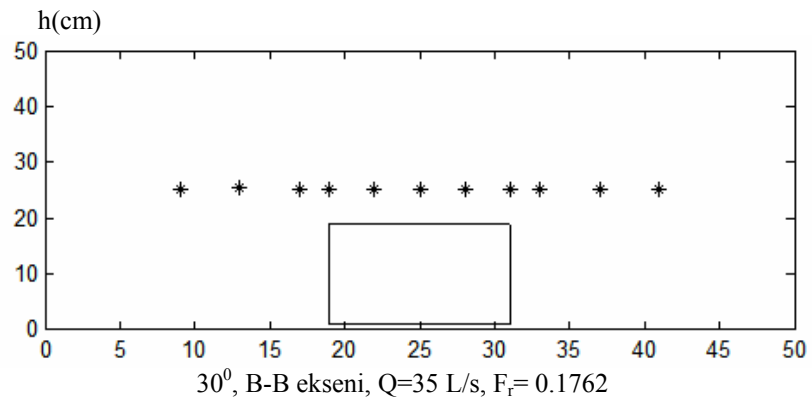
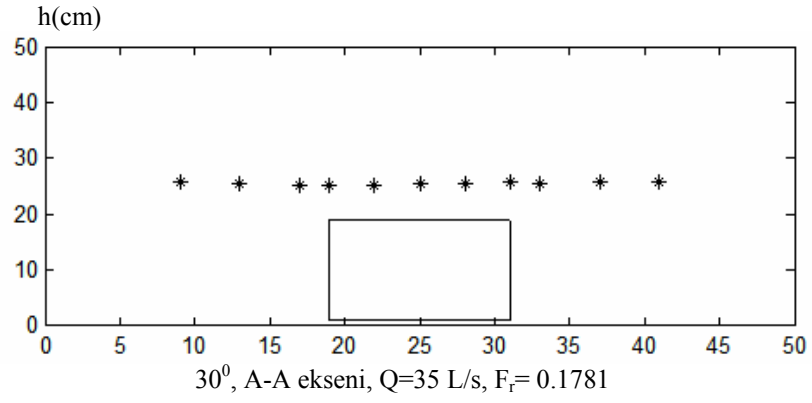
Ek 2.2 (devam).



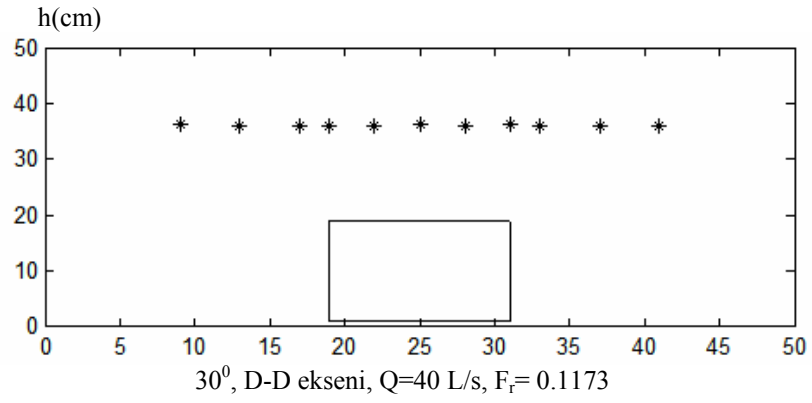
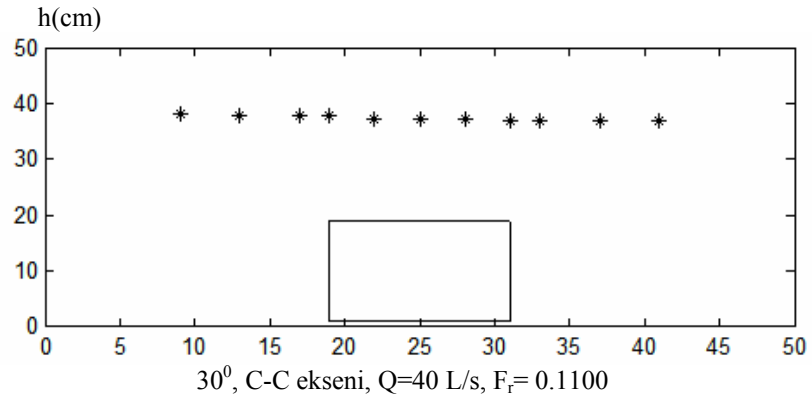
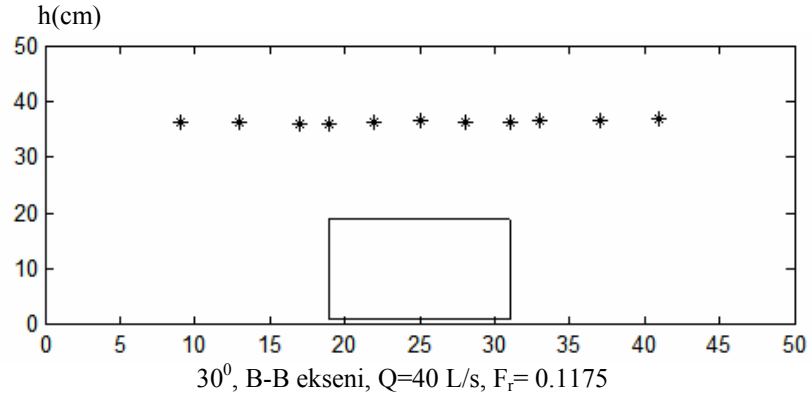
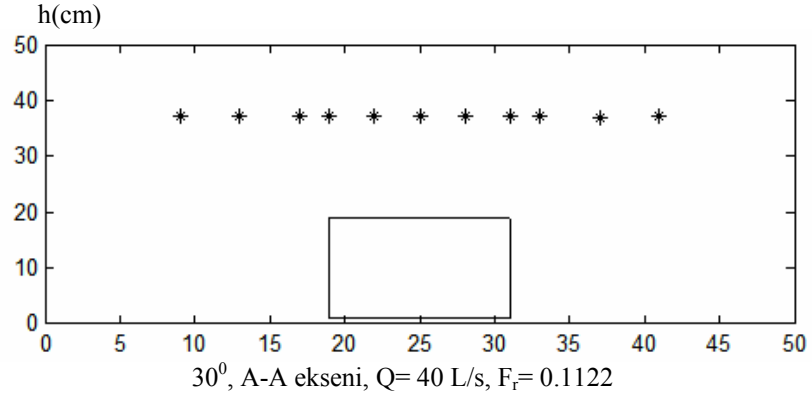
Ek 2.2 (devam).



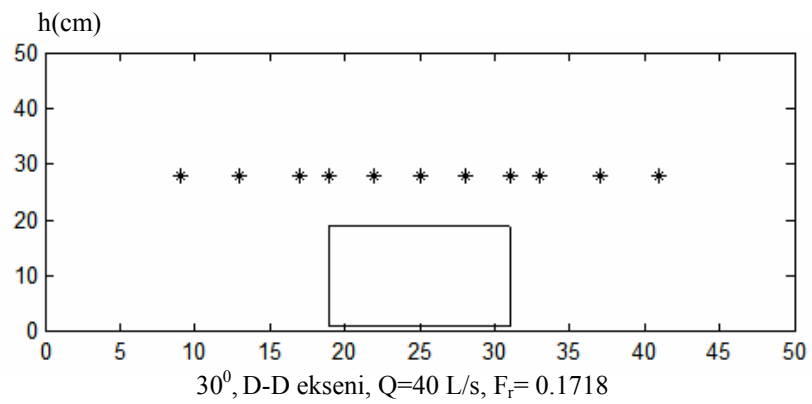
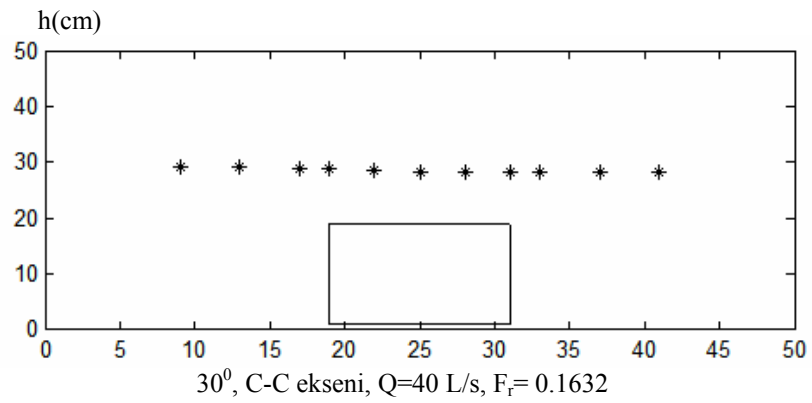
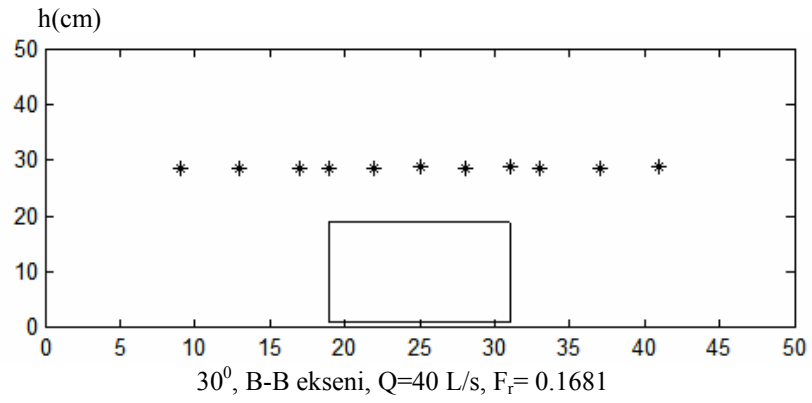
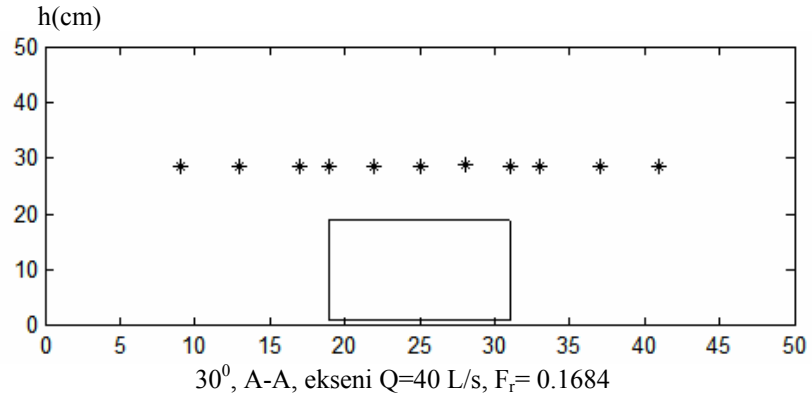
Ek 2.3 $\alpha = 30^\circ$, $Q=35$ L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri



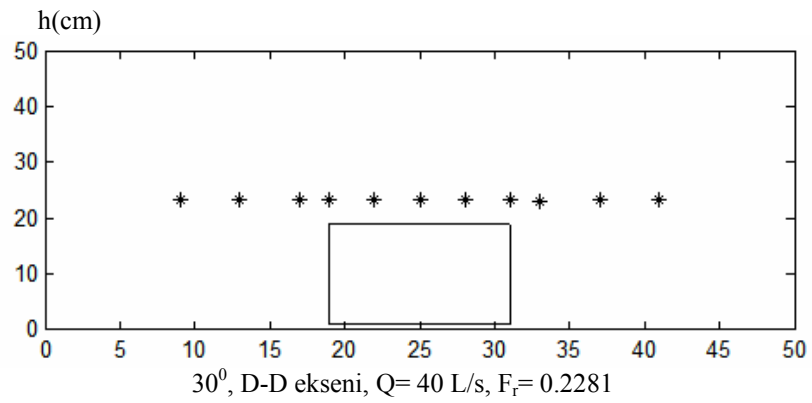
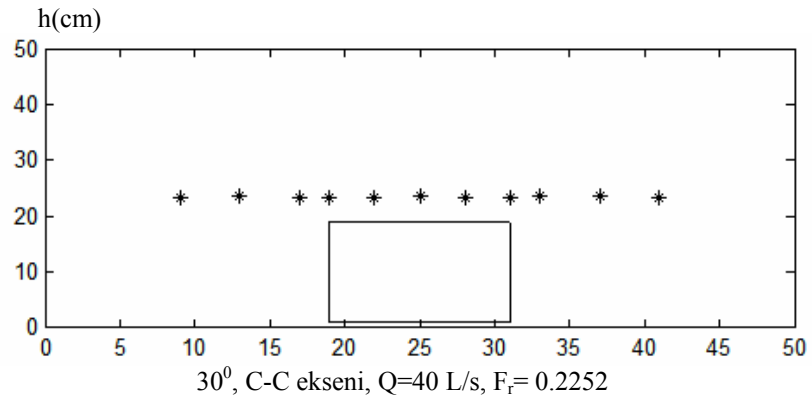
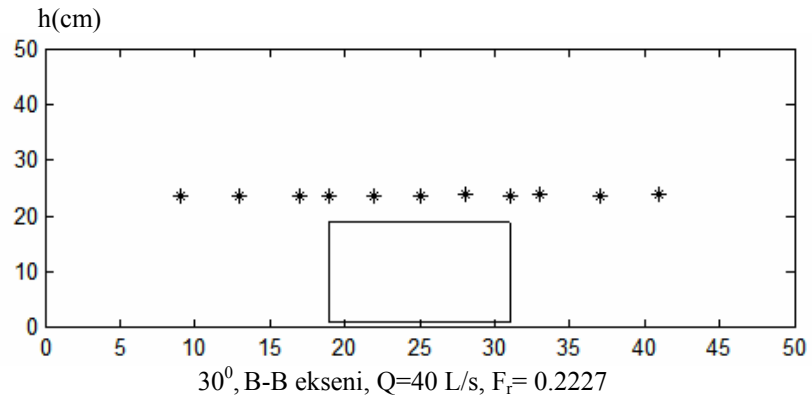
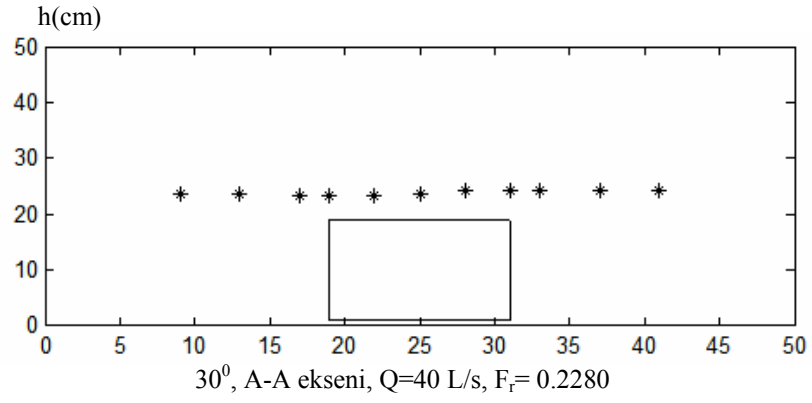
Ek 2.3 (devam).



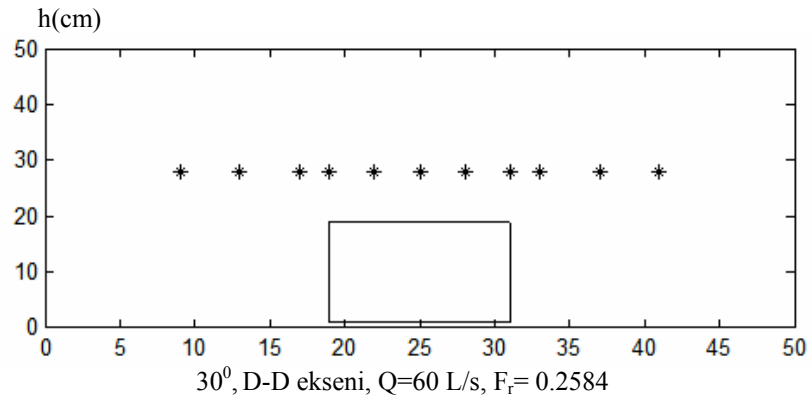
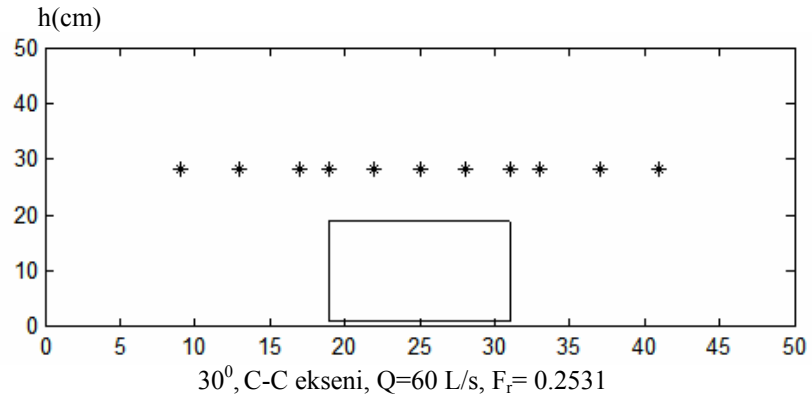
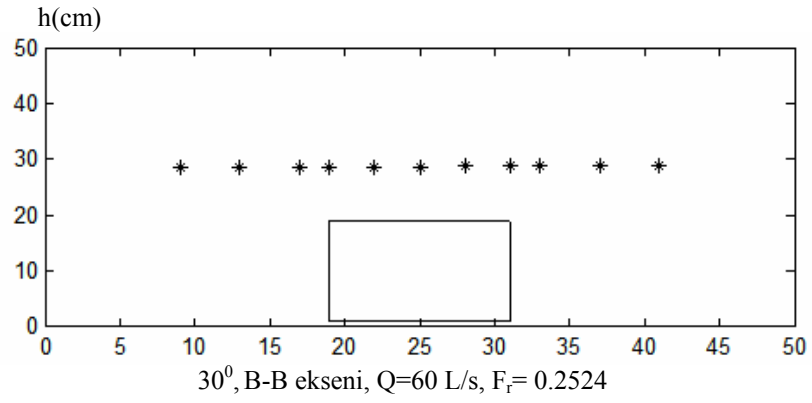
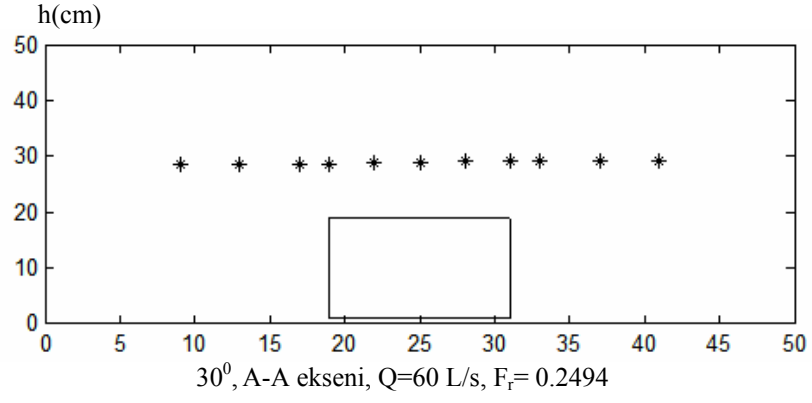
Ek 2.4 $\alpha = 30^0$, Q=40 L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yzđi profilleri



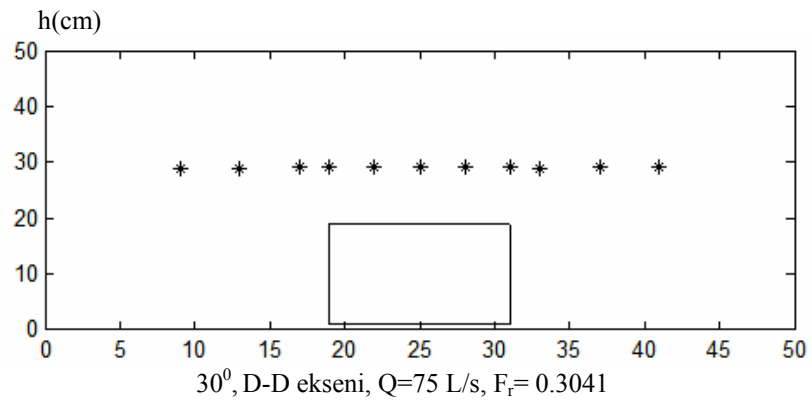
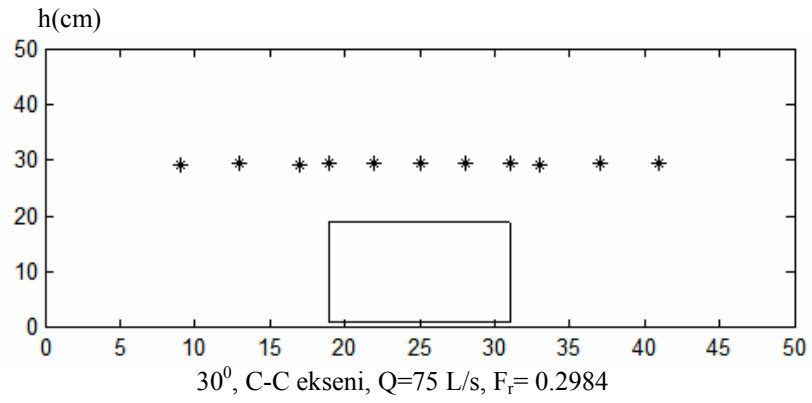
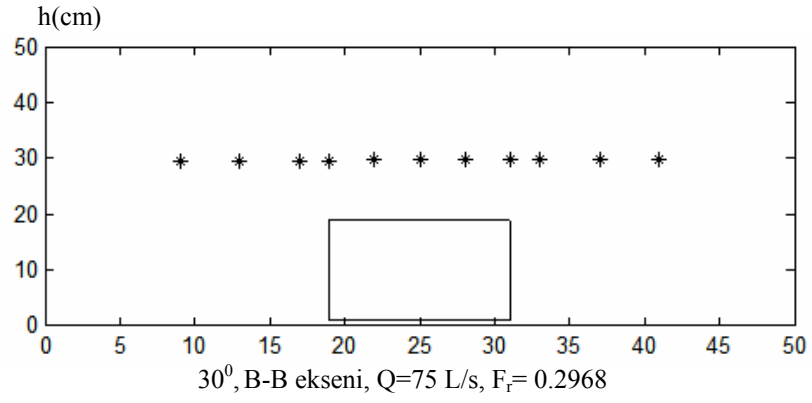
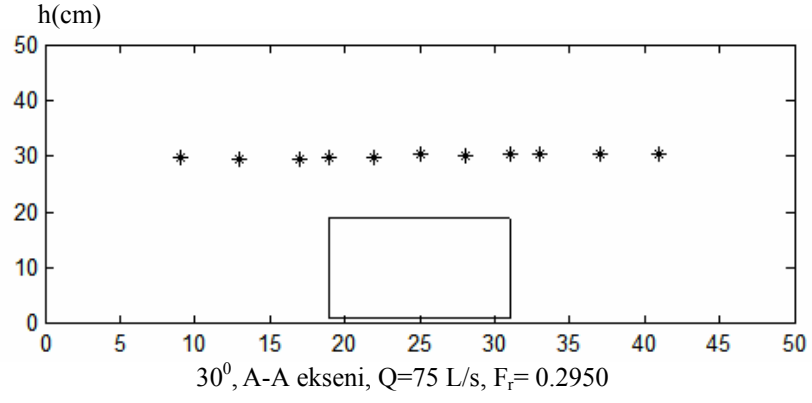
Ek 2.4 (devam).



Ek 2.4 (devam).

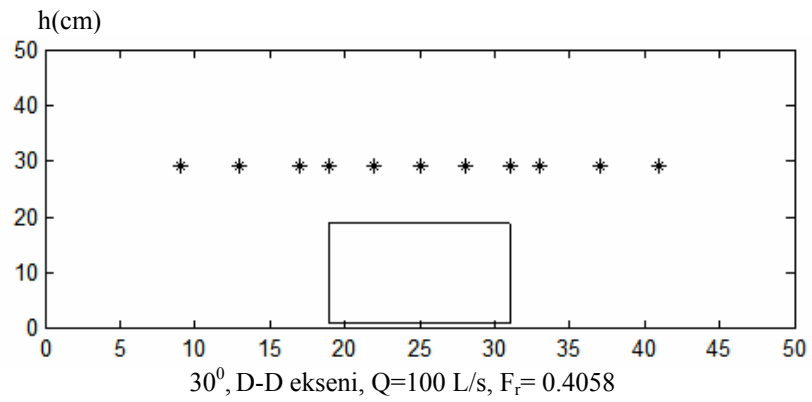
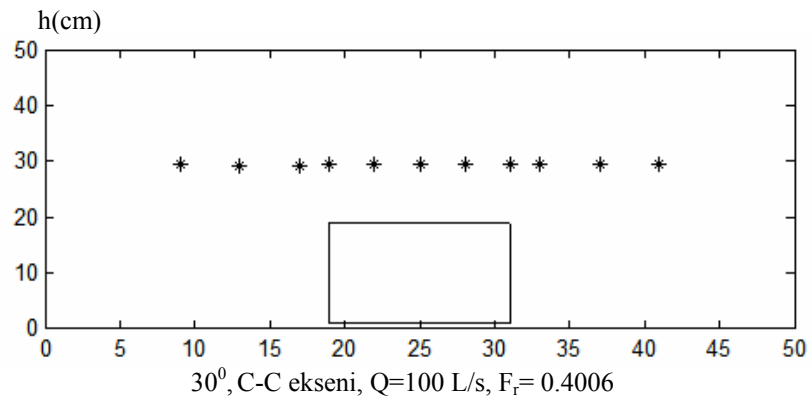
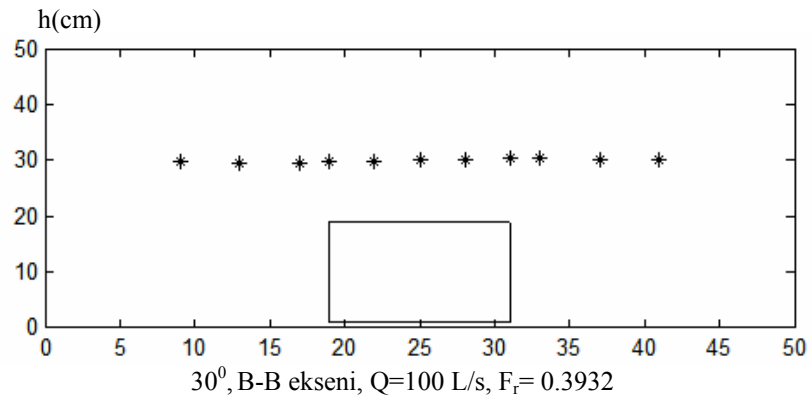
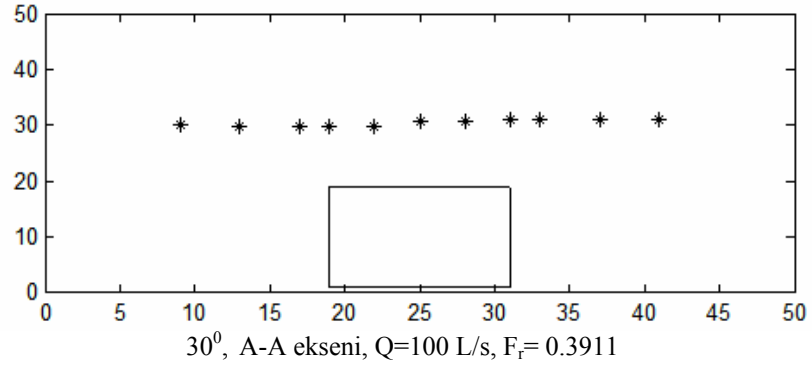


Ek 2.5 $\alpha = 30^\circ$, Q=60 L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri

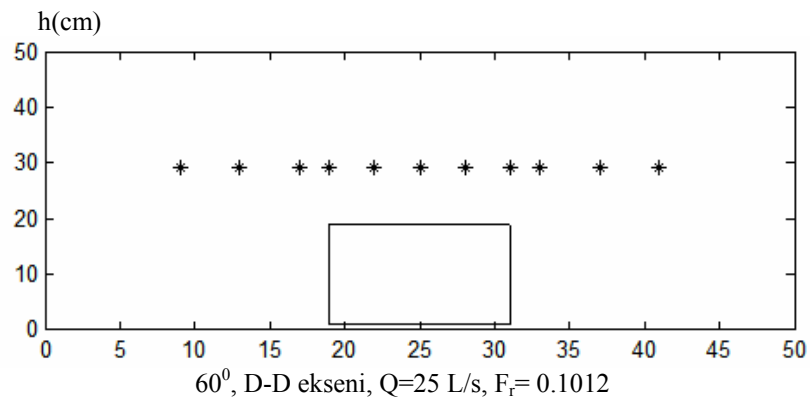
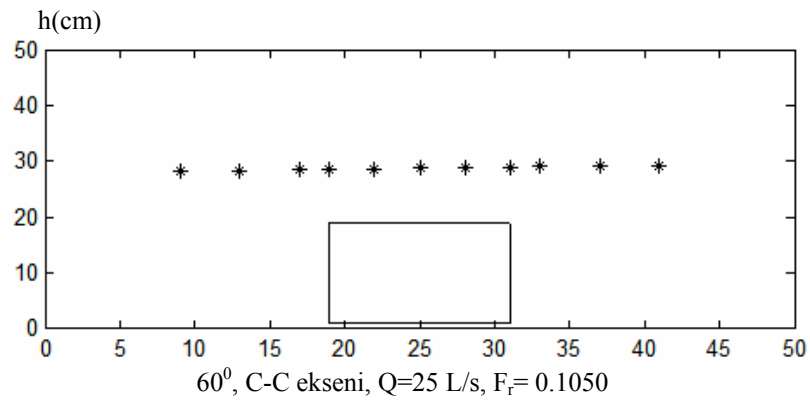
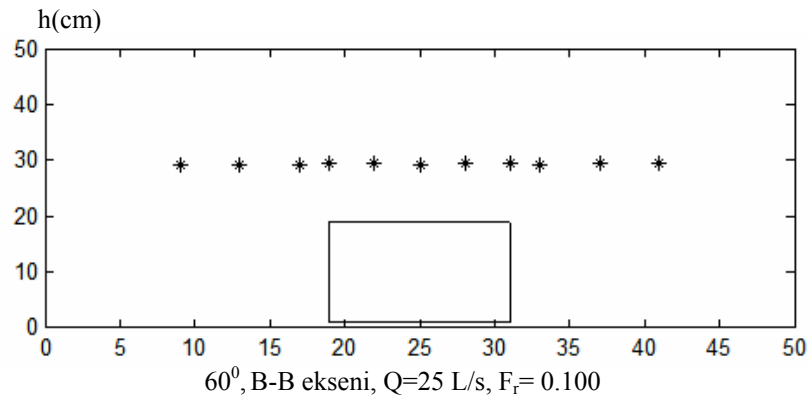
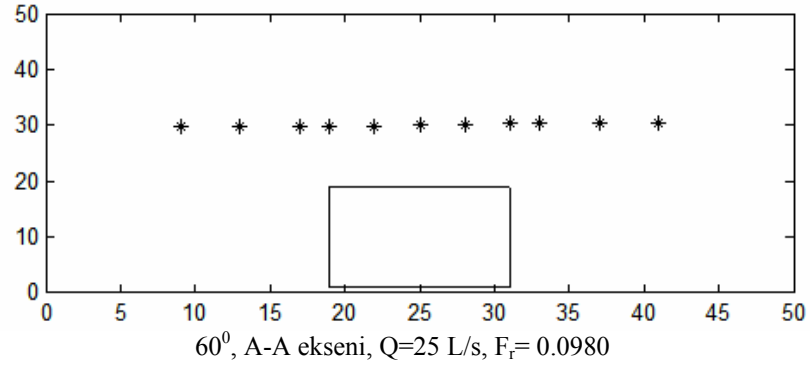


Ek 2.6 $\alpha = 30^\circ$, $Q=75$ L/s 'de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri

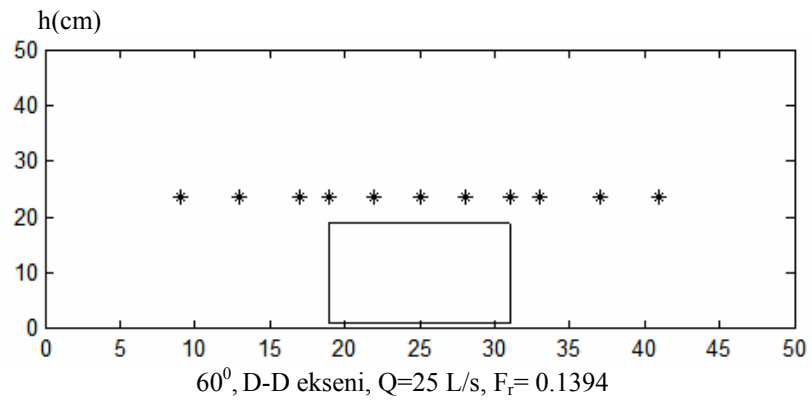
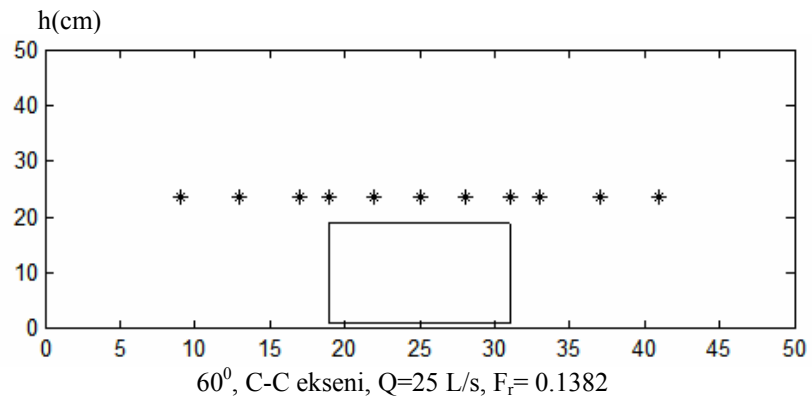
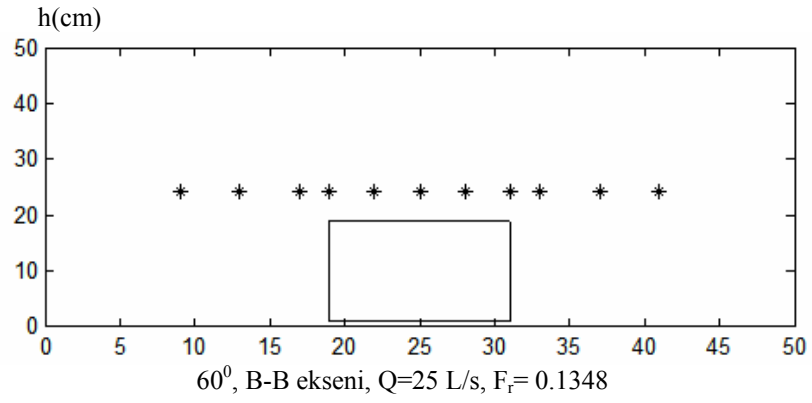
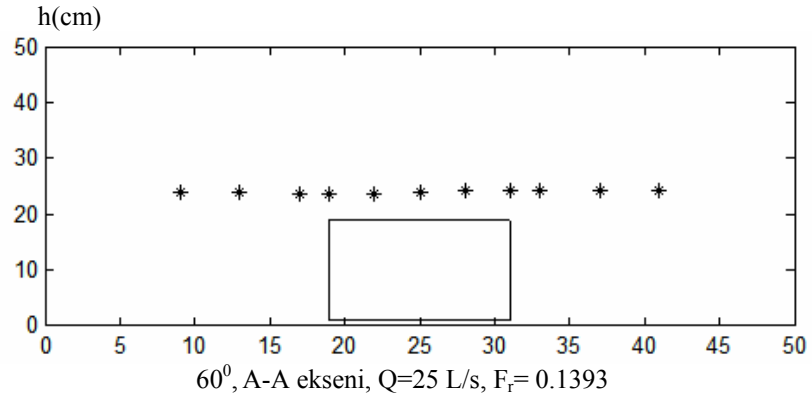
h(cm)



Ek 2.7 $\alpha = 30^0$, Q=100 L/s ‘de yan savak eşiğı boyunca elde edilen su yüzü profilleri
h(cm)

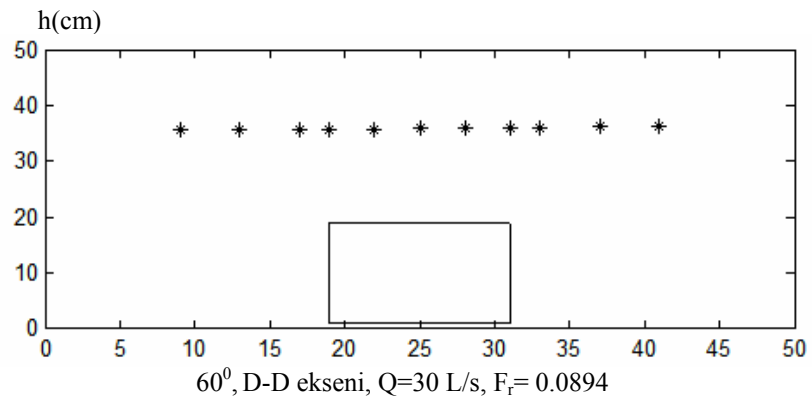
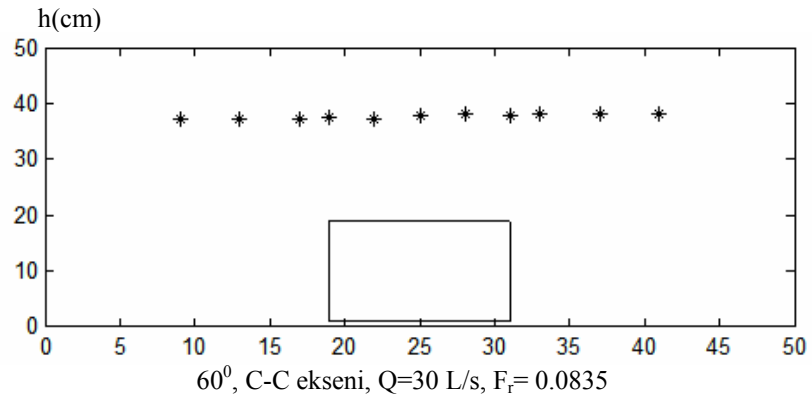
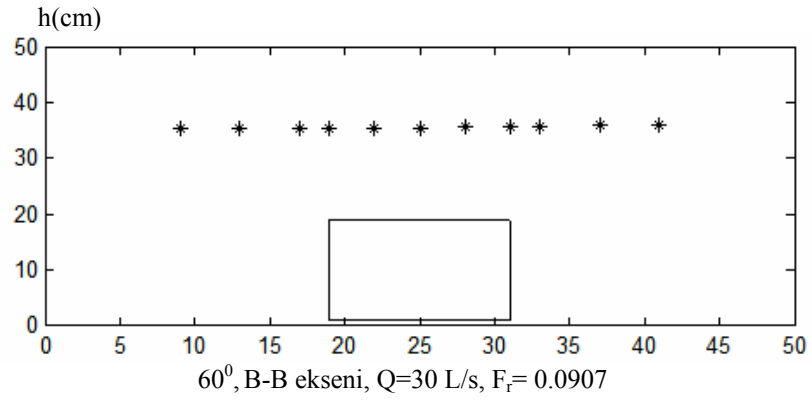
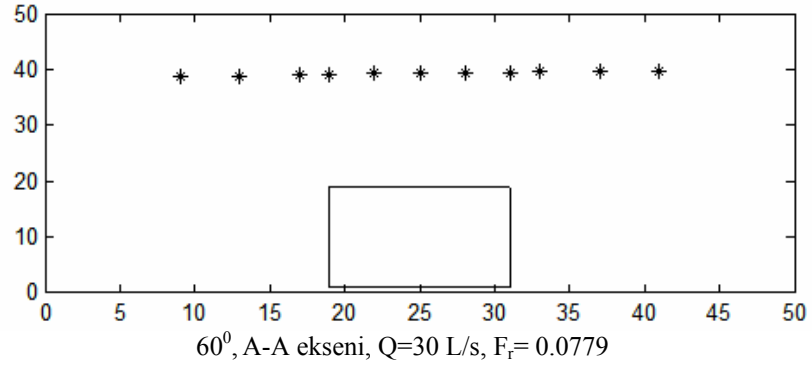


Ek 2.8 $\alpha = 60^\circ$, Q=25 L/s 'de yan savak eşiğı boyunca elde edilen su yüzü profilleri



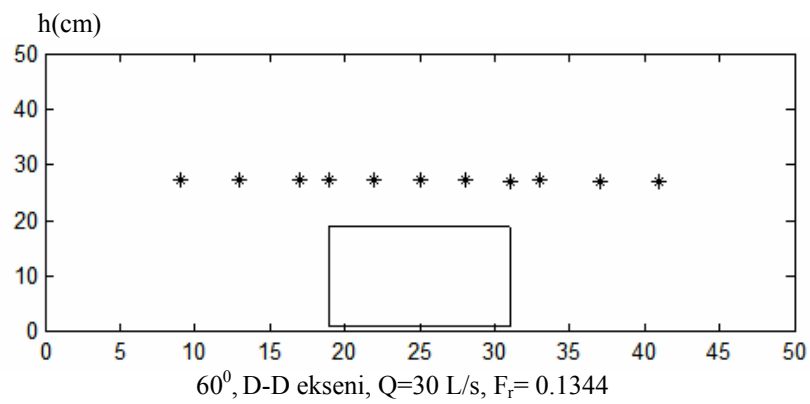
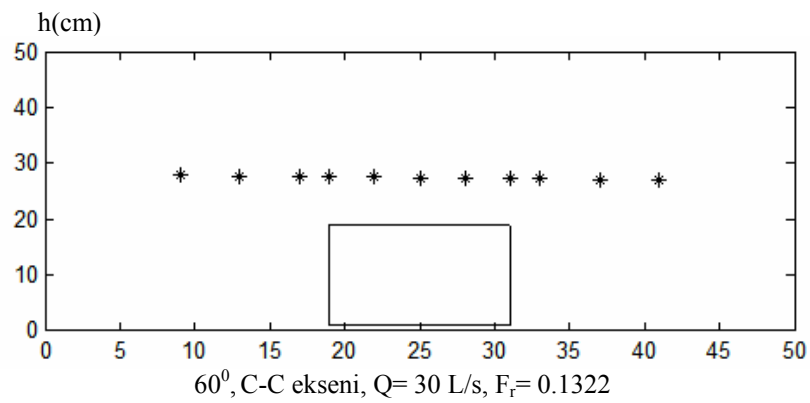
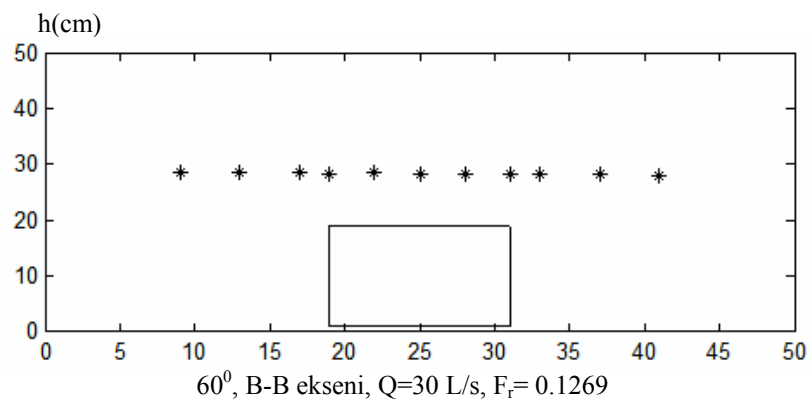
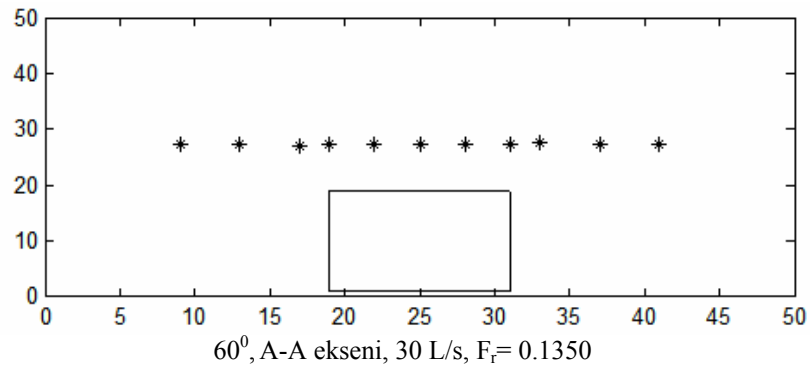
Ek 2.8 (devam).

h(cm)



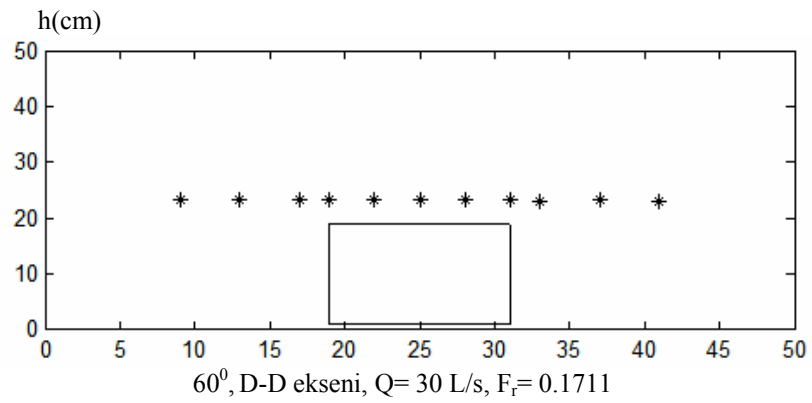
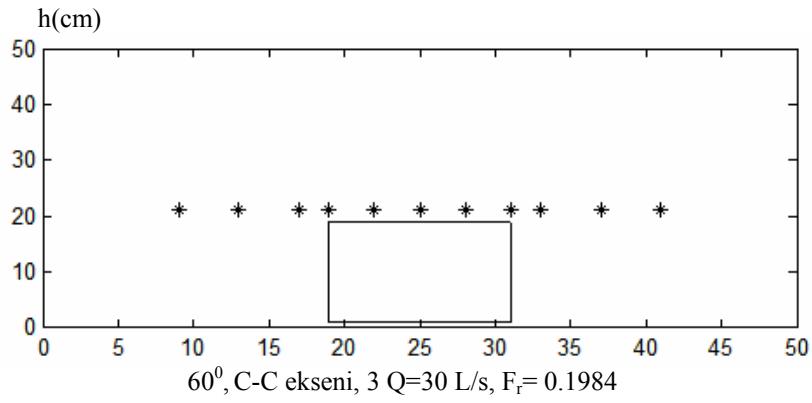
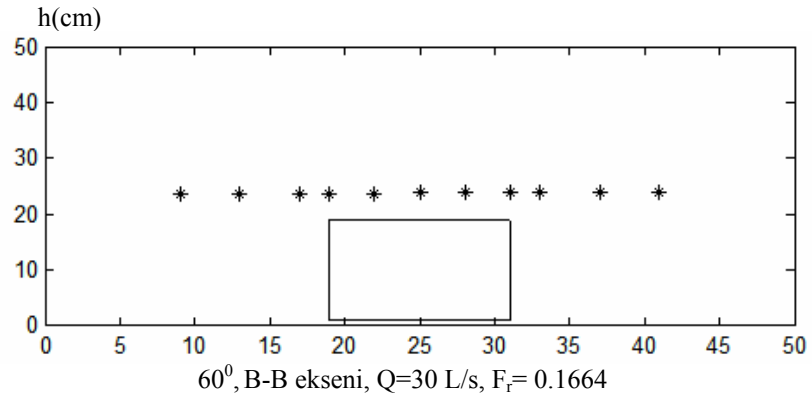
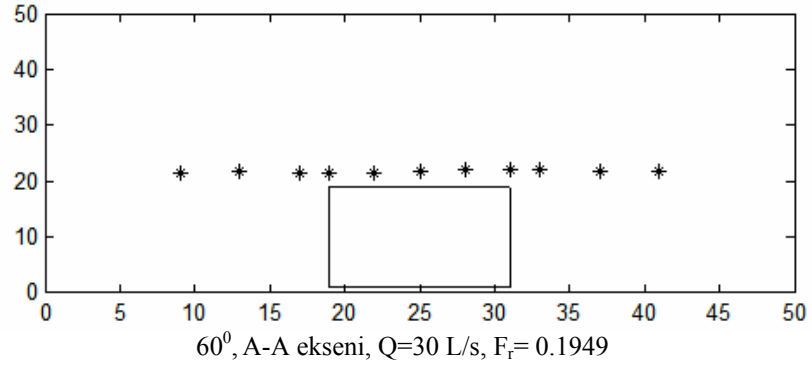
Ek 2.9 $\alpha = 60^\circ$, Q=30 L/s 'de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yzu profilleri

h(cm)



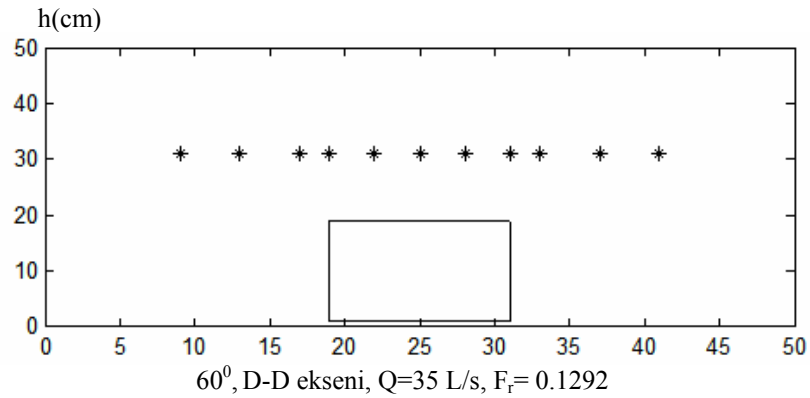
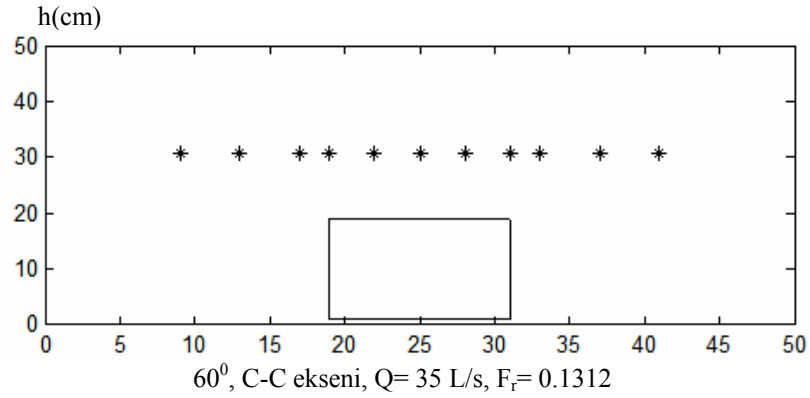
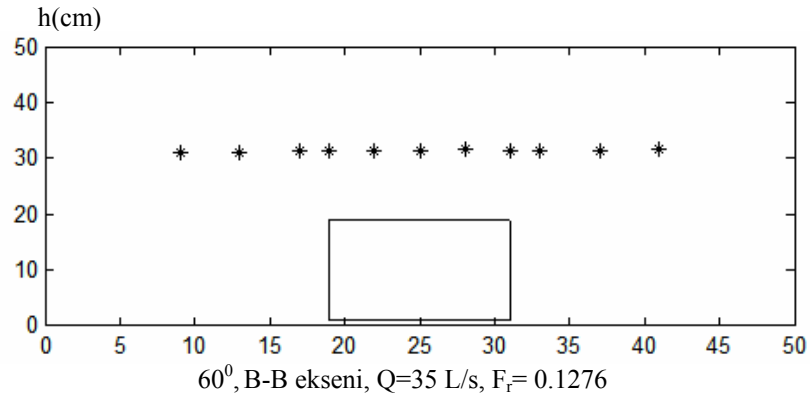
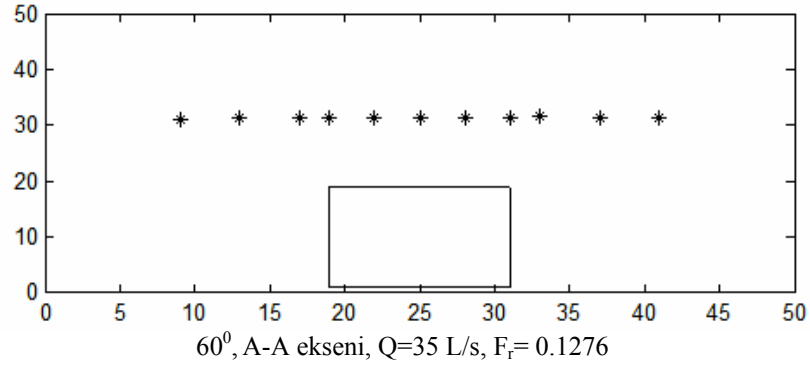
Ek 2.9 (devam).

h(cm)



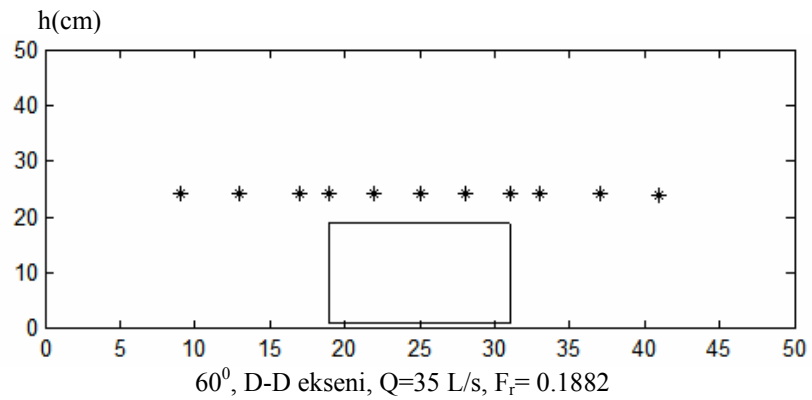
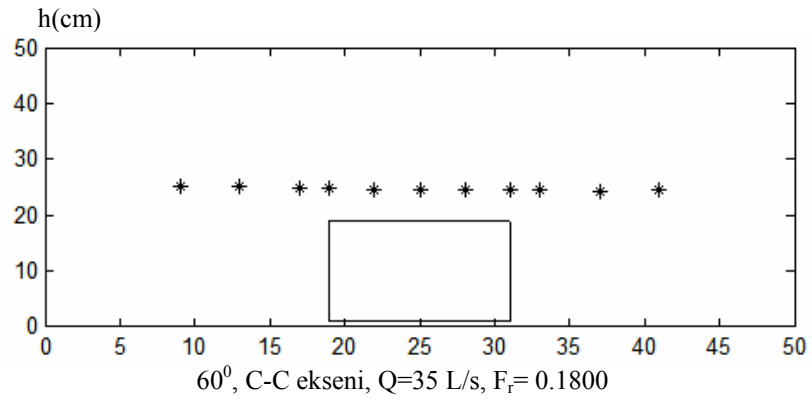
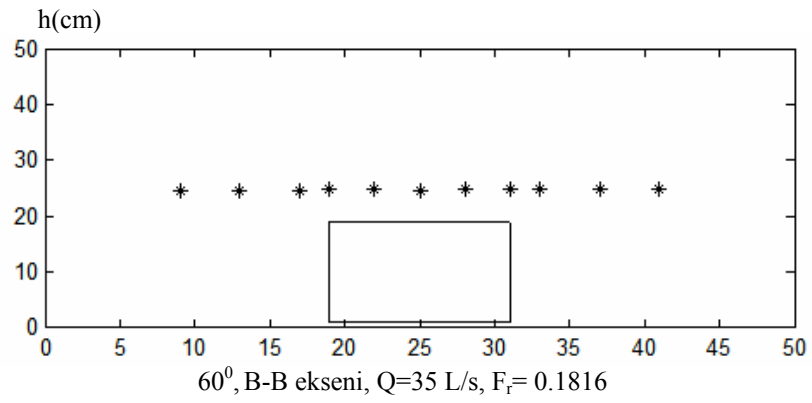
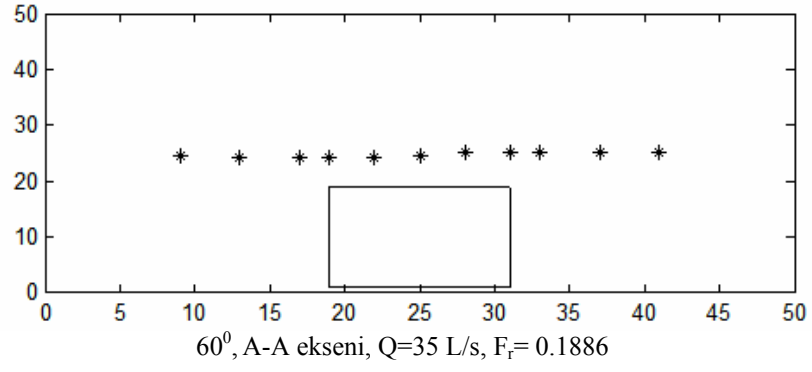
Ek 2.9 (devam).

h (cm)

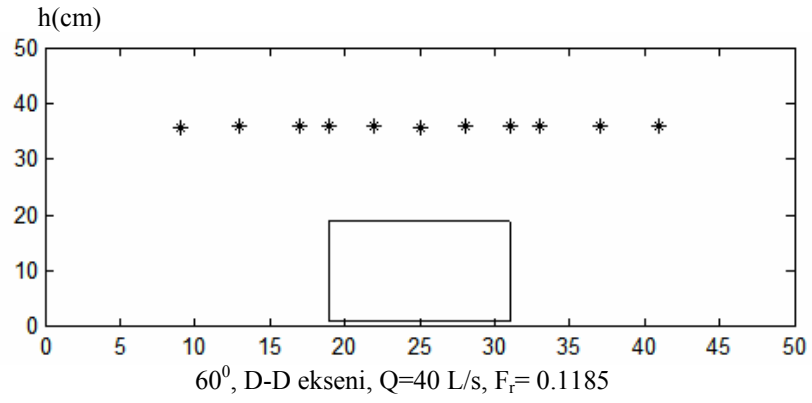
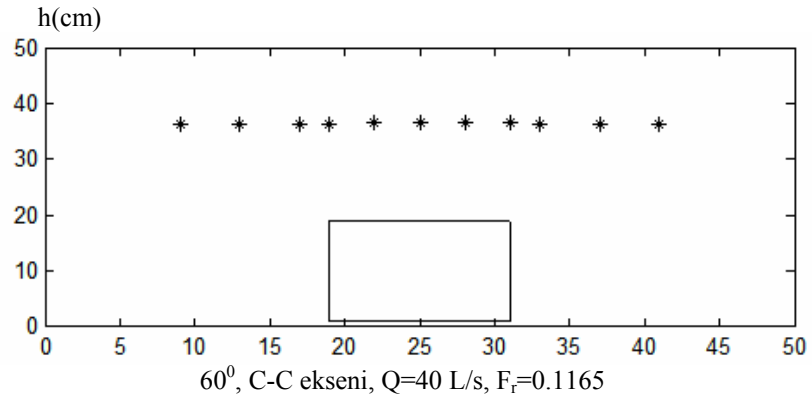
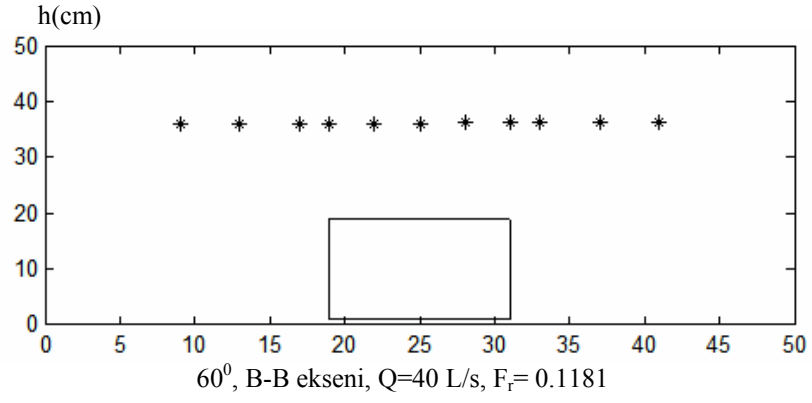
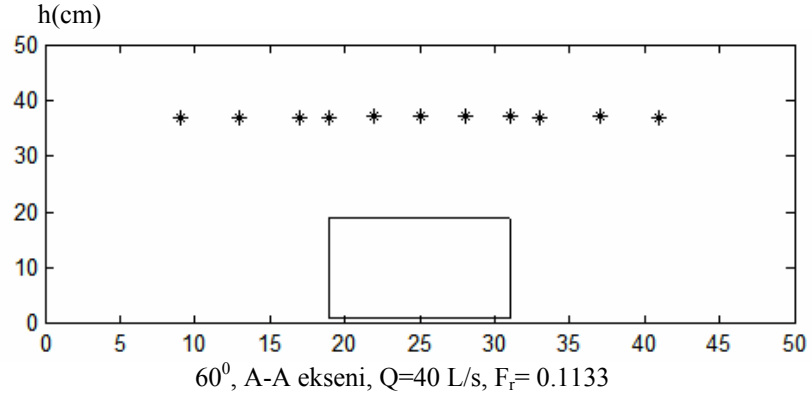


Ek 2.10 $\alpha = 60^\circ$, Q=35 L/s ‘de yan savak eşiğı boyunca elde edilen su yüzü profilleri

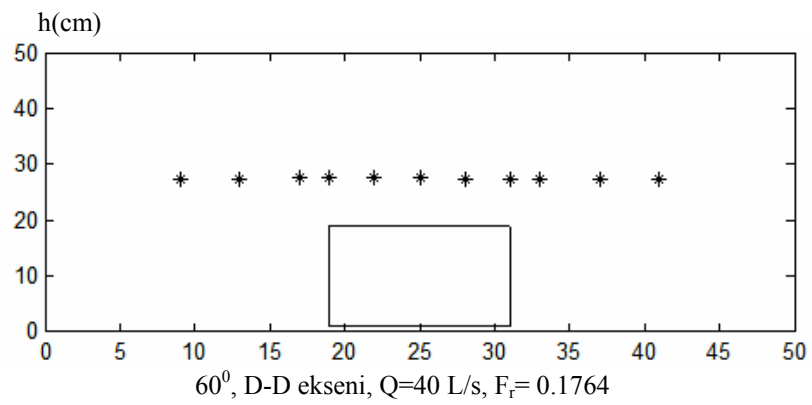
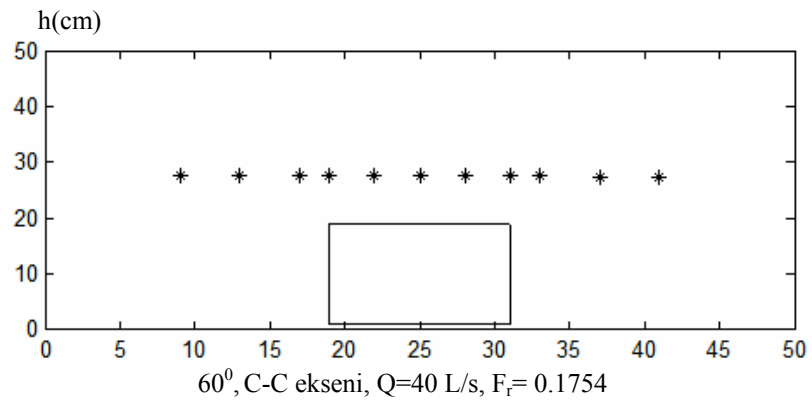
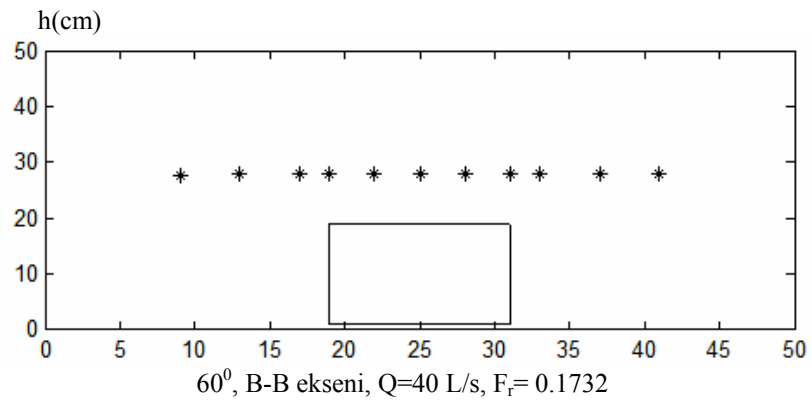
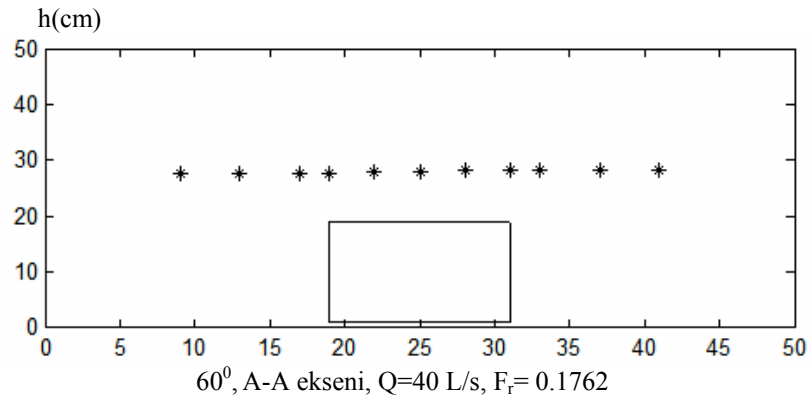
h(cm)



Ek 2.10 (devam).

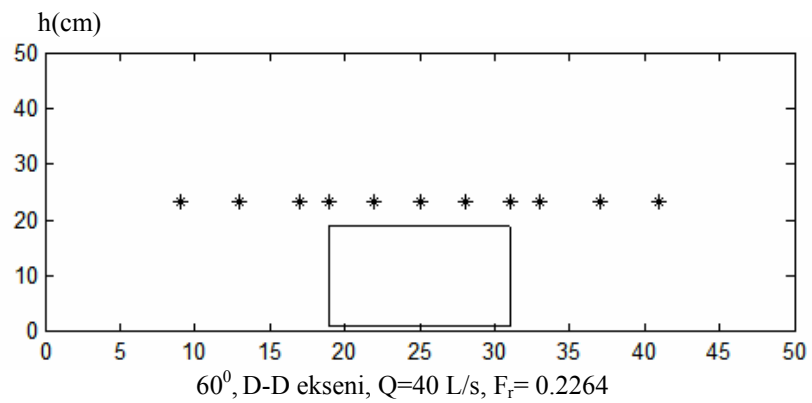
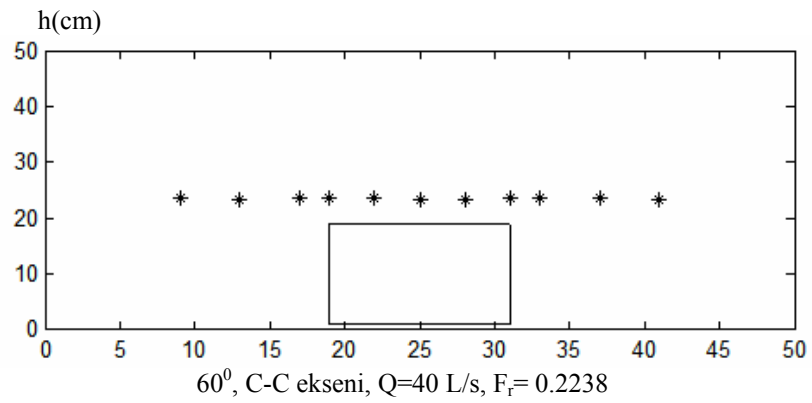
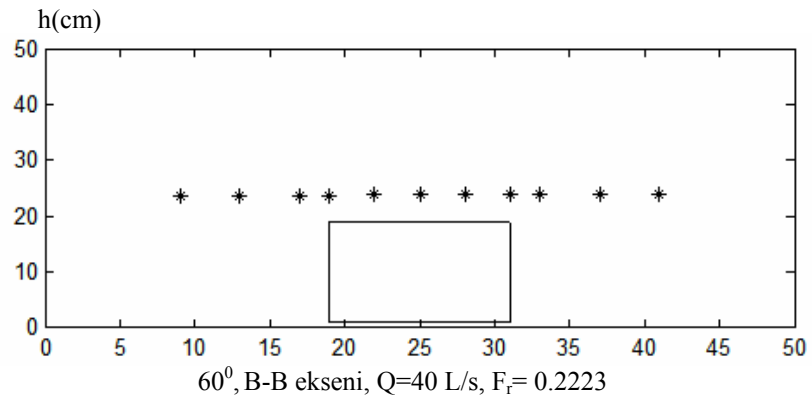
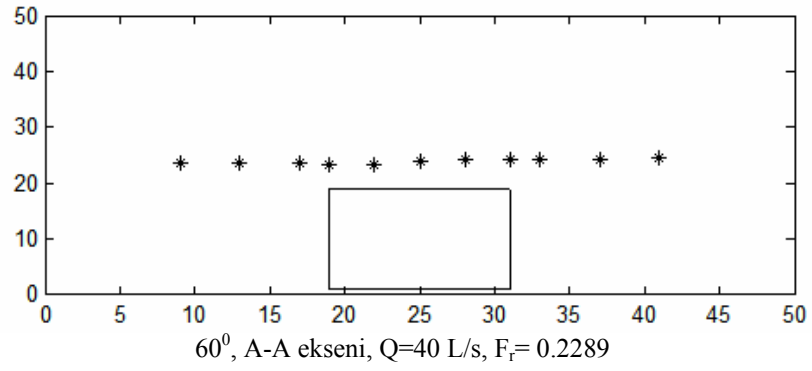


Ek 2.11 $\alpha = 60^\circ$, $Q=40$ L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yzşü profilleri

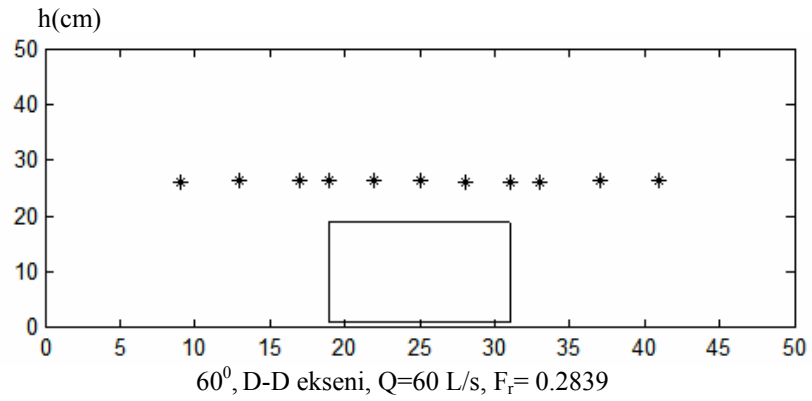
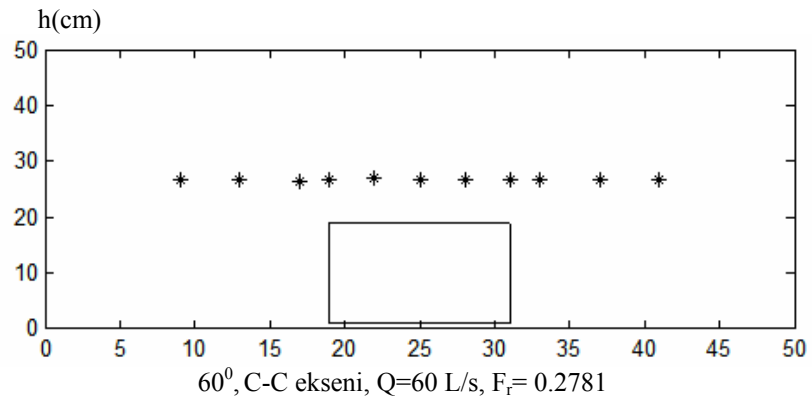
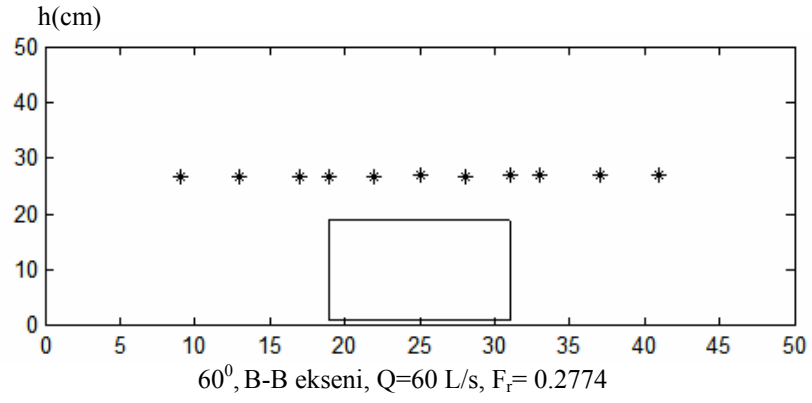
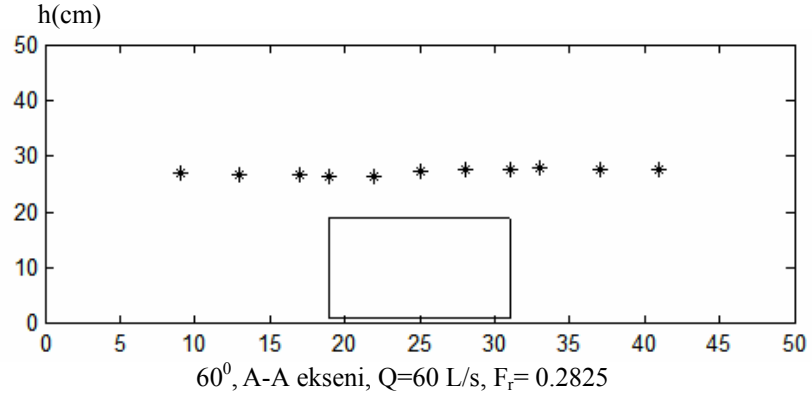


Ek 2.11 (devam).

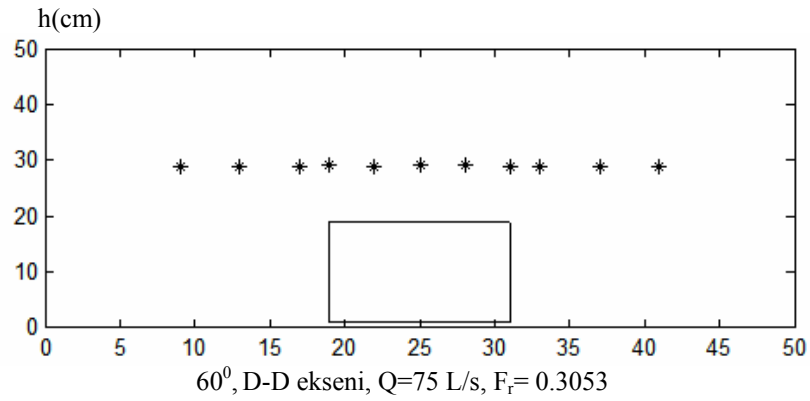
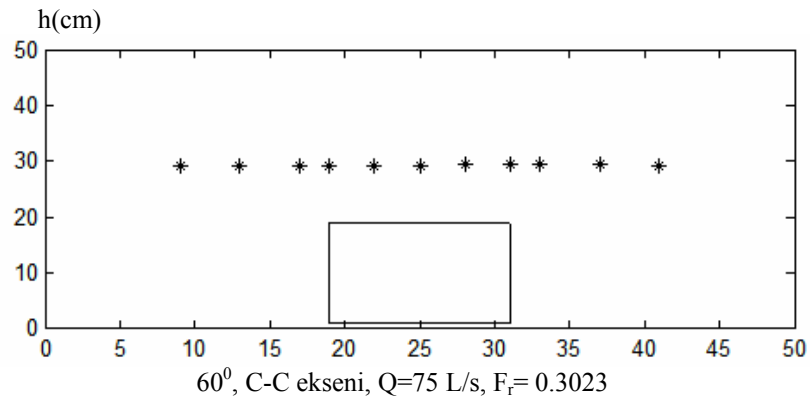
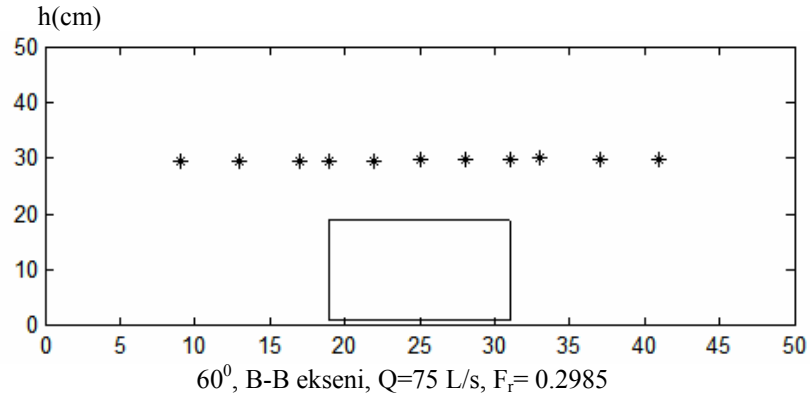
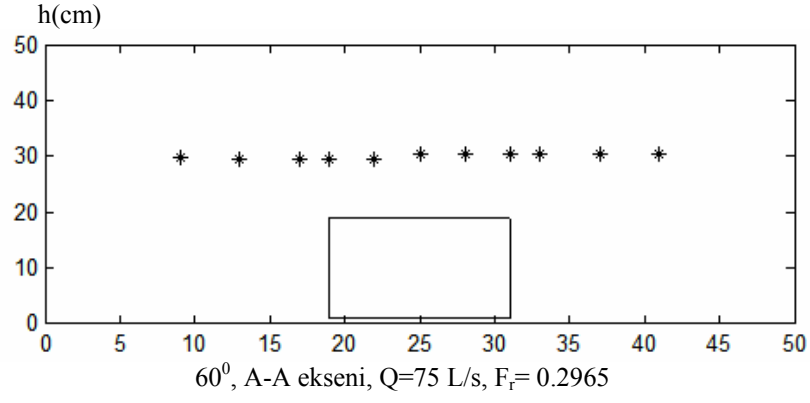
h(cm)



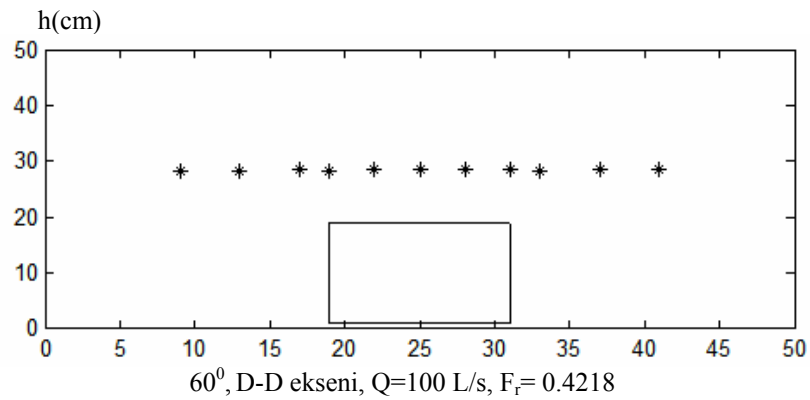
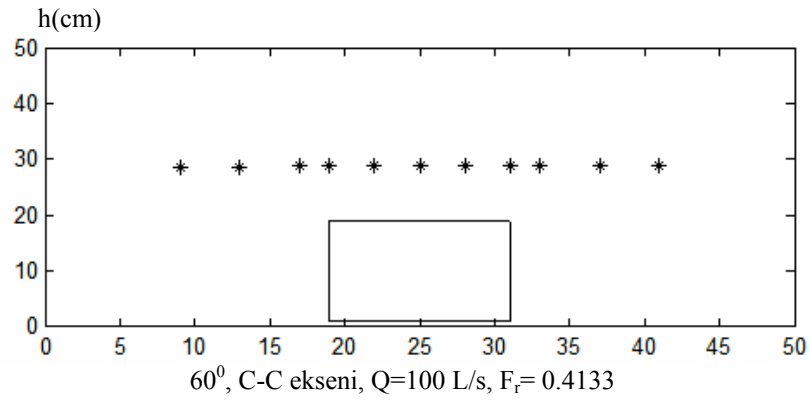
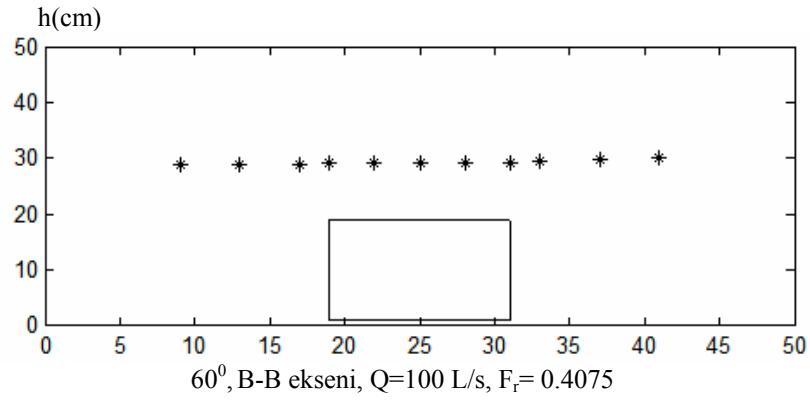
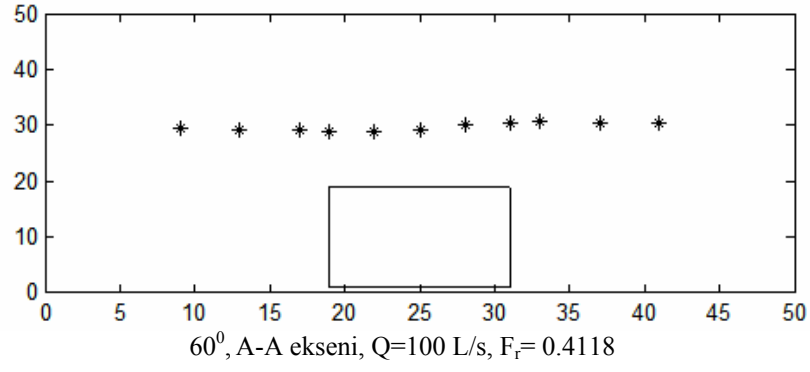
Ek 2.11 (devam).



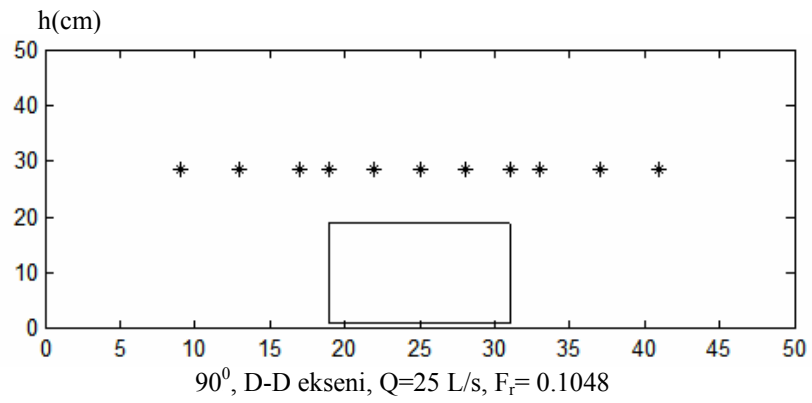
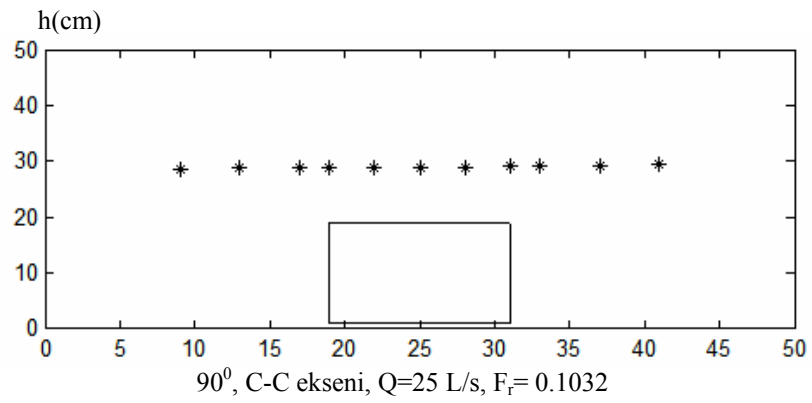
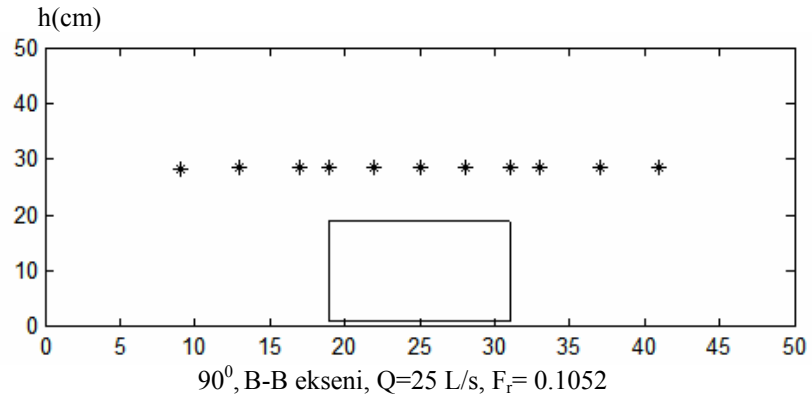
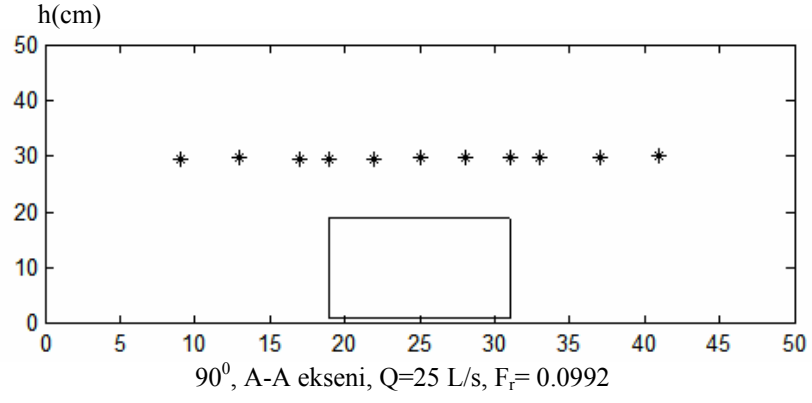
Ek 2.12 $\alpha = 60^\circ$, $Q=60$ L/s ‘de yan savak eşiğı boyunca elde edilen su yüzü profilleri



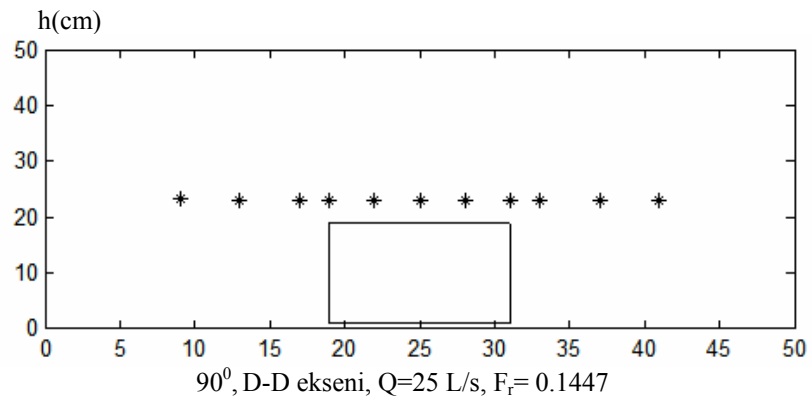
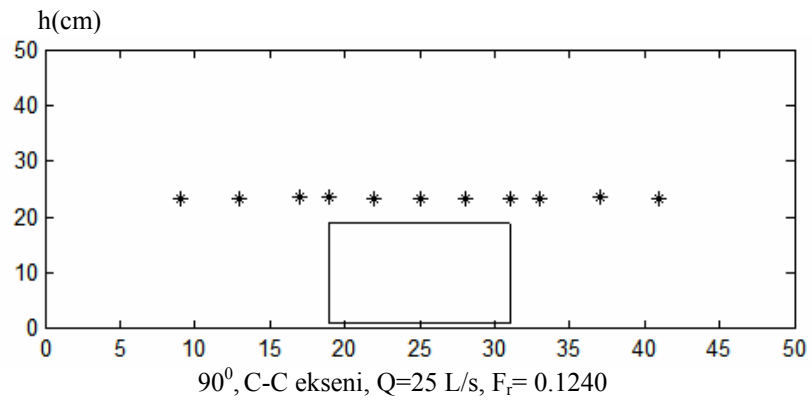
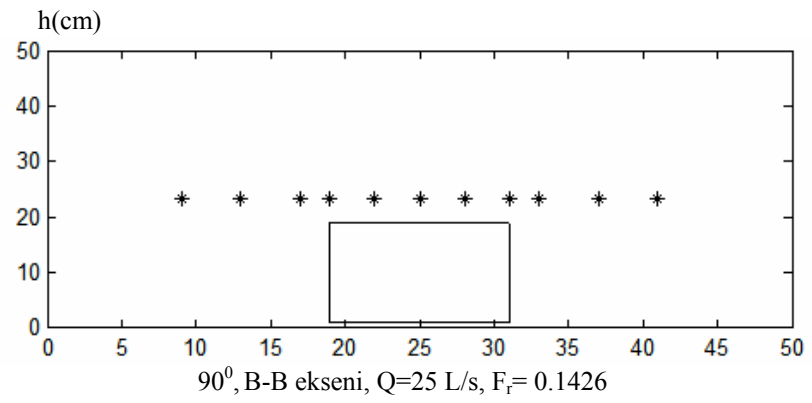
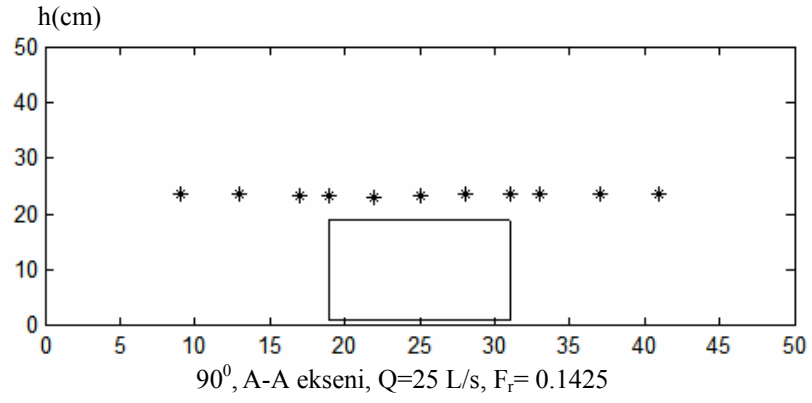
Ek 2.13 $\alpha = 60^\circ$, $Q=75$ L/s ‘de yan savak eşiğı boyunca elde edilen su yüzü profilleri
h(cm)



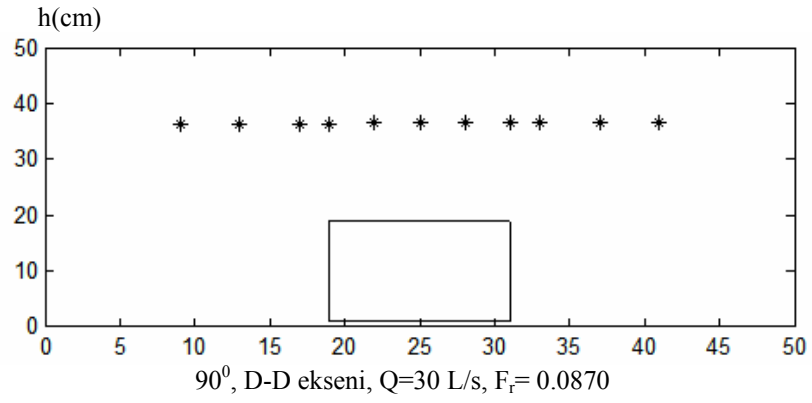
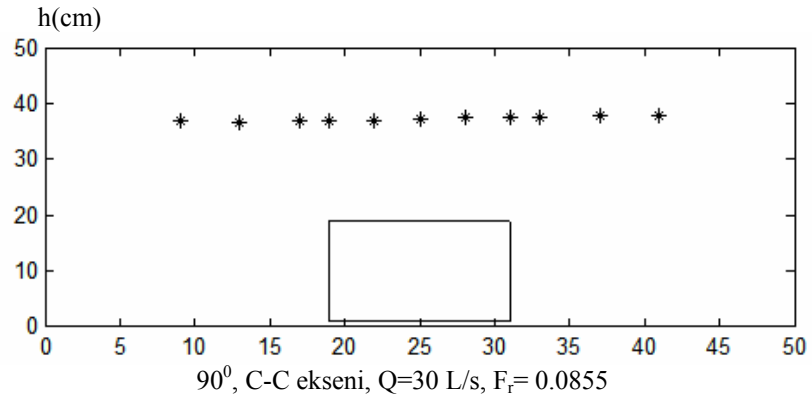
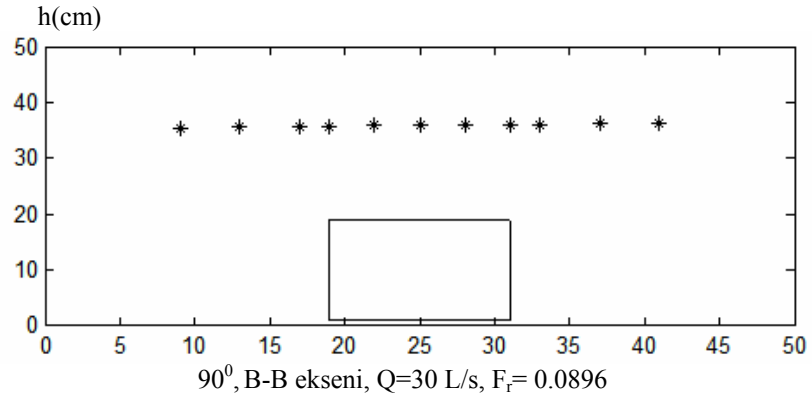
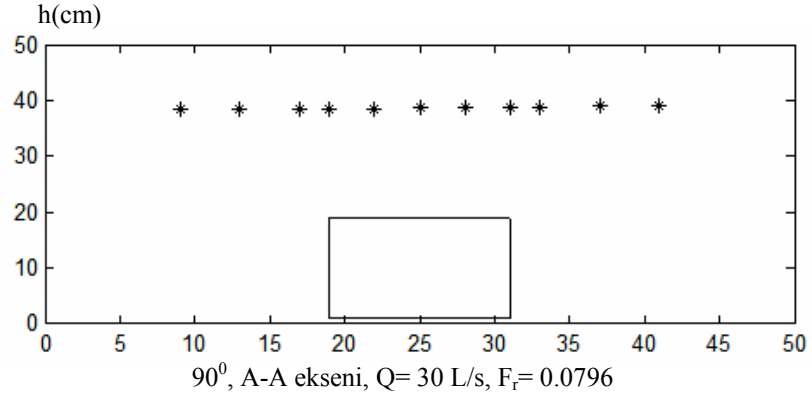
Ek 2.14 $\alpha = 60^\circ$, $Q=100$ L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri



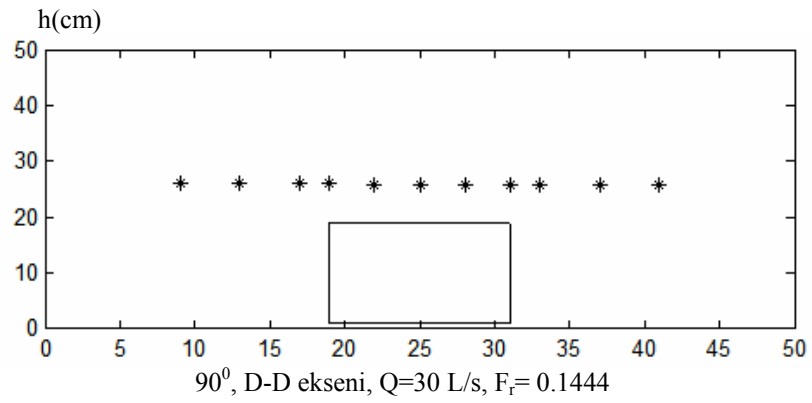
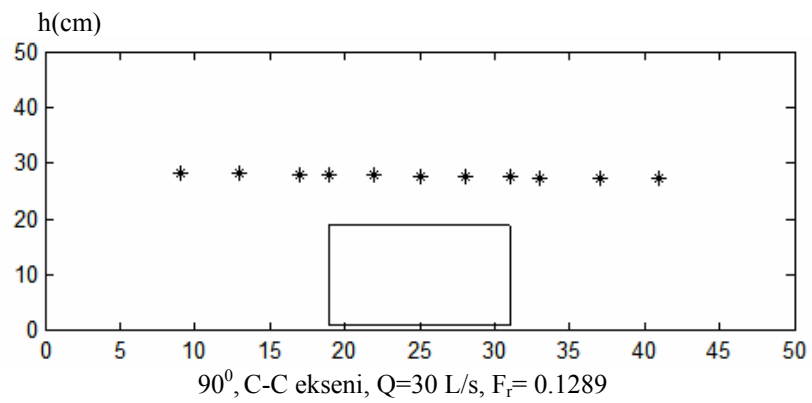
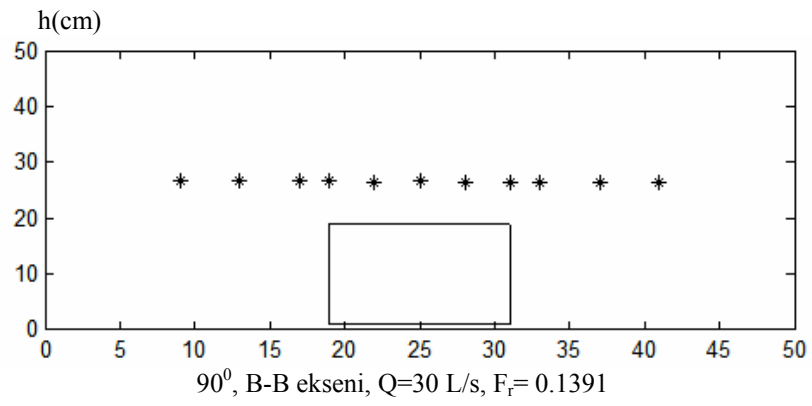
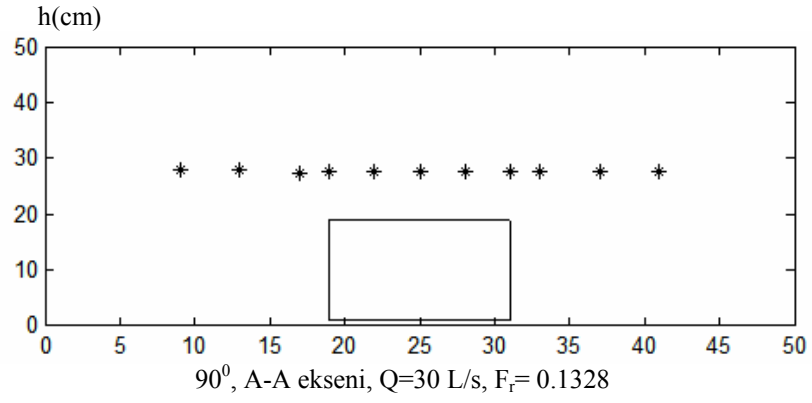
Ek 2.15 $\alpha = 90^0$, Q=25 L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri



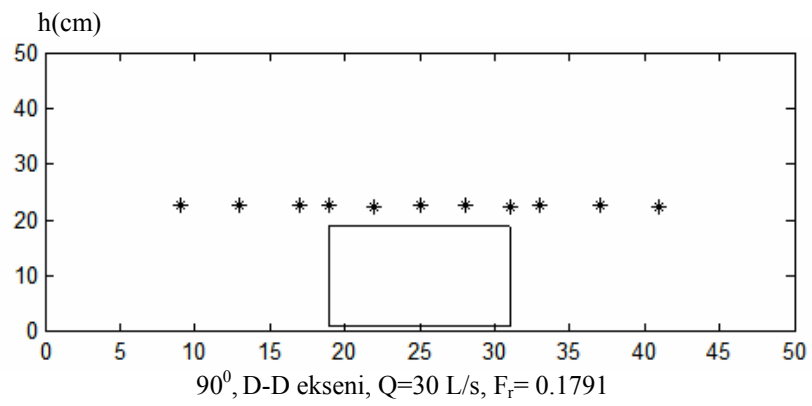
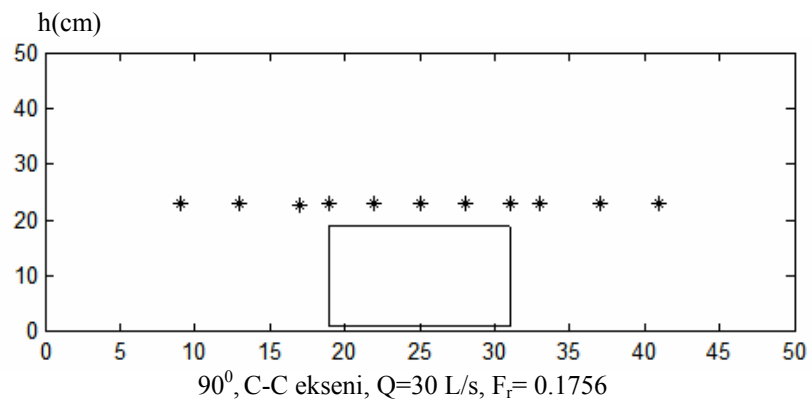
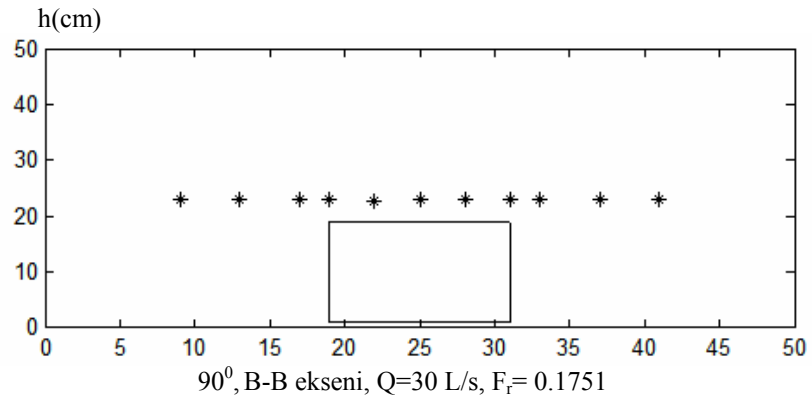
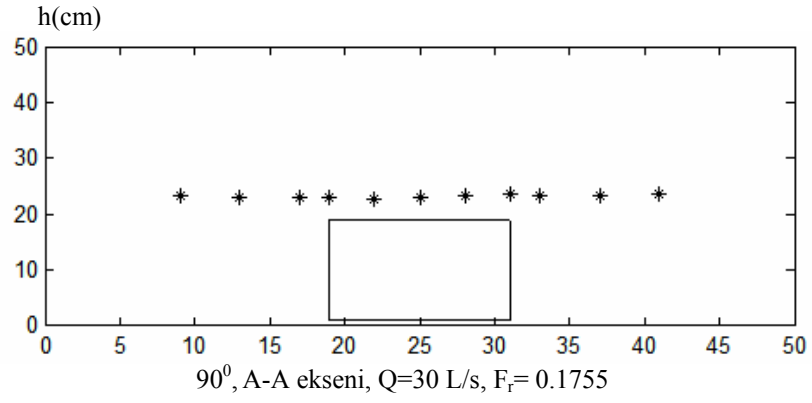
Ek 2.15 (devam).



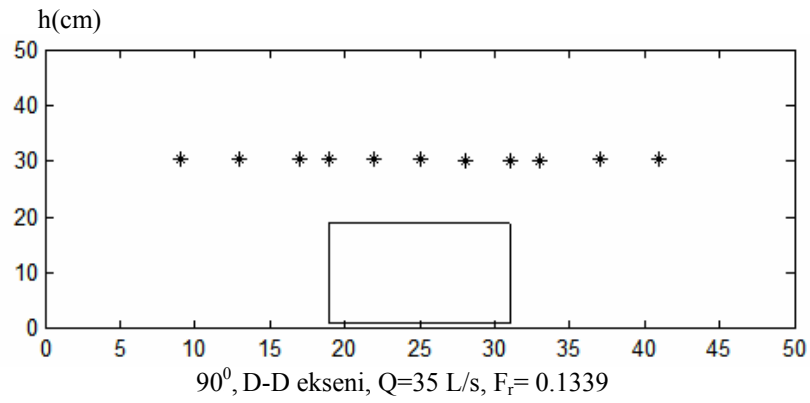
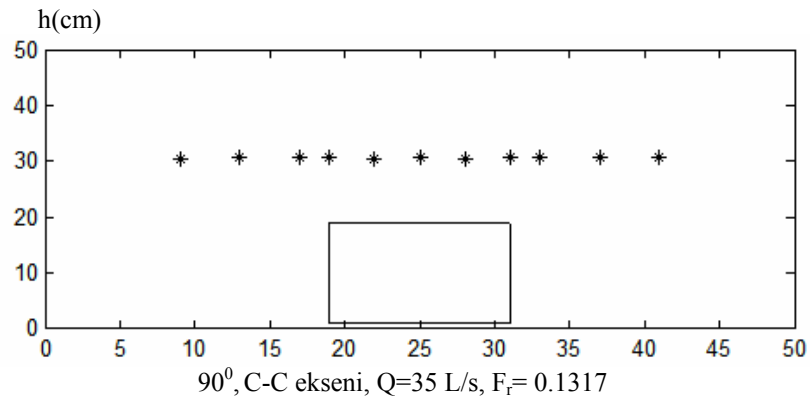
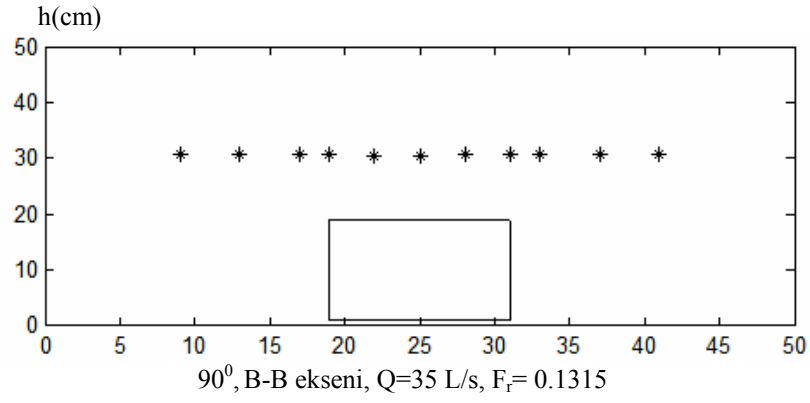
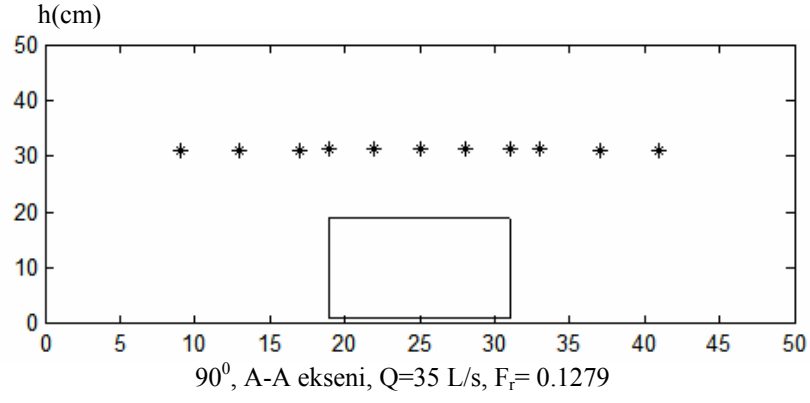
Ek 2.16 $\alpha = 90^0$, Q=30 L/s ‘de yan savak eşiğı boyunca elde edilen su yüzü profilleri



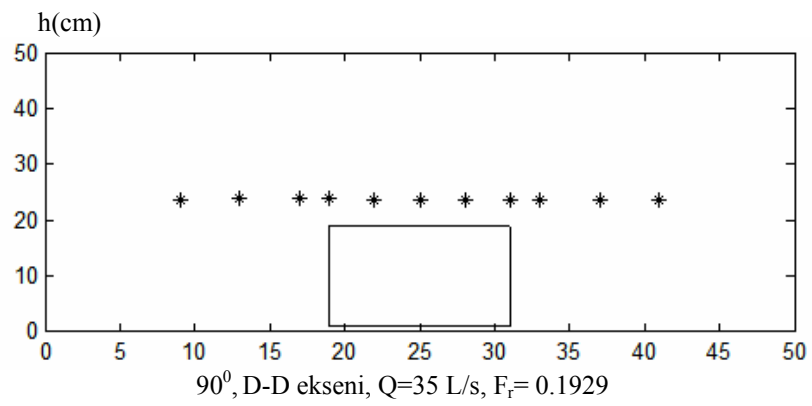
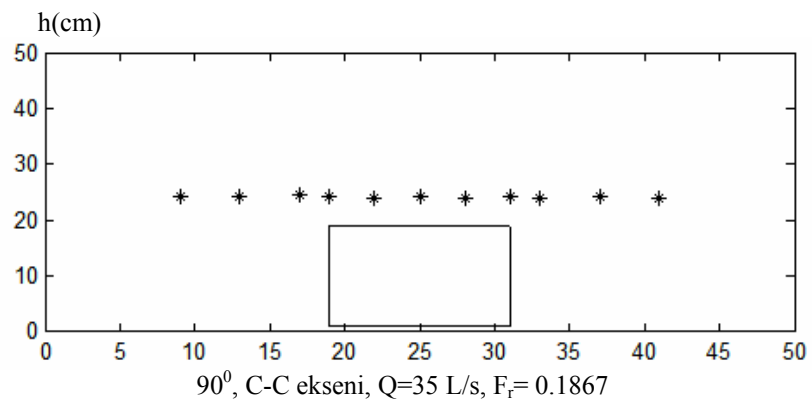
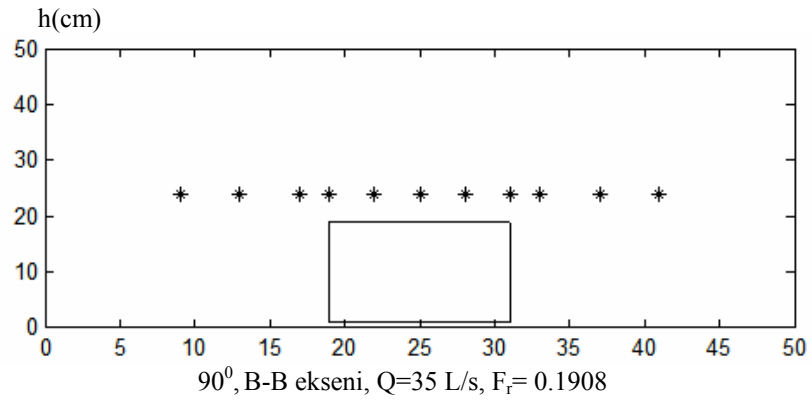
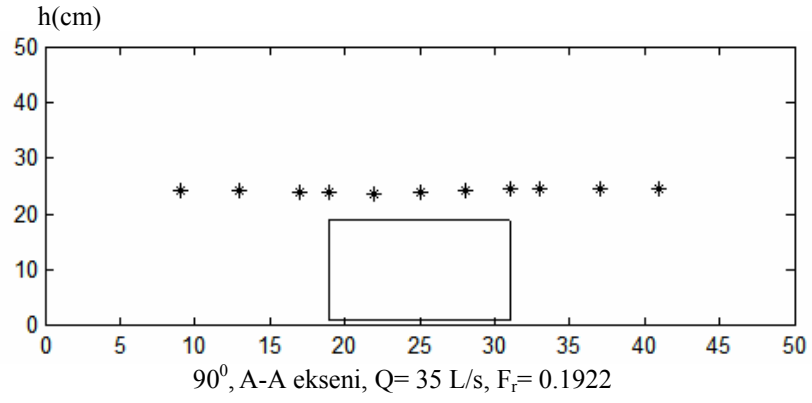
Ek 2.16 (devam).



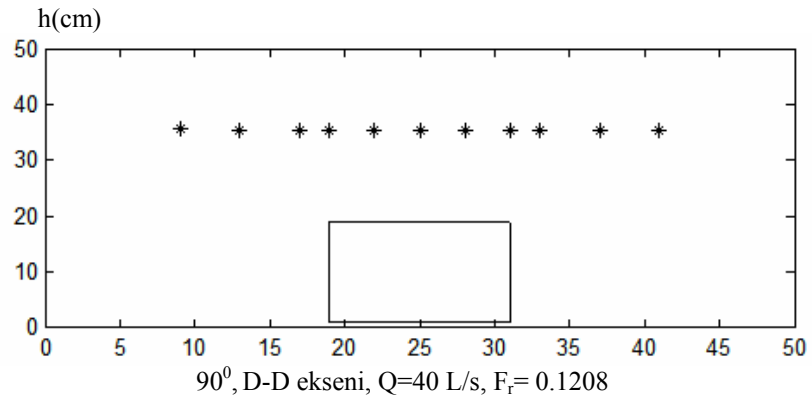
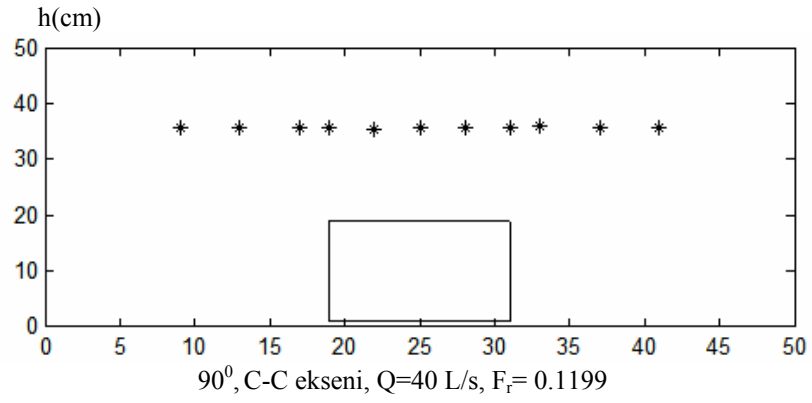
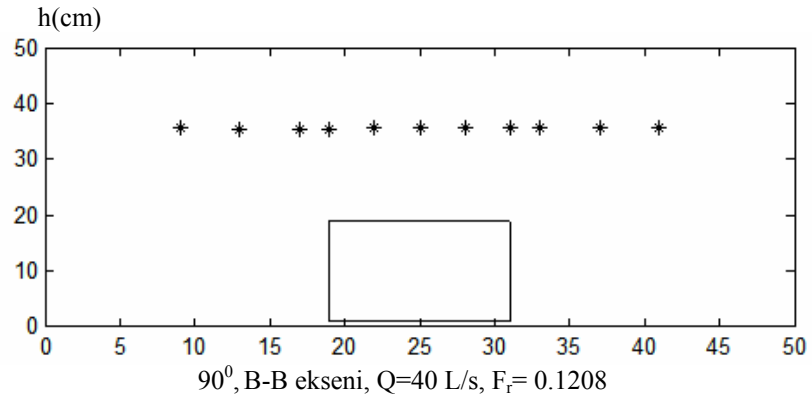
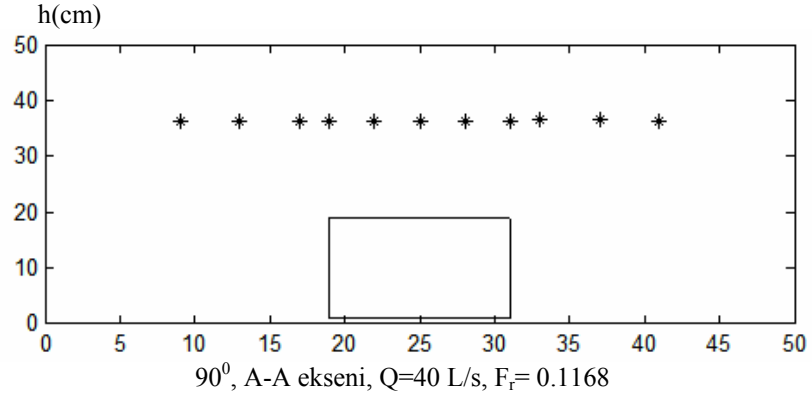
Ek 2.16 (devam).



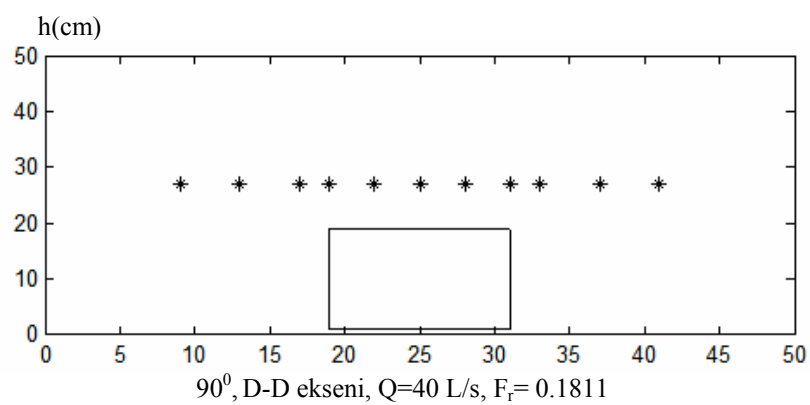
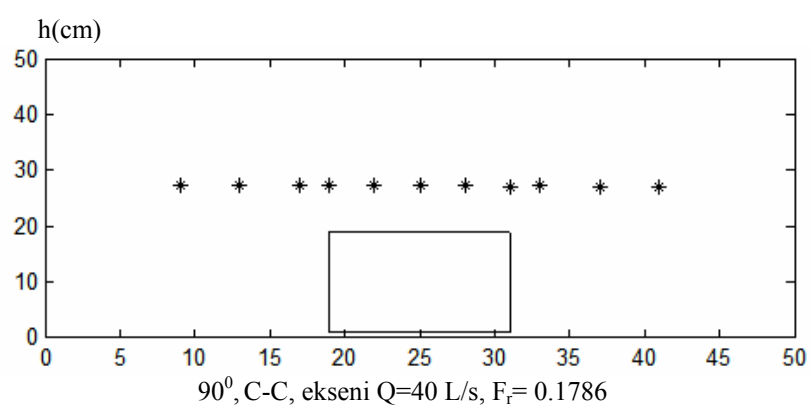
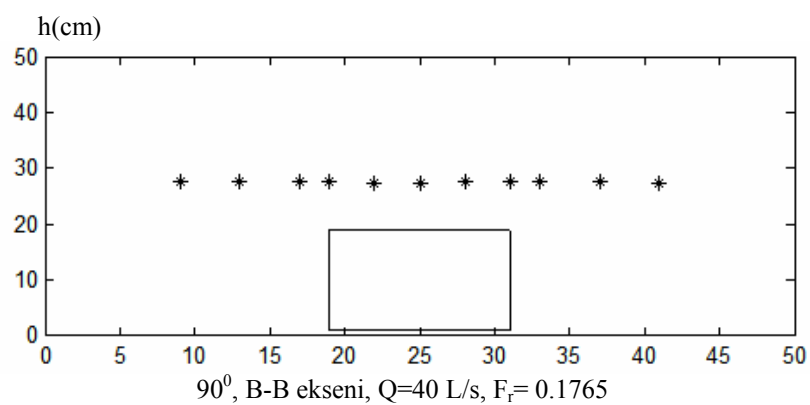
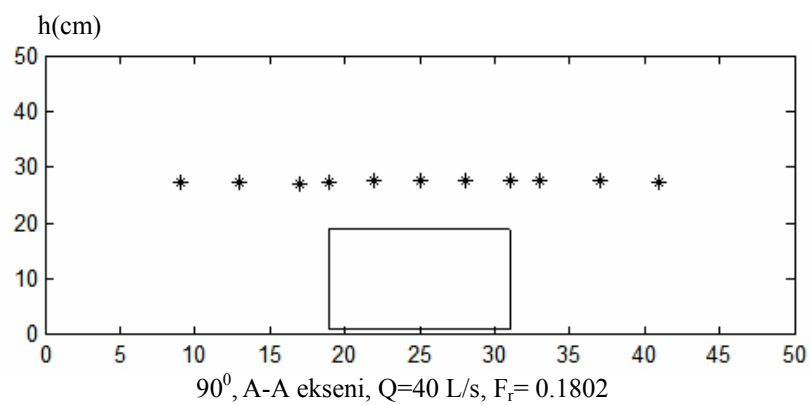
Ek 2.17 $\alpha = 90^0$, Q=35 L/s ‘de yan savak eşiğı boyunca elde edilen su yüzü profilleri



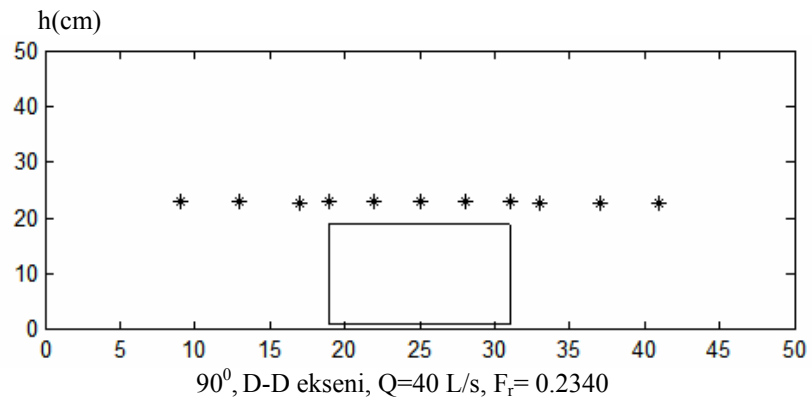
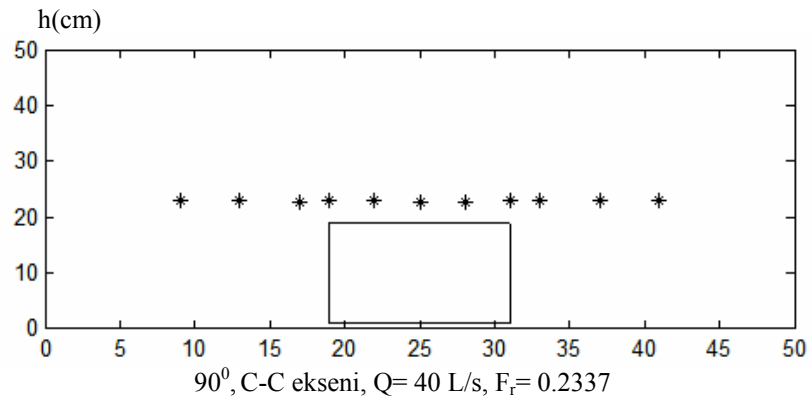
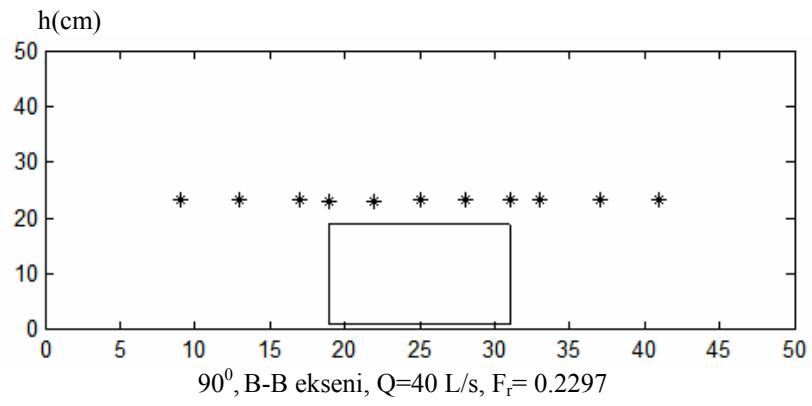
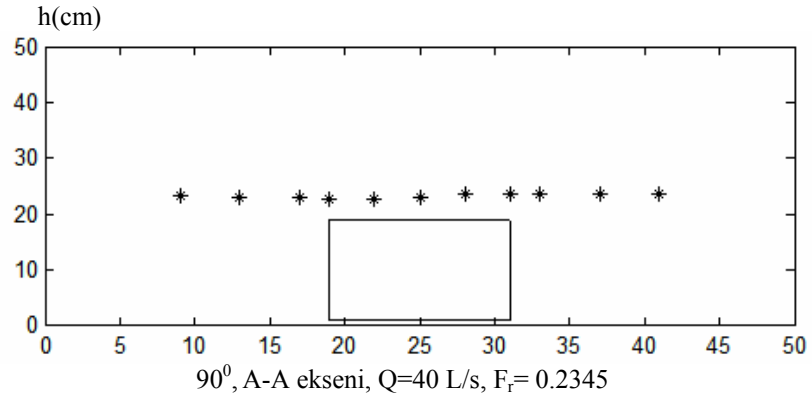
Ek 2.17 (devam).



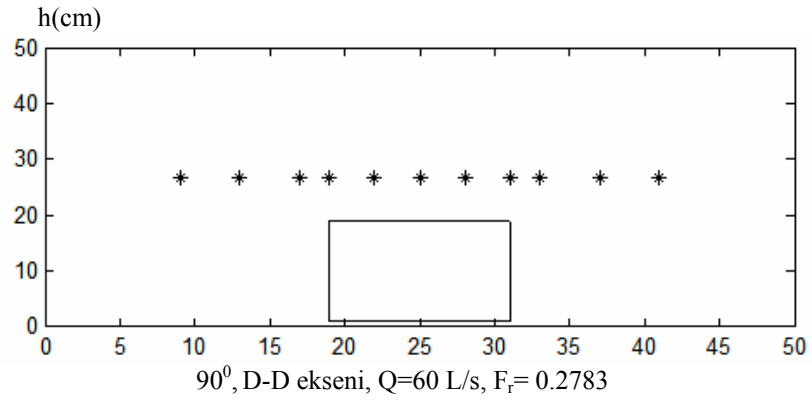
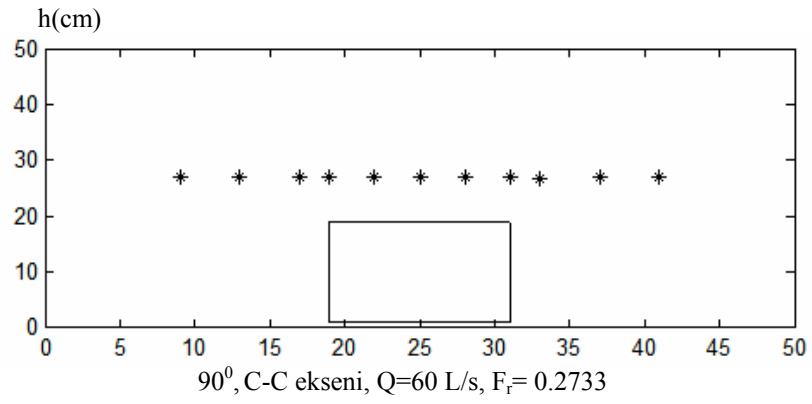
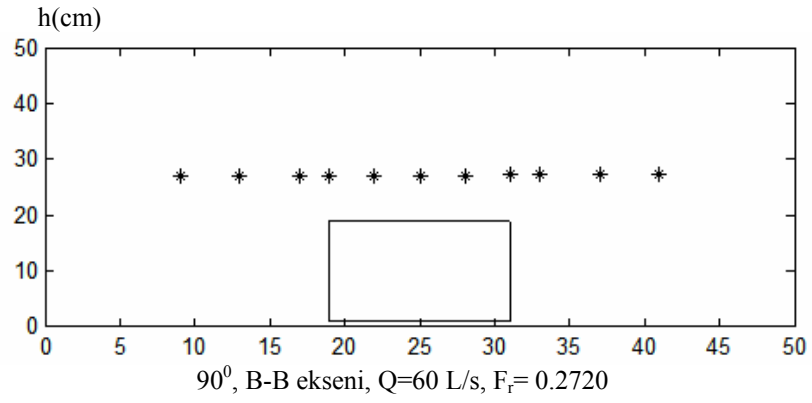
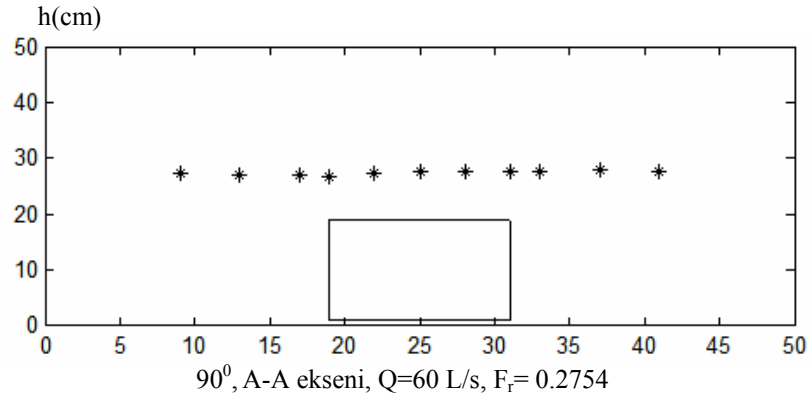
Ek 2.18 $\alpha = 90^\circ$, $Q=40$ L/s ‘de yan savak eşiğı boyunca elde edilen su yüzü profilleri



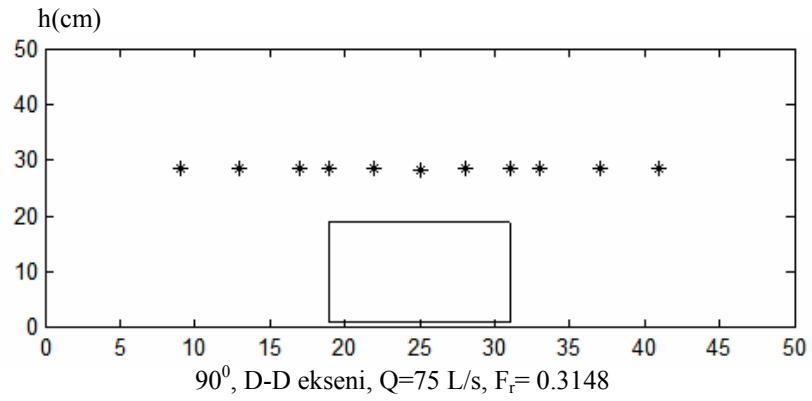
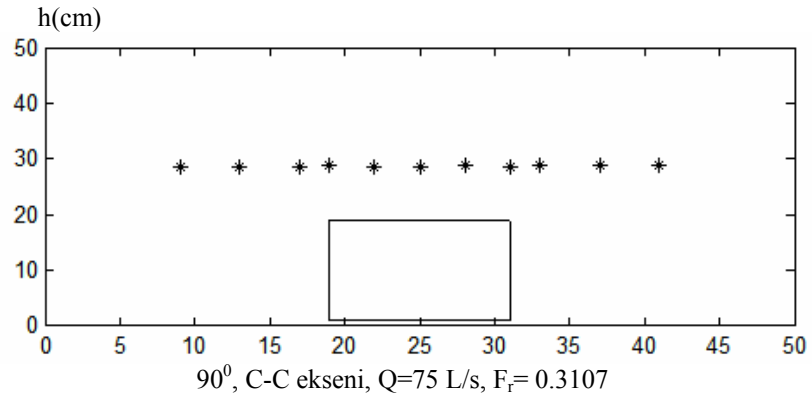
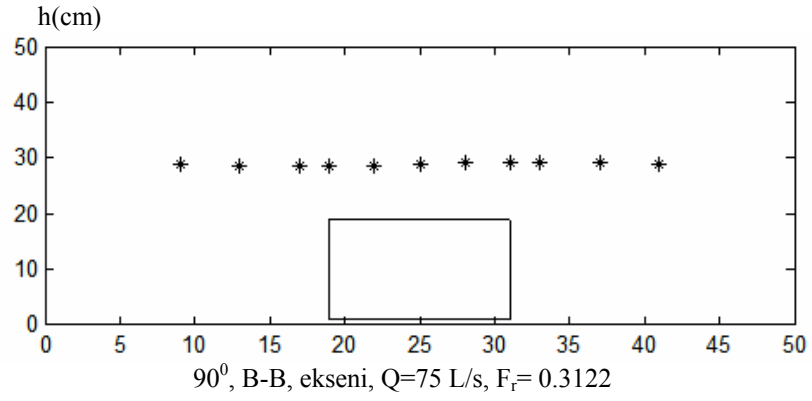
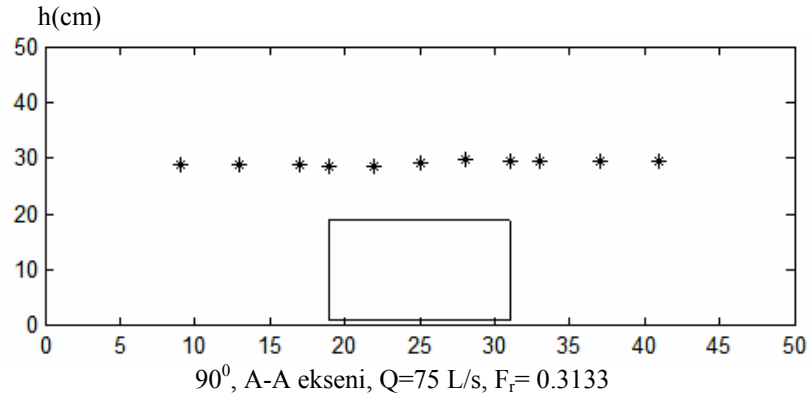
Ek 2.18 (devam).



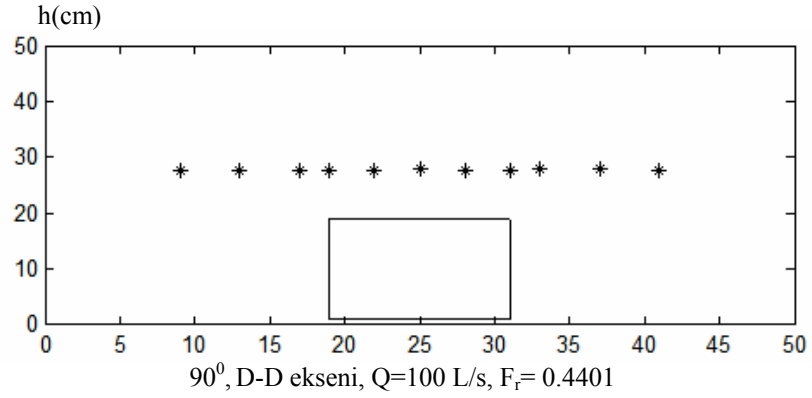
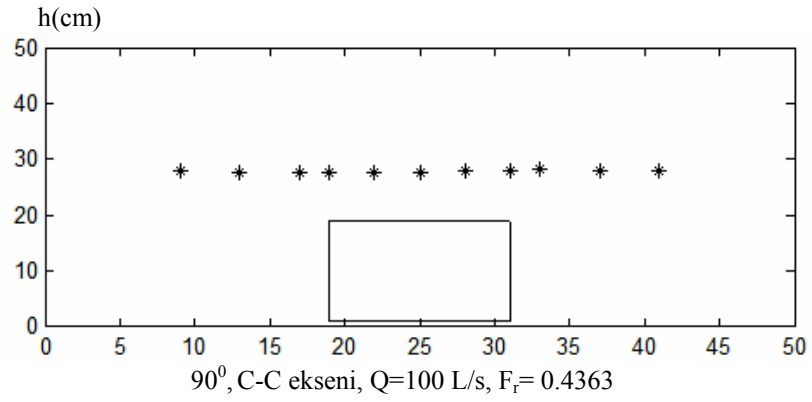
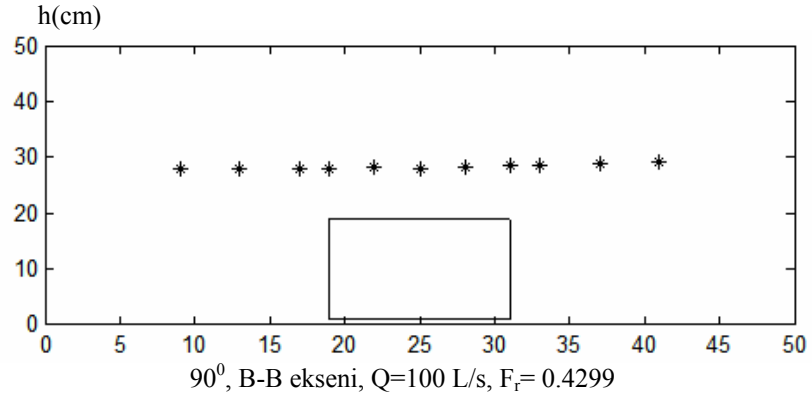
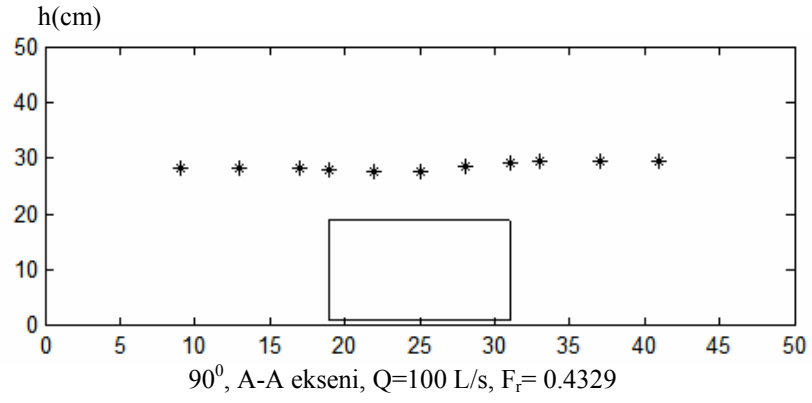
Ek 2.18 (devam).



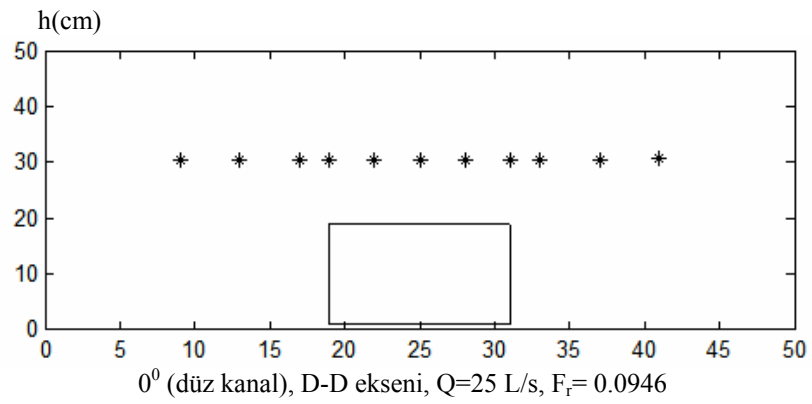
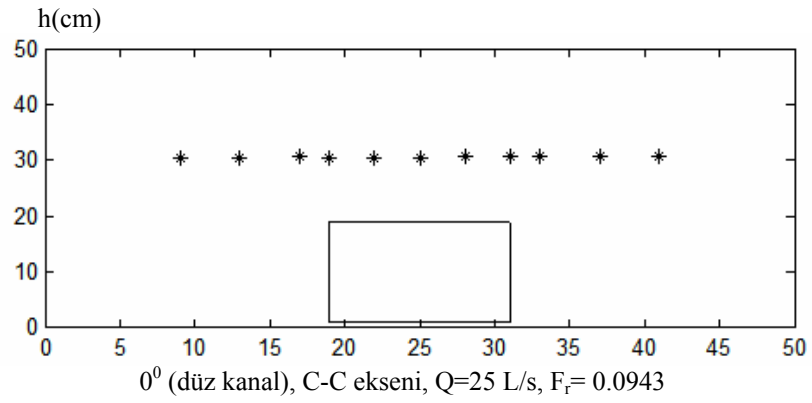
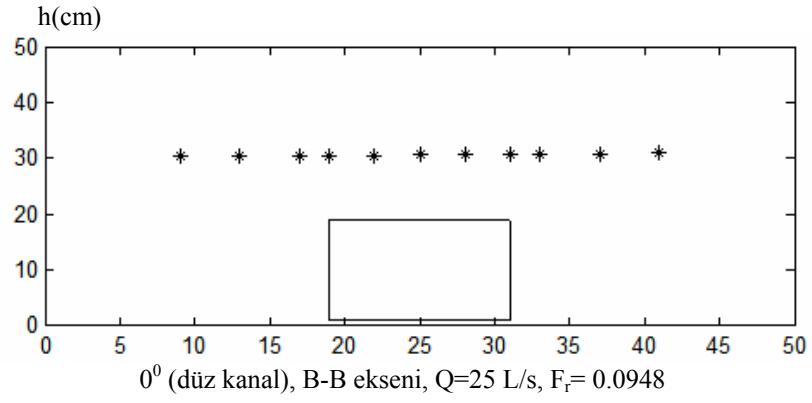
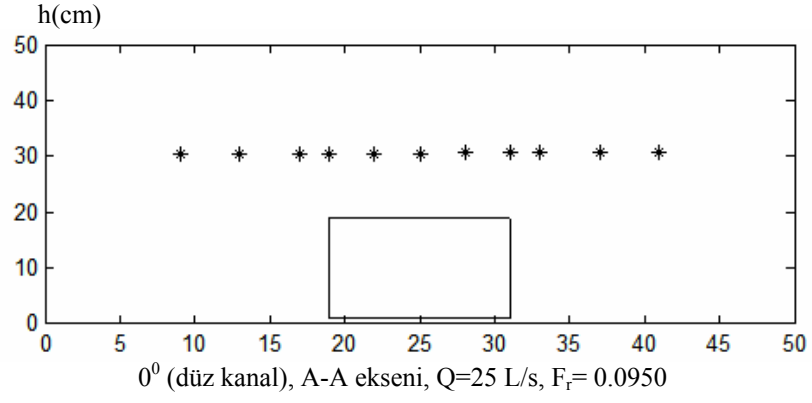
Ek 2.19 $\alpha = 90^0$, Q=60 L/s 'de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri



Ek 2.20 $\alpha = 90^0$, Q=75 L/s ‘de yan savak eşiğı boyunca elde edilen su yüzü profilleri

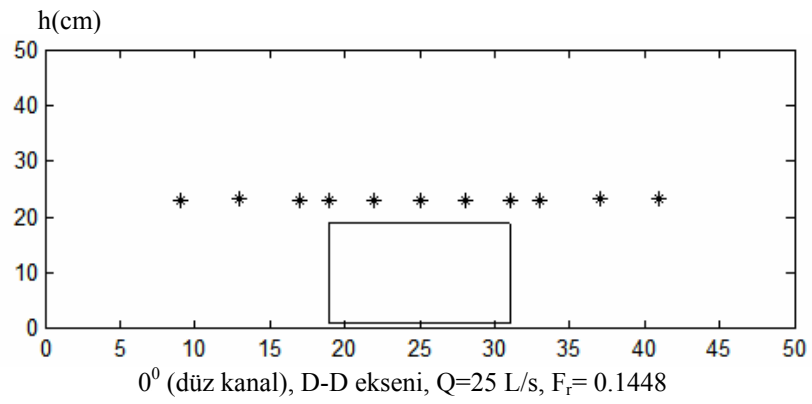
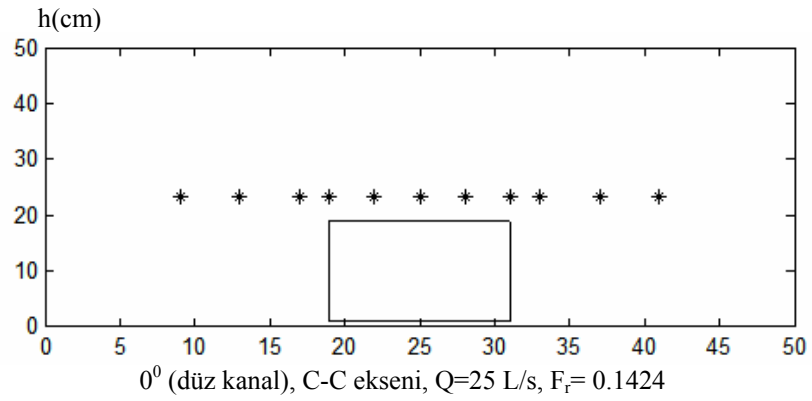
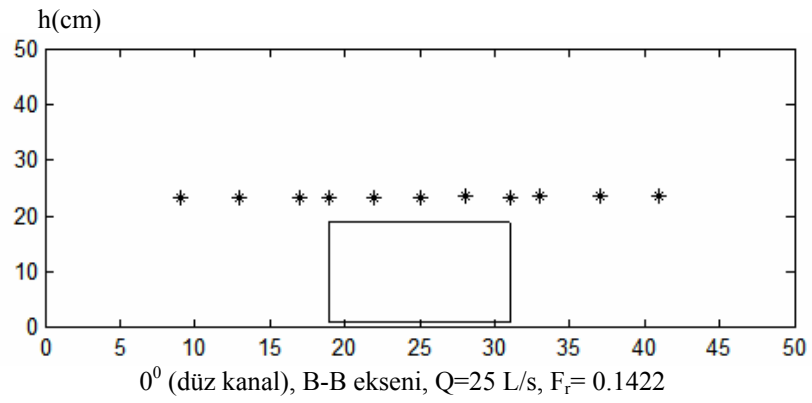
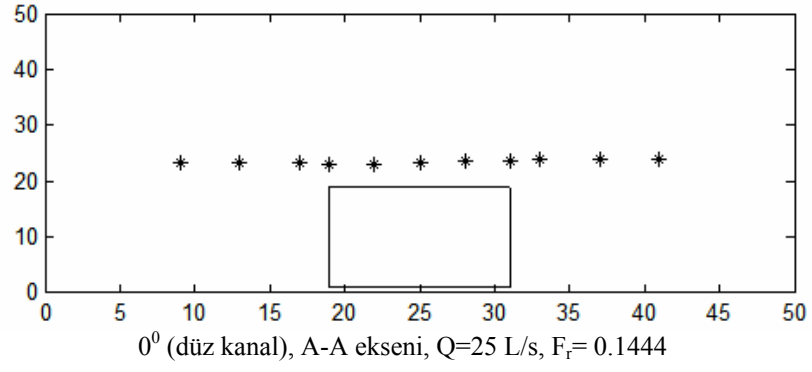


Ek 2.21 $\alpha = 90^0$, Q=100 L/s 'de yan savak eşiğı boyunca elde edilen su yüzü profilleri



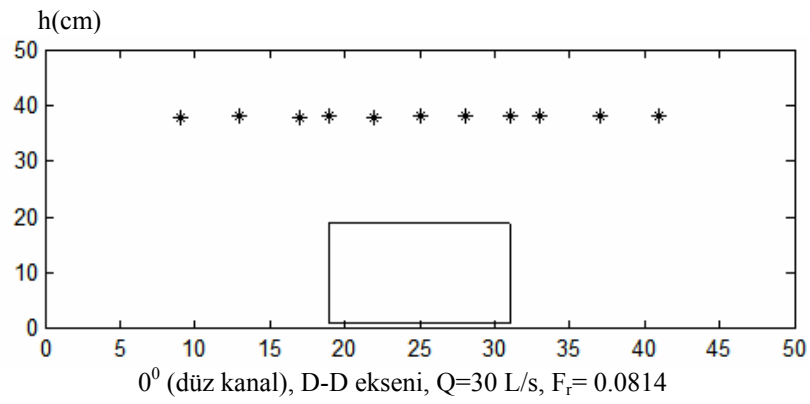
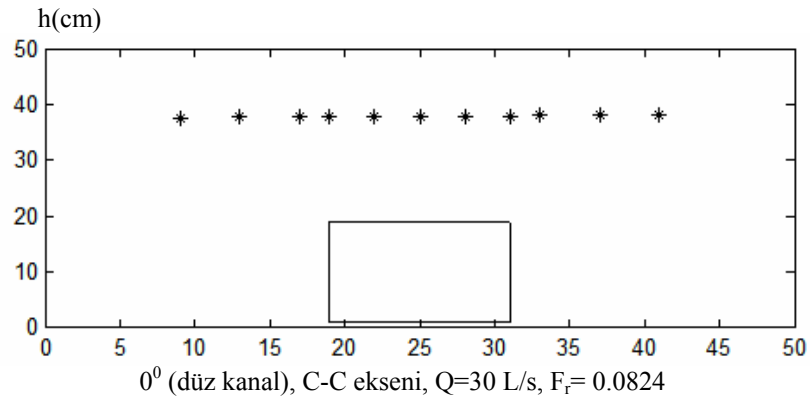
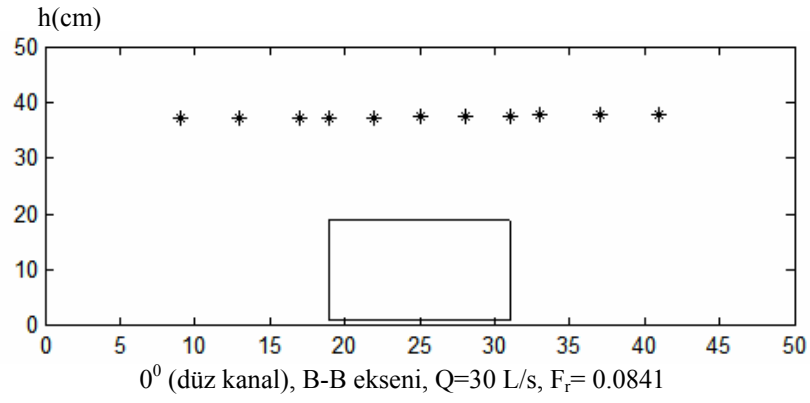
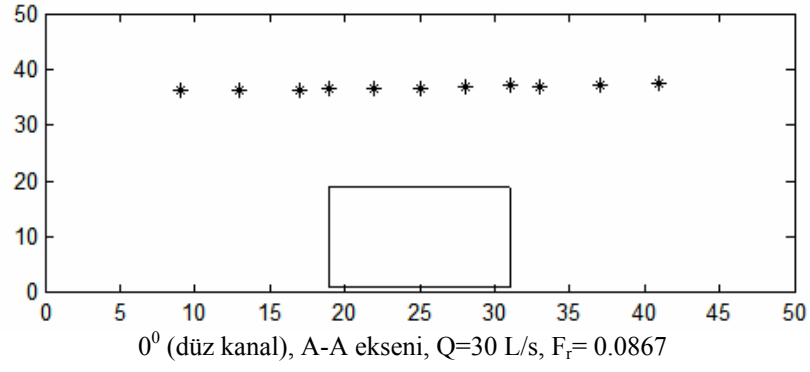
Ek 2.22 $\alpha = 0^0$ (düz kanal) , Q=25 L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri

h(cm)

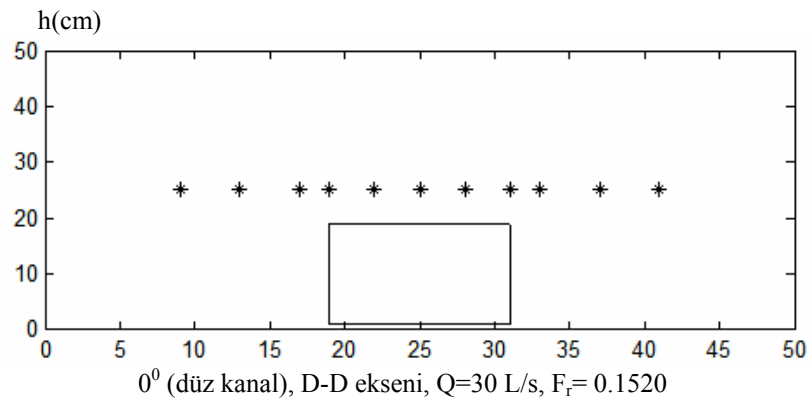
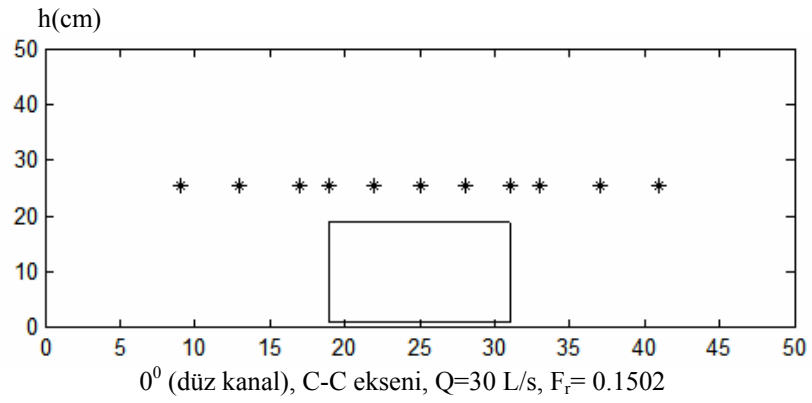
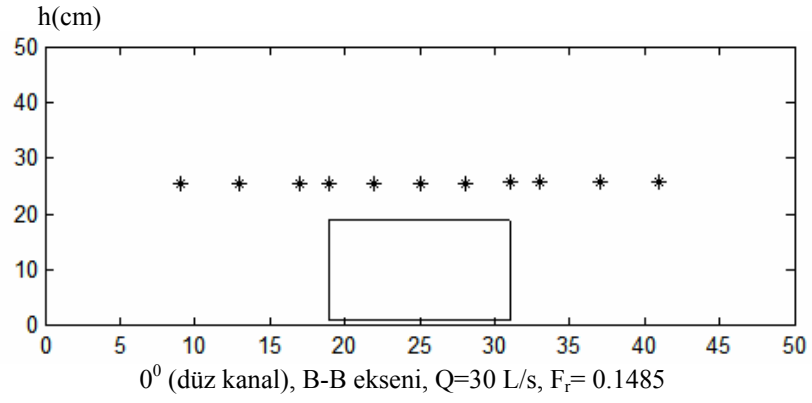
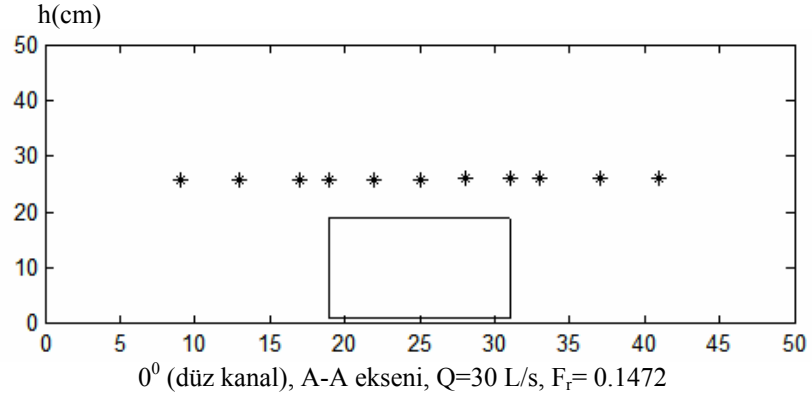


Ek 2.22 (devam).

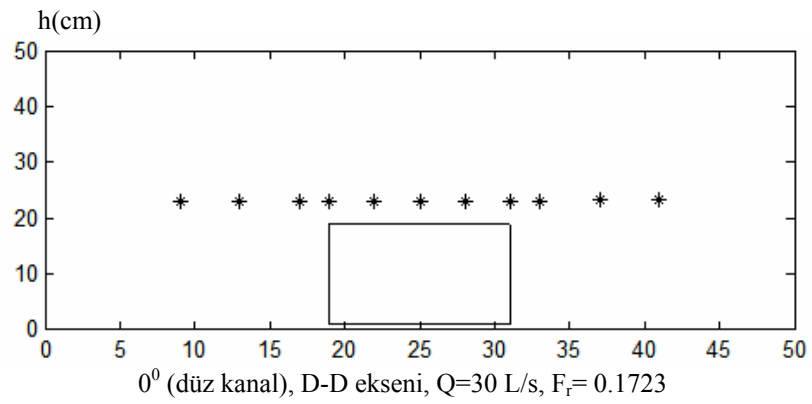
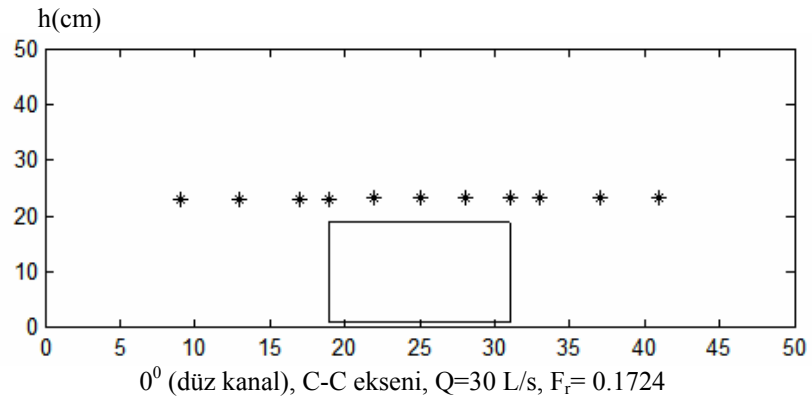
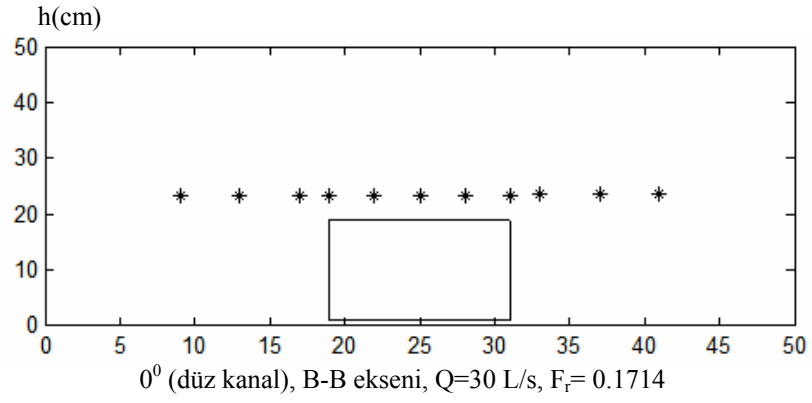
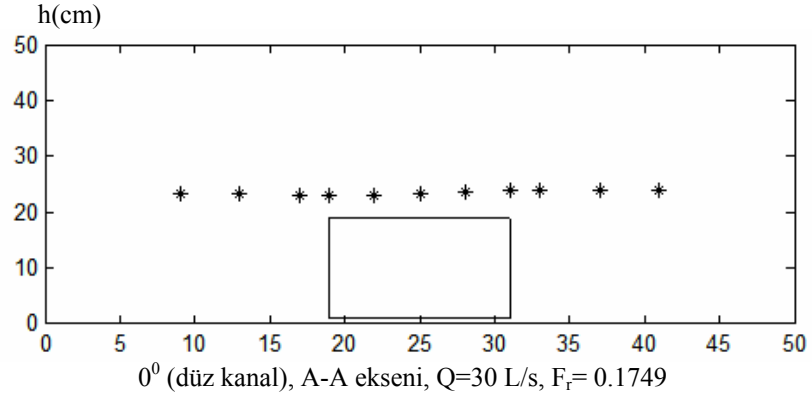
$h(\text{cm})$



Ek 2.23 $\alpha = 0^\circ$ (düz kanal) , Q=30 L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri

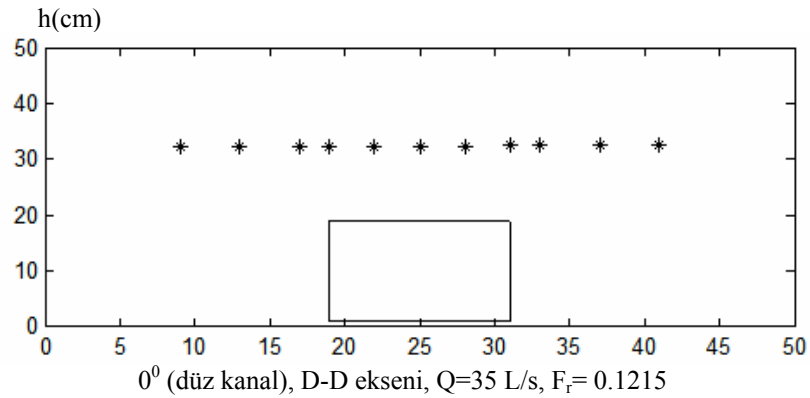
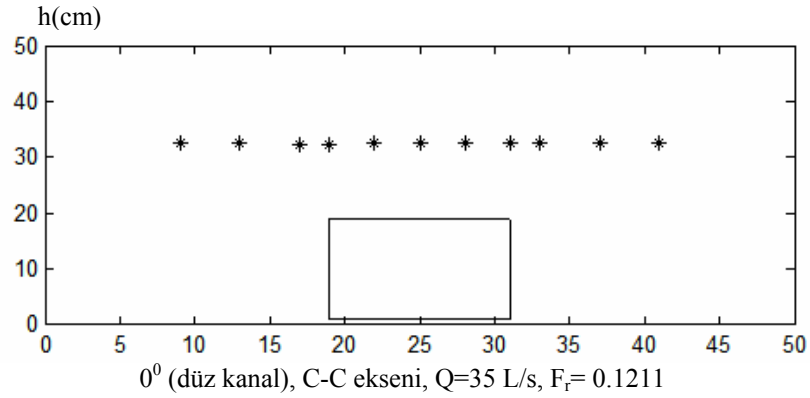
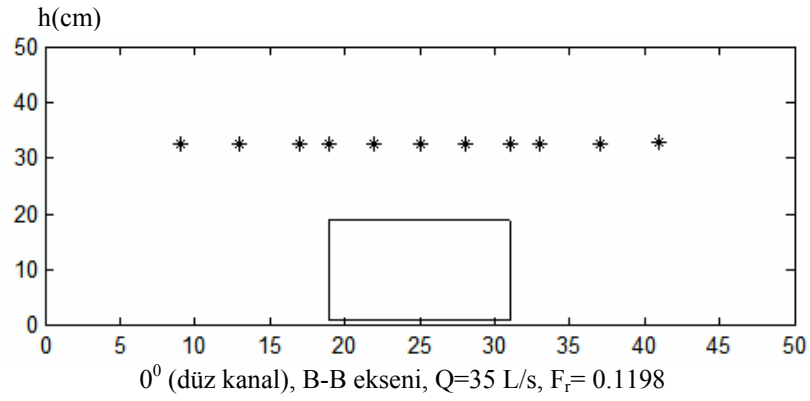
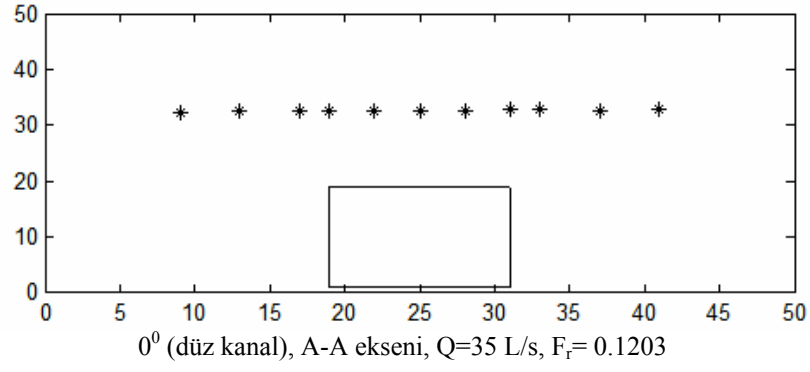


Ek 2.23 (devam).

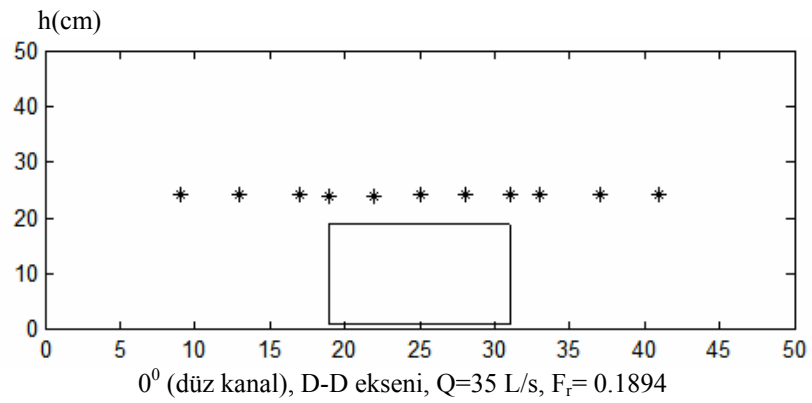
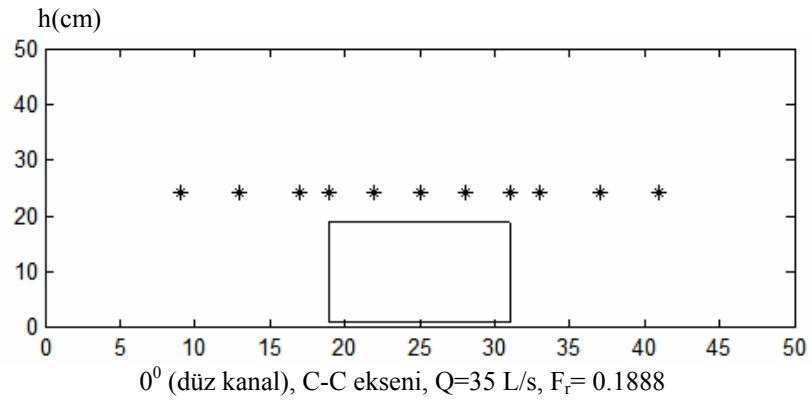
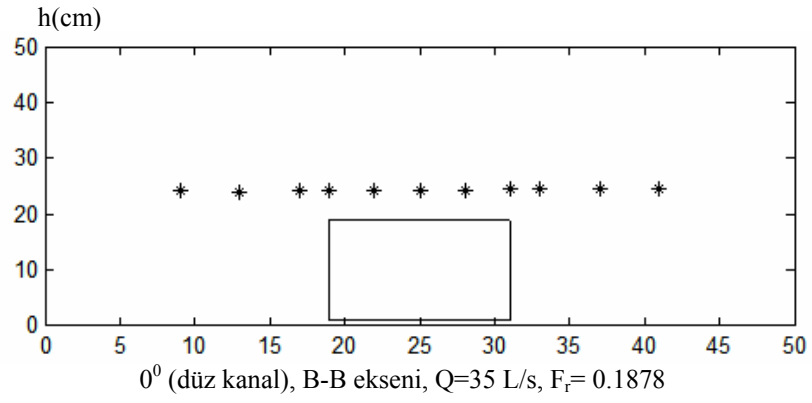
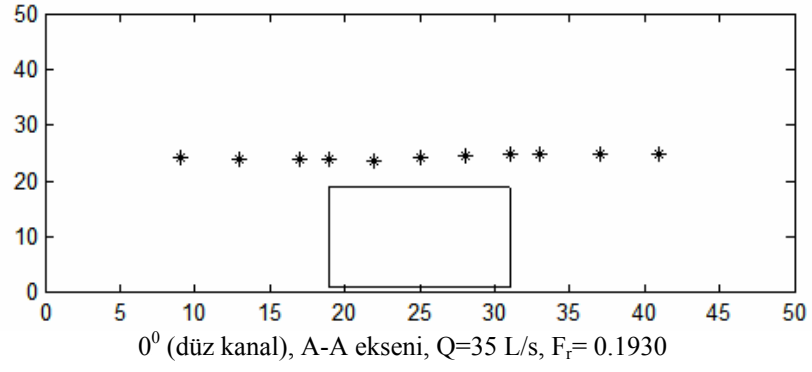


Ek 2.23 (devam).

$h(\text{cm})$

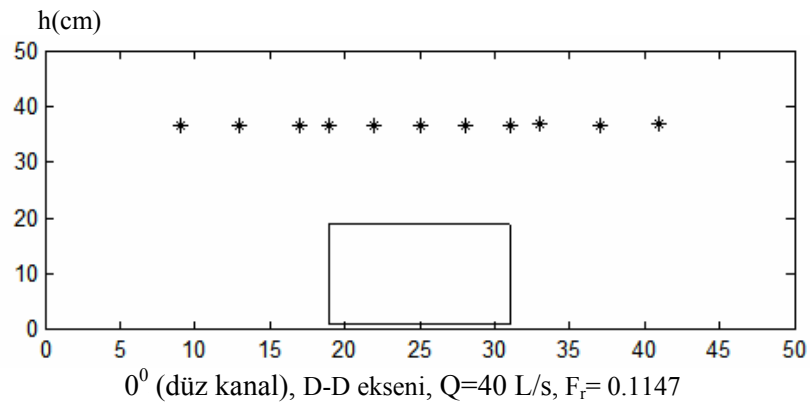
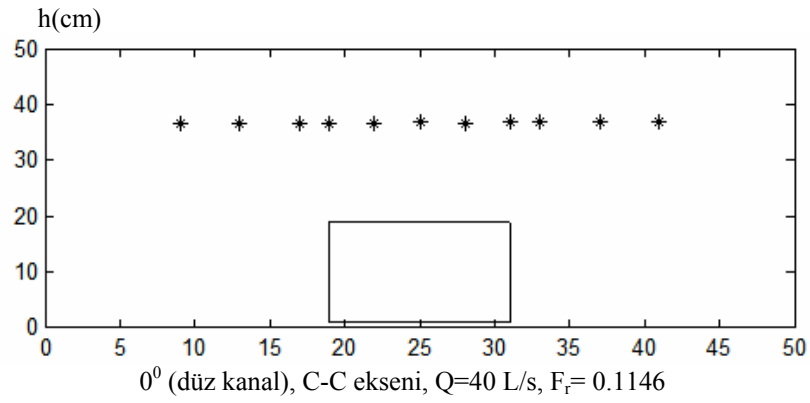
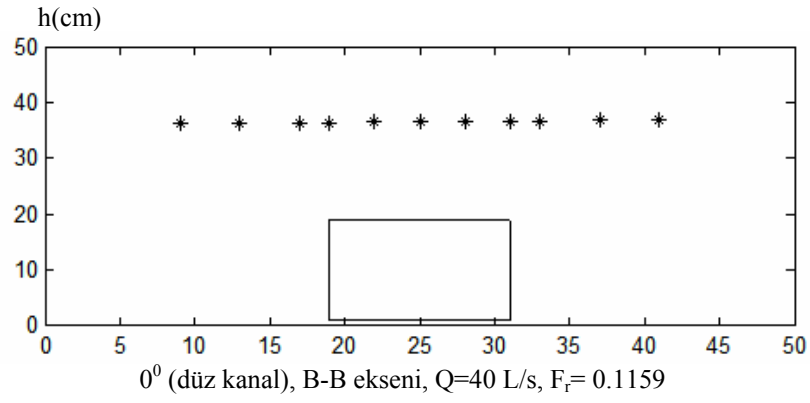
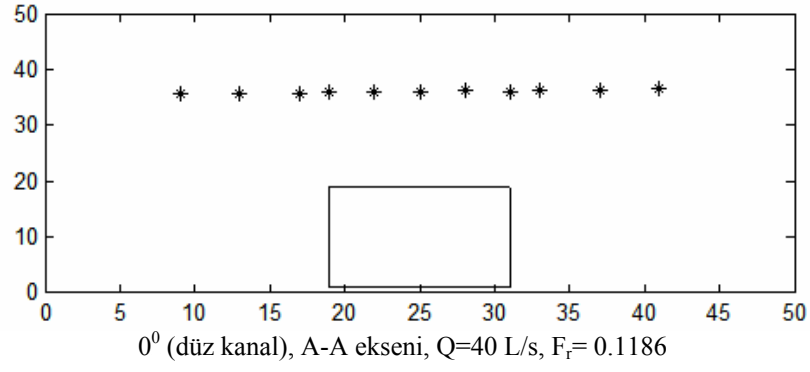


Ek 2.24 $\alpha = 0^\circ$ (düz kanal) , $Q=35$ L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri

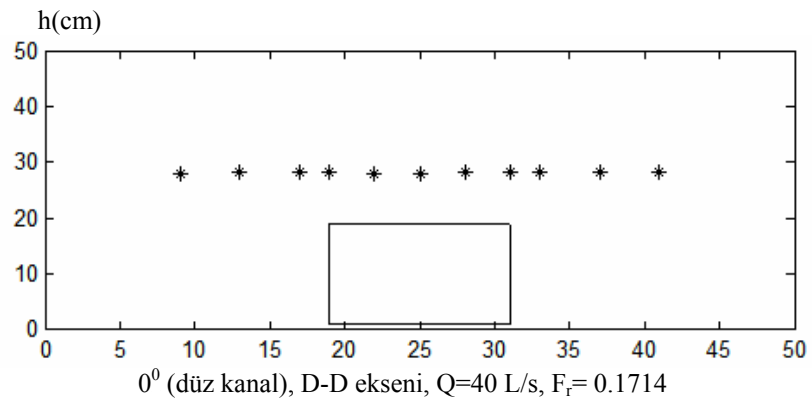
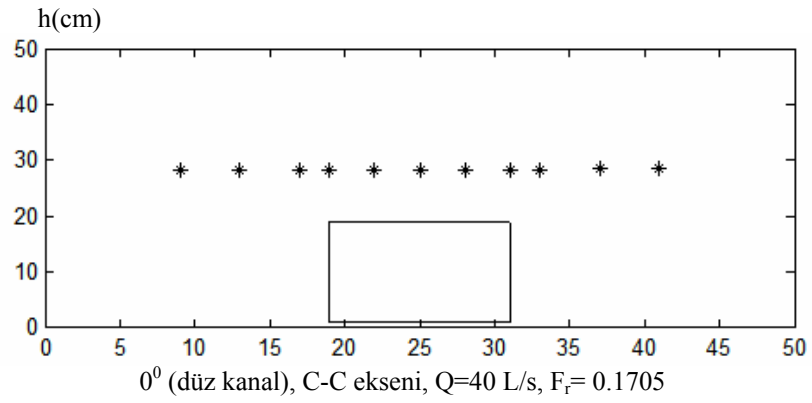
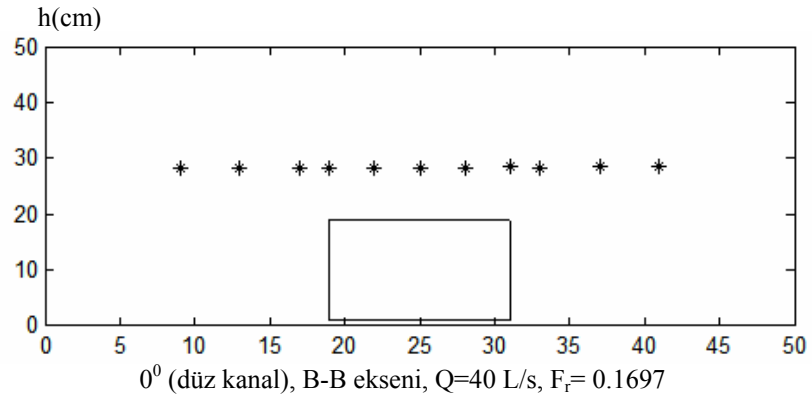
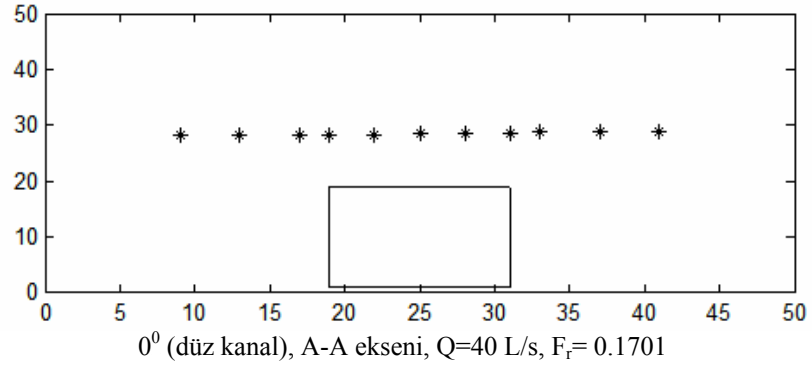


Ek 2.24 (devam).

h (cm)

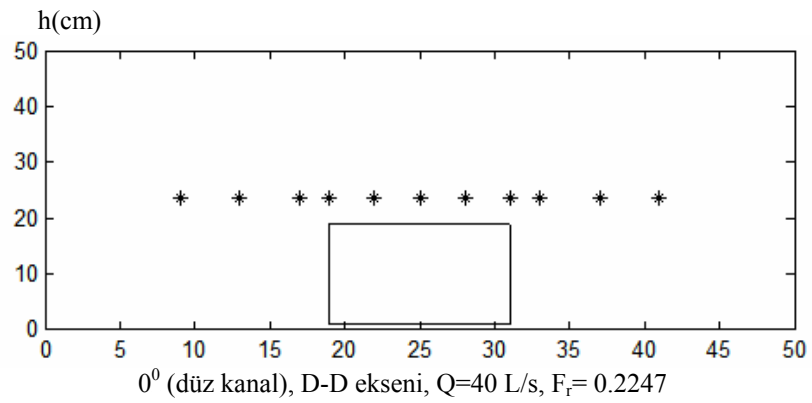
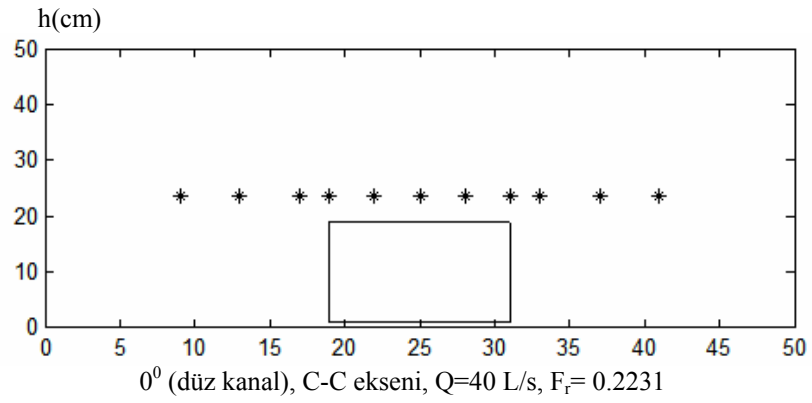
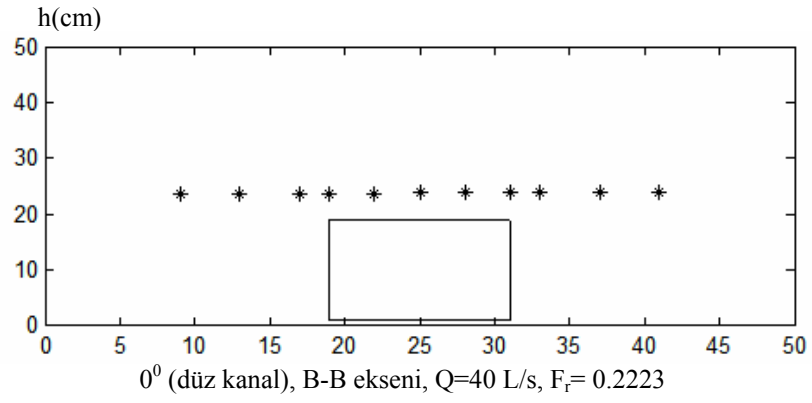
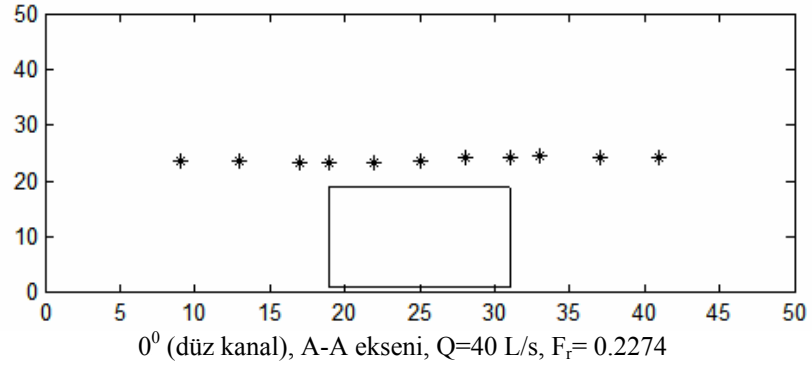


Ek 2.25 $\alpha = 0^0$ (düz kanal) , $Q=40$ L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri



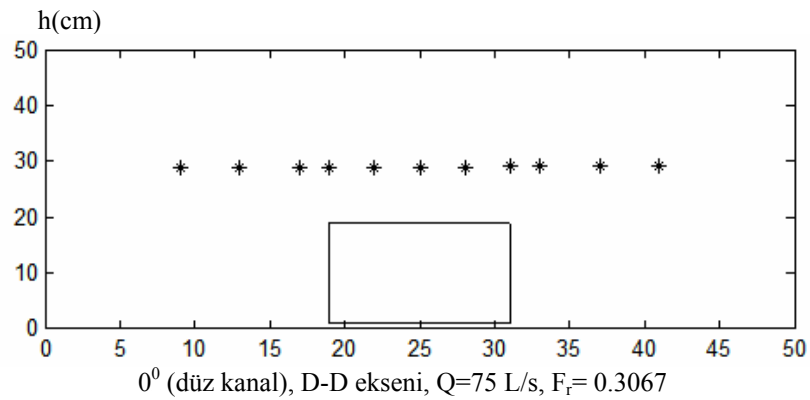
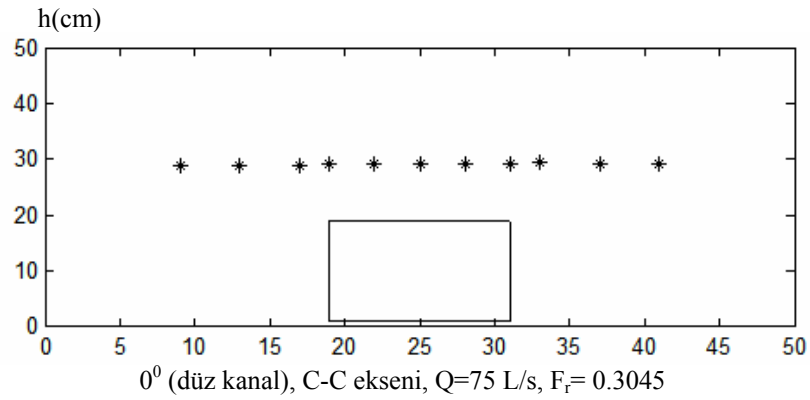
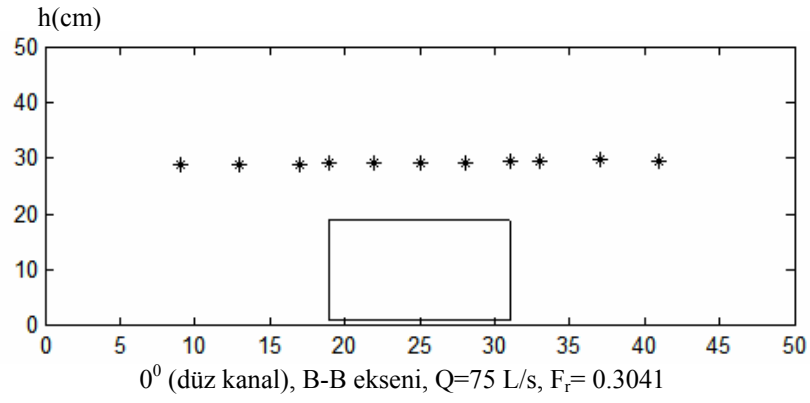
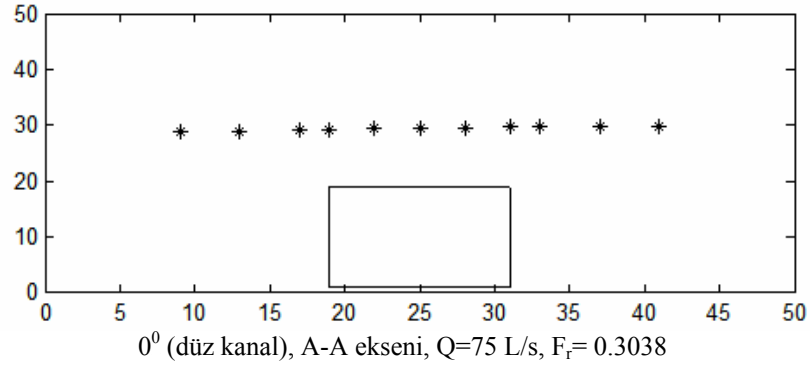
Ek 2.25 (devam).

$h(\text{cm})$



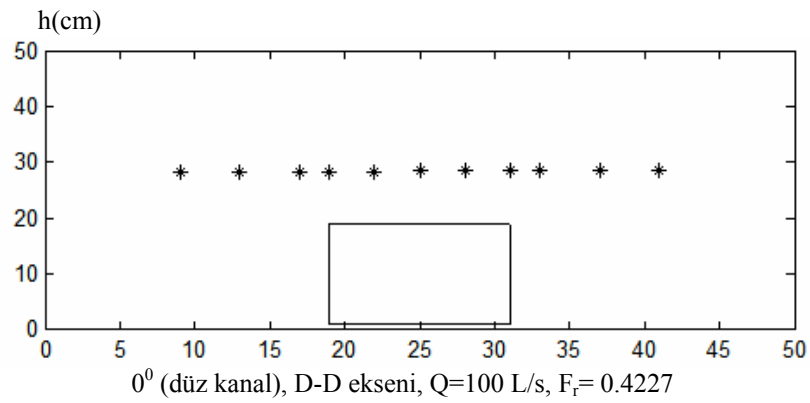
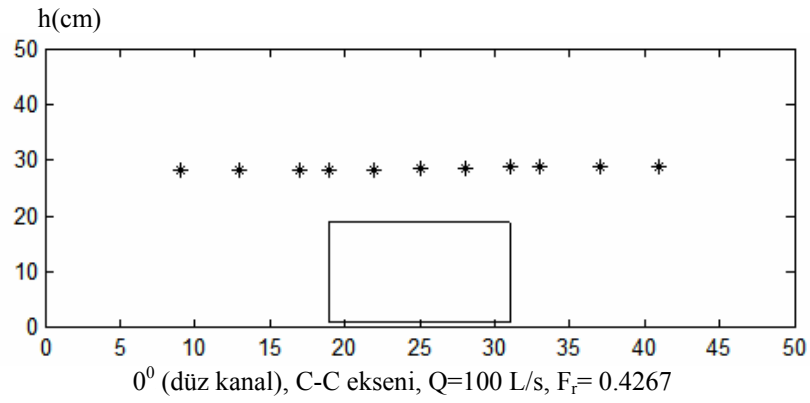
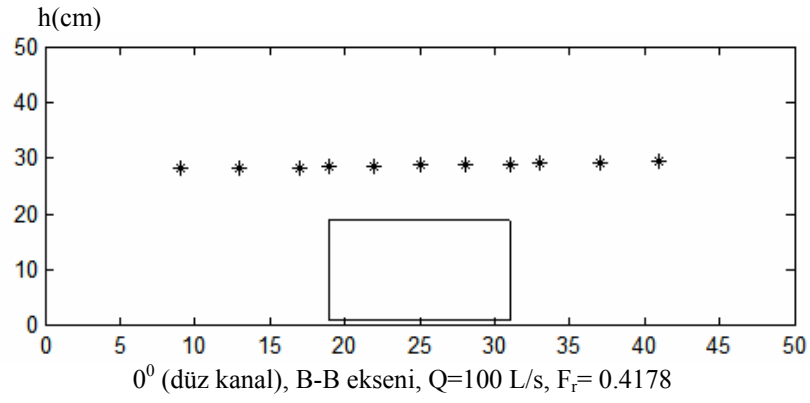
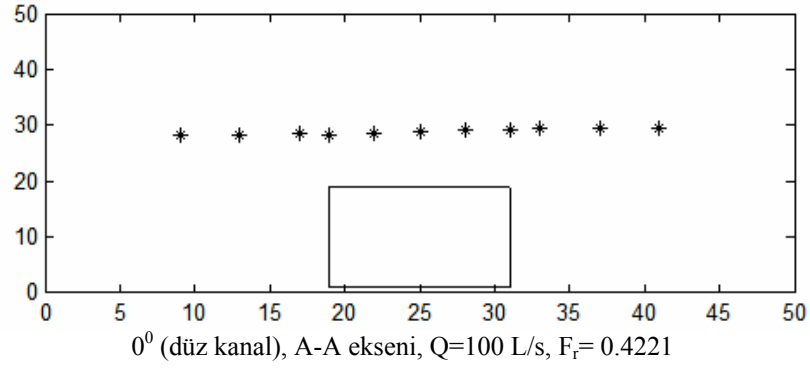
Ek 2.25 (devam).

$h(\text{cm})$



Ek 2.26 $\alpha = 0^\circ$ (düz kanal) , $Q=75$ L/s ‘de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri

h(cm)



Ek 2.27 $\alpha = 0^\circ$ (düz kanal) , $Q=100$ L/s 'de yan savak eşiği boyunca elde edilen su yüzü profilleri