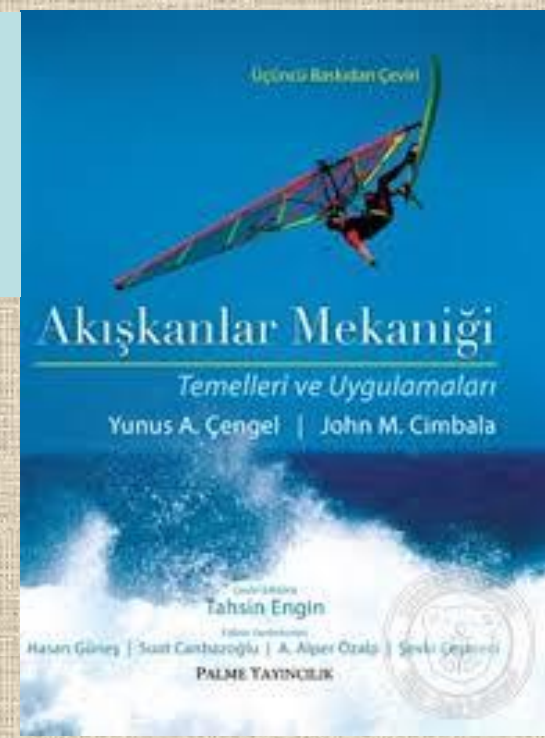


Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları
3'üncü Baskıdan Çeviri
Yunus A. Cengel, John M. Cimbala
McGraw-Hill, 2014



Bölüm 13

AÇIK KANAL AKIŞI

İngilizce orijinal sunum esas alınarak
Tahsin Engin, Hasan Güneş, A. Alper Özalp ve Suat Canbazoğlu
tarafından hazırlanmıştır.



Serbest yüzeyli olan herhangi bir sıvı akışı bir açık kanal akış türüdür.
Fotoğraf kuzey Avustralya'yı boylu boyunca dolanan Nicholson nehrine aittir.

Öğrenim Amaçları

- Açık kanallardaki akış ile borulardaki basınçlı akış arasındaki farkı anlayabilmelidir.
- Açık kanallardaki farklı akış rejimlerini ve bunların tipik özelliklerini öğrenebilmelidir.
- Akışta hidrolik sıçramanın görülüp görülmeyeceğini öngörebilmeli ve hidrolik sıçramada kaybolan enerjiyi hesaplayabilmelidir.
- Açık kanallarda kayar (sürgü) kapaklar ve savaklar kullanarak hacimsel debinin nasıl ölçüleceğini öğrenebilmelidir.

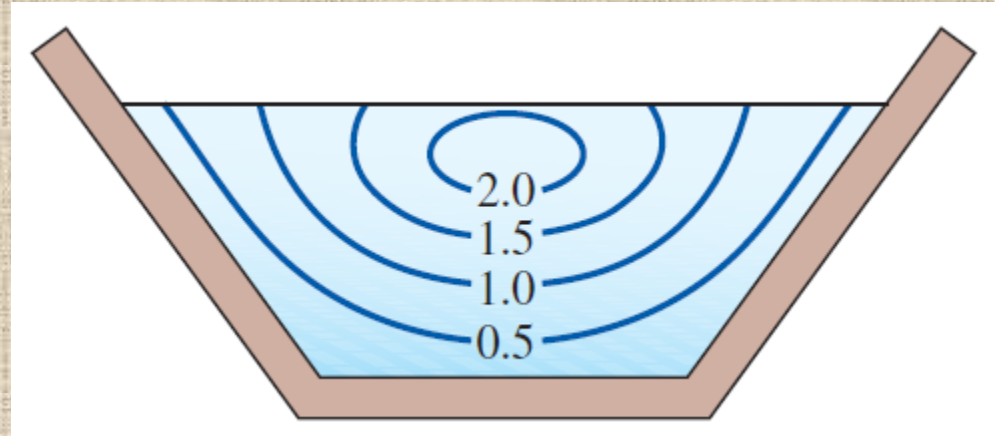
13-1 ■ AÇIK KANAL AKIŞLARININ SINIFLANDIRILMASI

Açık Kanal Akışı: Açık kanal akışı, sıvıların atmosfere açık kanallarda ya da kısmen dolu borulardaki akışıdır ve *serbest yüzey* olarak adlandırılan bir sıvı-gaz ara yüzeyinin varlığı ayırıcı bir niteliktir.

Örnekler: Pratikte karşılaşılan doğal akışların çoğu, örneğin *suyun dereler, nehirler ve taşkınlardaki akışı ile yağmur suyunun ana yollar, araç park alanları ve çatılardan uzaklaştırılması* birer açık kanal akışıdır.

İnsan yapısı açık kanal akış sistemleri olan; sulama kanalları, kanalizasyonlar, drenaj kanalları ve yol kenarlarındaki yağmur kanalları ve benzerlerinin tasarımı mühendisliğin önemli bir uygulama alanıdır.

Bir açık kanalda yan ve alt yüzeylerdeki akış hızı, kaymazlık şartından dolayı sıfırdır ve simetrik geometriler için serbest yüzeyin orta düzleminde tipik olarak serbest yüzeyin biraz altında en yüksek değerini alır.



Trapez en-kesitli bir açık kanaldaki tipik sabit eksenel hız eğrileri (değerler ortalama hıza göredir).

Açık kanallardaki hız dağılımı (ve dolayısıyla akış) genellikle üç-boyutludur. Bununla birlikte, mühendislik uygulamalarında denklemler, kanalın bir en-kesitindeki ortalama hıza göre yazılır. Ortalama hız sadece akım yönünde x ile değiştiğinden, V **bir-boyutlu** bir değişkendir.

Bu bölümün kapsamı bir-boyutlu ortalama hız ile tanımlanabilen akışlarla sınırlandırılmıştır.

Bir-boyutlu denklemler basit olmalarına rağmen bir hayli doğru sonuç verir ve uygulamada yaygın olarak kullanılır.

Kanal çeperlerindeki kaymazlık şartı, hız gradyenini artırır ve ıslak yüzeylerde kayma gerilmesi oluşur.

Belirli bir en-kesitteki kayma gerilmesi ıslak çevre boyunca değişir ve akışa karşı direnç gösterir.

Bu direncin büyüklüğü, sıvının viskozitesine bağlı olduğu kadar çeper yüzeyindeki hız gradyenine ve yüzey pürüzlülüğüne de bağlıdır.

Açık kanal akışları daimi ya da daimi olmayan akışlar şeklinde de sınıflandırılabilir. Belirli bir konumda zamana bağlı bir değişim yoksa, akışın daimi olduğu söylenebilir. Açık kanal akışlarını tanımlayan büyüklük, kanal boyunca değişebilen **akış derinliğidir** (ya da alternatif olarak ortalama hızdır). Kanal boyunca belirli bir yerdeki akış derinliği zamanla değişmiyorsa (her ne kadar bir yerden diğerine değişse de) akışın *daimi* olduğu söylenebilir. Aksi takdirde akış *daimi değildir*.

Bu bölümde sadece **daimi** akış incelenecektir.

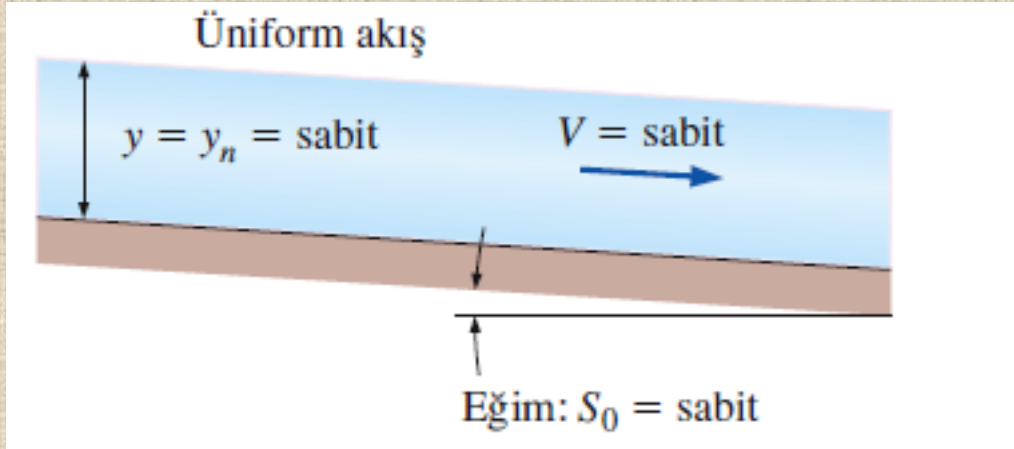
Üniform ve Üniform Olmayan (Değişen) Akışlar

Üniform Akış: Eğer akış derinliği (ve dolayısıyla ortalama hız) sabit kalıyorsa kanaldaki akışın üniform olduğu söylenebilir.

Üniform Olmayan Akış veya **Değişen Akış:** Akış derinliğinin akış yönünde değiştiği akıştır.

Pratikte üniform akış şartları ile çoğunlukla kanalların sabit eğimli ve sabit en-kesitli ve pürüzlüğünün değişmediği uzun düz bölümlerinde yaygın olarak karşılaşılır.

Açık kanal akışlarının önemli bir karakteristik büyüklüğü olan akış derinliği, üniform akışlarda **normal derinlik y_n** olarak adlandırılır.



Bir açık kanaldaki üniform akışta, akış derinliği y ve ortalama akış hızı V sabit kalır.

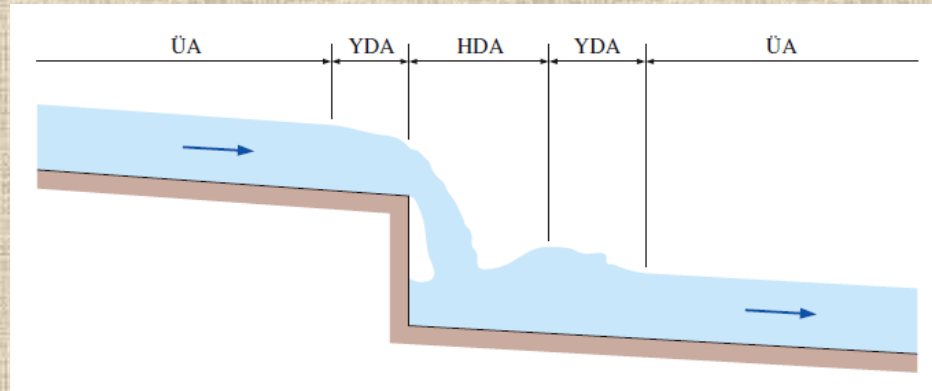
Kanalda, kapak gibi bir engelin bulunması veya eğim ya da en-kesitin değişmesi akış derinliğinin değişmesine neden olur ve dolayısıyla akış **değişen** ya da **üniform olmayan** bir hal alır.

Bu tür değişen akışlar; nehirler, sulama sistemleri ve kanalizasyon hatları gibi doğal ya da insan yapısı kanallarda yaygın olarak görülür.

Hızlı Değişen Akış (HDA): Eğer akış derinliği, akış yönünde bağıl olarak kısa bir mesafede (kısmen açık bir kapağın altından geçen su akımında ya da serbest dökülme (düşme) halindeki bir su akımında olduğu gibi) önemli ölçüde değişiyorsa değişen akış, hızlı değişen akış (HDA) olarak adlandırılır,

Yavaş Değişen Akış (YDA): Eğer akış derinliği kanal boyunca uzun bir mesafede yavaşça değişiyorsa değişen akış, yavaş değişen akış (YDA) olarak adlandırılır.

Yavaş değişen akış bölgesi, genellikle hızlı değişen akış ile üniform akış bölgelerinin arasında bulunur.



Bir açık kanaldaki üniform akış (ÜA), yavaş değişen akış (YDA) ve hızlı değişen akış (HDA) bölgeleri.

Kanallarda Laminer ve Türbülanslı Akışlar

Boru akışları gibi açık kanal akışları da Reynolds sayısına bağlı olarak; laminer, türbülanslı ya da geçiş akışı olabilir ve burada **Reynolds sayısı**,

$$Re = \frac{\rho V R_h}{\mu} = \frac{V R_h}{\nu}$$

V : ortalama sıvı hızı

ν : sıvının kinematik viskozitesi

R_h : **hidrolik yarıçap**

Hidrolik yarıçap:

$$R_h = \frac{A_c}{p} \quad (\text{m})$$

Hidrolik çap:

$$D_h = \frac{4A_c}{p} = 4R_h$$

Laminer Akış: $Re \leq 500$, Türbülanslı Akış: $Re \geq 2500$ ve Geçiş Akışı: $500 \leq Re \leq 2500$

Laminer akış, ince bir su tabakasının (yağmur suyunun yoldan ya da park alanında uzaklaştırılmasında olduğu gibi) düşük hızlı akışında görülür.



Hidrolik yarıçap ile hidrolik çap arasındaki ilişki beklediğiniz gibi değildir.

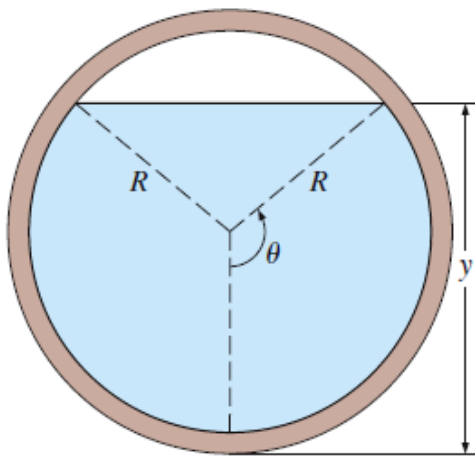
Açık kanallardaki su akışında Reynolds sayısı tipik olarak 50000'in üzerindedir ve dolayısıyla akış neredeyse her zaman türbülanslıdır.

Islak çevrenin kanalın sıvı ile temas eden yan yüzeylerini ve tabanını kapsadığına dikkat edilmelidir. Serbest yüzey ve yan yüzeylerin havaya açık kısımları ıslak çevreye dahil değildir.

Örneğin, yüksekliği h ve genişliği b olan ve içerisinde y derinliğinde su bulunan dikdörtgen bir kanal için ıslak çevre ve akış en-kesitinin alanı sırasıyla; $p = b + 2y$ ve $A_c = yb$ 'dir. Dolayısıyla hidrolik yarıçap,

$$\text{Dikdörtgen kanal :} \quad R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{yb}{b + 2y} = \frac{y}{1 + 2y/b}$$

$$y \text{ kalınlığındaki sıvı tabakası:} \quad R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{yb}{b + 2y} \cong \frac{yb}{b} \cong y$$

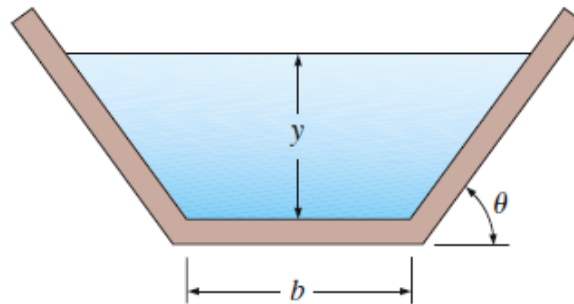


$$A_c = R^2(\theta - \sin \theta \cos \theta)$$

$$p = 2R\theta$$

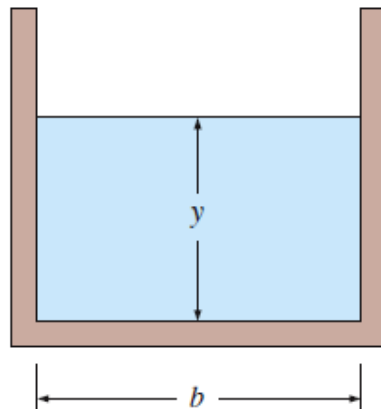
$$R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{2\theta} R$$

(a) Dairesel kanal (θ radyan biriminde)



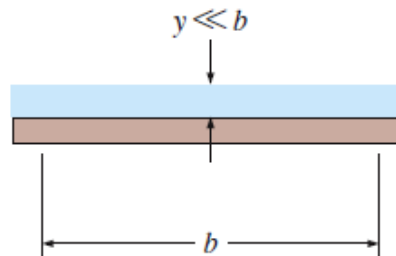
$$R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{y(b + y/\tan \theta)}{b + 2y/\sin \theta}$$

(b) Trapez kanal



$$R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{yb}{b + 2y} = \frac{y}{1 + 2y/b}$$

(c) Dikdörtgen kanal



$$R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{yb}{b + 2y} \cong \frac{yb}{b} \cong y$$

(d) y kalınlığındaki sıvı filmi

Çeşitli açık kanal geometrileri için hidrolik yarıçap bağıntıları.

13–2 ■ FROUDE SAYISI VE DALGA HIZI

Açık kanal akışı boyutsuz Froude sayısının değerine göre *kritikaltı*, *kritik* ya da *kritiküstü* olarak sınıflandırılır.

Froude sayısı:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL_c}}$$

$$Fr = V/\sqrt{gy}$$

L_c olarak geniş dikdörtgen kanallar için akış derinliği y alınır.

$Fr < 1$ kritikaltı akış - nehir (veya sakin) rejimli akış

$Fr = 1$ kritik akış

$Fr > 1$ kritiküstü akış - hızlı (veya sel) rejimli akış

$$Fr^2 = \frac{V^2}{gL_c} \frac{\rho A}{\rho A} = \frac{2(\frac{1}{2}\rho V^2 A)}{mg} \propto \frac{\text{Atalet kuvveti}}{\text{Yerçekimi (ağırlık) kuvveti}}$$

Sıkıştırılabilir akıştaki Mach sayısı ile açık kanal akışındaki Froude sayısı arasındaki analogi.

Sıkıştırılabilir Akış	Açık Kanal Akışı
$Ma = V/c$	$Fr = V/c_0$
$Ma < 1$ Sesaltı	$Fr < 1$ Kritikaltı
$Ma = 1$ Sonik	$Fr = 1$ Kritik
$Ma > 1$ Sestüstü	$Fr > 1$ Kritiküstü

V = Ses hızı
 $c = \sqrt{kRT} = \text{ses hızı (ideal gaz)}$
 $c_0 = \sqrt{gy} = \text{dalga hızı (sıvı)}$

Kritikaltı Akış: *Düşük akış hızlarında ($Fr < 1$)*, küçük bir bozucu etki yukarıakım bölgesine doğru (sabit bir gözlemciye göre $c_0 - V$ bağıl hızıyla) ilerler ve yukarıakım koşullarını etkiler. Bu, *sakin rejim akışı*, *nehir rejimi akışı* ya da *kritikaltı akış* olarak adlandırılır.

Kritiküst Akış: *yüksek akış hızlarında ($Fr > 1$)*, küçük bir bozucu etki yukarıakım bölgesine doğru (aslında dalga, sabit bir gözlemciye göre $V - c_0$ bağıl hızıyla aşağıakım bölgesine doğru sürüklenir) ilerleyemez ve yukarıakım bölgesinin koşulları aşağıakım bölgesinin koşullarından etkilenmez. Bu akış yukarıakım koşullarınca kontrol edilir.

Kritik derinlik (genel):

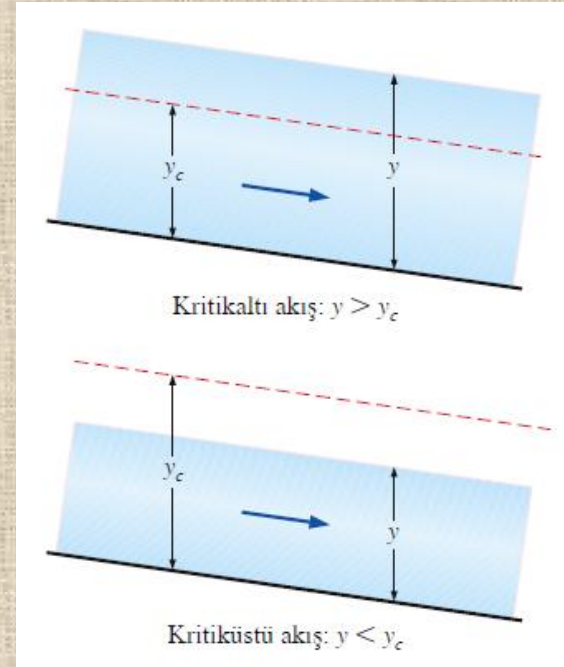
$$y_c = \frac{\dot{V}^2}{gA_c^2}$$

Kritik derinlik (dikdörtgen):

$$y_c = \left(\frac{\dot{V}^2}{gb^2} \right)^{1/3}$$

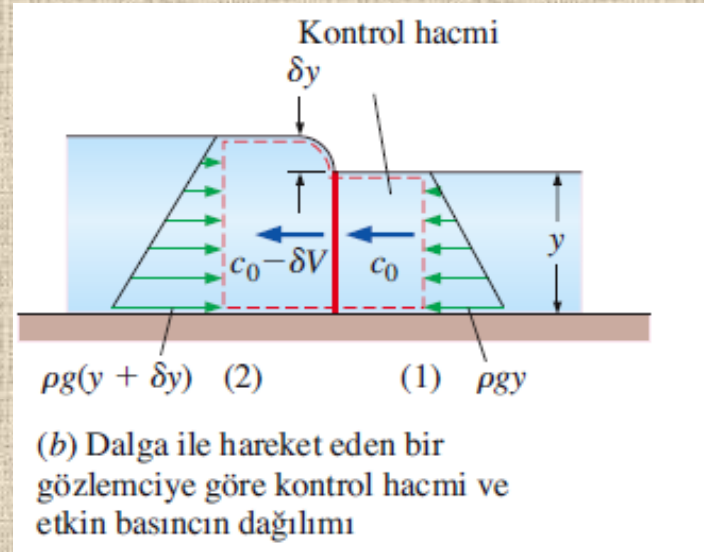
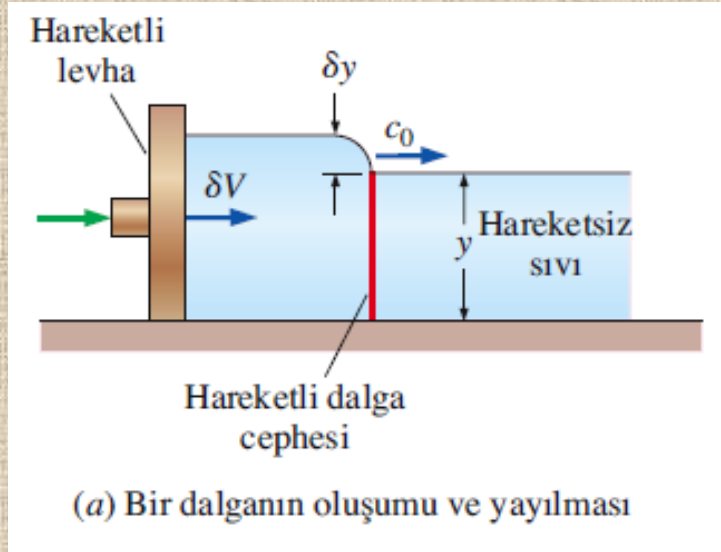
Sıkıştırılabilir akışta olduğu gibi bir sıvı, kritikaltıdan kritiküstü akışa ivmelenebilir. Elbette kritiküstüden kritikaltı akışa da yavaşlayabilir ancak bunu bir şoktan geçerek yapabilir. Bu durumda şok, **hidrolik sıçrama** olarak adlandırılır ve sıkıştırılabilir akıştaki **normal şoka** karşılık gelir.

Kritikaltı ve kritiküstü akışların kritik derinliğe bağlı tanımları.



Yüzey Dalgalarının Hızı

Bir yüzey çalkantısının bir sıvı içerisindeki ilerleme hızı olan **dalga hızı c_0** , açık kanal akışının incelenmesinde kullanılan önemli bir parametredir.



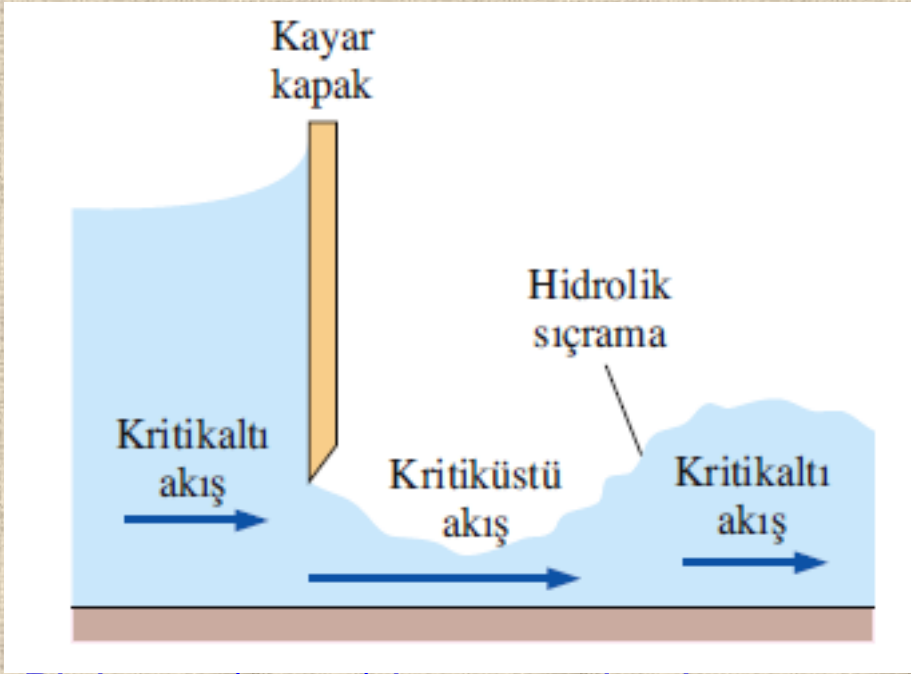
Açık bir kanalda dalganın oluşumu ve analizi.

$$\rho c_0 y b = \rho (c_0 - \delta V) (y + \delta y) b \quad \rightarrow \quad \delta V = c_0 \frac{\delta y}{y + \delta y}$$

$$P_{2, \text{ort}} A_2 - P_{1, \text{ort}} A_1 = \dot{m}(-V_2) - \dot{m}(-V_1) \quad \frac{\rho g (y + \delta y)^2 b}{2} - \frac{\rho g y^2 b}{2} = \rho c_0 y b (-c_0 + \delta V) - \rho c_0 y b (-c_0)$$

$$g \left(1 + \frac{\delta y}{2y} \right) \delta y = c_0 \delta V \quad c_0^2 = g y \left(1 + \frac{\delta y}{y} \right) \left(1 + \frac{\delta y}{2y} \right)$$

Sonsuz küçük yüzey dalgaları $c_0 = \sqrt{gy}$



Bir kayar (sürgü) kapağın altından geçen kritiküstü akış.

Bir kayar (sürgü) kapağın altından geçen kritiküstü akış.

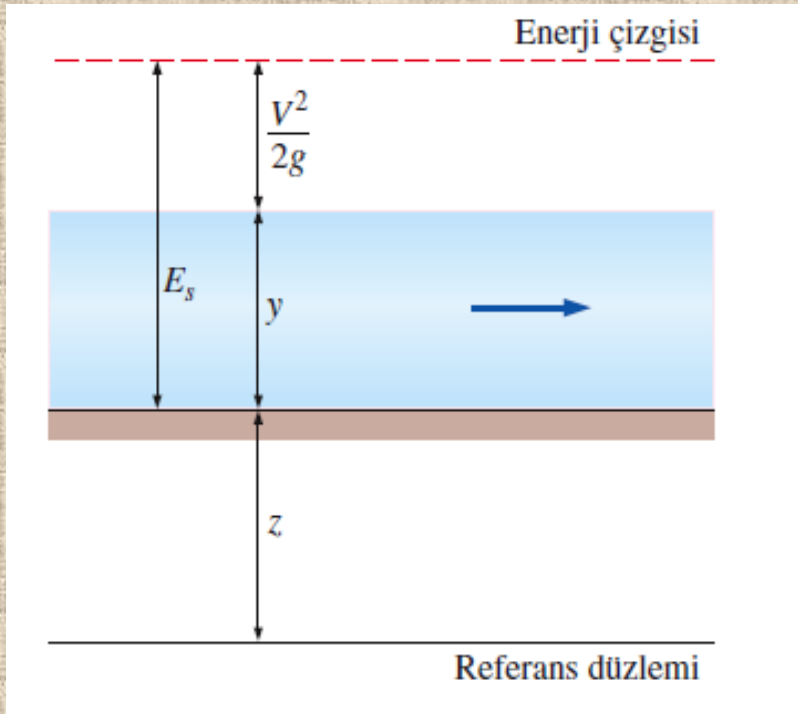


(a)



(b)

13-3 ■ ÖZGÜL ENERJİ



Bir açık kanaldaki sıvının özgül enerjisi E_s , kanalın tabanına göre toplam mekanik enerjisidir ve yük olarak ifade edilir.

$$H = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} = z + y + \frac{V^2}{2g}$$

z : yükselti veya seviye yükü (potansiyel enerji)

$P/\rho g = y$: etkin (efektif) basınç yükü

$V^2/2g$: hız yükü (kinetik enerji) veya dinamik yük

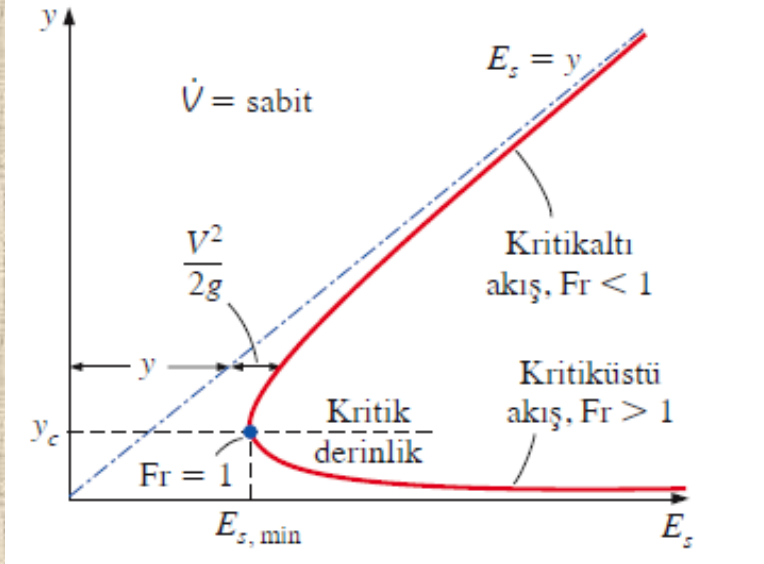
Özgül Enerji E_s : Bir açık kanaldaki sıvının basınç yükünün ve dinamik yükünün toplamıdır.

$$E_s = y + \frac{V^2}{2g}$$

$$V = \frac{\dot{V}}{yb}$$

$$E_s = y + \frac{\dot{V}^2}{2gb^2y^2}$$

$$E_s = y + \frac{\dot{V}^2}{2gb^2y^2}$$

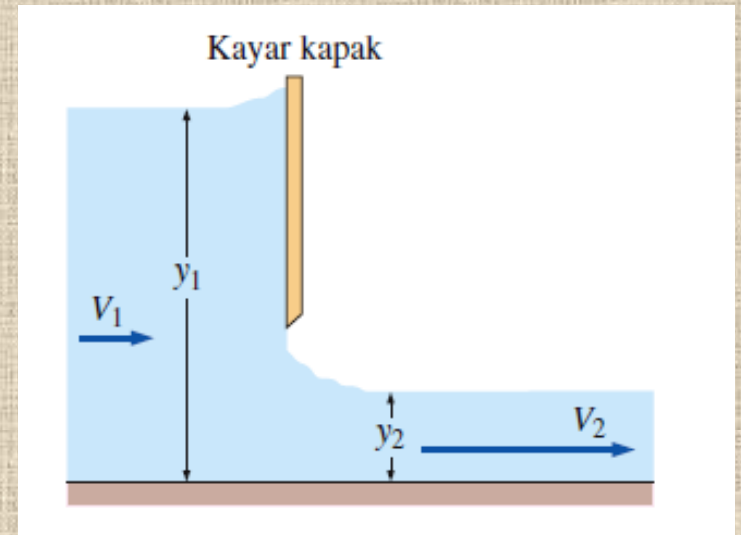


Özgül enerji, **kritik derinlik y_c** ve **kritik hız V_c** ile tanımlanan ve **kritik nokta** olarak adlandırılan ortadaki bir noktada minimum değeri olan $E_{s, min}$ 'e düşer.

Minimum özgül enerji **kritik enerji** olarak ta adlandırılır.

Özgül enerji E_s 'nin belirli bir debi için y derinliği ile değişimi.

Bir kayar (sürgü) kapaktan geçen akışta eşlenik derinlikler. Kayar (sürgü) kapağın yukarı akış bölgesinde sıvı derinliği fazla, aşağıakış bölgesinde ise sıvı derinliği azdır (sığdır).



$$\frac{dE_s}{dy} = \frac{d}{dy} \left(y + \frac{\dot{V}^2}{2gb^2y^2} \right) = 1 - \frac{\dot{V}^2}{gb^2y^3} = 0$$

$$y_c = \left(\frac{\dot{V}^2}{gb^2} \right)^{1/3}$$

$$\dot{V} = y_c b V_c \quad V_c = \sqrt{gy_c}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} = \frac{V_c}{\sqrt{gy_c}} = 1$$

Özgül enerjinin minimum olduğu nokta kritik noktadır. Özgül enerji minimum değerine ulaştığında, akış ta kritik akış haline gelir.

Sonuç olarak akış; düşük akış hızlarında kritikaltıdır ve dolayısıyla akış derinliği fazladır; yüksek akış hızlarında kritiküstüdür ve dolayısıyla akış derinliği azdır (eğrinin alt kolu); ve kritik noktada da kritiktir (özgül enerjinin minimum olduğu nokta).

Özgül enerji, sadece kritik derinliğe bağlı olarak da ifade edilebilir:

$$E_{s, \min} = y_c + \frac{V_c^2}{2g} = y_c + \frac{gy_c}{2g} = \frac{3}{2}y_c$$

Üniform akışta, akış derinliği ile akış hızı ve dolayısıyla özgül enerji sabit kalır, çünkü $E_s = y + V^2/2g$ 'dir. Yük kaybı, yükseklikteki düşüş ile karşılanır (kanalın eğimi akış yönünde olmalıdır). Bununla birlikte üniform olmayan akışta özgül enerji, kanalın eğimine ve sürtünme kayıplarına bağlı olarak artar ya da azalır.

ÖRNEK 13-1 Akışın Karakteri ve Eşlenik Derinlik

Su, 0.4 m genişliğindeki dikdörtgen en-kesitli bir açık kanaldan $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ debi ile daimi olarak akmaktadır (Şekil 13-15). Akış derinliği 0.15 m ise; akış hızını ve akışın kritikaltı mı yoksa kritiküstü mü olduğunu belirleyiniz. Ayrıca akış karakterinin değişmesi durumunda eşlenik akış derinliğini belirleyiniz.

ÇÖZÜM Dikdörtgen en-kesitli bir açık kanaldaki suyun akışı ele alınmaktadır. Akışın karakteri, akış hızı ve eşlenik derinliğin belirlenmesi istenmektedir.

Kabuller Özgül enerji sabittir.

Analiz Ortalama akış hızı,

$$V = \frac{\dot{V}}{A_c} = \frac{\dot{V}}{yb} = \frac{0.2 \text{ m}^3/\text{s}}{(0.15 \text{ m})(0.4 \text{ m})} = 3.33 \text{ m/s}$$

olarak bulunur. Bu akış için kritik derinlik:

$$y_c = \left(\frac{\dot{V}^2}{gb^2} \right)^{1/3} = \left(\frac{(0.2 \text{ m}^3/\text{s})^2}{(9.81 \text{ m/s}^2)(0.4 \text{ m})^2} \right)^{1/3} = 0.294 \text{ m}$$

Dolayısıyla akış **kritiküstü**dür, çünkü gerçek akış derinliği $y = 0.15 \text{ m}$ 'dir ve $y < y_c$ 'dir. Akışın karakterini belirlemenin diğer bir yolu da Froude sayısını hesaplamaktır:

$$\text{Fr} = \frac{V}{\sqrt{gy}} = \frac{3.33 \text{ m/s}}{\sqrt{(9.81 \text{ m/s}^2)(0.15 \text{ m})}} = 2.75$$

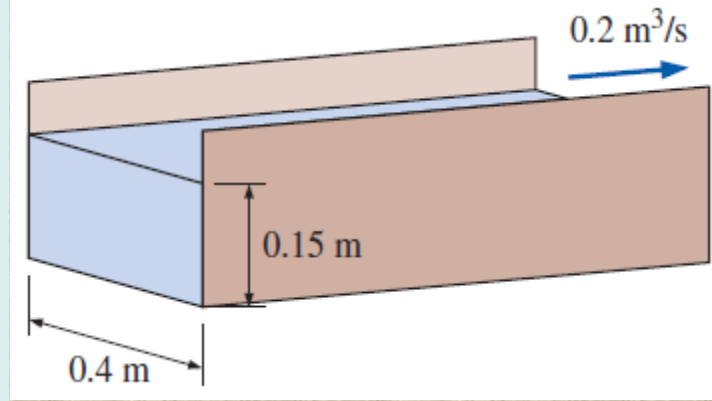
Akış yine kritiküstüdür, çünkü $\text{Fr} > 1$ 'dir. Verilen şartlar için özgül enerji:

$$E_{s1} = y_1 + \frac{\dot{V}^2}{2gb^2y_1^2} = (0.15 \text{ m}) + \frac{(0.2 \text{ m}^3/\text{s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)(0.4 \text{ m})^2(0.15 \text{ m})^2} = 0.7163 \text{ m}$$

Bu durumda eşlenik derinlik $E_{s1} = E_{s2}$ olması gerektiğinden yola çıkılarak belirlenebilir:

$$E_{s2} = y_2 + \frac{\dot{V}^2}{2gb^2y_2^2} \rightarrow 0.7163 \text{ m} = y_2 + \frac{(0.2 \text{ m}^3/\text{s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)(0.4 \text{ m})^2y_2^2}$$

Yukarıdaki eşitliğin y_2 için çözülmesiyle eşlenik derinlik $y_2 = 0.69 \text{ m}$ olarak hesaplanır. Dolayısıyla eğer özgül enerji sabit tutulurken, akışın karakteri kritiküstünden kritikaltına değiştirilirse, akışın derinliği 0.15 m'den 0.69 m'ye çıkar.



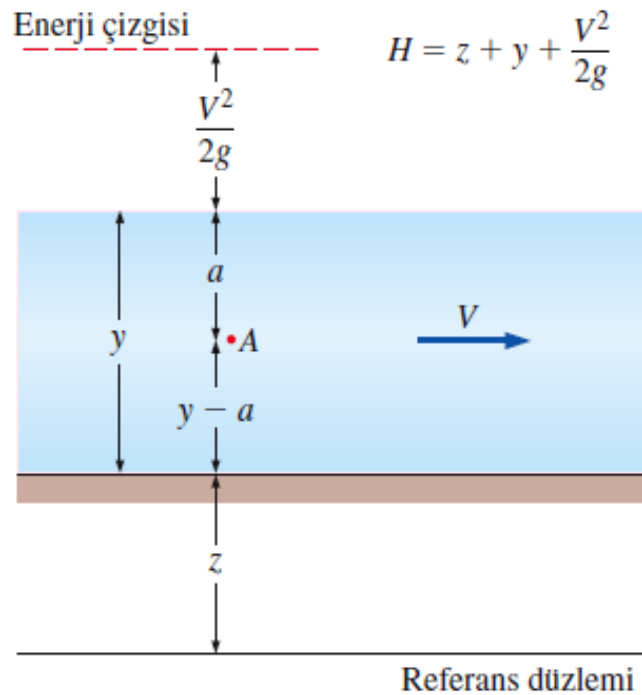
İrdeleme Suyun sabit özgül enerjisiyle (sürtünme kayıpları yükseklik düşüşüne eşit olmalıdır) bir hidrolik sıçramadan geçmesi durumunda, kanalın yan duvarlarının da yeterince yüksek olduğu kabul edilerek, akış derinliğinin 0.69 m'ye çıkacağına dikkat ediniz.

13-4 ■ KÜTLENİN VE ENERJİNİN KORUNUMU DENKLEMLERİ

$$\dot{V} = A_c V = \text{sabit}$$

Süreklilik denklemi :

$$A_{c1} V_1 = A_{c2} V_2$$



Açık kanalda akan bir sıvının toplam enerjisi.

$$H_A = z_A + \frac{P_A}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} = z + (y - a) + \frac{\rho g a}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} = z + y + \frac{V^2}{2g}$$

$$H = z + y + \frac{V^2}{2g}$$

Enerji denklemi :

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

$$h_L = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2g} = f \frac{L}{R_h} \frac{V^2}{8g}$$

$$S_0 = \tan \alpha = \frac{z_1 - z_2}{x_2 - x_1} \cong \frac{z_1 - z_2}{L}$$

Kanalın taban eğimi

Eğer kanalın tabanı düz ise tabanın eğimi de sabittir.

Enerji denklemi:

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + S_0 L = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

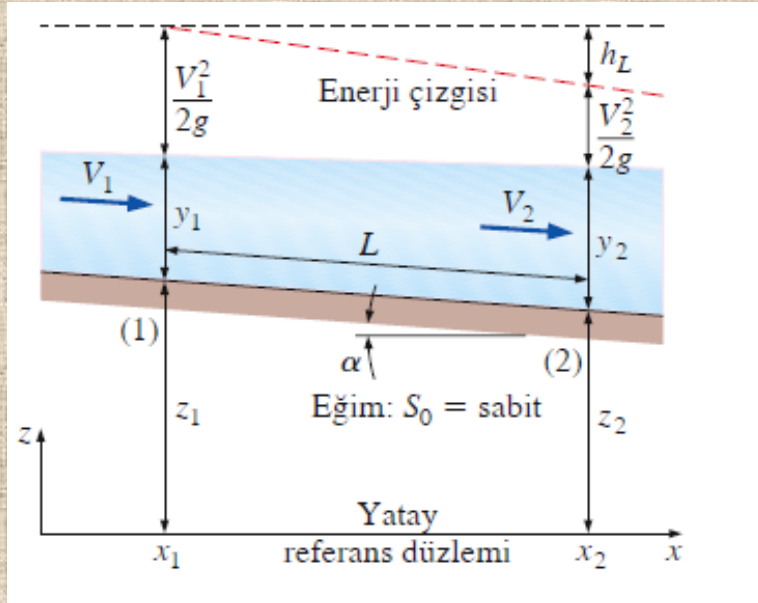
Açık kanal sistemlerinin tasarımında tabanın eğimi; sürtünmeden kaynaklanacak yük kaybının üstesinden gelecek ve böylece istenen akış miktarını oluşturmaya yetecek yükseklik düşüşünü sağlayacak şekilde seçilir.

Dolayısıyla, yük kayıpları ile tabanın eğimi arasında yakın bir ilişki vardır ve yük kayıplarını bir eğim (ya da açının tanjantı) olarak ifade etmek mantıklıdır. Bu, bir **sürtünme eğimi** tanımlanarak yapılabilir:

Sürtünme eğimi:
$$S_f = \frac{h_L}{L}$$

Enerji denklemi:
$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + (S_f - S_0)L$$

Yük kayıplarının yükseklik düşüşüne eşit olması halinde, sürtünme eğiminin taban eğimine eşit olduğuna dikkat ediniz. Yani $h_L = z_1 - z_2$ olduğu zaman; $S_f = S_0$ olur.



Yatay referans düzlemi ile arasındaki mesafe $z + y + V^2/2g$ (sıvının yük olarak ifade edilen toplam mekanik enerjisi) olan çizgi enerji çizgisidir.

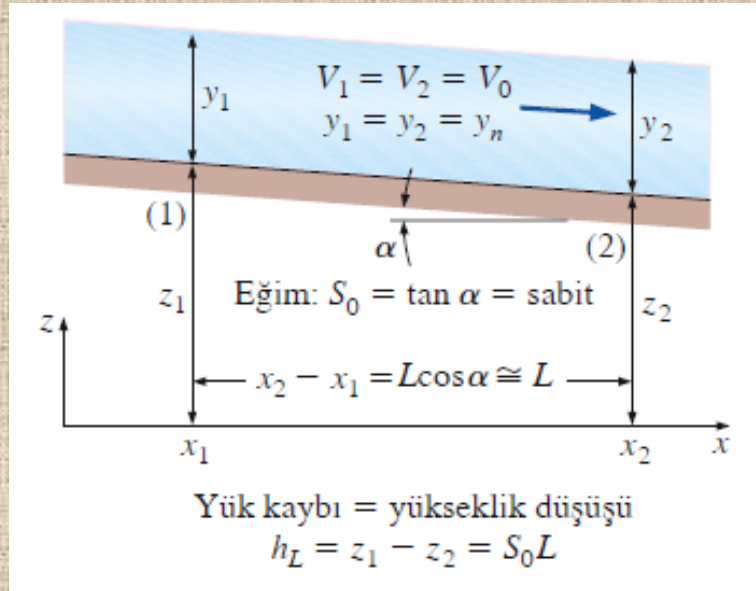
Enerji çizgisi, genellikle sürtünme kayıplarının bir sonucu olarak kanal gibi akış yönünde eğimlidir ve düşeydeki fark yük kaybı h_L 'ye eşittir.

Açık bir kanalın iki en-kesiti arasındaki sıvının toplam enerjisi.

13-5 ■ KANALLARDA ÜNİFORM AKIŞ

Akış derinliği (ve dolayısıyla daimi akışta $\dot{V} = A_c V = \text{sabit}$ olduğu için ortalama akış hızı) sabit kalırsa, bir kanaldaki akış *uniform flow* olarak adlandırılır. Uygulamada çoğunlukla; sabit eğimli, sabit en-kesitli ve yüzey koşulları değişmeyen, uzun ve düz kanallarda üniform akış koşullarıyla karşılaşılır.

Üniform akıştaki akış derinliği, *normal depth* y_n ve ortalama akış hızı da *üniform akış hızı* V_0 olarak adlandırılır.



$$h_L = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2g} \quad \text{or} \quad S_0 L = f \frac{L}{R_h} \frac{V_0^2}{8g} \quad \begin{matrix} h_L = S_0 L \\ D_h = 4R_h \end{matrix}$$

$$V_0 = C \sqrt{S_0 R_h} \quad \text{ve} \quad \dot{V} = C A_c \sqrt{S_0 R_h}$$

$$C = \sqrt{8g/f} \quad \text{Chezy katsayısı}$$

$$f = [2.0 \log(14.8 R_h / \epsilon)]^{-2}$$

Chezy katsayısı, pürüzlü yüzeyleri olan küçük kanallar için $30 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ 'den, düz yüzeyleri olan büyük kanallar için $90 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ 'ye kadar değişir.

Üniform akışlarda; akış derinliği y , ortalama akış hızı V ile taban eğimi S_0 sabit kalır ve yük kaybı, yükseklik düşüşüne eşittir: $h_L = z_1 - z_2 = S_f L = S_0 L$.

$$C = \frac{a}{n} R_h^{1/6}$$

Manning katsayısı n : kanal yüzeyinin pürüzlülüğüne bağlıdır.

Manning denklemleri (Gauckler–Manning denklemleri)

Üniform akış: $V_0 = \frac{a}{n} R_h^{2/3} S_0^{1/2}$ ve $\dot{V} = \frac{a}{n} A_c R_h^{2/3} S_0^{1/2}$

$$a = 1 \text{ m}^{1/3}/\text{s} = (3.2808 \text{ ft})^{1/3}/\text{s} = 1.486 \text{ ft}^{1/3}/\text{s}$$

Kritik Üniform Akış

Açık kanaldaki akış, Froude sayısı $Fr = 1$ ve dolayısıyla akış hız dalga hızı $V_c = \sqrt{gy_c}$ 'ye eşit olduğunda kritik akış olur.

Kritik eğim (genel):

$$S_c = \frac{gn^2 y_c}{a^2 R_h^{4/3}}$$

Film akışı ya da $b \gg y_c$ olacak şekilde geniş bir dikdörtgen kanaldaki akış için;

Kritik eğim ($b \gg y_c$):

$$S_c = \frac{gn^2}{a^2 y_c^{1/3}}$$

Manning katsayısı n 'nin açık kanaldaki su akışı için ortalama değerleri*

Chow'dan alınmıştır (1959).

Duvar Malzemesi	n
A. Yapay kanallar	
Cam	0.010
Prinç	0.011
Çelik, pürüzsüz	0.012
Çelik, boyanmış	0.014
Çelik, perçinli	0.015
Dökme demir	0.013
Beton, perdahlı	0.012
Beton, perdahsız	0.014
Ahşap, düzeltilmiş	0.012
Ahşap, düzeltilmemiş	0.013
Kil döşenmiş	0.014
Tuğla döşenmiş	0.015
Asfalt	0.016
Oluklu metal	0.022
Moloz taş ile hazırlanmış	0.025
B. Kazılmış toprak kanallar	
Temiz	0.022
Çakıllı	0.025
Yabanî otla kaplı	0.030
Düzdün taşlı	0.035
C. Doğal kanallar	
Temiz ve düz	0.030
Derin çukurlu	0.040
Büyük nehirler	0.035
Dağ dereleri	0.050
D. Taşkın yatakları	
Mera, tarım alanı	0.035
Seyrek çalılık	0.050
Sık çalılık	0.075
Ağaçlık	0.150

* n 'nin belirsizliği $\pm \%20$ 'ya da daha fazla olabilir.

Üniform Olmayan Çevreli Kanallar ve Süperpozisyon Yöntemi

Birçok doğal ve bazı insan yapısı kanallar için yüzey pürüzlülüğü ve dolayısıyla Manning katsayısı kanalın ıslak çevresi ve hatta kanal uzunluğu boyunca çok fazla değişir.

Örneğin, bir nehrin yatağının taşlı bir tabanı olabilir, ancak aynı nehrin taşkın yatağı, çalılıklarla kaplı bir alana yayılabilir.

Bu gibi problemleri çözmek için farklı yöntemler vardır; ya bütün kanal en-kesiti için geçerli olan bir etkin (efektif) Manning katsayısı n bulunur, ya da kanal alt bölümlere ayrılır ve süperpozisyon yöntemi uygulanır.

Örneğin bir kanalın en-kesiti, her birinin kendine ait Manning katsayısı ve debisi olan N adet alt bölüme ayrılır.

Bir bölümün çevresi belirlenirken, sadece o bölüme ait sınırın ıslak parçası değerlendirilir ve hayali sınırlar göz ardı edilir.

Kanaldan geçen debi, bütün bölümlerden geçen debilerin toplamıdır.

Su, tabanı yabani otlarla kaplı, taban genişliği 0.8 m, trapez açısı 60° ve taban eğim açısı 0.3° olan trapez en-kesitli kazılmış bir toprak kanaldan Şekil 13-19'da gösterildiği gibi akmaktadır. Akış derinliği 0.52 m olarak ölçüldüğüne göre, kanaldan akan suyun debisini hesaplayınız. Taban açısı 1° olsaydı cevabınız ne olurdu?

ÇÖZÜM Su, tabanı otlarla kaplı ve boyutları verilen trapezen-kesitli bir kanalda akmaktadır. Ölçülen bir akış derinliği için debinin hesabı istenmektedir.

Kabuller 1 Akış daimi ve üniiformdur. 2 Taban eğimi sabittir. 3 Kanalın ıslak yüzeylerinin pürüzlülüğü ve dolayısıyla sürtünme katsayısı sabittir.

Özellikler Yüzeyleri otlarla kaplı bir açık kanalın Manning katsayısı $n = 0.030$ 'dur.

Analiz Kanalın en-kesit alanı, ıslak çevresi ve hidrolik yarıçapı;

$$A_c = y \left(b + \frac{y}{\tan \theta} \right) = (0.52 \text{ m}) \left(0.8 \text{ m} + \frac{0.52 \text{ m}}{\tan 60^\circ} \right) = 0.5721 \text{ m}^2$$

$$p = b + \frac{2y}{\sin \theta} = 0.8 \text{ m} + \frac{2 \times 0.52 \text{ m}}{\sin 60^\circ} = 2.001 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{0.5721 \text{ m}^2}{2.991 \text{ m}} = 0.2859 \text{ m}$$

Kanal tabanının eğimi:

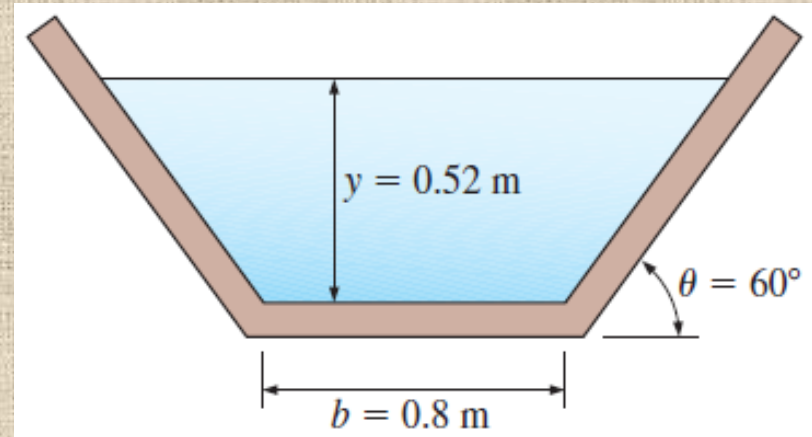
$$S_0 = \tan \alpha = \tan 0.3^\circ = 0.005236$$

Artık kanaldan akan hacimsel debi Manning denkleminden hesaplanabilir:

$$\dot{V} = \frac{a}{n} A_c R_h^{2/3} S_0^{1/2} = \frac{1 \text{ m}^{1/3}/\text{s}}{0.030} (0.5721 \text{ m}^2) (0.2859 \text{ m})^{2/3} (0.005236)^{1/2} = \mathbf{0.60 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Taban eğiminin 1° olması durumundaki hacimsel debi son bağıntıda $S_0 = \tan \alpha = \tan 1^\circ = 0.01746$ yazılarak belirlenebilir. Sonuç $\dot{V} = \mathbf{1.1 \text{ m}^3/\text{s}}$ olur.

İrdeleme Taban açısının, hacimsel debi üzerindeki etkisinin çok fazla olduğuna dikkat ediniz: Ayrıca, Manning katsayısının değerindeki ve dolayısıyla hesaplanan hacimsel debideki belirsizlik oldukça fazladır, n 'deki %10 belirsizlik, hacimsel debide %10 belirsizliğe yol açar. Bu nedenle nihai sonuçlar,



ÖRNEK 13–3 Dikdörtgen Bir Kanalin Yüksekliği

Su, taban genişliği 1.22 m olan perdahsız betondan yapılmış dikdörtgen bir kanaldan 1.44 m³/s debiyle taşınacaktır. Kanalın üzerinde bulunduğu arazinin eğimi nedeniyle kanal tabanı 1000 m’de 2 m alçalmaktadır. Üniform akış koşullarında kanalın minimum yüksekliğinin ne olması gerektiğini belirleyiniz (Şekil 13–20). Eğer tabandaki alçalma 1000 m’de 1 m olsaydı cevabınız ne olurdu?

ÇÖZÜM Su, genişliği bilinen, perdahsız betondan yapılmış dikdörtgen en-kesitli bir kanaldan nakledilecektir. Belirli bir hacimsel debi için gerekli minimum kanal yüksekliğinin belirlenmesi istenmektedir.

Kabuller 1 Akış daimi ve üniformdur. 2 Taban eğimi sabittir. 3 Kanalın ıslak yüzeylerinin pürüzlülüğü, dolayısıyla sürtünme katsayısı sabittir.

Özellikler Perdahsız beton yüzeyli bir açık kanal için Manning katsayısı $n = 0.014$ ’tür.

Analiz Kanalın en-kesit alanı, ıslak çevresi ve hidrolik yarıçapı:

$$A_c = by = (1.22 \text{ m})y \quad p = b + 2y = (1.22 \text{ m}) + 2y \quad R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{1.22y}{1.22 + 2y}$$

Kanal tabanının eğimi $S_0 = 2/1000 = 0.002$ ’dir. Manning denklemi kullanılarak kanaldan geçen hacimsel debi, y ’ye göre doğrusal olmayan aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

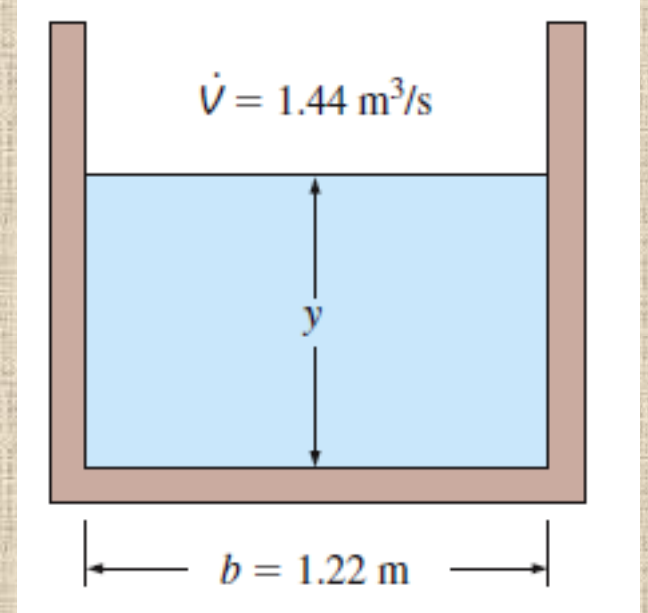
$$\dot{V} = \frac{a}{n} A_c R_h^{2/3} S_0^{1/2}$$
$$1.44 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{1 \text{ m}^{1/3}/\text{s}}{0.014} (1.22y^2) \left(\frac{1.22y}{1.22 + 2y} \right)^{2/3} (0.002)^{1/2}$$

EES gibi bir denklem çözücü ya da iteratif bir yaklaşım kullanılarak akış derinliği,

$$y = 0.76 \text{ m}$$

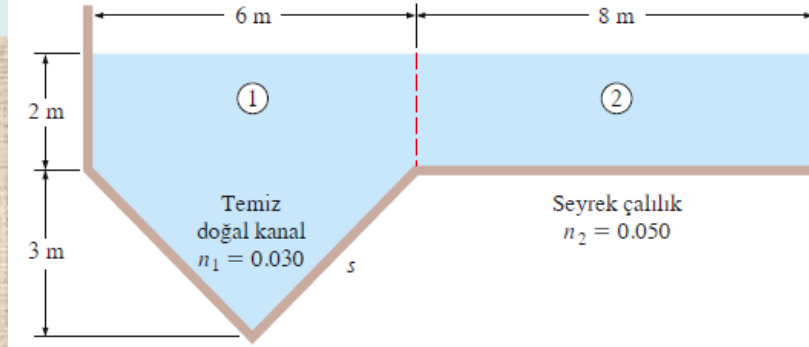
olarak belirlenebilir. Eğer tabandaki alçalma sadece 1000 m’de 1 m olsaydı; tabanın eğimi $S_0 = 0.001$ ve akış derinliği de $y = 1 \text{ m}$ olurdu.

İrdeleme y ’nin akış derinliği ve bunun kanal yüksekliğinin minimum değeri olduğuna dikkat edilmelidir. Ayrıca Manning katsayısı n ’nin değerindeki belirsizlik de bir hayli fazladır ve tüm bunlar inşa edilecek kanalın derinliği kararlaştırılırken göz önünde bulundurulmalıdır.



ÖRNEK 13–4 Pürüzlülüğü Üniform Olmayan Kanallar

Su, taban eğimi 0.003 olan ve en-kesiti Şekil 13–21’de gösterilen kanalda akmaktadır. Farklı alt bölümlerin boyutları ve yüzeyler için Manning katsayıları da şekil üzerinde verilmiştir. Kanaldan akan hacimsel debiyi ve kanal için geçerli etkin Manning katsayısını belirleyiniz.



ÇÖZÜM Su, yüzey özellikleri üniform olmayan bir kanaldan akmaktadır. Debinin ve etkin Manning katsayısının belirlenmesi istenmektedir.

Kabuller 1 Akış daimi ve üniformdur. 2 Tabanın eğimi sabittir. 3 Kanal boyunca Manning katsayıları değişmemektedir.

Analiz Kanal farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip iki bölümden oluşmaktadır ve Şekil 13 – 21’de gösterildiği gibi kanalı iki alt bölüme ayırmak uygundur. Her bir alt bölümün debisi Manning denklemi ile belirlenebilir ve toplam debi, bunlar birbirine eklenerek hesaplanabilir.

Üçgen kanalın kenar uzunluğu $s = \sqrt{3^2 + 3^2} = 4.243$ m’dir. Her bir alt bölüm ve kanalın tamamı için akış alanı, ıslak çevre ve hidrolik yarıçaplar:

Alt bölüm 1:

$$A_{c1} = 21 \text{ m}^2 \quad p_1 = 10.486 \text{ m} \quad R_{h1} = \frac{A_{c1}}{p_1} = \frac{21 \text{ m}^2}{10.486 \text{ m}} = 2.00 \text{ m}$$

Alt bölüm 2:

$$A_{c2} = 16 \text{ m}^2 \quad p_2 = 10 \text{ m} \quad R_{h2} = \frac{A_{c2}}{p_2} = \frac{16 \text{ m}^2}{10 \text{ m}} = 1.60 \text{ m}$$

Bütün kanal:

$$A_c = 37 \text{ m}^2 \quad p = 20.486 \text{ m} \quad R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{37 \text{ m}^2}{20.486 \text{ m}} = 1.806 \text{ m}$$

Her bir alt bölüm için Manning denklemi kullanılarak kanalın toplam debisi belirlenebilir:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = \frac{a}{n_1} A_{c1} R_{h1}^{2/3} S_0^{1/2} + \frac{a}{n_2} A_{c2} R_{h2}^{2/3} S_0^{1/2} \\ &= (1 \text{ m}^{1/3}/\text{s}) \left[\frac{(21 \text{ m}^2)(2 \text{ m})^{2/3}}{0.030} + \frac{(16 \text{ m}^2)(1.60 \text{ m})^{2/3}}{0.050} \right] (0.003)^{1/2} \\ &= 84.8 \text{ m}^3/\text{s} \cong \mathbf{85 \text{ m}^3/\text{s}}\end{aligned}$$

Toplam debi hesaplandığına göre bütün kanal için geçerli olan etkin Manning katsayısı Manning denkleminde bulunabilir:

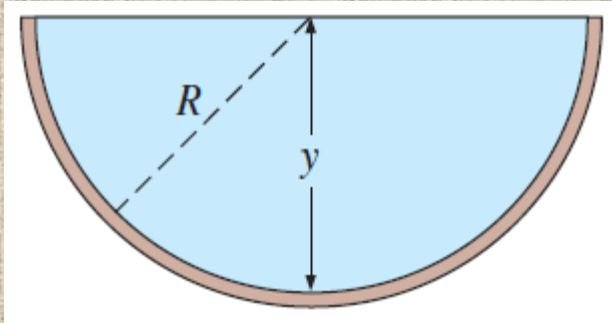
$$n_{\text{etkin}} = \frac{a A_c R_h^{2/3} S_0^{1/2}}{\dot{V}} = \frac{(1 \text{ m}^{1/3}/\text{s})(37 \text{ m}^2)(1.806 \text{ m})^{2/3}(0.003)^{1/2}}{84.8 \text{ m}^3/\text{s}} = \mathbf{0.035}$$

İrdeleme Kanalın etkin Manning katsayısı n_{etkin} , beklendiği gibi iki n değerinin arasındadır. Kanalın ağırlıklı ortalama Manning katsayısı $n_{\text{ort}} = (n_1 p_1 + n_2 p_2)/p = 0.040$ 'dır ve n_{etkin} değerinden oldukça farklıdır. Dolayısıyla bütün kanal için ağırlıklı ortalama Manning katsayısının kullanılması cazip gelebilir, ancak doğru olmaz.

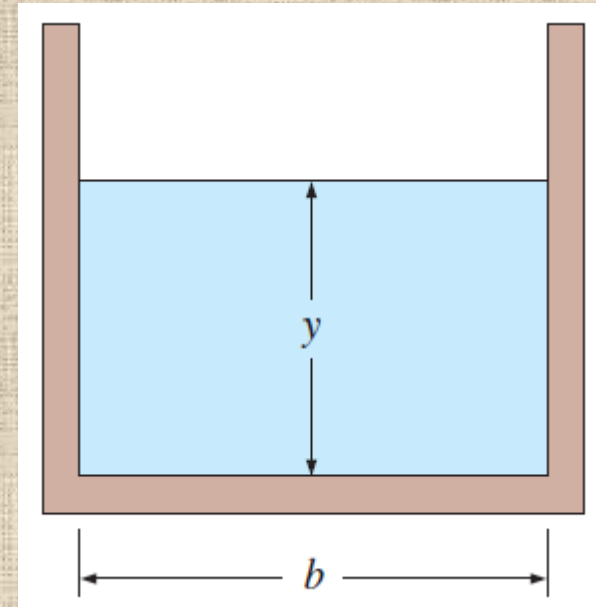
13–6 ■ EN İYİ HİDROLİK EN-KESİTLER

Belirli bir kanal uzunluğu için sistemin maliyetini kanalın ıslak çevresi belirlediğinden; boyutların ve dolayısıyla sistemin maliyetinin mümkün olduğu kadar azaltması için ıslak çevre uzunluğu en düşük düzeyde tutulmalıdır.

Bir açık kanal için en iyi hidrolik en-kesit, hidrolik yarıçapı maksimum ya da buna eşdeğer şekilde bir ifadeyle, belirli bir en-kesit alanı için ıslak çevresi minimum olandır.



Bir açık kanal için en iyi hidrolik en-kesit, yarım dairedir, çünkü belirli bir en kesit alanı için ıslak çevresi minimumdur ve dolayısıyla akış direnci de minimumdur.



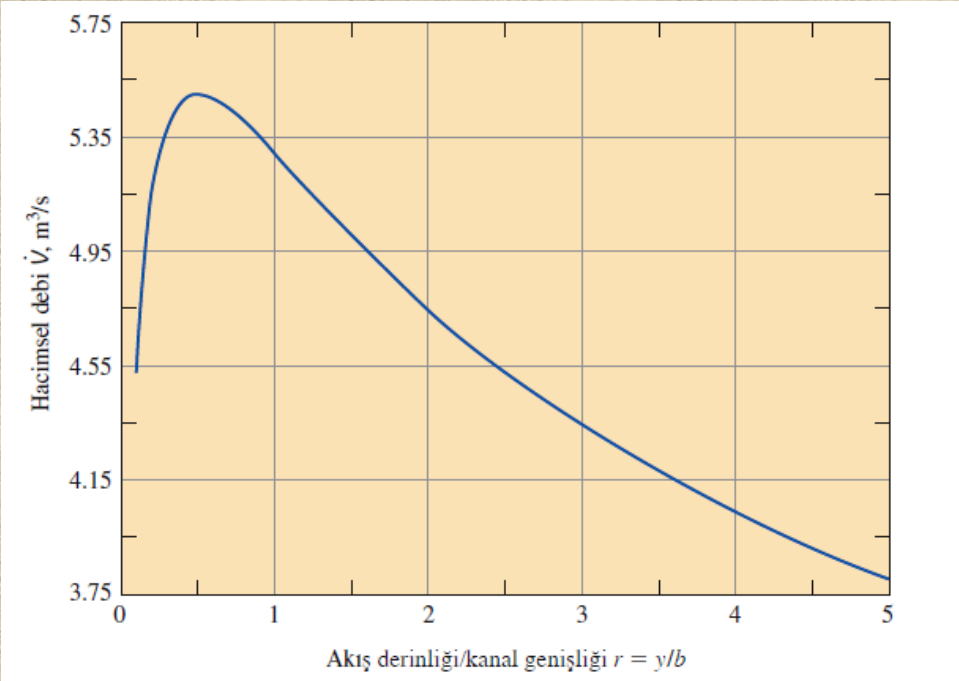
Genişliği b ve akış derinliği y olan dikdörtgen açık kanal. Verilen bir en-kesit alanı için en büyük debi $y = b/2$ olduğunda gerçekleşir.

$A_c = 1 \text{ m}^2$, $S_0 = \tan 1^\circ$ ve $n = 0.012$ olan bir dikdörtgen kanal için hidrolik yarıçap R_h 'nin ve hacimsel debi $\dot{V}$ 'nin görünüş (veya akış derinliği/kanal genişliği) oranı y/b ile değişimi

Görünüş Oranı y/b	Kanal Genişliği $b, \text{ m}$	Akış Derinliği $y, \text{ m}$	Islak Çevre $p, \text{ m}$	Hidrolik Yarıçap $R_h, \text{ m}$	Debi, m^3/s
0.1	3.162	0.316	3.795	0.264	4.53
0.2	2.236	0.447	3.130	0.319	5.14
0.3	1.826	0.548	2.921	0.342	5.39
0.4	1.581	0.632	2.846	0.351	5.48
0.5	1.414	0.707	2.828	0.354	5.50
0.6	1.291	0.775	2.840	0.352	5.49
0.7	1.195	0.837	2.869	0.349	5.45
0.8	1.118	0.894	2.907	0.344	5.41
0.9	1.054	0.949	2.951	0.339	5.35
1.0	1.000	1.000	3.000	0.333	5.29
1.5	0.816	1.225	3.266	0.306	5.00
2.0	0.707	1.414	3.536	0.283	4.74
3.0	0.577	1.732	4.041	0.247	4.34
4.0	0.500	2.000	4.500	0.222	4.04
5.0	0.447	2.236	4.919	0.203	3.81

Akış derinliği/kanal genişliği oranı arttıkça, hacimsel debinin de artarak $y/b = 0.5$ 'de maksimum değerini aldığı ve daha sonra azalmaya başladığı söylenebilir.

Aynı eğilim hidrolik yarıçap için de görülür, ancak ıslak çevre p için eğilim tamamen terstir. Bu sonuçlar, verilen bir şekil için en iyi hidrolik en-kesitin; hidrolik yarıçapı en büyük, ya da benzer şekilde ıslak çevresi en küçük olan en-kesit olduğunu doğrulamaktadır.



$A_c = 1 \text{ m}^2$ ve $S_0 = \tan 1^\circ$ olan bir dikdörtgen kanal için hacimsel debi'nin akış derinliği/kanal genişliği oranı ile değişimi.

Dikdörtgen Kanallar

$$A_c = yb \quad \text{ve} \quad p = b + 2y$$

$$p = \frac{A_c}{y} + 2y$$

$$\frac{dp}{dy} = -\frac{A_c}{y^2} + 2 = -\frac{by}{y^2} + 2 = -\frac{b}{y} + 2$$

$$dp/dy = 0$$

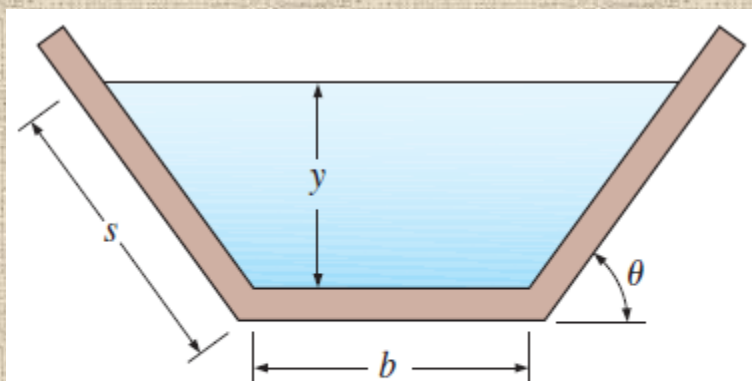
En iyi hidrolik en-kesit (dikdörtgen kanal):

$$y = \frac{b}{2}$$

Dolayısıyla verilen bir en-kesit alanı için bir dikdörtgen kanalın tasarımı, akış direncini azaltmak ve debiyi artırmak amacıyla sıvı yüksekliği kanal genişliğinin yarısı olacak şekilde yapılmalıdır.

Bu aynı zamanda ıslak çevreyi ve dolayısıyla inşaat maliyetlerini en aza indirir.

Trapez Kesitli Kanallar



$$R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{y(b + y/\tan \theta)}{b + 2y/\sin \theta}$$

$$A_c = \left(b + \frac{y}{\tan \theta} \right) y \quad \text{ve} \quad p = b + \frac{2y}{\sin \theta}$$

$$p = \frac{A_c}{y} - \frac{y}{\tan \theta} + \frac{2y}{\sin \theta}$$

Trapez bir kanal için parametreler.

$$\frac{dp}{dy} = -\frac{A_c}{y^2} - \frac{1}{\tan \theta} + \frac{2}{\sin \theta} = -\frac{b + y/\tan \theta}{y} - \frac{1}{\tan \theta} + \frac{2}{\sin \theta}$$

$$dp/dy = 0$$

En iyi hidrolik en-kesit (trapez kanal):

$$y = \frac{b \sin \theta}{2(1 - \cos \theta)}$$

$$R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{y(b + y/\tan \theta)}{b + 2y/\sin \theta} = \frac{y(b \sin \theta + y \cos \theta)}{b \sin \theta + 2y}$$

$$b \sin \theta = 2y(1 - \cos \theta)$$

En iyi en-kesit için hidrolik yarıçap:

$$R_h = \frac{y}{2}$$

$$dp/d\theta = 0.$$

En iyi trapez açısı:

$$\theta = 60^\circ$$

$$y = b \sin \theta / (2 - 2 \cos \theta)$$

$\theta = 60^\circ$ için en iyi akış derinliği:

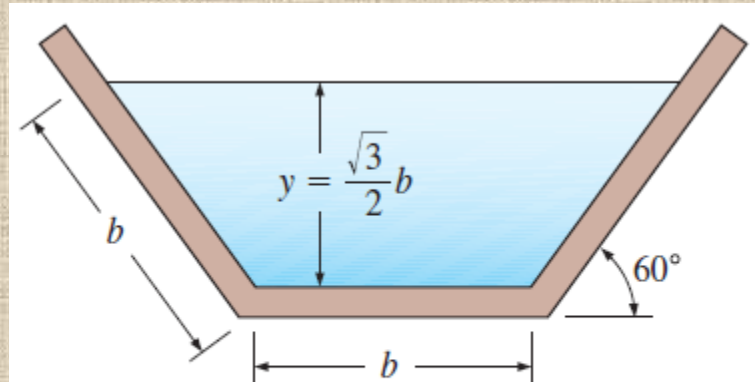
$$y = \frac{\sqrt{3}}{2} b$$

$$s = \frac{y}{\sin 60^\circ} = \frac{b\sqrt{3}/2}{\sqrt{3}/2} = b$$

$$p = 3b$$

$$A_c = \left(b + \frac{y}{\tan \theta}\right)y = \left(b + \frac{b\sqrt{3}/2}{\tan 60^\circ}\right)(b\sqrt{3}/2) = \frac{3\sqrt{3}}{4} b^2$$

Çapı D olan dairesel bir kanal için en iyi hidrolik en-kesitin $y = D/2$ olduğu gösterilebilir.



Trapez kanallar için en iyi en-kesit bir altıgenin yarısıdır.

$$R_h = \frac{y}{2} = \frac{\sqrt{3}}{4} b \quad A_c = \frac{3\sqrt{3}}{4} b^2$$

ÖRNEK 13-5 Bir Açık Kanalin En İyi En-Kesiti

Su, 2 m³/s debi ile yüzeyleri asfalt ile kaplanmış bir açık kanaldan üniform akış koşullarında taşınacaktır. Tabanın eğimi 0.001'dir. Kanalin (a) dikdörtgen ve (b) trapez şeklinde olması halinde en iyi en-kesitin boyutlarını belirleyiniz (Şekil 13-27).

ÇÖZÜM Suyun belirli bir debi ile açık bir kanaldan taşınması istenmektedir. Dikdörtgen ve trapez şekiller için en iyi kanal boyutlarının belirlenmesi istenmektedir.

Kabuller 1 Akış daimi ve üniformdur. 2 Tabanın eğimi sabittir. 3 Kanalin ıslak yüzeylerinin pürüzlülüğü, dolayısıyla sürtünme katsayısı sabittir.

Özellikler Asfaltla kaplanmış bir açık kanal için Manning katsayısı $n = 0.016$ 'dır.

Analiz (a) Dikdörtgen bir kanal için en iyi en-kesit; akış yüksekliği, kanal genişliğinin yarısı $y = b/2$ olduğu zaman söz konusudur. Kanalin en-kesit alanı, ıslak çevresi ve hidrolik yarıçapı:

$$A_c = by = \frac{b^2}{2} \quad p = b + 2y = 2b \quad R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{b}{4}$$

olarak yazılabilir. Bunlar Manning denkleminde yerlerine yazılırsa;

$$\dot{V} = \frac{a}{n} A_c R_h^{2/3} S_0^{1/2} \rightarrow b = \left(\frac{2n\dot{V}4^{2/3}}{a\sqrt{S_0}} \right)^{3/8} = \left(\frac{2(0.016)(2 \text{ m}^3/\text{s})4^{2/3}}{(1 \text{ m}^{1/3}/\text{s})\sqrt{0.001}} \right)^{3/8}$$

elde edilir ve bu da $b = 1.84 \text{ m}$ sonucunu verir. Buradan; $A_c = 1.70 \text{ m}^2$, $p = 3.68 \text{ m}$ ve en iyi dikdörtgen kanalın boyutları,

$$b = 1.84 \text{ m} \quad \text{ve} \quad y = 0.92 \text{ m}$$

olarak bulunur.

(b) En iyi trapez kanal en-kesiti, trapez açısının 60° ve akış yüksekliğinin $y = b\sqrt{3}/2$ olması durumunda söz konusudur. Bu durumda,

$$A_c = y(b + b\cos\theta) = 0.5\sqrt{3}b^2(1 + \cos 60^\circ) = 0.75\sqrt{3}b^2$$

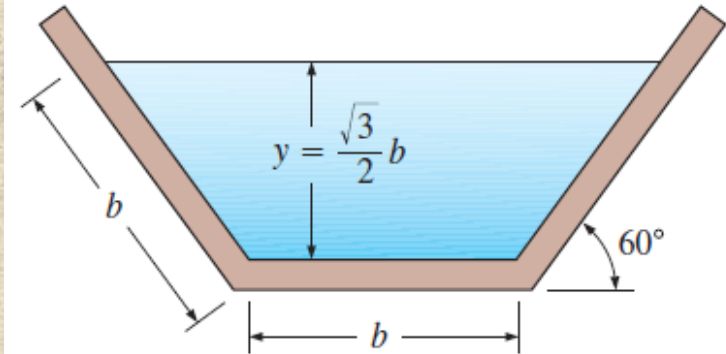
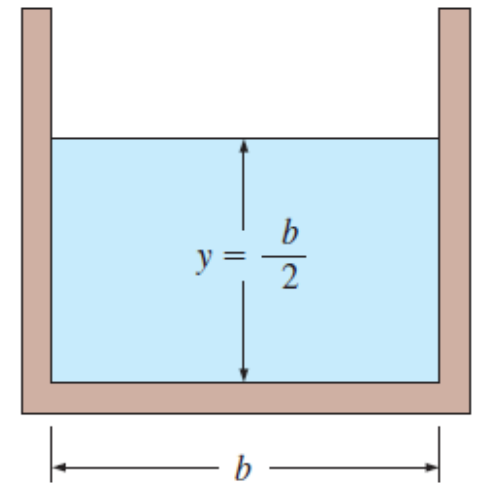
$$p = 3b \quad R_h = \frac{y}{2} = \frac{\sqrt{3}}{4}b$$

yazılabilir. Bunlar Manning denkleminde yerlerine yazıldığında,

$$\dot{V} = \frac{a}{n} A_c R_h^{2/3} S_0^{1/2} \rightarrow b = \left(\frac{(0.016)(2 \text{ m}^3/\text{s})}{0.75\sqrt{3}(\sqrt{3}/4)^{2/3}(1 \text{ m}^{1/3}/\text{s})\sqrt{0.001}} \right)^{3/8}$$

sonucu elde edilir. Buradan $A_c = 1.64 \text{ m}^2$, $p = 3.37 \text{ m}$ ve en iyi trapez kanalın boyutları şu şekilde bulunur:

$$b = 1.12 \text{ m} \quad y = 0.973 \text{ m} \quad \text{ve} \quad \theta = 60^\circ$$



İrdeleme: Trapez kesit daha iyidir, çünkü ıslak çevresi daha kısadır (3.68 m'ye karşılık 3.37 m) ve dolayısıyla inşaa maliyeti daha düşüktür. Bu çoğu insan yapımı su kanallarının trapez şekilli olmasının nedenidir. Bununla birlikte, trapez kanaldaki ortalama akış hızı, en-kesit alanı A_c 'nin daha küçük olmasından dolayı daha büyüktür.



Düşük inşa masrafları ve iyi performansları nedeniyle, çoğu insan yapımı su kanalları trapez şekillidir.



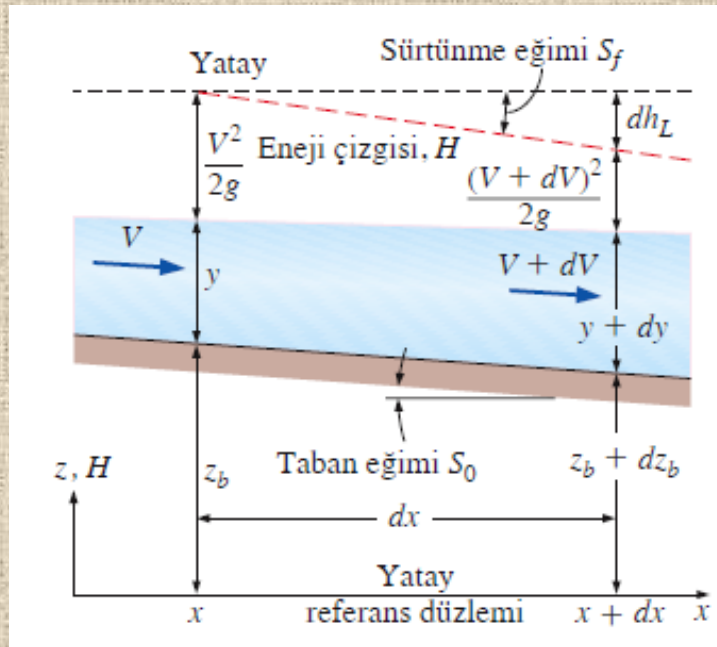
13-7 ■ YAVAŞ DEĞİŞEN AKIŞ

Yavaş Değişen Akış (YDA): Bu akış, akış derinliğindeki ve hızındaki yavaş değişimlerin (ani değişimler yoktur ve eğimler küçüktür) yanı sıra, daima düzgün kalan bir serbest yüzeyi (süreksizlikler ya da zigzaglar yoktur) ile tanınır.

Bir kanalın taban eğimindeki veya en-kesitindeki bir değişim, ya da akış yolundaki bir engel, kanaldaki üniform akışın yavaş veya hızlı değişen akış haline gelmesine yol açabilir.

$$\frac{dH}{dx} = \frac{d}{dx} \left(z_b + y + \frac{V^2}{2g} \right) = \frac{dz_b}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{V}{g} \frac{dV}{dx}$$

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{dh_L}{dx} = -S_f \quad \text{ve} \quad \frac{dz_b}{dx} = -S_0$$



$$S_0 - S_f = \frac{dy}{dx} + \frac{V}{g} \frac{dV}{dx}$$

$$0 = bV \frac{dy}{dx} + yb \frac{dV}{dx} \rightarrow \frac{dV}{dx} = -\frac{V}{y} \frac{dy}{dx}$$

$$S_0 - S_f = \frac{dy}{dx} - \frac{V^2}{gy} \frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dx} - Fr^2 \frac{dy}{dx}$$

YDA denklemi:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2}$$

Bir açık kanaldaki yavaş değişen akışta (YDA) diferansiyel bir akış bölümü boyunca özelliklerin değişimi.



Froude sayısının 1 'den küçük ya da büyük oluşuna bağlı olarak, verilen S_0 ve S_f değerleri için dy/dx pozitif veya negatif olabilir.

Bu nedenle kritikaltı ve kritiküstü akışlardaki akışın davranışı zıttır.

Akış derinliği, $S_0 - S_f > 0$ için, kritikaltı akışta akış yönünde artarken, kritiküstü akışta ise azalmaktadır.

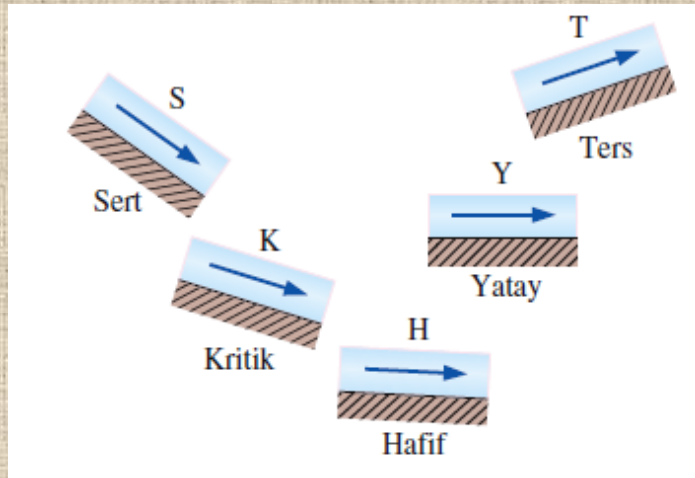
Yaklaşık olarak sabit su derinlikli ve en-kesitli yavaş akan Chicago nehri, $S_0 \approx S_f$ ve $dy/dx \approx 0$ olan üniform akıma bir örnektir.

Açık Kanallarda Sıvı Yüzeyi Profilleri, $y(x)$

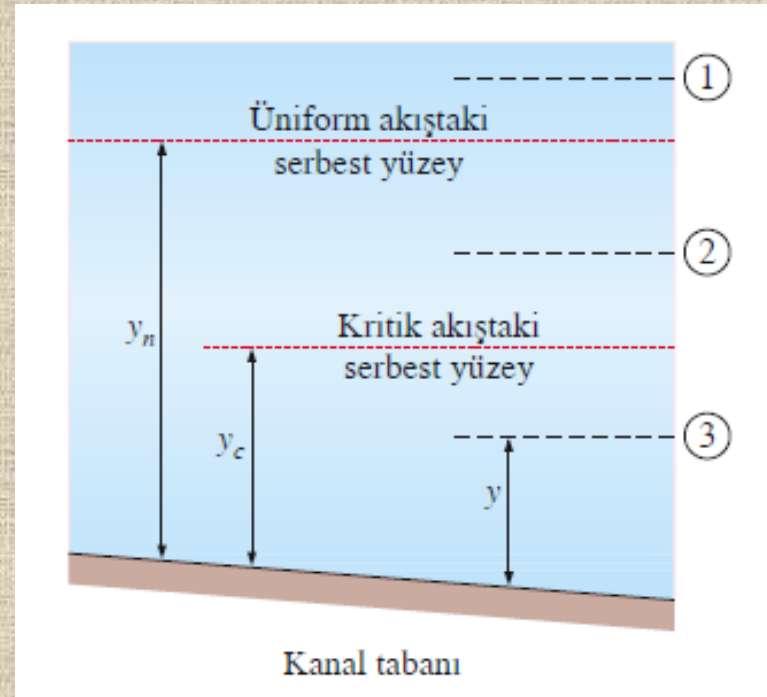
Belirli bir akış debisi ve kanal geometrisi için akış derinliğinin kestirilebilmesi önemlidir.

Akış derinliğinin aşağıakım yönündeki mesafeye göre değişimine ait grafik, akışın **$y(x)$ yüzey profili**ni verir.

Yüzey profillerinin yavaş değişen akış için genel karakteristikleri, taban eğimine ve akış derinliğinin kritik ve normal derinliklere göre durumuna bağlı olarak değişir.

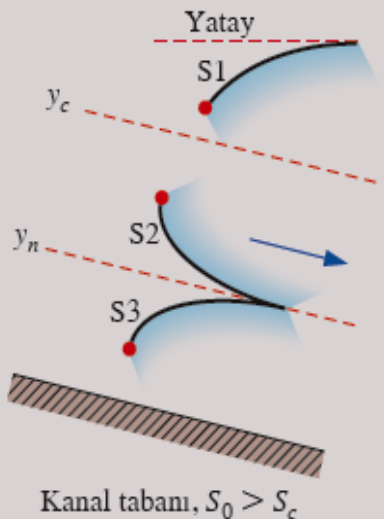
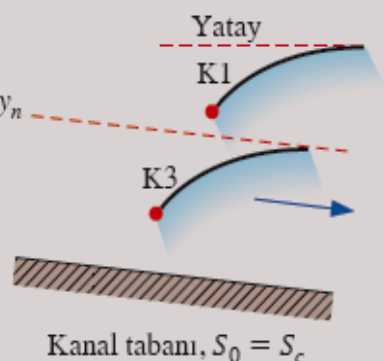


Farklı tipte eğimler için sıvı yüzey profillerine ait harf gösterimi: S, K, H, Y, T.

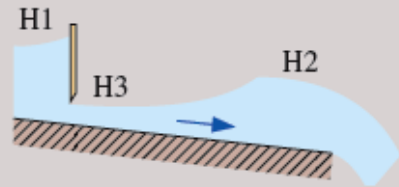


Sıvı yüzey profilleri için normal ve kritik derinliklere göre bağlı akış derinliğinin değerine dayanan sayı gösterimi: 1, 2 ve 3.

Yavaş değişen akışta yüzey profillerinin sınıflandırılması. Düşey ölçek büyük oranda abartılmıştır.

Kanal Eğimi	Profil Gösterimi	Akış Derinliği	Froude Sayısı	Profil Eğimi	Yüzey Profili
Sert (S) $y_c > y_n$ $S_0 < S_c$	S1	$y > y_c$	$Fr < 1$	$\frac{dy}{dx} > 0$	
	S2	$y_n < y < y_c$	$Fr > 1$	$\frac{dy}{dx} < 0$	
	S3	$y < y_n$	$Fr > 1$	$\frac{dy}{dx} > 0$	
Kritik (K) $y_c = y_n$ $S_0 < S_c$	K1	$y > y_c$	$Fr < 1$	$\frac{dy}{dx} > 0$	
	K3	$y < y_c$	$Fr > 1$	$\frac{dy}{dx} > 0$	

Hafif (H) $y_c < y_n$
 $S_0 < S_c$



H1

$$y > y_n$$

$$Fr < 1$$

$$\frac{dy}{dx} > 0$$

H2

$$y_c < y < y_n$$

$$Fr < 1$$

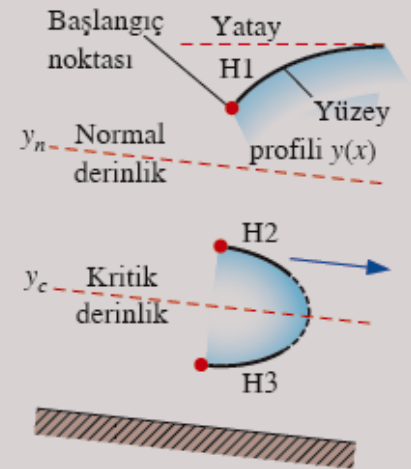
$$\frac{dy}{dx} < 0$$

H3

$$y < y_c$$

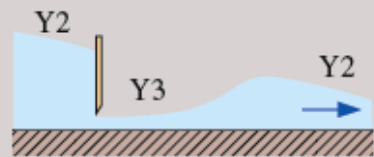
$$Fr > 1$$

$$\frac{dy}{dx} > 0$$



Kanal tabanı, $S_0 < S_c$

Yatay (Y) $y_n \rightarrow \infty$
 $S_0 = 0$



Y2

$$y > y_c$$

$$Fr < 1$$

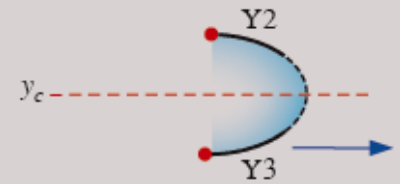
$$\frac{dy}{dx} < 0$$

Y3

$$y < y_c$$

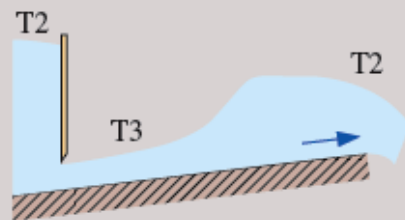
$$Fr > 1$$

$$\frac{dy}{dx} > 0$$



Kanal tabanı, $S_0 = 0$

Ters (T) $S_0 < 0$
 y_n : yoktur



T2

$$y > y_c$$

$$Fr < 1$$

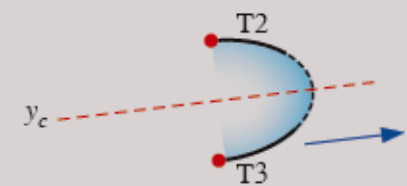
$$\frac{dy}{dx} < 0$$

T3

$$y < y_c$$

$$Fr > 1$$

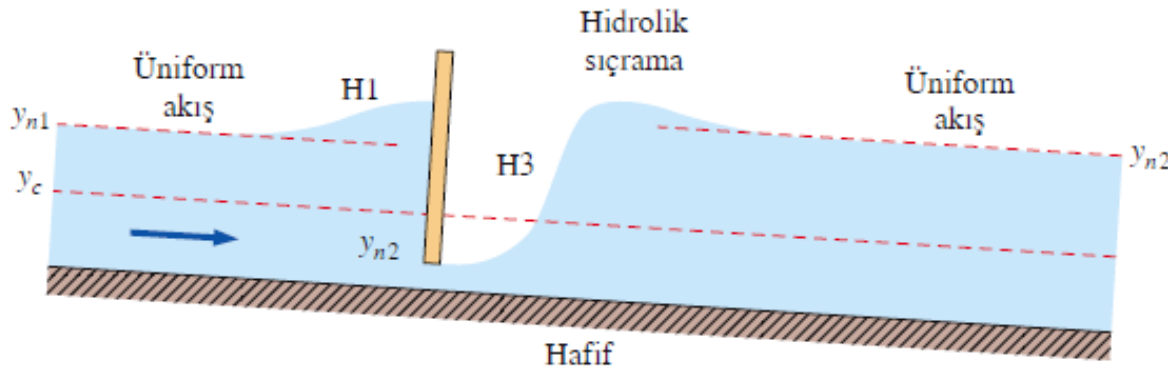
$$\frac{dy}{dx} > 0$$



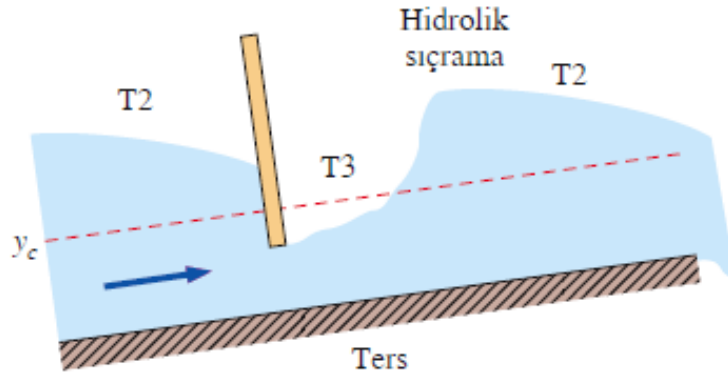
Kanal tabanı, $S_0 < 0$

Bazı Örnek Yüzey Profilleri

Tipik bir açık kanal sistemi; farklı eğimlere sahip çeşitli bölümler ile *geçiş adı verilen bağlantılardan* oluşur ve dolayısıyla akışın genel yüzey profili, daha önceden tanımlanan alt profillerin meydana getirdiği sürekli bir profildir.

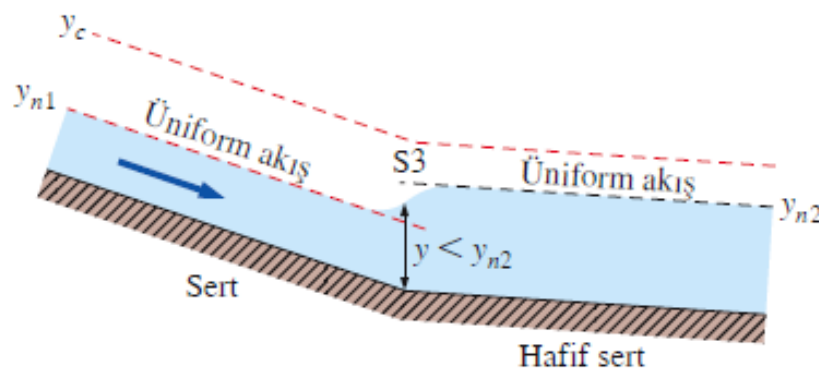


(a) Hafif eğimli bir açık kanalda kayar (sürgü) kapaktan akış

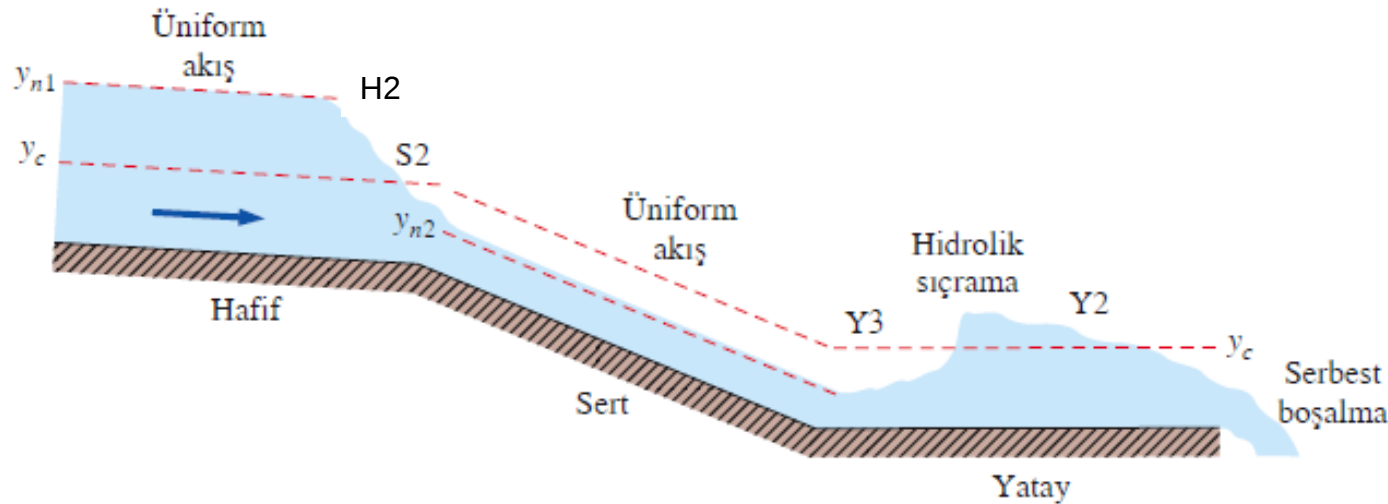


(b) Ters eğimli ve serbest boşalımlı bir açık kanalda kayar (sürgü) kapaktan akış

Açık kanal akışında yaygın olarak karşılaşılan bazı yüzey profilleri. Tüm akışlar soldan sağa doğrudur.



(c) Sert eğimden hafif sert eğime doğru değişen üniform kritiküstü akış



(d) Hafif eğimden sert eğime ve ardından yataya değişen serbest boşalımlı üniform kritikaltı akış

Açık kanal akışında yaygın olarak karşılaşılan bazı yüzey profilleri. Tüm akışlar soldan sağa doğrudur.

Yüzey Profilinin Sayısal Çözümü

Yüzey profili $y(x)$ 'in önceden kestirimi açık kanal sistemlerinin tasarımının önemli bir parçasıdır.

Kanal boyunca noktaların tanımlanması, yüzey profilinin belirlenmesi için iyi bir başlangıçtır. **Kontrol noktaları** adı verilen bu noktalardaki akış derinliği debiden yararlanılarak hesaplanabilir.

Kontrol noktalarındaki akış derinlikleri bir kez belirlendiğinde, genellikle aşağıdaki doğrusal olmayan diferansiyel denklemin sayısal integrali alınarak, yüzey profilinin yukarıakımı ve aşağıakımı belirlenebilir:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2}$$

Sürtünme eğimi S_f , üniform akış koşullarından ve Froude sayısı da kanal en-kesiti için uygun bir bağıntıdan belirlenir.

ÖRNEK 13-6 H1 Hafif Eğimli Yüzey Profilli Yavaş Değişen Akış

Birim genişliğinden geçen debi $1 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ ve Manning katsayısı $n = 0.02$ olan geniş bir dikdörtgen kanalda yavaş değişen su akışını göz önüne alınız. Kanalin eğimi 0.001 olup $x = 0$ konumundaki akış derinliği 0.8 m olarak ölçülmüştür. (a) Normal ve kritik akış derinliklerini bulunuz ve su yüzey profilini sınıflandırınız, (b) $0 \leq x \leq 1000 \text{ m}$ aralığı için yavaş değişen akış (YDA) denklemini sayısal olarak integre ederek $x = 1000 \text{ m}$ 'deki y akım derinliğini bulunuz. Farklı x değerlerindeki akım derinliklerini elde etmek için (b) şikkını tekrar çözünüz ve yüzey profilini çiziniz (Şekil 13-34).

ÇÖZÜM Dikdörtgen en-kesitli geniş bir dikdörtgen kanaldaki yavaşça değişen akış (YDA) göz önüne alınacaktır. Normal ve kritik akış derinlikleri, akış türü ve belirli bir akım derinliği hesaplanacaktır ve ayrıca yüzey profili çizilecektir.

Kabuller 1 Kanal geniş ve akım yavaş değişendir. 2 Taban eğimi sabittir. 3 Kanalin ıslak yüzeyinin pürüzlülüğü ve dolayısıyla sürtünme katsayısı sabittir.

Özellikler Kanalin Manning katsayısı $n = 0.02$ olarak verilmektedir.

Analiz (a) Kanalin geniş olduğu ifade edilmiştir, bu yüzden hidrolik yarıçap kanal derinliğine eşittir: $R_h \cong y$. Birim genişlik ($b = 1 \text{ m}$) için debi bilindiğinden, Manning denkleminde normal akım derinliği aşağıdaki gibi bulunur:

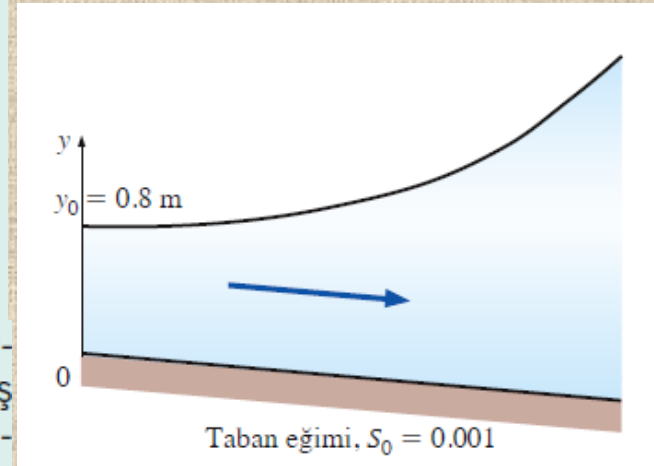
$$\dot{V} = \frac{a}{n} A_c R_h^{2/3} S_0^{1/2} = \frac{a}{n} (yb) y^{2/3} S_0^{1/2} = \frac{a}{n} b y^{5/3} S_0^{1/2}$$

$$y_n = \left(\frac{(\dot{V}/b)n}{a S_0^{1/2}} \right)^{3/5} = \left(\frac{(1 \text{ m}^2/\text{s})(0.02)}{(1 \text{ m}^{1/3}/\text{s})(0.001)^{1/2}} \right)^{3/5} = \mathbf{0.76 \text{ m}}$$

Bu akışa ait kritik derinlik

$$y_c = \frac{\dot{V}^2}{g A_c^2} = \frac{\dot{V}^2}{g (by)^2} \rightarrow y_c = \left(\frac{(\dot{V}/b)^2}{g} \right)^{1/3} = \left(\frac{(1 \text{ m}^2/\text{s})^2}{(9.81 \text{ m/s}^2)} \right)^{1/3} = \mathbf{0.47 \text{ m}}$$

olarak elde edilir. $x = 0$ 'da $y_c < y_n < y$ olduğundan, Tablo 13-3'ten bu yavaş değişen akış (YDA) esnasındaki su yüzey profilinin **H1** olacağı görülmektedir.



(b) Başlangıç şartı $y(0) = 0.8$ m olarak bilindiğinden, herhangi bir x konumundaki y akım derinliği, yavaş değişen akış (YDA) denkleminin sayısal integralinden bulunur:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2}$$

Burada geniş dikdörtgen kanal için

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} = \frac{\dot{V}/by}{\sqrt{gy}} = \frac{\dot{V}/b}{\sqrt{gy^3}}$$

olur ve sürtünme eğimi, üniform akış denkleminde $S_0 = S_f$ yazılarak hesaplanır.

$$\dot{V} = \frac{a}{n} by^{5/3} S_f^{1/2} \rightarrow S_f = \left(\frac{(\dot{V}/b)n}{ay^{5/3}} \right)^2 = \frac{(\dot{V}/b)^2 n^2}{a^2 y^{10/3}}$$

S_f 'nin bu değerini geniş bir dikdörtgen kanal için yavaş değişen akış (YDA) denkleminde yerine yazarak,

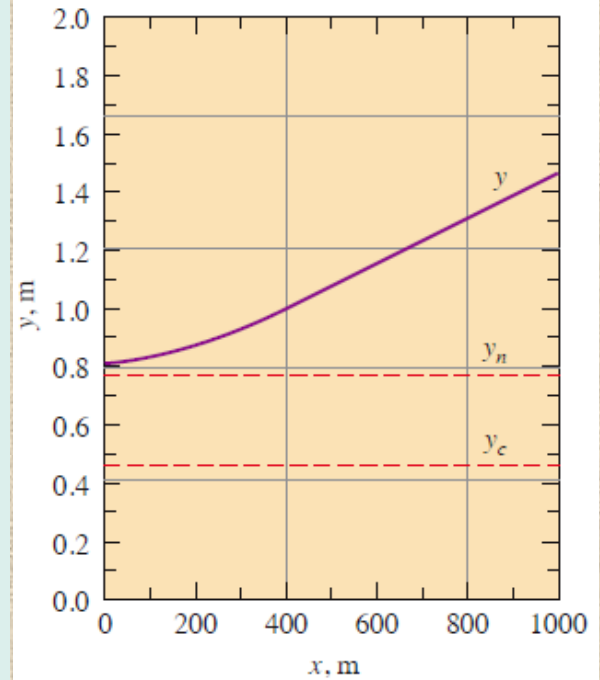
$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - (\dot{V}/b)^2 n^2 / (a^2 y^{10/3})}{1 - (\dot{V}/b)^2 / (gy^3)}$$

şeklinde yüksek dereceden lineer olmayan ve bu yüzden analitik olarak integre edilmesi zor, ancak imkansız olmayan bir denklem elde edilir. EES (Mühendislik Denklem Çözücüsü) veya Matlab gibi bir program kullanılarak bu tip lineer olmayan diferansiyel denklemleri sayısal olarak integre ederek çözmek günümüzde kolaydır. Bu düşünce ile $y(x_1) = y_1$ başlangıç şartlı lineer olmayan birinci mertebeden diferansiyel denklemin çözümü

$$y = y_1 + \int_{x_1}^{x_2} f(x,y) dx \text{ olup, burada; } f(x,y) = \frac{S_0 - (\dot{V}/b)^2 n^2 / (a^2 y^{10/3})}{1 - (\dot{V}/b)^2 / (gy^3)}$$

biçiminde ifade edilir. Burada $y = y(x)$ belirli bir x konumundaki su derinliğidir. Verilen sayısal değerler için bu problem EES (Mühendislik Denklem Çözücüsü) ile aşağıdaki gibi çözülebilir:

Kanal boyunca uzaklık, m	Su derinliği, m
0	0.80
100	0.82
200	0.86
300	0.90
400	0.96
500	1.03
600	1.10
700	1.18
800	1.26
900	1.35
1000	1.44



ŞEKİL 13-35

Örnek 13-6'da incelenen yavaş değişen akış (YDA) problemi için akım derinliği ve yüzey profili.

Hac = 1 “m³/s, birim genişlik, (b = 1) için hacimsel debi”

b = 1 “m, kanalın genişliği”

n = 0.02 “Manning katsayısı”

S₀ = 0.001 “kanalın eğimi”

g = 9.81 “yerçekimi ivmesi, m/s²”

x₁ = 0; y₁ = 0.8 “m, başlangıç şartı”

x₂ = 1000 “m, kanalın uzunluğu”

f_{xy} = (S₀ - ((Vol/b)² * n² / y^(10/3))) / (1 - (Vol/b)² / (g * y³)) “integre edilecek YDA denklemi”

y = y₁ + integral(f_{xy}, x, x₁, x₂) “otomatik adım büyüklüklü integral denklemi”

Boş bir EES (Mühendislik Denklemler Çözücüsü) ekranına yukarıdaki mini programı kopyalayıp, 1000 m konumundaki su derinliği hesaplanırsa aşağıdaki sonuç bulunur:

$$y(x_2) = y(1000\text{m}) = 1.44 \text{ m}$$

Fonksiyonun integralinin otomatik ayarlanan bir adım kullanılarak belirlenen sınırlar arasında sayısal yöntemle alındığına dikkat ediniz. Kanal boyunca farklı konumlardaki su derinlikleri farklı x₂ değerlerinde hesaplamaları tekrarlayarak elde edilir. Sonuçlar çizilirse Şekil 13–34’deki gibi bir yüzey profil elde edilir. EES’nin eğri uydurma özelliği kullanılarak akım derinliği verilerini ifade etmek için aşağıdaki gibi ikinci dereceden polinom şeklinde bir eğri de uydurulabilir:

$$y_{\text{yaklaşık}}(x) = 0.7930 + 0.0002789x + 3.7727 \times 10^{-7}x^2$$

Bu eğri uydurma formülünden elde edilen akım derinliği sonuçlarının, tablo halinde verilen verilerden %1’den daha fazla sapmadığı gösterilebilir.

İrdeleme Grafikten bulunan sonuç, H1 yüzey profilinin aşağıakım yönünde su derinliğinin artması gerektiğini ifade eden Tablo 13–3 yardımıyla yapılan nicelik tahminini doğrulamaktadır. Bu problem Şekil 13–36’da verilen kod kullanılarak Matlab gibi diğer programlar ile de çözülebilir.

```
clear all
domain=[0 1000]; % limits on integral
s0=.001; % channel slope
n=.02; % Manning roughness
q=1; % per-unit-width flowrate
g=9.81; % gravity (SI)
y0=.8; % initial condition on depth
[X,Y]=ode45('simple_flow_derivative',
[domain(1) domain (end)],y0,
[],s0,n,q,g,domain);
```

```
plot(X,Y,'k')
axis([0 1000 0 max(Y)])
xlabel('x (m)');ylabel('y (m)');
*****
```

```
function
yprime=simple_flow_
derivative(x,y,flag,s0, n,q,g, (domain)
yprime=(s0-n.^2*q.^2./y.^(10/3))./(1-
q.^2/g./y.^3);
```

ŞEKİL 13–36

Örnek 13–6’da incelenen yavaş değişen akış (YDA) problemini çözmek için kullanılan bir Matlab programı.

ÖRNEK 13-7 Kanal Eğiminin Sınıflandırılması

Su, yüzeyleri perdahsız betonla kaplanmış dikdörtgen bir kanalda üniform olarak akmaktadır. Kanal genişliği 6 m, akış derinliği 2 m ve taban eğimi 0.004'tür. Bu akış için kanalın hafif mi, kritik mi yoksa sert eğimli mi olduğunu belirleyiniz (Şekil 13-37).

ÇÖZÜM Su, açık bir kanalda üniform olarak akmaktadır. Bu akış için kanal eğiminin hafif mi, kritik mi yoksa sert mi olduğu belirlenecektir.

Kabuller 1 Akış daimi ve üniformdur. 2 Taban eğimi sabittir. 3 Kanalın ıslak yüzeyinin pürüzlülüğü ve dolayısıyla sürtünme katsayısı sabittir.

Özellikler Perdahsız beton yüzeyli bir açık kanal için Manning katsayısı $n = 0.014$ 'tür.

Analiz En-kesit alanı, çevre ve hidrolik yarıçap aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$A_c = yb = (2 \text{ m})(6 \text{ m}) = 12 \text{ m}^2$$

$$p = b + 2y = 6 \text{ m} + 2(2 \text{ m}) = 10 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{12 \text{ m}^2}{10 \text{ m}} = 1.2 \text{ m}$$

Akış debisi ise Manning denkleminde,

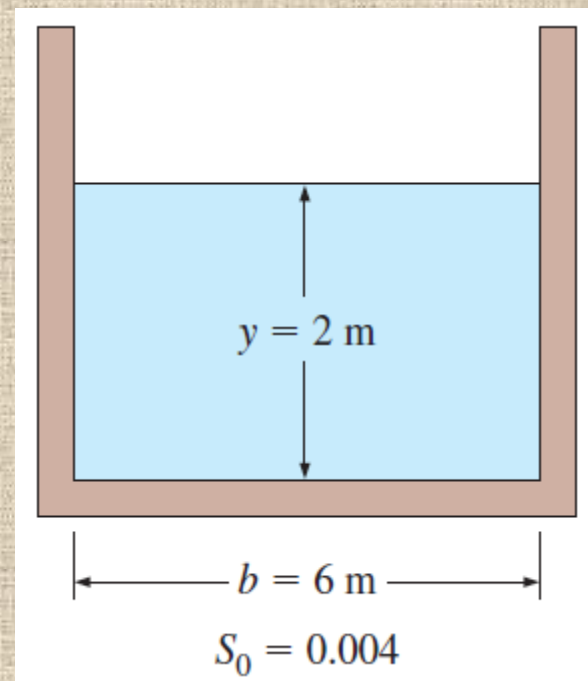
$$\dot{V} = \frac{a}{n} A_c R_h^{2/3} S_0^{1/2} = \frac{1 \text{ m}^{1/3}/\text{s}}{0.014} (12 \text{ m}^2)(1.2 \text{ m})^{2/3}(0.004)^{1/2} = 61.2 \text{ m}^3/\text{s}$$

olarak bulunur. Akışın üniform olduğu dikkate alınırsa, belirlenen akış debisindeki derinlik normal derinlik olup, bu yüzden $y = y_n = 2 \text{ m}$ 'dir. Bu akış debisi için kritik derinlik

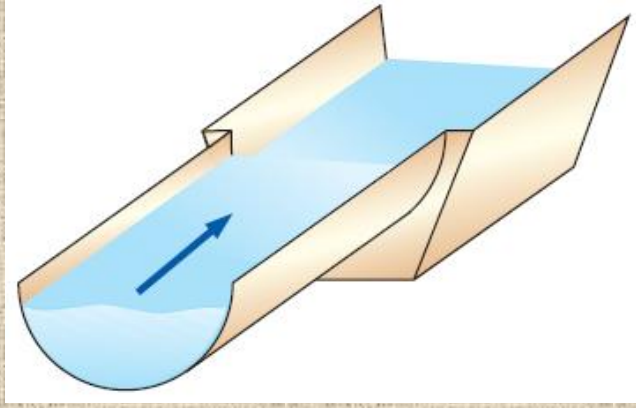
$$y_c = \frac{\dot{V}^2}{g A_c^2} = \frac{(61.2 \text{ m}^3/\text{s})^2}{(9.81 \text{ m/s}^2)(12 \text{ m}^2)^2} = 2.65 \text{ m}$$

olarak elde edilir. $y_n < y_c$ olduğundan, bu akış koşullarında kanal **sert** eğimli olarak sınıflandırılır ve akış kritiküstüdür.

İrdeleme Eğer akış derinliği 2.65 m'den daha fazla olsaydı, kanal için *hafif eğimli* denirdi. Bu nedenle taban eğimi tek başına, eğimi aşağı doğru olan bir kanalı; hafif, kritik ya da sert eğimli olarak sınıflandırmak için yeterli değildir.



13-8 ■ HIZLI DEĞİŞEN AKIŞ VE HİDROOLİK SIÇRAMA

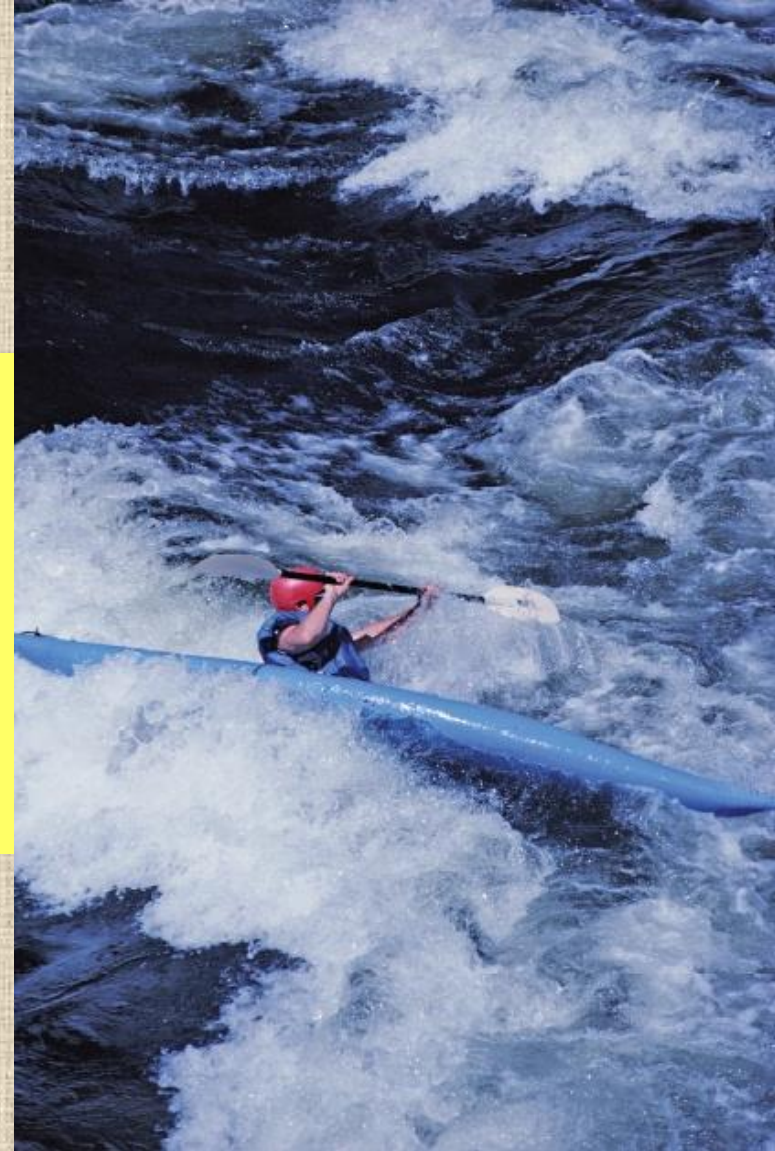


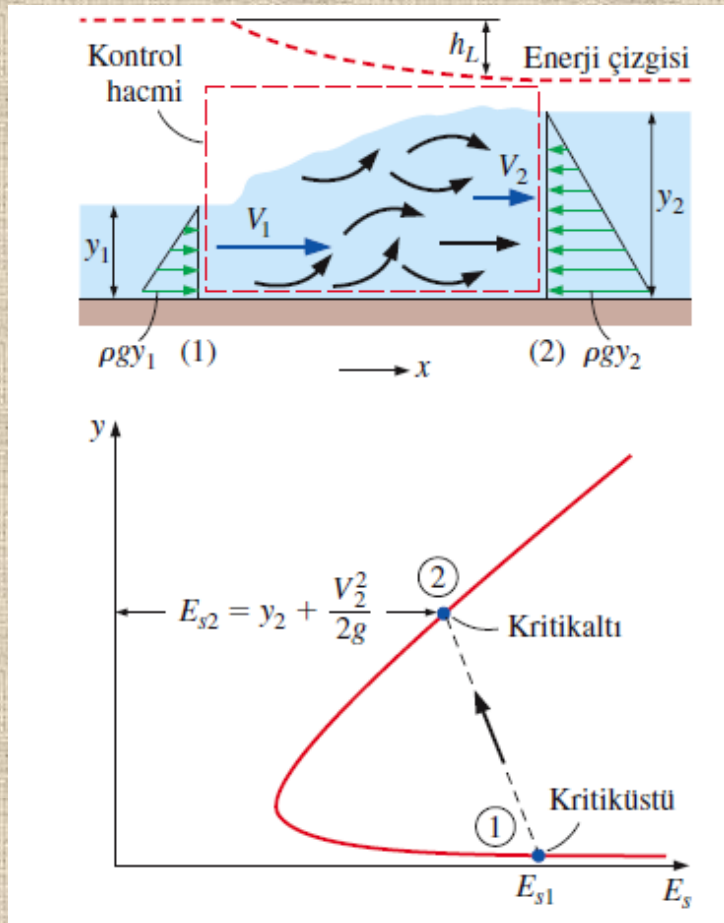
En-kesit alanının aniden değişmesi gibi akıştaki ani bir değişimde hızlı değişen akış görülür akış görülür.

Hızlı değişen akışlar genellikle karmaşıktır. Bunun nedeni, hızlı değişen akışlarda çok boyutluluk ve geçiş etkileri, ters akışlar ve akış ayrılmalarının önemli miktarda görülebilmesidir.

Bu yüzden hızlı değişen akışlar genellikle deneysel veya sayısal yöntemlerle incelenir. Ancak bu karmaşıklıklara rağmen, bazı hızlı değişen akışların tek-boyutlu yaklaşım kullanılarak makul bir doğrulukla analiz edilmesi mümkündür.

Bir akarsuyun hızla akan kısımlarında kanoya binildiğinde rafting yapan kişi yavaş değişen akış (YDA) ve hızlı değişen akış (HDA)'nın her ikisinin de çeşitli özellikleriyle karşılaşır. Hızlı değişen akış (HDA) daha heyecan verici olanıdır.





$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \quad \rho y_1 b V_1 = \rho y_2 b V_2 \quad y_1 V_1 = y_2 V_2$$

$$P_{1, \text{ort}} A_1 - P_{2, \text{ort}} A_2 = \dot{m} V_2 - \dot{m} V_1$$

$$P_{1, \text{ort}} = \rho g y_1 / 2$$

$$P_{2, \text{ort}} = \rho g y_2 / 2$$

$$A_1 = y_1 b, A_2 = y_2 b$$

$$\dot{m} = \dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \rho A_1 V_1 = \rho y_1 b V_1$$

$$y_1^2 - y_2^2 = \frac{2 y_1 V_1}{g} (V_2 - V_1)$$

$$V_2 = (y_1 / y_2) V_1$$

$$y_1^2 - y_2^2 = \frac{2 y_1 V_1^2}{g y_2} (y_1 - y_2)$$

$$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 + \frac{y_2}{y_1} - 2 \text{Fr}_1^2 = 0$$

$$\text{Fr}_1 = V_1 / \sqrt{g y_1}$$

Derinlik oranı:

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.5 (-1 + \sqrt{1 + 8 \text{Fr}_1^2})$$

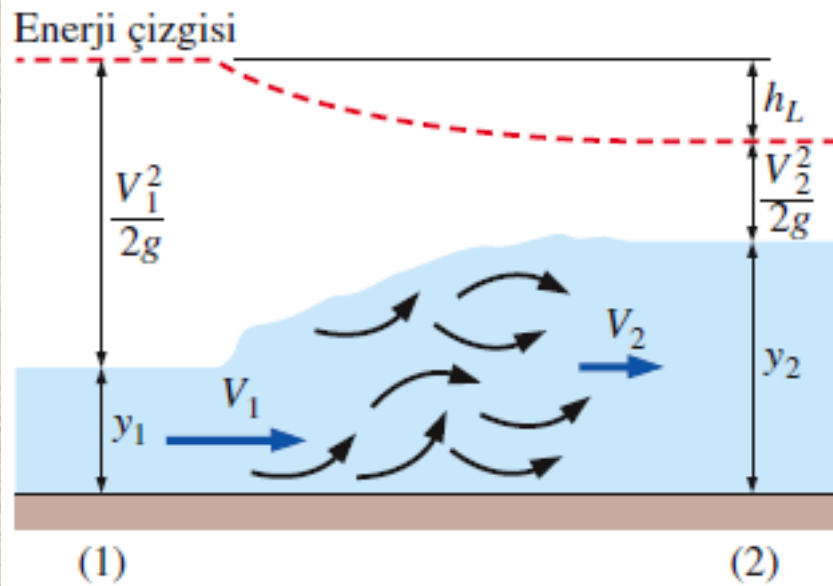
$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

$$h_L = y_1 - y_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} = y_1 - y_2 + \frac{y_1 \text{Fr}_1^2}{2} \left(1 - \frac{y_1^2}{y_2^2} \right)$$

Bir hidrolik sıçramanın şematik çizimi ve akış derinliği-ölgül enerji diyagramı (ölgül enerji azalmaktadır).

$$E_{s1} = y_1 + V_1^2/2g$$

$$\text{Enerji kayıp oranı} = \frac{h_L}{E_{s1}} = \frac{h_L}{y_1 + V_1^2/2g} = \frac{h_L}{y_1(1 + Fr_1^2/2)}$$



$$\text{Enerji kayıp oranı} = \frac{h_L}{E_{s1}} = \frac{h_L}{y_1 + V_1^2/2g}$$

Enerji kayıp (yitim) oranı; zayıf hidrolik sıçramalarda ($Fr_1 < 2$) yüzde bir kaçtan, şiddetli sıçramalarda ($Fr_1 > 9$) yüzde 85'e kadar çıkabilir.

Enerji kayıp (yitim) oranı, bir hidrolik sıçramada kaybolan mekanik enerjinin oranını gösterir.

Hidrolik sıçramaların sınıflandırılması

Kaynak: ABD Taşkın Önleme Dairesi (1955).

Yukarıakım Fr_1	Derinlik Oranı y_2/y_1	Eneji Kayıp Yüzdesi	Açıklama	Yüzey Profili
<1	1	0	<i>İmkânsız sıçrama.</i> Oluşması, termodinamiğin ikinci yasasına aykırıdır.	
1–1.7	1–2	<%5	<i>Dalgalı sıçrama</i> (veya <i>duran dalga</i>). Yüzey seviyesinde hafif yükselme. Enerji kaybı düşüktür. $Fr = 1.7$ civarında yüzey dalgaları başlar.	
1.7–2.5	2–3.1	%5–15	<i>Zayıf sıçrama.</i> Yüzey küçük dalgalarla yavaşça yükselir. Enerji kaybı düşüktür.	
2.5–4.5	3.1–5.9	%15–45	<i>Salınımlı sıçrama.</i> Tabandan giren akım jetlerinin neden olduğu çalkantılar, km'lerce yol alabilen ve toprak setlere hasar veren büyük dalgalar meydana getirir. Düşüm yataklarının tasarımında bundan kaçınılması gerekir.	
4.5–9	5.9–12	%45–70	<i>Daimi sıçrama.</i> Kararlı, iyi dengelenmiş ve aşağıakım şartlarına duyarsızdır. Bu sıçramada yoğun girdap hareketi ve yüksek seviyede enerji kaybı vardır. Önerilen tasarım aralığıdır.	
>9	>12	%70–85	<i>Kuvvetli sıçrama.</i> Şiddetli ve kesintilidir. Enerji kaybı yönünden etkilidir, ancak diğer tasarımlara göre daha fazla su yükseklikleri gerektirdiğinden ekonomik olmayabilir.	

ÖRNEK 13-8 Hidrolik Sıçrama

Bir kayar kapağın altından 10 m genişliğindeki yatay dikdörtgen bir kanala boşalan suyun hidrolik sıçramaya uğradığı gözlenmektedir. Sıçramadan önceki akış derinliği ve hızı sırasıyla 0.8 m ve 7 m/s'dir. Buna göre (a) sıçramadan sonraki akış derinliğini ve Froude sayısını, (b) yük kaybını ve enerji kaybı (yitim) oranını ve (c) hidrolik sıçramanın güç kaybı meydana getirme potansiyelini belirleyiniz (Şekil 13-42).

ÇÖZÜM Belirli bir derinliği ve hızı olan su, yatay bir kanalda hidrolik bir sıçramaya uğramaktadır. Sıçramadan sonraki derinlik ve Froude sayısı, yük kaybı ve enerji kaybı (yitim) oranı ile kayıp güç potansiyeli belirlenecektir.

Kabuller 1 Akış daimi ya da sanki-daimidir. 2 Kanal, uç etkileri ihmal edilebilecek kadar geniştir.

Özellikler Suyun yoğunluğu 1000 kg/m³'tür.

Analiz (a) Hidrolik sıçramadan önceki Froude sayısı,

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{7 \text{ m/s}}{\sqrt{(9.81 \text{ m/s}^2)(0.8 \text{ m})}} = 2.50$$

bulunur ki bu 1'den büyüktür. Dolayısıyla akış sıçramadan önce gerçekten de kritiküstüdür. Buna göre sıçramadan sonraki akış derinliği, hızı ve Froude sayısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

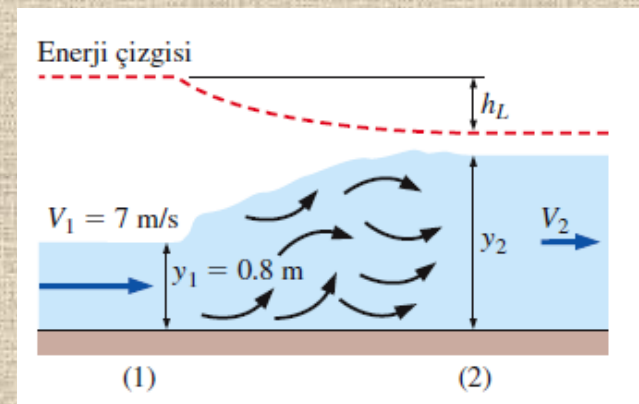
$$y_2 = 0.5y_1(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2}) = 0.5(0.8 \text{ m})(-1 + \sqrt{1 + 8 \times 2.50^2}) = \mathbf{2.46 \text{ m}}$$

$$V_2 = \frac{y_1}{y_2}V_1 = \frac{0.8 \text{ m}}{2.46 \text{ m}}(7 \text{ m/s}) = 2.28 \text{ m/s}$$

$$Fr_2 = \frac{V_2}{\sqrt{gy_2}} = \frac{2.28 \text{ m/s}}{\sqrt{(9.81 \text{ m/s}^2)(2.46 \text{ m})}} = \mathbf{0.464}$$

Dikkat edilirse sıçramadan sonra akış derinliği üç katına çıkarken Froude sayısı beşte-biri civarına düşmektedir.

(b) Yük kaybı, enerji denkleminde,



$$h_L = y_1 - y_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} = (0.8 \text{ m}) - (2.46 \text{ m}) + \frac{(7 \text{ m/s})^2 - (2.28 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)}$$

$$= \mathbf{0.572 \text{ m}}$$

olarak bulunur. Suyun sıçramadan önceki özgül enerjisi ve enerji kayıp (yitim) oranı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E_{s1} = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = (0.8 \text{ m}) + \frac{(7 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 3.30 \text{ m}$$

$$\text{Enerji kayıp oranı} = \frac{h_L}{E_{s1}} = \frac{0.572 \text{ m}}{3.30 \text{ m}} = \mathbf{0.173}$$

Dolayısıyla sıvının kullanılabilir yükünün (ya da mekanik enerjisinin) %17.3'ü hidrolik sıçramadaki sürtünme etkileri nedeniyle yitirilmektedir (ısı enerjisine dönüşmektedir).

(c) Suyun kütleli debisi,

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \rho b y_1 V_1 = (1000 \text{ kg/m}^3)(0.8 \text{ m})(10 \text{ m})(7 \text{ m/s}) = 56000 \text{ kg/s}$$

olarak hesaplanır. Bu durumda 0.572 m'lik bir yük kaybına karşılık gelen güç kaybı aşağıdaki gibi bulunur:

$$\dot{E}_{\text{kaybolan}} = \dot{m} g h_L = (56000 \text{ kg/s})(9.81 \text{ m/s}^2)(0.572 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right)$$

$$= 314000 \text{ N} \cdot \text{m/s} = \mathbf{314 \text{ kW}}$$

İrdeleme Sonuçlar, hidrolik sıçramanın oldukça yitirgen bir süreç olduğunu ve verilen durumda bu yolla 314 kW'lık gücün boşa harcandığını ortaya koymaktadır. Başka bir ifadeyle eğer su, kapaktan salıverilmek yerine bir hidrolik türbine yönlendirilseydi 314 kW'a kadar güç üretilebilirdi. Ancak bu potansiyel, faydalı güç yerine suyun sıcaklığında,

$$\Delta T = \frac{\dot{E}_{\text{kaybolan}}}{\dot{m} c_p} = \frac{314 \text{ kJ/s}}{(56000 \text{ kg/s})(4.18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})} = 0.0013^\circ\text{C}$$

artışa neden olan faydasız ısı enerjisine dönüştürülmektedir. 314 kW'lık bir direnç ısıtıcısının 56 000 kg/s debiyle akan suda aynı sıcaklık artışına neden olacağına dikkat ediniz.

13–9 ■ AKIŞIN KONTROLÜ VE ÖLÇÜLMESİ

Boru ve kanallardaki debiler, farklı tiplerdeki vanalar ile kontrol edilir.

Ancak açık kanallardaki sıvı akışı tamamen durdurulamaz ve bu nedenle kanal bir engel ile kısmen kapatılarak debi kontrolü yapılır.

Bu da sıvının ya engelin *üzerinden* ya da *altından* akması sağlanarak yapılır.

Savak: Sıvının üzerinden aktığı engele savak denir.

Kapak: Sıvının alt taraftaki ayarlanabilir açıklıktan geçtiği engele ise kapak denir.

Bu tür düzenekler, kanaldan geçen debiyi ölçmenin yanı sıra debiyi kontrol etmek için de kullanılabilir.

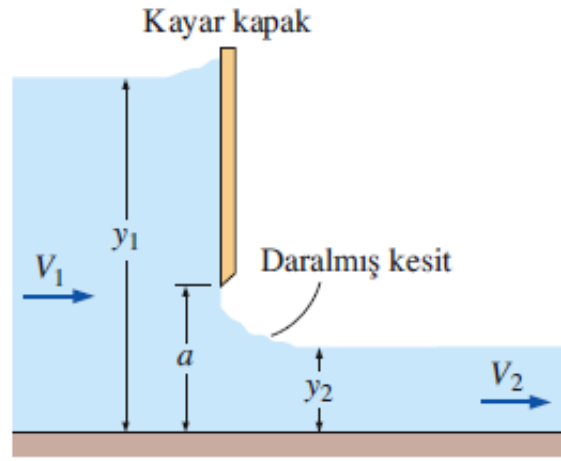


Suyun *üzerinden* akarak geçtiği bir engelin bulunduğu akış kontrol ünitelerine **savak** denir.

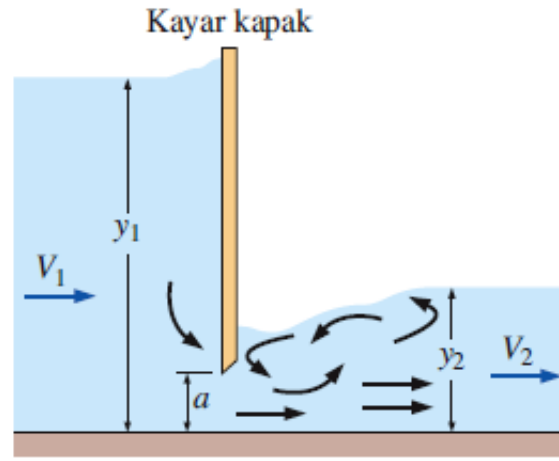


Kapaklar

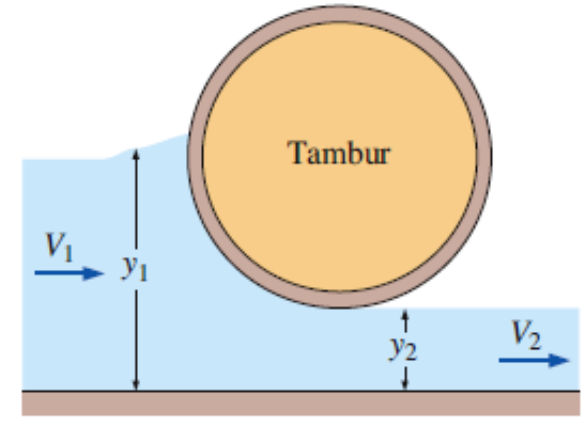
Debi kontrolü amacıyla yaygın olarak kullanılan kapaklar:



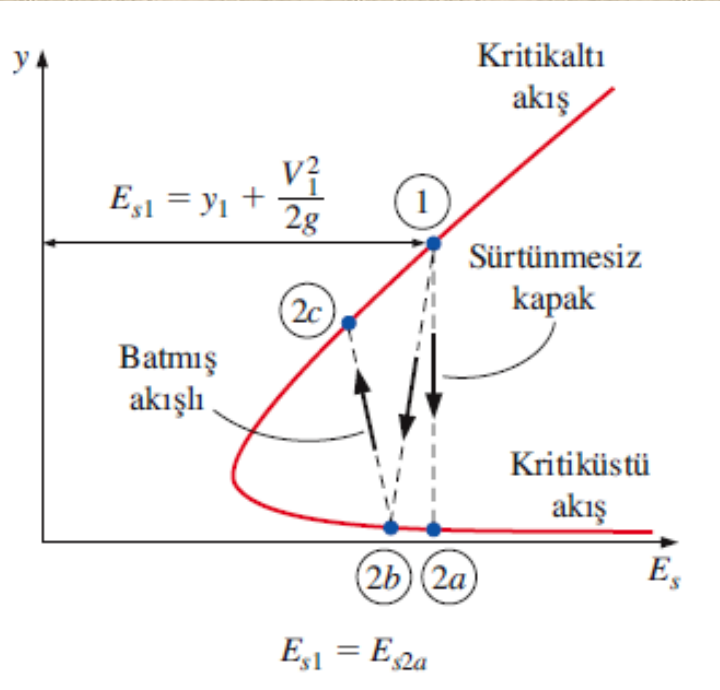
(a) Serbest akışlı kayar kapak



(b) Batmış akışlı kayar kapak



(c) Silindirik tamburlu kapak

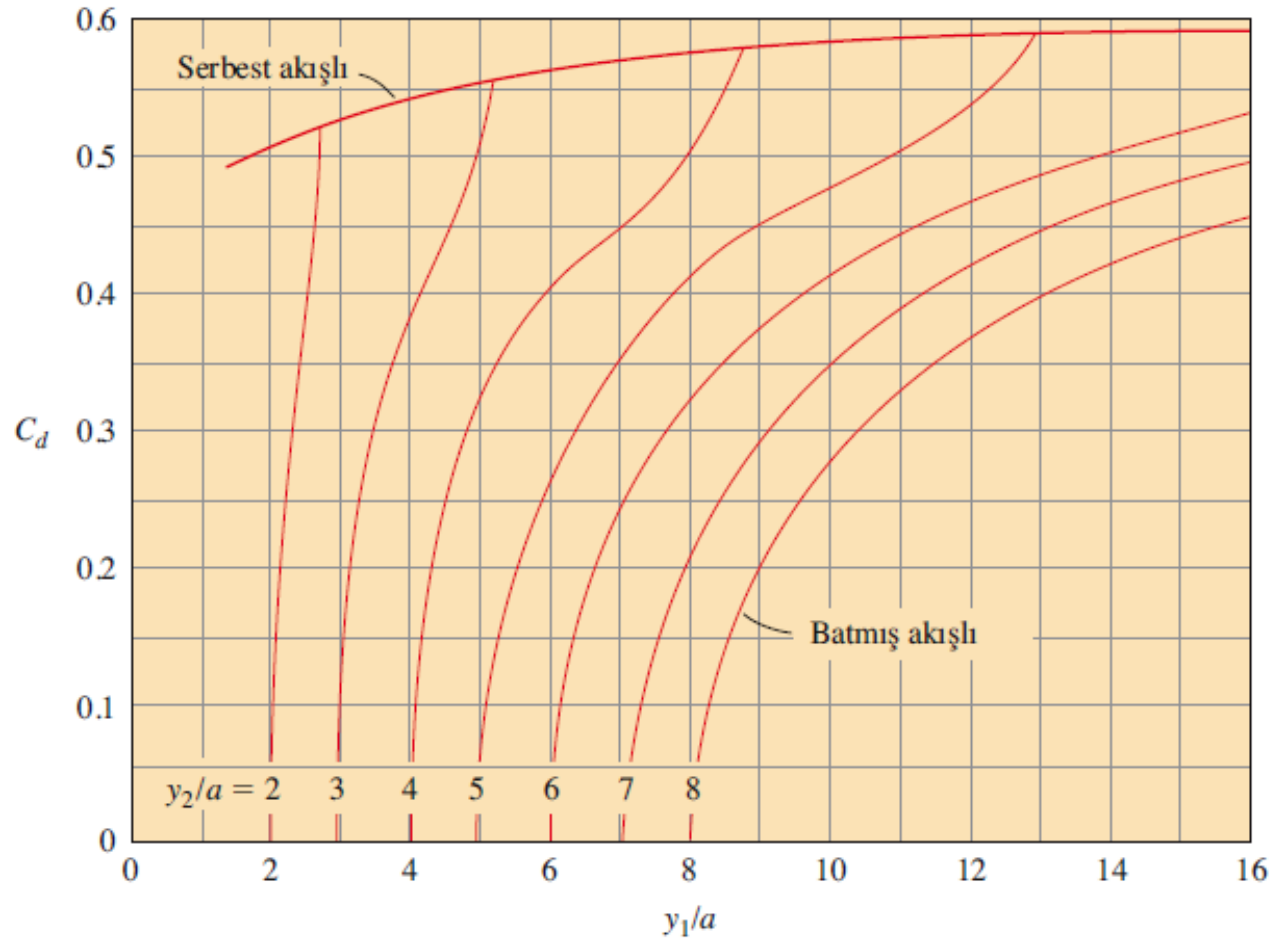


$$V = \sqrt{2gy_1}$$

$$V = C_d \sqrt{2gy_1} \quad \text{and} \quad \dot{V} = C_d b a \sqrt{2gy_1}$$

Debi katsayısı, C_d

Kapaklardaki akışın şematik gösterimi ve akış derinliği-ölgül enerji diyagramı.



Kapaklardaki batmış ve serbest akışlı durumlar için debi katsayıları.

Kapaktaki serbest akışlı durumda C_d değerleri çoğunlukla 0.5 ile 0.6 aralığındadır. C_d değerleri, batmış akışlı durumda ise beklenildiği gibi aniden düşmekte ve aynı yukarıakım şartları için debi azalmaktadır. Belirli bir y_1/a değeri için C_d 'nin değeri, artan y_2/a ile azalmaktadır.

Su, 3 m derinliğindeki hazneden 6 m genişliğindeki bir açık kanala, kanalın dibinde 0.25 m yüksekliğinde açıklığı bulunan bir kayar kapağın altından bırakılmaktadır. Akış derinliği, türbülans tamamen yatıştıktan sonra 1.5 m olarak ölçülmüştür. Buna göre boşalma debisini hesaplayınız (Şekil 13-47).

ÇÖZÜM Su bir hazneden bir kayar kapağın altından salınmaktadır. Belirtilen akış derinlikleri için boşalma debisi hesaplanacaktır.

Kabuller 1 Akış daimi ya da sanki-daimidir. 2 Kanal, uç etkileri ihmal edilebilecek kadar geniştir.

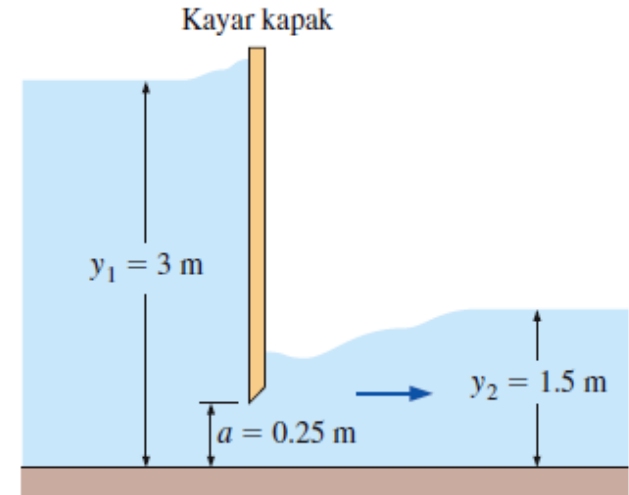
Analiz Derinlik oranı y_1/a ve daralma katsayısı y_2/a ,

$$\frac{y_1}{a} = \frac{3 \text{ m}}{0.25 \text{ m}} = 12 \quad \text{ve} \quad \frac{y_2}{a} = \frac{1.5 \text{ m}}{0.25 \text{ m}} = 6$$

olarak hesaplanır. Bu değerlere karşılık gelen debi katsayısı Şekil 13-46'dan $C_d = 0.47$ olarak okunur. Bu durumda boşalma debisi aşağıdaki gibi bulunur:

$$\dot{V} = C_d b a \sqrt{2gy_1} = 0.47(6 \text{ m})(0.25 \text{ m}) \sqrt{2(9.81 \text{ m/s}^2)(3 \text{ m})} = 5.41 \text{ m}^3/\text{s}$$

İrdeleme Serbest akış durumunda debi katsayısı $C_d = 0.59$ ve buna karşılık gelen debi de $6.78 \text{ m}^3/\text{s}$ olurdu. Dolayısıyla kayar kapaktaki akım batmış akışlı olduğunda debi önemli ölçüde azalmaktadır.



ŞEKİL 13-47

Örnek 13-9 için şematik çizim.

Savaklar

Sürtünme etkilerinin ihmal edilebilir derecede küçük olduğu (yük kaybı $h_L = 0$) akışta, toplam mekanik enerji sabit kalır ve yukarıdaki 1 kesiti ile aşağıdaki 2 kesiti arasındaki açık kanal akışı için bir-boyutlu enerji denklemi:

$$z_{b1} + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_{b2} + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{veya} \quad E_{s1} = \Delta z_b + E_{s2}$$

$$E_s = y + V^2/2g$$

$$\Delta z_b = z_{b2} - z_{b1}$$

Sabit b genişlikli kanal için:

$$\dot{V} = A_c V = byV = \text{sabit}$$

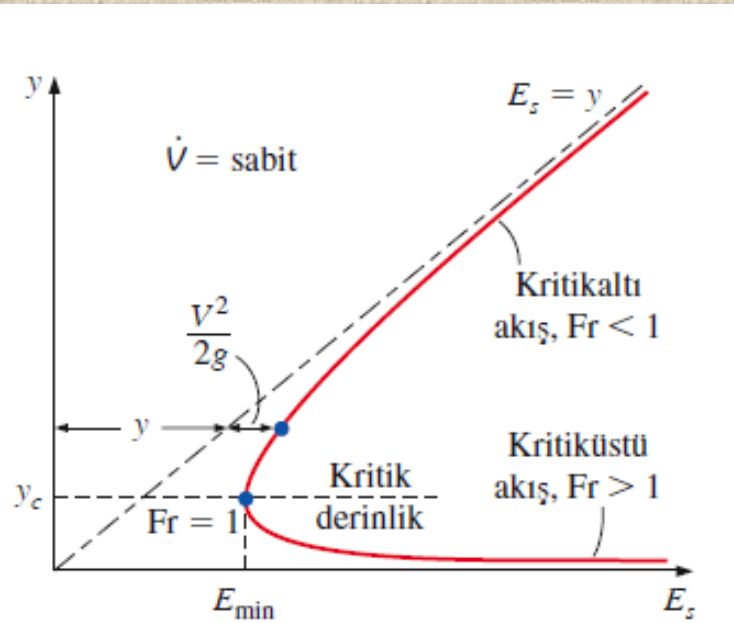
$$V = \dot{V}/A_c$$

$$E_s = y + \frac{\dot{V}^2}{2gb^2y^2}$$

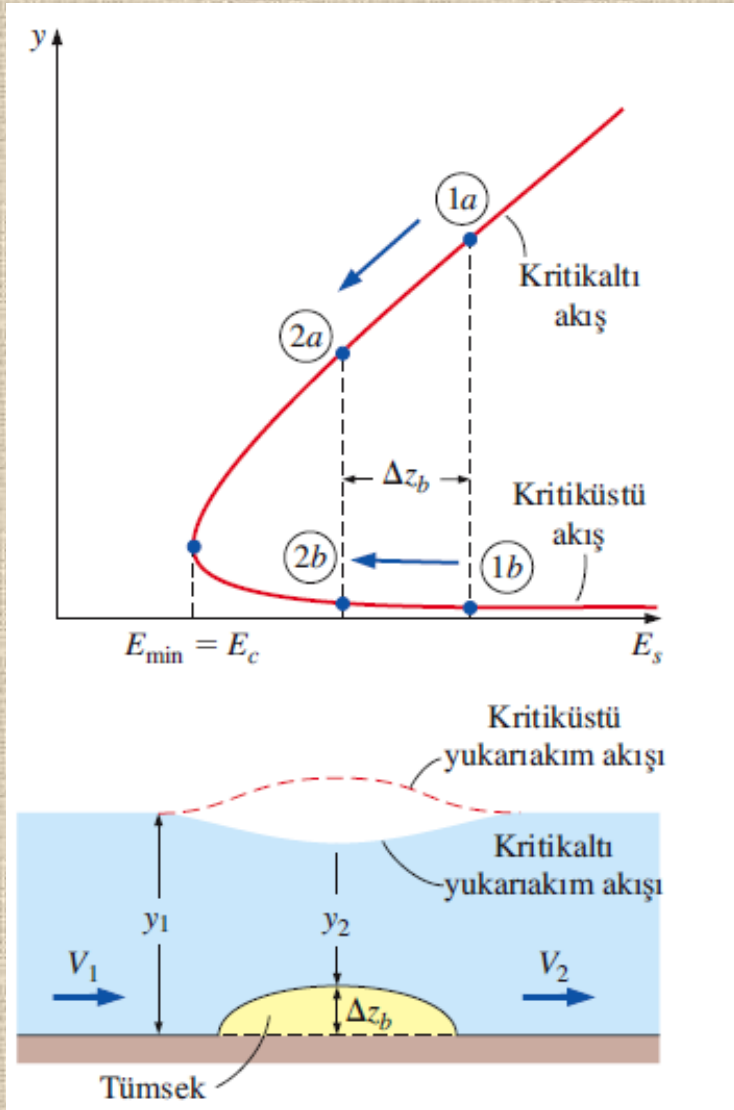
Bu diyagram, akış sırasında olabilecek durumları gösterdiği için son derece değerlidir.

1 en-kesitindeki yukarıdaki şartları belirlendikten sonra, $E_s - y$ diyagramı üzerindeki herhangi bir 2 en-kesitindeki sıvının hali, 1 noktasından geçen özgül enerji eğrisinin üzerindeki bir noktaya düşmek zorundadır.

Sabit genişlikli bir kanalda belirli bir debi için özgül enerji E_s 'nin y derinliği ile değişimi.



Bir Tümsek (Eşik) Üzerinden İhmal Edilebilir Sürtünmeli Akış



$$E_{s2} = E_{s1} - \Delta z_b$$

$$y_2 V_2 = y_1 V_1 \quad V_2 = (y_1/y_2) V_1$$

$$E_{s2} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \rightarrow E_{s1} - \Delta z_b = y_2 + \frac{V_1^2 y_1^2}{2g y_2^2}$$

$$y_2^3 - (E_{s1} - \Delta z_b) y_2^2 + \frac{V_1^2}{2g} y_1^2 = 0$$

Kritikaltı ve kritiküstü yukarıakım koşullarındaki akışların bir eşik (tümsek) üzerinden geçişlerinin şematik çizimi ve akış derinliği-özgül enerji diyagramı.

Geniş Kenarlı Savaklar

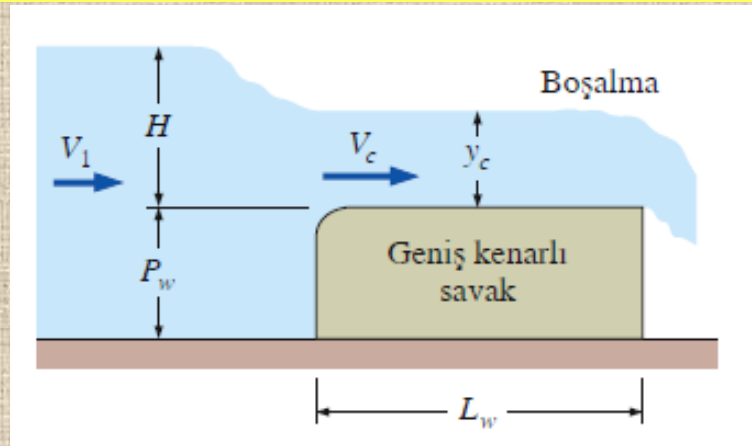
Bir açık kanalda yeterince yüksek bir engel üzerindeki akış daima kritiktir.

Debiyi ölçmek üzere açık kanallara kasten yerleştirilen bu tür engellere *savak* denir.

$$\dot{V} = A_c V = y_c b \sqrt{g y_c} = b g^{1/2} y_c^{3/2}$$

Geniş Kenarlı Savak: Üzerinde kritik akışın olduğu yatay bir tepeye sahip P_w yüksekliğinde, L_w uzunluğunda dikdörtgen en-kesitli bir engeldir.

Savak Yükü, H : Savağın üst yüzeyinin üzerindeki yukarıakım yüküdür.



Geniş-kenarlı bir savak üzerinden akış.

$$H + P_w + \frac{V_1^2}{2g} = y_c + P_w + \frac{V_c^2}{2g}$$

$$V_c = \sqrt{g y_c}$$

$$y_c = \frac{2}{3} \left(H + \frac{V_1^2}{2g} \right)$$

$$\dot{V}_{\text{ideal}} = b \sqrt{g} \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} \left(H + \frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2}$$

Geniş kenarlı savak:

$$\dot{V} = C_{\text{wd, geniş}} b \sqrt{g} \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} \left(H + \frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2}$$

$$C_{\text{wd, geniş}} = \frac{0.65}{\sqrt{1 + H/P_w}}$$

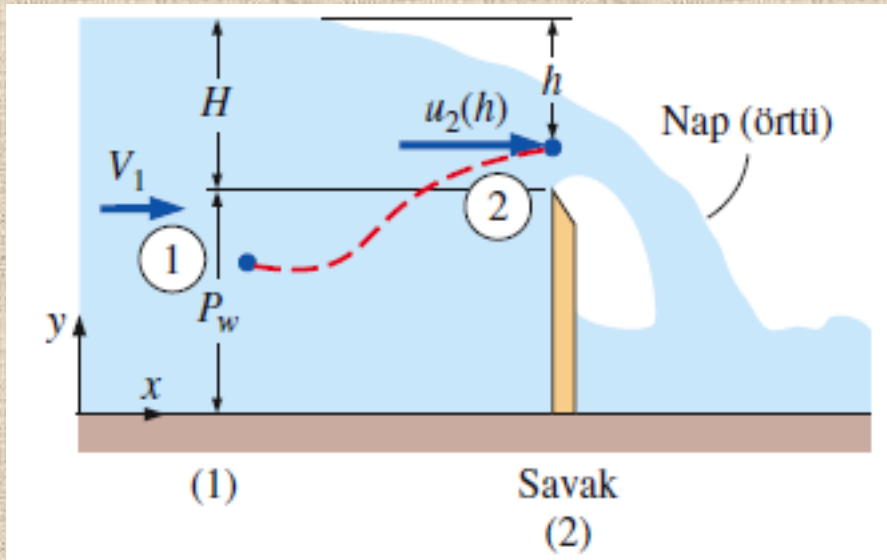
V_1 hızı düşük olan geniş kenarlı savak: $\dot{V} \cong C_{\text{wd, geniş}} b \sqrt{g} \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} H^{3/2}$

Keskin Kenarlı Savaklar

Keskin kenarlı savak, kanala yerleştirilen dikey bir levhadır ve debinin ölçülmesi için sıvıyı bir açıklıktan akmaya zorlar.

Savağın tipini açıklığın şekli belirler.

Üst kenarı düz olan çok ince dikey levha, üzerinden geçen akışın en-kesiti dikdörtgen olduğu için, dikdörtgen savak olarak anılırken; üçgen açıklığa sahip bir levha üçgen savak olarak anılır.



Keskin kenarlı bir savak üzerinden akış.

$$H + P_w + \frac{V_1^2}{2g} = (H + P_w - h) + \frac{u_2^2}{2g}$$

$$u_2 = \sqrt{2gh + V_1^2}$$

$$\dot{V} = \int_{A_c} u_2 dA_{c2} = \int_{h=0}^H \sqrt{2gh + V_1^2} w dh$$

$$\dot{V}_{ideal} = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} \left[\left(H + \frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} \right]$$

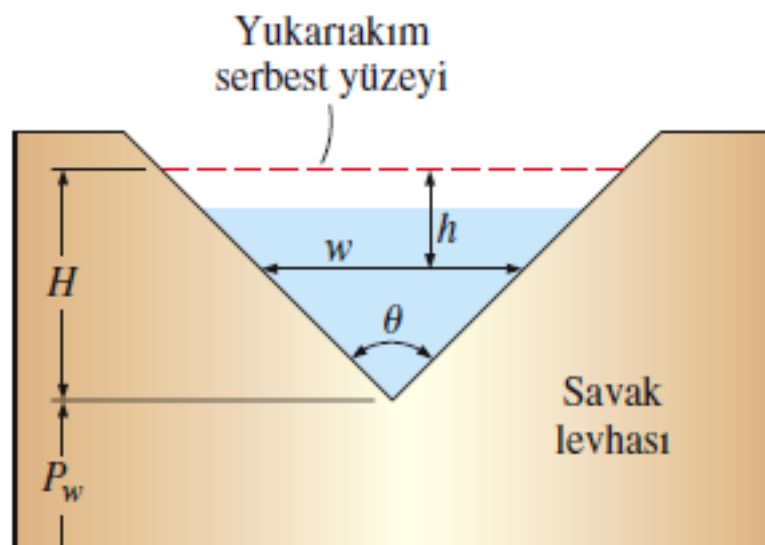
$$\dot{V}_{ideal, dikdörtgen} \cong \frac{2}{3} b \sqrt{2g} H^{3/2}$$

Keskin kenarlı dikdörtgen savak: $\dot{V}_{\text{dikdörtgen}} = C_{\text{wd, dikdörtgen}} \frac{2}{3} b \sqrt{2g} H^{3/2}$

$\frac{H}{P_w} \leq 2$ olmak koşuluyla $C_{\text{wd, dikdörtgen}} = 0.598 + 0.0897 \frac{H}{P_w}$

$\dot{V}_{\text{ideal, üçgen}} = \frac{8}{15} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{2g} H^{5/2}$

Keskin kenarlı üçgen savak: $\dot{V} = C_{\text{wd, üçgen}} \frac{8}{15} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{2g} H^{5/2}$



Üçgen (ya da V-çentikli) keskin kenarlı savak geometrisi. Aşağıakımdan yukarıakıma doğru bakıştaki görünüş.

ÖRNEK 13-10 Bir Tümsek (Eşik) Üzerindeki Kritikaltı Akış

Geniş yatay bir açık kanaldan akan su, kanal tabanındaki 15 cm yüksekliğinde bir eşik ile karşılaşmaktadır. Eşikten önceki akış derinliği 0.80 m ve hız 1.2 m/s olduğuna göre, eşik üzerinde su yüzeyinin alçalıp alçalmayacağını belirleyiniz (Şekil 13-53).

ÇÖZÜM Yatay açık bir kanaldan akan su bir eşik ile karşılaşmaktadır. Eşik üzerindeki su yüzeyinin alçalıp alçalmayacağı belirlenecektir.

Kabuller 1 Akış daimidir. 2 Sürtünme etkileri ihmal edilebileceği için mekanik enerji kaybı yoktur. 3 Kanal, uç etkileri ihmal edilebilecek kadar geniştir.

Analiz Yukarıdakının Froude sayısı ve kritik derinlik,

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{1.2 \text{ m/s}}{\sqrt{(9.81 \text{ m/s}^2)(0.80 \text{ m})}} = 0.428$$

$$y_c = \left(\frac{\dot{V}^2}{gb^2} \right)^{1/3} = \left(\frac{(by_1 V_1)^2}{gb^2} \right)^{1/3} = \left(\frac{y_1^2 V_1^2}{g} \right)^{1/3} = \left(\frac{(0.8 \text{ m})^2 (1.2 \text{ m/s})^2}{9.81 \text{ m/s}^2} \right)^{1/3} = 0.455 \text{ m}$$

olarak hesaplanır. $Fr < 1$ olduğundan akış kritikaltıdır ve bu nedenle eşik üzerinde akış derinliği azalır. Yukarıdakının özgül enerjisi,

$$E_{s1} = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = (0.80 \text{ m}) + \frac{(1.2 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.873 \text{ m}$$

olarak bulunur. Eşik üzerindeki akış derinliği,

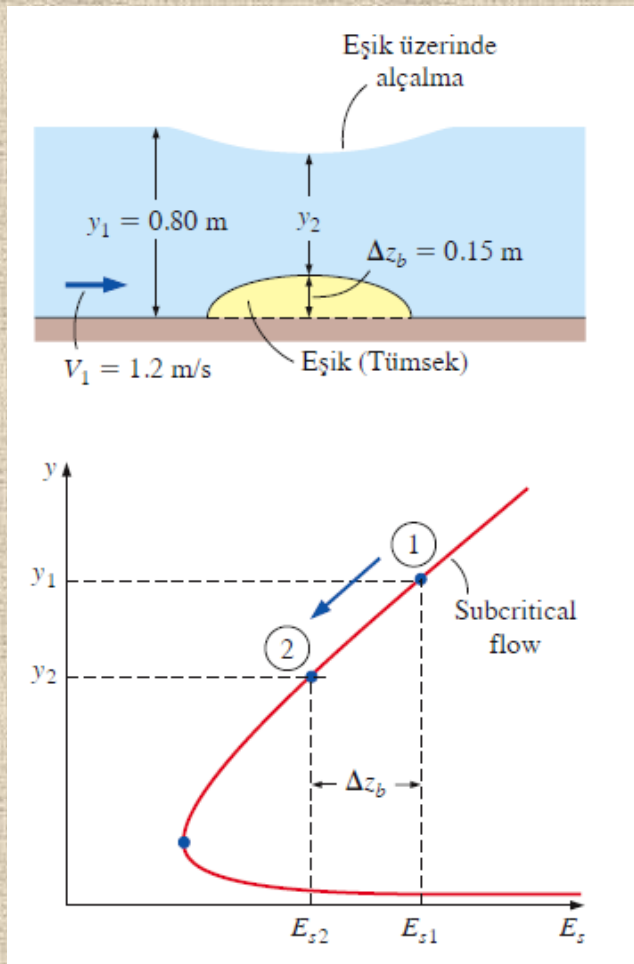
$$y_2^3 - (E_{s1} - \Delta z_b)y_2^2 + \frac{V_1^2}{2g}y_1^2 = 0$$

denklemden hesaplanabilir. Sayısal değerler yerine konursa,

$$y_2^3 - (0.873 - 0.15 \text{ m})y_2^2 + \frac{(1.2 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)}(0.80 \text{ m})^2 = 0$$

ya da

$$y_2^3 - 0.723y_2^2 + 0.0470 = 0$$



elde edilir. Bir denklem çözücü kullanılarak bu denklemin üç kökü; 0.59 m, 0.36 m ve -0.22 m olarak hesaplanır. Fiziksel açıdan imkânsız olduğu için negatif sonuç atılır. Kritik derinlikten küçük olduğu ve sadece kritiküstü akışta görülebileceği için 0.36 m sonucu da atılır. Böylece eşik üzerindeki akış derinliği için tek anlamlı sonuç $y_2 = 0.59$ m'dir. Bu durumda tümsek üzerinde su yüzeyinin kanal tabanından yüksekliği $\Delta z_b + y_2 = 0.15 + 0.59 = 0.74$ m olur ve bu da $y_1 = 0.80$ m'den daha küçüktür. Dolayısıyla tümsek üzerinde su yüzeyi,

$$\text{Alçalma} = y_1 - (y_2 + \Delta z_b) = 0.80 - (0.59 + 0.15) = \mathbf{0.06 \text{ m}}$$

kadar **alçalmıştır**.

İrdeleme $y_2 < y_1$ olmasının su yüzeyinin mutlaka alçalacağı anlamını taşımadığına dikkat edilmelidir (su yüzeyi bu durumda da eşik üzerinde yükselmiş olabilir). Eşik üzerindeki su yüzeyi sadece $y_1 - y_2$ farkı eşik yüksekliği Δz_b 'den büyük olduğunda alçalır. Ayrıca alçalmanın gerçek değeri, analizde göz ardı edilen sürtünme etkilerinden dolayı 0.06 m'den farklı olabilir.

ÖRNEK 13-11 Savak İle Debi Ölçülmesi

Genişliği 5 m olan yatay bir açık kanaldaki su debisi 0.60 m yüksekliğinde ve kanal ile aynı genişlikteki keskin kenarlı bir dikdörtgen savak ile ölçölmektedir. Yukarıakım tarafındaki su derinliği 1.5 m olduğuna göre suyun debisini hesaplayınız (Sekil 13-54).

ÇÖZÜM Üzerine keskin kenarlı dikdörtgen bir savak yerleştirilen yatay bir açık kanalın yukarıakımındaki su derinliği ölçölmüştür. Debi belirlenecektir.

Kabuller 1 Akış daimidir. 2 Yukarıakımın hız yükü ihmal edilebilir. 3 Kanal, uç etkileri ihmal edilebilecek kadar geniştir.

Analiz Savak yükü,

$$H = y_1 - P_w = 1.5 - 0.60 = 0.90 \text{ m}$$

ve savak debi katsayısı,

$$C_{wd, \text{dikdörtgen}} = 0.598 + 0.0897 \frac{H}{P_w} = 0.598 + 0.0897 \frac{0.90}{0.60} = 0.733$$

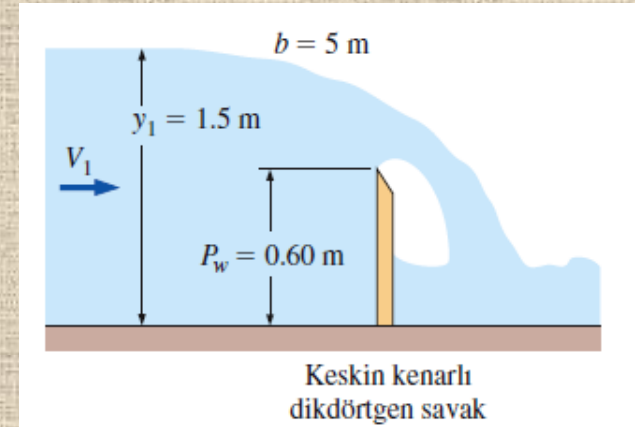
olarak bulunur. $0.9/0.6 = 1.5$ olduğ u için $H/P_w < 2$ koşulu sağlanmıştır. Bu durumda kanaldan geçen su debisi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{dikdörtgen}} &= C_{wd, \text{dikdörtgen}} \frac{2}{3} b \sqrt{2gH^{3/2}} \\ &= (0.733) \frac{2}{3} (5 \text{ m}) \sqrt{2(9.81 \text{ m/s}^2)(0.90 \text{ m})^{3/2}} \\ &= 9.24 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

İrdeleme Yukarıakım hızı ve yükü,

$$V_1 = \frac{\dot{V}}{by_1} = \frac{9.24 \text{ m}^3/\text{s}}{(5 \text{ m})(1.5 \text{ m})} = 1.23 \text{ m/s} \quad \text{ve} \quad \frac{V_1^2}{2g} = \frac{(1.23 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.077 \text{ m}$$

olarak bulunur. Bu değer, savak yükünün %8.6'sına karşılık gelmektedir ve önemli bir miktardır. Yukarıakımın hız yükü de hesaba katılırsa debi 10.2 m³/s olur ve bu da hesaplanan değerden yaklaşık %10 daha fazladır. Bu nedenle savak yüksekliği P_w , savak yükü H 'den çok büyük olmadıkça, yukarıakımın hız yükünü de hesaba katmak yerinde olur.



Özet

- **AÇIK KANAL AKIŞLARININ SINIFLANDIRILMASI**
 - ✓ Üniorm ve Üniorm Olmayan (Değişen) Akışlar
 - ✓ Kanallarda Laminer ve Türbölanslı Akışlar
- **FROUDE SAYISI VE DALGA HIZI**
 - ✓ Yüzey Dalgalarının Hızı
- **ÖZGÜL ENERJİ**
- **KÜTLE VE ENERJİNİN KORUNUMU DENKLEMLERİ KANALLARDA ÜNİFORM AKIŞ**
 - ✓ Kritik Üniorm Akış
 - ✓ Üniorm Olmayan Çevre Kenarlı Kanallar ve Süperpozisyon Yöntemi
- **EN İYİ HİDROLİK EN-KESİTLER**
 - ✓ Dikdörtgen Kanallar, Trapez Kanallar
- **YAVAŞ DEĞİŞEN AKIŞ (YDA)**
 - ✓ Açık Kanallarda Sıvı Yüzeyi Profilleri, $y(x)$
 - ✓ Bazı Örnek Yüzey Profilleri
 - ✓ Yüzey Profiline Sayısal Çözümü
- **HIZLI DEĞİŞEN AKIŞ (HDA) VE HİDROLİK SIÇRAMA**
- **AKIŞIN KONTROLÜ VE ÖLÇÜLMESİ**
 - ✓ Kapaklar, Savaklar