

T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

AÇIK KANALLARDA SU YÜZÜ PROFİLİNİN FARKLI HİDROLİK
KOŞULLAR ALTINDA BELİRLENMESİ

Gökmen ÖZTÜRKMEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

(İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI)

DİYARBAKIR
ARALIK – 2008

T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne
DİYARBAKIR

Bu çalışma, jürimiz tarafından İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Jüri Üyesinin Ünvanı, Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Başkan	: Yrd. Doç. Dr. Nizamettin HAMİDİ	
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Z. Fuat TOPRAK (Danışman)	
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Orhan KAVAK	

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

17 / 12 / 2008

Prof. Dr. Hamdi TEMEL
ENSTİTÜ MÜDÜRÜ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca desteğini esirgemeyen, tecrübelerinden yararlandığım, tez çalışmam boyunca değerli zamanını benimle paylaşan danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Z. Fuat TOPRAK başta olmak üzere, görüş ve tavsiyelerinden yararlandığım Yrd. Doç. Dr. Nizamettin HAMİDİ' ye, Yrd. Doç. Dr. Orhan KAVAK' a, Öğr. Gör. Ali Em' e,

Değerli dostluklarıyla çalışma hayatımda ve bu tezin hazırlanması sürecinde desteklerini esirgemeyen, değerli mesai arkadaşlarım Arş. Gör. Senem YILMAZ, Arş. Gör. Felat DURSUN ve Elektronik ve Haberleşme Yüksek Mühendisi Serkan KÖSE başta olmak üzere burada adlarını sayamadığım tüm arkadaşlarıma,

Her daim en büyük destekçim olan sevgili aileme,

Bu çalışmayı DÜBAP- 07- 02- 29 numaralı proje ile destekleyen Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Yürütücü Sekreterliği' ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	iv
SUMMARY	v
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Su Kaynaklarının Geliştirilmesi Açısından Önemi	1
1.2. Su Yüzü Profili.....	2
1.3. Su Yüzü Profilinin Belirlenmesinde Problem Nedir?	3
1.4. Çalışmada İzlenen Yol	6
1.5. Önceki Çalışmalar	7
2. AÇIK KANAL AKIMLARI.....	16
2.1. Açık Kanal Akımlarında Temel Kavramlar.....	18
2.2. Açık Kanal Akımlarının Sınıflandırılması.....	20
2.2.1. Viskozitenin Akıma Etkisi.....	20
2.2.2. Yerçekimin Akıma Etkisi	21
2.2.3. Akım Derinliğinin Zamana Bağlı Olarak Değişimi	21
2.2.4. Akım Derinliğinin Konuma Bağlı Olarak Değişimi	22
2.3. Hız	23
2.4. Enerji- Özgül Enerji- Kritik Derinlik	24
2.5. Kararlı Üniform Akım ve Temel Denklemleri	27
2.6. Üniform Olmayan Akım.....	29
2.6.1. Tedrici Değişken Akım.....	29
2.6.2. Ani Değişken Akım	32

2.7. Açık Kanal Akımlarında Su Yüzü Profilleri.....	35
2.7.1. Su Yüzü Profil Tipleri.....	35
2.7.2. Su Yüzü Profillerinin Belirlenmesinde İzlenen Adımlar	37
2.8.3. Su Yüzü Profiline İlişkin Denklemlerin Çözüm Yöntemleri	38
3. DENEY DÜZENEĞİ ve DENEYSEL ÇALIŞMA	39
3.1. Deney Düzeneği	39
3.1.1. Deney Kanalı	39
3.1.2. Seviye Ölçer.....	40
3.1.3. Taban Eşikleri	44
3.2. Deneysel Çalışma.....	45
3.2.1. Seviye Ölçümleri	46
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	49
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	64
KAYNAKLAR	66
KISALTMALAR ve SİMGELER.....	70
ŞEKİLLER ÇİZELGESİ	72
TABLolar ÇİZELGESİ	74
ÖZGEÇMİŞ	75
EKLER	76

AÇIK KANALLARDA FARKLI HİDROLİK KOŞULLAR ALTINDA SU YÜZÜ PROFİLİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, açık kanal akımlarında ani değişim kesitlerinde su yüzü profilinin belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Bu amaçla yapılan deneysel çalışmada, sabit debi ve sabit taban eğimine sahip bir açık kanal akımında farklı eşik tipleri için eşik menba ve mansabında akım doğrultusunda meydana gelen su yüzü değişimleri gözlenmiş ve ölçülmüştür. Deneyler, laboratuvar şartlarında, dikdörtgen kesitli bir kanal üzerinde, kararlı akım durumu ve farklı geometrik şekil ve boyutlardaki 12 tane taban eşiği için tekrarlanmıştır. Kanalin, cidar pürüzlülüğü, taban eğimi ve genişliği ile akımın debisi sabit iken farklı geometri ve boyutlara sahip taban eşikleri ile oluşturulan her yerel değişim bölgesi için birer su yüzü profili elde edilmiştir. Deneyler her bir eşik için üç kez olmak üzere toplam 36 kez tekrarlanmıştır. Böylece taban eşiklerinin geometrisi ve boyutlarının su yüzü profili üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında ölçülerek elde edilmiş ve çalışmanın ekler kısmında sunulan verilerin, konuya ilişkin teorik çalışmalarda ve modellemelerde güvenle kullanılabileceği düşünülmekte ve konu ile ilgilenen araştırmacılar için yararlı olacağı umulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Su yüzü profili, Açık kanal akımı, Taban eşiği

DETERMINING THE WATER SURFACE PROFILES IN OPEN CHANNELS AT DIFFERENT HYDRAULIC CONDITIONS

SUMMARY

In this study, water surface profiles in sudden change sections in open channel flows has been researched. For this purpose, change of the water surface along the upstream and downstream of different types floor sills has been observed and measured. The channel that the experiments are performed has a rectangular cross section. At steady flow conditions, experiments have been performed for the 12 floor sills which has various geometrical shape and dimensions. Friction coefficient, floor slope, width of the channel and flow rate are constant. Water surface profiles have been obtained for each sudden change sections that has formed by different type floor sills. Experiments have been repeated 3 times for each type of sills and by this way 36 experiments have been performed. Thus, the effects of floor sill shape and dimensions on water surface profiles have been researched.

It is hope that, the experimentally obtained data, that is given in the appendices of the study will be useful for reseachers and could confidentially be used for theoretical studies as well as for modeling.

Key Words: Water surface profiles, Open channel flow, Floor sill

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Su Kaynaklarının Geliştirilmesi Açısından Önemi

Bilindiği üzere yeryüzünde yağışların ve buna bağlı olarak su varlığının yıl içindeki zamansal ve konumsal dağılımı homojen değildir (Aytek ve Toprak, 2001). Diğer taraftan, küresel iklim değişikliğinden söz edildiği günümüzde (IPCC, 2001) yakın gelecekte yeryüzünde yağış, sıcaklık, nem ve benzeri önemli iklim parametrelerinin gerek yıl içindeki gerek uzun bir dönem içerisindeki dağılımlarının daha belirgin bir şekilde değişeceği tahmin edilmektedir (IPCC, 2007). Bu değişime bağlı olarak şu ana kadar kurak olmayan bazı bölgelerin çölleşmesine karşın insan yaşamına uygun olmayan bazı soğuk bölgelerin ise ılımanlaşacağı tahmin edilmektedir (Karaca ve Şen, 2007). Dünyada meydana gelen buzul erimeleri, deniz seviyesindeki yükseliş, zamansız yağış ve taşkınlar, kuraklık, kasırga ve benzeri meteorolojik afetlerin sayısında küresel iklim değişimine bağlı olarak artış kaydedilmektedir (IPCC, 2001 / IPCC, 2007). Türkiye’de 2007 yılında İç Anadolu ve kısmen Ege Bölgelerinde, 2008 yılında da Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde meydana gelen kuraklıklar, ülke genelinde son yıllarda meydana gelen taşkın felaketleri küresel iklim değişikliğinin yaşanılan coğrafyada da hissedilir duruma geldiğinin birer göstergesidir.

Küresel iklim değişikliğine bağlı olarak dünyada yağış/su dengesinin bozulmasına karşın küresel nüfus artışı ve buna bağlı olarak tarım-hayvancılık, sanayi ve evsel su ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Bu nedenle günümüzde dünyanın birçok ülkesinde hem su temininde hem de kullanılmış suların uzaklaştırılmasında ciddi sorunlar yaşanmaktadır (Aytek ve Toprak, 2001). Bu durum, su kaynaklarının kirlenmesi ve içme ve kullanım suyunda kalitenin düşmesi gibi devasa sorunları da beraberinde getirmektedir.

Bundan harekele, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de doğal su kaynaklarının belli bir plan çerçevesinde korunması, kontrol edilmesi ve en verimli şekilde kullanılmasına yönelik çalışmaların önem kazandığı söylenebilir. Günümüzde su kaynaklarının geliştirilmesinde, artık tek tek su kaynaklarının projelendirilmesi yerine, havza bazında, havzalar arası ve hatta bölge ve ülkeler arası planlamalara ihtiyaç hissedilmektedir. Büyük ölçekli bu problemler artık basit birer mühendislik problemi

olmaktan çıkmış, bilim insanları arasında ve hükümetler arasında uluslararası düzeyde tartışılır hale gelmiştir.

Taşkın kontrolü, akarsu düzenlemesi, akarsularda katı madde hareketinin kontrolü, akarsu taşımacılığı ve geçişleri, sulama-kurutma sistemleri, bağlamalar, barajlar ve baraj hazneleri, su alma yapıları, enerji kırıcı yapılar, su kuvveti tesisleri vb. su kaynaklarına yönelik faaliyetlerin tümü su kaynaklarını geliştirilmesi kapsamına girer. Su kaynaklarını geliştirmeye yönelik faaliyetlerin planlama, inşa, işletme aşamalarının güvenli-ekonomik ve verimli bir şekilde icra edilmesi, yapı-su-zemin etkileşimlerinin, hidrolik-hidrolojik etki-etkenlerin tam ve doğru olarak göz önüne alınmasıyla mümkündür.

Yukarıda kısaca önemi ve kapsamından söz edilen “su kaynaklarının geliştirilmesi” çalışmalarında, suyun kalitesi, optimum kullanımı ve taşkından korunma açısından su yüzeyinin alacağı şeklin önceden (projelendirme aşamasında) tahmini büyük öneme sahiptir. Sulama ve drenaj kanalları, akarsular, galeriler, dolu savaklar, yan savaklar, enerji kırıcı yapılar ve bağlamalar gibi açık kanal akımlarının sözkonusu olduğu yapıların boyutlandırılmasında su yüzeyi profilinin önceden bilinmesi özellikle taşkınlardan korunmak ve su yapılarını korumak açısından büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada açık kanal olarak “su yüzeyinin atmosfer ile temas halinde bulunduğu akımlar” değerlendirilmiştir. Akarsular genel olarak geometrik olmayan enkesitlere sahip olmakla birlikte özellikle “geniş akarsu” olarak kabul edilebilecek kimi akarsular dikdörtgen enkesitli olarak değerlendirilebilir. Bunun yanında yapay açık kanallar genellikle yamuk (trapez) veya dikdörtgen enkesitlidir. Bundan hareketle bu çalışmada dikdörtgen kesitli bir açık kanal üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Farklı geometri ve yüksekliklere sahip taban eşikleri kullanılarak farklı hidrolik ve geometrik koşullara sahip açık kanal akımları sağlanmıştır. Böylece dikdörtgen kesitli açık kanal akımlarında farklı hidrolik ve geometrik koşullar altında su yüzeyinin alacağı şekiller deneysel olarak tespit edilmiştir. Eş zamanlı olarak video ve fotoğraf görüntüleri elde edilmiş, grafikleri çizilmiş ve sonuçlar hem tablo hem de fotoğraf ve grafikler şeklinde sunulmuştur.

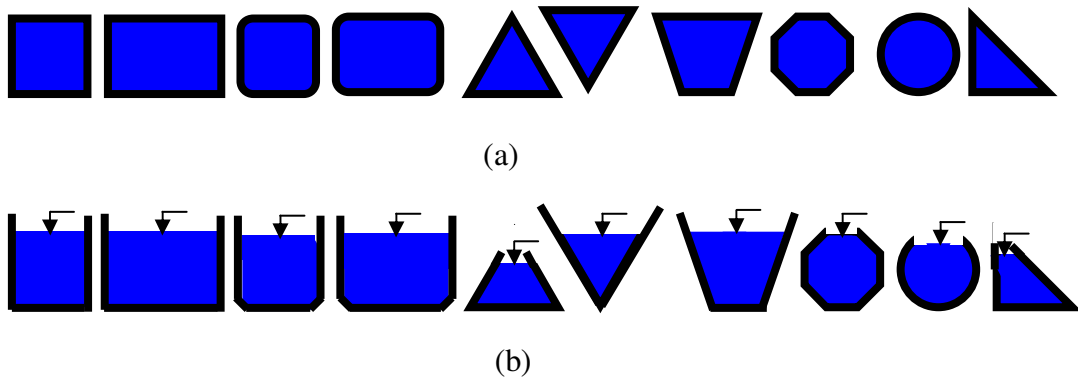
1.2. Su Yüzü Profili

Su yüzü profili kısaca, bir açık kanal akımında akım yolu boyunca elde edilecek akım derinliklerinin grafiği olarak tanımlanabilir. Başka bir ifade ile akım yolu boyunca akım derinliklerinin grafiği, akımın yüzey profilini verir. Su yüzünün akım yolu boyunca

kanal tabanından yüksekliğini gösteren bu eğri kanal boyunca akım en kesitinin belirlenmesini sağladığı gibi, sıvı ağırlığı, kayma kuvveti ve atalet etkileri arasındaki dinamik dengeyi de yansıtır (Çengel, 2008). Bir akımın analizi için su yüzü eğimi ve akım derinliği arasındaki ilişkinin belirlenmesi gerekir ki, bu da ancak su yüzü profillerinin geniş kapsamlı bir şekilde etüt edilmesiyle mümkündür (Wilson, 1969).

1.3. Su Yüzü Profiline Belirlenmesinde Problem Nedir?

Bilindiği üzere, yüzeyi açık hava ile temasta olan sıvı akımına açık kanal akımı denilmektedir. Açık kanal akımlarında kesitin tam dolu akması şart değildir. Akışkanın atmosfer ile temas yüzeyi vardır, akımın açık kanal akımı olup olmaması akım ortamının veya kesitin geometrisinden bağımsızdır. Akımın meydana gelmesinde basınç enerjisinden çok yer çekimi ivmesi etkilidir, dışardan bir enerji ile bulunduğu kottan daha yüksek bir kota akışkanı iletmek mümkün değildir. Başka bir ifade ile akım, yer çekimi ivmesine rağmen meydana gelemez. Boru akımlarında ise kesit tam dolu akmaktadır, akışkanın atmosfer ile temas yüzeyi yoktur, bir akımın boru akımı olup olmaması akım ortamının veya kesitin geometrisinden bağımsızdır, basınçlıdır, dışardan bir enerji ile bulunduğu kottan daha yüksek bir kota akışkanı iletmek mümkündür. Başka bir ifade ile akım, yer çekimi ivmesine rağmen meydana gelebilir. Şekil 1.1 de basınçlı boru akımları ile açık kanal akımlarına örnekler verilmiştir.



Şekil 1.1 Boru ve açık kanal akım kesitleri: (a) boru akımı, (b) açık kanal akımı

Açık kanal akımlarında atmosfer basıncındaki serbest yüzeyin varlığı, açık kanal problemlerinin analizine hem yardımcı hem de zorlaştırıcı bir etken olduğu söylenebilir. Serbest su yüzü üzerinde, basıncın sabit alınabilmesi problemlerin analizini kolaylaştıran bir etkidir. Fakat diğer taraftan, serbest su yüzünün şekil değiştirebilme yeteneğinden ötürü akım kesiti kanal boyunca sürekli değişebilmekte ve bu karakteristik özellik sıçrama,

ani düşü, kabarma gibi olaylara neden olmaktadır. Sıvı ağırlığı, kayma kuvveti ve atalet etkileri arasındaki dinamik dengeyi yansıtmamasından ötürü açık kanal akımlarının söz konusu olduğu her türlü hidrolik yapının güvenli ve ekonomik bir tasarımı ve efektif bir işletme modu için, hidrolik yapıların mansap ve menba etkilerinin, su yüzü profilinin akım yolu boyunca karşılaşıcağı yerel kesit ve cidar pürüzlülüğü değişimlerinin, akım yolu üzerinde inşa edilecek sanat yapılarının ve olası hidrolojik koşulların akımı nasıl etkileyeceğinin belirlenmesi zorunludur. Örneğin, bir havza için olası hidrolojik koşulların neden olabileceği taşkın senaryolarının belirlenebilmesi için yağış-akış miktarlarına karşılık gelecek su yüzü profillerinin önceden belirlenmesi gerekir. Benzer şekilde bir hidroelektrik santralin işletme moduna göre debisi sürekli değişen mansap suyunu kontrol edebilmek için de yine kuyruk suyu kanalının bağlandığı nehir veya kanalın su yüzü profilinin bilinmesi gerekir.

Yapay açık kanallarda, kesit geometrisi, cidar malzemesi, taban eğimi gibi geometrik, hidrolik ve diğer fiziksel koşulların önceden belirlenmesi veya bilinmesi (özellikle kararlı akım durumunda) su yüzü profilinin belirlenmesine yönelik hesaplamaları kolaylaştırır da doğal açık kanallar için bunu söylemek mümkün değildir. Doğal açık kanallarda akım kesiti, taban eğimi ve akım debisi genellikle sabit ve düzenli değildir. Bu tür açık kanallarda su yüzü profilinin elde edilmesi güçtür.

Su yüzü profillerinin belirlenmesi kısaca akım yolu boyunca akım derinliğinin değişimi (dy/dx) veya bir noktadaki su seviyesinin zamanla değişiminin (dy/dt) belirlenmesi olarak tanımlanabilir.

Su yüzü profillerinin önceden kestirimi açık kanal sistemlerinin tasarımının önemli bir parçasıdır. Su yüzü profilinin analizinde alışlagelmiş prosedür normal ve kritik derinlik çizgilerinin çizilmesi, olası kontrol noktalarının belirlenmesi ve kontrol kesitlerinden başlanarak su yüzü profilinin hesaplanması şeklindedir (Jain 2003). Yüzey profilinin belirlenmesi için öncelikle kanal boyunca, derinlik ile debi arasındaki kesin ilişkinin var olduğu ve kontrol kesitleri adı verilen kesitlerdeki (regülatörler, kanal giriş ve çıkışları gibi) bütün değişimler tespit edilir. Akımın kritik derinlikte veya üniform akım derinliğinde olduğu kesitler de birer kontrol kesittir. Kontrol kesitlerindeki akım derinlikleri bir kez belirlendiğinde, genellikle 1.1 denkleminin sayısal integrali alınarak, yüzey profilinin yukarı akımı ve aşağı akımı belirlenir (Çengel, 2008).

$$\frac{dy}{dx} = \frac{J_0 - J + \alpha \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial b} \frac{db}{dx}}{1 - Fr^2} \quad (1.1)$$

Burada dy/dx akım derinliğinin kanal boyunca değişimini, J_0 kanal taban eğimini, J enerji çizgisi eğimini (hidrolik eğim), Q kanalın debisini, A kanal kesit alanını, b kanal taban genişliğini, g yerçekimi ivmesini, Fr Froude sayısını, α Coriolis katsayısını göstermektedir. Tedrici değişen akımların genel diferansiyel denklemi olan 1.1 bağıntısı aynı zamanda su yüzü diferansiyel denklemi olarak da bilinir. Bu diferansiyel denklemin analitik veya sayısal çözümü akım derinliğini (y), verilen bir dizi parametre için kanal boyunun (x) fonksiyonu olarak verir ve $y(x)$ fonksiyonu akımın yüzey profilidir. Denklem prizmatik bir kanal için db/dx ifadesi sıfır olacağından şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\frac{dy}{dx} = \frac{J_0 - J}{1 - Fr^2} \quad (1.2)$$

Profil çizimi ve derinlik hesaplamaları sel rejimindeki akımlarda memba kontrolünden mansaba doğru, nehir rejimindeki akımlarda ise mansap kontrolünden membaya doğru yapılır (Yüksel, 2000).

Yüzey profillerinin genel karakteristikleri, taban eğimine ve akım derinliğinin kritik ve normal değerlerine göre değişir. Akım yolu boyunca taban eğimi ve debinin değişken olması, akım yolu üzerinde çeşitli su yapılarının olması gibi durumlar sonucunda aynı açık kanal sisteminde akımın rejimi ve dolayısıyla su yüzeyi profili akım yolu boyunca değişebilmektedir. Örneğin bir kanalın aşağı-eğimli (pozitif eğimli) bir kısmındaki yüzey profilinin genel şekli, yukarı-eğimli (ters-negatif eğimli) kısımdakinden farklıdır. Akımın nehir rejimi (kritikaltı) veya sel rejiminde (kritiküstü) olması halleri için oluşacak yüzey profilleri birbirinden oldukça farklıdır. Aynı şekilde, akımın üniform veya üniform olmaması durumlarında da farklı farklı su yüzü profilleri görülür (Çengel, 2008).

Açık kanal sistemleri farklı eğim, hız ve debiye sahip kısımlardan, geçiş ve bağlantılardan oluşmaktadır. Kanal sistemlerindeki akımın su yüzü profili, II. bölümde detaylı şekilde verilecek olan farklı tip profillerden birinin veya birkaçının oluşturduğu sürekli bir profildir.

Literatürde yavaş değişen akımlar için su yüzeyinin diferansiyel denklemi çeşitli yöntemler kullanılarak çözülmektedir. Su yüzeyi profilleri; kritik akım derinliği (y_c), normal akım derinliği (y_0), kanal taban eğimi (J_0) ve kritik taban eğimi (J_c) değişkenlerine bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Buna karşın, çok boyutluluk ve geçiş etkileri, geri akımlar ve akım ayrılmalarının önemli oranda görüldüğü ani değişen akımlar deneysel veya sayısal yöntemlerle incelenir.

Bilgisayar teknolojisindeki gelişime paralel olarak açık kanal akımlarının analizi için de birçok yazılım geliştirilmiş ve su yüzü profilinin daha hızlı ve daha doğru bir şekilde belirlenmesini olanaklı kılmıştır. A.B.D. Mühendisler Birliği Hidroloji Mühendisliği Merkezi tarafından geliştirilmiş HEC-RAS (Hydraulic Engineering Center, River Analysis System) ve Dünya Meteoroloji Birliği tarafından geliştirilen WSPRO, Mike, Fluent, Flow3D programlarının yanı sıra Richard L. Schaefer(1985) tarafından geliştirilen BAKWATR, Özcan (2005) tarafından geliştirilen Channel Profiler bunlardan birkaçıdır.

1.4. Çalışmada İzlenen Yol

Öncelikle su kaynaklarının geliştirilmesi çalışmaları açısından konunun önemi, tanımı, amacı ve kapsamı araştırılmış ve konuya ilişkin geçmişte yapılan çalışmalar araştırılmıştır. Bu ön çalışmanın sonuçları, “Çalışmanın Su Kaynaklarının Geliştirilmesi Açısından Önemi”, “Su Yüzü Profili”, “Su Yüzü Profilinin Belirlenmesinde Problem Nedir?” ve “Konuya İlişkin Literatür” alt başlıkları ile Giriş bölümünde verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, açık kanal akımları, su yüzü profilleri, açık kanal akımlarında yerel değişim bölgelerinin hidroliği ile ilgili geçmiş literatüre, bazı temel kavramlar ve çözüm yaklaşımlarına ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, bu çalışmada kullanılan deney düzeneği ve deneysel çalışmanın ayrıntıları sunulmuştur.

Dördüncü bölümde; deneysel çalışmanın sonuçları ve sayısal ve görsel olarak elde edilen veriler ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Son bölümde; elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde tartışılmış ve bazı önerilerde bulunulmuştur.

Ekler bölümünde ise deneysel çalışmada su yüzü profillerini belirlemek amacıyla yapılan akım derinliği ölçümleri verilmiştir.

1.5. Önceki Çalışmalar

Su yüzeyi profilinin belirlenmesine yönelik literatürde çok sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmaların bir kısmı doğal açık kanal akımlarını bir kısmı ise yapay açık kanal akımlarını ele almaktadır. Yine bu çalışmaların bir kısmı laboratuvar şartlarındaki açık kanallar; bir kısmı ise doğal ortamlardaki akarsu veya yapay kanallar üzerinde yapılan gözlem ve ölçümlere dayanmaktadır. Konuya ilişkin çalışmaları ayrıca durum tespitine yönelik çalışmalar ile modellemeye yönelik çalışmalar olarak da sınıflandırmak mümkündür. Birebir olarak, bu çalışmada “açık kanallarda su yüzü profilinin farklı hidrolik koşullar altında belirlenmesi” kapsamında “açık kanal akımlarında su yüzeyi profillerinin farklı taban eşikleri için belirlenmesi” deneysel olarak araştırılmıştır. Ancak bu konunun birebir işlendiği çalışmalara rastlanmamıştır. Bu durum, bu çalışmanın konusunun belirlenmesinde rol oynamıştır. Başka bir ifade ile bu çalışmada, bilim insanları arasında dolayısıyla konuya ilişkin literatürde henüz ayrıntılı bir şekilde tartışılmadığı için bu konu özellikle seçilmiştir. Diğer taraftan bu durum, henüz literatürde konunun birebir işlendiği bir klavuz çalışmaya rastalanmaması nedeniyle çalışmayı güçleştirmektedir. Aşağıda, farklı yönleri ile konuya ilişkin önemli görülen bazı çalışmalar özetlenmiş ve kısaca kritik edilmiştir.

Wilson (1969), bir akımın analizi için su yüzü eğimi ve akım derinliği arasındaki ilişkinin belirlenmesinin gerektiğini, bunun da ancak su yüzü profillerinin geniş kapsamlı bir şekilde etüt edilmesiyle mümkün olduğunu bildirmiş ve bu doğrultuda bir dizi prizmatik olmayan dikdörtgen kanal tipi belirleyerek, bu kanal tipleri için su yüzü profillerini araştırmıştır.

Yao (1971), dikdörtgen yatay kanallarda üniform olmayan akım başlıklı çalışmada, tedrici değişen kritikaltı akımın yüzey profilini belirleyen, kullanımı kolay bir çizelge geliştirmiş ve çizelgenin kullanımını sayısal örneklerle sunmuştur. Çizelgenin kullanılmasında gerekli tek değişken kritik akım derinliğidir.

Fread ve Harbaugh (1971), kararlı tedrici değişen akımlar için yüzey profili hesaplamalarının Newton İterasyon Yöntemi ile gerçekleştirilebileceğini belirtmişlerdir. Yöntemin trapez bir kanal için uygulanmasına yönelik Fortran IV dilinde bir program

geliştirmişlerdir. Program vasıtasıyla bir kontrol noktasının mansap ve membasında seçilen noktalar için hata büyüklüğünü kontrol edilerek profil derinlikleri uygun bir şekilde hesaplanabilmektedir. Çalışmada, Newton İterasyon Yönteminin tedrici değişen akım denkleminin çözümünde trapezoidal yöntem nazaran daha basit ve hesaplamalarda daha etkili olduğu belirtilmiştir.

Chiu ve Isu (1978), açık kanallarda akım profili tahmini için Kalman Filtresi yaklaşımını uygulamışlardır. Açık kanallarda su yüzü profil hesaplamalarında belirsizliklerin genellikle Manning katsayısı (n) gibi direnç katsayılarının seçiminden kaynaklandığını belirten yazarlar, bu tarz belirsizliklerin üstesinden gelmek için Kalman Filtresi yaklaşımını geliştirmişlerdir. Yaklaşım, bir matematik sistem modeli ile bir gözlem modelini birleştirmektedir. Matematik model, 1) bir boyutlu kararlı açık kanal akımını ve 2) Manning pürüzlülük katsayısının üç durumundan (n 'nin sabit, kanal enkesit yerinin bir fonksiyonu veya hem enkesit yeri hem de o enkesitteki akım derinliğinin bir fonksiyonu olması halleri için) birini veren stokastik diferansiyel denklemini kontrol eden ve doğrusal olmayan (non-linear) stokastik denklemden meydana gelmektedir. Tahmin yöntemi, bazı farklı su derinliği örnekleme veya ölçme yöntemlerinde tahmini su derinliği ve n 'in türetilmesinde doğruluğu test edilmiştir. Daha sonra Kalman Filtresinin sonuçları, günümüzde kullanılan iki paralel yöntemin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Kumar (1979), dikdörtgen, trapez, dairesel, parabolik ve üçgen yatay kanallarda ve ters eğimli dikdörtgen, geniş parabolik ve üçgen kanallarda yüzey profillerini, tedrici değişen açık kanal akımının diferansiyel denkleminin değiştirilmiş halinin direkt integrasyonu ile elde etmiştir. Sürtünmeden kaynaklanan yük kaybını Chezy formunda temel diferansiyel denklem ile ifade eden yazar, ayrıca kapalı yöntem çözümlerindeki derinlik ve mesafelerin, bu kanallardaki akımın kiritik derinliği ile fiziksel olarak ilgisini atfettiğini bildirmiştir. Bunun yanı sıra, çeşitli boyutsuz derinlikler için değişken akımlara ilişkin sayısal değerler tablo halinde verilmiştir.

Yen ve Tsai (1979), verilen bir derinlik için kesit yerinin ve verilen bir kesit için derinliğin belirlenmesi olmak üzere bir boyutlu kararlı tedrici değişen açık kanal akımları için su yüzü profili hesaplama yöntemlerinin iki kategoride değerlendirilebileceği ve sadece prizmatik kanalların söz konusu olduğu durumlarda verilen bir debi ve derinlik için kesit yerinin belirlenebileceği belirtilmektedir. Çalışmada, memba ve mansaptaki derinliklere bağlı olarak debi ve su yüzü profilini eş zamanlı çözmek için nümerik bir

yöntem önerilmektedir. Yazarlar, bu yöntemin ayrıca, verilen debi ve sınır şartları için klasik problemlere de uygulanabileceği ifade etmişlerdir.

Hu (1980), USBR (United States Bureau of Reclamation / Birleşik Devletler Tarıma Uygunlaştırma Dairesi) standartlarında bir at nalı tünel için su yüzü profilini hesaplayan bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmada, bu özel kesitlerin geometrisini açıklayan bağıntılar sıralanmaktadır. Yöntem, bilinen enerji yasasının direkt integrasyonunu kullanmaktadır. Ayrıca hidrolik ifadelerin sayısal değerleri tablo ve eğriler şeklinde sunulmuştur. Yazar yöntemin diğer adım-adım çözüm yöntemleriyle bir karşılaştırması olsun diye uygulamalı örnekler vermiş ve bu uygulamalı örneklerin, geliştirmiş olduğu yöntemin profil hesaplamalarında kolaylık sağladığını gösterdiğini belirtmiştir.

Molinas ve Yang (1985), enerji ve momentum denklemlerini esas alan bir model geliştirilmiş ve modelin hidrolik sıçrama boyunca su yüzeyi profilinin hesaplanmasında kullanılabileceği belirtilmiştir. Modelin kanal taban eğiminin sert (büyük), tatlı (küçük), yatay, ters veya bunların kombinasyonu olup olmasına bakmaksızın su yüzü profillerinin hesabına olanak sağlayabildiğini ifade etmişlerdir. Modelin kullanılmasında kontrol kesitinin bir göl, savak, kapak veya doğal akarsu kesiti olabileceğini ve yük kaybı hesabı için Manning, Chezy veya Darcy-Weisbach denklemlerinden birinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Modelde kullanılan yöntemlerin ve hesap yönteminin adımları detaylıca tarif edilmiş ve modelin su yüzü profil hesaplamaları için kullanımını göstermek amacıyla örnekler kullanılmıştır.

Zaghloul ve Darwish (1987), tedrici değişen akım problemleri için direkt adım metodunu kullanan, Lotus 1-2-3 tabanlı bir paket program geliştirildiğini bildirmişlerdir. Program normal derinlik, kritik derinlik ve tedrici değişken akım derinliği gibi gerek duyulan parametrelerin belirlenmesinin ardından profil tipinin tayinini, akım profili sınıflandırması ile karşılaştırılarak belirlemektedir. Daha sonra ise profil uzunluğu hesaplanarak tablo haline getirilmektedir. Çalışmada, netice itibariyle tedrici değişen akımın profili, taban eğimi, normal ve kritik derinliklerin grafik olarak sunumu için Lotus grafik kullanılmıştır.

Shearman (1990), Dünya Meteoroloji Teşkilatının geliştirdiği WSPRO programı ile su yüzeyi profilinin, akımın bir boyutlu, tedrici değişken veya karalı olarak kabulü halinde, kritik altı, kritik ve kritik üstü akımlar için hesaplanabildiğini belirtmektedir.

Program; köprü (tek veya çok açıklıklı), menfez, taşkın kanalı ve köprü oyulması problemlerinde açık kanal akımının analizi için kullanılabilir. Program öncelikli olarak kanal geçişlerinden kaynaklanan birikinti su etkisinin, alternatif köprü açıklıklarının veya set yapısının değerlendirilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Program, otoyol tasarımı için su yüzü profillerinin analizi, taşkın yatağı planlama ve evre-debi ilişkisinin belirlenmesi problemlerinin çözümünde de uygulanabilmektedir. Programın Fortran programlama dilinde yazılmış olduğunu ve geniş bir kullanım alanına sahip bulunduğunu bildirmiştir.

Paine (1992), açık kanal su yüzü profillerinin hesabı için en yaygın kabul gören yöntemlerden biri standart adım metodu olduğunu ve standart adım metodunu esas alan geleneksel bilgisayar modellerinin, rutin drenaj analizleri için bile çok fazla veri girdisine ihtiyaç duyduğunu belirterek, prizmatik açık kanallarda standart adım metodunu kullanan yeni bir algoritma geliştirmiştir. Newton-Raphson modelinde sunulan bu algoritmanın kritikaltı, kritiküstü, kritik, ters ve yatay akım rejimleri için uygun olduğu, algoritma ile doğrusal değişebilen taban genişliklerine sahip kanal geçiş kesitlerinin kolayca adapte edilebildiği belirtilmiştir. Tablo ve interpolasyon yöntemleri olmaksızın standart adım denklemlerinin sayısal çözümün hızlıca sonuçlanmasını sağladığını belirten yazar, kararlı akım durumu için algoritmayı kullanan bir bilgisayar programı geliştirmiştir.

Baril ve Drogin (1993), açık kanallar veya kapalı akım yolları için, hesaplanmış kritikaltı ve kritiküstü su yüzü profillerini ve basınç gradyanlarını birleştiren ve hesaplamalı hidrolik esaslı iki yeni bilgisayar programını önermişlerdir.

İlhan (1994), dikey eğrilikli kanallarda (düşey düzlemde eğri kanallarda) akımın hesabına yönelik çalışmada; serbest yüzeyli akımın sayısal çözümü için bir yöntem sunmuştur. Yazar, su yüzeyi profili hesabı ve basınç dağılımı hesabı için ayrı ayrı denklemler önermektedir. Hidrolik Model olarak önerdiği bu denklemlerin sonuçlarını Dressler (1978) tarafından elde edilmiş sığ akım denklemlerinin sonuçları ile karşılaştırmıştır. Sonuçta bunlardan, su yüzü profili hesaplaması için önerilenin başarılı olduğu basınç dağılımı için önerilenin ise hatalı sonuçlar verebildiğini belirtmiştir.

Yazıcılar (1997), taşkın yataklarında su yüzü profili hesabına yönelik çalışmada, pek çok gelişmiş ülkede kamu ve özel kuruluşların kullandığı programlardan biri olan, A.B.D. Mühendisler Birliği Hidroloji Mühendisliği Merkezi tarafından geliştirilmiş HEC-RAS (Hydraulic Engineering Center, River Analysis System) programını kullanmıştır.

Kullanıcıya girdi verilerini görsel olarak kontrol etme ve verilerle iki ve üç boyutlu grafik ortamda çalışma olanağını da veren bu programı, taşkın probleminin sıkca görüldüğü Bartın Nehri su yüzü profili hesaplamaları için kullanmıştır.

Barutçuoğlu (1999), yavaş değişen açık kanal akımlarının su yüzü profillerini hesaplama yöntemlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Bunun için açık kanal akımlarında kontrol noktaları ile yavaş değişen akımlar elde etmiş ve bu tür akımlar için geliştirilmiş yöntemlerden bazılarını kullanarak su yüzü profillerini hesaplamıştır. Değişik akım şartlarında, değişik yöntemlerle yaptığı hesaplamaları karşılaştırmıştır. Sonuçta, Nümerik İntegrasyon ve Sonlu Farklar yöntemlerinin daha güvenilir olduğunu belirlemiştir.

Birsoy (2002), bileşik kanallarda su yüzü profillerini belirlemek amacıyla bir bileşik kanal Froude sayısı tanımlayıp enerji ve momentum eşitlikleri ile birleştirmiştir. Hesaplamalar için C++ dilinde yazılmış bir bilgisayar programı (CCWASP) geliştirmiştir. Geliştirdiği programı test etmek için M_2 profili elde edilebilen bir laboratuvar kanalında deneyler yapmıştır. Deney sonuçları ile program sonuçları karşılaştırdığında; program sonuçlarının deney sonuçlarına yakın ancak kullanılan yöntemle göre daha yüksek su yüzü profilleri elde edildiğini görmüştür. Bunun nedeninin ise temel su yüzü eşitlikleri bulunurken yapılan varsayımlar olarak izah etmiştir.

Demirel ve Tozluk (2002), su yüzü profilinin Euler metodu ile sayısal çözümünde gerekli adım sayısını araştırmışlardır. Tedrici değişken akımlarda su yüzü profilini veren değişkenlerine ayrılabilen diferansiyel denklemin direkt olarak integrali alınmadığı için kesin çözümünün olmayışından yola çıkarak, kesin çözümü bilinmeyen problemlerin yaklaşık metotlarla çözülmesinde oluşan hata miktarının hesaplanması ve Euler metoduyla su yüzü profilinin çözümünde meydana gelen hatanın önceden belirlenecek bir değeri aşmaması için gerekli adım sayısını belirlemişlerdir.

Örsel (2002), kritik altı açık kanal akımlarında bir eşikte oluşan yerel enerji kayıplarını ele alan bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında, eşik şekli, eşik yüksekliği ve Froude sayısının yerel kayıplara etkisini deneysel olarak incelemiştir. Yerel enerji kaybını Froude sayısı ve bağıl eşik yüksekliğine bağlayan formüller önermiş ve eşikler için yerel kayıp katsayıları hesaplamış ve bunlar için pratik değerler önermiştir. Yerel enerji

kayıplarının su yüzeyi profili üzerinde etkili olması ve deneysel çalışmalarında farklı şekil ve yüksekliklere sahip eşiklerin kullanılması bu çalışma detaylı bir şekilde incelenmiştir.

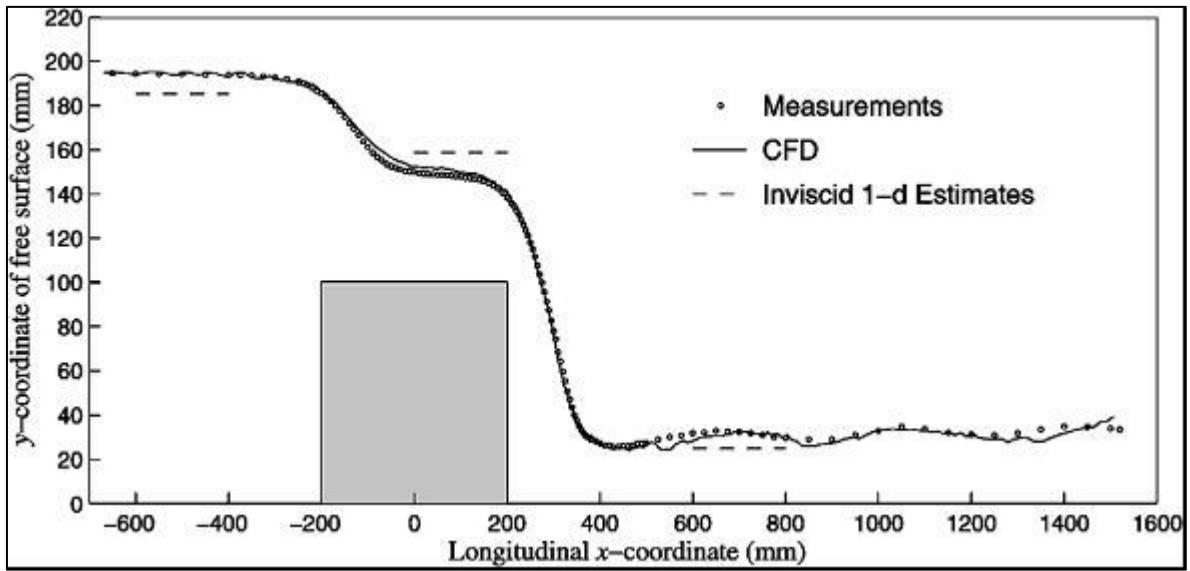
Ponce vd. (2002), tedrici değişen akım denkleminin kritik eğim ile ilişkili olarak ifade edilerek su yüzü profillerine yeni bir bakışın mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada, GVF denklemi, taban eğimi, kritik eğim ve Froude sayısına bağlı olarak değişecek şekilde geliştirilmiştir. Bu denklemin analizinin, akım-derinlik gradyeninin (dy/dx) kritik eğim ve kanal taban eğiminin belli değer aralıkları için sınırlı değerler verdiğini kesin olarak ortaya koyduğu belirtilmektedir. Yazarlara göre bu yeni bakış açısı, akım-derinlik gradyeninin su yüzeyi profili analizindeki yerine ilişkin tanımlamayı geliştirmekte ve tamamlamaktadır. Örneğin, dy/dx S_3 profili için kritik eğimden azalarak sifıra doğru (pozitif sonlu bir değer) gitmektedir (asimptotik normal derinlik). Benzer şekilde, dy/dx C_1 and C_3 profilleri için sabit ve kanal taban eğimi kritik eğime eşittir.

Miyamoto (2003), açık kanal akımında, serbest su yüzeyi davranışına etki eden faktörleri incelemek ve türbülans yapısı üzerindeki etkisini araştırmak için laboratuvar deneyleri yapmıştır. Bu çalışmadan şu sonuçlar elde edilmiştir: 1) Türbülansın, su yüzeyi hareketinden (iniş çıkışlarında) ciddi bir şekilde etkilendiği su yüzeyine yakın bir tabaka vardır. 2) Bu yüzey etki tabakasında türbülanslı akım dalgalı yüzeye paralel görülmektedir. 3) Yüzey hareketi ile geniş-ölçekli türbülans yapısı arasında özel bir etkileşim vardır. 4) Yüzey etkileşim tabakası yaklaşık olarak ortalama su derinliğinin %20'sinden azdır ve kalınlık, su hareketinin dalga boyunun artmasına bağlı olarak artmakta; Froude sayısının artmasına bağlı olarak azalmaktadır.

Seçkin vd. (2003), bir köprü ayağı etrafındaki su yüzü profilinin modellenmesi adlı çalışmalarında, prototip bir köprü yapısı etrafında 10 farklı debi için 15 farklı kesitte su yüzü profilleri ölçmüşlerdir. Daha sonra HEC-RAS paket programı yardımıyla, ölçülen su yüzü profillerini modellenmişlerdir. Modellemede sırasıyla Enerji, Momentum, Yarnell ve WSPRO yöntemlerini kullanmışlardır.

Sarker ve Rhodes (2004), modern ticari yazılımların, karmaşık geometrilere sahip açık kanalları modellemedeki uygulanabilirliğini göstermek amacıyla laboratuvar ölçeğinde geniş tepeli bir savak üzerindeki su yüzü profilini deneysel olarak elde etmişler ve deney sonuçlarını ticari yazılım kullanarak elde ettikleri sayısal çözümlerle karşılaştırmışlardır. Türbülanslı akımı ifade eden Reynolds-ortalama Navier Stokes

denklemlerinin çözümü için Fluent V.4.4.7. yazılımını kullanmışlardır. Serbest yüzey modeli için ise Volume of Fluid (VOF) metodunu kullanmışlardır. Şekil 1.2’ de de gösterildiği gibi, serbest yüzey modeli ve çalışmada sözü edilen interpolasyon sisteminin kombinasyonu ile elde edilen su seviyesi değerlerin, savağın membasında deney sonuçlarıyla elde edilen değerlerle hidrometrik açıdan önemli oranda uyduğuna; ancak savak üzerindeki ani hızlı değişim bölgesi için bu durumun çok az da olsa geçerliliğini yitirdiğini; eşğin mansabında ise ölçüm değerleri ile model değerleri arasında ciddi farklılıklar olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 1.2 Sarker ve Rhodes’un deney ve model sonuçlarının grafik gösterimi (Sarker ve Rhodes 2004)

Onuşuel (2005), “HEC-RAS modelleme sistemine dayalı taşkın alanı yönetimi” adlı çalışmasında, taşkın alanlarının HEC-RAS modelleme sistemi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak belirlenmesi ve görsel olarak ortaya konmasını amaçlamıştır. Bu doğrultuda İzmir Bostanlı Havzası’ndaki kritik yerlere kararlı ve kararsız akım similasyonlarının oluşturulması amacıyla HEC-RAS hidrolik modelini uygulamıştır. Yazar, taşkın pik değerlerini ve taşkın hidrograflarını HEC-HMS hidrolojik modeli ile elde etmiş ve bu model çıktılarını HEC-RAS modelinde girdi olarak kullanmıştır. HEC-RAS modelinden elde ettiği su derinliklerini daha sonra ArcView sistemine aktarmış ve taşkın altında kalabilecek olan alanları belirleyerek görsel hale getirmiştir.

Seçilir (2005), akarsular üzerindeki farklı kesitlere sahip köprü yapılarının su yüzü profillerine etkisini incelemek için köprülerden dolayı oluşan kabarmaların hesabı için

geliştirilmiş Biery-Deuller yaklaşımı ve Polinomial yaklaşımlarını ele almış, model deneyleri gerçekleştirmiştir. Dikdörtgen, dairesel ve eliptik kesitlerde dört farklı köprü açıklığında iki farklı pürüzlülükte deneyler yapmıştır. Dikdörtgen açıklıklı (modern) köprülerde cilalı ve pürüzlü akım şartlarında, dh maksimum kabarma yüksekliğinin, polinomial yaklaşımla hesaplanabileceğini ve bu durumda korelasyon katsayısının oldukça yüksek çıktığını ($R^2=0.90$); eliptik açıklıklı köprüler için Biery ve Delleur yöntemi ile hesaplanan cilalı ve pürüzlü akımlardaki kabarma yüksekliğinin polinomial yaklaşıma göre daha iyi sonuç verdiğini, bu durumda korelasyon katsayısının $R^2=0.79$ olduğunu; Dairesel açıklıklı köprülerde ise her iki yöntemin de yaklaşık aynı doğrulukta sonuçlar verdiğini gözlemiştir.

Anh ve Hosoda (2007), üç boyutlu gelişigüzel bir yüzey üzerindeki akımı analiz amacıyla derinlik ortalamalı yeni bir denklem dizisi sunmuşlardır. Bu genel denklemler klasik derinlik ortalamalı modellerde kullanılan yumuşak eğim kabulü olmadan karmaşık bölgelerdeki akımın analiz edilebilmesini sağlamaktadır. Geliştirilen yeni model; silindirik ve dairesel birer yüzey üzerinde ve hava çekirdekli girdabı olan düşey bir su alma yapısı için su yüzü profillerinin hesabında uygulanmıştır. Dairesel yüzey üzerindeki su yüzü profilleri laboratuvar deneyleri ile gözlenerek model test edilmiştir. Model sonuçlarının, deney sonuçları ve ampirik formüllerle hesaplanan sonuçlar ile iyi derecede uyum sağladığı belirtilmiştir.

Kocaman (2007), baraj yıkılması problemini deneysel, teorik ve sayısal olarak ele aldığı çalışmada; yatay dikdörtgen bir kanalda iki su seviyesini ayıran düşey bir kapağın ani olarak kaldırılması suretiyle elde edilen baraj yıkılması taşkın dalgasının, farklı topografya ve kuyruk suyu koşullarına sahip mansap boyunca yayılması sırasında oluşan su yüzü profillerini ve bir noktadaki su seviyesinin zamanla değişimlerini sayısal görüntü işleme teknikleri ile belirlemiştir. Öncelikle kuru ve farklı kuyruk suyu yüksekliklerine sahip ıslak durumlar için yıkılmanın başlangıç aşamalarında su yüzü profillerini belirleyip, Stoker (1957) tarafından kuru ve ıslak durum için verilen analitik çözümlerin deneysel sonuçlarla uyumuna bakmıştır. Deneysel sonuçları daha sonra FLOW-3D yazılımı kullanılarak sığ su ve RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) denklemlerine dayanan sayısal çözümlerle karşılaştırmıştır. Daha sonra mansapta üçgen ve trapez olmak üzere iki farklı geometriye sahip taban eşikleri kullanarak arazi yatağındaki değişimlerin etkisini ele almıştır. Elde ettiği deneysel verileri kendi içerisinde, 2-boyutlu RANS ve 1-boyutlu sığ su

denklemleri (SWE) ile karşılaştırılarak irdelenmiştir. Son olarak mansap enkesiti üzerine yerleştirdiği üçgen, trapez-A ve trapez-B olmak üzere üç farklı geometriye sahip pleksiglas engeller yardımıyla kanal üzerinde daralmalar oluşturularak enkesit şeklinin ve kanal genişliğindeki değişimlerin etkisini 3-Boyutlu RANS denklemleri ile karşılaştırarak incelemiştir. Çalışmada, noktasal su seviyesi değişimlerinin video görüntülerden belirlenmesi amacıyla geliştirilen yaklaşım RANS denklemleri ile karşılaştırılarak ölçüm sisteminin hassasiyeti de incelenmiştir.

Aköz vd. (2007), “kontrol yapıları arkasındaki açık kanal akımlarının sayısal ve deneysel analizi” başlıklı çalışmalarında, suyun hareketini idare eden denklemlerin analitik çözümlerini elde etmek amacıyla, laboratuvar kanalında iki boyutlu savak arkası akımda PIV cihazı kullanarak hız ölçümleri yapmışlardır. Elde edilen deneysel bulguları, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak Reynolds hareket denkleminin sayısal çözümünden elde ettikleri teorik hızlarla karşılaştırmışlardır. Savak üzerinde oluşan su yüzü profilini, akışkan hacim yöntemi (VOF) ile teorik olarak elde ettikleri su yüzü profili ile karşılaştırarak irdelenmişlerdir.

2. AÇIK KANAL AKIMLARI

Bir önceki bölümde açık kanal akımları kısaca tanımlanmış, özellikleri ve boru (basınçlı) akımlardan farklılıkları belirtilmiş, kısaca açık kanal akımlarının genel olarak tüm akışkan akımlarının içindeki yeri ve önemi özetlenmişti. Bu bölümde ise açık kanal akımları geniş bir şekilde ele alınmış ve bu tür akımların ayrıntılarına inilmiştir.

En geniş sınıflandırma ile açık kanalları doğal ve yapay açık kanallar olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Dereler, ırmaklar, nehirler, nehir ağızları, sel yatakları doğal açık kanallara; arklar, dolu savaklar, savaklar, çakıl, balık ve su taşıtı geçitleri, doğal akarsu yatağının taşkın kesitleri, sulama ve drenaj kanalları, drenler, galeriler ve benzeri su yüzeyinin atmosfer ile teması olan her türlü yapay su yolu yapay açık kanallara birer örnektir. Şekil 2.1 gerçek bir yapay bir açık kanalı, Şekil 2.2 ise doğal bir açık kanalı göstermektedir.

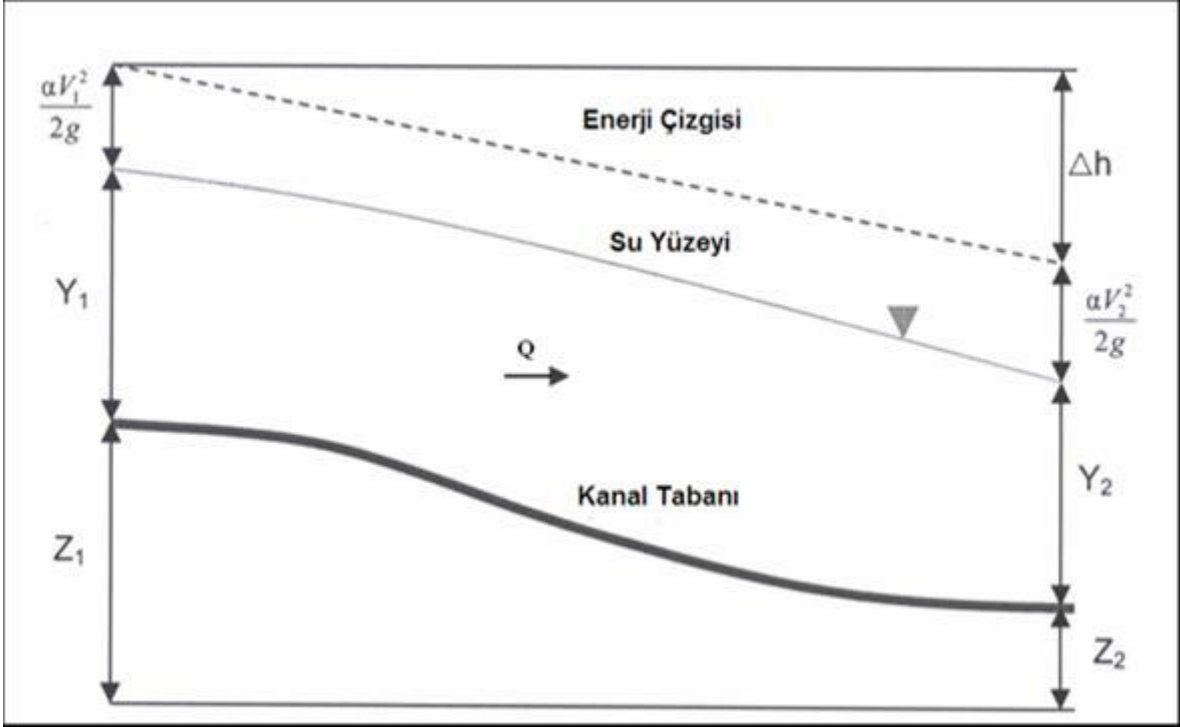


Şekil 2.1 Yapay açık kanallara bir örnek



Şekil 2.2 Doğal açık kanallara bir örnek (Dicle Nehri, Diyarbakır)

Hareketi meydana getiren temel etmen enerjidir. Bu durum hem katılar için hem de akışkanlar için geçerlidir. Bir boru (basıncılı) akımında bu enerji yerçekimi kuvvetinin etkisi ile kot farkından sağlanabildiği gibi dışarıdan üretilmiş bir enerji ile de sağlanabilir. Oysa bir açık kanal akımının tek enerji kaynağı yerçekimi kuvvetidir. Bu akımlarda yerçekimi, basınç ve potansiyel enerjilerini; bu enerjiler de kinetik enerjiyi sağlamaktadır. Potansiyel enerji “geometrik yükseklik”; basınç enerjisi “basınç yüksekliği” ve kinetik enerji ise “hız yüksekliği” şeklinde metre cinsinden ifade edilmektedir (Yüksel, 2000). Geometrik ve basınç yüksekliği toplamı ise “piyezometrik yükseklik” olarak tanımlanmaktadır. Basınç ve potansiyel enerjilerinin bir kısmı akışkanın hareketine bir kısmı ise hareketi engellemeye çalışan sürtünme gerilmelerine harcanmaktadır. Şekil 2.3 de gösterildiği gibi akışkan, iki akım seviyesi arasındaki, yerçekimi ile sürtünme kuvvetleri (viskozite, kanal tabanı ve cidar sürtünmeleri) arasındaki dinamik dengeye bağlı olarak enerjisi büyük olan noktadan küçük olan noktaya doğru akar. Akım, genellikle türbülanslı, üç boyutlu ve karmaşıktır.



Şekil 2.3 Açık kanallarda iki kesit arasındaki enerji dengesi

Su yüzeyinin atmosfer basıncına açık olmasının, açık kanal problemlerinin incelenmesinde hem yardımcı hem de zorlaştırıcı etkileri vardır. Serbest yüzey üzerinde rölatif basınç ile çalışılabildiği için su yüzeyinin atmosfere açık olması inceleme kolaylığı sağlamaktadır. Diğer taraftan su yüzeyinin açık havaya maruz oluşu, açık kanal akımlarında sıçrama, ani düşü, kabarma gibi olaylara neden olmaktadır. Bu durumlar, akım kesitinin (derinlik, taban genişliği) ve dolayısıyla akımın hidrolik özelliklerinin (hız ve basınç gibi) kanal boyunca sürekli olarak ve kontrolsüz bir şekilde değişmesine neden olmaktadır. Bu da hidrolik hesapları güçleştirmektedir. Doğal akarsularda çoğu kez düzgün olmayan kesitin akım yolu boyunca da sürekli olarak değiştiği de hesaba katılırsa problemin daha da büyüyeceği açıktır. Burada problem, serbest yüzeyin şeklinin önceden tahmin edilememesidir. Oysa boru akımlarında boru kesiti çoğu kez sabittir veya kontrollü bir şekilde değişmektedir. Bu nedenle açık kanallardaki akımların incelenmesi karakter bakımından çok farklı ve çözümleri de karmaşıktır. (White, 2004).

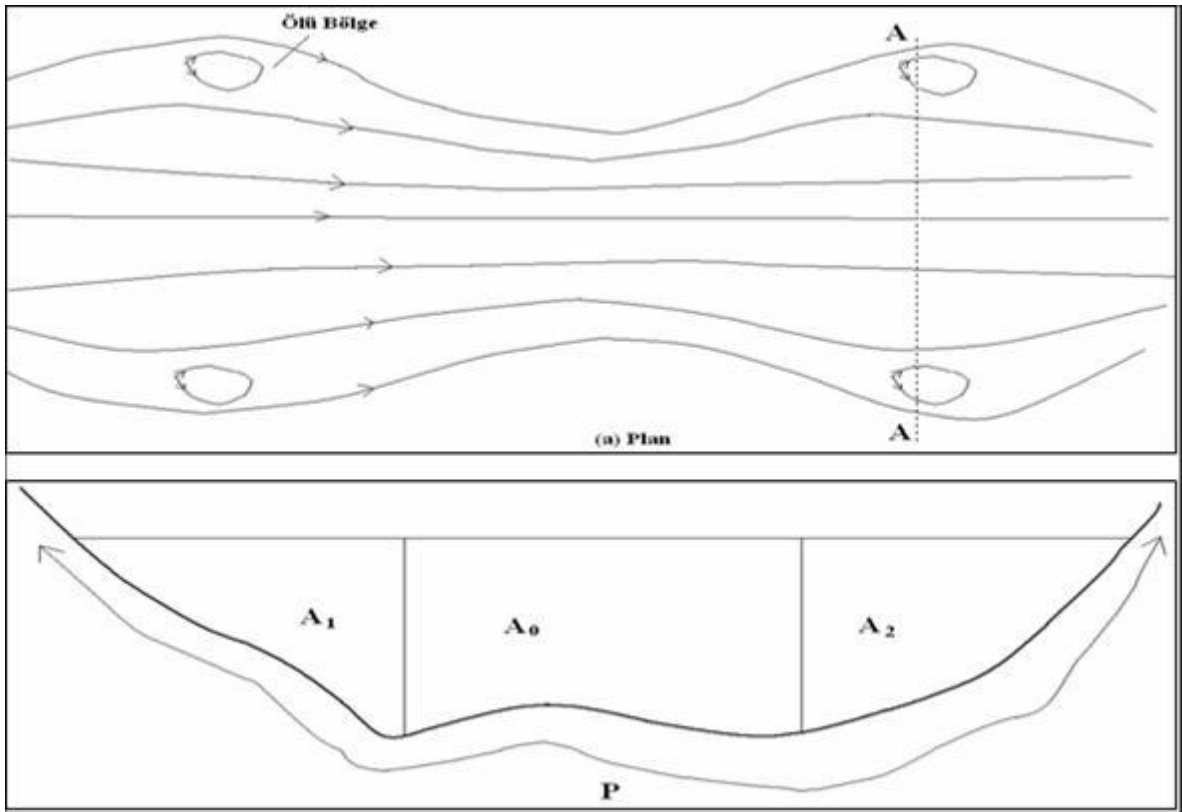
2.1. Açık Kanal Akımlarında Temel Kavramlar

Enkesit (A), akımın, akım yönüne dik olarak alınan düzlemsel kesitidir.

Islak kesit (akım kesiti), enkesitin sıvı ile dolu olan kısmıdır (Şekil 2.4 de A_1 , A_0 , A_2 alanlarının tamamı).

Etkili (efektif) akım kesiti, akımın Q debisini büyük ölçüde belirleyen kesittir (Şekil 2.4 de A_0 enkesiti alanı).

Kanalların genişleme bölgelerinde (Şekildeki A_1 ve A_2 bölgeleri) enerji daha çok sürtünme gerilmelerine harcanmakta ve buna bağlı olarak hareketi sağlayan enerji (kinetik enerji) azalmaktadır. Dolayısıyla farklı hız tabakalarının, buna bağlı olarak ters akımların ve akışkanın akıma dahil olmadığı döngülerin meydana geldiği bölgeler oluşmaktadır. Bu bölgeler ölü bölgeler (ölü kesitler) olarak bilinir ve bu bölgeler fiilen akıma katılmaz (Şekil 2.4' de A_1 ve A_2 enkesit alanları). Yapay (suni) açık kanal akımlarında ise ani genişleme ve daralma bölgeleri dışında tüm kesitte efektif akım söz konusudur. Dolayısıyla etkili akım kesiti ile akım kesiti birbirine eşittir.



Şekil 2.4 Düzensiz topografyaya sahip bir kanalın plan ve enkesiti (Yüksel, 2000).

Islak çevre (Ç), ıslak kesiti çevreleyen kanalın katı cidar uzunluğuna denir.

Hidrolik derinlik (y), bir açık kanal akımında akım kesit alanının su yüzü genişliğine oranıdır.

Hidrolik yarıçap (R), akım kesitinin ıslak çevreye olan oranına denir. Geniş bir açık kanalda, örneğin su yüzü genişliğinin su derinliğinden 40 kat veya daha fazla olduğu durumlarda, hidrolik yarıçap yerine su derinliği alınabilir.

$$R = \frac{A_0}{P} \quad (2.1)$$

Kesit ortalama akım hızı (V) (ortalama hız), kanaldan geçen debinin akım kesitine oranına denir.

$$V_{ort} = \frac{Q}{A_0} \quad (2.2)$$

2.2. Açık Kanal Akımlarının Sınıflandırılması

Açık kanal akımları, genel olarak viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetlerine oranı, atalet kuvvetlerinin ağırlık kuvvetlerine oranı, derinliğin zamana ve akım yönündeki mesafeye bağlı olarak değişip değişmediğine bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Aşağıdaki alt başlıklarda bu sınıflandırmalar ayrıntıları ile verilmiştir.

2.2.1. Viskozitenin Akıma Etkisi

Açık kanal akımları, atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranına bağlı olarak laminer veya türbülanslı akım olarak sınıflandırılmaktadır. Buna göre bu sınıflandırmada boyutsuz bir büyüklük olan Re sayısı ölçüt olarak alınır. Açık kanal akımları genellikle türbülanslıdır. Laminer akım durumu, çok ince bir su tabakasının pürüzsüz bir yüzey üzerindeki akımı dışında, ancak laboratuvar şartlarında özel olarak elde edilebilir. Reynolds sayısı aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$Re = \frac{V(4R)}{\nu} \quad (2.3)$$

Burada V ortalama akım hızı, ν suyun kinematik viskozitesi, R hidrolik yarıçaptır. Açık kanal akımları için eğer;

$Re < 500$	»»	Laminer Akım
$Re > 500$	»»	Türbülanslı Akım

French,(1986)'e göre;

$Re \leq 500$	»»	Laminer Akım
$500 \leq Re \leq 12500$	»»	Geçiş Akımı
$12500 \leq Re$	»»	Türbülanslı Akım

2.2.2. Yerçekiminin Akıma Etkisi

Açık kanal akımları ayrıca atalet kuvvetlerinin ağırlık kuvvetlerine oranına bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmadaki ölçüt ise yine boyutsuz bir büyüklük olan Froude sayısıdır. Froude Sayısı;

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (2.4)$$

Şeklinde tanımlanır. Burada, V ortalama akım hızı, y akım derinliği, g ise yerçekimi ivmesidir.

$Fr < 1$	»»	Akım Nehir Rejiminde (Kritik Üstü Akım)
$Fr = 1$	»»	Akım Kritik Rejimde (Kritik Akım)
$Fr > 1$	»»	Akım Sel Rejiminde (Kritik Altı Akım)

2.2.3. Akım Derinliğinin Zamana Bağlı Olarak Değişimi

Açık kanal akımlarını tanımlayan büyüklük, kanal boyunca değişebilen akım derinliğidir (ya da alternatif olarak ortalama hızdır) (Çengel, 2008). Akım, akım yolundaki belirli bir konumda akım derinliğinin zamana bağlı değişimine göre, kararlı (daimi) ya da kararlı (daimi olmayan) şeklinde sınıflandırılabilir. Akım derinliğinde zamana bağlı bir değişim yoksa veya göz önüne alınan zaman diliminde sabit olduğu varsayılıyorsa, akım “kararlı” olarak, aksi durumda “kararsız” olarak tarif edilir.

2.2.4. Akım Derinliğinin Konuma Bağlı Olarak Değişimi

Açık kanal akımları ayrıca akım derinliğinin akım yönü boyunca değişip değişmediğine bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Buna göre eğer derinlik akım yönündeki mesafeye bağlı olarak değişmiyor ise üniform; akım yönündeki mesafeye bağlı olarak değişiyor ise üniform olmayan (değişken) şeklinde de sınıflandırılmaktadır. Başka bir ifade ile eğer akım derinliği akım boyunca sabit kalıyorsa kanaldaki akım üniform aksi durumda üniform olmayan akım olarak sınıflandırılmaktadır. Üniform olmayan akımda akım derinliği kanal boyunca alınan x uzaklığının bir fonksiyonudur.

Açık kanal akımların en genel biçimde şu şekilde sınıflandırılır (Yüksel, 2000).

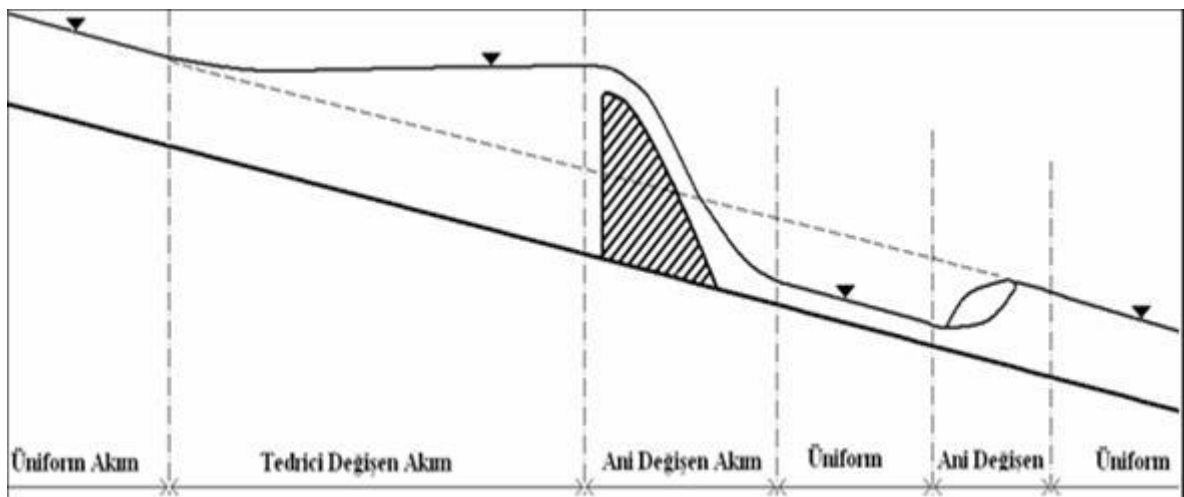
1. Kararlı Açık Kanal Akımı

- a) Kararlı Üniform Akım
- b) Kararlı Üniform Olmayan Akım
 - i) Tedrici değişen akım
 - ii) Ani değişen akım

2. Kararsız Açık Kanal Akımı

- a) Kararsız Üniform Akım
- b) Kararsız Üniform Olmayan Akım
 - i) Tedrici değişen akım
 - ii) Ani değişen akım

Görüldüğü üzere üniform olmayan akımlar, tedrici (yavaş) ve ani değişen akımlar olarak ayrıca ikiye ayrılmaktadır. Pratikte, kanallardaki kesit değişikliği, taban seviyesindeki değişimler veya kanal üzerindeki köprü, regülatör, eşik, vb. yapılar nedeniyle bir kanal boyunca farklı akım tipleri görülebilmektedir (Şekil 2.5).

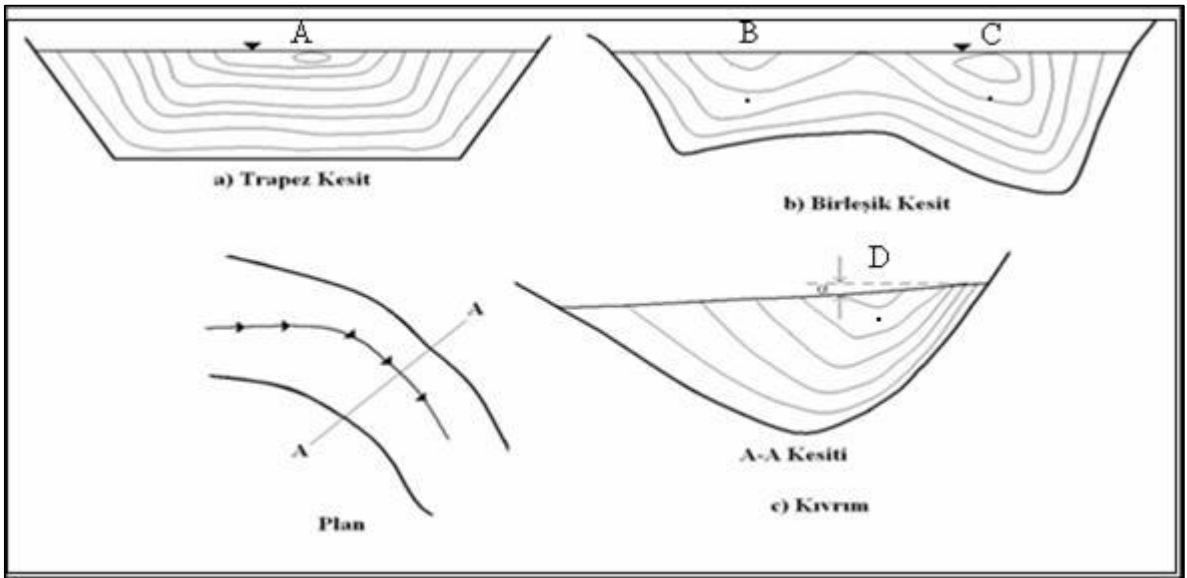


Şekil 2.5 Bir akım yolu boyunca görülebilecek akım türleri örneği (Sümer, 1983).

2.3. Hız

Açık kanal akımlarında akım hızı, yan ve alt yüzeylerde kaymama koşulundan dolayı sıfır olup serbest yüzeyin orta düzleminde en yüksek değerini almaktadır. Şekil 2.6. a, b, ve c, hızın kesit içerisinde nasıl değiştiğini göstermektedir. Buna göre A, B, C, D ve E noktaları en yüksek hızlara sahip noktalardır. Tam kanal katı cidarı üzerinde (taban ve duvar yüzeylerinde) ise sıfır olarak kabul edilir. O halde hız kesit içerisinde, cidardan uzaklaştıkça artar. Ayrıca birçok durumda, akım hızı akım yönünde de değişir. Bu nedenle açık kanallardaki hız dağılımı genellikle üç-boyutludur. Bununla birlikte, mühendislik uygulamalarında denklemler, kanalın bir en-kesitindeki ortalama hıza göre yazılır. Ortalama hız sadece akım yönünde x ile değiştiğinden, akım hızı bir-boyutlu bir değişkendir. Çözüm kolaylığının yanı sıra, bir hayli doğru sonuç vermelerinden ötürü bir boyutlu denklemler uygulamada yaygın olarak kullanılır (Çengel, 2008).

Bir kesitteki hız dağılımı, kanalın geometrisine, pürüzlülüğüne, planda yaptığı kıvrımlara bağlıdır. Kanal kesiti içindeki her noktada hız değerinden farklıdır. Profiller oldukça karışıktır ve tipik olarak en büyük hız, kanalın orta düzleminde ve yüzeyin yaklaşık %20 altında oluşur. Hız profili yaklaşık olarak, tabandan serbest yüzeye doğru logaritmik bir biçim gösterir. Dairesel kesitli olmayan kanallarda ikincil akımlar vardır. Açık kanal akımlarında kesit ortalama akım hız üzerinde kanal cidar pürüzlülüğü ve enerji çizgisinin yanı sıra kanal taban eğimi de etkilidir (Yüksel, 2000).



Şekil 2.6 Tipik açık kanal kesitlerinde hız dağılımı (Yüksel, 2000).

Şekil 2.6. da görüldüğü gibi bir akarsu kıvrımında merkezkaç kuvvetinin etkisiyle akım dış kıyıya doğru yönelmektedir. Su yüzünde enine doğrultuda dış tarafa doğru eğimlidir. Maksim hız yörüngesi dış kıyıya doğru yerleşmektedir. Bu tip bir kesitte ana akım doğrultusuna dik olarak sekonder bir akım yapılır. Bu akım yüzeyde dış kıyıya, tabanda ise iç kıyıya doğru yönelecek biçimde oluşur. Bu akım akarsuların taban malzemelerinin iç tarafa doğru yığılmalarına, buna karşın dış kıyının erozyona uğramasına neden olur. Bu nedenle, su alma yapıları daima kıvrımların dış kıyılarına inşa edilir.

Açık kanal akımlarında su yüzeyinin enerji çizgisinden $\frac{V^2}{2g}$ kadar aşağıda bulunduğu söylenebilir. Ancak hız dağılımı üniform olmadığından gerçekte tam doğru olmamaktadır. Nitekim burada V ortalama akım hızıdır. Bundan dolayı gerçek hız yüksekliğini bulmak için ortalama hız yüksekliğinin bir “ α ” katsayısıyla çarpılarak düzeltilmesi gerekir ($\alpha \frac{V^2}{2g}$). Bu katsayı “Coriolis katsayısı” olarak bilinir ve 1 ile 2 arasında bir değere sahiptir. Düzgün kanallarda 1.15, doğal akarsularda 1.30, geniş kanallarda daha da düşüktür.

Ortalama hıza göre ifade edilen momentum ifadesi de bir “ β ” katsayısıyla çarpılarak düzeltilir, bu sayı da “Boussinesq katsayısı olarak bilinmektedir ve 1,01- 1,12 arasında değerler alır (Yüksel, 2000).

2.4. Enerji-Özgül Enerji-Kritik Derinlik

Açık kanal akımının temel etmenin enerji olduğu Bölüm 2.1’ de belirtilmiştir. Bir kesitten birim zamanda geçen birim ağırlıktaki akışkanın enerjisi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilmektedir.

$$H = \alpha \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + z \quad (2.5)$$

Burada V kesit ortalama akım hızı, α hız düzeltme katsayısı, g yerçekimi ivmesi olup $\alpha V^2/2g$ hız yükü (dinamik yük veya hız yüksekliği) olarak tanımlanır. P basınç, γ akışkanın özgül ağırlığı olmak üzere P/γ basınç yüküdür (basınç yüksekliğidir). z ise söz konusu noktanın karşılaştırma (kıyas) düzleminden yüksekliği olup potansiyel yük (geometrik kot veya geometrik yükseklik) olarak tanımlanır.

Açık kanallarda akımın çözümlenmesinde enerjinin korunumu prensibinden hareketle herhangi iki kesit arasındaki enerji eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + y_1 + z_1 = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + y_2 + z_2 + h_k \quad (2.6)$$

(2.6) eşitliğinde z_1 ve z_2 taban seviyelerini, y_1 ve y_2 akım derinliklerini, V_1 ve V_2 kesit ortalama akım hızlarını, g yerçekimi ivmesini, α_1 ve α_2 Coriolis katsayılarını, h_k iki kesit arasındaki yük kaybını ifade etmektedir.

Bir kesitten birim zamanda geçen, birim ağırlıktaki akışkanın kanal tabanından itibaren yatay düzleme dik olarak ölçülen enerjisine “Özgül Enerji” denir ve (2.7) eşitliği ile ifade edilir.

$$E = y + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (2.7)$$

A kesit alanı ve Q debi olmak üzere $V = Q/A$ ifadesi yukarıdaki denkleme dahil edilerek özgül enerji aşağıdaki şekilde de ifade edilmektedir.

$$E = y + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (2.8)$$

(2.8) denklemini kapalı formda $f(E, Q, y) = 0$ şeklinde de ifade edilir. Bu bağıntının irdelenmesi sonucu; debinin sabit olduğu durumda, özgül enerjinin akım derinliği ile değişimi ve özgül enerjinin sabit olduğu durumda debinin akım derinliği ile değişimi belirlenmektedir. Debinin sabit olduğu durum için özgül enerji bağıntısının irdelenmesi,

$$y \rightarrow \infty \text{ ise } E \rightarrow \infty ; y \rightarrow 0 \text{ ise } E \rightarrow \infty$$

olduğunu göstermektedir. Bu da özgül enerji fonksiyonunun bir minimumdan geçtiğini ve $E = E_{\min}$ için bir tek y çözümü olduğu sonucuna bizi götürmektedir. Bu değer $dE/dy = 0$ şartından bulunur. Bu değer E özgül enerjisini minimum yapan akım derinliğidir. Bu derinlik kritik derinlik (y_c) olarak bilinir. Şekil 2.7’ de verilen özgül enerji-akım derinliği grafiğinden şu sonuçlar çıkarılabilir:

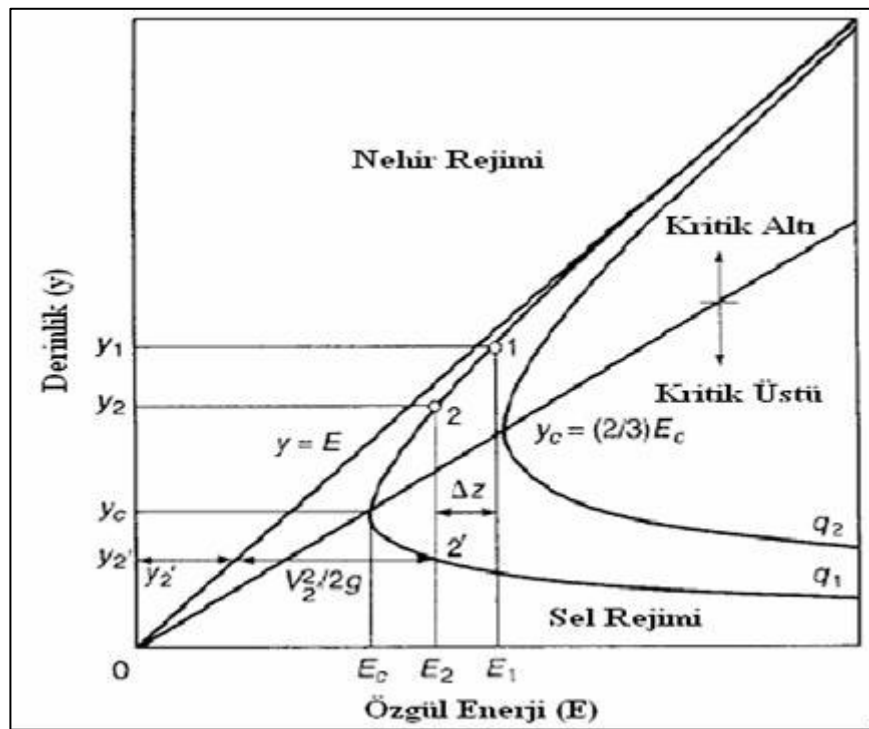
Verilen bir sabit Q debisinin kanalda akabilmesi için sahip olduğu özgül enerji, E nin en az E_{min} kadar olması veya $E > E_{min}$ olması gerekir.

Bu sabit Q debisini, belli bir $E > E_{min}$ özgül enerjisinde, biri kritik derinlikten büyük; diğeri küçük olmak üzere iki farklı akım derinliğinde akıtmak mümkündür. $y > y_c$ olması halinde akım nehir rejimi; $y < y_c$ olması halinde akım sel rejiminde akıyor denir.

Bu sabit Q debisinin enerjisi $E = E_{min}$ ise, akım derinliği $y = y_c$ dir. Bu durumda akım, kritik akım olarak adlandırılır ve kritik akımda Froude sayısının değeri birdir. Kritik akım derinliği; verilen bir özgül enerji için maksimum debiyi geçiren, verilen bir debiyi minimum enerjiyle geçiren, verilen bir debiyi minimum momentum ile geçiren derinlik olarak da tanımlanır. Bu koşullar altındaki bir akımın kanal taban eğimi de kritik eğim J_c olarak adlandırılır. Bu sonuçlar ayrıca Tablo 2.1’de özetlenmiştir.

Tablo 2.1 Akım rejimi-derinlik-hız-Froude sayısı ilişkisi (Sümer, 1983).

Akımın Rejimi	Derinlik (y)	Hız (V)	Forude Sayısı (Fr)	Kanal eğimi (J_0)
Nehir (Kritik üstü)	$y > y_c$	$V < V_c$	$Fr < 1$	$J_0 < J_c$
Kritik	$y = y_c$	$V = V_c$	$Fr = 1$	$J_0 = J_c$
Sel (Kritik altı)	$y < y_c$	$V > V_c$	$Fr > 1$	$J_0 > J_c$



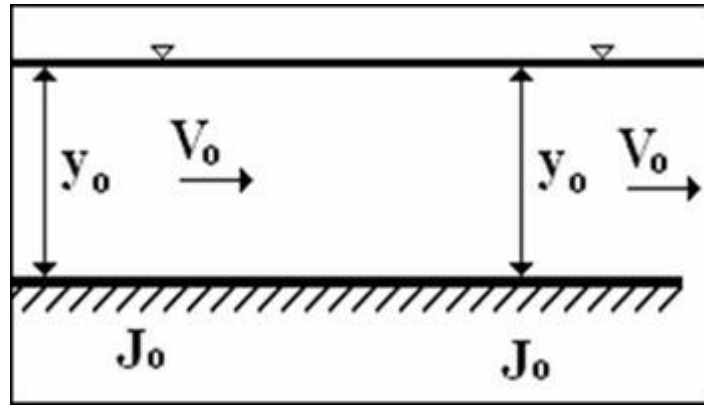
Şekil 2.7. İki farklı debi için özgül enerji- akım derinliği grafiği

2.5. Kararlı Üniform Akım ve Temel Denklemleri

Üniform olan açık kanal akımlarında, kanal tabanı, su yüzü ve enerji çizgileri birbirine paraleldir ve açık kanal boyunca akım derinliği (dolayısıyla akım kesiti), hız ve debi sabit kalır. Akışkan partikülü yörüngeleri doğrusal ve enkesite diktir. Sıvı; sabit eğimli, sabit pürüzlülüğe sahip ve sabit enkesitli açık kanallarda sürtünmelerden kaynaklanan yük kaybı, yükseklik kaybı ile eşitleninceye kadar ivmelenir. Sıvı bu noktada limit hızına ulaşır ve üniform akım yerleşmiş olur. Akım; kanalın eğimi, enkesiti ve yüzey pürüzlülüğü değişmedikçe üniform olarak sürer (Çengel, 2008).

Pratikte üniform akım koşulları ile çoğunlukla kanalların sabit eğimli ve sabit enkesitli, pürüzlülüğün değişmediği uzun düz bölümlerinde karşılaşılır. Doğal açık kanallarda üniform akım oluşması genellikle mümkün olmamakla birlikte pek çok durumda akım koşullarının üniform olduğu varsayımıyla hesaplamalar yapılmaktadır.

Açık kanal akımlarının önemli bir karakteristik büyüklüğü olan akım derinliği, üniform akımlarda normal derinlik y_0 olarak adlandırılır (Şekil 2.8)



Şekil 2.8 Tipik bir üniform akımdaki kanal kesiti.

Üniform akımda herhangi iki kesit arasındaki enerji eşitliği kısaca şöyle ifade edilebilir:

$$h_k = z_1 - z_2 ; \text{ veya } h_k = J_o L \quad (2.9)$$

Birçok araştırmacı açık kanal akımları için, kesit ortalama akım hızını ve debiyi belirlemede kullanılacak basit ampirik ifadeler geliştirmeye çalışmıştır. Bu konuda

literatürde hızı eğime bağlayan ilk ifade olarak bilinen ve Fransız mühendis Antonie Chezy'e ithafen Chezy denklemi olarak anılan denklem şöyledir;

$$V = C\sqrt{RJ_0} \quad (2.10)$$

Burada V kesit ortalama akım hızı, R hidrolik yarıçap, J_0 kanal eğimi, C ise aşağıdaki şekilde ifade edilen Chezy katsayısıdır. Chezy denklemi amprik yolla elde edilmiş bir denklem olduğundan, C katsayısının hesabı için önerilen birçok amprik ifade bulunmaktadır.

$$C = \sqrt{8g/f} \quad (2.11)$$

Verilen bu bağıntıda g yerçekimi ivmesi, f yüzey sürtünme katsayısıdır. Chezy katsayısı, boyutlu bir büyüklük olmasına karşın boyutsuz olarak işlem görmekte ve birim sistemleri arasında değişim göstermemektedir.

Chezy denkleminin benzer bir şeklini, Fransız Philippe-Gaspard Gauckler 1868'de ve İrlandalı Robert Manning 1889'da birbirlerinden habersiz olarak önermişlerdir (Çengel, 2008). Günümüzde de üniform akım hesaplamalarında yaygın olarak kullanılan Manning denklemi şu şekildedir;

$$V = \frac{a}{n} R^{2/3} J_0^{1/2} \quad (2.12)$$

Denklemdaki a çarpanı, SI birim sisteminde değeri $1 \text{ m}^{1/3}/\text{sn}$ olan boyutlu bir sabittir. n ise deneysel olarak belirlenen ve boyutsuz kabul edilen, Manning pürüzlülük katsayısıdır. (2.12) denklemi süreklilik denklemiyle birleştirilerek, SI birim sisteminde debiyi m^3/s cinsinden hesaplayan aşağıdaki ifade elde edilmektedir.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} J_0^{1/2} \quad (2.13)$$

Manning denkleminin kullanımında dikkat edilmesi gereken en önemli nokta verilen açık kanal şartlarına uygun pürüzlülük katsayısının seçilmesidir. Pürüzlülük katsayısı; taban malzemesinin cinsi, kanal geometrik özellikleri, güzergah özellikleri, taban ve şevlerdeki otlama ve mevsimsel değişim vb. gibi bir çok değişkene bağlıdır. Manning

denkleminin pratikte başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiş ancak tabanı veya şevleri hareketli kanallarda uygulanmaması gerektiği bildirilmiştir (Chow, 1959). Böyle hallerde hareketli taban direncini dikkate alan yaklaşımların kullanılması önerilmektedir.

2.6. Üniform Olmayan Akım

Değişken akımlara; nehirler, sulama sistemleri ve kanalizasyon hatları gibi doğal ya da insan yapısı kanallarda yaygın olarak görülür. Eğer akım derinliği, akım yönünde göreceli olarak kısa bir mesafede önemli ölçüde değişiyorsa değişken akım, ani değişen akım; akım derinliği kanal boyunca göreceli olarak uzun bir mesafede yavaşça değişiyorsa değişken akım, tedrici değişen akım olarak adlandırılır. Açık kanal enkesitinde, taban eğiminde, kanal pürüzlülüğünde ve debide görülen değişimler, kanal üzerinde inşa edilmiş hidrolik yapılar nedeniyle, akım bu değişimin meydana geldiği bölgelerde üniformalıktan uzaklaşır. Bu durumda akım derinliği ve akım hızı kanal boyunca alınan bir x mesafesinin fonksiyonu olur. Dolayısıyla akım çizgileri birbirine paralel olmaz. Bu durumda üniform akım şartları için verilen ifadeler özellikle ani değişen akımlar için geçerliliğini tamamen yitirir ve üniform olmayan akımın hesaplamalarında önceki bölümlerde sözü edilen özgül enerji kavramı ve momentumun korunumu prensibi değişken akımların çözümlenmesinde büyük ölçüde kolaylık sağlar.

2.6.1. Tedrici Değişken Akım

Tedrici değişen akım bölgesi, genellikle ani değişen ve üniform akım bölgelerinin arasında görülmektedir. Tedrici değişen akımlarda çalkantı ve türbülans etkilerinin yoğun olarak hissedilmemesinden ötürü, enerji kayıplarına esas itibarıyla kanal boyunca oluşan sürtünme kuvvetleri neden olur. Bu nedenle kanal pürüzlülüğü tedrici değişken akımlarda önemli bir faktördür.

Tedrici değişen akımlarda, akım derinliğinde ve hızında yavaş değişimler gözlenir ve akım yüzeyi süreksizlik veya zikzakların görülmediği düzgün kararlı bir yüzeydir. Bu da kanal boyunca akım derinliğinde görülecek değişimin, kütle ve enerjinin korunumu kanunlarını kullanarak formüle edilmesini ve serbest yüzey profil için bağıntılar elde edilmesini mümkün kılar. Akım çizgilerinin yaklaşık olarak düzgün ve birbirine paralel olduğu, kanal taban eğiminin çok büyük olmadığı durumlar için üniform akımlarda olduğu gibi tedrici değişen akımlarda da basınç dağılımının hidrostatik kurallara göre değiştiği, bir-boyutlu ortalama hız ile çalışılabileceği kabulleri yapılarak çözüme gidilebilir.

Tedrici değişen akımın genel diferansiyel denklemi şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\frac{dy}{dx} = \frac{J_o - J + \alpha \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial b} \frac{db}{dx}}{1 - Fr^2} \quad (2.14)$$

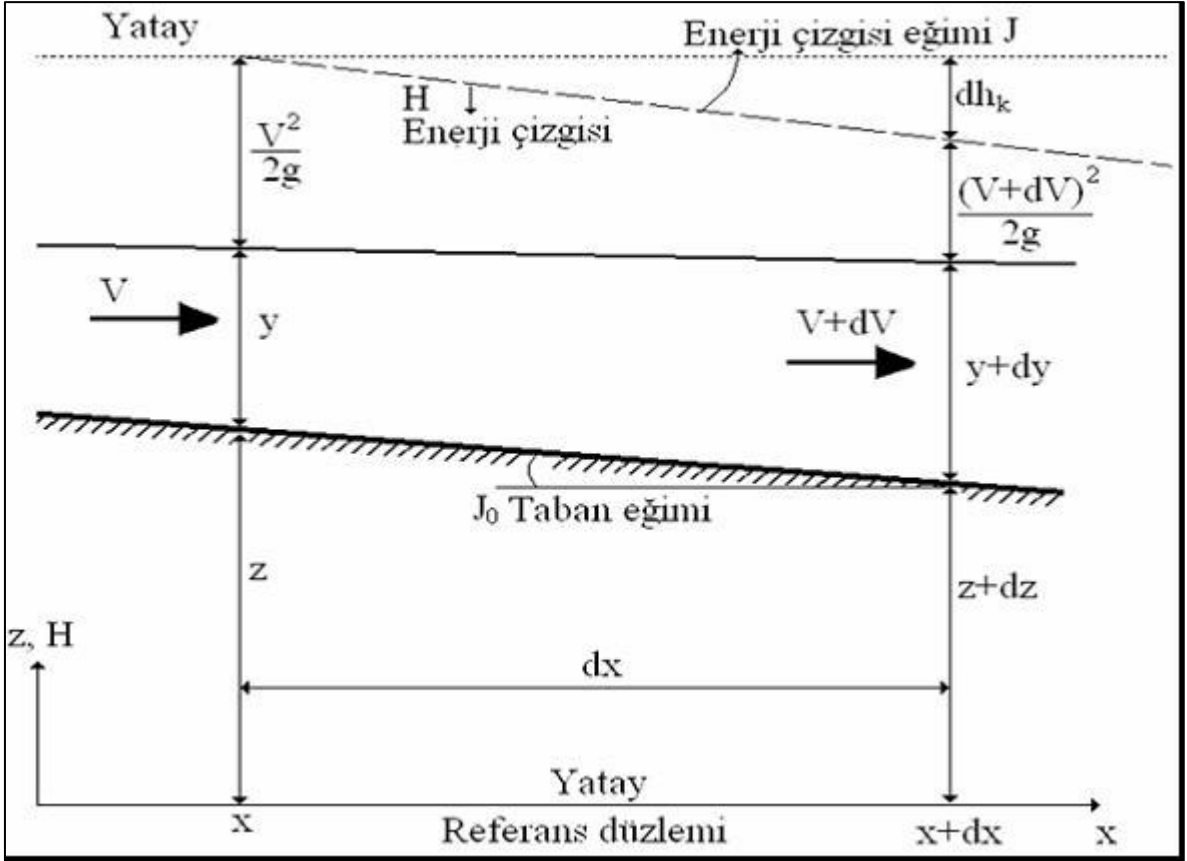
Burada (b) kanal taban genişliğini göstermektedir. Tedrici değişen akımların genel diferansiyel denklemi olan (2.14) bağıntısı aynı zamanda su yüzü diferansiyel denklemi olarak da bilinir. Bu diferansiyel denklem akım derinliğini (y), verilen bir dizi değişken için mesafenin (x) bir fonksiyonu olarak verir ve y(x) fonksiyonu akımın yüzey profilidir. şekil 2.9, tedrici değişken kararlı bir akımda, akışkanın toplam enerjisinin (H) kanal uzunluğu (x) boyunca değişimini göstermektedir. Bu değişimi ifade eden 2.15 denklemindeki dH/dx terimi enerji çizgisi eğiminin, dz/dx terimi ise kanal taban eğiminin negatif işaretlisine eşit olmaktadır. Prizmatik bir kanal için db/dx terimin sıfır olduğu da dikkate alınırsa (2.16) denklemi (2.17) formunda yazılabilir.

$$\frac{dH}{dx} = \frac{d}{dx} \left(z + y + \frac{V^2}{2g} \right) = \frac{dz}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{V}{g} \frac{dV}{dx} \quad (2.15)$$

$$J_o - J = \frac{dy}{dx} + \frac{V}{g} \frac{dV}{dx} \quad (2.16)$$

Kararlı olan bir akımda süreklilik denklemi gereği debinin kanal boyunca değişimi sıfıra eşittir. Dolayısıyla (2.15) bağıntısındaki dV/dx ifadesi $\frac{dV}{dx} = -\frac{V}{y} \frac{dy}{dx}$ şeklinde yazılabilir ve bu ifade (2.16) bağıntısında yerine konulduğunda (2.17) denklemi elde edilir;

$$J_o - J = \frac{dy}{dx} - \frac{V^2}{gy} \frac{dy}{dx} \quad (2.17)$$



Şekil 2.9 Diferansiyel bir akım bölümü boyunca akıma ait bazı özelliklerin değişimi (Çengel, 2008)

Burada V^2/gy ifadesi Froude sayısının karesidir. Bu ifadeden dy/dx çekilerek (2.18) denklemi elde edilir.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{J_0 - J}{1 - Fr^2} \quad (2.18)$$

Su yüzü profillerinin belirlenmesinde (2.18) denklemi kullanılabilir. Froude sayısı ve enerji çizgisi eğiminin daima pozitif olduğu bilinmektedir. Kanal taban eğimi kanalın aşağı-eğimli kısımlarında pozitif (genel durum), yatay kısımlarında sıfır ve yukarı-eğimli kısımlarında ise negatif (ters akım) olmaktadır. Akım derinliğinin; $dy/dx > 0$ olduğunda artarken, $dy/dx < 0$ olduğunda azalmakta ve $dy/dx = 0$ olduğunda ise sabit kalmaktadır, yani serbest yüzey, üniform akımda olduğu gibi kanal tabanına paralel olmaktadır. Froude sayısının 1' den küçük ya da büyük oluşuna bağlı olarak, verilen J_0 ve J değerleri için dy/dx pozitif veya negatif olabilir. Bu nedenle kritikaltı ve kritiküstü akımlardaki akımın davranışı zıtlık göstermektedir. Örneğin akım derinliği, $J_0 - J > 0$ için, akım yönünde kritikaltı akımda artarken, kritiküstü akımda azalmaktadır. Paydadaki $1 - Fr^2$ teriminin

işaretinin belirlenmesi biraz daha kolaydır. Kritikaltı akım ($Fr < 1$) için pozitif, kritiküstü akım ($Fr > 1$) için ise negatiftir. Ancak paydanın işaretini, J_0 ve J 'nin birbirine göre bağlı büyüklükleri belirlemektedir. Hızın artmasıyla birlikte yük kaybının arttığı ve hızın verilen bir debi için akım derinliği ile ters orantılı olduğu düşünülürse; $y < y_0$ için $J > J_0$ ve böylece $J_0 - J < 0$, öte yandan $y > y_0$ için ise $J < J_0$ ve böylece $J_0 - J > 0$ olduğu görülmektedir. Yatay ($J_0 = 0$) ve yukarı-eğimli ($J_0 < 0$) kanallarda paydaki $J_0 - J$ ifadesi, daima negatiftir ve dolayısıyla bu tür kanallardaki kritikaltı akımlarda akım derinliği akım yönünde azalır (Çengel, 2008).

2.6.2. Ani Değişken Akım

Akım derinliğinin akım yönünde göreceli olarak kısa bir mesafede önemli ölçüde değiştiği açık kanal akımlarına “ani değişen akım” denildiği önceki bölümlerde belirtilmişti. Açık kanal akımlarında su yüzünde meydana gelen yerel değişimler genel olarak; kanal enkesit değişimlerinin (kanal tabanının yükselmesi veya alçalması ve kanal genişliğinin daralması veya genişlemesinin) doğurduğu su yüzü değişimleri, kanal girişlerinde oluşan su yüzü değişimleri, yan savakların doğurduğu su yüzü değişimleri şeklinde olur.

Bu tür akımlar; dip savaklarda, geniş veya keskin tepeli savaklarda, çağlayanlarda ve kanalların genişleme ve daralma amacı ile yapılan geçiş bölgelerinde meydana gelir. Kanal enkesitinin değişmesi, hızlı değişen akımın görülmesinin önemli bir nedenidir. Ancak bir dip savağından geçen akım gibi bazı hızlı değişen akımlar, kanal enkesitinin sabit olduğu bölgelerde bile meydana gelebilir.

Hızlı değişen akımlar genellikle karmaşıktır. Bunun nedeni, hızlı değişen akımlarda çok boyutluluk ve geçiş etkileri, geri akımlar ve akım ayrılmalarının önemli miktarda görülebilmesidir. Dolayısıyla hızlı değişen akımlar genellikle deneysel veya sayısal yöntemlerle incelenir. Ancak bu karmaşıklıklara rağmen, bazı hızlı değişen akımların tek boyutlu yaklaşım kullanılarak yaklaşık olarak analiz edilmesi mümkündür (Çengel, 2008).

Sert eğimli kanallardaki akım kritiküstüdür. Azalan kanal eğimi ya da artan sürtünme etkileri nedeniyle kanal, akımı kritiküstü akım olarak sürdüremezse, akım kritikaltı hale gelir. Kritiküstü akımdan kritikaltı akıma geçiş her zaman bir hidrolik sıçrama ile gerçekleşir. Bir hidrolik sıçramada önemli ölçüde karışma ve çalkantı ile birlikte, önemli miktarda enerji yitimi de (dissipation) gerçekleşir. Hızlı değişen akımlar

için ortalama hız, her zaman en kullanışlı ya da en uygun parametre olmayabilir. Bu nedenle özellikle akım kararlı değilse (dalgaların sahilde kırılması gibi), hızlı değişen akımların analizi oldukça karmaşıktır. Burada konuya ilgisinden ötürü enkesitin küçültülmesi ile meydana gelen ani değişen akımlar biraz daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Enkesitin büyütülmesi hali sadece özetlenmiştir.

- Enkesit küçültülmesi ya kanal tabanının daraltılması veya kanal tabanının yükseltilmesi şeklinde mümkündür. Kanal tabanı üzerine Şekil 2.10' daki gibi e_1 yüksekliğinde bir eşik yerleştirilsin. Eşiğin etkisi yerel olacağından sürtünme etkileri (tesirleri) ihmal edilebilir. O halde eşiğin memba tarafındaki akımın 2.20 bağıntısı ile ifade edilen enerjisi, Bernoulli denklemi gereğince, eşik üzerindeki akımın enerjisine eşit olmalıdır.

$$E_0 = y_0 + \frac{q^2}{2gy_0} \quad (2.19)$$

$$E_1 = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1} + e_1 \quad (2.20)$$

O halde denklemler eşitlenir ve sadeleştirilirse;

$$E_0 = E_1 + e_1 \quad (2.21)$$

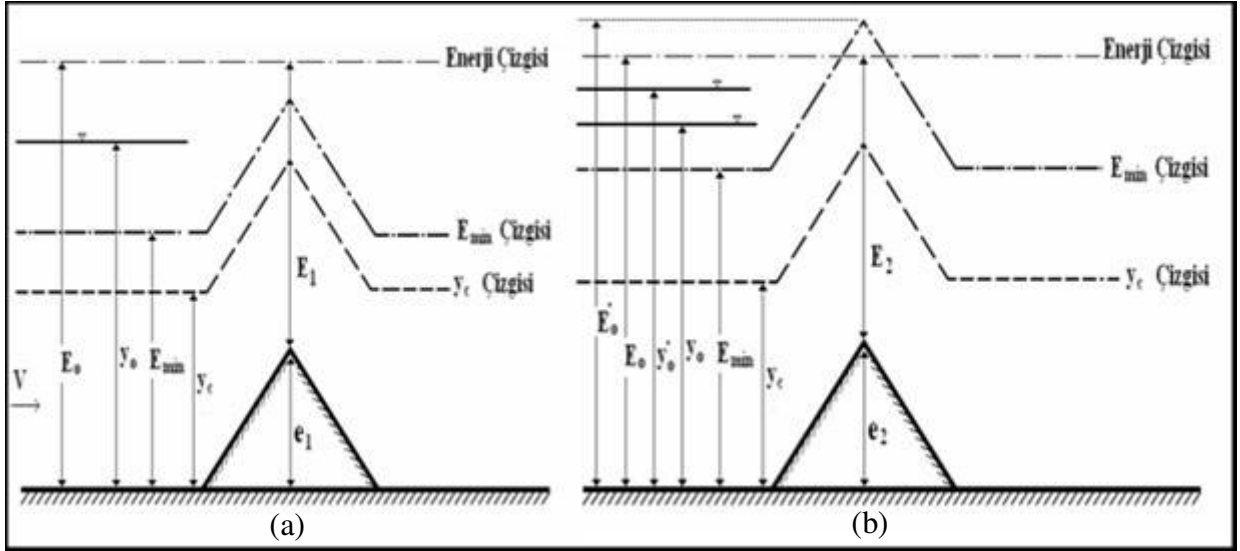
Olacak ve bu bağıntıdan E_1 yalnız bırakılırsa bağıntı;

$$E_1 = E_0 - e_1 \quad (2.22)$$

formuna gelecektir.

Diğer taraftan, bir q debisinin eşiğin üzerinden mevcut koşullarda geçebilmesi için eşik üzerindeki E_1 enerjisinin E_{\min} 'den büyük ($E \geq E_{\min}$) olması gerekir. Şekil 2.10(a)' da nehir rejiminde verilen akım için bu durum sağlanmaktadır. Dikdörtgen kesitli açık kanallar için minimum özgül enerji aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$E_{\min} = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (2.23)$$



Şekil 2.10 Kanal tabanında bir eşik olması durumu (Sümer, 1983)

Aynı akımın tabanına, e_1 'den çok daha yüksek e_2 yüksekliğinde bir eşik yerleştirildiğinde olacaktır.

$$E_2 = E_0 - e_2 \quad (2.24)$$

Bu durumda eşik üzerindeki E_2 enerjisi E_{\min} dan küçük olacak, dolayısıyla q debisi eşğin üzerinden, mevcut koşullarda geçemeyecektir. Şekil 2.10(b)' de nehir rejiminde verilen akım için bu durum sağlanmaktadır. Eğer gelen akımın mevcut enerjisi engeli (küçültülmüş kesiti) geçmeye yetmiyorsa eşik üzerindeki özgül enerjinin minimum değere ulaşması için memba tarafındaki derinlikte artış olacaktır. Artış öncesi y_0 olan derinlik, derinlik artışı sonunda y_0 ' değerine ulaşarak, tam eşik üzerinde akım minimum özgül enerjiye sahip olduğu için eşik üzerindeki derinlik kritik y_c değerine düşecek; daha sonra derinlik kritik derinliğin altına inerek akım sel rejimine geçecektir. Dolayısıyla engelin iki tarafındaki rejim birbirinden farklı olacak ve engelin tam üstünde kritik rejim olacaktır. Engelden önceki derinlik artışı, gelen akım nehir rejiminde ise kabarma, gelen akım sel rejiminde ise hidrolik sıçrama şeklinde olacaktır. Kanal tabanının daraltılması halinde durum fizik olarak kanal tabanının yükseltilmesi ile aynı olmasa da benzer olacaktır. Ancak hidrolik hesaplamaların yönteminde yani olayın matematiğinde farklılık olacaktır.

- İster kanal tabanının çukurlaştırılması (derinliğin artırılması) ister kanal tabanının genişletilmesi şeklinde olsun enkesit büyütüldüğü takdirde akım mevcut enerjisi ile yoluna devam edecektir. Bu durumda problem fizik olarak, mevcut koşullarda (mevcut enerjisi ile) akımın meydana gelebileceği kanal tabanının yükseltilmesi problemi ile aynı olmasa da benzer olacaktır. Ancak hidrolik hesaplamaların yönteminde yani olayın matematiğinde farklılık olacaktır. Bu çalışmanın konusu ile ilişkisinin az olması nedeniyle burada konunun ayrıntılarına inilmeyecektir.

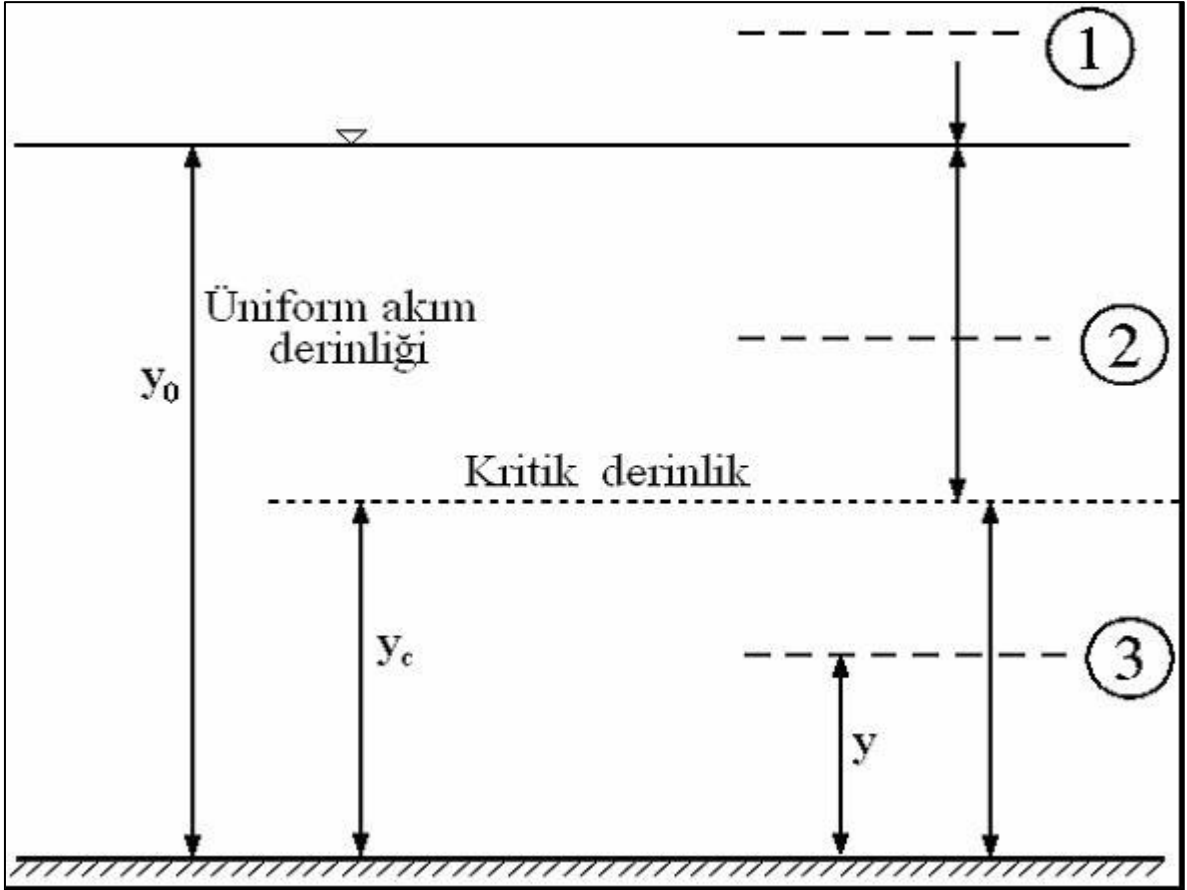
2.7. Açık Kanal Akımlarında Su Yüzü Profilleri

2.7.1. Su Yüzü Profil Tipleri

Su yüzü profilleri, kanal eğimini gösteren bir harfin yanı sıra kritik derinliğe (y_c) ve normal derinliğe (y_0) göre bağıl akım derinliğini gösteren bir sayı ile tespit edilmektedir. Bir yüzey profili kanal eğimlerinin sınıflandırılmasına göre ilk olarak S-C-M-A-H harflerinden biri ile şu şekilde adlandırılır;

$J_0 > J_c$	»	Büyük (Sert) eğimli	»	S tipi
$J_0 = J_c$	»	Kritik eğimli	»	C tipi
$J_0 < J_c$	»	Küçük (Tatlı) eğimli	»	M tipi
$J_0 < 0$	»	Ters eğimli	»	A tipi
$J_0 = 0$	»	Yatay	»	H tipi

Verilen bir kanal eğimi için akım alanı, kiritik ve üniform akım derinliklerine göre Şekil 2.11' de gösterilen üç bölgeye ayrılabilir. Akım üniform veya kiritik akımda değilse akım bu üç bölgeden herhangi birinde bulunmaktadır.



Şekil 2.11 Su yüzü profilleri için normal ve kritik derinliklere göre bağlı akım bölgeleri (Çengel, 2008)

Bir yüzey profili; eğer akım derinliği hem kritik hem de normal derinliğin üzerindeyse ($y > y_c$ ve $y > y_0$) 1 ile, eğer akım derinliği bu ikisi arasındaysa ($y_0 > y > y_c$) 2 ile ve eğer akım derinliği hem kritik hem de normal derinliğin altındaysa ($y < y_c$ ve $y < y_0$) 3 ile gösterilir. Görüldüğü üzere, belirli bir kanal eğimi tipi için üç farklı profil mümkün olmaktadır. Ancak yatay veya ters eğimli kanallarda akım asla üniform olamadığı için normal derinlik tanımlaması yapılmaz ve 1 tipinde akım görülmez. Ayrıca kritik eğimli kanallarda, normal ve kritik derinlikler özdeş olduğundan, 2 tipindeki akım oluşmamaktadır (Çengel, 2008). Bir bölgesinde eğimler kabarma eğrisi (pozitif eğim), iki bölgesindeki eğimler alçalma eğrisi (negatif eğim), olarak isimlendirilir. Sonuç olarak; beş tip kanal eğimi ve üç tip akım derinliğinin durumu için Tablo 2.2' de verilen 12 ayrı su yüzü profili mevcuttur. (Yüksel, 2000)

Tablo 2.2 Su yüzü profil tipleri (Munson, 1994).

Eğim Tipi	Eğim Notasyonu	Froude Sayısı	Yüzey Profili Tipi
$J_0 < J_c$	Küçük (Tatlı) Eğim (Mild)	$Fr < 1$	M_1
		$Fr < 1$	M_2
		$Fr > 1$	M_3
$J_0 = J_c$	Kritik Eğim (Critical)	$Fr < 1$	C_1
		$Fr > 1$	C_2
$J_0 > J_c$	Büyük (Sert) Eğim (Steep)	$Fr < 1$	S_1
		$Fr > 1$	S_2
		$Fr > 1$	S_3
$J_0 = 0$	Yatay (Horizontal)	$Fr < 1$	H_2
		$Fr > 1$	H_3
$J_0 < 0$	Ters Eğim (Adverse)	$Fr < 1$	A_2
		$Fr > 1$	A_3

2.7.2. Su Yüzü Profillerinin Belirlenmesinde İzlenen Adımlar

Su yüzü profili $y(x)$ 'in önceden kestirimi açık kanal sistemlerinin tasarımının önemli bir parçasıdır. Yüzey profilinin belirlenmesi için öncelikle kanal boyunca, derinlik ile debi arasındaki kesin ilişkinin var olduğu ve kontrol kesitleri adı verilen kesitlerdeki (barajlar, regülatörler, kanal giriş ve çıkışları gibi) bütün değişimler tespit edilir. Akımın kritik derinlikte veya üniform akım derinliğinde olduğu kesitlerde birer kontrol kesitidir. Kontrol kesitlerindeki akım derinlikleri bir kez belirlendiğinde, genellikle 2.14 denkleminin sayısal integrali alınarak, yüzey profilinin yukarı akımı ve aşağı akımı belirlenir. Profil çizimi ve derinlik hesaplamaları sel rejimindeki akımlarda memba kontrolünden mansaba doğru, nehir rejimindeki akımlarda ise mansap kontrolünden membaya doğru yapılır (Yüksel, 2000).

Açık kanal sistemleri farklı eğimlere sahip bölümlerden, geçiş ve bağlantılardan oluşmaktadır. Kanal sistemlerindeki akımın su yüzü profili, bir önceki bölümde belirtilen 12 tip profilden birinin veya tümünün oluşturduğu sürekli bir profildir.

2.7.3. Su Yüzü Profiline İlişkin Denklemlerin Çözüm Yöntemleri

Su yüzünün genel denkleminin prizmatik olmayan (düzensiz kesite sahip) kanallar için (1.1.) denklemi, prizmatik kanallar için ise (1.2.) denklemi olduğu belirtilmişti. Uygulamada bu iki denklemin çözümü için ayrı ayrı yöntemler mevcuttur.

(1.1) denkleminin çözümünde kullanılan belli başlı yöntemler Standart Adım, Erza, Grimm, Escoffier Metodları olarak sıralanabilir.

Doğrudan Adım ve Standart Adım Yöntemleri (1.2.) denkleminin çözümünde kullanılan nümerik yöntemlere, Bakhmeteff Metodu ise analitik yöntemlere örnek olarak verilebilir.

3. DENEY DÜZENEĞİ ve DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Deney Düzenegi

Açık kanallarda çeşitli taban eşikleri için oluşan su yüzü profillerini gözlemlemek amacıyla Mühendislik Mimarlık Fakültesi'ndeki Hidrolik Laboratuvarında, Şekil 3.1' de genel görünümü verilmiş olan kurulu deney düzeneğinden yararlanılarak çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği; çok amaçlı deney kanalı, seviye ölçüm düzeneği, eşikler ve kişisel bilgisayardan oluşmaktadır.

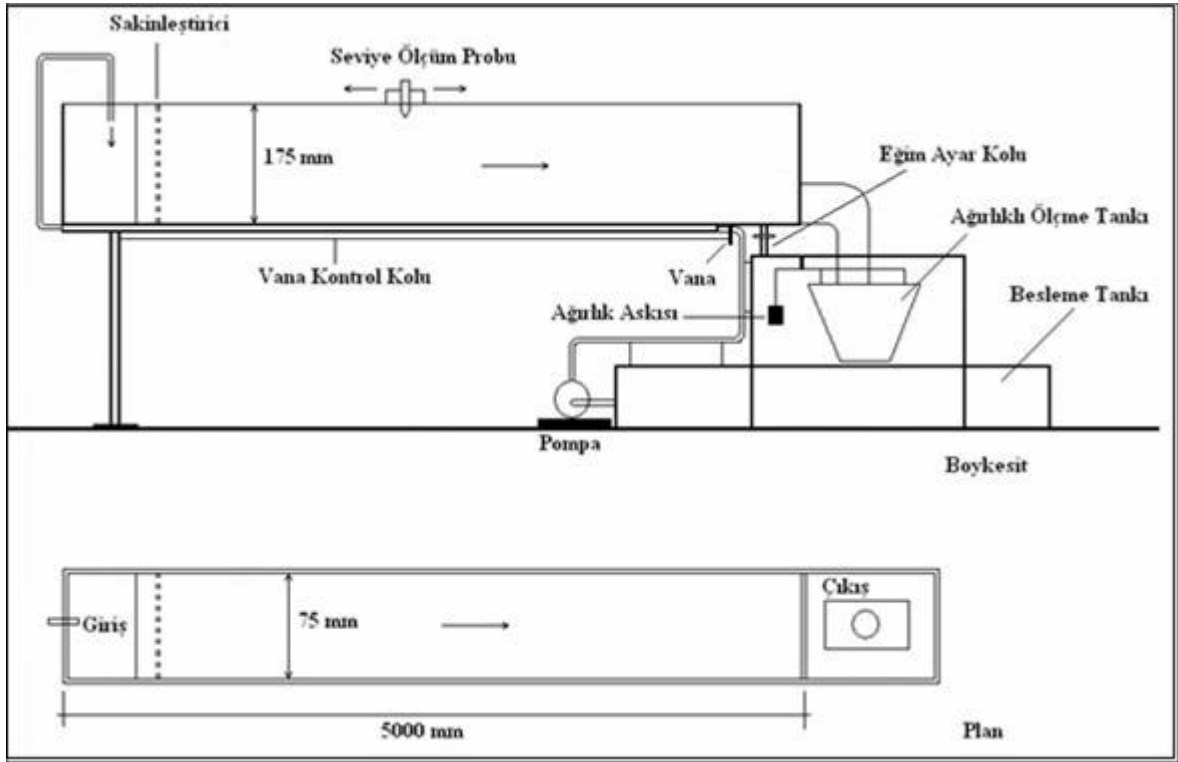


Şekil 3.1 Deney düzeneğinin genel görünümü

3.1.1. Deney Kanalı

Deney kanalı kapalı bir su devresi şeklinde çalışmaktadır. Kanal kendi içerisinde su devrini bir pompa ile sağlamaktadır. Su, besleme tankından kanal girişine kontrol vanası yardımıyla iletilmektedir. Vana, kanal boyunca bir kontrol kolu tarafından ayarlanabilmektedir. Kanal çıkışından ağırlıklı ölçme tankına dökülen su tekrar besleme tankına dönmektedir. Kanal dikdörtgen kesitli olup, taban eğimi isteğe bağlı olarak vidalı krika vasıtasıyla düşeyde ± 100 mm ölçüleme ile değiştirilebilmektedir. Kanalın debisi, vana kontrol kolu ile ayarlanabilmektedir. Kanal 5 m uzunluk, 0,075 m genişlikte ve 0,175 m derinliktedir. Kanal duvarları hafif dayanıklı şeffaf plastik malzemeden, tabanı

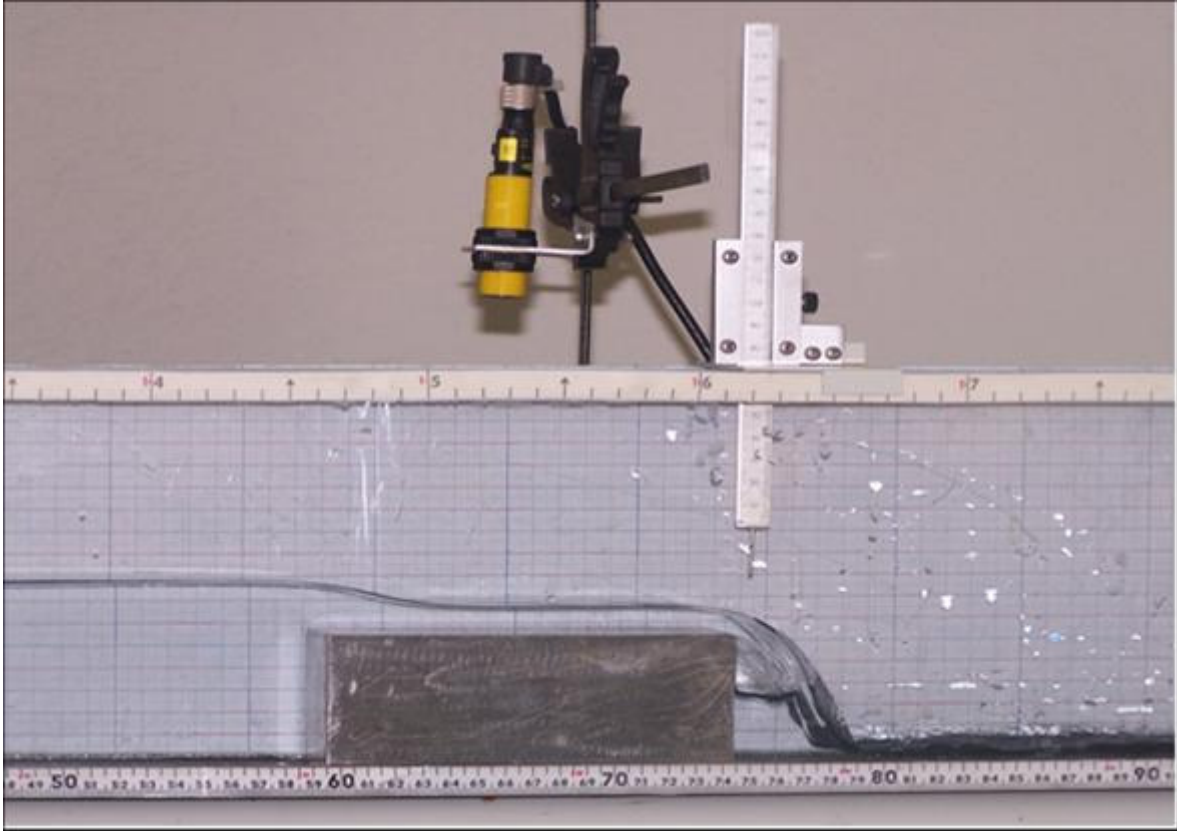
çelik üzeri yağlı boyadan imal edilmiştir. Sistemdeki pompanın gücü 150 W ve kapasitesi 2,2 lt/sn dir. Sistemdeki su tankı kapasitesi 180 litredir. Kanal sisteminde debi ölçümleri 70 litrelik bir ağırlıklı ölçüm tankı vasıtasıyla yapılmaktadır. Ağırlık tankında kullanılan ağırlıklar 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 ve 10,0 kg olarak değişmektedir. Şekil 3.2' de deney kanalının hem planda hem de boy kesitte şematik olarak tüm aparatları ile verilmiştir.



Şekil 3.2 Deney kanalının şematik görünümü

3.1.2. Seviye Ölçer

Kanal boyunca akımın su yüzü profillerinin belirlenmesi amacıyla derinlikler, kanal boyunca ultrasonik ve mekanik seviye ölçer cihazlar ile ölçülmüştür. Ultrasonik seviye ölçer, kanala monte edilen bir ray sistemi aracılığı ile, akıma dik doğrultuda ise hem yatayda hem de düşeyde birer dişli çubuk ve birer kelebek mandal aracılığı ile hareketi sağlanmaktadır (Şekil 3.3). Prob sinyalleri bir kablo aracılığı ile sinyal dönüştürücü ve kaydedici cihaza, oradan da bilgisayara aktarılmaktadır.



Şekil 3.3 Ultrasonik seviye ölçüm probu ve mekanik seviye ölçer

Ultrasonik prob gönderdiği ses dalgalarının su yüzüne çarpıp yansması yoluyla akım derinliğini belirlemektedir. Probun sağlıklı ölçüm alabilmesi için ray üzerinde su yüzüne dik olacak şekilde hareket etmektedir. Prob, akım derinliğindeki değişimleri 1mm hassasiyetlikle ölçebilmektedir. Su yüzünün, probun sağlıklı ölçüm almasına neden olacak kadar değişken olduğu noktalardaki seviye ölçümleri ve prob ölçümlerinin kontrolü için Şekil 3.3’ de görülen kanal üzerine yerleştirilmiş metalden yapılmış mekanik ölçüm aparatından kullanılmıştır. Probun sağlıklı ölçüm alamadığı noktalarda ölçümler mekanik ölçüm aparatı vasıtasıyla manuel olarak yapılmıştır. Probun aldığı ölçüm verilerinin analog olarak bilgisayara aktarımında kullanılan veri dönüştürücü ve kaydediciye ait teknik bilgiler detaylı olarak ekte ayrıca verilmiştir.

Ultrasonik seviye ölçüm cihazı ile yapılan ölçümlerin bilgisayar ortamına aktarılması ve görsel olarak takibi için bir yazılım ve bu yazılımın için geliştirilmiş kullanıcı ara yüzünden yararlanılmıştır (Şekil 3.5 ve 3.6).

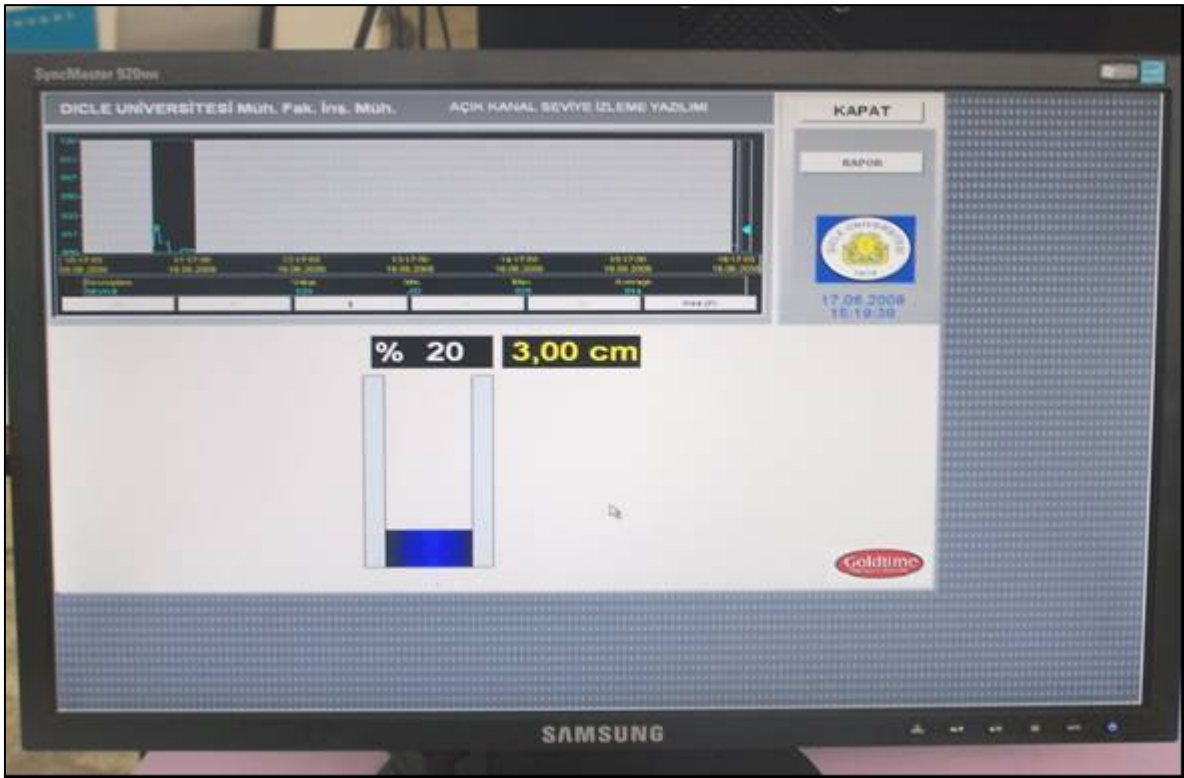
Prob, kanal yan tarafına yerleştirilmiş bir ray üzerinde hareket eden aparat vasıtasıyla kanal boyunca yatayda ve düşeyde hareket edebilmektedir. Ultrasonik prob

gönderdiği ses dalgalarının su yüzüne çarpıp yansması yoluyla akım derinliğini belirlemektedir. Probuun sağlıklı ölçüm alabilmesi için su yüzüne dik olacak şekilde monte edilmiştir. Prob, akım derinliğindeki değişimleri 1mm hassasiyetlikle ölçebilmektedir. Su yüzünün, probun sağlıklı ölçüm almasına neden olacak kadar değişken olduğu noktalardaki seviye ölçümleri ve prob ölçümlerinin kontrolü için Şekil 3.3' de görülen kanal üzerine yerleştirilmiş metalden yapılmış mekanik ölçüm aparatından yararlanılmıştır. Probuun sağlıklı ölçüm alamadığı noktalarda ölçümler mekanik ölçüm aparatı vasıtasıyla elle yapılmıştır.

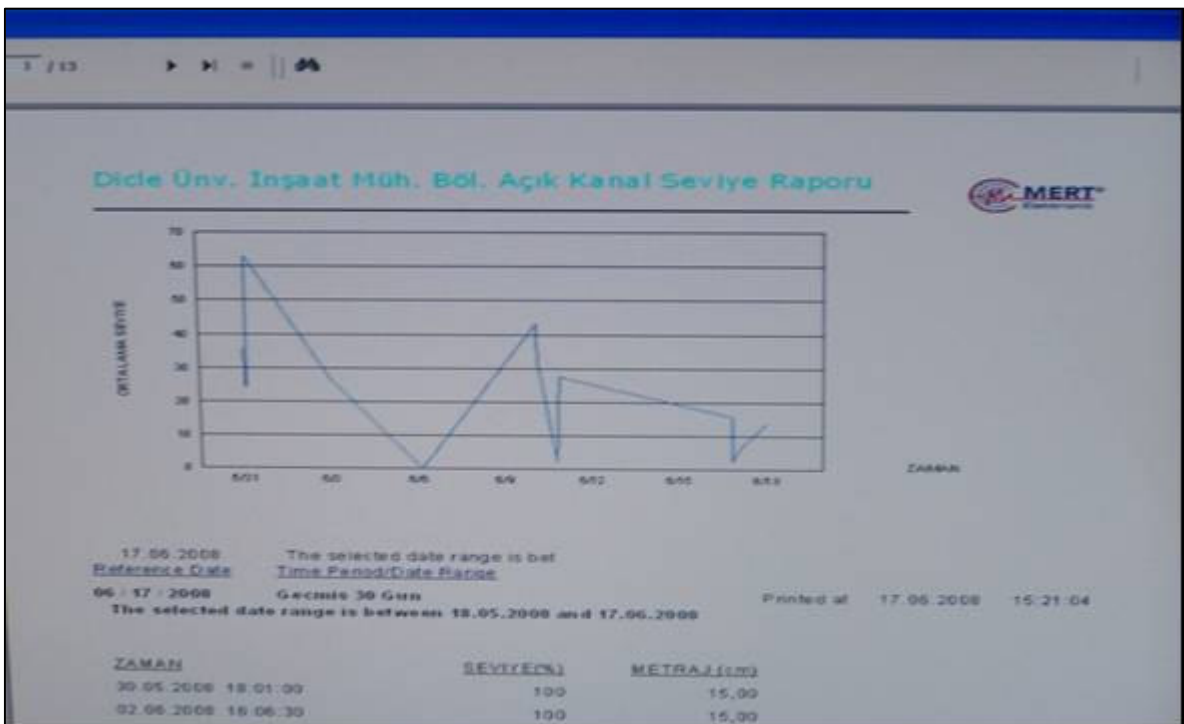
Prob ölçümlerin bilgisayar ortamına aktarılması ve görsel olarak takibi için bir yazılım ve bu yazılımın için geliştirilmiş kullanıcı ara yüzünden yararlanılmıştır. (Şekil 3.5 / 3.6).



Şekil 3.4 Veri dönüştürücü ve kaydedici



Şekil 3.5 Kullanılan yazılımın ara yüzünün ölçüm esnasındaki görüntüsü



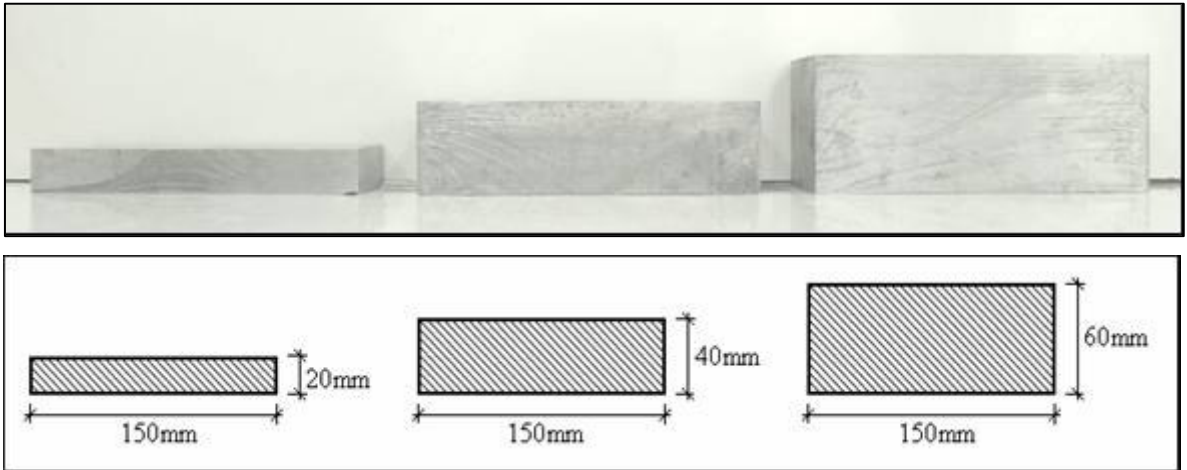
Şekil 3.6 Yazılımın ölçüm kayıtlarına ait rapor sayfasının görünümü

3.1.3.Taban Eşikleri

Bir nehrin derinliğinin ayarlanması amacıyla su altına inşa edilen alçak yapı, bir kapak veya savağın giriş açıklığının tabanı, amacı su seviyesi yapının tepe noktasına ulaşmaya kadar akımın azaltılması veya önlenmesi olan ve bir çevirme kanalının girişinde veya bir çıkış yapısında enine olarak inşa edilmiş olan alçak yapı olarak tanımlanan taban eşiği, deney düzeneğinde kanal boyunca farklı su yüzü profillerinin elde edilmesi amacıyla kullanılmıştır.

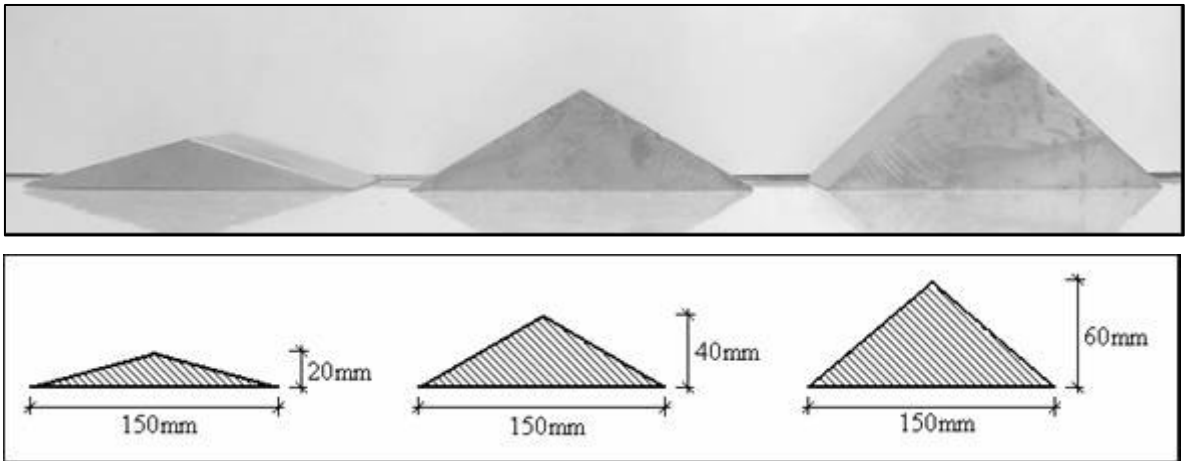
Paslanmaya karşı dayanıklı metalden üretilmiş, dört farklı geometrik kesitte (dikdörtgen, ikizkenar yamuk, yarım daire, ikizkenar üçgen) ve üç farklı yüksekliğe ($e = 20 / 40 / 60\text{mm}$) sahip taban eşikleri kullanılmıştır. Eşiklerin genişliği kanal genişliğine eşit olup, $b_e = 75\text{ mm}$ ' dir. Kullanılan eşiklerin geometrik şekil ve boyutları aşağıda verilmiştir.

Dikdörtgen kesitli taban eşikleri;



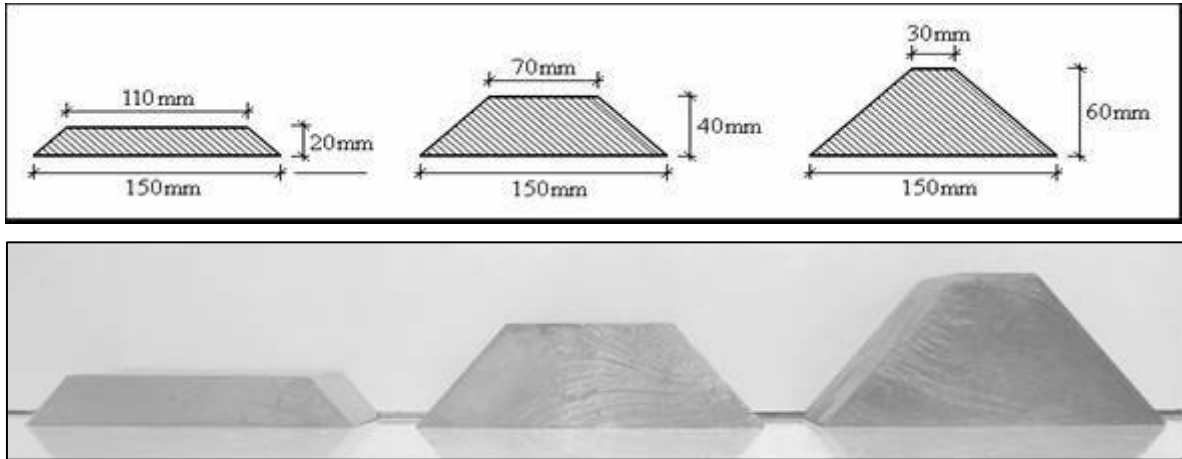
Şekil 3.7 Dikdörtgen kesitli taban eşiklerinin resim ve boyutları

İkizkenar üçgen kesitli taban eşikleri;



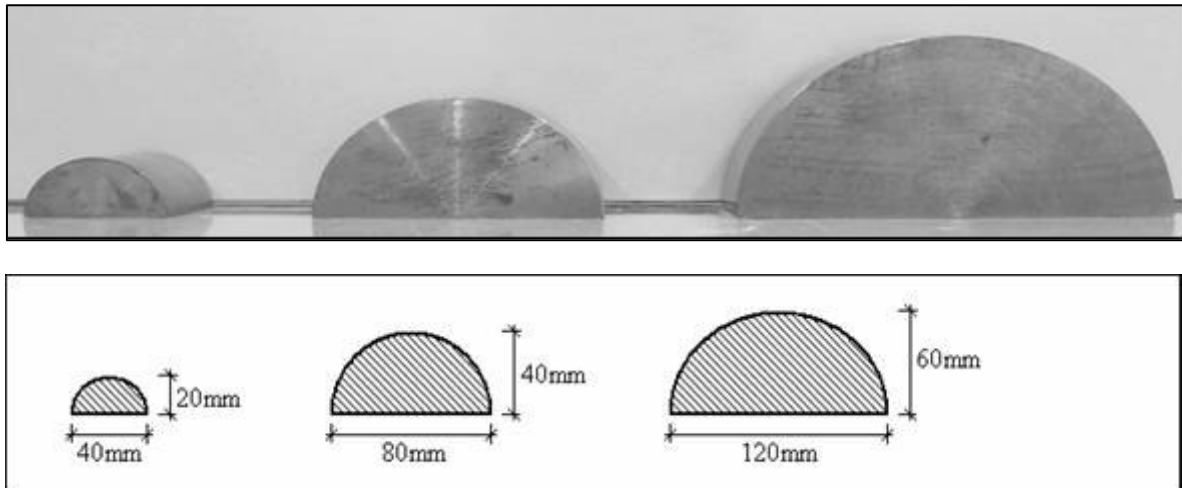
Şekil 3.8 İkizkenar üçgen kesitli taban eşiklerinin resim ve boyutları

İkizkenar yamuk kesitli taban eşikleri;



Şekil 3.9 İkizkenar yamuk kesitli taban eşiklerinin resim ve boyutları

Yarım daire kesitli taban eşikleri;



Şekil 3.10 Yarım daire kesitli taban eşiklerinin resim ve boyutları

3.2. Deneysel Çalışma

Laboratuar çalışmaları sırasında ortam sıcaklığı basit bir termometre vasıtasıyla günlük olarak ölçülmüş ve ortam sıcaklığının 26°C ila 30°C arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Çalışmada, farklı eşik tipleri için oluşacak su yüzü profillerinin belirlenmesi amaçlandığından, kanal pürüzlülüğü, kanal taban eğimi ve akımın debisi sabit tutulmuştur.

Debi, ağırlıklı ölçme tankının dolma süresi ölçülerek hesaplanmıştır. Vana açılarak su temini sağlanmış ve 70 l hacme sahip ölçüm tankı doluncaya kadar vana açık

tutulmuştur. Tank doluncaya kadar geçen süre kronometre ile ölçülmüştür. Ölçüm üç kez tekrarlanarak bulunan değerlerin aritmetik ortalaması alınmış ve ölçüm tankının dolum süresi 170 sn olarak tespit edilmiştir. Sistemin debisi (3.1.) bağıntısı ile $Q = 0,41177 \text{ l/sn}$ olarak belirlenmiştir.

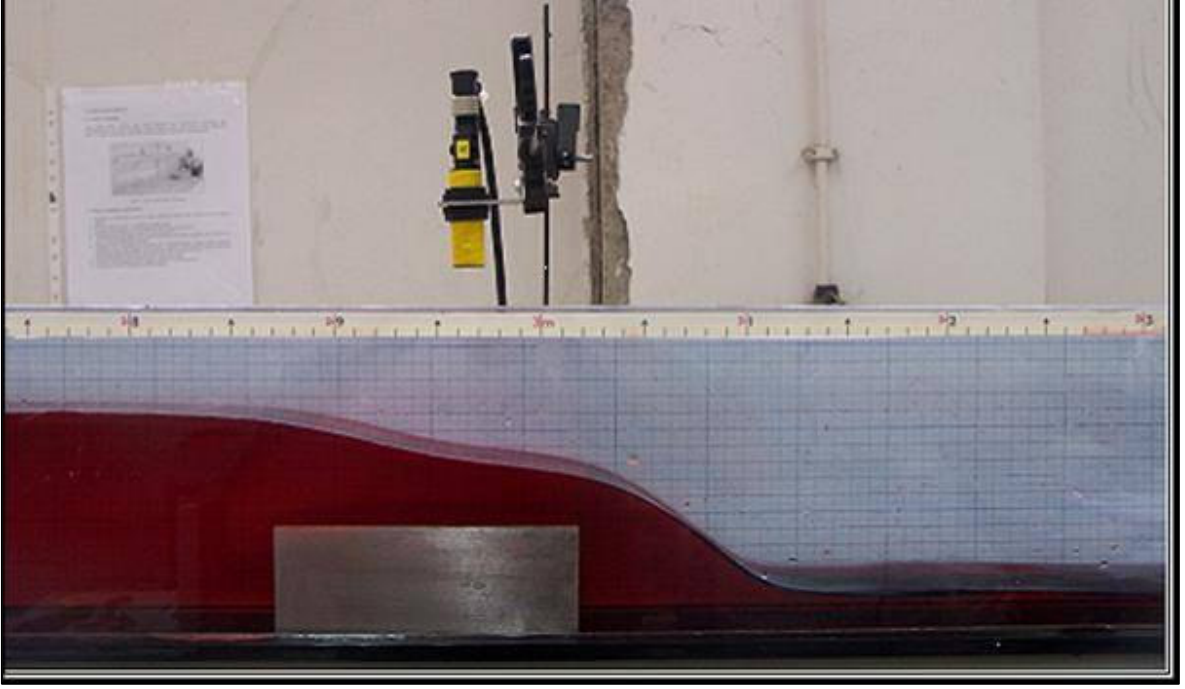
$$Q = V_{\text{tank}}/t \quad (3.1)$$

Burada Q akım debisi, V_{tank} tankın hacmi ve t tankın dolum süresidir.

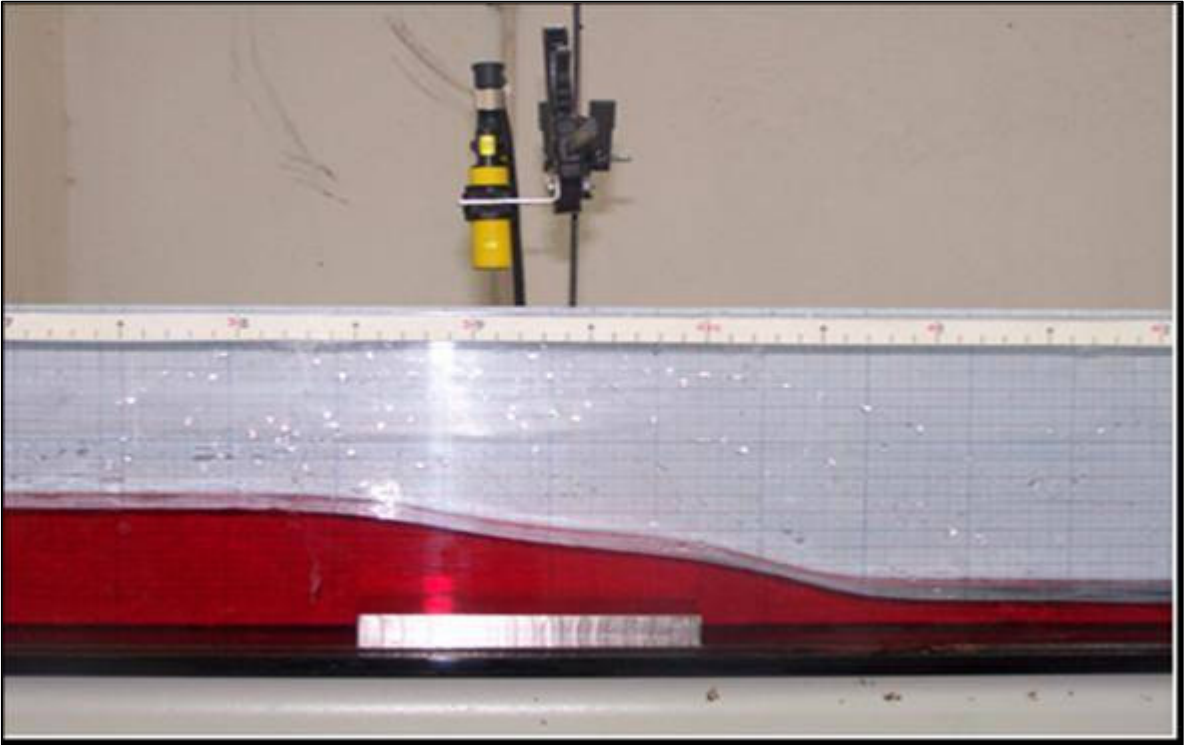
Eğim ayar kolu vasıtasıyla ayarlanan kanal taban eğimi $J_0 = 0,00232$ olarak sabit tutulmuştur.

3.2.1. Seviye Ölçümleri

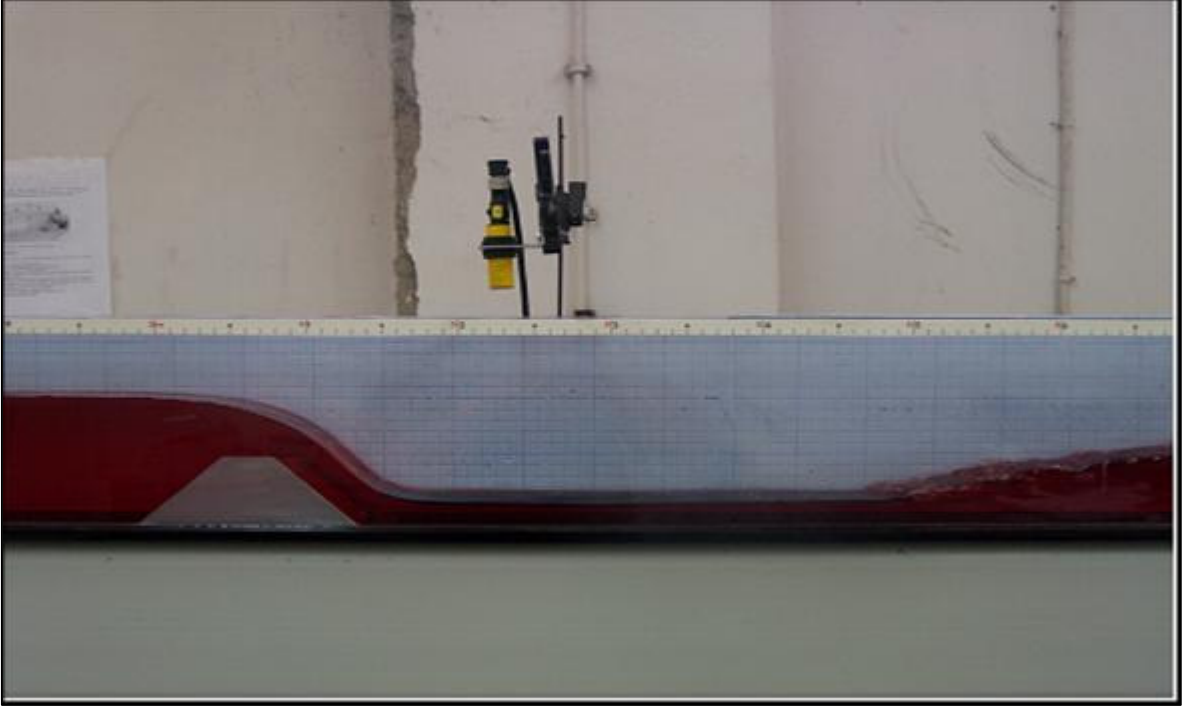
Her eşik tipi için, eşik orta noktası başlangıç noktası kabul edilerek akım derinlikleri, eşik mansabında ve membasında $\Delta x = 2,5 \text{ cm}$, eşik üzerinde ise $\Delta x = 1 \text{ cm}$ arayla ölçülmüştür. Eşik geometrisi ve boyutlarına bağlı olarak su yüzeyindeki değişimi daha ayrıntılı bir şekilde gözlemlemek için tam eşik üzerinde ölçüm mesafesi daraltılmıştır. Deneyle, her eşik tipi ve boyutu için önce ağırlıksız çilek suyu boyası (strawberry liquid) ile renklendirilen su akımı için yeterli sayıda tekrarlanmıştır. Böylece Şekil 3.11 – 3.12 - 3.13’ deki gibi açık kanal akımına görsellik kazandırılarak su yüzeyi değişimi gözlenmiş ve derinlikler, kanalın şeffaf duvarına yapıştırılan milimetrik kağıt ve mekanik ölçüm aleti kullanılarak da ölçülmüştür. Ultrasonik seviye ölçer cihazının boyadan etkilenmesi olasılığına karşı deneyler daha sonra boyasız şebeke suyu akımı ile tekrarlanmıştır. Sayısal sonuçlar ayrıca Ekler bölümünde tablo halinde verilmiştir.



Şekil 3.11 Boyalı su ile gerçekleştirilen açık kanal akımı ve seviye ölçer cihazı (150x60 mm dikdörtgen kesitli taban eşiği)



Şekil 3.12 Boyalı su ile gerçekleştirilen açık kanal akımı ve seviye ölçer cihazı (150x20 mm dikdörtgen kesitli taban eşiği)



Şekil 3.13 Boyalı su ile gerçekleştirilen açık kanal akımı ve seviye ölçer cihazı (150/30/60 mm trapez kesitli taban eşiği)

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

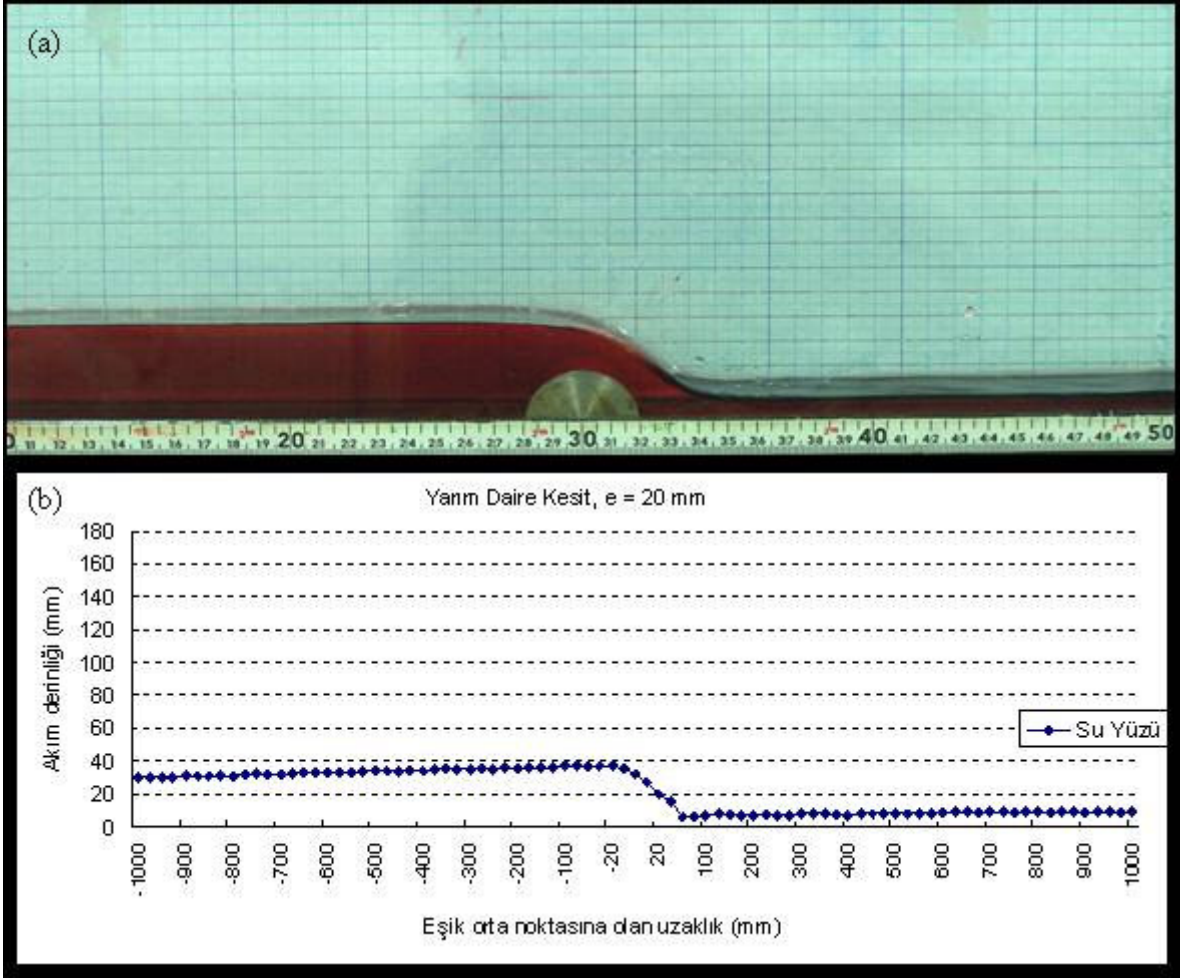
Belirtilen akım şartlarında, 12 farklı tipteki eşik için elde edilen su yüzü profillerinin kanal boyunca dağılımı Ekler bölümünde tablolar halinde sunulmuştur. Şekil 3.7, 3.8, 3.9, 3.10'da gösterilen farklı kesitlerdeki eşik tiplerinde su yüzündeki değişimlerin belirlenmesi amacıyla mansabındaki birer metre dahilindeki ölçüm kesitlerinin renklendirilmiş su ile oluşturulan akım halleri görüntülenmiş ve bu kesitlerde Bölüm 3' de anlatıldığı üzere yapılan derinlik ölçümleri Excel ortamında grafik haline dönüştürülmüştür. Deneysel sonuçlar görsel olarak hem fotoğraf hem de grafik şeklinde Şekil 4.1-12' de verilmiştir. Daha detaylı ve daha küçük boyutlarda olmasını sağlamak için görüntülerde ölçüm bölgesi grafiklere nazaran daha dar tutulmuştur. Ayrıca her şeklin altında akımın, eşik öncesi (üniform akım ve kabarmadan sonraki), tam eşik üzerindeki ve eşikten sonraki (değişim bölgesinden çıktıktan ve değişim öncesi şartlara dönünceye kadar) derinlikleri başta olmak üzere hidrolik açıdan önemli görülen bazı büyüklükler verilmiştir. Derinlikler, ultrasonik seviye ölçer cihazı ile yapılmış olup manuel olarak bu ölçümler tekrarlanarak teyit edilmiştir. Aşağıda sırası ile elde edilen görüntü, grafik ve sayısal değerler her bir eşik tipi ve boyutu için ayrı ayrı irdelenmiştir.

Akımın debisi ve kanal taban eğimi tüm deneylerde sabit tutulmuş olup bu değerler Bölüm üçte verilmişti. Akımın tüm eşik yükseklikleri için mevcut enerjisinin eşiği geçmeye yetmediği görülmüştür. Değişim bölgesi öncesinde (eşik öncesi) akım sel rejiminde olup derinliği, $y_{sel} = 11$ mm olarak ölçülmüştür. Bu nedenle akımda kabarma meydana gelmektedir. Kabarma sonucu akım nehir rejimine geçmekte ve bu nedenle eşiğin membasında hidrolik sıçrama meydana gelmektedir. Ayrıntıların kaybolmaması için görüntüler yakın alınmış olup hidrolik sıçrama bölgesi görüntü kapsamına alınmamıştır.

Akımın kesit ortalama hızı süreklilik denklemi ile 0,4774 m/s ve Froude sayısı (2.4) bağıntısı ile 1,42 olarak hesaplanmıştır. Hidrolik sıçramanın başladığı ve sıçrama etkilerinin kaybolduğu kesitler, $e = 20$ mm yüksekliğe sahip eşikler için meydana getirilen akımlarda gözlemlenebilse de, diğer eşik tipleri için oluşan akımlar da kanal membasındaki son ölçüm kesitinde dahi kabarmanın devam etmesinden ötürü gözlemlenememiştir. Deneyler sırasında gözlemlenen sıçrama, dalgalı yüzeysel sıçrama şeklindedir. Nitekim Froude sayısı, 1,00 ila 1,70 arasında olduğu takdirde hidrolik sıçrama dalgalı yüzeysel sıçrama şeklinde meydana gelmektedir (Yüksel, 2000). Yukarıda da belirtildiği gibi deneysel çalışmada akımın Froude sayısı 1.42 olarak hesaplanmıştır.

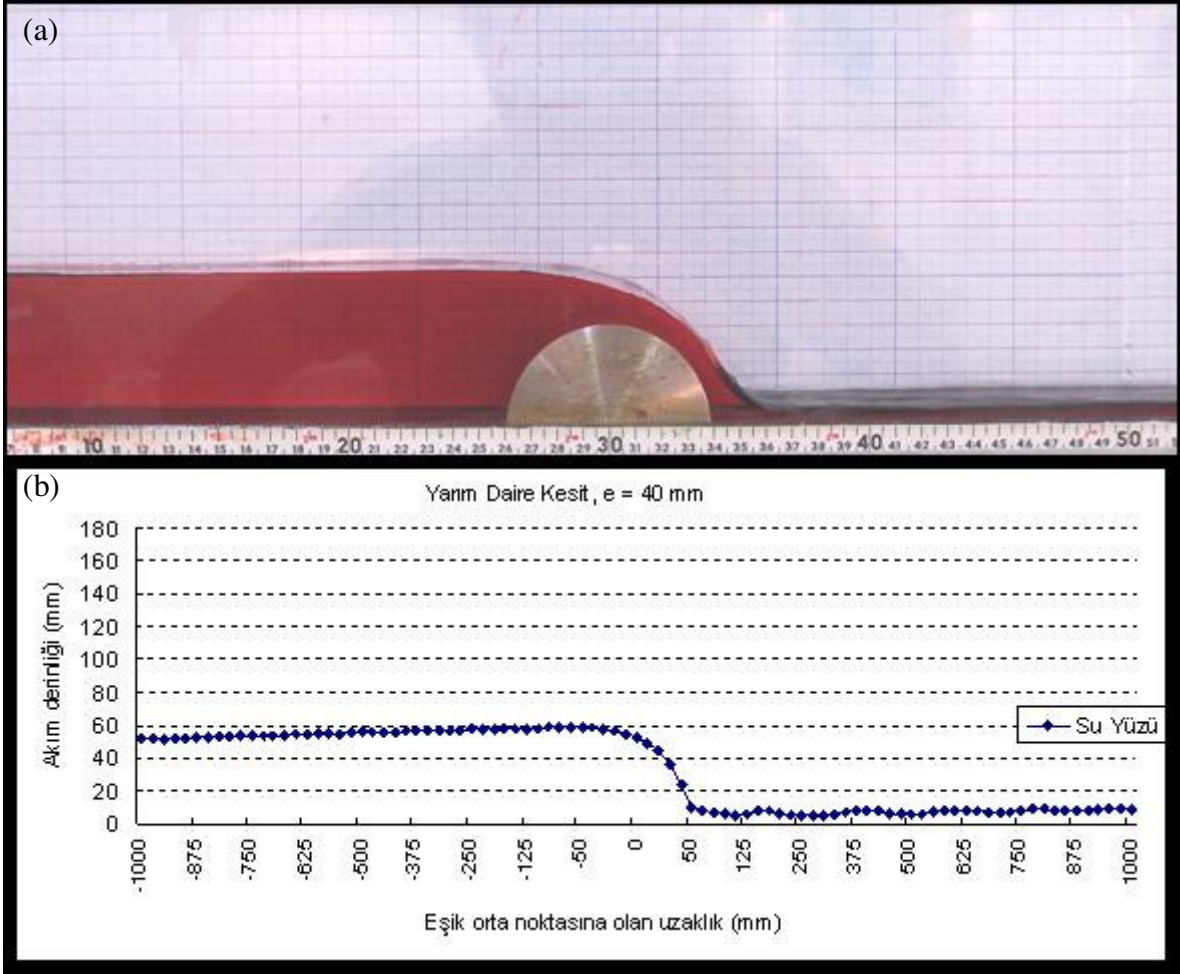
Görselliğin artırılması amacıyla yakın plandan alınan görüntülerde dar bir ölçüm aralığı görüntülendiği için sıçrama etkileri görülememektedir.

- Yarım daire kesitli ve yüksekliği $e = 20$ mm olan eşik üzerinde gerçekleştirilen akımda (Şekil 4.1), hidrolik sıçrama eşik orta noktasından $x = 2400$ mm uzaklıkta başlamakta ve $x = 800$ mm'ye kadar gözlemlenebilmektedir. Hidrolik sıçramadan sonra maksimum kabarma derinliği eşik orta noktasına $x = 20$ mm uzaklıkta (eşiğin giriş kesitinde) $y_{\max} = 20,5$ mm olarak ölçülmüştür. Eşiğin orta noktasında derinlik $y_e = 12,5$ mm olarak ölçülmüştür. $y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ bağıntısı ile hesaplanan kritik derinlik ise $14,5$ mm olarak bulunmuştur. Eşiğin tam orta noktasında meydana gelmesi beklenen ve $12,5$ mm olarak ölçülen kritik derinliğin hesap sonucu bulunan kritik derinlikten $2,5$ mm ($0,0025$ m) kadar düşük çıktığı görülmüştür. Bu farkın, debinin manuel olarak ölçülmesinden kaynaklanan hatadan ve ölçüm cihazının ± 1 mm olan hassasiyetinden meydana geldiği düşünülmüştür. Eşiğin tam orta noktasından sonra sel rejimine geçen akımda derinliğin, eşik yüzey eğriliğine benzer bir eğrilikte parabolik olarak azaldığı, kanal boyunun elverdiği son ölçüm kesitinde ise derinliğin $y_{\min} = 10$ mm olduğu gözlemlenmiştir. Akımın, eşik öncesi şartlarına dönmek üzere eşik öncesi akım şartlarındaki $y_{\text{sel}} = 11$ mm değerine ulaşması beklenmesine rağmen son ölçüm kesitinde dahi bu değer ölçülememiştir. Bununla birlikte eşik mansabında akım derinliklerinin giderek arttığı gözlemlenmesi buna neden olan olgunun, kanal boyunun yetersiz oluşu olarak yorumlanmıştır.



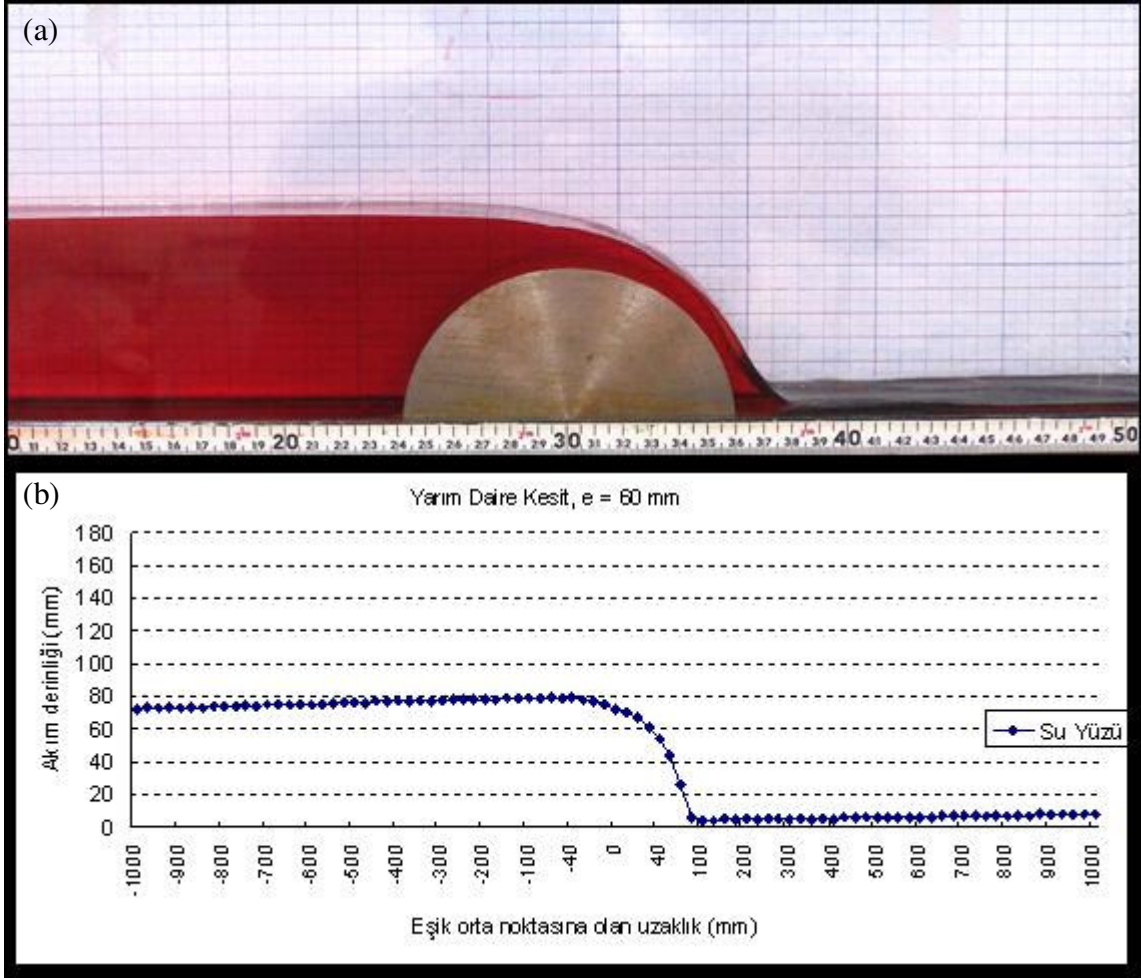
Şekil 4.1 Yarım daire kesit, e = 20 mm eşik üzerindeki akım; (a) resim (b) grafik

- Yarım daire kesitli ve yüksekliği $e = 40$ mm olan eşik üzerinde gerçekleştirilen akımda (Şekil 4.2), maksimum kabarma derinliği eşiğe giriş kesitinde $y_{\max} = 50$ mm olarak ölçülmüştür. Eşiğin tam orta noktasında derinlik $y_e = 12,5$ mm olarak ölçülmüştür. Bu değer de yine hesaplanan kritik derinlikten (14,5 mm) az olması, yine debinin manuel olarak ölçülmesinden kaynaklanan hatadan ve ölçüm cihazının ± 1 mm olan hassasiyetinden meydana geldiği düşünülmüştür. Eşiğin tam orta noktasından sonra sel rejimine geçen akımda derinliğin, eşik yüzey eğrilğine benzer bir eğrilikte parabolik olarak azaldığı, daha sonra $y_{\text{sel-min}} = 9$ mm olarak ölçülen en düşük değerine ulaştığı görülmüştür. Akımın, eşik öncesi şartlarına dönmek üzere eşik öncesi akım şartlarındaki $y_{\text{sel}} = 11$ mm değerine ulaşması beklenmesine rağmen son ölçüm kesitinde dahi bu değer ölçülememiştir. Bununla birlikte eşik mansabında akım derinliklerinin giderek artığının gözlemlenmesi buna neden olan olgunun, kanal boyunun yetersiz oluşu olarak yorumlanmıştır.



Şekil 4.2 Yarım daire kesit, $e = 40$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim (b) grafik

- Yarım daire kesitli ve yüksekliği $e = 60$ mm olan eşik üzerinde gerçekleştirilen akımda (Şekil 4.3), maksimum kabarma derinliği eşiğe giriş kesitinde, $y_{\max} = 79,5$ mm olarak ölçülmüştür. Eşiğin tam orta noktasında derinlik $y_e = 12,5$ mm olarak ölçülmüştür. Bu değer de yine hesaplanan kritik derinlikten (14,5 mm) az olması, yine debinin manuel olarak ölçülmesinden kaynaklanan hatadan ve ölçüm cihazının ± 1 mm olan hassasiyetinden meydana geldiği düşünülmüştür. Eşiğin tam orta noktasından sonra sel rejimine geçen akımda derinliğin, eşik yüzey eğriliğine benzer bir eğrilikte parabolik olarak azaldığı, daha sonra $y_{\text{sel-min}} = 8$ mm olarak ölçülen en düşük değerine ulaştığı görülmüştür. Akımın, eşik öncesi şartlarına dönmek üzere eşik öncesi akım şartlarındaki $y_{\text{sel}} = 11$ mm değerine ulaşması beklenmesine rağmen son ölçüm kesitinde dahi bu değer ölçülemedi. Bununla birlikte eşik mansabında akım derinliklerinin giderek artmasının gözlemlenmesi buna neden olan olgunun, kanal boyunun yetersiz oluşu olarak yorumlanmıştır.



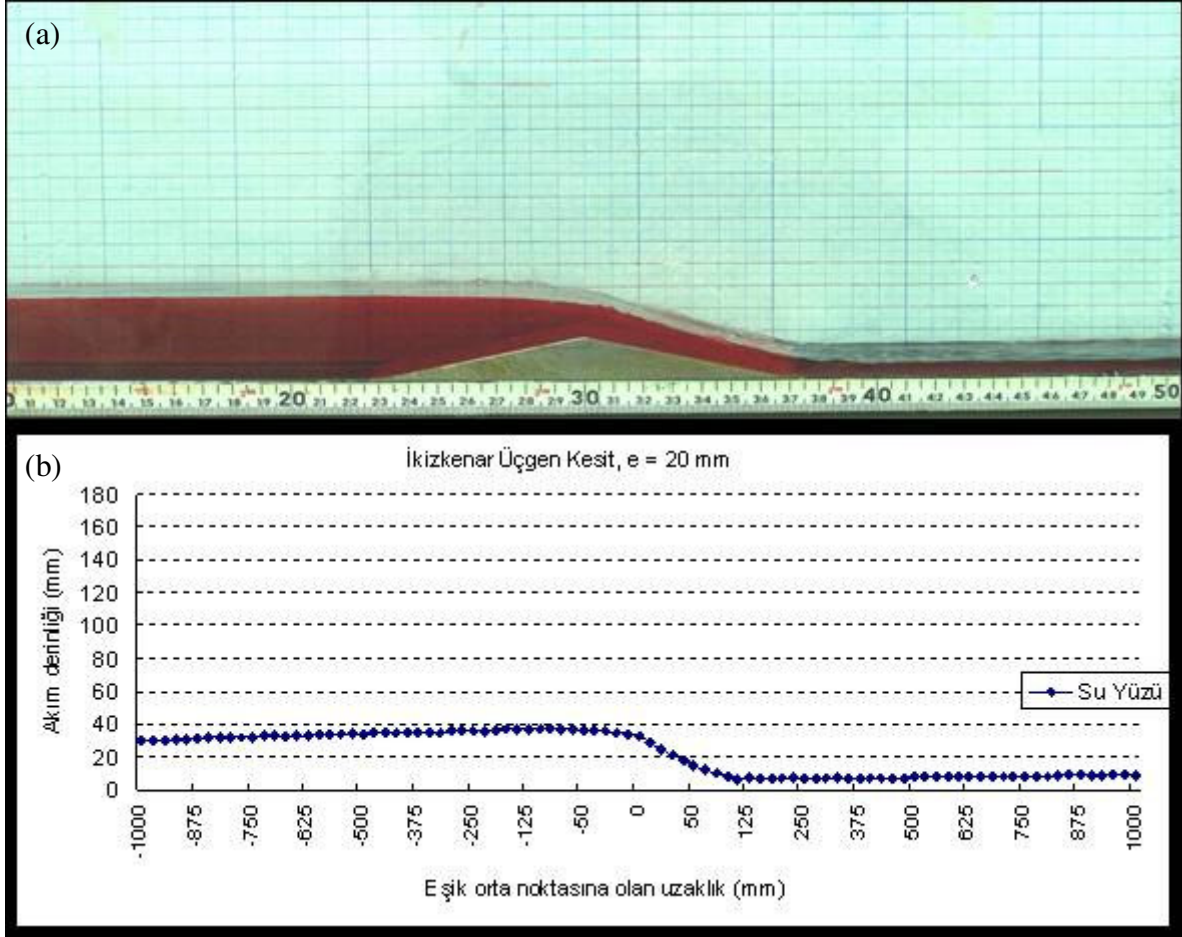
Şekil 4.3 Yarım daire kesit, $e = 60$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim (b) grafik

- İkizkenar üçgen kesitli ve yüksekliği $e = 20$ mm olan eşik üzerinde gerçekleştirilen akımda (Şekil 4.4), hidrolik sıçrama eşik orta noktasından $x = 2550$ mm uzaklıkta başlamakta ve $x = 900$ mm'ye kadar gözlemlenebilmektedir. Hidrolik sıçramadan sonra maksimum kabarma derinliği eşik orta noktasına $x = 75, 100, 125, 150$ mm uzaklıklarda $y_{\max} = 37$ mm olarak ölçülmüştür. Eşiğin orta noktasında derinlik $y_e = 12,5$ mm

olarak ölçülmüştür. $y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ bağıntısı ile hesaplanan kritik derinlik ise $14,5$ mm olarak

hesaplanmıştır. Eşiğin tam orta noktasında meydana gelmesi beklenen ve $12,5$ mm olarak ölçülen kritik derinliğin hesap sonucu bulunan kritik derinlikten $2,5$ mm ($0,0025$ m) kadar düşük çıktığı görülmüştür. Bu farkın, debinin manuel olarak ölçülmesinden kaynaklanan hatadan ve ölçüm cihazının ± 1 mm olan hassasiyetinden meydana geldiği düşünülmüştür. Eşiğin tam orta noktasından sonra sel rejimine geçen akımda derinliğin, eşik yüzey eğrilğine benzer bir eğrilikte parabolik olarak azaldığı, kanal boyunun elverdiği son ölçüm

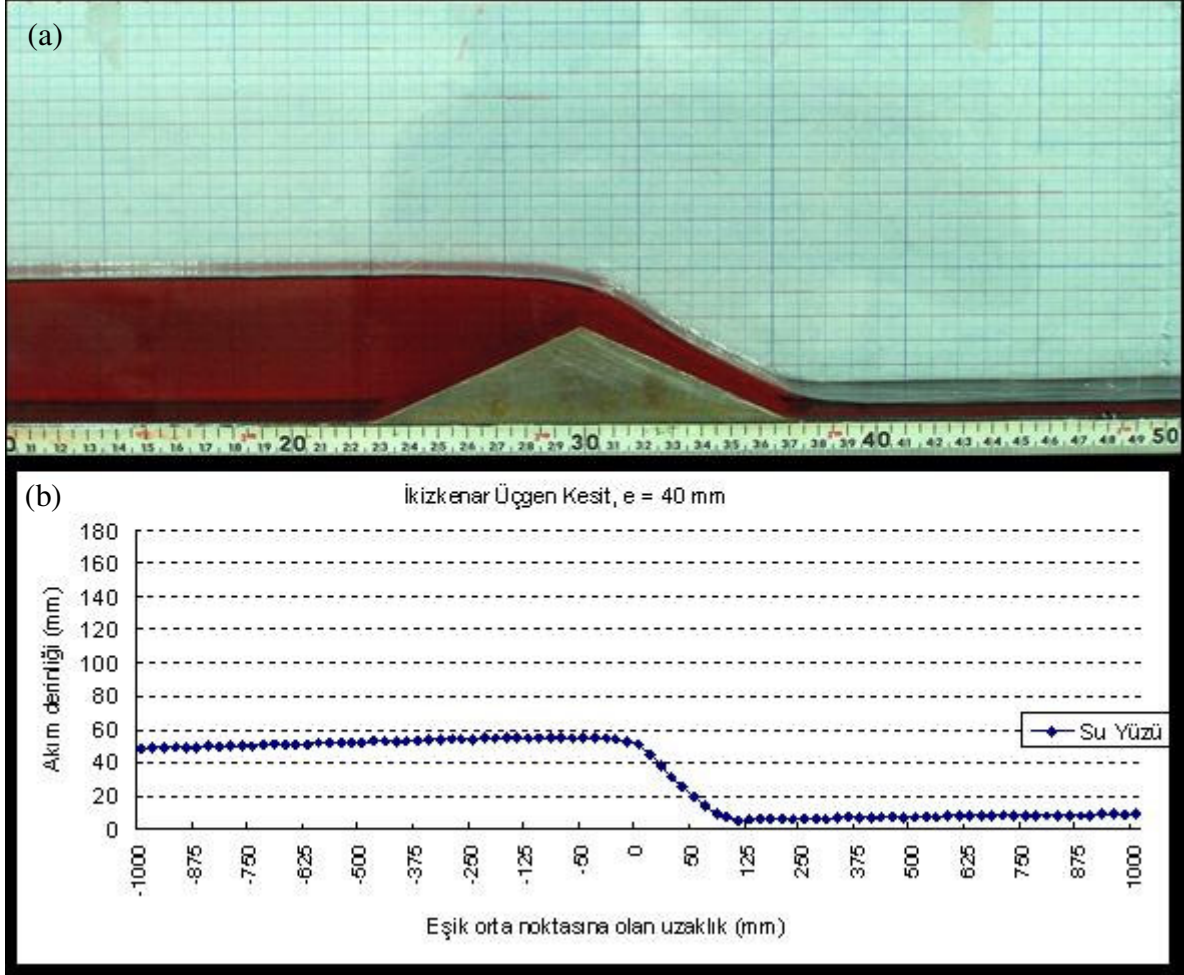
kesitinde ise derinliğin $y_{\min} = 9$ mm olduğu gözlemlenmiştir. Akımın, eşik öncesi şartlarına dönmek üzere eşik öncesi akım şartlarındaki $y_{\text{sel}} = 11$ mm değerine ulaşması beklenmesine rağmen son ölçüm kesitinde dahi bu değer ölçülememiştir. Bununla birlikte eşik mansabında akım derinliklerinin giderek artığının gözlemlenmesi buna neden olan olgunun, kanal boyunun yetersiz oluşu olarak yorumlanmıştır.



Şekil 4.4 İkizkenar üçgen kesit, $e = 20$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim (b) grafik

- İkizkenar üçgen ve yüksekliği $e = 40$ mm olan eşik üzerinde gerçekleştirilen akımda (Şekil 4.5), maksimum kabarma derinliği eşik orta noktasına $x = 75, 100, 125, 150$ mm uzaklıklarda $y_{\max} = 55$ mm olarak ölçülmüştür. Eşiğin tam orta noktasında derinlik $y_e = 10,5$ mm olarak ölçülmüştür. Bu değer de yine hesaplanan kritik derinlikten (14,5 mm) az olması, yine debinin manuel olarak ölçülmesinden kaynaklanan hatadan ve ölçüm cihazının ± 1 mm olan hassasiyetinden meydana geldiği düşünülmüştür. Eşiğin tam orta noktasından sonra sel rejimine geçen akımda derinliğin, eşik yüzey eğriliğine benzer bir eğriliğe parabolik olarak azaldığı, daha sonra $y_{\text{sel-min}} = 9$ mm olarak ölçülen en düşük değerine ulaştığı görülmüştür. Akımın, eşik öncesi şartlarına dönmek üzere eşik öncesi

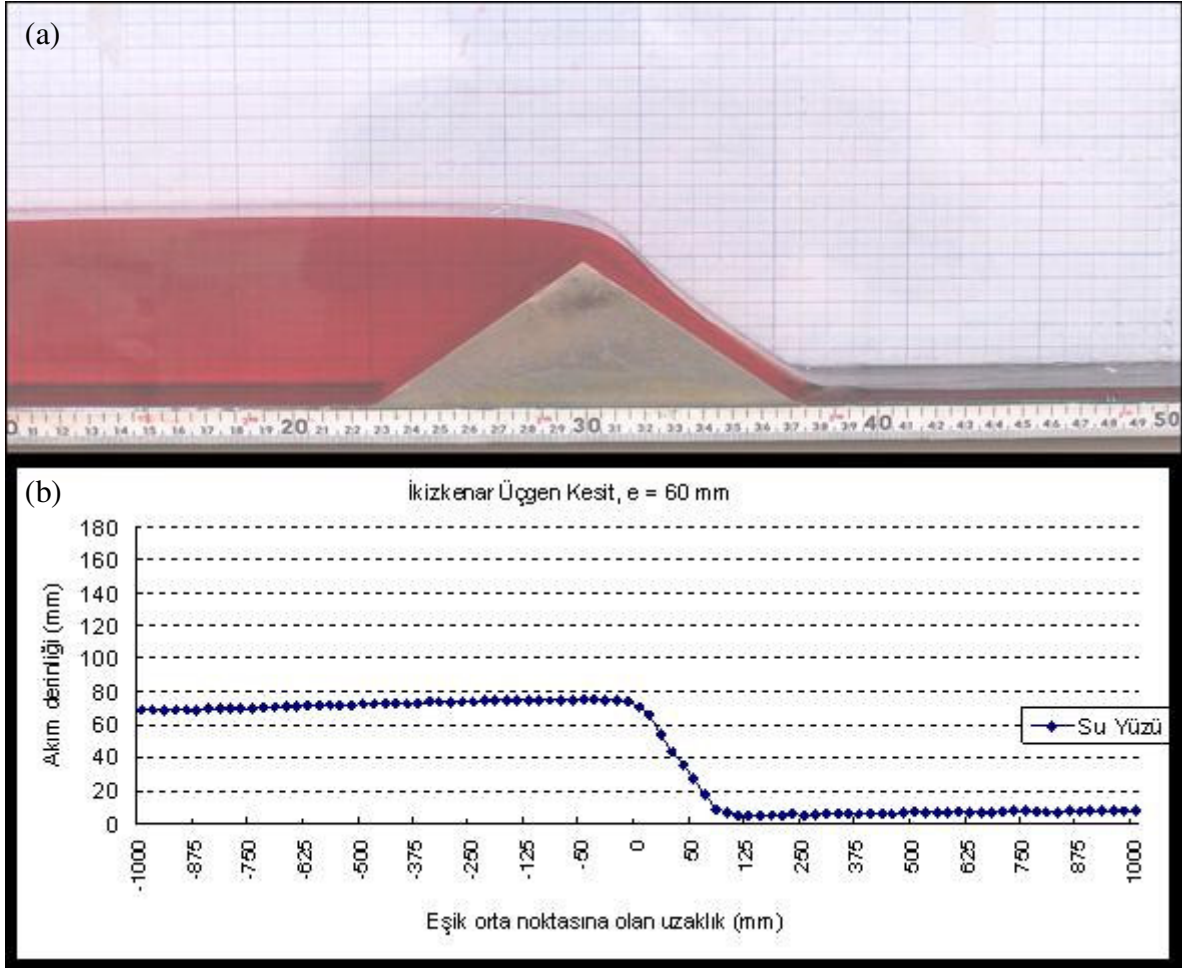
akım şartlarındaki $y_{sel} = 11$ mm değerine ulaşması beklenmesine rağmen son ölçüm kesitinde dahi bu değer ölçülemedi. Bununla birlikte eşik mansabında akım derinliklerinin giderek arttığı gözlemlenmesi buna neden olan olgunun, kanal boyunun yetersiz oluşu olarak yorumlanmıştır.



Şekil 4.5 İkizkenar üçgen kesit, e = 40 mm eşik üzerindeki akım; (a) resim (b) grafik

- İkizkenar üçgen ve yüksekliği $e = 60$ mm olan eşik üzerinde gerçekleştirilen akımda (Şekil 4.6), maksimum kabarma derinliği eşik orta noktasına $x = 75, 100, 125$ mm uzaklıklarda $y_{max} = 75$ mm olarak ölçülmüştür. Eşiğin tam orta noktasında derinlik $y_e = 11$ mm olarak ölçülmüştür. Bu değer de yine hesaplanan kritik derinlikten (14,5 mm) az olması, yine debinin manuel olarak ölçülmesinden kaynaklanan hatadan ve ölçüm cihazının ± 1 mm olan hassasiyetinden meydana geldiği düşünülmüştür. Eşiğin tam orta noktasından sonra sel rejimine geçen akımda derinliğin, eşik yüzey eğriliğine benzer bir eğriliğe parabolik olarak azaldığı, daha sonra $y_{sel-min} = 7$ mm olarak ölçülen en düşük değerine ulaştığı görülmüştür. Akımın, eşik öncesi şartlarına dönmek üzere eşik öncesi

akım şartlarındaki $y_{sel} = 11$ mm değerine ulaşması beklenmesine rağmen son ölçüm kesitinde dahi bu değer ölçülemedi. Bununla birlikte eşik mansabında akım derinliklerinin giderek arttığı gözlemlenmesi buna neden olan olgunun, kanal boyunun yetersiz oluşu olarak yorumlanmıştır.



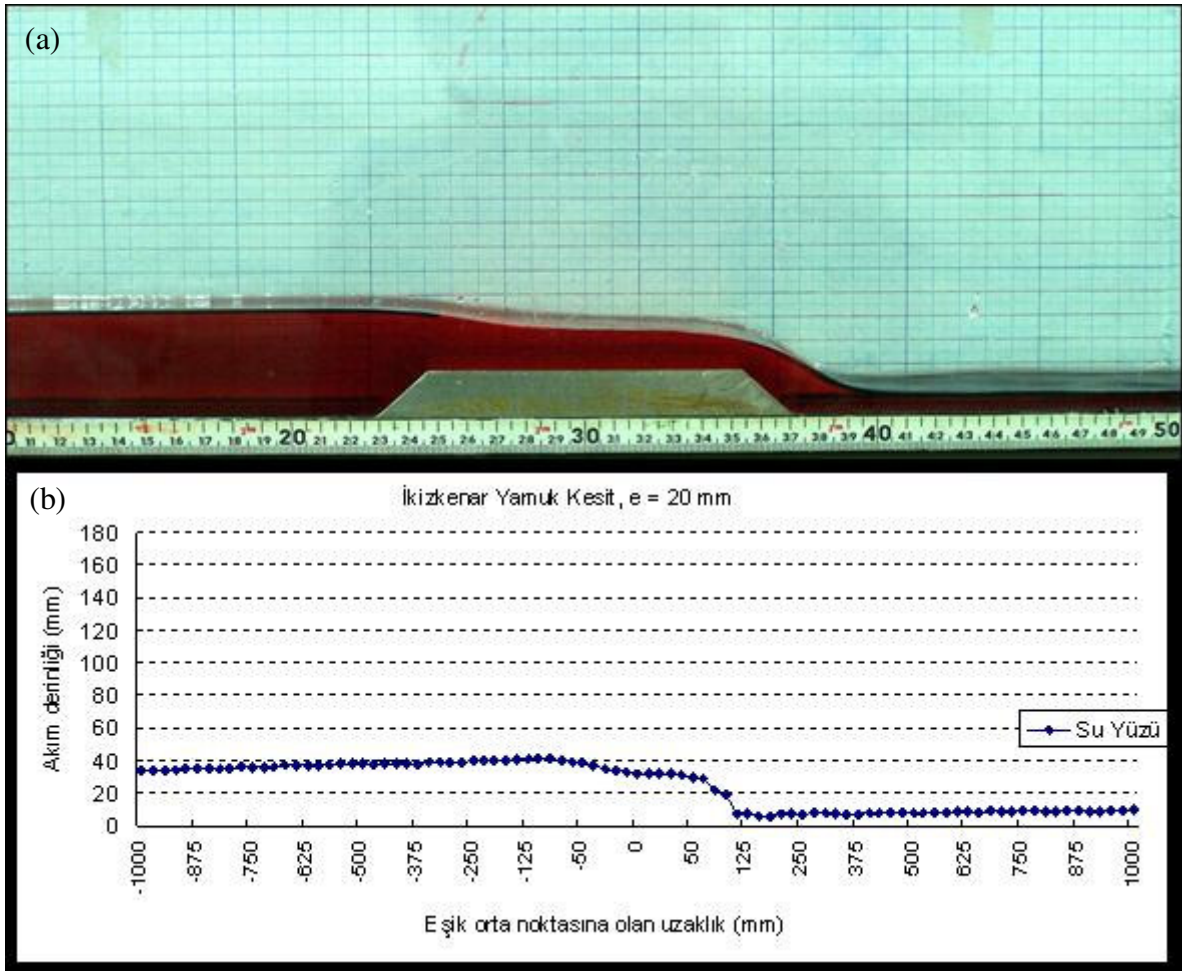
Şekil 4.6 İkizkenar üçgen kesit, e = 60 mm eşik üzerindeki akım; (a) resim (b) grafik

- İkizkenar yamuk kesitli ve yüksekliği e = 20 mm olan eşik üzerinde gerçekleştirilen akımda (Şekil 4.7), hidrolik sıçrama eşik orta noktasından x = 3050 mm uzaklıkta başlamakta ve x = 1100 mm'ye kadar gözlemlenebilmektedir. Hidrolik sıçramadan sonra maksimum kabarma derinliği eşik orta noktasına x = 75, 100, 125 mm uzaklıklarda $y_{max} = 41,5$ mm olarak ölçülmüştür. Eşiğin orta noktasında derinlik $y_e = 12,5$ mm olarak

ölçülmüştür. $y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ bağıntısı ile hesaplanan kritik derinlik ise 14,5 mm olarak

hesaplanmıştır. Eşiğin tam orta noktasında meydana gelmesi beklenen ve 12,5 mm olarak ölçülen kritik derinliğin hesap sonucu bulunan kritik derinlikten 2,5 mm (0,0025 m) kadar

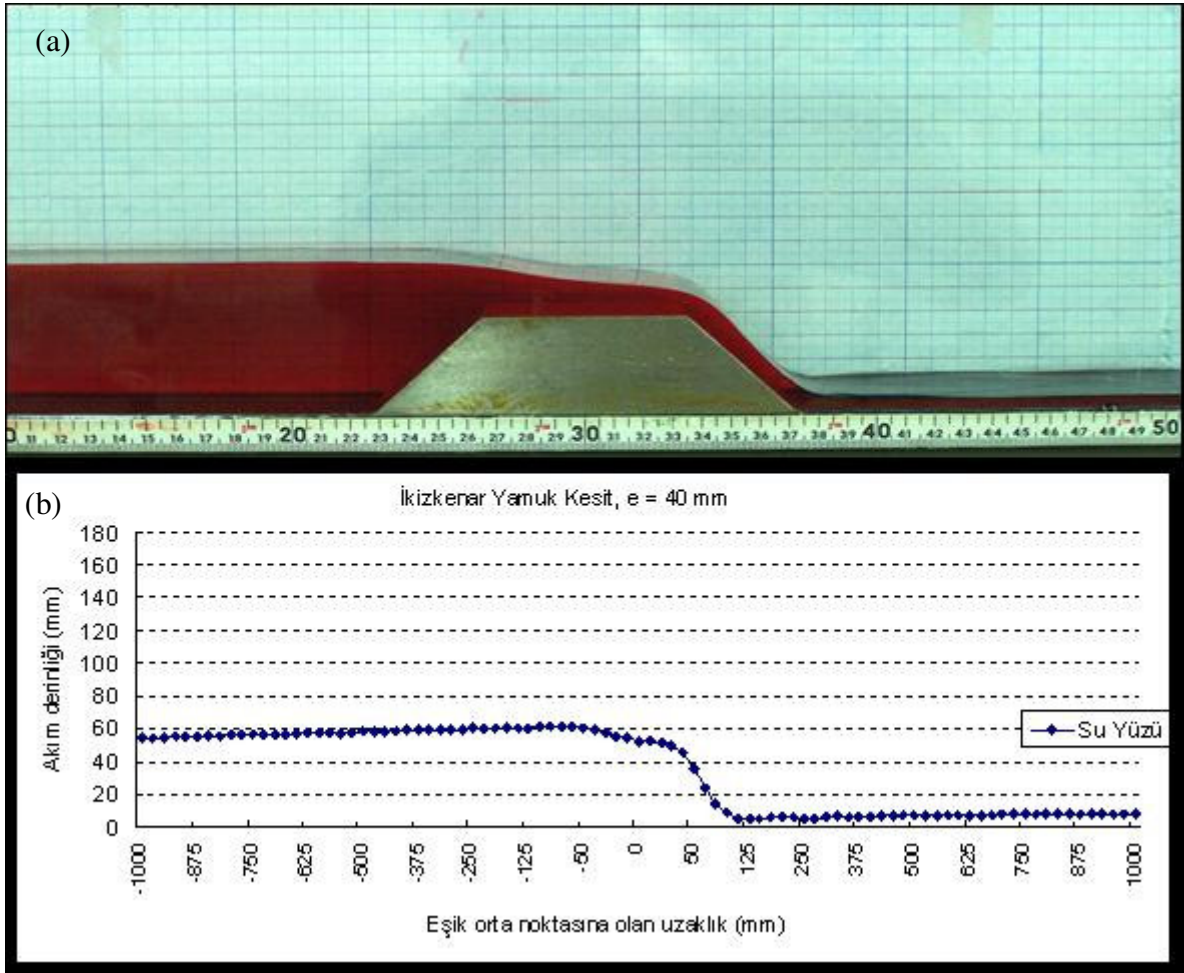
düşük çıktığı görülmüştür. Bu farkın, debinin manuel olarak ölçülmesinden kaynaklanan hatadan ve ölçüm cihazının ± 1 mm olan hassasiyetinden meydana geldiği düşünülmüştür. Eşik giriş kesitindeki maksimum kabarma derinliğinden sonra su yüzü giderek alçalmakta eşik orta noktasında kritik derinlikte geçmekte ve hemen bir miktar daha kabardıktan sonra eşik yüzey eğrilğine yakın bir eğrilikte parabolik olarak azalmaktadır. Kanal boyunun elverdiği son ölçüm kesitinde ise derinliğin $y_{\min} = 10$ mm olduğu gözlemlenmiştir. Akımın, eşik öncesi şartlarına dönmek üzere eşik öncesi akım şartlarındaki $y_{\text{sel}} = 11$ mm değerine ulaşması beklenmesine rağmen son ölçüm kesitinde dahi bu değer ölçülememiştir. Bununla birlikte eşik mansabında akım derinliklerinin giderek artığının gözlemlenmesi buna neden olan olgunun, kanal boyunun yetersiz oluşu olarak yorumlanmıştır.



Şekil 4.7 İkizkenar yamuk kesit, $e = 20$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim (b) grafik

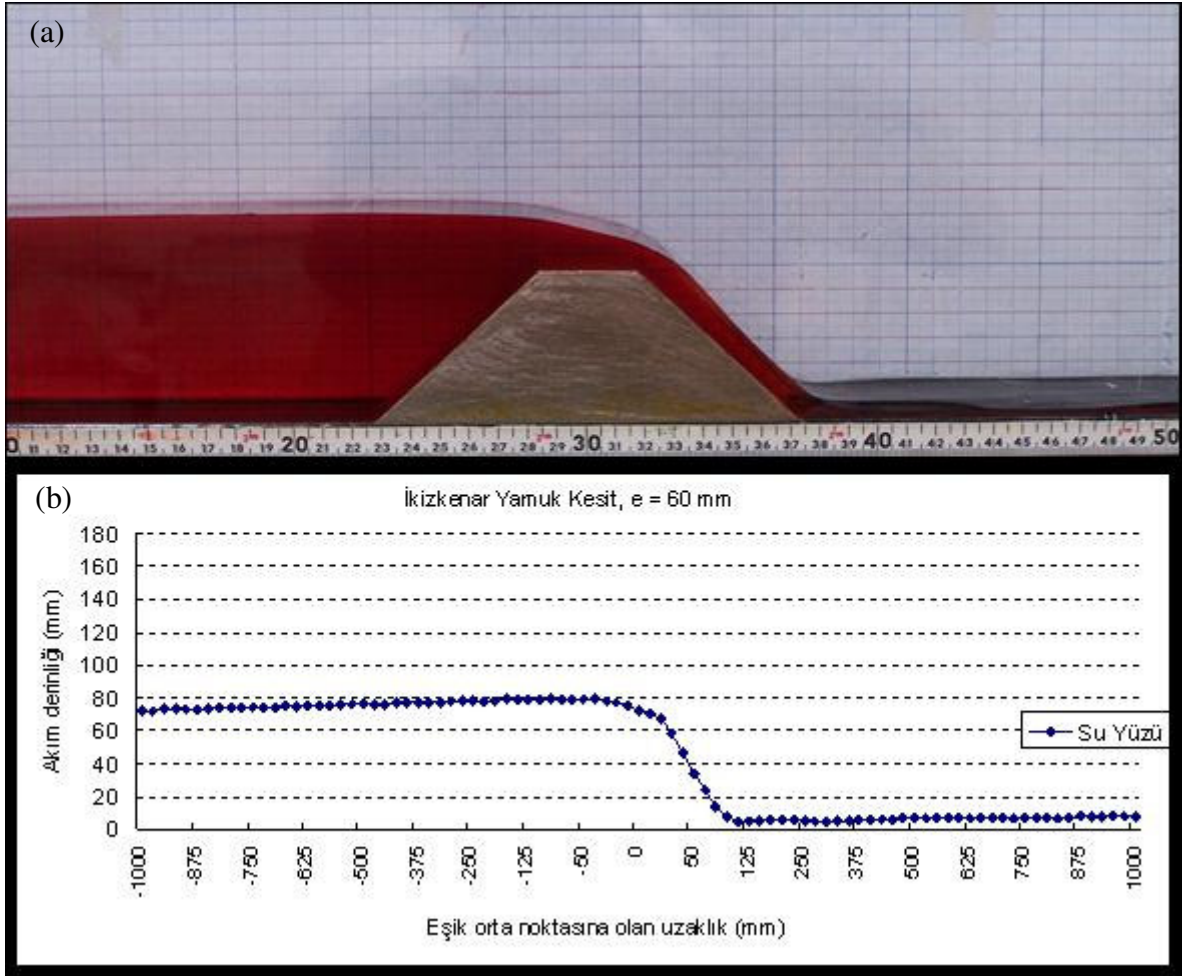
- İkizkenar yamuk ve yüksekliği $e = 40$ mm olan eşik üzerinde gerçekleştirilen akımda (Şekil 4.8), maksimum kabarma derinliği eşik orta noktasına $x = 75, 100, 125$ mm uzaklıklarda $y_{\max} = 61$ mm olarak ölçülmüştür. Eşiğin tam orta noktasında derinlik

$y_e = 12,5$ mm olarak ölçülmüştür. Bu değerin de yine hesaplanan kritik derinlikten (14,5 mm) az olması, yine debinin manuel olarak ölçülmesinden kaynaklanan hatadan ve ölçüm cihazının ± 1 mm olan hassasiyetinden meydana geldiği düşünülmüştür. Eşik giriş kesitindeki maksimum kabarma deriniğinden sonra su yüzü giderek alçalmakta eşik orta noktasında kritik derinlikte geçmekte ve hemen bir miktar daha kabardıktan sonra eşik yüzey eğriliğine yakın bir eğriliğe parabolik olarak azalmaktadır. Kanal boyunun elverdiği son ölçüm kesitinde ise derinliğin $y_{sel-min} = 8$ mm olarak ölçülen en düşük değerine ulaştığı görülmüştür. Akımın, eşik öncesi şartlarına dönmek üzere eşik öncesi akım şartlarındaki $y_{sel} = 11$ mm değerine ulaşması beklenmesine rağmen son ölçüm kesitinde dahi bu değer ölçülememiştir. Bununla birlikte eşik mansabında akım derinliklerinin giderek artığının gözlemlenmesi buna neden olan olgunun, kanal boyunun yetersiz oluşu olarak yorumlanmıştır.



Şekil 4.8 İkizkenar yamuk kesit, $e = 40$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim (b) grafik

• İkizkenar yamuk ve yüksekliği $e = 60\text{ mm}$ olan eşik üzerinde gerçekleştirilen akımda (Şekil 4.9), maksimum kabarma derinliği eşik orta noktasına $x = 75, 100, 125\text{ mm}$ uzaklıklarda $y_{\max} = 79,5\text{ mm}$ olarak ölçülmüştür. Eşiğin tam orta noktasında derinlik $y_e = 12,5\text{ mm}$ olarak ölçülmüştür. Bu değer de yine hesaplanan kritik derinlikten ($14,5\text{ mm}$) az olması, yine debinin manuel olarak ölçülmesinden kaynaklanan hatadan ve ölçüm cihazının $\pm 1\text{ mm}$ olan hassasiyetinden meydana geldiği düşünülmüştür. Eşik giriş kesitindeki maksimum kabarma derinliğinden sonra su yüzü giderek alçalmakta eşik orta noktasında kritik derinlikte geçmekte ve hemen bir miktar daha kabardıktan sonra eşik yüzey eğrilğine yakın bir eğrilikte parabolik olarak azalmaktadır. Kanal boyunun elverdiği son ölçüm kesitinde ise derinliğin $y_{\text{sel-min}} = 7,5\text{ mm}$ olarak ölçülen en düşük değerine ulaştığı görülmüştür. Akımın, eşik öncesi şartlarına dönmek üzere eşik öncesi akım şartlarındaki $y_{\text{sel}} = 11\text{ mm}$ değerine ulaşması beklenmesine rağmen son ölçüm kesitinde dahi bu değer ölçülememiştir. Bununla birlikte eşik mansabında akım derinliklerinin giderek artığının gözlemlenmesi buna neden olan olgunun, kanal boyunun yetersiz oluşu olarak yorumlanmıştır.

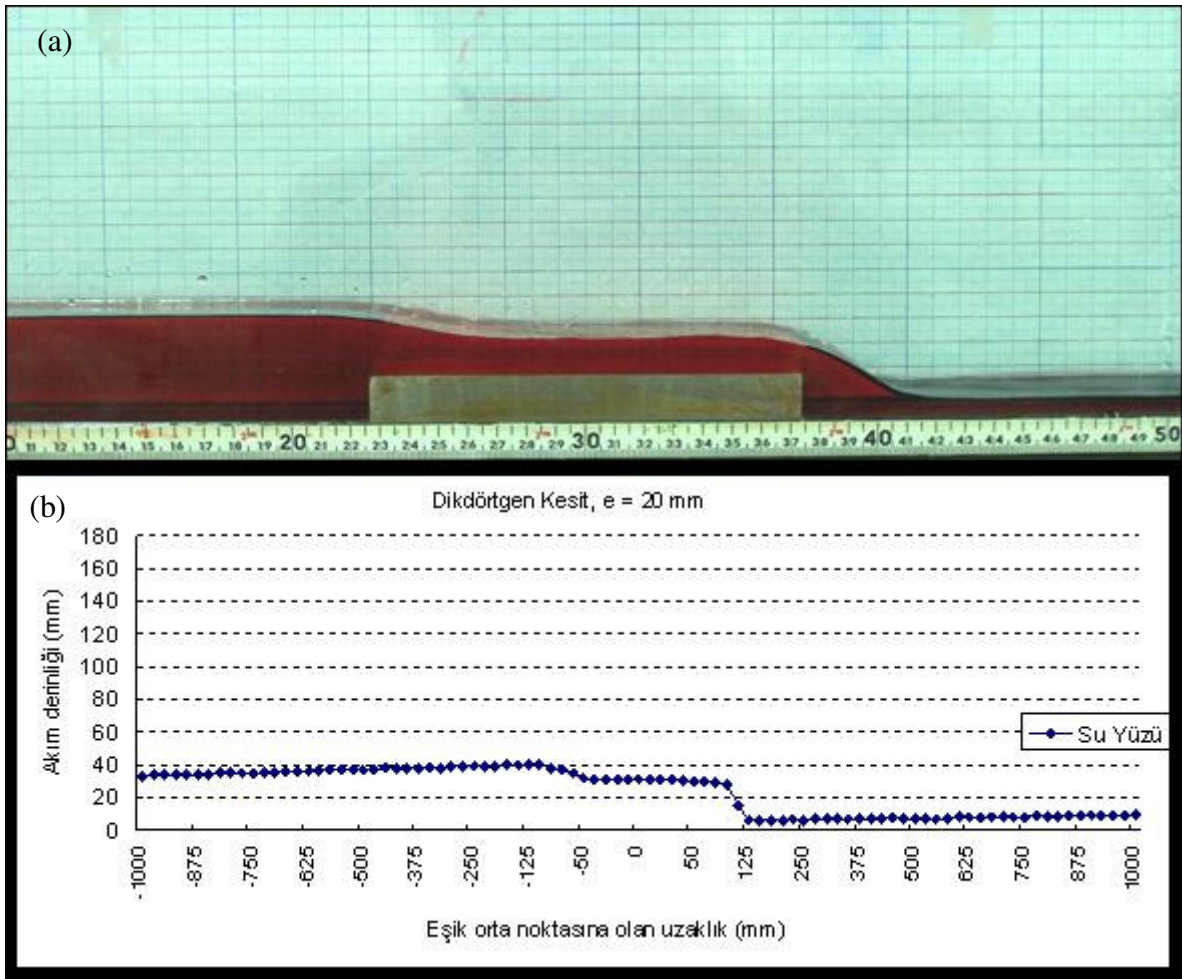


Şekil 4.9 İkizkenar yamuk kesit, $e = 60\text{ mm}$ eşik üzerindeki akım; (a) resim (b) grafik

- Dikdörge kesitli ve yüksekliği $e = 20$ mm olan eşik üzerinde gerçekleştirilen akımda (şekil 4.10), hidrolik sıçrama eşik orta noktasından $x = 3050$ mm uzaklıkta başlamakta ve $x = 1400$ mm'ye kadar gözlemlenebilmektedir. Hidrolik sıçramadan sonra maksimum kabarma derinliği eşik orta noktasına $x = 100, 125, 150, 175, 200$ mm uzaklıklarda $y_{\max} = 40$ mm olarak ölçülmüştür. Eşiğin orta noktasında derinlik $y_e = 11$ mm olarak ölçülmüştür. Kritik derinlik ise eşiğin orta noktasının membasında $x = 50$ mm de

gözlemlenmiştir. $y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ bağıntısı ile hesaplanan kritik derinlik ise 14,5mm olarak

hesaplanmıştır. Eşiğin tam orta noktasında meydana gelmesi beklenen ve 12,5 mm olarak ölçülen kritik derinliğin hesap sonucu bulunan kritik derinlikten 2,5 mm (0,0025 m) kadar düşük çıktığı görülmüştür. Bu farkın, debinin manuel olarak ölçülmesinden kaynaklanan hatadan ve ölçüm cihazının ± 1 mm olan hassasiyetinden meydan geldiği düşünölmüştür. Eşiğ giriş kesitindeki maksimum kabarma derinliğinden sonra su yüzü giderek alçalmakta, eşiğin orta noktasından önce kritik derinlikte geçmekte ve hemen bir miktar daha kabardıktan sonra parabolik olarak azalmaktadır. Kanal boyunun elverdiği son ölçüm kesitinde ise derinliğin $y_{\min} = 9$ mm olduğu gözlemlenmiştir. Akımın, eşiğ öncesi şartlarına dönmek üzere eşiğ öncesi akım şartlarındaki $y_{\text{sel}} = 11$ mm değerine ulaşması beklenmesine rağmen son ölçüm kesitinde dahi bu değer ölçölememiştir. Bununla birlikte eşiğ mansabında akım derinliklerinin giderek artığının gözlemlenmesi buna neden olan olgunun, kanal boyunun yetersiz oluşu olarak yorumlanmıştır.



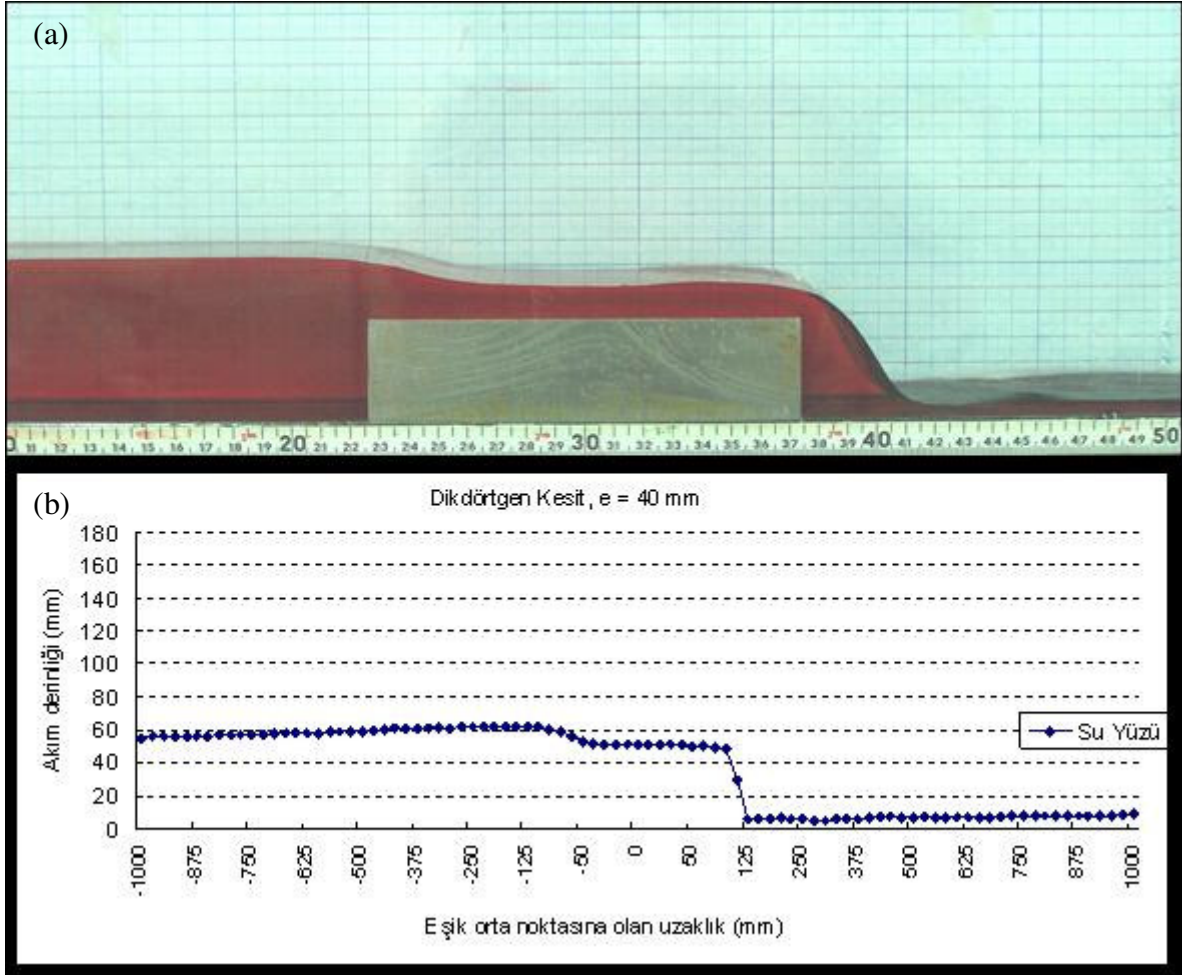
Şekil 4.10 Dikdörtgen kesit, $e = 20$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim (b) grafik

- Dikdörtgen kesitli ve yüksekliği $e = 40$ mm olan eşik üzerinde gerçekleştirilen akımda (Şekil 4.11), maksimum kabarma derinliği eşik orta noktasına $x = 100, 125, 150, 175$ mm uzaklıklarda $y_{\max} = 62$ mm olarak ölçülmüştür. Eşiğin orta noktasında derinlik $y_e = 11$ mm olarak ölçülmüştür. Kritik derinlik ise eşiğin orta noktasının membasında

$x = 40$ mm' de gözlemlenmiştir. $y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ bağıntısı ile hesaplanan kritik derinlik ise

14,5 mm olarak hesaplanmıştır. Eşiğin tam orta noktasında meydana gelmesi beklenen ve 12,5 mm olarak ölçülen kritik derinliğin hesap sonucu bulunan kritik derinlikten 2,5 mm (0,0025 m) kadar düşük çıktığı görülmüştür. Bu farkın, debinin manuel olarak ölçülmesinden kaynaklanan hatadan ve ölçüm cihazının ± 1 mm olan hassasiyetinden meydana geldiği düşünülmüştür. Eşik giriş kesitindeki maksimum kabarma deriniğinden sonra su yüzü giderek alçalmakta, eşiğin orta noktasından önce kritik derinlikte geçmekte ve hemen bir miktar daha kabardıktan sonra parabolik olarak azalmaktadır. Kanal boyunun elverdiği son ölçüm kesitinde ise derinliğin $y_{\min} = 8,5$ mm olduğu gözlemlenmiştir.

Akımın, eşik öncesi şartlarına dönmek üzere eşik öncesi akım şartlarındaki $y_{sel} = 11$ mm değerine ulaşması beklenmesine rağmen son ölçüm kesitinde dahi bu değer ölçülememiştir. Bununla birlikte eşik mansabında akım derinliklerinin giderek arttığı gözlemlenmesi buna neden olan olgunun, kanal boyunun yetersiz oluşu olarak yorumlanmıştır.



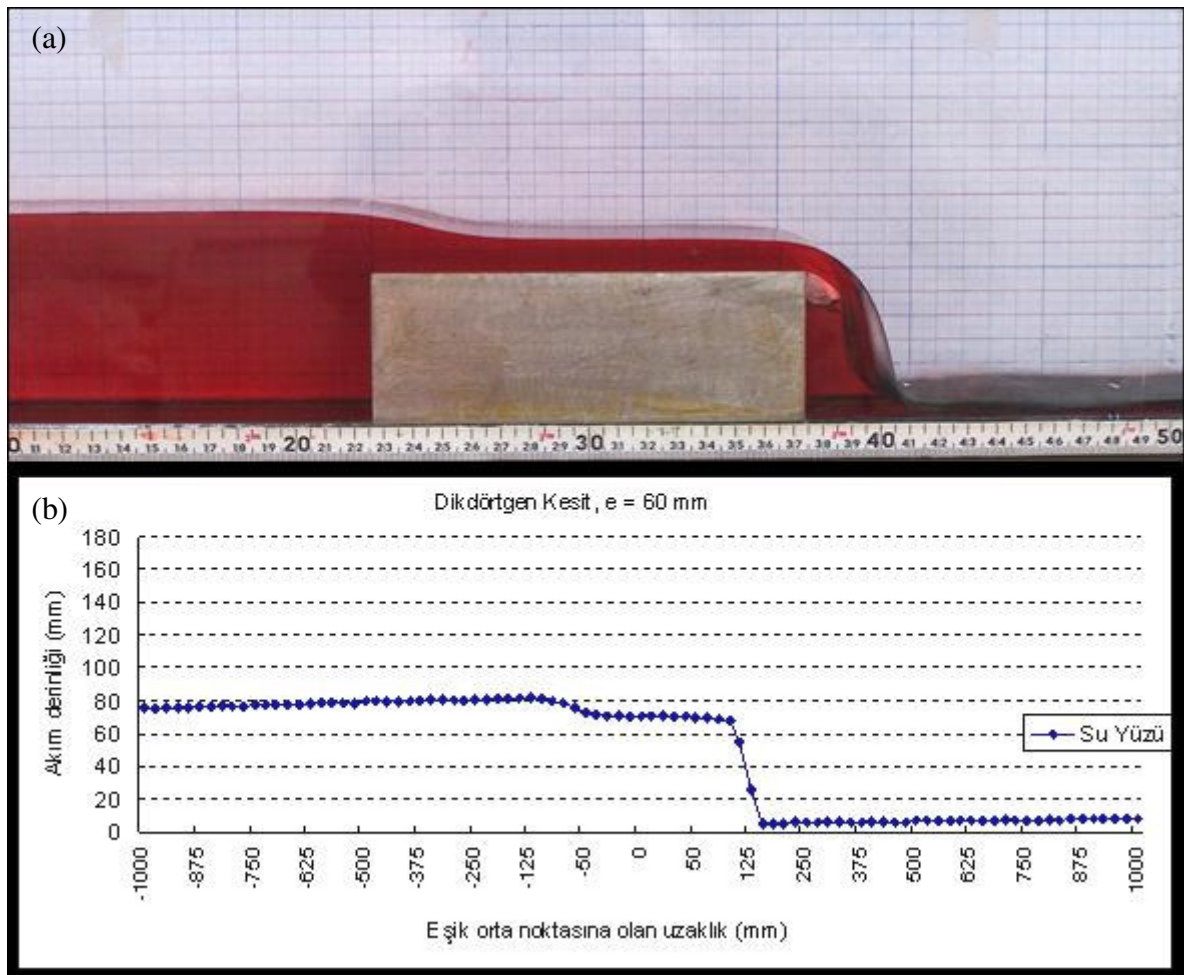
Şekil 4.11 Dikdörtgen kesit, e = 40 mm eşik üzerindeki akım; (a) resim (b) grafik

- Dikdörtgen kesitli ve yüksekliği $e = 60$ mm olan eşik üzerinde gerçekleştirilen akımda (Şekil 4.12), maksimum kabarma derinliği eşik orta noktasına $x = 100, 125, 150$ mm uzaklıklarda $y_{max} = 82$ mm olarak ölçülmüştür. Eşiğin orta noktasında derinlik $y_e = 11$ mm olarak ölçülmüştür. Kritik derinlik ise eşiğin orta noktasının membasında

$x = 50$ mm de gözlemlenmiştir. $y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ bağıntısı ile hesaplanan kritik derinlik ise 14,5

mm olarak hesaplanmıştır. Eşiğin tam orta noktasında meydana gelmesi beklenen ve 12,5 mm olarak ölçülen kritik derinliğin hesap sonucu bulunan kritik derinlikten 2,5 mm

(0,0025 m) kadar düşük çıktığı görülmüştür. Bu farkın, debinin manuel olarak ölçülmesinden kaynaklanan hatadan ve ölçüm cihazının ± 1 mm olan hassasiyetinden meydana geldiği düşünülmüştür. Eşik giriş kesitindeki maksimum kabarma deriniğinden sonra su yüzü giderek alçalmakta, eşiğin orta noktasından önce kırık derinlikte geçmekte ve hemen bir miktar daha kabardıktan sonra parabolik olarak azalmaktadır. Şekil 4.12 de de görüldüğü gibi eşiğin çıkış kesitinde hava girişi meydana gelmiştir. Kanal boyunun elverdiği son ölçüm kesitinde ise derinliğin $y_{\min} = 7,5$ mm olduğu gözlemlenmiştir. Akımın, eşik öncesi şartlarına dönmek üzere eşik öncesi akım şartlarındaki $y_{\text{sel}} = 11$ mm değerine ulaşması beklenmesine rağmen son ölçüm kesitinde dahi bu değer ölçülememiştir. Bununla birlikte eşik mansabında akım derinliklerinin giderek artığının gözlemlenmesi buna neden olan olgunun, kanal boyunun yetersiz oluşu olarak yorumlanmıştır.



Şekil 4.12 Dikdörtgen kesit, e = 60 mm eşik üzerindeki akım; (a) resim (b) grafik

5. SONUÇLAR

Çalışmada, genel çerçeve itibariyle, açık kanal akımlarında su yüzü profillerinin belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Özel olarak da yarım daire, üçgen, trapez ve dikdörtgen kesitler olmak üzere dört farklı geometrik kesite sahip taban eşiklerinin her biri için, $e = 20$ mm, $e = 40$ mm, $e = 60$ mm olmak üzere üç farklı yükseklikteki taban eşikleri için deneyler tekrarlanmıştır. Böylece, toplam 12 farklı kanal taban eğiği için, eğiğin geometrisi ve yüksekliklerinin, debi ve kanal taban eğimi sabit tutularak dikdörtgen kesitli prizmatik bir kanal akımında su yüzü profillerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Hem gözlem hem de ölçüm ve hesaplar irdelenmiş, elde edilen sonuçlar görüntü, grafik ve tablolar halinde sunulmuştur. Bu veriler, konu ile ilgilenen araştırmacıların gelecekteki çalışmalarında kullanabilecekleri formatta verilmiştir.

Bu çalışmadan ayrıca aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- i. Çalışmada; yarım daire, üçgen, trapez ve dikdörtgen kesitli üç farklı geometrideki kanal taban eşikleri kullanılmıştır. Böylece taban eğiğinin geometrisinin ani değişim bölgesinde su yüzü profiline etkisi deneysel olarak tespit edilmiştir. Yarım daire ve üçgen kesitli taban eşiklerinde maksimum kabarma derinliği, eğiğin topuk noktasında; trapez ve dikdörtgen kesitli eşiklerde ise eğiğin giriş kesitinden membaya doğru belirli bir Δx mesafesinde meydana gelmektedir. Trapez kesitin tepe genişliği küçüldükçe akımın yüzey profili üçgen eşik üzerinde oluşan profile gittikçe yaklaşmaktadır. Bunun nedeni, topukdan tepe noktasına doğru eğik yüzey çizgisinin eğiminin artmasıdır. Üçgen ve yarım daire kesitli eşiklerde kritik derinlik tam tepe noktasında meydana gelmekte ve kabarma tepe noktasına kadar devam etmektedir. Diğer iki kesitte kesite sahip eşiklerde ise kabarma topuk noktasında durmakta, kritik derinlik eğiğin üst yatay yüzeyinin orta noktasında meydana gelmekte ve bu yüzey boyunca hem nehir hem kritik hem de sel rejimleri bir arada görülmektedir. Fakat eşik üzerindeki derinlikler kritik derinlikten çok farklı değildir. Akım; dikdörtgen kesitli eşiklerde tamamen, trapez kesitli eşiklerde ise eğik yüzeyin eğiminin artmasına bağlı olarak kısmen keskin kenarlı savak akımlarında olduğu gibi eğiği terk etmektedir. Bu nedenle çoğu kez eğiğin mansap kısmında hava boşlukları ve negatif basınçların meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durum diğer iki kesit türü için gözlemlenmemiştir. Özellikle dikdörtgen kesitli

eşiklerin sonu, akımı engellemeye çalışan ikinci bir engel gibi davranmakta ve eşiğin sonlarına doğru hafif bir kabarma gözlenmektedir.

- ii.** Deneyle farklı geometriye sahip her bir eşik türü için farklı eşik yükseklikleri ile de tekrarlanmıştır. Dikdörtgen kesitli eşiklerin sonunda meydana geldiği belirtilen hafif kabarmanın özellikle eşik yüksekliği azaldıkça daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Her dört geometrideki eşiklerde eşikten sonraki akım derinliğinin, eşik yüksekliğinin artmasına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla hız ve Fr sayısı da artmaktadır. Eşiklerin taban genişliği sabit olduğundan yüksekliği arttıkça üçgen ve trapez kesitlerdeki eşik yüzeyin eğimi artmakta ve bu artışa bağlı olarak eşiğin mansaptaki topuğuna doğru derinliğin gittikçe azaldığı görülmüştür. Bu durum özellikle en düşük eşik yüksekliğine (20 mm) sahip eşiklerde tam tersine dönmektedir. Mevcut eşik yüksekliklerinin tümünde ve tüm kesit geometrilerinde batmış akım gözlenmemiştir. Ancak eşik yüksekliği arttıkça eşik sonrası sel rejimi daha belirgin hale gelmekte ve derinlik düşmektedir. Buna bağlı olarak akım, eşik öncesi şartlarına daha uzun bir mesafede dönmektedir. Yine eşik yüksekliğine bağlı olarak doğal olarak maksimum kabarma yüksekliği artmaktadır. Belirtilen son iki gözlemden, eşik yüksekliği arttıkça eşiğin memba ve mansabındaki akım derinliklerinin arasındaki fark artmaktadır. Bu durum, eşik öncesi biriktirilen potansiyel enerji ne kadar yüksek ise eşik tepe noktasından sonra kinetik enerjinin, dolayısıyla kesit ortalama akım hızının daha yüksek olacağı şeklinde mütalaa edilmiştir. Başka bir ifade ile mevcut enerjiye dönüşürken korunduğuna işaretir.

KAYNAKLAR

1. Ağırlioğlu, N.; Erkek, C., (2002), Su Kaynakları Mühendisliği, Beta Yayınevi, İstanbul.
2. Aköz, M.S.; Şeker, T.; Demirci M., (2007), *Kontrol Yapıları Arkasındaki Akımların Sayısal ve Deneysel Analizi*, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(1): 245-253.
3. Anh, T.N.; Hosoda, T., (2007), *Depth-Averaged Model of Open-Channel Flows Over an Arbitrary 3D Surface and It's Applications to Analysis of Water Surface Profile*, Journal of Hydraulic Engineering, vol.133, Issue n 4, p 350-360.
4. Aytek, A.; Toprak, Z.F., (2001), *Fresh Water-Saltwater Distribution and Freshwater Potential of Turkey*, Proc. International Symposium on Water Resources and Environmental Impact Assessment, 233-238, İstanbul.
5. Baril, G.J.; Drogin, G., (1993), *Computational Hydraulics - The Systems Approach*, Proceedings - National Conference on Hydraulic Engineering, 1993, pt 1, p 779-784, San Francisco, CA, USA.
6. Barutçuoğlu, Ş., (1999), *Açık Kanallarda Yavaş Değişen Akım Su Yüzeyi Profilleri Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
7. Birsoy, O., (2002), *Water Surface Profiles in Compound Channels*, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
8. Chiu, Chao-Lin; Isu, Emmanuel Oko, (1978), *Application of Kalman Filter to Open Channel Flow Profile Estimation*, Appl of Kalman Filter to Hydrol, Hydraul, and Water Resour, Proc of AGU (Am Geophys Union) Chapman Conf., p 441-458, Univ of Pittsburgh, Dep of Civ Eng, Stochastic Hydraul Program (Publisher) Pittsburgh, PA, USA.
9. Chow, V.T., (1959), *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill International Editions, (21st Printing 1985), New York.

10. Çengel, Y.A.; Cimbala, J.M., (2008), *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*, Güven Bilimsel, İzmir.
11. Demirel, E.; Tozluk H., (2002), *Su Yüzü Profiline Euler Metodu ile Sayısal Çözümünde Gerekli Adım Sayısının Belirlenmesi*, Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 15(1): 31-40.
12. Fread, D.L.; Harbaugh T.E., (1971), *Open channel profiles by Newton's Iteration Technique*, Journal of Hydrology, vol. 13, pp. 70-80.
13. French, R.H., (1986), *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company,.
14. Hu, W.W., (1980), *Water Surface Profile For Horseshoe Tunnel*, ASCE Transportation Engineering Journal, v 106, n 2, p 133-139.
15. İlhan, M. H., (1994), *Computation of Flow Over Vertically Curved Channels*, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
16. IPCC, (2001), *An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. This summary, approved in detail at IPCC Plenary XVIII, Wembley, United Kingdom.
17. IPCC, (2007), *The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) established by WMO and UNEP Fourth Assessment Report "Climate Change 2007"*, Paris.
18. Jain, S.C., (1993), *Nonunique Water-Surface Profiles in Open Channels*, Journal of Hydraulic Engineering, v 119, n 12, p 1427-1434.
19. Jamieson D., (1992), *Ethics, Public-Policy and Global Warming*, Science Technology & Human Values 17 (2): 139-153.
20. Karaca, M.; Şen, Ö.L., (2007) *Küresel Isınma: Gerçekler ve Belirsizlikler*, TÜBİTAK http://www.tubitak.gov.tr/home.do;jsessionid=E5835E72700CD9FAD50E141C98C23CAC?sid=0&cid=773,http://www.yerbilimleri.com/index.php?option=com_frontpage&Itemid=110.
21. Kocaman, S., (2007), *Baraj Yıkılması Probleminin Deneysel ve Teorik olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

22. Kumar, A., (1979), *Gradually Varied Surface Profiles in Horizontal and Adversely Sloping channels*, Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Part 1- Design & Construction, v 67, n pt 2, p 435-452, London.
23. Miyamoto H., (2003). *Free Surface Behaviour In Turbulent Open-Channel Flows*. Dept.Architecture and Civil Eng Kobe University Rokkodai 1-1,Nada, Kobe 657-8501, Japan.
24. Molinas, A.; Yang, C. T., (1985), *Generalized Water Surface Profile Computations*, Journal of Hydraulic Engineering, v 111, n 3, p 381-397.
25. Munson, R.B.; Young, D.F.; Okiishi, T.H., (1994), *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc..
26. Onuşluel, G., (2005), *Floodplain Management Based on The HEC-RAS Modeling System*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
27. Örsel, S. İ., (2002), *Local Losses at a Step in Sub-Critical Open Channel Flow*, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi.
28. Özcan, A., (2005), *A Computer Program for Open Channel Design*, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
29. Paine, J. N., (1992), *Open-Channel Flow Algorithm in Newton-Raphson Form*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v 118, n 2, p 306-319.
30. Ponce Victor, Lohani M. Anil, Shetty Ampar V. (2002). *New Perspective on Water-Surface Profiles Using Critical Slope*. Department of Civil and Environmental Engineering, San Diego State University, San Diego, CA 92182-1324
31. Sarker, M.A.; Rhodes, (2004), D.G., *Calculation of Free-Surface Profile Over a Rectangular Broad-Crested Weir*, Flow Measurement and Instrumentation, 15(4): 215-219.
32. Seçilir, S., (2005), *Akarsular Üzerindeki Farklı Kesitli Köprü Yapılarının Su Yüzü Profillerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

33. Seçkin, G.; Seçkin, N.O.; Ardıçlıoğlu, M.; Selek, Z., (2003), *Bir Köprü Ayağı Etrafındaki Su Yüzü Profiline Modellenmesi*, Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4(2):257-264.
34. Shearman, J.O., (1990), *User's manual for WSPRO--A computer model for water surface profile computations*, Federal Highway Administration Report FHWA-IP-89-027, 177 p.
35. Sümer, B.M.; Ünsal, İ.; Bayazit, M., (1983), *Hidrolik*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
36. White, F.M., (2004), *Fluid Mechanics*, Birinci Basım, İstanbul.
37. Wilson, E.H., (1969), *Surface Profiles in Non-Prismatic Rectangular Channels*, Water Power, v 21, n 11, p 438-43.
38. Yanmaz, A.M.; Usul, N., (2006), *Kavramsal Su Mühendisliği*, ODTÜ Bilim ve Toplum Kitapları Dizisi, Ankara.
39. Yao, K.M., (1971), *Nonuniform Flow in Flat Rectangular Channels*, ASCE J Hydraulic Div., v 97, n HY9, Paper number:8369, p 1343-8.
40. Yazıcılar, F., (1997), *Water Surface Profile Computations in Floodplain Channels*, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
41. Yen, C.; Tsai, C.T., (1979), *Computation of Flow Profile by Double Sweep Method*, Proc ASCE Eng Mech Div Spec Conf, 3rd, p 819-822, Austin, TX, USA.
42. Yüksel, Y., (2000), *Teori ve çözümlü Problemleri ile Bilgisayar Uygulamalı Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik*, Beta Yayınevi, İstanbul.
43. Zaghoul Nabil A.; Darwish A. Y., (1987), *Solution of gradually varied flow problems using the direct step method with the IBM PC Lotus 1-2-3 system*. Environmental Software, vol. 2, no. 4, pp. 199-206.

KISALTMALAR ve SİMGELER LİSTESİ

A = kanal kesit alanı

b = kanal taban genişliği

b_e = eşik taban genişliği

C = Chezy katsayısı

ζ = ıslak çevre

e = eşik yüksekliği

E = özgül enerji

E_{\min} = minimum özgül enerji

E_0 = üniform akım özgül enerjisi

f = yüzey sürtünme katsayısı

Fr = Froude sayısı

g = yerçekimi ivmesi

h_k = sürekli enerji kaybı

Δh = iki kesit arasındaki toplam yük kaybı

H = toplam yük

J = hidrolik eğim

J_c = kritik eğim

J_0 = kanal taban eğimi

L = kanal uzunluğu

L_e = eşik uzunluğu

n = Manning katsayısı

P = basınç

q = birim genişlik debisi

Q = debi

R = hidrolik yarıçap

Re = Reynolds sayısı

V = kesit ortalama akım hızı

V_c = kritik akım kesit ortalama akım hızı

V_0 = üniform akım kesit ortalama akım hızı

V_{tank} = deney kanalı ağırlıklı ölçme tankının hacmi

y = akım derinliği

y_c = kritik akım derinliği

y_e = eşik orta noktasında ölçülen akım derinliği

y_{max} = maksimum kabarma kesitinde ölçülen akım derinliği

y_{min} = minimum akım derinliği

y_{nehir} = nehir rejimi akım derinliği

y_0 = üniform akım derinliği

y_{sel} = sel rejimi akım derinliği

$y_{\text{sel-min}}$ = sel rejiminde ölçülen minimum akım derinliği

x = kanal boyunca alınan belirli uzunluk

z = kesitteki taban kotu

α = Coriolis katsayısı

β = Boussinesq katsayısı

γ = özgül ağırlık

ν = kinematik viskozite katsayısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 1.1. Boru ve açık kanal akım kesitleri; (a) boru akımı, (b) açık kanal akımı
- Şekil 1.2 Sarker ve Rhodes'un deney ve model sonuçlarının grafik gösterimi
- Şekil 2.1. Yapay açık kanallara bir örnek
- Şekil 2.2. Doğal açık kanallara bir örnek
- Şekil 2.3. Açık kanallarda iki kesit arasındaki enerji dengesi
- Şekil 2.4. Düzensiz topoğrafyaya sahip bir kanalın plan ve enkesiti
- Şekil 2.5. Bir akım yolu boyunca görülebilecek akım türleri örneği
- Şekil 2.6. Tipik açık kanal kesitlerinde hız dağılımı
- Şekil 2.7. İki farklı debi için özgül enerji- akım derinliği grafiği
- Şekil 2.8. Tipik bir ünifom akımdaki kanal kesiti
- Şekil 2.9. Diferansiyel bir akım bölümü boyunca akıma ait bazı özelliklerin değişimi
- Şekil 2.10. Kanal tabanında bir eşik olması durumu
- Şekil 2.11. Su yüzü profilleri için normal ve kritik derinliklere göre bağıl akım bölgeleri
- Şekil 3.1. Deney düzeneğinin genel görünümü
- Şekil 3.2. Deney kanalının şematik görünümü
- Şekil 3.3. Ultrasonik seviye ölçüm probu ve mekanik seviye ölçer
- Şekil 3.4. Veri dönüştürücü ve kaydedici
- Şekil 3.5. Kullanılan yazılımın ara yüzünün ölçüm esnasındaki görüntüsü
- Şekil 3.6. Yazılımın ölçüm kayıtlarına ait rapor sayfasının görünümü
- Şekil 3.7. Dikdörtgen kesitli taban eşiklerinin resim ve boyutları
- Şekil 3.8. İkizkenar üçgen kesitli taban eşiklerinin resim ve boyutları
- Şekil 3.9. İkizkenar yamuk kesitli taban eşiklerinin resim ve boyutları
- Şekil 3.10. Yarım daire kesitli taban eşiklerinin resim ve boyutları
- Şekil 3.11 Boyalı su ile gerçekleştirilen açık kanal akımı ve seviye ölçer cihazı (150x60 mm dikdörtgen kesitli taban eşiği)

Şekil 3.12 Boyalı su ile gerçekleştirilen açık kanal akımı ve seviye ölçer cihazı (150x20 mm dikdörtgen kesitli taban eşiği)

Şekil 3.13 Boyalı su ile gerçekleştirilen açık kanal akımı ve seviye ölçer cihazı (150/30/60 mm trapez kesitli taban eşiği)

Şekil 4.1. Yarım daire kesit, $e = 20$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim, (b) grafik

Şekil 4.2. Yarım daire kesit, $e = 40$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim, (b) grafik

Şekil 4.3. Yarım daire kesit, $e = 60$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim, (b) grafik

Şekil 4.4. İkizkenar üçgen, $e = 20$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim, (b) grafik

Şekil 4.5. İkizkenar üçgen, $e = 40$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim, (b) grafik

Şekil 4.6. İkizkenar üçgen, $e = 60$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim, (b) grafik

Şekil 4.7. İkizkenar yamuk, $e = 20$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim, (b) grafik

Şekil 4.8. İkizkenar yamuk, $e = 40$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim, (b) grafik

Şekil 4.9. İkizkenar yamuk, $e = 60$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim, (b) grafik

Şekil 4.10. Dikdörtgen kesit, $e = 20$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim, (b) grafik

Şekil 4.11 Dikdörtgen kesit, $e = 40$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim, (b) grafik

Şekil 4.12 Dikdörtgen kesit, $e = 60$ mm eşik üzerindeki akım; (a) resim, (b) grafik

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Akım rejimi-derinlik-hız-Froude sayısı ilişkisi

Tablo 2.2. Su yüzü profil tipleri

ÖZGEÇMİŞ

15 Ocak 1979'da Gaziantep'te doğdu. Gaziantep Mehmetçik İlkokulu'nda başlayan eğitim hayatının, orta ve lise öğrenimini Gaziantep Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra 1998 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek öğrenimine başladı. Bu bölümü 2004 yılında tamamlayarak İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2005 yılında Gaziantep'te özel sektörde kontrol mühendisi olarak iş hayatına başladı. Aynı yıl Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. 13.12.2005 tarihinde Dicle Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamasından dolayı Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans programından bilimsel hazırlık aşamasındayken ayrıldı. Halen, Dicle Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Ana Bilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak görevini sürdürmektedir.

EKLER

Ek – 1; e = 20 mm, yarım daire kesitli eşik için elde edilen akım derinlikleri

Eşik Kesit Geometrisi	Yarım Daire	
Eşik Yüksekliği (mm)	e = 20	
Akım Debisi (l/sn)	Q = 0,41177	
Kanal Taban Eğimi	$J_0 = 0,00232$	
Kanal Taban Genişliği (mm)	B = 75	
Eşik Taban Uzunluğu (mm)	$L_e = 150$	
Ortam Sıcaklığı (°C)	T ~ 30	
Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafex (mm)	Akım Derinliği y (mm)
1	-1000	30
2	-975	30
3	-950	30,5
4	-925	30,5
5	-900	31
6	-875	31
7	-850	31,5
8	-825	31,5
9	-800	31,5
10	-775	32
11	-750	32
12	-725	32
13	-700	32,5
14	-675	32,5
15	-650	33
16	-625	33
17	-600	33
18	-575	33,5
19	-550	33,5
20	-525	34
21	-500	34
22	-475	34
23	-450	34,5
24	-425	34,5
25	-400	34,5
26	-375	35
27	-350	35
28	-325	35
29	-300	35,5
30	-275	35,5
31	-250	35,5
32	-225	36
33	-200	36
34	-175	36,5
35	-150	36,5
36	-125	36,5
37	-100	37
38	-75	37
39	-50	37,5

Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafex (mm)	Akım Derinliği y (mm)
40	-25	37
41	-20	37
42	-10	35
43	0	32,5
44	10	27
45	20	20,5
46	25	15
47	50	6,5
48	75	6,5
49	100	7
50	125	8
51	150	7,5
52	175	7
53	200	7
54	225	7,5
55	250	7,5
56	275	7,5
57	300	8
58	325	8
59	350	8
60	375	7,5
61	400	7,5
62	425	8
63	450	8
64	475	8,5
65	500	8,5
66	525	8,5
67	550	8,5
68	575	8,5
69	600	9
70	625	9
71	650	9
72	675	9
73	700	9
74	725	9
75	750	9
76	775	9
77	800	9
78	825	9
79	850	9,5
80	875	9,5
81	900	9,5
82	925	9,5
83	950	9,5
84	975	9,5
85	1000	9,5

Ek – 2; e = 40 mm, yarım daire kesitli eşik için elde edilen akım derinlikleri

Eşik Kesit Geometrisi	Yarım Daire	
Eşik Yüksekliği (mm)	e = 40	
Akım Debisi (l/sn)	Q = 0,41177	
Kanal Taban Eğimi	$J_0 = 0,00232$	
Kanal Taban Genişliği (mm)	B = 75	
Eşik Taban Uzunluğu (mm)	$L_e = 150$	
Ortam Sıcaklığı (°C)	T ~ 30	
Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
1	-1000	51,5
2	-975	51,5
3	-950	52
4	-925	52
5	-900	52
6	-875	52,5
7	-850	52,5
8	-825	53
9	-800	53
10	-775	53,5
11	-750	53,5
12	-725	53,5
13	-700	54
14	-675	54
15	-650	54,5
16	-625	54,5
17	-600	55
18	-575	55
19	-550	55
20	-525	55,5
21	-500	55,5
22	-475	55,5
23	-450	56
24	-425	56
25	-400	56,5
26	-375	56,5
27	-350	56,5
28	-325	57
29	-300	57
30	-275	57
31	-250	57,5
32	-225	57,5
33	-200	57,5
34	-175	58
35	-150	58
36	-125	58
37	-100	58
38	-75	58,5
39	-70	58,5
40	-60	58,5
41	-50	58,5
42	-40	59

Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
43	-30	58
44	-20	57
45	-10	55
46	0	52,5
47	10	49
48	20	44,5
49	30	36
50	40	24
51	50	10
52	60	8
53	70	7
54	75	6
55	100	5
56	125	6
57	150	8
58	175	7,5
59	200	6
60	225	4,5
61	250	4,5
62	275	5
63	300	5
64	325	6
65	350	6,5
66	375	7,5
67	400	8
68	425	7,5
69	450	6
70	475	6
71	500	5,5
72	525	6
73	550	7
74	575	7,5
75	600	8
76	625	8
77	650	7,5
78	675	7
79	700	7
80	725	7
81	750	8
82	775	8,5
83	800	8,5
84	825	7,5
85	850	7,5
86	875	7,5
87	900	7,5
88	925	8,5
89	950	9
90	975	9
91	1000	8,5

Ek – 3; e = 60 mm, yarım daire kesitli eşik için elde edilen akım derinlikleri

Eşik Kesit Geometrisi	Yarım Daire	
Eşik Yüksekliği (mm)	e = 60	
Akım Debisi (l/sn)	Q = 0,41177	
Kanal Taban Eğimi	J ₀ = 0,00232	
Kanal Taban Genişliği (mm)	B = 75	
Eşik Taban Uzunluğu (mm)	L _e = 150	
Ortam Sıcaklığı (°C)	T ~ 30	
Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
1	-1000	72,5
2	-975	73
3	-950	73
4	-925	73
5	-900	73,5
6	-875	73,5
7	-850	73,5
8	-825	74
9	-800	74
10	-775	74,5
11	-750	74,5
12	-725	74,5
13	-700	75
14	-675	75
15	-650	75
16	-625	75,5
17	-600	75,5
18	-575	75,5
19	-550	76
20	-525	76
21	-500	76,5
22	-475	76,5
23	-450	77
24	-425	77
25	-400	77
26	-375	77,5
27	-350	77,5
28	-325	77,5
29	-300	78
30	-275	78
31	-250	78
32	-225	78,5
33	-200	78,5
34	-175	78,5
35	-150	79
36	-125	79
37	-100	79,5
38	-75	79,5
39	-60	79,5
40	-50	79
41	-40	79
42	-30	78

Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
43	-20	77
44	-10	75,5
45	0	72,5
46	10	70
47	20	67
48	30	61
49	40	54,5
50	50	44,5
51	60	26,5
52	75	6,5
53	100	4,5
54	125	4,5
55	150	5
56	175	5,5
57	200	5,5
58	225	5,5
59	250	5
60	275	5
61	300	5
62	325	5
63	350	5,5
64	375	5,5
65	400	5,5
66	425	6
67	450	6,5
68	475	6,5
69	500	6,5
70	525	6,5
71	550	6
72	575	6
73	600	6
74	625	6,5
75	650	7
76	675	7,5
77	700	7,5
78	725	7,5
79	750	7,5
80	775	7
81	800	7
82	825	7,5
83	850	7,5
84	875	8
85	900	8
86	925	8
87	950	8
88	975	8
89	1000	8

Ek – 4; e = 20 mm, ikizkenar üçgen kesitli eşik için elde edilen akım derinlikleri

Eşik Kesit Geometrisi	İkizkenar Üçgen	
Eşik Yüksekliği (mm)	e = 20	
Akım Debisi (l/sn)	Q = 0,41177	
Kanal Taban Eğimi	$J_0 = 0,00232$	
Kanal Taban Genişliği (mm)	B = 75	
Eşik Taban Uzunluğu (mm)	$L_e = 150$	
Ortam Sıcaklığı (°C)	T ~ 30	
Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
1	-1000	29,5
2	-975	30
3	-950	30
4	-925	30,5
5	-900	31
6	-875	31
7	-850	31,5
8	-825	31,5
9	-800	31,5
10	-775	32
11	-750	32
12	-725	32,5
13	-700	32,5
14	-675	33
15	-650	33
16	-625	33
17	-600	33,5
18	-575	33,5
19	-550	34
20	-525	34
21	-500	34
22	-475	34,5
23	-450	34,5
24	-425	34,5
25	-400	35
26	-375	35
27	-350	35
28	-325	35
29	-300	35,5
30	-275	35,5
31	-250	35,5
32	-225	36
33	-200	36
34	-175	36,5
35	-150	36,5
36	-125	37
37	-100	37
38	-75	37
39	-70	36,5
40	-60	36,5
41	-50	36
42	-40	36

Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
43	-30	35,5
44	-20	35
45	-10	34
46	0	32,5
47	10	29
48	20	25
49	30	21
50	40	18
51	50	15
52	60	12
53	70	9,5
54	75	8
55	100	6
56	125	6,5
57	150	6,5
58	175	6,5
59	200	6,5
60	225	6,5
61	250	6,5
62	275	6,5
63	300	6,5
64	325	7
65	350	7
66	375	7
67	400	7
68	425	7
69	450	7
70	475	7
71	500	7,5
72	525	7,5
73	550	7,5
74	575	7,5
75	600	7,5
76	625	8
77	650	8
78	675	8
79	700	8
80	725	8
81	750	8
82	775	8
83	800	8
84	825	8,5
85	850	8,5
86	875	8,5
87	900	8,5
88	925	8,5
89	950	8,5
90	975	9
91	1000	9

Ek – 5; e = 40 mm, ikizkenar üçgen kesitli eşik için elde edilen akım derinlikleri

Eşik Kesit Geometrisi	İkizkenar Üçgen	
Eşik Yüksekliği (mm)	e = 40	
Akım Debisi (l/sn)	Q = 0,41177	
Kanal Taban Eğimi	$J_0 = 0,00232$	
Kanal Taban Genişliği (mm)	B = 75	
Eşik Taban Uzunluğu (mm)	$L_e = 150$	
Ortam Sıcaklığı (°C)	T ~ 30	
Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
1	-1000	48
2	-975	48,5
3	-950	48,5
4	-925	49
5	-900	49
6	-875	49
7	-850	49,5
8	-825	49,5
9	-800	49,5
10	-775	50
11	-750	50
12	-725	50,5
13	-700	50,5
14	-675	51
15	-650	51
16	-625	51
17	-600	51,5
18	-575	51,5
19	-550	51,5
20	-525	52
21	-500	52
22	-475	52,5
23	-450	52,5
24	-425	53
25	-400	53
26	-375	53
27	-350	53,5
28	-325	53,5
29	-300	53,5
30	-275	54
31	-250	54
32	-225	54,5
33	-200	54,5
34	-175	54,5
35	-150	55
36	-125	55
37	-100	55
38	-75	55
39	-70	55
40	-60	55
41	-50	55
42	-40	55

Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
43	-30	55
44	-20	54
45	-10	52,5
46	0	50,5
47	10	45
48	20	38
49	30	31
50	40	25
51	50	20
52	60	14
53	70	9
54	75	7
55	100	5
56	125	6
57	150	6
58	175	6
59	200	6
60	225	6
61	250	6
62	275	6
63	300	6
64	325	7
65	350	7
66	375	7
67	400	7
68	425	7
69	450	7
70	475	7
71	500	7
72	525	7
73	550	7
74	575	7,5
75	600	7,5
76	625	7,5
77	650	7,5
78	675	7,5
79	700	7,5
80	725	7,5
81	750	8
82	775	8
83	800	8
84	825	8
85	850	8
86	875	8
87	900	8
88	925	8,5
89	950	8,5
90	975	8,5
91	1000	8,5

Ek – 6; e = 60 mm, ikizkenar üçgen kesitli eşik için elde edilen akım derinlikleri

Eşik Kesit Geometrisi	İkizkenar Üçgen	
Eşik Yüksekliği (mm)	e = 60	
Akım Debisi (l/sn)	Q = 0,41177	
Kanal Taban Eğimi	J ₀ = 0,00232	
Kanal Taban Genişliği (mm)	B = 75	
Eşik Taban Uzunluğu (mm)	L _e = 150	
Ortam Sıcaklığı (°C)	T ~ 30	
Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
1	-1000	68,5
2	-975	68,5
3	-950	69
4	-925	69
5	-900	69
6	-875	69
7	-850	69,5
8	-825	69,5
9	-800	69,5
10	-775	70
11	-750	70
12	-725	70,5
13	-700	70,5
14	-675	71
15	-650	71
16	-625	71,5
17	-600	71,5
18	-575	71,5
19	-550	72
20	-525	72
21	-500	72,5
22	-475	72,5
23	-450	72,5
24	-425	73
25	-400	73
26	-375	73
27	-350	73,5
28	-325	73,5
29	-300	74
30	-275	74
31	-250	74
32	-225	74,5
33	-200	74,5
34	-175	74,5
35	-150	74,5
36	-125	75
37	-100	75
38	-75	75
39	-70	75
40	-60	75
41	-50	75,5
42	-40	75,5

Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
43	-30	75
44	-20	74,5
45	-10	74
46	0	71
47	10	65,5
48	20	54,5
49	30	43
50	40	35
51	50	27,5
52	60	17,5
53	70	9
54	75	7
55	100	4,5
56	125	4,5
57	150	5
58	175	5
59	200	5
60	225	5,5
61	250	5
62	275	5,5
63	300	5,5
64	325	5,5
65	350	5,5
66	375	5,5
67	400	5,5
68	425	6
69	450	6
70	475	6,5
71	500	6,5
72	525	6,5
73	550	6,5
74	575	6,5
75	600	6,5
76	625	7
77	650	6,5
78	675	7
79	700	7
80	725	7,5
81	750	7,5
82	775	7
83	800	7
84	825	7
85	850	7,5
86	875	7,5
87	900	7,5
88	925	7,5
89	950	7,5
90	975	7,5
91	1000	7,5

Ek – 7; e = 20 mm, ikizkenar yamuk kesitli eşik için elde edilen akım derinlikleri

Eşik Kesit Geometrisi	İkizkenar Yamuk	
Eşik Yüksekliği (mm)	e = 20	
Akım Debisi (l/sn)	Q = 0,41177	
Kanal Taban Eğimi	$J_0 = 0,00232$	
Kanal Taban Genişliği (mm)	B = 75	
Eşik Taban Uzunluğu (mm)	$L_e = 150$	
Ortam Sıcaklığı (°C)	T ~ 30	
Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
1	-1000	34
2	-975	34,5
3	-950	34,5
4	-925	34,5
5	-900	35
6	-875	35
7	-850	35,5
8	-825	35,5
9	-800	35,5
10	-775	36
11	-750	36
12	-725	36,5
13	-700	36,5
14	-675	37
15	-650	37
16	-625	37,5
17	-600	37,5
18	-575	37,5
19	-550	38
20	-525	38
21	-500	38
22	-475	38
23	-450	38,5
24	-425	38,5
25	-400	38,5
26	-375	38,5
27	-350	39
28	-325	39
29	-300	39,5
30	-275	39,5
31	-250	40
32	-225	40
33	-200	40,5
34	-175	40,5
35	-150	41
36	-125	41
37	-100	41
38	-75	41
39	-70	40
40	-60	39,5
41	-50	39
42	-40	37

Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
43	-30	35
44	-20	34
45	-10	33
46	0	32,5
47	10	32
48	20	32
49	30	32
50	40	31,5
51	50	30
52	60	29
53	70	22
54	75	19
55	100	7,5
56	125	7
57	150	6,5
58	175	6,5
59	200	7
60	225	7
61	250	7,5
62	275	8
63	300	8
64	325	7
65	350	7
66	375	7
67	400	8
68	425	8
69	450	8
70	475	8
71	500	8
72	525	8
73	550	8,5
74	575	8,5
75	600	9
76	625	9
77	650	8,5
78	675	9
79	700	9
80	725	9
81	750	9
82	775	9
83	800	9
84	825	9
85	850	9
86	875	9,5
87	900	9,5
88	925	9,5
89	950	9,5
90	975	9,5
91	1000	10

Ek – 8; e = 40 mm, ikizkenar yamuk kesitli eşik için elde edilen akım derinlikleri

Eşik Kesit Geometrisi	İkizkenar Yamuk	
Eşik Yüksekliği (mm)	e = 40	
Akım Debisi (l/sn)	Q = 0,41177	
Kanal Taban Eğimi	J ₀ = 0, 00232	
Kanal Taban Genişliği (mm)	B = 75	
Eşik Taban Uzunluğu (mm)	L _e = 150	
Ortam Sıcaklığı (°C)	T ~ 30	
Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
1	-1000	54
2	-975	54,5
3	-950	54,5
4	-925	55
5	-900	55
6	-875	55
7	-850	55,5
8	-825	55,5
9	-800	56
10	-775	56
11	-750	56
12	-725	56,5
13	-700	56,5
14	-675	56,5
15	-650	57
16	-625	57
17	-600	57
18	-575	57,5
19	-550	57,5
20	-525	57,5
21	-500	58
22	-475	58
23	-450	58,5
24	-425	58,5
25	-400	59
26	-375	59
27	-350	59
28	-325	59,5
29	-300	59,5
30	-275	59,5
31	-250	60
32	-225	60
33	-200	60
34	-175	60,5
35	-150	60,5
36	-125	60,5
37	-100	61
38	-75	61,5
39	-70	61
40	-60	61
41	-50	60,5
42	-40	59,5

Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
43	-30	57,5
44	-20	55
45	-10	54
46	0	52,5
47	10	52
48	20	51
49	30	49,5
50	40	45,5
51	50	36
52	60	24
53	70	14
54	75	9
55	100	5
56	125	5
57	150	5
58	175	5,5
59	200	6
60	225	5,5
61	250	5
62	275	5
63	300	6
64	325	6,5
65	350	6
66	375	6
67	400	6
68	425	6,5
69	450	6,5
70	475	7
71	500	7
72	525	7
73	550	7
74	575	7
75	600	7
76	625	7
77	650	7
78	675	7
79	700	7,5
80	725	7,5
81	750	7,5
82	775	7,5
83	800	7,5
84	825	7,5
85	850	7,5
86	875	8
87	900	8
88	925	8
89	950	8
90	975	8
91	1000	8

Ek – 9; e = 60 mm, ikizkenar yamuk kesitli eşik için elde edilen akım derinlikleri

Eşik Kesit Geometrisi	İkizkenar Yamuk	
Eşik Yüksekliği (mm)	e = 60	
Akım Debisi (l/sn)	Q = 0,41177	
Kanal Taban Eğimi	$J_0 = 0,00232$	
Kanal Taban Genişliği (mm)	B = 75	
Eşik Taban Uzunluğu (mm)	$L_e = 150$	
Ortam Sıcaklığı (°C)	T ~ 30	
Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
1	-1000	72,5
2	-975	72,5
3	-950	73
4	-925	73
5	-900	73,5
6	-875	73,5
7	-850	73,5
8	-825	74
9	-800	74
10	-775	74,5
11	-750	74,5
12	-725	74,5
13	-700	74,5
14	-675	75
15	-650	75
16	-625	75,5
17	-600	75,5
18	-575	75,5
19	-550	76
20	-525	76
21	-500	76,5
22	-475	76,5
23	-450	76,5
24	-425	77
25	-400	77
26	-375	77,5
27	-350	77,5
28	-325	77,5
29	-300	78
30	-275	78
31	-250	78,5
32	-225	78,5
33	-200	78,5
34	-175	79
35	-150	79
36	-125	79
37	-100	79,5
38	-75	79,5
39	-70	79,5
40	-60	79,5
41	-50	79,5
42	-40	79

Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
43	-30	78,5
44	-20	77
45	-10	75
46	0	72,5
47	10	70,5
48	20	67
49	30	58,5
50	40	46
51	50	34
52	60	23,5
53	70	13,5
54	75	8
55	100	4,5
56	125	4,5
57	150	5
58	175	5,5
59	200	5,5
60	225	5,5
61	250	5
62	275	5
63	300	5
64	325	5
65	350	5
66	375	5,5
67	400	5,5
68	425	5,5
69	450	6
70	475	6,5
71	500	6,5
72	525	6,5
73	550	6,5
74	575	6,5
75	600	6,5
76	625	6,5
77	650	6,5
78	675	7
79	700	7
80	725	7
81	750	7
82	775	7
83	800	7
84	825	7
85	850	7
86	875	7,5
87	900	7,5
88	925	7,5
89	950	7,5
90	975	7,5
91	1000	7,5

Ek – 10; e = 20 mm, dikdörtgen kesitli eşik için elde edilen akım derinlikleri

Eşik Kesit Geometrisi	Dikdörtgen	
Eşik Yüksekliği (mm)	e = 20	
Akım Debisi (l/sn)	Q = 0,41177	
Kanal Taban Eğimi	J ₀ = 0,00232	
Kanal Taban Genişliği (mm)	B = 75	
Eşik Taban Uzunluğu (mm)	L _e = 150	
Ortam Sıcaklığı (°C)	T ~ 30	
Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
1	-1000	33,5
2	-975	34
3	-950	34
4	-925	34
5	-900	34,5
6	-875	34,5
7	-850	34,5
8	-825	35
9	-800	35
10	-775	35,5
11	-750	35,5
12	-725	35,5
13	-700	35,5
14	-675	36
15	-650	36
16	-625	36,5
17	-600	36,5
18	-575	37
19	-550	37
20	-525	37
21	-500	37,5
22	-475	37,5
23	-450	38
24	-425	38
25	-400	38
26	-375	38,5
27	-350	38,5
28	-325	38,5
29	-300	39
30	-275	39
31	-250	39,5
32	-225	39,5
33	-200	39,5
34	-175	40
35	-150	40
36	-125	40
37	-100	40
38	-75	38
39	-70	37
40	-60	35
41	-50	32
42	-40	31,5

Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
43	-30	31
44	-20	31
45	-10	31
46	0	31
47	10	31
48	20	31
49	30	31
50	40	30,5
51	50	30
52	60	30
53	70	29
54	75	28
55	100	15
56	125	6
57	150	6
58	175	6
59	200	6,5
60	225	7
61	250	6,5
62	275	7
63	300	7
64	325	7
65	350	7
66	375	7
67	400	7,5
68	425	7,5
69	450	8
70	475	7,5
71	500	7,5
72	525	7,5
73	550	7,5
74	575	7,5
75	600	8
76	625	8
77	650	8
78	675	8
79	700	8,5
80	725	8,5
81	750	8,5
82	775	9
83	800	8,5
84	825	8,5
85	850	9
86	875	9
87	900	9
88	925	9
89	950	9
90	975	9
91	1000	9

Ek – 11; e = 40 mm, dikdörtgen kesitli eşik için elde edilen akım derinlikleri

Eşik Kesit Geometrisi	Dikdörtgen	
Eşik Yüksekliği (mm)	e = 40	
Akım Debisi (l/sn)	Q = 0,41177	
Kanal Taban Eğimi	J ₀ = 0, 00232	
Kanal Taban Genişliği (mm)	B = 75	
Eşik Taban Uzunluğu (mm)	L _e = 150	
Ortam Sıcaklığı (°C)	T ~ 30	
Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
1	-1000	55,5
2	-975	56
3	-950	56
4	-925	56,5
5	-900	56,5
6	-875	56,5
7	-850	56,5
8	-825	57
9	-800	57
10	-775	57,5
11	-750	57,5
12	-725	57,5
13	-700	58
14	-675	58
15	-650	58
16	-625	58,5
17	-600	58,5
18	-575	59
19	-550	59
20	-525	59,5
21	-500	59,5
22	-475	60
23	-450	60
24	-425	60,5
25	-400	60,5
26	-375	60,5
27	-350	61
28	-325	61
29	-300	61
30	-275	61,5
31	-250	61,5
32	-225	61,5
33	-200	61,5
34	-175	62
35	-150	62
36	-125	62
37	-100	62
38	-75	60
39	-70	59
40	-60	56,5
41	-50	53,5
42	-40	52,5

Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
43	-30	51,5
44	-20	51
45	-10	51
46	0	51
47	10	51,5
48	20	51,5
49	30	51
50	40	51
51	50	50,5
52	60	50,5
53	70	49,5
54	75	48
55	100	30
56	125	5,5
57	150	5,5
58	175	6
59	200	6,5
60	225	6
61	250	6
62	275	5
63	300	5
64	325	6
65	350	6
66	375	6
67	400	7
68	425	7
69	450	8
70	475	7
71	500	7
72	525	7
73	550	7
74	575	7
75	600	7
76	625	7
77	650	7
78	675	7
79	700	7
80	725	7,5
81	750	7,5
82	775	7,5
83	800	8
84	825	8
85	850	8
86	875	8
87	900	8
88	925	8
89	950	8
90	975	8,5
91	1000	8,5

Ek – 10; e = 60 mm, dikdörtgen kesitli eşik için elde edilen akım derinlikleri

Eşik Kesit Geometrisi	Dikdörtgen	
Eşik Yüksekliği (mm)	e = 60	
Akım Debisi (l/sn)	Q = 0,41177	
Kanal Taban Eğimi	$J_0 = 0,00232$	
Kanal Taban Genişliği (mm)	B = 75	
Eşik Taban Uzunluğu (mm)	$L_e = 150$	
Ortam Sıcaklığı (°C)	T ~ 30	
Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
1	-1000	75,5
2	-975	75,5
3	-950	75,5
4	-925	76
5	-900	76
6	-875	76,5
7	-850	76,5
8	-825	77
9	-800	77
10	-775	77
11	-750	77,5
12	-725	77,5
13	-700	77,5
14	-675	78
15	-650	78
16	-625	78,5
17	-600	78,5
18	-575	78,5
19	-550	79
20	-525	79
21	-500	79,5
22	-475	79,5
23	-450	79,5
24	-425	80
25	-400	80
26	-375	80,5
27	-350	80,5
28	-325	80,5
29	-300	80,5
30	-275	81
31	-250	81
32	-225	81
33	-200	81,5
34	-175	81,5
35	-150	82
36	-125	82
37	-100	82
38	-75	80
39	-70	79
40	-60	76
41	-50	72,5
42	-40	72

Nokta No	Eşik Orta Noktasına Olan Mesafe, x (mm)	Akım Derinliği y (mm)
43	-30	70,5
44	-20	70,5
45	-10	70,5
46	0	71
47	10	71
48	20	71
49	30	71
50	40	70,5
51	50	70
52	60	69,5
53	70	69
54	75	68
55	100	55
56	125	26
57	150	5
58	175	5
59	200	5
60	225	6
61	250	6
62	275	6
63	300	6
64	325	6
65	350	6
66	375	6
67	400	6
68	425	6
69	450	6
70	475	6
71	500	7
72	525	7
73	550	6,5
74	575	6,5
75	600	6,5
76	625	6,5
77	650	6,5
78	675	7
79	700	7
80	725	7
81	750	7
82	775	7
83	800	7
84	825	7
85	850	7,5
86	875	7,5
87	900	7,5
88	925	7,5
89	950	7,5
90	975	7,5
91	1000	7,5