

Doksan Derece Kıvrım Açısında Köprü Kenar Ayağı Etrafında Oluşan Oyulmanın İncelenmesi

Meral KORKMAZ*, M. Emin EMİROĞLU**

*Tunceli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ
meralkorkmaz@tunceli.edu.tr

**Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ
memiroglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received:06.05.2015; Kabul/Accepted:22.07.2015)

Özet

Köprüler ulaşım ağını hızlandırmak ve kolaylaştırmak için yapılan önemli yapılardır. Son yıllarda ağır hasar gören veya yıkılan köprüler üzerinde yapılan çalışmalar, hasar nedenlerinin çoğunun taşkınlar sırasında meydana gelen oyulma olayından kaynaklandığını ortaya koymuştur. Taşkınlar esnasında köprü kenar veya orta ayakları etrafındaki taban malzemelerinin taşınması sonucu bu bölgede oyulmalar oluşmaktadır. Oyulma olayına, etki eden birçok parametrenin yanında, kıvrımlı kanallarda sekonder akım şiddetinin etkisi de önemli olmaktadır. Bu çalışmada, kıvrımlı bir kanalda 90° kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen farklı ayak uzunluğundaki köprü ayakları etrafında oluşan yerel oyulmalar ve akım şiddetinin oyulma olayına etkisi temiz su oyulması durumu için deneysel olarak incelenmiştir. Köprü kenar ayağının uzunluğu oyulma derinliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Temiz su oyulması durumunda maksimum oyulma derinliği akım şiddetine bağlı olarak zamanla artmakta ve belli bir süre sonra asimptotik olarak devam etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Oyulma, Köprü kenar ayağı, menderes, temiz su oyulması.

Investigation of Scour Depth Formed Around Bridge Abutments At Ninety Degree Curved Angle

Abstract

Bridges are important structures constructed in order to provide faster and easier the transportation network. In recent years, a number of studies have been made on heavily damaged or destroyed bridges. Reasons of destruction of bridges are floods. Scour occurred around the bridge pier or abutments during floods takes place due to sediment transport. The effect of secondary flow in meandering channels together with the many parameters influencing the scour event is also important. In the current study, the bridge abutments with different lengths have been placed the outer bank at the angle of bend curvature of 90°. The local scour experiments have been conducted for clear water scour condition. The length of the bridge abutment has a significant effect on the depth of scour. In the case of the clean water scour, the maximum scour depth increases with time. After a certain time, scouring curve does not change with time, it becomes asymptotic to the x axis.

Keywords: Scour, bridge abutment, meandering, clear-water scour.

1. Giriş

Ulaşım ihtiyacının artması ile birlikte şehirlerarası ulaşımı hızlandırmak ve güvenilir bir şekilde sağlamak amacıyla yapılan köprüler, çok ihtiyaç duyulan yapılardır. Köprülerin yıkılmalarının veya hasar görmelerinin en önemli nedenlerinden biri, taşkınlar esnasında meydana gelen oyulma problemidir. Konunun

önemi nedeniyle oyulma problemi 20.yy'dan beri araştırılmaktadır. Oyulma, akarsular ve sel yataklarındaki su akımının sebep olduğu doğal bir olaydır. Oyulma olayına; akarsu taban malzemesi, akım hızı, akım derinliği, orta ve kenar ayak genişlikleri, ayak şekilleri, atak açısı gibi pek çok parametre etki etmektedir.

Oyulma olayı; akarsu içerisine yerleştirilen köprü orta ayağı, köprü kenar ayağı veya mahmuzlar gibi yapıların yerleştirilmesi

sebebiyle türbülans şiddetinin artması ve katı madde taşınımının karşılıklı etkileşimi sonucunda başlamış olur. Daha sonra oyulma çukurunun geometrisi sürekli olarak değişir. Oyulma çukuruna gelen katı madde miktarı, giden katı madde miktarına eşit olunca dinamik denge oluşur. Bu durumda oluşan oyulma derinliği, maksimum denge oyulma derinliği olarak isimlendirilir (Güngör, 1997) [1].

İstatistiklere göre, köprü yıkılmalarının % 60'ı oyulma nedeniyle meydana gelmiştir. Oyulma herhangi bir zamanda da oluşabilmesine rağmen taşkınlar sırasında meydana gelme olasılığı daha yüksektir. Akarsularda köprü kenar ve orta ayağına yakın oyulmalar diğer sebeplerden daha çok köprü hasarlarına neden olmaktadır (Murillo, 1987) [2]. 1847-1975 yılları arasında 143 hasarlı köprünün hata nedenleri hakkında bir analiz yapılmıştır. Elde edilen bulgular Tablo 1'de verilmiştir (Zhai, 2010) [3].

Tablo 1. Köprü hasar nedenlerinin sınıflandırılması [3]

Sınıflandırma	Yıkılma Nedenleri	Adet
1	Taşkın anında oyulma	70
2	Sakıncalı malzemeler	22
3	Aşırı Yükleme ve kazalar	14
4	Uygun olmayan yerleştirme	12
5	Depremler	11
6	Tasarım hataları	5
7	Rüzgar Tahribatları	4
8	Dayanıklılığını yitirme	4
9	Donatının Paslanması	1

Uzmanlar, Türkiye'de 7 Nisan 2012'de 110 metresi yıkılan 255 metrelik Çaycuma Köprüsü'nün yıkılmasının en önemli sebebinin köprünün temelindeki oyulma olduğunu belirtmişlerdir. Köprüler ister doğrusal akarsularda ister kıvrımlı akarsularda inşa edilsin, suyun mevcut akım koşullarına dayanması gerekmektedir. Köprülerin, hem statik kuvvetlere karşı hem de suyun dinamik etkisine karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Her köprünün zayıf tarafı temelinin su tarafından oyulma ihtimalidir. Bu yüzden inşaat sırasında taban oyulmalarına karşı önlemler alınması zorunludur. Akarsuyun debisi nedeniyle temel inşaatını engellemek için temel yeterince derine yapılması gerekir. Böylece temel altının oyulması engellenmektedir. Ancak ne kadar derine inşa edileceğini bilmek için mevcut akım

ve yapı koşullarına göre maksimum oyulmanın doğru olarak tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Akarsularda sekonder akım nedeniyle akarsuyun köprü ayakları oyulmaya maruzdur. Ayak etrafındaki oyulmanın denge oyulma durumu gerçekleşene kadar devam edeceği açıktır. Tabanın kararlı hale geldiği yerin de altına doğru temel ve riprap uygulaması yapılmaktadır. Çaycuma Köprüsü'nde de topuk oyulması meydana gelmiştir (Şekil 1). Yukarıda da ifade edildiği gibi tasarım aşamasında denge oyulma derinliğini tahmin etmek, yapının güvenliği açısından büyük öneme sahiptir.



Şekil 1. Çaycuma Köprüsü (7 Nisan 2012)

(www.milliyet.com.tr) [4]

Köprü ayaklarındaki oyulma birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Çalışmaların büyük bir çoğunluğu, doğrusal akarsular üzerine yerleştirilen köprü ayaklarında oluşan oyulma ile ilgilidir.

Chiew ve Melville [5] yaptıkları deneysel çalışmada üniform ve kohezyonsuz katı maddenin (sedimentin) taşınması durumunda silindirik şeklindeki köprü ayağı etrafında oluşan yerel oyulmaları araştırmışlardır.

Melville ve Sutherland [6], geçmişte yapılan deneysel çalışmalara ait verileri değerlendirerek, üniform veya üniform olmayan taban malzemesi için farklı tipte köprü orta ayağı çevresindeki temiz su ve hareketli taban oyulmalarının nihai derinliğini tahmin eden bir bağıntı önermişlerdir.

Chiew ve Melville [7] dairesel köprü ayağı etrafında oluşan oyulmaları üniform olmayan sediment kullanarak menbada sürekli sediment beslemeli bir kanalda deneysel olarak incelemişlerdir. Zırhlanmanın ve köprü ayağı çapının dane çapına oranının denge oyulma derinliğinin azalmasında önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda

üniform olmayan malzeme durumunda denge oyulma derinliğinin üniform malzeme durumuna göre daha az veya eşit olduğunu bulmuşlardır.

Yanmaz ve Altınbilek [8], üniform taban malzemesi kullanarak dairesel ve kare kesitli köprü ayaklarında oluşan temiz su oyulmalarının zamana bağlı değişimi için sediment süreklilik denklemini kullanarak yarı teorik bir model geliştirmişler ve tasarım amaçlı boyutsuz oyulma tahmini eğrilerini değişik sediment ve akım özellikleri için hazırlamışlardır.

Chiew [9] köprü ayaklarında oluşan oyulmalara karşı ayakta açılan dar-uzun dikdörtgen deliklerin (slot) yaka ile birleştirilmesi şeklindeki koruyucu önlemi incelemiştir.

Ayala ve Grandon [10] dairesel ve dikdörtgen kesitli köprü ayaklarında üniform olmayan taban malzemesi ile temiz su oyulmalarını deneysel olarak incelemiş ve akım özelliklerine ek olarak oyulma derinliğinin hem ayak kesit geometrisine hem de zırhlanmaya bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Chiew [11] riprap boyutu ve tabaka kalınlığı ile ilgili deneysel çalışmaları sonunda gerekli boyut için yarı ampirik bir bağıntı önermiştir. Riprap örtüsü çapının köprü ayak çapına oranının 1,5 ~ 3 aralığında olması durumunda göçmeye karşı direncin riprap örtüsü genişliğiyle doğrusal arttığını ifade etmiştir.

Richardson ve Davis [12] riprap tabakası çapının köprü ayak çapının 5 katı olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Melville ve Raudkivi [13] üniform olmayan dairesel enkesitli köprü ayağı üzerinde yaptıkları çalışmalarda temel geometrisinin oyulma üzerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Melville [14], deneysel çalışmalara ait verileri değerlendirerek üniform veya üniform olmayan taban malzemesi için farklı tipte köprü orta ve yan ayakları çevresindeki temiz su ve hareketli taban oyulmalarının nihai derinliğini tahmin eden bir bağıntı önermiştir.

Kandasamy ve Melville [15] köprü kenar ve orta ayaklarında oluşabilecek en büyük oyulma derinlikleri ile ilgili bir makale yayınlamışlardır.

Melville ve Chiew [16] silindir şeklindeki köprü ayağı etrafında oluşan oyulmanın zaman içinde gelişimini incelemiş ve denge zaman ölçeğini tanımlamışlardır.

Melville ve Coleman [17] riprap tabakası çapının köprü ayak çapının 3 ~ 4 katı olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Cardoso vd [18] Köprü kenar ayaklarındaki oyulmaya zaman ve kanal geometrisinin etkisini incelemişlerdir.

Kumar vd [19] dairesel yaka ve köprü ayağında açılmış dikdörtgen deliğin (slot) oyulmalara etkisini temiz su oyulması şartlarında araştırmışlardır.

Ballio ve Orsi [20] köprü kenar ayakları etrafındaki yerel oyulmaların zamanla değişimini incelemişlerdir.

Chiew, Y. M. ve Lim F. H. [21] köprü ayağı etrafında temiz su oyulması şartlarında yerleştirilen riprap örtüsünün işlevliğini araştırmışlardır.

Lauchlan C.S. ve Melville [22] hareketli taban şartlarında kenar göçmesi (edge failure), kayma göçmesi (shear failure), savrulma (winnowing) şeklindeki olumsuzluklara ilave olarak yatak şeklindeki değişimin (bed form progression) de bir etmen olduğunu belirterek yaptıkları araştırmalar sonrasında riprap tabakasının konumunu da içeren bir bağıntı önermişlerdir.

Richardson vd [23], geçmişte yapılan deneysel çalışmalara ait verileri değerlendirerek, farklı tipte köprü orta ayakları çevresinde nihai temiz su ve hareketli taban oyulmasını tahmin eden bir bağıntı önermişlerdir.

Oliveto ve Hager [24] temiz su oyulması durumunda, üniform ve üniform olmayan taban malzemesi kullanarak dairesel köprü orta ayakları etrafında meydana gelen oyulmaları deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde, 1 m ve 0.50 m genişliklerine sahip, 11 metre uzunluğunda iki ayrı dikdörtgen kanal kullanmışlardır. Taban malzemesi olarak 3 ayrı üniform ve 3 ayrı üniform olmayan malzeme seçmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, temiz su koşullarında meydana gelen yerel oyulmanın zamana bağlı değişimi için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir.

$$Z = \frac{d_s}{L_R} = 0.068 N \sigma^{-1/2} F_d^{1.5} \quad (1)$$

burada; Z=boyutsuz oyulma derinliği, d_s =oyulma derinliği, F_d = densimetrik Froude sayısı, L_R = referans uzunluğu, T = boyutsuz zaman, N = şekil faktörü (dairesele orta ayak için 1, karesel yan ayak için 1,25) ve σ = sediment standart sapmasını göstermektedir.

$$\sigma = (d_{84}/d_{16})^{0.5} \quad (2)$$

$$F_d = \frac{v}{(gd_{50} \frac{\rho_s - \rho}{\rho})^{1/2}} \quad (3)$$

$$T = [(g'd_{50})^{1/2} / L_R] t \quad (4)$$

$$g' = \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) g \quad (5)$$

burada, g' = Göreceli yerçekimi ivmesini ifade eder. Referans uzunluğu kenar ayak için aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir.

$$L_R = b^\alpha h^\beta, \quad (\alpha + \beta = 1) \quad (6)$$

Coleman vd [25] köprü kenar ayağında oluşan oyulmalarını temiz su durumunda araştırmışlardır.

Rahman ve Haquem [26] köprü ayaklarının bulunduğu bölgelerde yerel oyulmaların tahmininde kullanılan Lacey formülünde değişiklik yaparak Bangladeş'teki nehirlere uygulamışlardır.

Chiew [27] şekli bozulan kanal durumunda köprü ayakları etrafında oluşan yerel oyulmalar ve riprapın kararlılığı ve işlevliği ile ilgili deneyler gerçekleştirmiştir.

Dey ve Barbhuiya [28] bir kanat duvarı ve yarım daire kenar ayaklarında oluşan temiz su oyulmaları incelemek amacıyla üniform ve üniform olmayan taban malzemesi kullanarak laboratuvarında deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda, belli bir akım derinliğinden sonra oyulma derinliğinin akım derinliğinden etkilenmediğini gözlemlemişlerdir. Üniform olmayan sediment kullanıldığında ise köprü ayağı etrafında oluşan oyulma derinliğinin üniform malzeme kullanıldığında meydana gelen oyulmadan daha az olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sheppard vd [29], üniform taban malzemesi kullanarak köprü orta ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmasını deneysel olarak incelemiş ve nihai oyulma derinliğini veren bir bağıntı önermişlerdir. Çalışmalarını 6.1 m genişliğinde, 6.4 m derinliğinde ve 38.4 m uzunlukta bir kanalda gerçekleştirmişlerdir. Kullandıkları dairesel orta ayak çapları 0.114, 0.305, 0.914 m'dir ve taban malzemeleri üniform olup, medyan çapları 0.22, 0.80, 2.90 mm'dir.

Rajkumar ve Subhasish [30] dairesel ve kare kesitli köprü ayaklarında oluşan temiz su oyulmalarını ve oyulma derinliğinin denge durumuna gelme sürelerini incelemek amacıyla üniform ve üniform olmayan sedimentler kullanarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda denge oyulma derinliğinin

dane çapı ile ters orantılı olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda köprü ayaklarında gözlenen oyulmanın denge durumuna gelme sürelerinin üniform malzeme için Froude sayısı ve dane çapı arttıkça artmakta olduğunu, üniform olmayan taban malzemesi için dane çapı dağılımının geometrik standart sapması arttıkça azalmakta olduğunu belirtmişlerdir.

Kayatürk [31]'te yaptığı doktora çalışmasında köprü ayakları etrafındaki oyulmayı incelemiştir. Çalışmasını 30 m uzunluğunda ve 1.5 m genişliğinde bir açık kanalda yürütmüştür. Deney kanalı, $d_{50}=1.48$ mm medyan dane çapına sahip üniform yatak malzemesi ile doldurulmuştur. Köprü ayağının yerleştirildiği kısımda kum derinliği 0.5 metre olarak alınmıştır. Bu 0.5 metrelik kısım 10 metre uzunluğundadır. Köprü yan ayak boyunun, eninden daha önemli bir parametre olduğu ifade etmiştir. Yerel oyulma derinliğini azaltmak amacı ile köprü yan ayağının etrafına farklı derinliklere yerleştirilen plakanın genişliğinin artması halinde ve plakanın kum seviyesine veya kum seviyesinin altına yerleştirilmesi durumunda, oyulma derinliği azaldığını tespit etmiştir. Köprü yan ayakları etrafına yerleştirilen plakaların kesilmesi ile elde edilen kısmi plakaların bazı durumlarda tam plaka kullanıldığında elde edilen etkiye sahip olduğunu bildirmiştir. Köprü yan ayaklarının etrafında, meydana gelen oyulmaların zamanla değişimi plakaların kullanılması durumunda aynı zaman periyodunda plakasız duruma göre oyulma derinliğinde dikkate değer bir azalma olduğu göstermiştir. Plakaların, yan ayak ve orta ayağın birlikte olduğu çalışmalarda gösterdiği davranışın, yan ayak ile orta ayak tek başlarına etraflarına yerleştirildiği zaman elde edilen davranıştan çok farklı olduğunu gözlemlemiştir.

Güngör ve Fırat [32] çalışmalarını genişliği 0.9 m, uzunluğu 27 m ve yüksekliği 0.6 m olan bir açık kanalda yapmışlardır. Taban malzemesi olarak özgül ağırlığı, $\gamma_s= 26.5$ kN/m³ olarak belirlenen kuvars kumu kullanmışlardır. Ortalama akım hızı, 0.455 m/s, akım derinliği 10 cm ve debi 41 L/s olarak belirlemiştir. Deneylerde boyutlar santimetre cinsinden olmak üzere; dikdörtgen için 5x10, 5x15, 5x20 olarak tespit edilen ayak modelleri, oblonik için de $r=2.5$ cm yarıçaplı yarım daire kesitli elemanlarla

dikdörtgen ayaklar birleştirilerek elde edilen ayak modellerini kullanmıştır. Bu çalışmalarında, kıvrımın dışında 60° merkez açı civarında rölatif oyulma derinliğinin her iki çalışmada da maksimum değere ulaştığı tespit etmiştir. Ayrıca, 130° merkez açı civarında kıvrımın dış kenarına yerleştirilen ayaklar etrafında meydana gelen rölatif oyulma derinliği maksimum değere ulaşmıştır. Kanal kıvrımında elde edilen taban topoğrafyasıyla, kanal boyunca her üç ekseninde de kıvrıma yerleştirilen ayaklar etrafında meydana gelen yerel oyulma derinliklerinin yakın bir benzerlik gösterdiğini ve taban şekillerinin maksimum rölatif denge oyulma derinliğinin oluşumunda etkili olduğu çalışmaların da görülmektedir. Ayrıca, kıvrımlı kanalda akımın etkisiyle oluşan taban topoğrafyasına etki eden parametrelerin, kıvrıma yerleştirilen köprü kenar ve orta ayakları etrafında meydana gelen denge oyulma derinliklerinin oluşumunda da aynen etkili olduğunu göstermişlerdir.

Li vd [33] *Dünya Çevre ve Su Kaynakları Konferansında* sundukları bildiriye köprü kenar ayaklarındaki oyulmalara karşı alınan yakanın önleyici etkilerini sunmuşlardır.

Oliveto ve Hager [34], 2002'deki çalışmalarına ek olarak yan ayaklar ve mahmuzlar etrafında oluşan yerel oyulmaları deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca köprü orta ayakları etrafında taşkın hidrografları sırasında meydana gelen yerel oyulmanın zamana bağlı değişimini veren bir yöntem önermişlerdir.

Yoon [35] gabion (taş ile doldurulmuş telden sepet) koruyucu önlemini temiz su şartlarında deneyler gerçekleştirmiştir. Esneklik, kalıcılık, geçirimsizlik ve ekonomik nedenleriyle riprapa göre daha üstün bir yöntem olduğunu belirtmiştir.

Alabi [36] Kanada'da Saskatchewan Üniversitesinde yaptığı yüksek lisans tezi çalışmalarında köprü ayağına yerleştirilen yakanın oyulmayı ne kadar azalttığını ve denge oyulma derinliğini araştırmıştır.

Unger ve Hager [37] dairesel enkesite sahip köprü ayaklarında oyulma mekanizmasını incelemiş ve riprapın göçme açısından güvenilirliğini değerlendirmiştir.

Zarrati vd [38] dairesel enkesitli iki ayaktan oluşan gruba riprap ve yaka yerleştirilmesinin sonuca etkilerini araştırmışlardır. Yakanın

ayaklara ayrı ayrı olarak veya tek parça şeklinde yerleştirilmesi ayrıca yakanın akıma paralel veya dik konumda olması hallerinde deneysel bulgularını yorumlamışlardır.

Yanmaz ve Köse [39] dikdörtgen kesitli köprü ayağı kenar etrafındaki temiz su oyulmasını üniform taban malzemesi kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Oyulma derinliği ve oyulma konturlarını ölçmüşler ve köprü ayağı etrafında oluşan oyulmanın zamana bağlı alansal ve hacimsel değişimini vermişlerdir. Deneyler sonucunda oyulmayı önlemek amacıyla kullanılmakta olan ripraplar için yerleştirilme bölgesi önermişlerdir.

Kothyari vd. [40], temiz su oyulmasının zamana bağlı gelişimini hesaplamak için yeni bir bağıntı önermişlerdir. Deneyler, 1 m ve 0.50 m genişliklerine sahip, 11 metre uzunluğunda iki ayrı dikdörtgen kanalda gerçekleştirilmiştir.

Kumcu vd. [41] dikdörtgen kenar ayağa farklı seviyelerde yaka monte edilmesi durumunda temiz su oyulmasının zamana bağlı olarak değişimini incelemişlerdir.

Melville vd. [42] kanat kenar ayak durumunda hareketli taban şartlarında yaptığı deneyler sonunda gerekli riprap boyutunu belirlemiş ve göz önüne alınacak hususları anlatmışlardır.

Dey vd [43] bozulmuş yatak durumunda 45 derece açılı kanat köprü kenar ayağı için yerel oyulmaları ve riprap kararlılığını araştırmışlardır.

Doğan [44] Orta Doğu Teknik Üniversitesinde yaptığı yüksek lisans tezi çalışmalarında 0.90 mm çaplı katı madde kullanmış ve yaka monte edilmiş dikdörtgen köprü kenar ayağı etrafındaki temiz su oyulmalarını araştırmıştır.

Cardoso ve Fael [45] (temiz su oyulması şartlarında gerçekleştirdikleri deneyler sonunda köprü kenar ayaklarına yerleştirilecek riprap örtüsü tabaka kalınlığının riprap çapının en az altı katına eşit olması durumunda oyulmaların ihmal edilebilir mertebede olduklarını belirtmişlerdir.

Chang, Lai ve Yen [46], kararlı ve kararsız akım koşullarında, üniform veya üniform olmayan taban malzemesi kullanarak köprü orta ayağı etrafındaki temiz su oyulmasının zamana bağlı değişimi için bir hesap yöntemi önermişlerdir.

Deng ve Cai [47] köprü ayakları etrafında oluşan yerel oyulmaların ölçümü, tahmini ve

oyulmalara karşı alınacak önlemlerle ilgili çalışmalarını yayınlamışlardır.

Diab vd. [48] oyulma çukurunun gelişimini ve denge durumunu çakıl taban malzemesine yerleştirilen köprü ayağı için araştırmışlardır.

Bu çalışmada ise, kıvrımlı bir kanalda $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen köprü yan ayağı etrafında oluşan yerel oyulmalar ve akım şiddetinin oyulma olayına etkisi temiz su oyulması durumu için deneysel olarak incelenmiştir. Her ayak için 10-12 saat arasında maksimum oyulma derinlikleri ölçülmüştür.

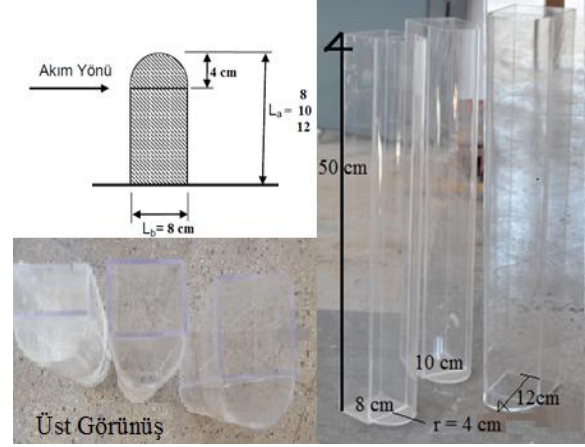
2. Deneysel Çalışma

2.1 Deneysel Düzenek ve Deneilerin Yapılışı

Deneysel Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Hidrolik Laboratuvarında 3 m eksen eğrilik yarıçapına sahip bir kıvrımlı kanalda yapılmıştır. Kıvrımlı kanal genişliği 100 cm'dir. Bunun 50 cm'lik kısmı ana kanal, diğer 50 cm'lik kısmı ise toplama kanalının genişliğidir. Ana kanal derinliği 50 cm, toplama kanalının derinliği ise 70 cm'dir (Şekil 3).

Ana kanal ve toplama kanalı taban eğimi $\%0.1$ 'dir. Köprü kenar ayağı I bölgesine (Şekil 3) kıvrım açısı 90° olan kanal dış duvarına yerleştirilmiştir. Ana kanala yerleştirilecek olan köprü ayağı pleksiglas malzemeden yapılmıştır. Dairesel burunlu (oblonik) köprü kenar ayağı $L_b=8$ cm genişliğinde, 50 cm yüksekliğinde olup $L_a=8, 10$ ve 12 cm olmak üzere üç farklı

uzunlukta ayak tipi seçilerek imalatı yaptırılmıştır. Yan ayağın ucu yarım daire şeklinde ve çapı 8 cm'dir (Şekil 2).



Şekil 2. Dairesel burunlu köprü yan ayağı boyutları

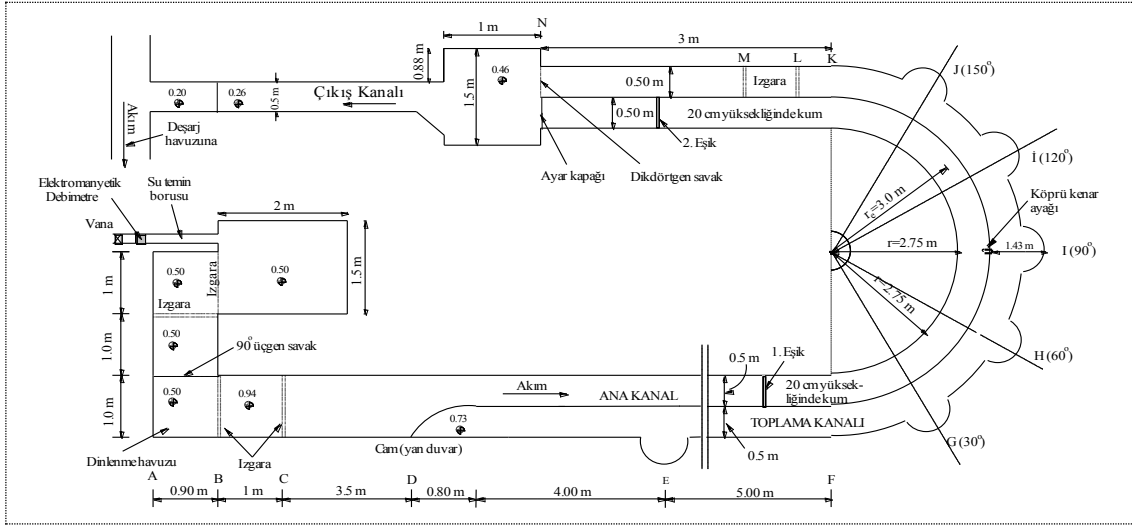
Köprü ayağı 90° lik açıda ana kanalın dış kıyı duvarına silikonla dik olarak monte edilmiştir. Maksimum oyulma derinliği ilk bir saatte 15 dakikada bir, ikinci saatte 20 dakikada bir, üçüncü saatte 30 dakikada bir ve sonraki sürelerde 60° şar dakikada bir maksimum oyulma derinlikleri ölçülmüştür. Temiz su oyulmasında denge oyulma derinliği deneyleri maksimum 660 dakikaya ulaşılmıştır. Aşağıdaki Tablo 1'de görüldüğü gibi $\alpha=90^\circ$ 'de 12 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerde ayak genişliğinin yanında su yüksekliği ve debi de değiştirilmiştir.

Tablo 1. Kıvrımlı kanalda $\alpha=90^\circ$ dış kıyıda deney serileri

Deneysel No	Ayak şekli	Debi	h	V	V_{kr}	V/V_{kr}
1	$L_a=8$ cm (dış kıyı)	23	150	0.307	0.4444	0.6901
2		26	150	0.347	0.4444	0.7801
3		30	160	0.375	0.4488	0.8356
4		35	170	0.412	0.4529	0.9093
5	$L_a=10$ cm (dış kıyı)	23	150	0.307	0.4444	0.6901
6		26	150	0.347	0.4444	0.7801
7		30	160	0.375	0.4488	0.8356
8		35	170	0.412	0.452	0.9093
9	$L_a=12$ cm (dış kıyı)	23	150	0.307	0.444	0.6901
10		26	150	0.347	0.4444	0.7801
11		30	160	0.375	0.4488	0.8356
12		35	170	0.412	0.4529	0.9093

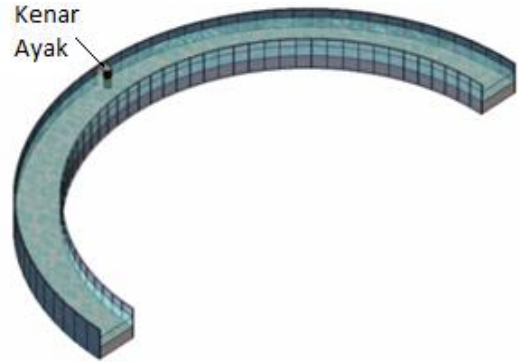
Deneyler 50 cm'lik ana kanalda yapılmıştır (Şekil 3). Ana kanal üzerindeki 1. ve 2. eşik arasına 20 cm yüksekliğinde kuvars kumu yerleştirilmiştir. Kanal tabanına yerleştirilen kumun sediment standart sapması $\sigma=1.70$ 'dir. Her deneyden önce kum karıştırılarak taban düzlenmiştir. Taban düzlenmesini aynı seviyede düzgün olarak sergilemek için, raylar üzerinde hareket eden araba üzerine bir aparat yerleştirilerek taban düzlemesi yapılmıştır. Taban düzenlemesi yapıldıktan sonra deneye başlarken vana çok az açılarak kanala su yavaş

bir şekilde verilir kumun bozulmaması sağlanır. Tüm kanal boyunca su seviyesi eşit olduktan sonra istenilen debi değeri Siemens marka elektromanyetik bir debimetre kullanılarak ayarlanır. Deneyler $V/V_{kr} < 1.0$ temiz-su oyulması durumuna göre değerler alınarak yapılmıştır. Ana kanal kıvrım boyunca seviye ölçümleri, raylar üzerinde hareket eden arabaya monte edilmiş dijital limnometre (± 0.01 mm hassasiyetli) ile yapılmıştır. Araba, kıvrımlı kısımda rahatlıkla hareket edecek şekilde tasarlanmıştır. Böylece, hem x hem de y doğrultusunda okumalar alınabilmektedir.



Şekil 3. Deney düzeneği

Köprü kenar ayağı kıvrımlı kanalın 90° kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilmiştir. Kenar ayağın görünümü Şekil 4'te görülmektedir.

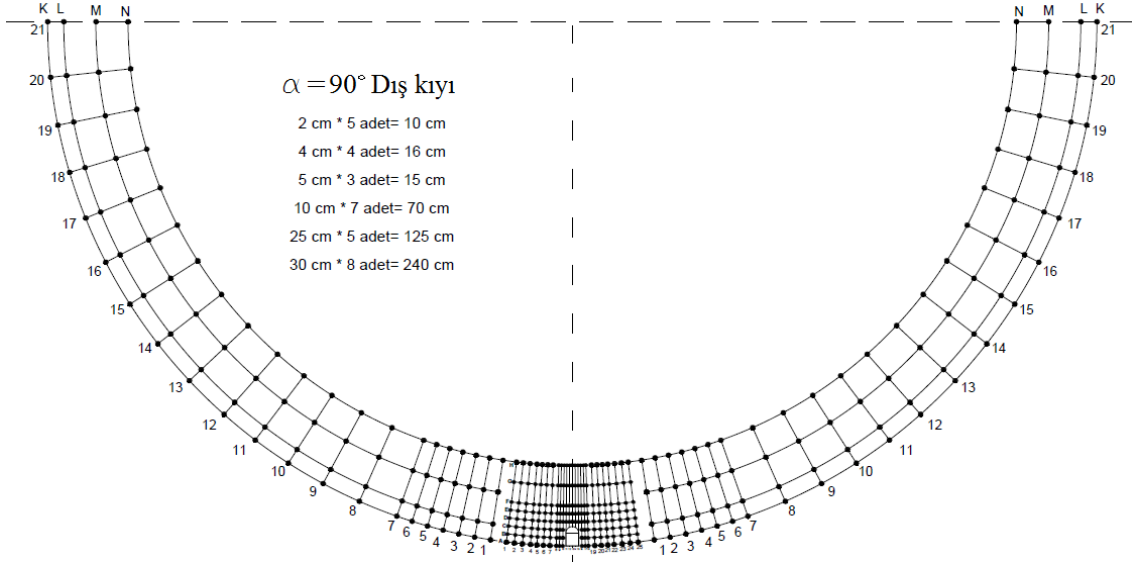


Şekil 4. Dış kıyıya yerleştirilen köprü kenar ayağının görünümü

Deney tamamlandıktan sonra (maksimum 12 saat sonunda), vana yavaşça kapatılarak tabanda oluşan topografyanın bozulmaması için 20 cm'lik eşik doğrusal kanalın mansabındaki

eşiğin üzerine tekrar konulmuş ve bu sayede suyun kanaldan yavaşça tahliyesi sağlanmıştır. Tüm bu işlemlerden sonra dijital limnometre yardımıyla kıvrımlı kanal boyunca köprü kenar

ayak etrafında daha sık olmak üzere belirli aralıklarda taban seviyesi ölçümleri yapılmıştır. Şekil 5'te dış kıyıda taban topografyası ölçümlerinin alındığı noktalar gösterilmiştir.

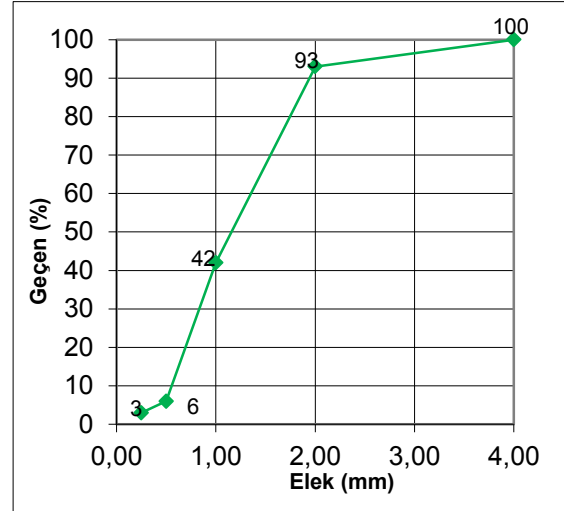


Şekil 5. Dış kıyıda taban topografyası ölçümlerinin alındığı noktalar

2.2. Deneyde kullanılan taban malzemesinin özellikleri

Bu deneysel çalışmada, taban malzemesi olarak granülometrisi ve özgül ağırlığı Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında yapılan deneylerle belirlenen kuvars kumu kullanılmıştır. Kumun özgül ağırlığı, $\gamma_s=2.65 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Yapı Laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda, elde edilen granülometri eğrisi şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'ya göre, $d_{10}=0.56 \text{ mm}$, $d_{16}=0.63 \text{ mm}$, $d_{60}=1.35 \text{ mm}$, $d_{84}=1.82$ olarak belirlenmiştir. Seçilen granülometriden, üniform malzeme kullanıldığı görülmektedir. $U=d_{60}/d_{10}=2.41 < 3$ 'tür.

(U =Üniformluk katsayısıdır). Sediment standart sapması ise, $\sigma=(d_{84}/d_{16})^{0.5}=1.70$ 'tir.



Şekil 6. Taban malzemesinin granülometri eğrisi

2.3 Taban Malzemesi Kritik Hızların Tayini

Taban malzemesini harekete geçirecek kritik akım hızları V_{kr} , logaritmik formdaki Eşitlik 2'den hesaplanmıştır (Melville ve Chiew, [16]); Önen, [49]).

$$\frac{V_{kr}}{u_{*kr}} = 5.75 \log \left(5.53 \frac{h}{d_{50}} \right) \quad (7)$$

burada u_{*kr} kritik kayma hızı (m/s), h su derinliği (m) ve d_{50} , malzemenin %50'sini geçiren elek çapıdır. Kayma hızları Shields Diyagramı kullanılarak bulunmuştur. 20 °C'de kuvars kumu için Shields diyagramı kullanılarak aşağıdaki ifade yazılabilir (Melville ve Chiew, [16]; Önen, [49]).

$$u_{*kr} = 0.0305d_{0.50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1},$$

$$1 \text{ mm} < d_{50} < 100 \text{ mm} \quad (8)$$

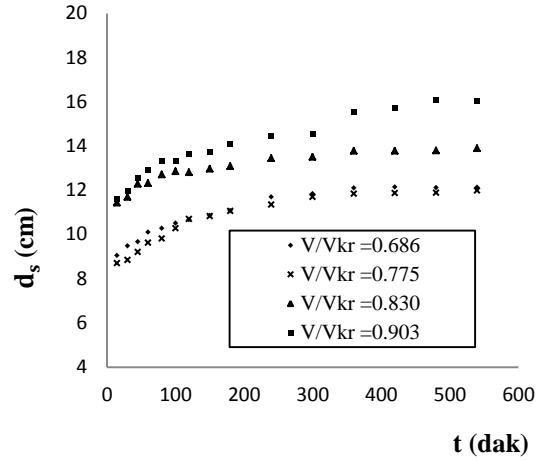
Medyan çap $d_{50}=1.16$ mm için (7) ve (8) eşitliklerinden, akımın çeşitli derinlikleri için taban malzemesini hareket ettirebilecek kritik hızlar için (9) eşitliği elde edilmiştir. Bu eşitlik deney kanalında test edilerek de doğrulanmıştır.

$$V_{kr} = 0.1557 \cdot \log(4767h) \quad (9)$$

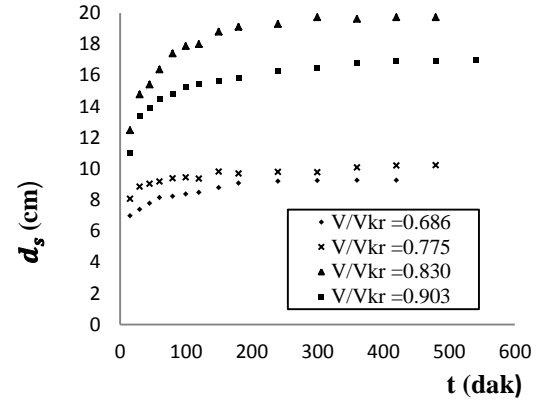
3. Deneysel Sonuçları ve Tartışma

Köprü kenar ayağı, kıvrımlı bir kanalda $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilmiştir. Farklı ayak uzunlukları için temiz su oyulma durumuna göre köprü kenar ayağı etrafında oluşan oyulma deneysel olarak incelenmiştir. Kenar ayak uzunluğunun maksimum oyulmaya ve taban geometrisine olan etkisi uzun süreli deneyler yapılarak incelenmiştir.

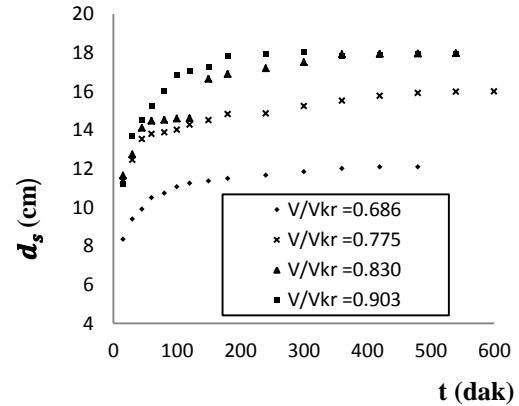
Farklı akım şiddetleri için maksimum oyulma derinliğinin zamanla değişimi Şekil 7'de görülmektedir. Şekil 7(a)'da $\alpha=90^\circ$, $L_a=8$ cm ve farklı akım şiddetlerine göre maksimum oyulma derinliğinin zamanla değişimi verilmiştir. Şekil 7(a)'da görüldüğü gibi akım şiddetinin artmasıyla maksimum oyulma derinliği artmıştır. 200 dakikaya kadar maksimum oyulma derinliğinin artma eğilimi bu süreden sonrakilere göre daha fazla olmuştur. Şekil 7(b,c)'de de görüldüğü gibi $L_a=8$ cm için elde edilen sonuçlara benzer bulgulara ulaşılmıştır.



(a) $\alpha=90^\circ$, $L_a=8$ cm (dış kıyı)



(b) $\alpha=90^\circ$, $L_a=10$ cm (dış kıyı)

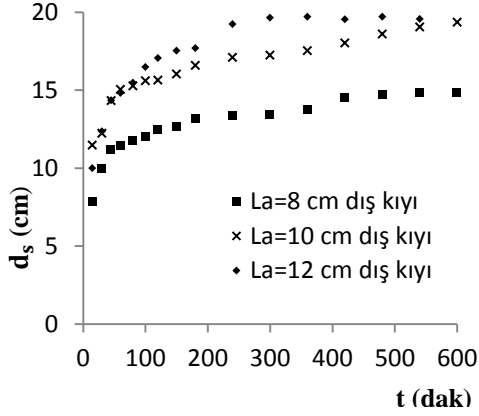


(c) $\alpha=90^\circ$, $L_a=12$ cm (dış kıyı)

Şekil 7(a-c). $\alpha=90^\circ$, farklı akım şiddetleri ve farklı ayak uzunlukları için oyulma derinliğinin zamanla değişimi

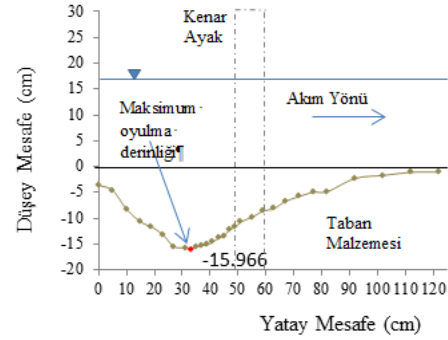
Şekil 8'de farklı kenar ayak uzunlukları için maksimum oyulma derinliğinin zamanla değişimi görülmektedir. Ayak uzunluğunun artması ile maksimum oyulma derinliği de

artmaktadır. $L_a=8$ cm için 600 dk sonundaki oyulma değeri 14.283 ve $L_a=10$ cm için 600 dk sonundaki oyulma değeri 19.339. Görüldüğü gibi ayağın %25 artması ile oyulma derinliği 1.30 kat artmaktadır.

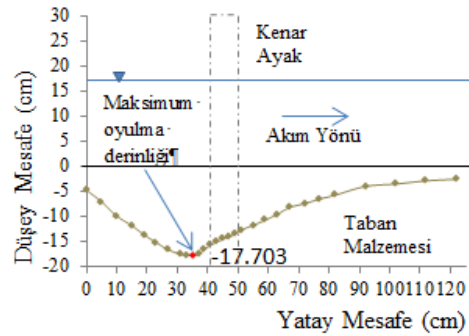


Şekil 8. $\alpha=90^\circ$ ve $V/V_{kr}=0.903$ 'de farklı ayak uzunlukları için oyulma derinliğinin zamanla değişimi

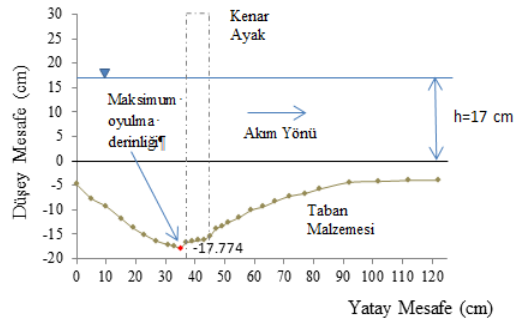
Şekil 9'da kıvrımlı bir kanalda $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen köprü kenar ayağı etrafında oluşan oyulma derinliğinin taban profili gösterilmiştir. Buradaki oyulmaya bakıldığında köprü kenar ayağı etrafında çok fazla oyulma olduğu görülmektedir. Aynı zamanda kenar ayak uzunluğu arttıkça oyulma daha da artmaktadır. Kıvrımlı kanala yerleştirilen üç tip ayaktaki taban profilleri incelendiğinde ise memba tarafında çok fazla oyulma olduğu görülmektedir. Maksimum oyulmanın yeri köprü kenar ayağının memba uç kısmında oluşmuştur. $L_a=8$ cm için memba ucundaki maksimum oyulma değeri -15.966, $L_a=10$ cm için -17.703 ve $L_a=12$ cm için ise -17.774 cm olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar Yanmaz ve Köse (2007) tarafından bulunan sonuçlar ile uyumludur.



(a) 8 cm, $V/V_{kr}=0.903$ ($\alpha=90^\circ$)



(b) 10 cm, $V/V_{kr}=0.903$ ($\alpha=90^\circ$)



(c) 12 cm, $V/V_{kr}=0.903$ ($\alpha=90^\circ$)

Şekil 9(a-c). Köprü kenar ayaklarında oyulma derinliğinin taban profilleri

Şekil 10'da $L_a=10$ cm için 11 saat sonundaki taban topoğrafyası görülmektedir. Dış kıyının oyulduğu iç kıyıda ise malzeme biriktiği görülmektedir. Elde edilen bulgular Güngör ve Fırat (2005) tarafından bulunan bulgular ile uyumludur.



Şekil 10. Köprü kenar ayağında oluşan oyulma ($L_a=10$ cm)

4. Sonuçlar

Kıvrımlı bir kanalda $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen köprü yan ayağı etrafında oluşan yerel oyulmalar, temiz su oyulması durumu için deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bu bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Akım şiddeti (V/V_{kr}) arttığı zaman maksimum oyulma derinliği de artmıştır.
- Köprü kenar ayak uzunluğu arttığı zaman maksimum oyulma derinliği de artmaktadır.
- Kıvrımlı kanal boyunca köprü kenar ayağı etrafında çok fazla oyulma olduğu görülmüştür.
- Maksimum oyulmanın yeri, kenar ayağın memba ucunda oluştuğu gözlemlenmiştir.

5. Semboller

b	Ana kanal genişliği (m)
d_{50}	Malzemenin yüzde ellisini geçiren elek çapı (Medyan çap, mm)
d_s	Oyulma Derinliği(m)
F_d	Densimetrik Froude sayısı
g'	Göreceli yerçekimi ivmesi
g	Yerçekimi ivmesi (m^2/s)
h	Herhangi bir kesitteki akım derinliği (m)
L_a	Kenar ayak uzunluğu (m)
L_b	Kenar ayak genişliği (m)
N	Şekil faktörü
t	Zaman (dakika)
T	Göreceli zaman

U	Üniformluk katsayısı
V	Ana kanaldaki ortalama akım hızı (m/s)
V_{kr}	Kritik kayma hızını (m/s)
u_{*kr}	Kritik kayma hızı (m/s)
Z	Boyutsuz oyulma derinliği
z_R	Referans uzunluğu
α	Kıvrım merkez açısı ($^\circ$)
γ_s	Taban malzemesi olarak özgül ağırlığı (kg/m^3)
σ	Sediment standart sapmasını
ρ	Akışkan yoğunluğu (kN/m^3)
ρ_s	Sediment yoğunluğu (kN/m^3)

6. Kaynaklar

1. Güngör, M., "Akarsu Kıvrımlarına Yerleştirilen Köprü Kenar Ayakları Etrafındaki Yerel Oyulma Derinliğinin Araştırılması", (Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 132s, (1997).
2. Murillo, J. A. (1987). "The Scourge of Scour." Civil Engineering, 57(7), 66-69.
3. Zhai, Yuan, "Time-Dependent Scour Depth Under Bridge-Submerged Flow". Civil Engineering Theses, Dissertations, And Student Research. Sf 4, (2010).
4. www.milliyet.com.tr
5. Chiew Y.M., Melville B. W., "Local Scour Around Bridge Piers". Journal of Hydraulic Research, 25 , 1, 15-26 (1987).
6. Melville, B. W., Sutherland A.J. "Design Method for Local Scour at Bridge Piers". Journal of Hydraulic Engineering, 114 (10), 1210-1226 (1988).
7. Melville B. W., Chiew Y. M., "Time Scale for Local Scour at Bridge Piers". Journal of Hydraulic Engineering, 125, 1, 59-65 (1999).
8. Yanmaz A. M., Altınbilek H. D., "Study of Time-Dependent Local Scour Around Bridge Piers". Journal of Hydraulic Engineering, 117, 10, 1247-1268, (1991).
9. Chiew Y. M. "Scour Protection at Bridge Piers". Journal of Hydraulic Engineering, 118(9), (1992).
10. Ayala L., Grandon F., "Effect of Pier Geometry on Scour in Graded Gravels Proceedings". National Conference on Hydraulic Engineering, Pp. 73-77, (1994).
11. Chiew Y. M., "Mechanics of Riprap Failure at Bridge Piers". Journal of Hydraulic Engineering, 121(9), 635-643 (1995).
12. Richardson, E. V., Davis, S. R., 1995. "Evaluating Scour at Bridges". (3rd ed.) (6.1-6.6). Hydr. Engrg. Circular No. 18 (HEC-18), Rep. No. FHWA-IP-90-017, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

13. Melville B. W., Raudkivi A.J., “Effects of Foundation Geometry on Bridge Pier Scour”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122, 4, 203-209 (1996).
14. Melville, B. W., 1997. “Pier and abutment scour: Integrated approach”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 123(2), 125-136.
15. Kandasamy J. K. , Melville B. W., “Maximum Local Scour Depth at Bridge Piers and Abutments”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Asce, 36, 2, 183-197 (1998).
16. Melville B. W., Chiew Y. M., “Time Scale for Local Scour at Bridge Piers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 1, 59-65 (1999).
17. Melville B. W., Coleman S.E., “Bridge Scour, Water Resources”. Highlands Ranch, Colo. (1999).
18. Cardoso A. H., Bettess R., “Effects of Time and Channel geometry on Scour at Bridge Abutments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125, 388-399 (1999).
19. Kumar V., Raju K.G.R., Vittal N., “Reduction of Local Scour Around Bridge Piers Using Slots and Collars”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 12, 1302-1305 (1999).
20. Balho F., Orsi E., “Time Evolution of Scour Around Bridge Abutments”. *Water Eng. Res.*, 2 (4), 243-259 (2000).
21. Chiew, Y. M., Lim F. H., “Failure Behavior of Riprap Layer at Bridge Piers Under Live-Bed Conditions”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Asce, 126, 1, 43-55 (2000).
22. Lauchlan C. S., Melville B. W., “Riprap Protection at Bridge Piers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127, 5, 412-418 (2001).
23. Richardson, E. V., Harrison, L. J., Davis S. R., “Evaluating Scour at Bridges” (4th Ed.) (6.1-6.6). Hydr. Engrg. Circular No. 18 (Hec-18), Rep. No. Fhwa-01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C., (2001).
24. Oliveto G., Hager, W. H., “Temporal Evolution of Clear-Water Pier and Abutment Scour”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9), 811–820. (2002).
25. Coleman S.E., Lauchlan C. S., Melville B. W., “Clearwater Scour Development at Bridge Abutments”. *Journal of Hydraulic Research*, 41, 521-531(2003).
26. Rahman M., Haquem. “A. Local Scour Estimation at Bridge Site, Modification and Application of Lacey Formula”. *International Journal of Sediment Research*, 18, 4, 333-339 (2003)
27. Chiew Y. M., “Local Scour and Riprap Stability at Bridge Piers in a Degrading Channel”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Asce, 130, 3, 218-226 (2004).
28. Dey S. ve Barbhuiya A.K., “Clear Water Scour at Abutments, *Water Management*”, 157,2, 77-98 (2004).
29. Sheppard D. M., Odeh, M., Glasser, T., “Large Scale Clear-Water Local Pier Scour Experiments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130, (2004).
30. Rajkumar R. V., Dey S., “Clear-Water Scour at Bridge Piers in Fine and Medium Gravel Bed”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(4), 775–781 (2005)
31. Kayatürk S. Y. Scour and Scour Protection at Bridge Abutments, (Ph. D. Thesis), Metu, Ankara, (2005).
32. Güngör, M. ve Fırat, “Akarsu Kıvrımlarında Meydana Gelen Taban Topoğrafyası ve Yerel Oyulma İle İlişkisi”, *Pamukkale Üniversitesi Müh. Bilimleri Dergisi*, 12(1), 1-6, (2005).
33. Li H., Barkdoll B., Kuhnle R., “Bridge Abutment Collar as a Scour Contermeasure”. *Asce*, Ewri, (2005).
34. Oliveto G., Hager, W. H., “Further Results to Time-Dependent Local Scour at Bridge Elements”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 97–105, (2005).
35. Yoon T. H., “Wire Gabion for Protecting Bridge Piers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No 11, 942-949, (2005).
36. Alabi P.D., “Time Development of Local Scour at a Bridge Pier Fitted with a Collar”. *University of Saskatchewan, Saskatoon Saskatchewan, Canada* (2006).
37. Unger J., Hager W. H. “Riprap Failure at Circular Bridge Piers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132, 4, 354-362, (2006).
38. Zarrati A.R., Nazariha M., Mashahir M.B., “Reduction of Local Scour in The Vicinity of Bridge Pier Grops Using Collars and Riprap”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132, 2, 9. 154-162, (2006).
39. Yanmaz A. M., Köse Ö., “Time-Wise Variation of Scouring at Bridge Abutments”. *Sadhana*, Vol. 32, Part 3, 199–213, Printed in India, (2007).
40. Kothyarı, U. C., Hager, W. H., Oliveto, G., “Generalized Approach for Clear-Water Scour at Bridge Foundations Elements”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(11), (2007).
41. Kumcu S.Y., Göğüş M., Kökpınar M. A., “Temporal Scour Development at Bridge Abutments With a Collar”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34, 4, 549 (2007).
42. Melville B. W., Ballegooy S., Coleman S.E., “Barkdoll B. Riprap Size Selection at Wing Wall

- Abutment". *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, 11, 1265-1269 (2007).
43. Dey S., Chiew Y. M., Kadam M. S., "Local Scour and Riprap Stability at an Abutment in a Degrading Bed". *Journal of Hydraulic Engineering, Asce*, 134, 10, 1496-1502 (2008).
 44. Doğan A. E., "Effects Of Collars on Scour Reduction at Bridge Abutments". (Mas. Sc. Thesis), Metu, Ankara, (2008).
 45. Cardoso A. H., Fael C. M. S. "Protecting Vertical Wall Abutments with Riprap Mattresses". *Journal of Hydraulic Engineering*, 135, 6, 457-465 (2009).
 46. Chang, W. Y., Lai, J. S., and Yen, C. L. (2004). "Evolution of Scour Depth at Circular Bridge Piers." *J. Hydraul. Res.*, 130(9), 905-913.
 47. Deng L., Cai C., "Bridge Scour: Prediction, Modeling, Monitoring, and Countermeasures - Review". *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, Doi: 10.1061/(Asce)Sc.1943-5576.0000041, 15(2), 125-134 (2010).
 48. Diab, R., Link, O., Zanke, U., "Geometry of Developing and Equilibrium Scour Holes at Bridge Piers in Gravel". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(4), 544-552, (2010).
 49. Önen, F., "Hareketli Tabanlı Akarsularda Yanal Akımın Hidrodinamiđinin İncelenmesi", Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.