

Köprü Kenar Ayaklarındaki Oyulma Güvenilirliği

Ömer KÖSE*

A. Melih YANMAZ**

ÖZ

Geniş akarsuları geçen köprülerin yıkılmasıyla çok sayıda can kaybı, kamu ve özel mülk hasarları ve trafiğin aksaması gibi problemler yaşanabilir. Bu olumsuzlukların önlenmesi amacıyla planlama ve tasarım aşamalarında köprü yıkımına neden olabilecek tüm etkenler ele alınmalıdır. Geçmiş gözlemlere dayanarak köprü yıkılmalarının ana nedeninin orta ve kenar ayaklar etrafında oluşan aşırı oyulmalar olduğu söylenebilir. Ayaklar etrafındaki oyulma olayı oldukça karmaşık olup, bu olayı tetikleyen parametrelerde fazla miktarda belirsizlik bulunmaktadır. Temel derinliğinin gerçekçi olarak saptanabilmesi için ayaklar etrafındaki oyulma derinliğinin hassas olarak bulunması gereklidir. Bu çalışmada, dik köprü kenar ayakları etrafındaki temiz su oyulmasının zamana bağlı değişimini veren amprik ve yarı amprik yöntemler geliştirilmiştir. Temel derinliğinin güvenilirliği, amprik yöntemin Monte Carlo tekniğiyle çözümlenmesinden bulunmaktadır. Ayrıca bu uygulamanın gösterildiği bir örnek sunulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Oyulma, kenar ayak, güvenilirlik, Monte Carlo yöntemi

ABSTRACT

Scouring Reliability at Bridge Abutments

Failures of bridges crossing wide rivers may cause a number of inconveniences, such as loss of several lives, damages to public and private properties, and traffic disruption. That is why various modes of bridge failures should be accounted for in the planning and design phases to compensate for such negative impacts. Based on the experience gained from past events, it is known that excessive scouring at bridge piers and abutments has been the main cause of bridge failures. The scouring phenomenon is relatively complex and high degrees of uncertainties are associated with the parameters characterizing this event. Accurate determination of the maximum possible depth of scour at these elements is of importance in realistic decision-making for the safe design of footings. This study is based on the development of clear-water scouring models for bridge abutments having vertical-walls using empirical and semi-empirical approaches. The reliability of the abutment footing

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 10.10.2008 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2010 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray - omerkose2000@gmail.com

** Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - myanz@metu.edu.tr

level is estimated using the empirical model with Monte Carlo simulations. An application is also presented to illustrate the use of this approach.

Key words: Scour, abutment, reliability, Monte Carlo technique

1. GİRİŞ

Köprü yıkılmalarının nedenleri üzerine yapılan istatistiksel çalışmalar, bu olayların çoğunlukla hidrolik etkenlerden kaynaklandığını göstermektedir. Wardhana ve Hadipriono'nun [1] A.B.D.'de 1989 ve 2000 yılları arasında hasar gören veya yıkılan 500'den fazla köprü üzerinde yaptığı araştırmalar sonucunda en önemli etkenin taşkınlar olduğu anlaşılmıştır. Taşkınlar esnasında ayaklar etrafında oluşan aşırı oyulmalar köprü yıkılmalarının veya ağır hasar görmelerinin ana nedenini oluşturmuştur. Konunun önemi nedeniyle 20. yüzyılın ortalarından başlayarak köprü ayakları etrafındaki oyulmanın mekanizması incelenmiş ve koruyucu yöntemlerin geliştirilmesi üzerinde durulmuştur. Günümüze kadar önemli gelişmeler elde edilmesine karşın konu önemini hala korumaktadır. Zira mekanizmasının çok karmaşık olması, bu olayın tam olarak çözümlenmesini ve evrensel şartlara uygun bir yöntem geliştirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, artan ve gelişen fiziksel laboratuvar olanakları ve matematiksel çözüm yöntemleriyle oyulma mekanizması değişik yönleriyle hala üzerinde önemle durulan bir konudur. Bu makale, dik köprü kenar ayakları etrafındaki temiz su oyulmasının zamansal değişimini incelemektedir. Daha önce bu konuda geliştirilmiş olan amprik denklemlerin çoğu oldukça uzun sürelerde erişilen temiz su dengeli oyulma derinliğine dayanmaktadır. Bu nedenle, dengeli oyulma derinliğine göre tespit edilecek temel derinlikleri ekonomik olmayan sonuçlar vermektedir [2], [3]. Ayaklar etrafındaki oyulma çukurunun seçilen tasarım taşkın süresi boyunca gelişiminin bilinmesi hem temel derinliğinin doğru bulunmasına, hem de ayaklar etrafındaki düzenleme yapılarının seçimine ışık tutacaktır [4].

Köprü kenar ayakları etrafındaki temiz su oyulmasının zamansal değişimi daha önce Wong [5], Tey [6], Cardoso ve Bettess [7], Ballio ve Orsi [8], Oliveto ve Hager [9], Coleman ve diğerleri [10], Dey ve Barbhuiya [11], Oliveto ve Hager [12], ve Yanmaz ve Köse [4] tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmalar arasında Dey ve Barbhuiya [11] tarafından geliştirilen yöntem yarı-amprik niteliktedir. Oliveto ve Hager [9] ile Coleman ve diğerlerinin [10] geliştirdiği amprik yöntemler ise kapsamlı laboratuvar verisiyle üretilmiştir. Zamansal ve yersel değişim gösteren türbülanslı akım ve ayaklar etrafındaki katı madde taşınımının karmaşık yapısı nedeniyle günümüzde tüm koşullar için geçerli olan bir yöntem henüz mevcut değildir. Bu nedenle, yukarıda sıralanan mevcut yöntemlere rağmen farklı akım şartları, taban malzemesi ve ayak şekilleri için ilave deneylere gereksinim bulunmaktadır. Gerek ölçek etkisi, gerek doğaya oranla oldukça basitleştirilmiş model nedeniyle ayaklar etrafındaki oyulmanın laboratuvar ortamındaki tam bir benzeşimini sağlamak mümkün olamamaktadır. Diğer taraftan, hassas arazi verisi çok az miktarda olduğundan amprik yöntemle bulunmuş modellerin arazi verisiyle kalibrasyonu da yapılamamaktadır. Bu makalede köprü dik kenar ayakları etrafındaki temiz su oyulmasının zamansal değişimini veren amprik ve yarı amprik nitelikte iki yöntem sunulacaktır. Amprik yöntemde boyut analizi yaklaşımı kullanılmıştır. Yarı amprik yöntemde ise oyulma çukurunun süreklilik denklemi esas alınmıştır. Ayak temel derinliğinin oyulma eğilimine karşı güvenilirliği amprik yöntem ve Monte Carlo benzeşimleriyle bulunmuştur.

2. DENEYSSEL ÇALIŞMA

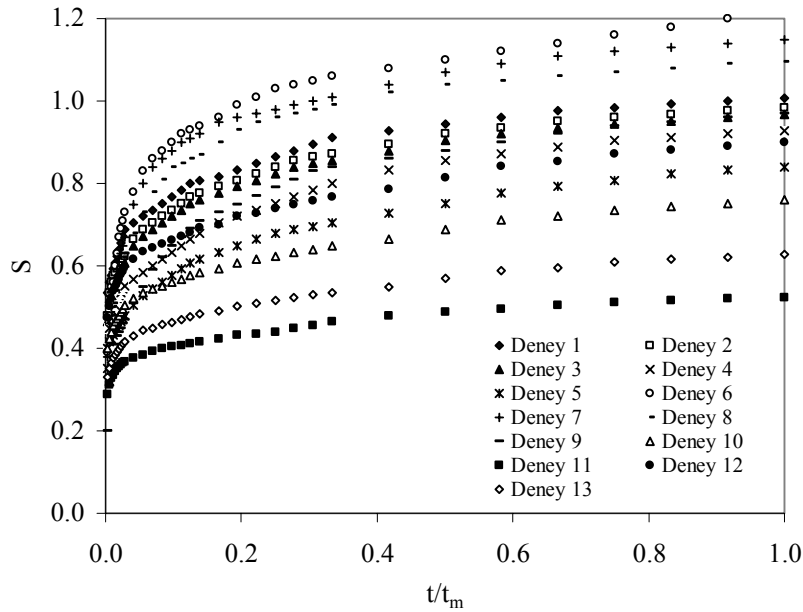
Köprü dik kenar ayakları etrafındaki temiz su oyulmasının zamansal değişimini incelemek amacıyla bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Deney kanalı 30 m uzunluğunda, 1.25 m genişliğinde ve 1.0 m derinliğinde olup, taban eğimi 0.001 değerindedir. Deneylerle ilgili özet bilgi Çizelge 1’de verilmektedir. Bu Çizelgede, L köprü kenar ayağının akıma dik yöndeki uzunluğu, D_{50} medyan dane çapı, u ortalama yaklaşım akım hızı, u_c tabanda hareketi başlatan ortalama kritik akım hızı, y ortalama yaklaşım akım derinliği, F_d dane yoğunluk Froude sayısı ($u/(\Delta g D_{50})^{0.5}$), Δ göreceli yoğunluk; $\Delta=(\rho_s - \rho)/\rho$, ρ_s dane özgül kütlesi, ρ suyun özgül kütlesi, g yerçekimi ivmesi ve t_m maksimum deney süresi olup, tüm deneyler 6 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Çizelge 1’de verilen ve detayları ileride anlatılacak olan C1-C5 ve C6-C10 deneylerinde ise ayaklar etrafındaki oyulma çukurunun 5, 20, 60, 100 ve 150 dakika sonunda elde edilen tesviye eğrileri bulunmuştur. Deneylerde taban malzemesi olarak medyan dane çapları 1.8 mm ve 0.9 mm olan iki farklı kum kullanılmıştır. Bu kumların granülometrik bileşiminin geometrik standart sapması (σ)1.40 değerinde olduğundan, yaklaşık olarak uniform dağılımlı kabul edilebilir.

Çizelge 1. Deney verisi

Deney no	L (cm)	D_{50} (mm)	u/u_c	y (cm)	F_d	L/y	t_m (dakika)
1	12.5	1.8	0.777	8.9	2.370	1.40	360
2	12.5	1.8	0.751	8.3	2.259	1.51	360
3	12.5	1.8	0.741	7.5	2.187	1.67	360
4	12.5	1.8	0.713	6.8	2.068	1.84	360
5	12.5	1.8	0.682	6.1	1.921	2.05	360
C1	12.5	1.8	0.777	8.9	2.370	1.40	5
C2	12.5	1.8	0.777	8.9	2.370	1.40	20
C3	12.5	1.8	0.777	8.9	2.370	1.40	60
C4	12.5	1.8	0.777	8.9	2.370	1.40	100
C5	12.5	1.8	0.777	8.9	2.370	1.40	150
6	10	1.8	0.777	8.9	2.370	1.12	360
7	10	1.8	0.751	8.3	2.259	1.20	360
8	10	1.8	0.741	7.5	2.187	1.33	360
9	10	1.8	0.713	6.8	2.068	1.47	360
C6	10	1.8	0.777	8.9	2.370	1.12	5
C7	10	1.8	0.777	8.9	2.370	1.12	20
C8	10	1.8	0.777	8.9	2.370	1.12	60
C9	10	1.8	0.777	8.9	2.370	1.12	100
C10	10	1.8	0.777	8.9	2.370	1.12	150
10	12.5	0.9	0.985	5.2	2.549	2.40	360
11	12.5	0.9	0.899	4.4	2.260	2.84	360
12	10	0.9	0.985	5.2	2.549	1.92	360
13	10	0.9	0.899	4.4	2.260	2.27	360

Köprü Kenar Ayaklarındaki Oyulma Güvenilirliği

Deneylerde içi boş pleksiglas malzemeden yapılmış eni 20 cm, boyu ise 12.5 cm ve 10 cm olan iki farklı kenar ayak modeli kullanılmıştır. Deneyler esnasında tabanda hareketin başlangıcı görsel olarak izlenmiş ve ayrıca Shields kriterine göre elde edilen kritik kayma gerilmesi değerlerinden kritik hızlar bulunmuştur. Deneylerde temiz su oyulması hali çalışıldığı için yaklaşım akım hızları tabanda hareket başlatmayacak şekilde seçilmiştir. Çizelge 1'den de görüleceği gibi u/u_c değerleri 1.0'den küçüktür. Deneyler esnasında dik kenar ayak etrafında oluşan maksimum oyulma derinliğinin (d_s) zamansal gelişimini (t) gözlemek amacıyla üstü açık ayak modelinin içine ucunda eğik bir ayna bulunan eşel indirilmiş ve ayak etrafındaki oyulma derinlikleri ilk taban seviyesine göreceli olarak ölçülmüştür. Maksimum deney süresi 6 saat olarak çalışılmıştır. Bu süre sonunda dengeli oyulma derinliklerine erişilmemiş olmasına karşın, oyulma derinliklerinin zamansal artış oranları çok düşük mertebelere inmiştir. Ayrıca 6 saatlik bir model deney süresinin doğada yeteri kadar büyük taşkın sürelerine karşı geleceği düşünüldüğünde çalışılan deney süresinin makul olduğu kabul edilebilir. Deneylerde maksimum oyulma derinliklerinin kenar ayakların memba köşesinde olduğu gözlenmiştir. Ölçülen maksimum oyulma derinliği verisi Şekil 1'de boyutsuz parametreler $S=d_s/L$ ve t/t_m cinsinden verilmiştir. Ayakların arka yüzlerinde ise yığılma bölgesi oluşmuştur.



Şekil 1. Boyutsuz oyulma derinliğinin boyutsuz zamana göre değişimi

3. AMPRİK YÖNTEM

Bu yaklaşım ayaklar etrafındaki oyulmayı etkileyen parametrelerin boyut analizine dayanmaktadır. Ayak etrafındaki maksimum oyulma derinliği d_s şu parametrelerin fonksiyonudur [13]:

$$d_s = f(L, u, y, \rho, \rho_s, \nu, u_c, g, D_{50}, \sigma, K_s, K_G, t) \quad (1)$$

Burada ν suyun kinematik viskozitesi, K_s kenar ayak şekil faktörü ve K_G kanal geometrik özelliklerini yansıtan düzeltme faktörüdür. Düzeltme faktörleriyle ilgili daha geniş bilgi Yanmaz [13] tarafından verilmiştir. Denklem (1)'den üretilecek boyutsuz parametreler için Buckingham'ın π teoremi uygulanmıştır. Gerekli düzeltmeler yapılarak elde edilen ve anlamlı hale getirilen boyutsuz parametreler aşağıdaki bağıntıda görülmektedir.

$$\frac{d_s}{L} = f\left(R_e, F_d, \frac{u}{u_c}, \frac{L}{D_{50}}, \frac{L}{y}, \sigma, K_s, K_G, T_s\right) \quad (2)$$

Burada R_e Reynolds sayısı (uy/ν), T_s daha önce Yanmaz ve Altınbilek [2] ve Yanmaz [3] tarafından köprü orta ayakları için kullanılmış olan boyutsuz zaman ifadesidir. Kenar ayaklar için $tD_{50}(\Delta g D_{50})^{0.5}/L^2$ olarak kullanılacak bu ifade zaman, dane çapı ve ayak büyüklüğü değişkenlerini tek bir değişkende toplaması açısından pratiktir. Denklem (2)'deki parametrelerin birbirine göreceli önem derecesine göre bazı basitleştirmeler yapılarak, bağıntı daha basit ve sade bir şekle dönüştürülebilir. Bu bağlamda şu kısıtlamalar ele alınacaktır. Tam teşekküllü türbülanslı akımlarda Reynolds sayısının etkisi ihmal edilebilir. Ayrıca pratikte pek çok prototip şartını yansıtan $L/D_{50} > 25$ durumunda L/D_{50} teriminin oyulma derinliğine etkisi ihmal edilmektedir [14]. Böylece taşkın yatakları ihmal edilen ve tabanı üniform kumdan oluşan prizmatik ana kanalda belli şekildeki bir kenar ayak etrafındaki boyutsuz oyulma parametreleri şu bağıntıya indirgenebilir ($\sigma \approx 1.0$, $K_s = 1.0$, $K_G = 1.0$):

$$\frac{d_s}{L} = f\left(F_d, \frac{u}{u_c}, \frac{L}{y}, T_s\right) \quad (3)$$

Denklem (3)'teki u/u_c ve F_d parametreleri akım derinliği, taban eğimi, taban direnç özellikleri ve medyan dane çapına bağlı olduğundan birbirlerine benzer bilgiler sunmaktadır [4]. Bu nedenle, L/y ve T_s parametrelerini, u/u_c ve F_d parametreleriyle ayrı ayrı sınyarak oyulma derinliğini daha yüksek korelasyonla veren kombinasyon bulunmalıdır. Şekil 1 ve Çizelge 1'de sunulan deneysel veri kullanılarak en iyi kombinasyon, korelasyon katsayısı 0.87 olan Denklem (4)'deki gibi elde edilmiştir.

$$\frac{d_s}{L} = 0.25 F_d^{0.85} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.15} (\log T_s)^{0.60} \quad (4)$$

4. YARI AMPRİK YÖNTEM

Bu makalede, köprü dik kenar ayakları etrafındaki oyulma derinliğinin zamansal değişimini veren ikinci bir model olarak yarı amprik nitelikte bir yöntem geliştirilecektir. Bu yöntem,

Köprü Kenar Ayaklarındaki Oyulma Güvenilirliği

ayak etrafındaki oyulma çukurunun süreklilik denkleminde dayanmaktadır. Temiz su oyulması koşullarında anılan süreklilik denklemi şöyle ifade edilmektedir:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{so} \quad (5)$$

Burada V ayak etrafındaki oyulma çukurunun hacmi ve Q_{so} oyulma çukurundan çıkan taban malzemesi debisidir. Denklem (5)'ten de görüleceği gibi bu yöntem oyulma çukuru hacminin zamansal değişiminin bilinmesine bağlıdır. Bu nedenle, ayak etrafındaki oyulma çukurunun hacminin değişik zamanlarda bulunması için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler $F_d=2.370$ değerinde ve $D_{50}=1.8$ mm çaplı kum için yapılmıştır. Ayak uzunluğu $L=12.5$ cm için C1 - C5 deneyleri, $L=10$ cm için ise C6 - C10 deneyleri gerçekleştirilmiştir (Bkz. Çizelge 1). Bu deneyler ardışık olarak sırasıyla 5, 20, 60, 100, ve 150 dakikalık deney süreleri sonunda tamamlanmış ve oyulma çukuru içindeki tesviye eğrileri limnometre ile sık aralıklarda ölçülmüştür. Bu ölçümler yapılmadan önce kanaldaki su yavaş yavaş tahliye edilmiş ve bu esnada oluşan taban topoğrafyasının bozulmamasına özen gösterilmiştir. Çalışılan ardışık sürelerin sonunda ayak etrafındaki çukur tekrar kumla doldurulup, taban düzleştirilmiş ve bir sonraki deney tekrar ilk taban seviyesinden başlatılmıştır. Tesviye eğrileri kullanılarak yüzey alanı ve çukur hacmi hesaplayan bir bilgisayar programı vasıtasıyla oyulma çukuru yüzey alanı ve hacmi hesaplanmıştır. Boyutsuz oyulma çukuru hacminin, $V^*=V/(d_s L^2)$, boyutsuz zaman, T_s , ile değişimi korelasyon katsayısı 0.980 olan (6) bağıntısındaki gibi elde edilmiştir.

$$V^* = 1.142 T_s^{0.281} \quad (6)$$

Denklem (6), oyulma çukuru hacminin zamansal değişiminin azalan bir fonksiyon izlediğini göstermektedir. Elde edilen oyulma çukuru tesviye eğrilerinden oyulma çukurunun arka yüzey haricindeki yanal eğimlerinin yaklaşık olarak kumun içsel sürtünme açısına, ϕ , eşit olduğu anlaşılmaktadır. Ayak etrafındaki oyulma çukurunun tesviye eğrilerinden bir tanesi Şekil 2'de verilmiştir.

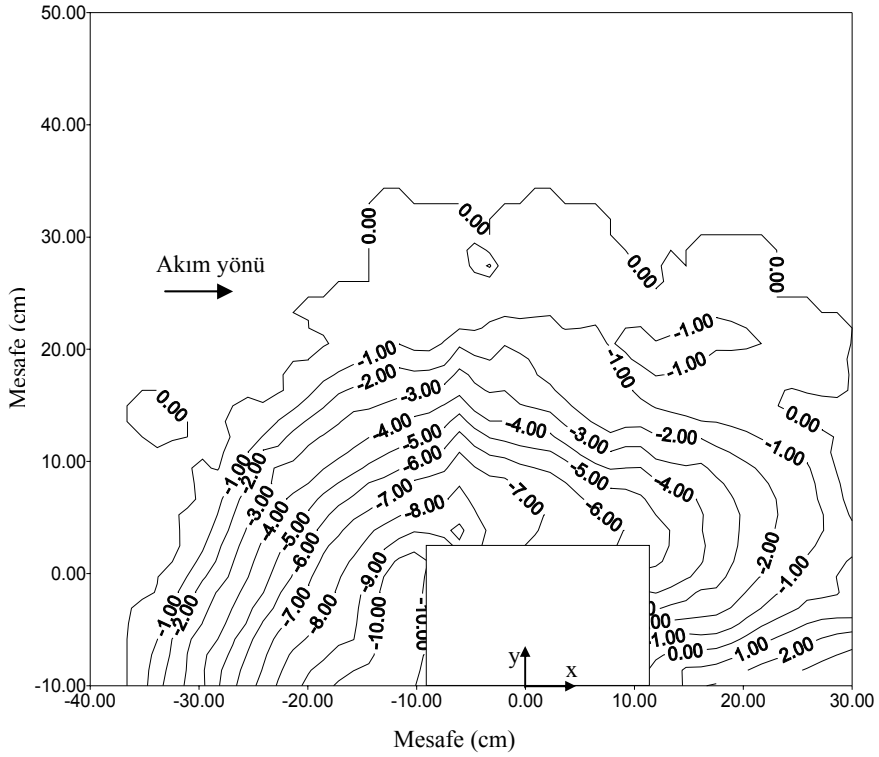
Model gelişiminin ikinci adımı Denklem (5)'te sunulan Q_{so} ifadesinin bulunması işlemidir. Oyulma çukurundan birim zamanda çıkan taban malzemesinin hacimsel miktarı şu ifadede bulunabilir:

$$Q_{so} = f \frac{EA_p}{\Delta\rho_s} \quad (7)$$

Burada f oyulma çukurunun geometrik şekliyle, akım ve taban malzemesi özelliklerine bağlı bir düzeltme faktörü, E sürüntü maddesi sıçrama debisi ve A_p oyulma tabanından sıçrama hareketinin gerçekleştiği birim alandır. Dey ve Debnath [15] tarafından eğik kum tabanlar için geliştirilen sıçrama fonksiyonu bu analizde kullanılabilir. Bu denklem

$$E = 0.0006 TD_*^{0.24} \sigma^{1.9} \rho_s \sqrt{\Delta g D_{50}} \quad (8)$$

şeklinde. Burada T oyulmadan kaynaklanan katı madde taşınım parametresi olup Dey and Barbhuiya [11] tarafından $(\tau_b - \tau_{bc})/\tau_{bc}$ ifadesiyle tanımlanmıştır. Bu ifadeye τ_b oyulma çukurundaki düz tabanda kayma gerilmesi, $\tau_{bc} = \psi \tau_{cr}$ eğimli tabandaki kritik kayma gerilmesi, τ_{cr} düz tabandaki kritik kayma gerilmesi, ψ türbülans çalkantıları ve ayak önündeki çevrinti salınımlarına bağlı bir katsayı ve D^* ise $D_{50}(\Delta g/v^2)^{1/3}$ ifadesiyle tanımlanan boyutsuz dane büyüklüğü parametresidir. Kayma gerilmesi τ_b nin zamansal değişimi Dey and Barbhuiya [11] tarafından sunulan yöntemle deneysel veriler kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Ayak etrafındaki cm cinsinden eş-oyulma eğrileri ($L=12.5$ cm, $t=100$ dakika)

Deneylerin yaklaşık olarak ilk beş dakikalık süresinde tabandaki kayma gerilmesinin, τ_b , ortalama değeri yaklaşık olarak $2\tau_0$ kadardır. Burada τ_0 yaklaşım akımının taban kayma gerilmesidir. Zamanla oyulma çukuru büyüdükçe τ_b değeri düşmekte ve deneylerin son saatinde τ_0 değerine yaklaşmaktadır. Matematiksel çözümlemeyi kolaylaştırmak için oyulma çukurunun düz tabanındaki kayma gerilmesinin zamansal değerinin $\tau_b(t) \cong \tau_0$ olarak alınması makuldür. Diğer taraftan oyulma çukuru içindeki kritik kayma gerilmesinin cidar boyunca dağılımı zamana ve çukurun geometrik özelliklerine bağlı olduğundan

Köprü Kenar Ayaklarındaki Oyulma Güvenilirliği

hesaplanması çok zordur. Bu nedenle, Dey ve Barbhuiya [11] tarafından önerilen $\psi=0.5$ değeri bu analizde de kullanılmıştır. Yukarıda sıralanan nedenlerden dolayı oyulma çukuru çeperlerinden sıçrayan malzeme debisi çeper boyunca değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, birim A_p alanı için makul bir tanımlama yapmak gerekmektedir. Ayak etrafındaki maksimum oyulma memba yüzünde, yığılma ise mansap bölgesinde olmaktadır. Akıma paralel yöndeki ayak genişliği boyunca daralma etkisiyle akım hızlanmaktadır. Ortalama sıçrama hareketini temsil etmesi için memba tarafından alınan bir birim alanın uygun olduğu kabul edilmiştir:

$$A_p = (d_s \cot \phi + L)D_{50} \quad (9)$$

Birim alan, oyulma çukuru maksimum yüzey genişliğinin dane çapıyla çarpımına eşit alınmıştır. Bu tanım ilk kez Yanmaz ve Altınbilek [2] tarafından orta ayaklar için sunulmuş, daha sonra Yanmaz [3] tarafından başka bir çalışmada tekrar kullanılmıştır. Sürüntü maddesi sıçrama debisi birim alanla çarpıldığı zaman EA_p değeri oyulma çukurundan çıkan taban malzemesi miktarının zamansal değişimini vermektedir. Denklem (5)'in, Denklem (6), (7) ve (8) kullanılarak çözülmesiyle oyulma derinliğinin zamansal değişimini veren bir denklem elde edilmiştir. V^* ve T_s parametrelerinin dahil edilmesiyle Denklem (6)'nın zamana göre türevi şöyle olmaktadır.

$$\frac{dV}{dt} = ct^{0.281} \frac{dd_s}{dt} + \frac{0.281cd_s}{t^{0.719}} \quad (10)$$

Burada $c = 1.142L^{1.438}D_{50}^{0.281}(\Delta gD_{50})^{0.1405}$ olmaktadır. Düzeltme katsayısı f , Denklem (8)'de verilen sıçrama fonksiyonu kullanılarak ve gerekli parametreleri Denklem (7)'de yerine koyarak şu ifadede bulunabilir:

$$f = \frac{\int_{ds1}^{ds2} mct^{0.281} dd_s + \int_{t_1}^{t_2} 0.281mcd_s t^{-0.719} dt}{\int_{t_1}^{t_2} (d_s \cot \phi + L) dt} \quad (11)$$

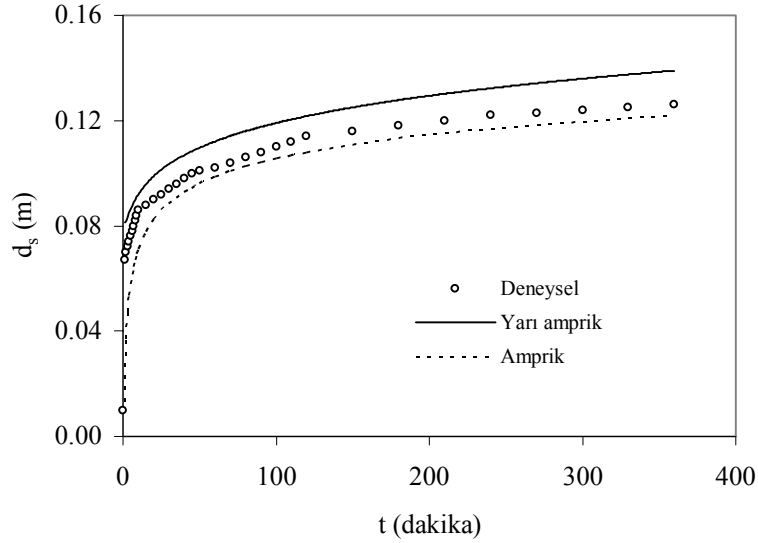
Burada $m = \Delta \rho_s / (ED_{50})$ olarak verilmektedir. Şekil 1'de sunulan oyulma verisinin ardışık zaman dilimlerinde Denklem (11)'in integral sınırları olarak kullanılmasıyla tüm deney koşullarını temsil eden bir dizi f değeri hesaplanmıştır. Bu değerlerin incelenmesiyle oyulma çukurundan çıkan sürüntü maddesi debisinin zamanla azalmakta olduğu görülmektedir. Düzeltme katsayısının fonksiyonel bir ilişkiyle sunulması gerekmektedir. Bu katsayının oyulma çukurunun geometrik şekli, ayak uzunluğu, akım ve taban malzemesi özelliklerine bağlı olması gerekir. Bu nedenle, bu özellikleri yansıtan bir dizi boyutsuz parametre oluşturulmuş ve çoklu regresyon yöntemiyle bu boyutsuz parametrelerin değişik kombinasyonları denenmiştir. Hesaplanan f değerleriyle en iyi uyumu veren kombinasyon

$$f = 143 \left(\frac{u_* t}{L} \right)^{-0.31} \left(\frac{d_s \cot \phi}{L} \right)^{-2.95} \quad (12)$$

ifadesiyle bulunmuştur. Burada u_* kayma gerilmesi hızıdır. Denklem (7), (10), ve (11) birleştirilerek dd_s/dt için çözülürse

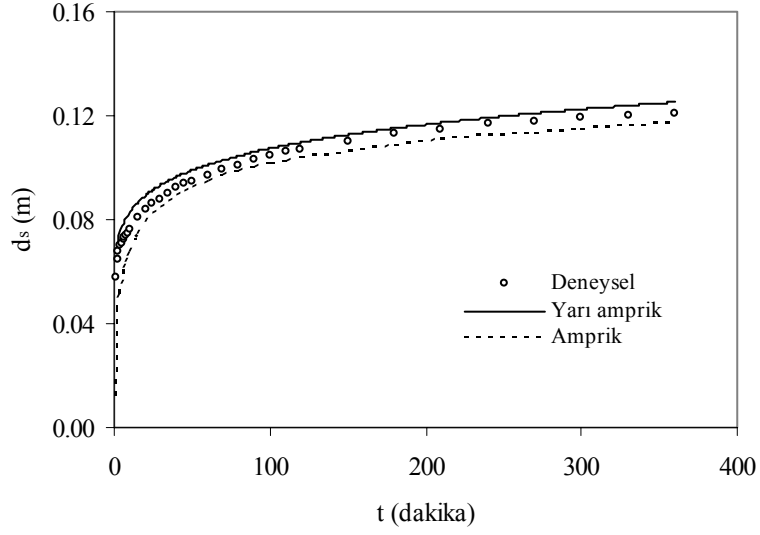
$$\frac{dd_s}{dt} = 143 \left(\frac{u_* t}{L} \right)^{-0.31} \left(\frac{d_s \cot \phi}{L} \right)^{-2.95} \frac{(d_s \cot \phi + L)}{mct^{0.281}} - \frac{0.281 d_s}{t} \quad (13)$$

elde edilir. Denklem (13), birinci mertebeden doğrusal olmayan bir diferansiyel denklemdir. Hesaplamalarda çapları 1.8 mm ve 0.9 mm olan kumların içsel sürtünme açıları sırasıyla 31° ve 30° olarak alınmıştır. Kumların göreceli yoğunluğu ise 1.65 değerinde kabul edilmiştir. Denklem (13)'ün sayısal çözümü Euler tekniğiyle gerçekleştirilmiştir. Denklem (13)'ün çözüm sonuçları makalenin boyut kısıtlaması nedeniyle sadece bazı deney koşulları için deney verisi ve amprik yaklaşım sonuçlarıyla birlikte Şekil 3, 4 ve 5'te gösterilmiştir.

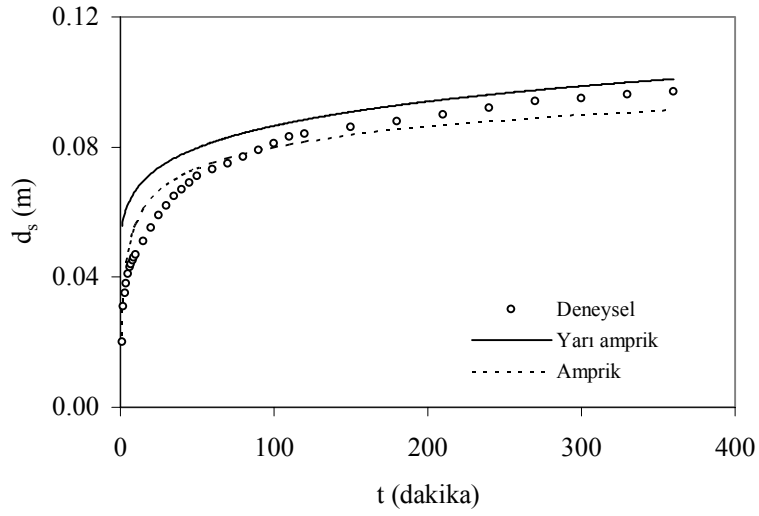


Şekil 3. Amprik ve yarı amprik model sonuçlarının deneysel veriyle uyumu (Deney 1)

Köprü Kenar Ayaklarındaki Oyulma Güvenilirliği



Şekil 4. Amprik ve yarı amprik model sonuçlarının deneysel veriyle uyumu (Deney 3)



Şekil 5. Amprik ve yarı amprik model sonuçlarının deneysel veriyle uyumu (Deney 9)

Bu şekillerdeki grafiklerden görüleceği gibi amprik ve yarı amprik yöntemlerin sonuçları deneysel veriyle uyum içindedir. Yarı amprik yöntem, Denklem (13)'ün çözümüne bağlı olup, bu makalede sunulan deney numaralarında amprik yöntemden biraz daha büyük

oyulma derinliği vermektedir. Ancak tüm deneyler gözden geçirildiğinde bazı deneylerde de amprik yöntemin yarı amprik yöntemden biraz daha büyük sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Detaylı analiz sonuçları Köse [16] tarafından sunulmaktadır. Bu nedenle genel eğilim, amprik ve yarı amprik yöntem sonuçlarının birbiriyle uyumlu sayılabileceği yönündedir. Amprik yöntem, Denklem (4) kullanılarak kolayca uygulanabileceği için köprü temel seviyesinin oyulma güvenilirliği hesaplamasında daha pratik olacaktır.

4. AYAK TEMEL SEVİYESİNİN GÜVENİLİRLİĞİ

Köprü emniyetinin değişik yıkılma modlarına göre tetkik edilebilmesi için sadece yapısal etkenlerin değil, aynı zamanda geoteknik ve hidrolik etkenlerin de incelenmesi gerekir. Köprünün fiziksel ömrü süresindeki işlevselliği, bu etkenlerin birlikte ele alınıp, gerekli onarım ve düzenlemelerin yapılmasına bağlıdır. Bu etkileşimlerin incelenmemesi, yapı ömrünce belirsizliklerin artmasına ve risk seviyesinin yükselmesine neden olabilir. Halbuki belirsizliklerin yeteri kadar irdelenerek tasarıma dahil edilmesiyle hem daha yüksek emniyet seviyesi elde edilebilir, hem de daha ekonomik tasarımlar bulunabilir. Köprülerin fiziksel ömrü boyunca periyodik olarak tetkik edilip izlenilmesiyle ilgili verinin zamansal değişimi hakkında bilgi edinilir. Ayrıca zamanında gerekli onarımların yapılmasıyla emniyet seviyesinin arzu edilen düzeyde tutulması sağlanmış olur [17], [18].

Bu makalede, diğer yıkılma modları ihmal edilerek köprü emniyetinin dik kenar ayaklar etrafındaki zamana bağlı oyulma eğilimine göre değişimi incelenecektir. Olasılık esaslı güvenilirlik yaklaşımıyla temel seviyesinin daha gerçekçi olarak tespit edilmesi mümkündür. Bu analiz amprik yaklaşımla gerçekleştirilecektir. Ortalama taban seviyesi altındaki temel derinliği için emniyet aralığı, $EA=d_f - d_s$, olarak tanımlanabilir. Burada d_f temel derinliği, d_s ise tasarım taşkın süresinde olması beklenen oyulma derinliğidir. Böylece temel derinliğinin güvenilirliği şöyle tanımlanmaktadır:

$$\alpha = P(EA > 0) \quad (14)$$

Burada P olasılıktır. Deterministik yaklaşımda d_f ve d_s değerleri sabit olduğu için emniyet aralığının 0'dan büyük olması gerekmektedir. Halbuki oyulma derinliğini etkileyen değişkenlerin pek çoğu rasgele niteliktedir. Dolayısıyla, tasarım parametrelerinin en olumsuz kombinasyonunun oluşması halinde emniyet aralığının sayısal değeri negatif olabilir. Bu nedenle, olasılık esaslı yaklaşım daha gerçekçi ve emniyetli tarafta kalacak sonuçlar vermektedir. Model belirsizliğini ihmal edip, Denklem (4)'deki değişkenleri SI birim sistemine göre açarsak Denklem (14), aşağıdaki

$$\alpha = P(EA \geq 0) = P\left(d_f - 0.0766L^{1.15}y^{-0.15}u^{0.85}D_{50}^{-0.425}\left[\log(4.023tD_{50}^{1.5}L^{-2})\right]^{0.60}\right) \quad (15)$$

şeklinde ifade edilebilir. Doğrusal olmayan nitelikteki Denklem (15) kullanılarak güvenilirlik hesaplanabilmesi için Monte Carlo yöntemi kullanılmış ve P olasılıkları için 0 ve 1 arasında rasgele sayılar üretilmiştir. Bu uygulama aşağıdaki örnekle açıklanmıştır.

5. UYGULAMA ÖRNEĞİ

Taban eğimi 0.0006 olan geniş bir nehirde dik kenar ayak uzunluğu 2.5 m olan bir köprü inşa edilecektir. Köprü ayağının sömel derinliği, Denklem (15) kullanılarak hesaplanan güvenilirlik mertebesine göre seçilmiştir. Üniform taban malzemesinin medyan dane çapı 17 mm'dir. Hidrolik tasarımda kullanılacak değişkenlerin ortalama değerleri süreklilik prensibini sağlayacak şekilde şöyle alınacaktır: $y=2.2$ m, $u=1.31$ m/s ve $t=4$ saat. Bu değerlerle $u/u_c=0.79$, $L/y=1.14$ ve $F_d=2.50$ bulunmuştur. Buna göre Denklem (4)'ün geçerlilik sınırlarında kalınmış ve tabanda temiz su koşullarının olduğu görülmüştür. Bu nedenle, tasarım süresi sonunda oluşacak oyulma derinliği Denklem (4) vasıtasıyla hesaplanabilir. Analizde kenar ayak uzunluğu ve sömel derinliği deterministik değişkenler olarak kabul edilmiştir. Bunun dışında kalan diğer değişkenler y , u ve D_{50} rasgele değişkenler olarak alınmıştır. Denklem (15)'le güvenilirlik hesaplayabilmek için rasgele değişkenlere ait gerekli istatistiksel bilginin girdi olarak kullanılması gereklidir. Bu bilgiler, rasgele değişkenlerin olasılık yoğunluk fonksiyonları (OYF) ve değişim katsayılarıdır (Ω). Ancak rasgele değişkenlere istatistiksel bilgilerin verilebilmesi için yeterli veriye gereksinim vardır. Bu veri, doğadan veya laboratuvar ortamından elde edilebilir. Burada deneyimli araştırmacıların öngörülleri de önemlidir. Ancak her köprü, içinde bulunduğu havzanın yersel özelliklerinden etkilendiği için o yöreyi temsil eden istatistiksel bilginin kullanılması gerekmektedir ki bu durumda genellikle veri eksikliği problemi yaşanmaktadır. Hidrolik değişkenlerin değişim katsayıları ölçüm hatalarını veya taban direnç seviyesindeki değişimlerin yarattığı farklılıkları yansıtır. Bu değişim katsayıları hassas laboratuvar ortamlarında oldukça düşük olmasına karşın, doğada büyük değerlere karşı gelmektedir. Bunun başlıca nedenleri, ölçüm aletlerinin doğadaki akım koşullarını tespit etmekteki zaafiyeti ve yeterli hassasiyete sahip olmaması, ölçüm yeri, insan kaynaklı ölçüm hataları, vb. gibi faktörler olarak sıralanabilir. Bu makalede daha önce Johnson [19], Johnson [20], Yanmaz [21] ve Yanmaz ve Çiçekdağ [22] tarafından kullanılmış olan istatistiksel değerler esas alınmıştır.

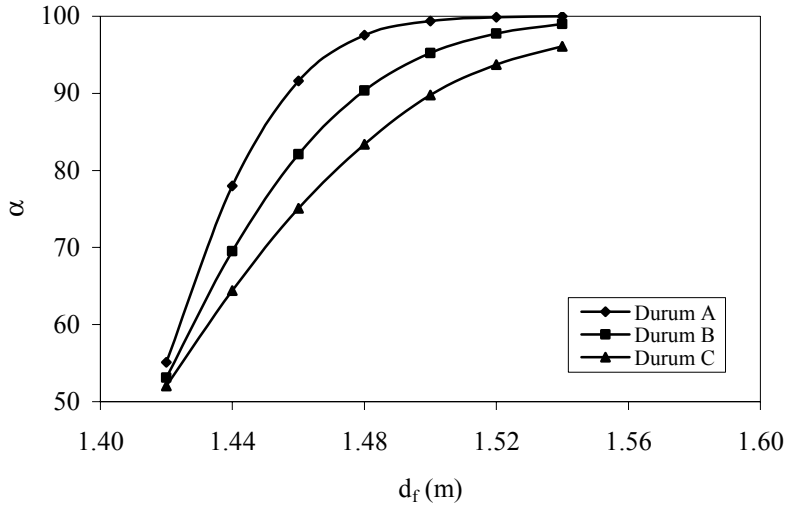
Bu örnekte güvenilirlik hesaplarındaki hassasiyetin araştırılması için olasılık yoğunluk fonksiyonu (OYF) ve değişim katsayılarının (Ω) etkisine de bakılacaktır. Bu bağlamda, 4 farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Dört farklı durum için kullanılan OYF ve Ω değerleri Çizelge 2'de sunulmuştur. Analizde sömel derinliğinin, d_f , emniyet seviyesine etkisini araştırmak için farklı derinlikler alınmıştır. Yersel koşullara göre ortalama sömel derinliğinin, 1.50 m mertebesinde olması planlanmaktadır. Bu bağlamda d_f değerleri için 1.42 m ile 1.54 m arasında değişen farklı değerler denenmiştir. Bu analizlerin A, B ve C durumlarında değişim katsayısının güvenilirliğe etkisi araştırılmıştır. Rasgele değişkenlerin değişim katsayılarının ve olasılık yoğunluk fonksiyonlarının hassasiyet analizi yapılmasının önemi şöyle izah edilebilir. Mevcut veriye ilave prototip veya model verisinin zamanla ilave edilmesiyle OYF ve Ω değerlerinde değişiklik beklenmesi olasıdır. Dolayısıyla hassasiyet analizi yapılarak olası en kritik durum bulunmaya çalışılacaktır.

Analiz sonuçları Şekil 6'da sunulmaktadır. Bu şekilden görüleceği gibi güvenilirlik sömel derinliğiyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Sömel derinliğinin $d_f=1.54$ m olduğu durumda her analiz için oldukça yüksek güvenilirlik değerleri bulunmuştur. Dolayısıyla sömel derinliğinin bu değerden daha fazla seçilmesinin emniyet açısından önemli bir katkısı olmamakla birlikte maliyeti artıracığı düşünülebilir. Bu analizlerde güvenilirliğin değişim katsayısına hassas olduğu gözlenmiştir. Ayrıca olasılık yoğunluk fonksiyonunun

güvenilirliğe etkisini araştırmak için son analiz (Durum D) gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, ortalama akım hızı ve medyan dane çapına üniform OYF tanımlanmış ve Durum B’de kullanılan Ω değerleri aynen alınmıştır. Ancak bu analizde güvenilirlik değerlerinde normal OYF’na göre ihmal edilecek kadar az değişiklikler gözlenmiştir.

Çizelge 2. Uygulama örneğinde kullanılan istatistiksel bilgiler

Değişken	Durum	Ω	OYF
y	A	0.10	Normal dağılım
	B	0.15	Normal dağılım
	C	0.20	Normal dağılım
	D	0.15	Normal dağılım
u	A	0.010	Normal dağılım
	B	0.015	Normal dağılım
	C	0.020	Normal dağılım
	D	0.015	Üniform dağılım
D ₅₀	A	0.05	Normal dağılım
	B	0.075	Normal dağılım
	C	0.10	Normal dağılım
	D	0.075	Üniform dağılım



Şekil 6. Güvenilirliğin sömel derinliğiyle değişimi

6. SONUÇ

Bu makalede, köprü kenar ayakları etrafındaki temiz su oyulmasının zamana bağlı değişimini veren amprik ve yarı amprik nitelikte iki farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu bağlamda yapılan laboratuvar deneyleri, $0.682 \leq u/u_c \leq 0.985$, $1.12 \leq L/y \leq 2.84$ ve $1.921 \leq F_d \leq 2.549$ aralığında, medyan dane çapları 1.8 mm ve 0.9 mm olan üniform kum malzemeye gerçekleştirilmiştir. Deneylerde akıma dik yöndeki ayak uzunluğu olarak 12.5 cm ve 10 cm olan dik duvar ayak modelleri çalışılmıştır. Oyulma çukurunun zamana bağlı hacimsel değişimi araştırılmış ve Denklem (6) önerilmiştir. Amprik yöntem, oyulma olayını etkileyen boyutsuz parametreler cinsinden sunulmuştur. Yarı amprik yöntemde oyulma çukurunun süreklilik denklemi kullanılmıştır. Oyulma çukurundan çıkan sürüntü maddesi debisi, Dey ve Debnath [15] tarafından sunulan sürüntü maddesi sıçrama fonksiyonu kullanılarak geliştirilmiştir. Bu yaklaşım sonucunda oyulma derinliğinin zamansal değişimini veren bir diferansiyel denklem, Denklem (13), elde edilmiştir. Amprik ve yarı amprik yöntem sonuçlarının birbirleriyle ve deneysel veriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Köprü kenar ayağı sömel seviyesinin oyulma eğilimine karşı güvenilirliğinin hesaplanmasında uygulaması daha kolay olduğu için amprik yöntem kullanılmıştır. Bir örnekle sunulan uygulama sonucuna göre, temel derinliği arttıkça güvenilirliğin arttığı; rasgele değişkenlerin değişim katsayısı arttıkça ise güvenilirliğin azaldığı gözlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamındaki deneyler D.S.İ., Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Hidrolik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar Daire Başkanlığı'nın desteği için teşekkür ederler.

Semboller

A_p : sıçrama birim alanı

c : katsayı

D_{50} : medyan dane çapı

D^* : boyutsuz dane büyüklüğü

d_s : köprü ayağı etrafındaki zamana bağlı maksimum oyulma derinliği

E : sürüntü maddesi sıçrama debisi

f : oyulma çukuru için düzeltme katsayısı

F_d : yoğunluk dane Froude sayısı

g : yerçekimi ivmesi

L : kenar ayak uzunluğu

m : katsayı

Q_{so} : oyulma çukurundan çıkan katı madde debisi

- S : boyutsuz oyulma derinliği
 T : katı madde taşınım parametresi
 T_s : boyutsuz zaman
 t : zaman
 t_m : maksimum deney süresi
 u : ortalama yaklaşım akım hızı
 u_c : tabanda hareket başlatan ortalama yaklaşım akım hızı
 u^* : kayma gerilmesi hızı
 u^*_{c} : kritik kayma gerilmesi hızı
 V : kenar ayak etrafındaki oyulma çukuru hacmi
 V^* : boyutsuz oyulma çukuru hacmi
 y : yaklaşım akım derinliği
 ρ : suyun yoğunluğu
 ρ_s : katı madde yoğunluğu
 ν : suyun kinematik viskozitesi
 Δ : göreceli yoğunluk
 σ : dane büyüklüğü dağılımının geometrik standart sapması
 ψ : türbülans çalkantıları ve çevrinti salınımlarına bağlı katsayı
 ϕ : kumun içsel sürtünme açısı
 τ_b : oyulma çukuru düz tabanında kayma gerilmesi
 τ_{bc} : oyulma çukurunda kritik kayma gerilmesi
 τ_{cr} : düz tabanda kritik kayma gerilmesi

Kaynaklar

- [1] Wardhana, K., Hadipriono, F.C. Analysis of Recent Bridge Failures in the United States. J. Perf. of Const. Fac., ASCE, 17 (3), 144-150, 2003.
- [2] Yanmaz A.M., Altınbilek HD. Study of Time-Dependent Local Scour Around Bridge Piers. J. Hydr. Eng., ASCE, 117(10), 1247-1268, 1991.
- [3] Yanmaz A.M. Temporal Variation of Clear Water Scour at Cylindrical Bridge Piers. Canadian J. Civil Eng., 33(8): 1098-1102, 2006.
- [4] Yanmaz A.M, Köse, Ö. Time-wise Variation of Scouring at Bridge Abutments. J. Sadhana, 32 (3), 199-213, 2007.

Köprü Kenar Ayaklarındaki Oyulma Güvenilirliği

- [5] Wong W.H. Scour at Bridge Abutments. Report No.275, School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 1982.
- [6] Tey C.B. Local Scour at Bridge Abutments. Report No.329, School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 1984.
- [7] Cardoso, A.H., Bettess, R. Effects of Time and Channel Geometry on Scour at Bridge Abutments. J. Hydr. Eng., ASCE, 125(4), 388-399, 1999.
- [8] Ballio, F., Orsi, E. Time Evolution of Scour Around Bridge Abutments. Water Eng. Res. 2(4), 243-259, 2000.
- [9] Oliveto, G., Hager, W.H. Temporal Evolution of Clear Water Pier and Abutment Scour, J. Hydr. Eng., ASCE, 128(9): 811-820, 2002.
- [10] Coleman, S.E., Lauchlan, C.S., Melville, B.W. Clear Water Scour Development at Bridge Abutments., J. Hydr. Res., 41(5): 521-531, 2003.
- [11] Dey, S., Barbhuiya, A.K. Time Variation of Scour at Abutments. J. Hydr. Eng., ASCE, 131(1), 11-23, 2005.
- [12] Oliveto, G., Hager, W.H. Further Results to Time-dependent Local Scour at Bridge Elements., J. Hydr. Eng., ASCE, 131(2), 97-105, 2005.
- [13] Yanmaz, A.M. Köprü Hidroliği, ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 2002.
- [14] Melville, B.W., Coleman, S.E. Bridge Scour, Water Resources Publications, LLC, Colorado, ABD, 2000.
- [15] Dey, S., Debnath, K. Sediment Pickup on Stream wise Sloping Beds., J. Irrig. and Drain. Eng. ASCE, 127(1), 39-43, 2001.
- [16] Köse, Ö. Analytical and Experimental Investigation of Temporal Variation of Clear Water Scour Depth at Bridge Abutments, Doktora Tezi, İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, 2007.
- [17] Yanmaz, A.M., Caner, A., Berk, A. Renovation of a Safety-Inspection Methodology for River Bridges. J. Perf. Const. Facil., ASCE, 21 (5), 382-389, 2007.
- [18] Caner, A., Yanmaz, A.M., Yakut, A., Avşar, Ö., Yılmaz, T. Service Life Assessment of Existing Highway Bridges with no Planned Regular Inspections, J. Perf. Const. Facil., ASCE, 22(2), 108-114, 2008.
- [19] Johnson, P.A. Uncertainty of Hydraulic Parameters”, J. Hydr. Eng., ASCE, 122 (2), 112-114, 1996.
- [20] Johnson, P.A. Fault Tree Analysis of Bridge Failure due to Scour and Channel Instability”, J. Infra. Sys. ASCE, 5(1),35-41, 1999.
- [21] Yanmaz, A.M. Overtopping Risk Assessment in River Diversion Facility Design, Canadian J. Civil Eng., 27, 319-326, 2000.
- [22] Yanmaz, A. M., and Çiçekdağ, Ö. “Composite Reliability Model for Local Scour Around Cylindrical Bridge Piers”, Canadian Journal of Civil Engineering, 28, 3, 520-535, 2001.