

Kıvrımlı Alluvial Kanallara Yerleştirilen Yan Savakların Etrafındaki Yerel Oyulmalar

Fevzi ÖNEN*
Hayrullah AĞAÇCIOĞLU**

ÖZET

Bu çalışmada, hareketli tabana sahip kıvrımlı bir kanal boyunca yan savak mansabında oluşan yerel oyulma derinlikleri, nehir rejimli akım şartlarında ve yan savaktan serbest savaklanma durumları için, deneysel olarak incelenmiştir. Kayma gerilmesi ve hız alanlarındaki değişimlerden dolayı yan savağın mansap bölgesinde ana kanal eksenini civarında boyuna bar ve bu bar ile dış kıyı arasında bir oyulma çukuru oluşmaktadır. Temiz su oyulması halinde akım şiddetine bağlı olarak oyulma derinliği zamanla lineer olarak artmakta ve belli bir süre sonra asimptotik olarak devam etmektedir. Boyut analizi sonucunda rölatif denge oyulma derinliğinin; rölatif akım şiddeti, savak yükü, taban malzemesi tane büyüklüğü, yan savak uzunluğu ve kıvrım açısı boyutsuzlarına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Rölatif akım şiddeti (akımın hızı) 0.55'ten küçük olduğunda herhangi bir yerel oyulma görülmemiştir. Akım şiddetine bağlı olarak rölatif denge oyulma derinliğinin hemen hemen lineer arttığı ve akım şiddeti 1.0 için maksimum denge oyulma derinliğine ulaştığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda rölatif savak yükü, tane büyüklüğü ve yan savak uzunluğundaki artışla da rölatif denge oyulma derinliği artmaktadır. Kıvrımlı kanalda 30⁰'lik kıvrım açısında maksimum rölatif denge oyulma derinliği, 120⁰ ve 150⁰'de ise minimum oyulma derinlikleri elde edilmiştir.

ABSTRACT

Local Scours Around Side-Weirs Located on Alluvial Bends

An experimental investigation of the local depth of scour around the side-weirs located on the curved part of an alluvial channel, for sharp crested side weirs under subcritical flow condition is presented in this paper. At the downstream end of the side weir, a longitudinal bar in the middle of the channel and a scour hole close to the outer bank are formed because of the changes in the shear stress field and velocities. The depth of clear-water scour approaches asymptotically to equilibrium with time depending on the flow intensity. It is

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 04.04.2005 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2007 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Yıldız-İstanbul – fonen@yildiz.edu.tr

** Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Yıldız-İstanbul – agacci@yildiz.edu.tr

also found that the equilibrium depth of the scour depends on the dimensionless parameters of flow intensity, flow shallowness, weir crest height, side-weir length and bend angles. Although there is no scour for flow intensities less than 0.55, the equilibrium depth of scour increases almost linearly with increasing flow intensity and attains the maximum value at a depth when the flow intensity is equal to 1.0. The equilibrium depth of the scour also increases when other dimensionless parameters (flow shallowness, weir crest height and side-weir length) increase. In a curved channel, the equilibrium depth of the scour has the maximum value at $\theta=30^0$, and the minimum value at $\theta=120^0$ and 150^0 sections of the bend .

1. GİRİŞ

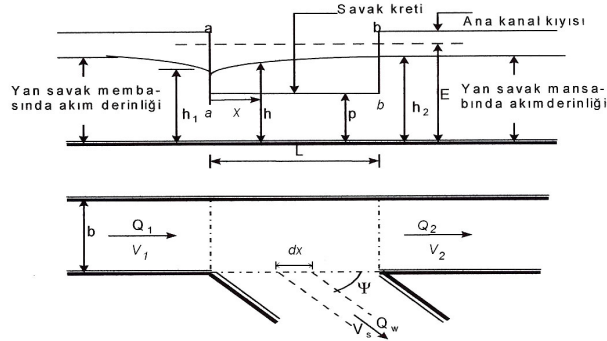
Yan savaklar, herhangi bir kanaldan ihtiyaç debisinin temini veya fazla suyun uzaklaştırılması için sulama, arazi drenajı ve kanalizasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kararlı kesitli kanallarda yan savaklarla ilgili çok sayıda araştırma yapılmasına rağmen, hareketli tabanlı kanallarda inşa edilen yan savaklarla ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Ancak doğal akarsu yatakları genellikle hareketli tabana sahiptir. Bu çalışmanın amacı, farklı akım şartlarında hareketli tabanlı kıvrımlı kanallara yerleştirilen yan savakların etrafında meydana gelen yerel oyulma derinliklerinin değişimini belirlemektir.

1.1 Yan Savak Akımı

Dikdörtgen en kesitli, prizmatik, yatay ve sürtünmesiz bir kanalda yan savak boyunca su yüzeyinin değişimi De Marchi [1] tarafından,

$$\frac{dh}{dx} = \frac{Qh \left\{ -\frac{dQ}{dx} \right\}}{gb^2h^3 - Q^2} \quad (1)$$

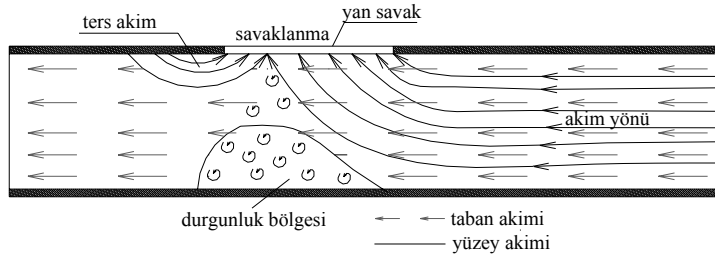
olarak verilmiştir. Burada, x , yan savağın başlangıcına olan mesafe (m), h , x kesitindeki akım derinliği (m), dh/dx , su yüzü profilinin değişimi, Q , x kesitindeki ana kanal debisi (m^3/s), b , ana kanal genişliği (m), g , yerçekimi ivmesi (m/s^2) ve dQ/dx , birim uzunluktan savaklanan debi ($m^3/s.m$) olarak verilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Yan savak akımının planı ve kesiti [4].

Ana kanaldaki nehir rejimli akım şartları için verilen bu denkleme göre, ana kanaldaki su derinliği yan savak başlangıcında minimuma ulaştıktan sonra yan savak ortasına kadar hızla yükselmekte daha sonra da artış oranı azalarak yan savak sonuna doğru su yüzü hemen hemen yatay olmaktadır.

Bazı araştırmacılar [2, 3, 4, 5 ve 6], nehir rejimli akım şartlarında yaptıkları deneysel çalışmalarda, yan savağın mansabında ters akım ve durgunluk bölgesi oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu araştırmacılara göre, ayrılma bölgesinin yeri ve büyüklüğü, yan savak membasındaki Froude sayısına ve yan savağın uzunluğuna bağlıdır. Ayrıca El-Khashab [1], yan savak boyunca mansaba doğru gidildikçe savaklanmadan dolayı ana kanaldaki akımın yavaşlayarak kinetik enerjisinin azaldığını (yan savak boyunca Froude sayısı azalmakta), yan savağa doğru yanal akımdan kaynaklanan sekonder akımın şiddetlendiğini ve yan savağın ilk yarısı sonunda ayrılma bölgesi, ikinci yarısında ise ters akımın meydana geldiğini belirtmiştir (Şekil 2). Araştırmacı, nehir rejimli akım durumunda sekonder akımın gücünün yan savak boyunca akım yönünde arttığını ve yan savaktan kanal genişliği kadar mesafe sonra azaldığını belirtmiştir. Yan savak yüksekliği ve yan savak uzunluğu sabit tutulduğunda, Q_w/Q_1 oranı (savaklanma oranı) arttıkça sekonder akımın gücünün arttığını belirtmiştir.



Şekil 2. Yan savak boyunca durgunluk bölgesi ve ters akım [4].

Kıvrımda meydana gelen akımın en önemli karakteristikleri, helikoidal akım ve maksimum hız yörüngesinin hareketidir. Helikoidal akım sürtünme, merkezkaç ve atalet kuvvetlerinin birbiriyle etkileşimi sonucu ortaya çıkmaktadır. Kanal tabanı yakınlarında akışkan zerreciklerinin hızları tabanda oluşan sınır direncinden dolayı büyük ölçüde azalır. Taban yakınlarında daha yavaş hareket eden akışkan zerrecikleri, merkezkaç ve basınç kuvvetleri arasında bir denge oluşturmak için daha keskin eğrisel bir yörünge izlerken, daha büyük hıza sahip olan yüzeydeki akışkan zerreciklerinin yörüngeleri kanalın tabanına doğru olur. Akışkan kütlesi, sürekliliğini devam ettirmek için dış kıyıda tabana doğru hareket ederken, iç kıyı boyunca tabandan yukarı doğru hareket eder. Bunun sonucu, teğetsel hız bileşenine ilave olarak kanal eksenine dik radyal hız bileşeni meydana gelir. Bu radyal hız bileşeni en kesit planında sekonder akımı oluşturur.

Shukry [7], helikoidal akımı, kıvrımda oluşan kabarma miktarını ve kıvrımdaki maksimum hız yörüngesini deneysel olarak araştırmıştır. Değişik akım şartlarına sahip farklı kıvrımlarda, helikoidal akımın etkisini ve büyüklüğünü ifade etmek için, helikoidal hareketin gücü olarak bilinen bir ifade kullanmıştır. Bu ifade, verilen bir en kesitte sekonder hareketin ortalama kinetik enerjisinin, akımın toplam kinetik enerjisine oranı olarak tarif edilmektedir. El-Khashab [3], doğrusal kanalda yanal savaklanmadan dolayı oluşan sekonder akımın şiddetinin kıvrımdakine benzer bir yapıda oluştuğunu belirtmiştir.

Kıvrımlı Alluvial Kanallara Yerleştirilen Yan Savakların Etrafındaki Yerel Oyulmalar

Choudhary ve Narasimhan [8], 180°'lik bir açık kanal kıvrımında nehir rejimli akım şartlarında helisoidal hareketin $\theta=15^\circ$ 'de dış kıyıda başladığını ve $\theta=135^\circ$ 'de dış kıyı bölgesinde maksimuma ulaştığını ve bu bölgede büyük kayma gerilmeleri oluştuğunu belirtmiştir. Ağaçcıoğlu ve Yüksel [4], kıvrımlı bir kanalın dış kıyısı boyunca yerleştirilen yan savak akımı ile ilgili çalışmada maksimum hız yörüngesinin doğrusal yaklaşım kanalında ana kanal ekseninde, kıvrım girişinden itibaren $\theta=30^\circ$ 'de iç kıyıda, $\theta=30^\circ$ 'den sonra ise $\theta=60^\circ$ 'de dış kıyıya yerleştiğini ve $\theta=120^\circ$ 'ye kadar dış kıyıda kaldığını, $\theta=120^\circ$ 'den sonra ise tekrar kanal eksenine döndüğünü ifade etmiştir. Araştırmacı maksimum hız yörüngesinin doğrultusunun $\theta=30^\circ$ civarında yanal akım doğrultusuna yakın olduğunu ifade etmiştir.

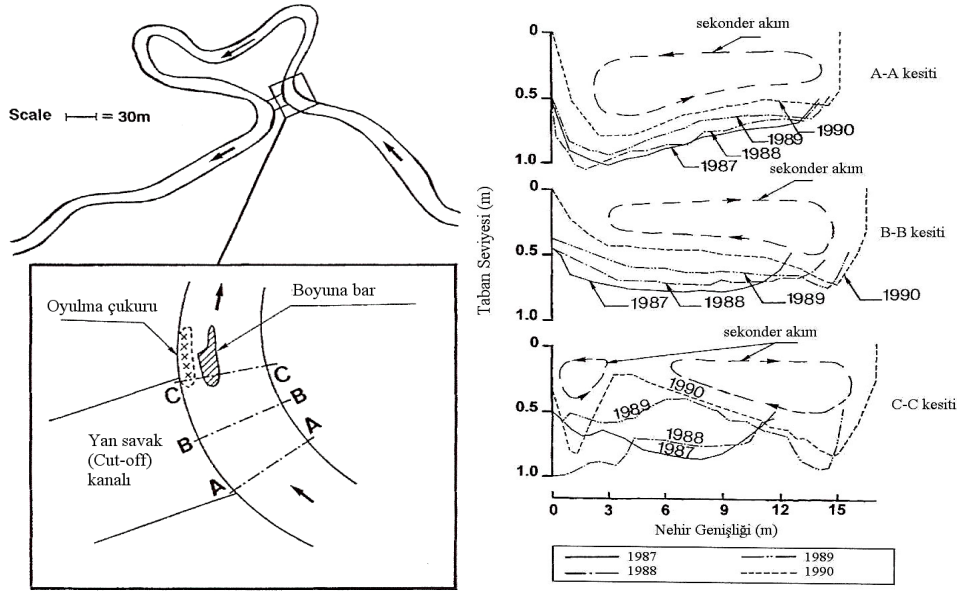
Neary ve Odgaard [9], $\theta=90^\circ$ 'lik bir açık kanal branşmanında (ayrımında) üç boyutlu akım yapısını deneysel olarak incelemişler ve akarsu kıvrımlarındaki akım yapısına benzer karakteristikler gösterdiğini belirtmişlerdir. Üç boyutlu akımın davranışının ana kanal pürüzlülüğüne ve yanal akım hızının ana kanal hızının oranına (savaklanma oranı) bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, ana kanaldan branş kanalına giren akımın önemli bir momentuma sahip olmasından dolayı ayrılma bölgesinin oluştuğunu; ayrılma bölgesinde hız, “eddy” ve döngülerin küçük olduğunu, yüzeydeki ayrılma bölgesinin tabandakinden daha küçük olduğunu ve taban yakınındaki hız vektörlerinin branş kanalına sapma açısının yüzeydekilere göre daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, akım çizgilerinin derinlik boyunca değişim gösterdiğini ve yüzeydekine oranla tabanda daha geniş bir bölgeyi kapladığını ifade etmişlerdir. Yüksek momentumdan dolayı yüzeydeki akım, ana akım yönünde hareketini sürdürürken tabandaki yavaş hareketli akımın branş kanalına yöneldiğini ve ana kanalda katı madde taşımını olması durumunda tabanda büyük bir katı madde yığılmasının oluşacağını belirtmişlerdir.

Fares [10 ve 11], kıvrımlı bir kanalda yanal savaklanma durumunda sınır kayma gerilmesinin karakteristik değişimini incelemiştir. Ayrıca kıvrımlı Allan Water nehrinin yan savak (cutoff) kesitinde taban topoğrafyasındaki değişimleri incelemiş ve buna uygun idealleştirilmiş rijit tabanlı bir model geliştirerek sınır kayma gerilmesiyle ilgili detaylı çalışmalar yapmıştır. Bu model çalışmada hem matematiksel hem de deneysel yaklaşımlar kullanılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar; kayma gerilmesindeki sürekli azalmanın kıvrımın yan savak bölgesinde olduğunu göstermiştir. Düşük savaklanma olması halinde kayma gerilmesindeki maksimum azalmanın %37, yüksek savaklanma halinde ise %82 olduğunu tespit etmiştir. Bu azalmanın, yan savak bölgesindeki kuvvetli yanal akımdan kaynaklanan ayrılma bölgesi ve durgunluk bölgesinin gelişimine bağlı olduğu belirtilmiştir.

Araştırmacı, savak kesitinde yanal savaklanmadan dolayı taban topoğrafyasında belirgin değişimler gözlemiş ve bu değişimleri aşağıdaki gibi sıralamıştır (Şekil 3).

- 1.) Yanal savaklanmadan dolayı kıvrımın yarattığı sekonder akım ve su yüzü eğimi değişime uğramaktadır. Yanal akımın yarattığı sekonder akımın şiddetine bağlı olarak hız ve kayma gerilme dağılımında değişiklikler olmakta ve doğal olarak bu değişimler yanal akımın bulunduğu kesitte taban topoğrafyasında bozulmalara yol açmaktadır.
- 2.) Kıvrımın yarattığı düşey yönlü sekonder akım yapısı yanal savaklanmanın şiddetine bağlı olarak tamamıyla bozulmaktadır. Kıvrımlı kanalın dış kıyısında hız ve kayma gerilmelerinde önemli azalmalar olmaktadır.

- 3.) Kıvrımdaki yanal savaklanma bölgesindeki durgunluk ve ayrılma bölgesi, akımın hız profillerindeki değişimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.
- 4.) Kayma gerilmelerindeki değişimlerin sonucunda yan savağın (cut-off) mansabında kanal genişliğinin %40'ı kadar bir mesafede boyuna bir bar oluşmakta (Talveg çizgisi kıvrımın iç kıyısına doğru kaymakta) ve mansap kesitinde tam yan savağın önünde bir oyulma çukuru oluşmaktadır. Boyuna bar ve oyulma çukuru, savaklanma oranı, Q_w/Q_1 ve rölatif savak yükü, h_1/p' e bağlıdır



Şekil 3. Allen Water'daki yan savak bölgesindeki taban profilleri [11]

1.2 Hidrolik Yapılar Etrafındaki Yerel Oyulmalar

Akım içerisine yerleştirilen köprü ayakları, mahmuzlar ve yan savaklar gibi hidrolik yapılar etrafında yerel oyulmalar olmaktadır. Bu yapılar etrafında meydana gelen yerel oyulmalar bu yapıların temellerinin zayıflamasına ve daha sonra yıkılmasına sebep olmaktadır. Oyulma olayı akarsulardaki taban malzemesinin özelliklerine, temel geometrisine ve akımın özelliklerine bağlı olarak gelişmektedir [12].

Bir çok araştırmacıya göre, hidrolik yapılar etrafındaki oyulma derinliği yaklaşan akım şiddetine bağlıdır. Melville ve Chiew [13], akım hızının kritik hızdan küçük ($V < V_{kr}$) olması durumunda temiz su oyulması, akım hızının kritik hızdan büyük ($V > V_{kr}$) olması durumunda ise hareketli taban oyulması meydana geldiğini ve bu hızların birbirine eşit ($V = V_{kr}$) olmaları durumunda ise maksimum denge oyulma derinliğinin oluştuğunu belirtmişlerdir.

Temiz su oyulması halinde yerel oyulma derinliği akım şiddetine bağlı olarak hemen hemen lineer artmakta ve kritik hız değerinde ($V = V_{kr}$) maksimum değere ulaşmaktadır. Akım hızının kritik hızdan büyük olması durumunda (hareketli taban oyulması) tabanda

Kıvrımlı Alluvial Kanallara Yerleştirilen Yan Savakların Etrafındaki Yerel Oyulmalar

hareket başladığından oyulma derinliği maksimum değer etrafında periyodik olarak salınım göstermektedir.

Temiz su oyulması aynı zamanda zamana bağlıdır. Oyulma derinliğinin dengeye ulaşma süresi, akımın taşıma kapasitesine ve taban malzemesinin direncine bağlıdır. Melville ve Chiew [13], arazi çalışmalarındaki gözlemlerle deneysel çalışmalardaki ölçümler arasındaki farklılıklardan dolayı zaman faktörünün önemli olduğunu belirtmişlerdir. Yanmaz ve Altınbilek [14], temiz su oyulması ile ilgili yaptıkları deneysel çalışmalarda uzun süreli deney yapmanın zorluklarından dolayı deney sürelerini altı saatle sınırlandırmışlardır. Ayrıca araştırmacılar, denge zamanının %33 ve %67'lik kısımlarında denge oyulma derinliklerinin %87 ve %95'lik kısmına ulaşıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca Melville ve Chiew [13], birbirini takip eden 24 saatlik bir zaman diliminde oyulma derinliklerindeki artış ayak çapının %5'ini geçmez ise bu sürenin denge oyulma süresi olarak alınabileceğini ifade etmişlerdir.

Melville ve Chiew [13], viskoz etkileri ihmal ederek boyut analizi sonucunda boyutsuz maksimum denge oyulma derinliğine etki eden boyutsuz parametreleri,

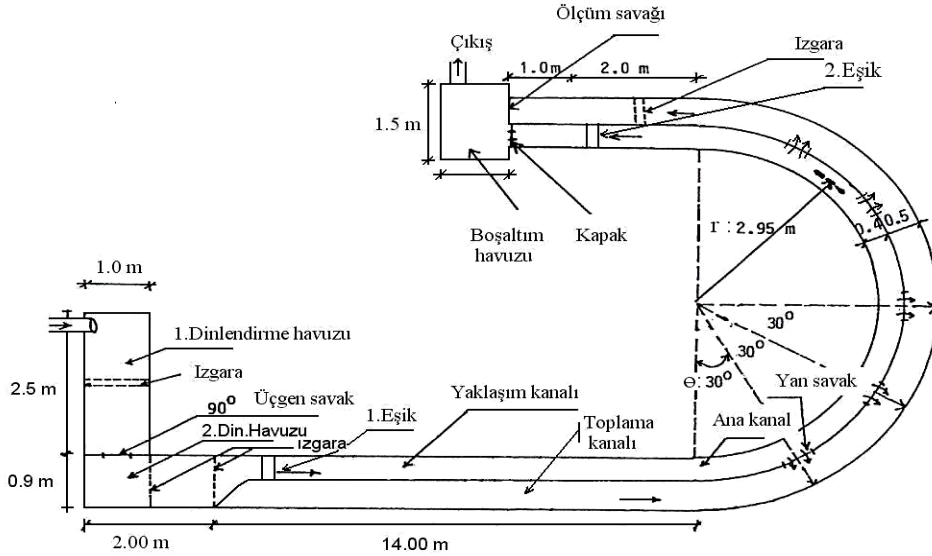
$$H_d/D = f(V/V_{kr}, h/D, d_{50}/D, t/t_c) \quad (2)$$

olarak elde etmişlerdir. Burada, t , zaman, t_c , oyulmanın dengeye ulaşma zamanı, H_d , dengeye ulaşma zamanında maksimum denge oyulma derinliği, D , ayak çapı, h , akım derinliği, d_{50} , taban malzemesi medyan çapıdır. V/V_{kr} , rölatif hız (akım şiddeti), h/D , boyutsuz akım derinliği, d_{50}/D , boyutsuz katı madde büyüklüğü olarak ifade edilmiştir. Ayrıca araştırmacılar, akım şiddetine bağlı olarak H/H_d 'nin t/t_c ile değişimini incelemişlerdir. Analizlerinde, akım hızına bağlı olarak denge zamanının %0.1 ile %10'lık kısımlarında denge oyulma derinliğinin %50'lik kısmına ulaşıldığını ve benzer şekilde denge zamanının %5 ve %40'lık kısımlarında denge oyulma derinliğinin %80 civarında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca denge zamanı 3 gün (72 saat) olan bir deney 4 saat sonunda durdurulursa denge oyulma derinliğinin yaklaşık %50 ile %80'lik kısmına ulaşıldığını belirtmişlerdir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik ve Kıyı Liman Laboratuvarında mevcut 14 m'lik doğrusal yaklaşım kanalı, 180⁰'lik 2.95 m eksen eğrilik yarıçapına sahip 90 cm genişliğinde kıvrımlı kanal ve kıvrımdan sonra 3 m'lik doğrusal mansap kanalında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Kanal saç levhalarla 40 ve 50 cm genişliklerde olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Ayırma duvarının yüksekliği 55 cm'dir. 40 cm genişliğe sahip kısım ana kanal olup, buradan 50 cm genişliğindeki sağanak kanalına savaklanma yapılmıştır. Deneyler, 30⁰'lik kıvrım açısında $L=25$, 40 ve 50 cm uzunluklu ve kum tabandan itibaren $p=7$, 12 ve 17 cm kret yükseklikli dikdörtgen yan savaklar için, ayrıca diğer kıvrım açılarında (60⁰, 90⁰, 120⁰ ve 150⁰) $L=40$ cm uzunluklu ve $p=7$ ve 12 cm kret yükseklikli yan savaklar için yapılmıştır (Şekil 4). Ana kanalın memba ve mansap uçlarına 20 cm yüksekliğinde iki eşik yerleştirilmiş ve aralarına 20 cm yüksekliğinde, $d_{50}=1.15$ mm ve $\sigma_g=1.74$ olan kuvars kumu serilmiştir. Ayrıca membadaki eşikten 1 m kadar geride iki sıra delikli tuğla yerleştirilerek akımın doğrusal kanala çalkantisız ulaşması sağlanmıştır. Her deneyden önce, tabakalaşmayı önlemek için kum karıştırılmış ve kanal tabanı düzlenmiştir. Deney başlangıcında tabandaki kumun

bozulmaması için membadaki vana yavaşça açılarak gerekli akım şartları sağlanmıştır. Deneyler temiz su oyulması için yapıldığından kanalın membасыndan katı madde ilavesi yapılmamıştır. Ana kanal taban eğimi % 0.1'dir. Ana kanal genişliği sabit tutulmuştur. Ana kanaldaki akım derinliği kanalın mansap ucuna yerleştirilen radyal seviye ayar kapağı ile değiştirilmiştir. Deneyler nehir rejimli akım şartlarında ve serbest savaklanma hali için gerçekleştirilmiştir. Yan savak nap kalınlığı olarak, yan savak membасыnda ana kanal eksenindeki su derinliğine göre elde edilen nap kalınlığı dikkate alınmıştır. Kanalı besleyen dinlendirme havuzunun sonunda bulunan üçgen ölçüm savağı ($90^\circ V$) ile ana kanal debisi belirlenmiş, yan savaktan savaklanan akım, sağanak kanalının sonuna yerleştirilen diğer bir üçgen ölçüm savağı ($90^\circ V$) ile tayin edilmiştir. Yan savağın mansabındaki debi $Q_2=Q_1-Q_w$ denkleminde bulunmuştur (Q_1 , ana kanal debisi, Q_w , savaklanan debi). Seviye ölçümleri (oyulma ve su derinlikleri) için raylar üzerinde hareket eden arabaya monte edilmiş $\pm 0,1$ mm hasasiyetli limnometre kullanılmıştır. Tabanda oluşan topoğrafyaların bozulmaması için deney bittikten sonra mansap kısmındaki eşğin üzerine 20 cm yüksekliğinde başka bir eşik yerleştirilerek suyun çok yavaş biçimde tahliyesi sağlanmıştır. Nihai oyulmaya erişmek bir kaç gün değil, hatta haftalar alabildiğinden bu çalışmada 12 saat sonunda oyulma derinliğindeki artış hızının sifıra yaklaşmasıyla elde edilen oyulma derinlikleri göz önüne alınmıştır. Kıvrım boyunca yapılan deneylerdeki akım şartları Çizelge 1'de özetlenmiştir.



Şekil 4. Deney Kanalı

Tabandaki malzemenin hareket başlangıcındaki kritik hızı (V_{kr}), su derinliğine bağlı olarak pilot deneylerle tayin edilmiş ve buna ait denklem aşağıda verilmiştir. (h_1 , yan savak membасыnda ana kanal eksenindeki su derinliği).

$$V_{kr}=0,1556\log(4809h_1) \quad (3)$$

Kıvrımlı Alluvial Kanallara Yerleştirilen Yan Savakların Etrafındaki Yerel Oyulmalar

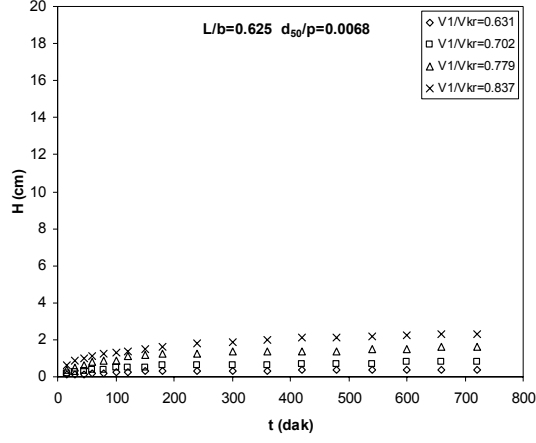
Çizelge 1. Kıvrımlı kanalda kullanılan farklı yan savaklar için akım şartları

θ	p (cm)	L (cm)	h_1 (cm)	h_1/p	d_{50}/p	L/b	V_1 (m/s)	V_{kr} (m/s)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(7)	(8)	(9)	(10)
30°	7	25	15-21	2.14-3.0	0.0164	0.625	0.25-0.47	0.44-0.47
	12	25	21-27	1.75-2.25	0.0096	0.625	0.31-0.48	0.47-0.49
	17	25	27-30	1.59-1.76	0.0068	0.625	0.34-0.48	0.48-0.49
	7	40	15-21	2.14-3.0	0.0164	1.0	0.25-0.47	0.44-0.47
	12	40	21-27	1.75-2.25	0.0096	1.0	0.27-0.48	0.47-0.49
	17	40	27-30	1.59-1.76	0.0068	1.0	0.34-0.48	0.48-0.49
	7	50	14-16	2.0-2.29	0.0164	1.25	0.27-0.45	0.44-0.45
	12	50	20-25	1.67-2.08	0.0096	1.25	0.31-0.48	0.46-0.48
	17	50	27-30	1.59-1.76	0.0068	1.25	0.34-0.49	0.48-0.49
60°	7	40	15-20	2.14-2.86	0.0164	1.0	0.25-0.47	0.44-0.47
	12	40	21-27	1.75-2.25	0.0096	1.0	0.28-0.48	0.47-0.49
90°	7	40	15-20	2.14-2.86	0.0164	1.0	0.25-0.47	0.44-0.47
	12	40	21-27	1.75-2.25	0.0096	1.0	0.31-0.48	0.47-0.49
120°	7	40	15-20	2.14-2.86	0.0164	1.0	0.27-0.47	0.44-0.47
	12	40	21-27	1.75-2.25	0.0096	1.0	0.31-0.48	0.47-0.49
150°	7	40	15-20	2.14-2.86	0.0164	1.0	0.27-0.47	0.44-0.47
	12	40	21-27	1.75-2.25	0.0096	1.0	0.31-0.48	0.47-0.49

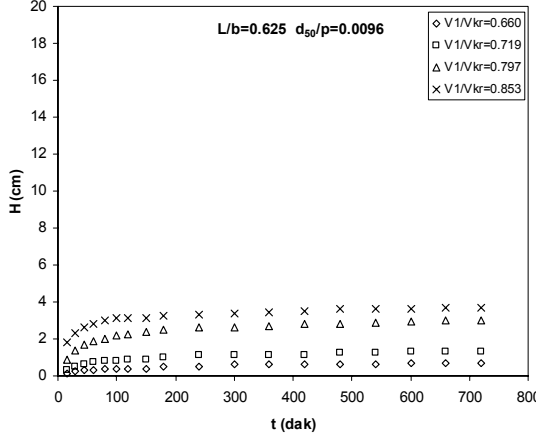
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

3.1 Oyulma Derinliği H'nin t (zaman) ile Değişimi

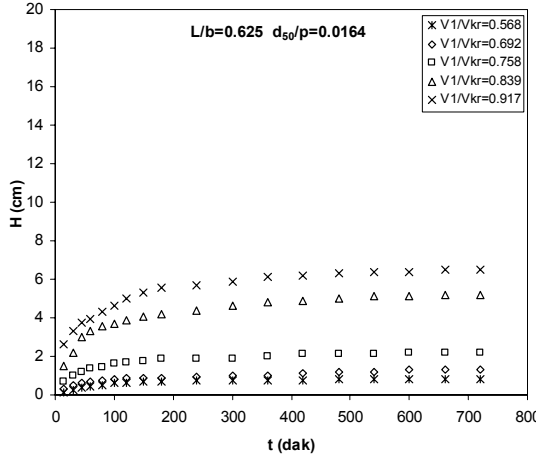
Bu çalışmada ilk olarak, 30°'lik kıvrım açısında farklı akım şartlarında (V_1/V_{kr}) oyulma derinliği H'nin t (zaman) ile değişimi incelenmiştir. Temiz su oyulması için ana kanaldaki hız, tabanda hareketin başlangıç hızı olan V_{kr} 'den küçük seçilmiştir. Deneyler $V_1/V_{kr}=0.55-1.0$ aralığında gerçekleştirilmiş ve her bir deney sonunda (12 saat) oyulma derinliğinin değişimi incelenmiştir. Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de sırasıyla boyutsuz yan savak uzunluğu $L/b=0.625$ ve boyutsuz tane büyüklükleri ($d_{50}/p=0.0068$, $d_{50}/p=0.0096$ ve $d_{50}/p=0.0164$) için temiz su oyulması halinde farklı akım şartlarında (V_1/V_{kr}) oyulma derinliğinin zamanla değişimi görülmektedir. Oyulma derinliği olarak, yan savağın mansabında ters akım bölgesinde oluşan maksimum oyulma derinliği dikkate alınmıştır. Şekillerden de görüldüğü gibi başlangıçta oyulma derinliği zamanla hızlı bir şekilde artmakta, daha sonra zamana bağlı olarak asimptotik olarak devam etmekte ve nihai durumda değişim çok az olmaktadır. Böylece oyulma derinliği dengeye ulaşmaktadır. Dengeye ulaşma süresi boyutsuz akım şiddeti (V_1/V_{kr}) ve boyutsuz tane büyüklüğüne (d_{50}/p) bağlıdır.



Şekil 5 $L/b=0.625$ ve $d_{50}/p=0.0068$ için H 'nin t ile değişimi



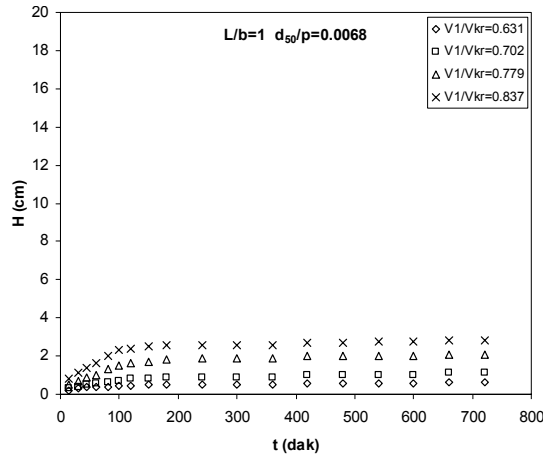
Şekil 6 $L/b=0.625$ ve $d_{50}/p=0.0096$ için H 'nin t ile değişimi



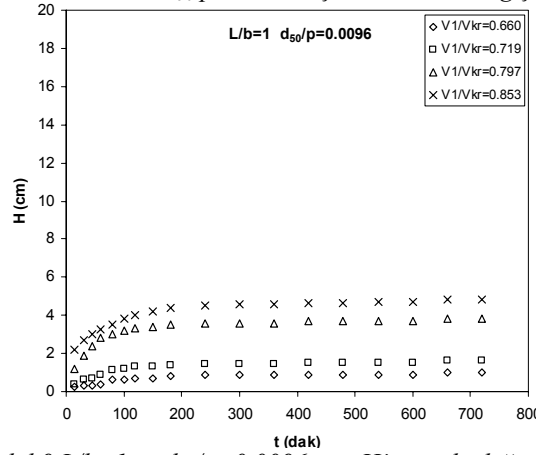
Şekil 7 $L/b=0.625$ ve $d_{50}/p=0.0164$ için H 'nin t ile değişimi

Kıvrımlı Alluvial Kanallara Yerleştirilen Yan Savakların Etrafındaki Yerel Oyulmalar

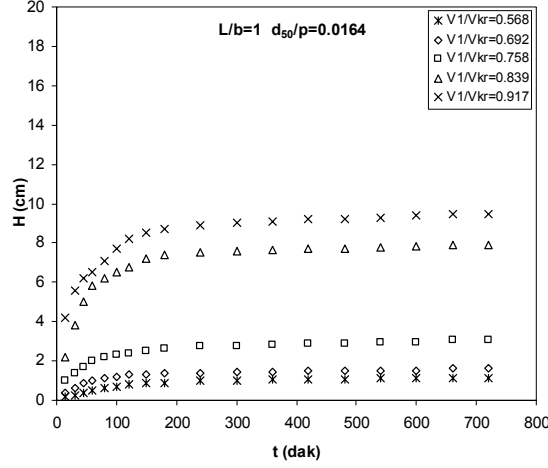
Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da sırasıyla $L/b=1$ ve $d_{50}/p=0.0068$, $d_{50}/p=0.0096$ ve $d_{50}/p=0.0164$ için temiz su oyulması halinde farklı akım şartlarında oyulma derinliğinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Bu şekillerle Şekil 5, 6 ve 7 birlikte incelendiğinde boyutsuz yan savak uzunluğunun artmasıyla oyulma derinliğinin arttığı görülmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi yan savak uzunluğunun artmasıyla daha fazla savaklanma olmakta ve bu da yanal akımdan dolayı oluşan sekonder akımın daha da şiddetlenmesine yol açmakta ve yan savak bölgesinde daha fazla oyulmanın meydana gelmesine sebep olmaktadır.



Şekil 8 $L/b=1$ ve $d_{50}/p=0.0068$ için H 'nin t ile değişimi



Şekil 9 $L/b=1$ ve $d_{50}/p=0.0096$ için H 'nin t ile değişimi

Şekil 10 $L/b=1$ ve $d_{50}/p=0.0164$ için H 'nin t ile değişimi

3.2 Boyut Analizi

Hareketli tabanlı kıvrımlı bir kanalda yan savağın mansap kısmında meydana gelen oyulma olayına etki eden değişkenler sırasıyla şunlardır; yan savak membasında ana kanal eksenindeki ortalama hız V_1 , tabandaki malzemeyi hareket ettirecek kritik hız V_{kr} , yan savak membasında ana kanal eksenindeki su derinliği h_1 , akışkanın özgül kütlesi ρ , taban malzemesinin özgül kütlesi ρ_s , akışkanın kinematik viskozitesi ν , yan savak uzunluğu L , yan savak eşik yüksekliği p , ana kanal genişliği b , taban malzemesinin medyan çapı d_{50} , yerçekimi ivmesi g , yüzey gerilmesi σ , kanal taban eğimi J_0 , kıvrım eğrilik yarıçapı r , kıvrım açısı θ , zaman t ve dengeye ulaşma zamanı t_e . Elementer bir akım parçacığı için J_0 ve σ etkileri küçük olduğundan olaya etkileri ihmal edilmiştir. Yüksek türbülanslı akım sebebiyle taban malzemesinin hareket başlangıcında etkili olan $1/Re$ ile ρ_s/ρ sabit terimi ihmal edilmiştir. Ayrıca $1/Fr^2$ terimi, akımın ataletini ifade etmek üzere V_1/V_{kr} ifadesi ile değiştirilmiş ve bazı boyutsuz büyüklükler arasında dönüşümler yapılarak denge oyulma derinliğine etki eden boyutsuzlar aşağıdaki şekilde bulunmuştur..

$$H_d/p = f(V_1/V_{kr}, h_1/p, L/b, d_{50}/p, r/p, \theta, t/t_e) \quad (4)$$

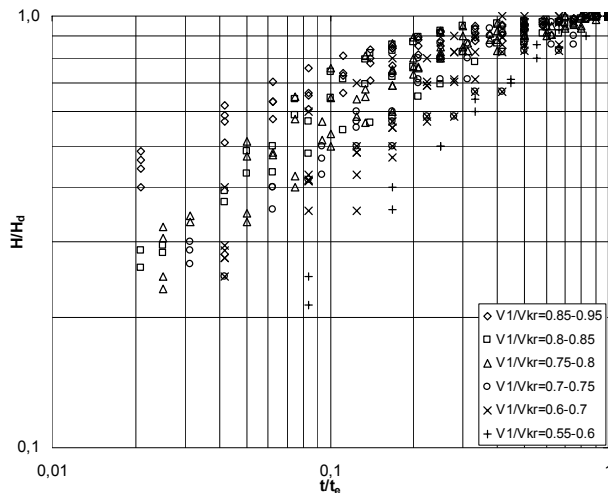
Burada, V_1/V_{kr} , akım şiddeti, h_1/p , akım sığlığı (rölatif savak yükü), L/b , yan savak uzunluğu, d_{50}/p , rölatif tane çapı, r/p , rölatif kıvrım yarıçapı ve θ , kıvrım açısıdır.

$\theta=30^\circ$ 'de temiz su oyulması halinde farklı akım şartlarında $H/H_d-t/t_e$ değişimi; tüm d_{50}/p ve L/b boyutsuzları için elde edilen veriler kullanılarak, logaritmik formda elde edilmiş ve Şekil 11'de birarada verilmiştir. Şekil 11'de görüldüğü gibi bütün eğriler (1,1) noktasından geçmekte, eğriler rölatif hız (V_1/V_{kr}) ve oyulma derinliklerinin artmasıyla (veya zamanın azalması) artmaktadır. Şekil 11'deki veriler aşağıdaki denklem ile iyi bir şekilde ifade edilebilir.

Kıvrımlı Alluvial Kanallara Yerleştirilen Yan Savakların Etrafındaki Yerel Oyulmalar

$$\frac{H}{H_d} = \exp \left\{ -0.055 \left| \frac{V_{kr}}{V_1} \left(\frac{p}{d_{50}} \right)^{0.02} \ln \left(\frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.85} \right\} \quad R^2 = 0.894 \quad (5)$$

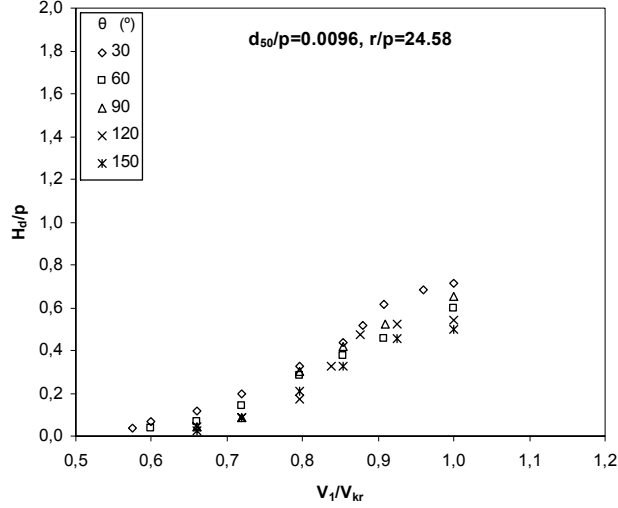
Şekil 11 incelendiğinde denge oyulma derinliklerine ulaşma süreleri rölatif akım hızına bağlı olup, V_1/V_{kr} hızındaki artış ile daha büyük oyulma derinlikleri elde edilmektedir. Ayrıca V_1/V_{kr} 'e bağlı olarak Şekil 11'de görüldüğü gibi $t/t_e=0.4$ iken $H/H_d>0.80$ olmakta ve benzer şekilde $t/t_e=0.2$ iken $H/H_d>0.50$ olduğu görülmektedir.



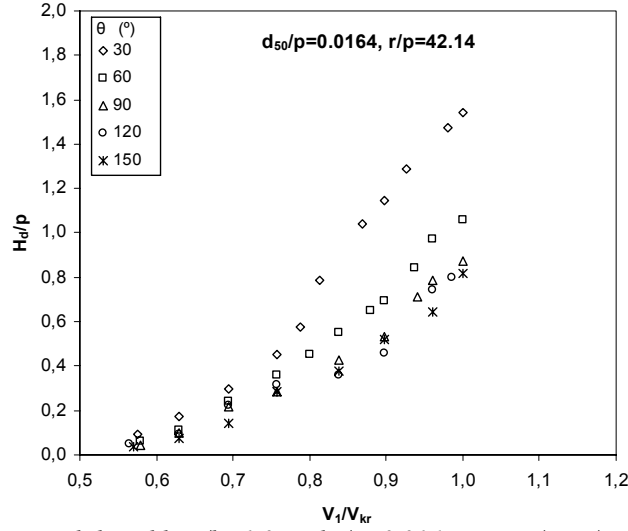
Şekil 11 Temiz su oyulması halinde oyulma derinliğinin gelişimi

3.3 Kıvrım Boyunca Rölatif Denge Oyulma Derinliği H_d/p 'nin Rölatif Akım Şiddeti V_1/V_{kr} ile Değişimi

Burada, kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$, $\theta=60^\circ$, $\theta=90^\circ$, $\theta=120^\circ$ ve $\theta=150^\circ$) $L/b=1.0$ ve $d_{50}/p=0.0096$, $d_{50}/p=0.0164$ için farklı akım şartlarında H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi incelenmiş Şekil 12 ve Şekil 13'de verilmişlerdir. Şekillerden de görüldüğü gibi 30° 'lik kıvrım kesitinde maksimum hız yörüngesinin dış kıyıya sapmasıyla (yan savak doğrultusundaki momentum artmakta ve sekonder akım şiddetlenmekte) en büyük rölatif denge oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Diğer taraftan $\theta=120^\circ$ ve $\theta=150^\circ$ 'lik kıvrım kesitlerinde ise maksimum hız yörüngesinin normal doğrultusuna dönmesiyle minimum rölatif denge oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Coşar ve Ağaçcıoğlu [5], maksimum hız yörüngesinin doğrultusunun $\theta=30^\circ$ civarında yanal akım doğrultusuna yakın olduğunu ve bu bölgede sekonder akımın etkisinin çok şiddetlendiğini, bu durumun $\theta=90^\circ$ 'ye kadar devam ettiğini, $\theta=120^\circ$ ve $\theta=150^\circ$ 'lerden sonra bu etkinin azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca bu araştırmacılar $\theta=30^\circ$ 'de yan savak debi katsayısının (C_d) daha büyük değerler aldığını ve salınımlar gösterdiğini belirtmişlerdir. Bundan dolayı su alma yapıları kıvrımlı kanalların ikinci yarısına yerleştirilmektedir. Ayrıca Şekillerden görüldüğü gibi d_{50}/p boyutsuzunun artmasıyla $\theta=30^\circ$ 'de daha büyük H_d/p değerler aldığı daha belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 12 Kıvrımlı kanalda $L/b=1.0$ ve $d_{50}/p=0.0096$ için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



Şekil 13 Kıvrımlı kanalda $L/b=1.0$ ve $d_{50}/p=0.0164$ için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi

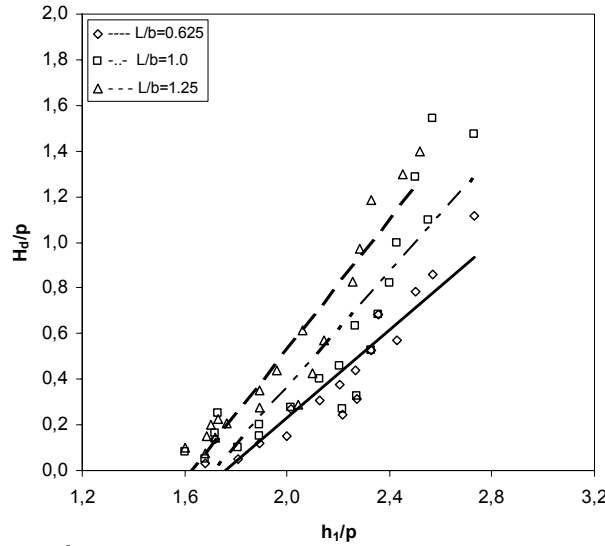
3.4 Rölatif Denge Oyulma Derinliği H_d/p 'nin Rölatif Savak Yükü h_1/p ile Değişimi

Bu bölümde, 30° 'lik kırım açısında dikdörtgen en kesitli $L=25, 40$ ve 50 cm uzunluğunda ve $p=7, 12$ ve 17 cm kret yüksekliğindeki yan savaklarda farklı akım şartlarında rölatif denge oyulma derinliği H_d/p 'nin boyutsuz savak yükü h_1/p ile değişimi incelenmiş ve üç farklı boyutsuz yan savak uzunluğu L/b için Şekil 14'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi h_1/p arttıkça (dolayısıyla savaklanma oranı) rölatif denge oyulma derinliği H_d/p artmaktadır. Büyük kret yüksekliğine sahip yan savaklarda, cidar sürtünme etkisi daha fazla olduğundan, aşağı yönlü sekonder akımın gücü de azalmakta ve bunun sonucunda rölatif denge oyulma derinliği azalmaktadır. Ayrıca, aynı akım derinliğinde savak kret yüksekliği

Kıvrımlı Alluvial Kanallara Yerleştirilen Yan Savakların Etrafındaki Yerel Oyulmalar

arttıkça savak yükü ve dolayısıyla yan savaktan savaklanan akım küçülmemekte, buna karşılık ana kanal mansabına devam eden akım ve boyuna kinetik enerji büyümektedir. Bu da yan savak sonundaki sekonder akımın şiddetini azaltmakta ve daha küçük oyulmalar meydana getirmektedir. Öte yandan yan savak uzunluğu ve savaklanma oranı Q_w/Q_1 (dolayısıyla h_1/p) arttıkça (boyuna akımın kinetik enerjisi azalmakta) yanal akımın yarattığı sekonder akımın gücünün de arttığı görülmektedir. Bundan dolayı aynı boyutsuz savak yükü için, boyutsuz yan savak uzunluğu L/b büyüdükçe H_d/p değeri de artmaktadır. Ayrıca Şekil 14'deki tüm verileri içeren tek bir denklem ($h_1/p > 1.6$ için) elde edilmiştir.

$$\left(\frac{H_d}{p}\right) / \left(\frac{L}{b}\right) = 1.3 \left(\frac{h_1}{p}\right) - 2.2 \quad R^2=0.84 \quad (6)$$



Şekil 14 $\theta=30^\circ$ de $L/b=0.625$, $L/b=1$ ve $L/b=1.25$ için $H_d/p-h_1/p$ değişimi

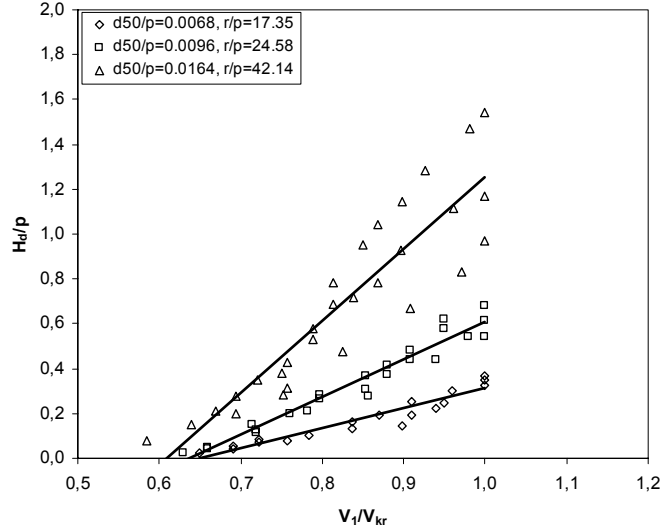
3.5 Rölatif Denge Oyulma Derinliği H_d/p 'nin Akım Şiddeti V_1/V_{kr} ile Değişimi

Bir çok araştırmacının belirttiği gibi, yerel oyulma derinliğine etki eden en önemli parametre yaklaşım hızı veya akımın şiddetidir. Bundan dolayı d_{50}/p boyutsuz tane çapına bağlı olarak H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi incelenmiştir (farklı h_1/p ve L/b boyutsuzları için). Şekil 15'de tüm d_{50}/p boyutsuzlarına göre H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile hemen hemen lineer arttığı görülmektedir. Her üç d_{50}/p boyutsuzuna göre $V_1/V_{kr} < 0.55$ için herhangi bir oyulma görülmemiş ve $V_1=V_{kr}$ değerinde maksimum denge oyulma derinlikleri elde edilmiştir. V_1/V_{kr} 'in küçük değerlerinde denge oyulma derinliklerinin hemen hemen birbirine yaklaştığı Şekil 15'de görülebilmektedir. Ayrıca boyutsuz yan savak uzunluğu nispeten büyük olduğunda sekonder akımın şiddetinin artmasıyla büyük V_1/V_{kr} değerlerinde eğriler birbirlerinden daha fazla uzaklaşmaktadır.

Her bir d_{50}/p için elde edilen eğrilerdeki saçılımlar boyutsuz L/b ve h_1/p parametrelerinin etkisinden kaynaklanmaktadır. Daha öncede bahsedildiği gibi, büyük kret yükseklikli yan savaklarda sürtünmeye harcanan enerji fazla olduğu için sekonder akımın şiddeti

azalmaktadır. Bundan dolayı $d_{50}/p=0.0068$ değerinde elde edilen denge oyulma derinlikleri diğer boyutsuzlarda elde edilenlerden daha küçük çıkmıştır. Ayrıca Şekil 15'deki tüm veriler tek bir doğru ile ifadelendirilerek aşağıdaki denklem ($V_1/V_{kr}>0.55$ için) elde edilmiştir.

$$\left(\frac{H_d}{p}\right)^{1/2} / \left(\frac{d_{50}}{p}\right) = 155.3 \left(\frac{V_1}{V}\right) - 7.6 \quad R^2=0.89 \quad (7)$$



Şekil 15 $\theta=30^\circ$ 'de $d_{50}/p=0.0068$, $d_{50}/p=0.0096$ ve $d_{50}/p=0.0164$ için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi

Şekil 15'deki veriler yardımıyla denge oyulma derinliği H_d/p 'nin V_1/V_{kr} , d_{50}/p ve h_1/p ile değişimi çoklu regresyon analizi yapılarak aşağıdaki denklem ile iyi bir şekilde ifade edilmiştir. Şekil 16'da görüldüğü gibi H_d/p 'nin gerçek ve tahmini değerleri arasında iyi bir ilişki sağlanmıştır

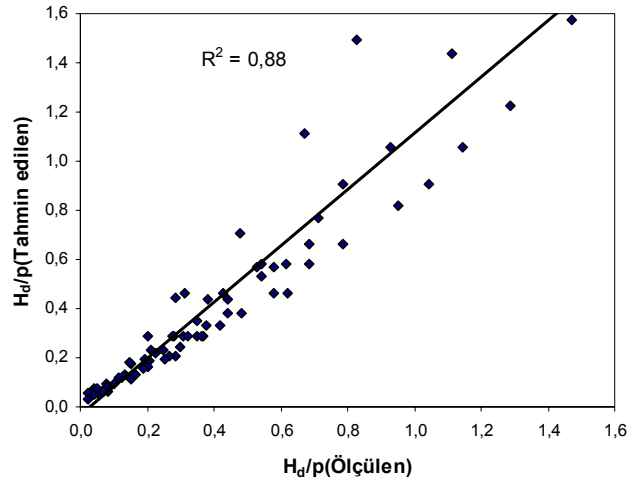
$$\left(\frac{H_d}{p}\right)^{1/2} / \left(\frac{d_{50}}{p}\right) = \left| 231.94 \left(\frac{V_1}{V_{kr}}\right)^{2.2} - 37.4 \right|^{0.83} \left| \frac{h_1}{p} - \frac{V_1}{V_{kr}} \right|^{0.01} \quad R^2 = 0.88 \quad (8)$$

3.6 Taban Topoğrafyası

Bu bölümde, $\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım kesitinde $L=40$ cm uzunluğunda ve $p=7$ cm kret yüksekliğindeki yan savakta taban topoğrafyasında meydana gelen değişimler Şekil 17'de verilmiştir. Yan savağın memba ve mansabında ana kanaldaki ortalama hız kritik hızdan küçüktür ($V_1/V_{kr}<1.0$ ve $V_2/V_{kr}<1.0$). Yan savak bölgesinde yanal savaklanmadan dolayı hız ve kayma gerilmelerinde azalmalar olmakta ve bu da yan savağın mansabında durgunluk ve ayrılma bölgesinin gelişmesine neden olmaktadır. Kayma gerilmelerindeki değişimin sonucunda yan savağın mansabında boyuna bar ve dış kıyıya yakın bir oyulma

Kıvrımlı Alluvial Kanallara Yerleştirilen Yan Savakların Etrafındaki Yerel Oyulmalar

çukuru oluşmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi maksimum oyulma derinliği ters akım bölgesinde oluşmaktadır. Zamana bağlı olarak bar ilk önce yan savağın orta kısmı ile mansab kısmı arasında dış kıyı ile belli bir açı yaparak oluşmuş, zamanla bu bar yan savağın dış kıyısına paralel bir hale gelmiş ve nihai durumda dış kıyı ile ters yönde belli bir açı yaparak iç kıyıya kadar gelişmiştir. Maksimum oyulma derinliği ve boyuna barın yeri durgunluk bölgesi ve ters akım alanının yerine bağlıdır. Daha önce bahsedildiği gibi durgunluk bölgesi ve ters akım alanının yeri V_1/V_{kr} , h_1/p , d_{50}/p ve L/b boyutsuzlarına bağlıdır. Ana kanalın mansabına doğru akımın şiddeti arttığı zaman ters akım bölgesi ve oyulma bölgesinin yeri yan savağın mansabına doğru kaymaktadır. Ayrıca h_1/p , d_{50}/p ve L/b boyutsuzlarının artmasıyla da ters akım bölgesi ve oyulma bölgesinin yeri yan savağın mansabına doğru kaymaktadır.



Şekil 16 $\theta=30^\circ$ 'de H_d/p 'nin gerçek ve tahmini değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 17 $V_1=0.38$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler

4. SONUÇLAR

Deneyisel çalışmada, hareketli tabanlı 180⁰'lik kıvrımlı bir kanal boyunca nehir rejimli akım şartlarında ve serbest savaklanma durumunda farklı yan savak boyutlarında temiz su oyulması halinde rölatif denge oyulma derinlikleri incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Yan savak bölgesinde hız ve kayma gerilmelerindeki azalma yan savağın mansabında durgunluk bölgesi ve ayrılma bölgesinin oluşmasına neden olmaktadır. Kayma gerilmelerindeki değişimin sonucunda yan savağın mansabında boyuna bir bar ve dış kıyıya yakın bir oyulma çukuru oluşmaktadır. Maksimum oyulma derinliği ve boyuna barın yeri durgunluk bölgesi ve ters akım alanın yerine bağlıdır. Durgunluk bölgesi ve ters akım alanının yeri V_1/V_{kr} , h_1/p , d_{50}/p , r/p ve L/b boyutsuzlarına bağlıdır.
- 2) Oyulma derinliği zamana bağlı olarak hızlı bir şekilde artmakta ve asimptotik olarak devam etmektedir. Daha sonra değişim hemen hemen sifıra yaklaşmakta ve dengeye ulaşılmaktadır. Dengeye ulaşma zamanı V_1/V_{kr} , d_{50}/p , r/p ve L/b boyutsuzlarına bağlıdır. Akım şiddeti (V_1/V_{kr}) arttığı zaman dengeye ulaşma süresi artmaktadır. Ayrıca d_{50}/p boyutsuzu arttığı zaman dengeye ulaşma süresi daha erken olmaktadır.
- 3) Datalardan görülebileceği gibi, V_1/V_{kr} bağlı olarak $t/t_c=0.4$ iken $H/H_d>0.80$ olmakta ve benzer şekilde $t/t_c=0.2$ iken $H/H_d>0.50$ olduğu görülmektedir.
- 4) $\theta=30^0$ 'lik kıvrım kesitinde maksimum hız yörüngesinin dış kıyıya sapmasıyla en büyük rölatif denge oyulma derinlikleri elde edilirken, $\theta=120^0$ ve $\theta=150^0$ 'lik kıvrım kesitlerinde ise maksimum hız yörüngesinin normal doğrultusuna dönmesiyle minimum rölatif denge oyulma derinlikleri elde edilmiştir.
- 5) Her üç d_{50}/p boyutsuzunda $V_1/V_{kr}<0.55$ olduğunda tabanda herhangi bir oyulma görülmemiştir. H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile hemen hemen lineer arttığı ve $V_1/V_{kr}=1$ 'de maksimum denge oyulma derinliği elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ve YTÜ Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.

SEMBOLLER

- b : Ana kanal genişliği
D : Silindirik ayak çapı
 d_{50} : Malzemenin yüzde ellisini geçiren elek çapı (Medyan çap)
 Fr_1 : Yan savak başlangıcındaki Froude sayısı
g : Yerçekimi ivmesi
H : Oyulma derinliği
 H_d : Denge zamanındaki oyulma derinliği
h : Herhangi bir kesitteki akım derinliği
 h_1 : Yan savak mansabında ana kanal eksenindeki su derinliği
 h_2 : Yan savak mansabında ana kanal eksenindeki su derinliği
 h_r : Rölatif yük (Savak üzerindeki nap kalınlığı /Toplam su derinliği)
 J_0 : Ana kanal taban eğimi
L : Yan savak uzunluğu

Kıvrımlı Alluvial Kanallara Yerleştirilen Yan Savakların Etrafındaki Yerel Oyulmalar

p	: Yan savak kret yüksekliği
Q_w	: Yan savak debisi
Q_1	: Ana kanal debisi
Q_2	: Yan savaktan sonraki ana kanal debisi
r	: Kıvrım eğrilik yarıçapı
R	: Regrasyon katsayısı
t	: Zaman (dakika)
t_c	: Oyulmanın dengeye ulaşma zamanı
θ	: Kıvrım açısı
ρ	: Akışkanın özgül kütlesi
u^*	: Taban kayma hızı
u^*_{kr}	: Kritik kayma hızı
V	: Yaklaşım hızı
V_1	: Yan savak membasında ana kanal eksenindeki ortalama akım hızı
V_2	: Yan savak mansabında ana kanal eksenindeki ortalama akım hızı
V_{kr}	: Kritik hız
x	: Yan savağın başlangıcına olan mesafe
σ_g	: Geometrik standart sapma

Kaynaklar

- [1] De Marchi, G., “Saggio di Teoria de Funzionamento Degli Stramazzi Laterali, L’Energia Elettrica, Milano, 11:849-860, 1934.
- [2] Subramanya, K., and Awasthy, S.C., “Spatially varied flow over side-weirs”, J. Hydr. Engrg., ASCE, 98(1),1-10, 1972.
- [3] El-Khashab, A. M. M., “Hydraulics of flow over side-weirs”, Ph.D. Thesis, presented to the University of Southampton, England., 1975.
- [4] Agaccioglu, H. and Yüksel, Y., “Side-Weir Flow in Curved Channel”, J. Irr. And Drain. Engrg., ASCE, Vol. 124, No. 3, 163-175, 1998.
- [5] Cosar, A. and Agaccioglu, H., “Discharge coefficient of a triangular side-weir located on a curved channel”, J. Irr. and Drain. Engrg., ASCE, Vol. 130, No. 5, 410-423, 2004.
- [6] Önen, F., Hareketli tabanlı akarsularda yanal akımın hidrodinamiğinin incelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
- [7] Shukry, A., “Flow around bends in open flume”, J. Hydr. Engrg., ASCE, 115,751-759, 1950.
- [8] Choudhary, U.K. ve Narasimhan, S., “Flow in 180° Open Channel Rigid Boundary Bends”, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Tec. Notes, 103(6):651-657, 1977.
- [9] Neary, V. S. and Odgaard, A. J., “Three-dimensional flow structure at open-channel diversions”, J. Hydr. Research, Vol. 119, No. 11, 1223-1230, 1994.
- [10] Fares, Y. R., “Boundary shear in curved channel with side overflow”, J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 121, No. 1, 2-14, 1995.
- [11] Fares, Y. R., “Changes of bed topography in meandering rivers at a neck cutoff intersection.”, J. of Environmental Hydrology, Vol. 8, paper 13, 2000.

- [12] Raudkivi, A. J., "Functional Trends of scour at bridge piers.", J. Hydr. Engrg, ASCE, Vol. 112, No. 1, 1-13, 1986.
- [13] Melville, B. W. and Chiew, Y. M., "Time scale for local scour at bridge scours", J. Hydr. Enggrg, ASCE, Vol. 125, No. 1, 59-65 1999.
- [14] Yanmaz, A. M. and Altınbilek, H. D., " Study of time-dependent local scour around bridge piers", J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 117, No. 10, 1247-1267, 1991.