

## Akarsu Köprü Temellerindeki Oyulma Riskinin Değerlendirilmesi

A. Melih YANMAZ<sup>1</sup>  
Melih ÇALAMAK<sup>2</sup>

### ÖZ

Akarsu köprüleri, yapı-akım etkileşimi nedeniyle altından akım geçmeyen köprülere oranla genellikle daha fazla olumsuz koşullara maruz kalırlar. Bu nedenle, köprü yıkılma riskini oluşturan bileşenlerden önemli bir tanesi de anılan etkileşimden kaynaklanan risktir. Bu çalışmada orta ayaklar etrafındaki oyulma olayını etkileyen değişkenlerde rastlanan belirsizlikler, tanımlanan olasılık yoğunluk fonksiyonlarıyla irdelenmektedir. Analizlerde genel taban oyulması ve daralma oyulması etkileri ihmal edilerek zamana bağlı bir temiz su oyulması yönteminin içerdiği belirsizlikler kullanılmış ve Monte Carlo benzeşimleriyle risk hesaplanmıştır. Oluşturulan modelde belirli akım, ayak geometrisi ve taban malzemesi özelliklerinde köprünün maruz kalacağı oyulma riski saptanmaktadır. Geliştirilen model örnek bir uygulama ile sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Köprü, oyulma, belirsizlik, risk, emniyet faktörü.

### ABSTRACT

#### Evaluation of Scour Risk at Foundations of River Bridges

River bridges are exposed to more inconvenient conditions due to the structure-flow interaction compared to bridges having no contact with flow. Therefore, one of the most important components of the bridge failure risk is the risk induced by soil-flow interaction. In this study, the uncertainties of the hydrological and hydraulic parameters affecting the scouring around bridge piers are examined using appropriate probability density functions. In the analyses, the uncertainties involved in the temporal variation of clear water scouring mechanism are considered. Influences of general bed degradation of the main channel and the contraction scour are ignored. The risk associated with the scouring around piers is estimated using Monte Carlo simulations. In the model, the scouring risk of the bridge pier is determined for the given flow, pier geometry and bed material characteristics. The developed model is presented with an application.

**Keywords:** Bridge, scour, uncertainty, risk, safety factor.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 14.04.2015 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2016 gününe kadar tartışmaya açıktır.

1 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - myanz@metu.edu.tr  
2 TED Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - melih.calamak@tedu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Akarsular üzerine kurulan köprülerin yıkılması sonucu her yıl can ve mal kayıpları yaşanmakta, ayrıca ulaşım hizmetleri de olumsuz olarak etkilenmektedir. Bu nedenle köprü tasarımcıları gittikçe artan bir ivme ile tasarımda akım-zemin-yapı etkileşimini değerlendirmektedir. Burada en önemli husus, yersel ve bölgesel koşullar ele alındığında en emniyetli ayak temel tasarımının gerçekleştirilmesidir. Bu da ayaklar etrafında oluşması beklenen maksimum oyulma derinliği ve çukur geometrik özelliklerinin hassas olarak saptanmasına bağlıdır. Klasik deterministik yöntemlerle gerçekleştirilen köprü tasarımlarında belirsizlikler irdelenmemektedir. Dolayısıyla yapılan tasarımda mertebesi saptanamayan bir risk mevcuttur. Bu riskin büyüklüğüne bağlı olarak köprünün ekonomik ömrü süresince herhangi bir anda ağır hasar görmesi veya yıkılması söz konusu olabilir. Dolayısıyla klasik yaklaşımda bu riski bertaraf ederek güvenli tarafta kalmak için genellikle yüksek emniyet faktörleri kullanılmaktadır. Bu durumda yapı maliyeti gerektiğinden daha fazla olabilmektedir. Hâlbuki tasarımı etkileyen olası tüm belirsizliklerin ele alınarak risk mertebesinin tahmin edilmesine dayanan yaklaşımlarda yapı emniyet seviyesi daha gerçekçi olarak saptanmaktadır.

Tasarımda ağırlığı etkin olan herhangi bir rastgele değişkenin istatistiksel özellikleri yeterince biliniyorsa bu değişkenleri temsil eden olasılık yoğunluk fonksiyonları saptanarak köprü güvenilirliği matematiksel olarak hesaplanabilir. Ayrıca bu yaklaşımda köprünün ekonomik ömrü boyunca maruz kalabileceği olumsuz etkenler çeşitli senaryolarla rahatlıkla ele alınabilir. Böylece yapı ekonomik ömrü boyunca bakım, onarım ve işletme zafiyetlerinden kaynaklanan giderlerin azaltılması da hedeflenebilir. Bu nedenlerle son yıllarda güvenilirlik teorisindeki gelişmeleri yapısal tasarımlara uygulayan yaklaşımlarda artış görülmektedir. Literatürde köprü ayakları etrafındaki oyulma güvenilirliğini tasarıma dahil edecek kapsama giren ilk çalışmanın Johnson [1] tarafından gerçekleştirildiği düşünülmektedir. Bu çalışmada göçme olasılığı ve emniyet faktörü arasında bir ilişki geliştirilmiştir. Bir başka çalışmada Johnson [2] başlıca oyulma ve akarsu dengesizliği problemlerinden kaynaklanan göçme mekanizmasını kusur ağacı çözümlemesiyle incelemiştir. Johnson ve Ayyub [3] değişik akım dönüş aralıklarında göçme olasılığı ve emniyet faktörü arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Köprü oyulmalarındaki belirsizlik ve güvenilirlik üzerindeki başlıca çalışmalar Johnson ve Ayyub [4], Johnson ve Simon [5], Johnson ve Ayyub [6] ve Yanmaz [7] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yanmaz ve Çiçekdağ [8] dairesel en-kesitli köprü ayaklarında direnç-yükleme girişimine bağlı bir güvenilirlik yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntemin diğer ayak tiplerine uygulanan geliştirilmiş bir şekli Yanmaz ve Üstün [9] tarafından gerçekleştirilmiştir. Akım dönüş aralığı ve yapı ekonomik ömrünü içeren bir dinamik güvenilirlik yöntemi Yanmaz [10] tarafından geliştirilmiştir. Köprü kenar ayakları için geliştirilen güvenilirlik yöntemleri sayıca orta ayaklar için geliştirilen yöntemlerden daha azdır. Yanmaz ve Çelebi [11] ve Köse ve Yanmaz [12] tarafından geliştirilen güvenilirlik yöntemleri çeşitli tipteki kenar ayaklar için geçerlidir.

Bu makalede, akarsu köprüleri tasarımında ortaya çıkan hidrolojik/hidrolik ve taban malzemesi belirsizlikleriyle bunların dahil edileceği risk esaslı bir yaklaşım vasıtasıyla temiz su oyulması koşullarında köprü orta ayakları için geliştirilen bir güvenilirlik yöntemi sunulmaktadır. Oluşturulan modelde kullanılan bağımsız değişkenler uygun olasılık yoğunluk fonksiyonlarıyla temsil edilmişlerdir. Bu yaklaşım, tasarım parametrelerini sabit kabul eden deterministik yaklaşımdan daha hassas sonuçlar vereceği için yapının daha

dayanıklı tasarımına olanak sağlamaktadır. Oluşturulan risk modelinin detaylı uygulaması bir örnek çalışma ile tartışılmaktadır.

## 2. BELİRSİZLİKLERİN İRDELENMESİ

Belirsizlik, tasarımcının kontrolü dışındaki olayların tamamını kapsamaktadır. Güvenilirlik esaslı yaklaşımın hassasiyeti, çalışılan olayda yer alan olası belirsizliklerin cinsinin ve mertebelerinin saptanmasına bağlıdır. Su kaynakları sistemlerinde rastlanan başlıca belirsizlikler hidrolojik, hidrolik ve yapısal esaslı belirsizliklerdir [13]. Hidrolojik belirsizlikler doğal, parametre ve model belirsizliklerini içermektedir. Hidrolik belirsizlikler model ve parametre belirsizliklerinin yanında yapı boyutlandırması, malzeme özellikleri ve işletme belirsizliklerinin hidrolik etkenlerde yarattığı belirsizlikleri kapsamaktadır. Yapısal belirsizlikler, akarsu köprüleri esas olarak ele alındığında köprü temel taşıma problemleri, yatak seviyesinde çeşitli nedenlerle artan oyulma potansiyeli vb. problemlerden kaynaklanan belirsizlikleri içermektedir. Bunların dışında yapım tekniği, hasar, bakım-onarım-işletme, ölçüm hatası ve tasarım hatası gibi genellikle insan kaynaklı etkenlerdeki belirsizlikler de mevcuttur.

Doğal belirsizlik, yağış, akış, sızma, buharlaşma gibi çeşitli hidrolojik olayların rastgele karakter göstermesine bağlıdır. Bunlar, doğada gelişen olaylar olması nedeniyle kontrol dışıdır. Model belirsizliği, herhangi bir olayın matematiksel bir ifade ile saptanmasında kullanılan modelin olayı hangi hassasiyetle temsil ettiğine bağlıdır. Dolayısıyla kullanılan yöntemle göre değişim gösterir. Bu nedenle fiziksel olayı etkileyen büyüklüklerin kullanılan ifadede mümkün olduğu kadar ele alınması önemlidir. Bu durum, köprü ayakları etrafındaki oyulmaların saptanmasında kullanılan yöntemlerdeki model belirsizliği açısından daha detaylı olarak irdelenebilir. Köprü ayakları etrafındaki oyulmaların saptanması için günümüze kadar pek çok ampirik ve yarı-ampirik nitelikte matematiksel model geliştirilmiştir. Bu yöntemler, genellikle deneysel veri ile üretildikleri için her modelin geçerliliği deneysel ortamda kullanılan değişkenlerin aralığına bağlıdır. Bu nedenle her yöntem kendi çalışma koşulları için geçerli olduğu halde, tüm akım, taban malzemesi, ayak geometrisi ve konum etkilerini ele alan evrensel bir yöntem henüz geliştirilmemiştir. Ayrıca laboratuvar koşullarında başta taban malzemesi olmak üzere bazı değişkenlerde ölçek etkisi nedeniyle kısıtlama bulunmaktadır. Bu nedenle üretilen matematiksel modelin arazi oyulma verisiyle uyumu gözden geçirilerek model düzeltilmesi yapılması gerekmektedir. Ancak bu durumda da kullanılan arazi verisinin kalitesi problemi ortaya çıkmaktadır. Taşkınlar esnasında bir akarsu köprüsüne akım içinden veya dışarıdan yaklaşarak oyulma verisi toplamak çok zor ve tehlikelidir. Diğer taraftan tabanla şiddetli etkileşim içindeki akımın yarattığı en olumsuz oyulma koşulunun zamansal olarak saptanması da neredeyse imkânsızdır. Bu nedenle genellikle taşkınlar sonrasında yapılan arazi ölçümüyle elde edilen veri gerçek maksimum oyulma derinliğini temsil etmemektedir. Zira taşkının çekilme döneminde azalan akarsu gücü nedeniyle taşınan kaba malzemenin oyulma çukuruna dolması olasıdır. Bu durumda tasarımda kullanılacak matematiksel modelin seçiminde yersel şartlara uyum gösterecek koşullarda türetilmiş bir yöntemin kullanılması daha gerçekçi olacaktır.

Parametre belirsizliği, kullanılan modeldeki parametrelerde gözlenen belirsizliktir. Havza yüzeysel akış katsayısı, akarsulardaki pürüzlülük katsayısı, akarsu plan ve en-kesit

özelliklerine göre değişim gösteren yersel akım derinliği ve hız, vb. gibi değişkenlerdeki belirsizlikler parametre belirsizliğine örnek olarak gösterilebilir. Hidrolik tasarım verisi öncelikle havza hidrolojik modellemesi sonucunda elde edilen değerlere bağlı olduğu için bilhassa akım parametrelerindeki belirsizlikler ardışık olarak artmaktadır. Parametre belirsizliği daha hassas modeller kullanılarak azaltılabilir. Bir değişkenin belirsizliği, o değişkenin değişim katsayısıyla,  $COV=\sigma/\mu$ , ifade edilebilir. Burada,  $\sigma$  değişkenin standart sapması,  $\mu$  değişkenin ortalama değeridir. Belirsizlik analizi yapılacak olaydaki toplam parametre belirsizliği, her parametrenin değişim katsayısının doğrusal kombinasyonundan bulunabilir. Ancak pek çok durumda tasarım parametrelerine ait gerekli istatistiksel bilgi mevcut değildir. Bu durumda deneyim önem kazanmaktadır. Bir değişkenin ortalama bir tasarım değerinden ne kadar sapma göstereceği, literatürde sunulan ve daha önce elde edilmiş veriye, tasarımcının mesleki bilgisi, gözlemciliği ve deneyimine bağlıdır [14].

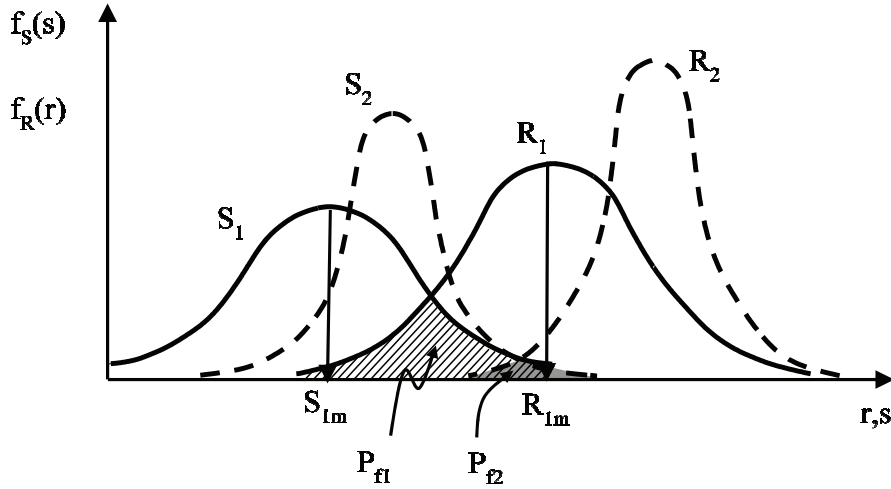
Yapım tekniği ve malzemeden kaynaklanan belirsizlikler, hidrolik parametreleri (örneğin köprü alt yapı elemanlarının yüzeysel pürüzlülüğü gibi) ve dolayısıyla akım sınır tabakasını etkileyebilir. Diğer bir belirsizlik ise köprünün işletimi ve akarsu kullanımında insan kaynaklı etkenlerden doğmaktadır. Taşkınlar sonrasında yatakta biriken malzemenin temizlenmesi ve ayaklar arasındaki akım alanının artırılması köprü emniyetini artırabilir. Ayrıca ülkemizde bilhassa Karadeniz Bölgesi'nde akarsu tabanından uzun sürelerle fazla miktarda taban malzemesi çekilmesiyle akarsu taban seviyesinde alçalma problemleri görülmektedir. Bu nedenle alçalan taban seviyeleri birkaç metreyi bulmakta ve bazen köprü temeli kazık başlıkları su seviyesinin bile üstüne çıkmaktadır.

### **3. GÖÇME OLASILIĞININ HESAPLANMASI**

Tasarımı etkileyen olası tüm belirsizliklerin ele alınarak mertebesinin tahmin edilmesine dayanan olasılık esaslı yaklaşımlara göre yapı emniyet seviyesi daha gerçekçi olarak saptanmaktadır. Bu husus, Şekil 1'deki örnekle daha detaylı olarak açıklanabilir. Bir yapıya etkileyen yüklemenin olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f_S(s)$ , buna karşı koyan yapı direncinin olasılık yoğunluk fonksiyonu ise  $f_R(r)$  ile ifade edilmektedir. Yükleme ve direnç bağımsız değişkenler olup, sırasıyla  $s$  ve  $r$  ile tanımlanmaktadır. Direnç ve yükleme dağılımlarının kesişim bölgesi göçme olasılığı veya risk olmaktadır. Başka bir ifade ile yüklemenin dirençten fazla olma olasılığı göçme riskini ifade etmektedir. Bu olasılığın büyüklüğü direnç dağılımının yükleme dağılımına göre konumundan etkilenmektedir. Örneğin geniş dağılımlı direnç ( $R_1$ ) ve yükleme ( $S_1$ ) durumunda iki dağılımın girişim bölgesi büyük olacağı için risk fazladır. Daha dar dağılımlı bir durumda ( $R_2$  ve  $S_2$ ) ise risk azalmaktadır (Bkz. Şekil 1). Ayrıca bir su yapısında yükleme doğal koşullarda geliştiği için kontrol dışında olmakla birlikte yapı direncinin artırılması mümkündür. Örneğin bir akarsu köprüsünde temel derinliğinin artırılması, olası kazıklı temel kullanılması, ayaklar etrafına koruyucu kaplama tasarımı yapılması vb. durumlarda direncin olasılık dağılımı, yüklemenin dağılımına göreceli olarak pozitif yönde kayma gösterecek ve olası risk daha da küçülecektir.

Olasılık esaslı risk tahmininin deterministik yaklaşımdan farkını daha net olarak ortaya koymak için ortalama değerlere dayalı emniyet faktörünü inceleyelim. Şekil 1'de gösterildiği gibi tasarım koşullarını temsil eden olasılık yoğunluk fonksiyonları ele alındığında deterministik yaklaşımda tanımlanan bir emniyet faktörü direncin ortalama

değerinin ( $R_{1m}$ ) yüklemenin ortalama değerine ( $S_{1m}$ ) oranı olarak verilebilir ( $R_{1m}/S_{1m}$ ). Deterministik yaklaşımda emniyet faktörünün 1.0 değerinden makul ölçüde büyük olmasıyla güvenli bir tasarım yapıldığı sonucu çıkarılabilir. Hâlbuki aynı durumda yüklem ve direnç dağılımları kesişiyorsa bir göçme olasılığı ( $P_f$ ) oluşmaktadır. Oluşan bu olasılığın kabul edilebilirliği, yapının konumuna ve önemine göre değişmektedir. Örneğin ABD'deki uygulama pratiğinde küçük akarsuları geçen tali köprüler için sınır  $P_f$  değeri  $10^{-3}$  mertebesinde iken, büyük akarsuları geçen ve üzerinde fazla trafik yükü bulunan önemli köprülerde bu sınır değer  $10^{-5}$  mertebesinde olmaktadır [15]. Yapının ekonomik ömrü boyunca maruz kalacağı koşullar düşünüldüğünde göçme riski oluşmasının kaçınılmaz olduğu; ancak periyodik gözlemlerle tetkik edilen köprülerde gerekli onarım ve düzenlemelerin yapılmasıyla bu olasılık seviyesinin azalacağı açıktır. Örneğin bir taşkın döneminden sonra ayaklar etrafında oluşan oyulma çukuru izlenerek gerekli onarımlar yapılmadan bırakılırsa düşen direnç koşullarında tekrar yüklenecek yeni bir şiddetli taşkın köprü direncini azaltacağı açıktır. Bu nedenle sadece yeni köprü tasarımlarında değil, mevcut akarsu köprülerinde de ayaklar etrafına oyulmaya karşı koruyucu tabakaların yerleştirilmesi önemlidir. Bu bağlamda riprap veya kısmi harçlı riprap uygulaması önerilebilir. Ülkemizde bu konuda tasarım uygulamaları geliştirilmiştir [16, 17, 18]. Ayrıca köprü ekonomik ömrü boyunca izleme ve tetkik ile oyulma eğilimine karşı hassasiyet riskinin saptanması [18, 19, 20] direncin sürekli olarak kontrol altında tutulmasına ve dolayısıyla arzu edilen seviyenin altına düştüğü durumlarda ilave onarımlarla tekrar seviyesinin yükseltilmesine olanak sağlanmaktadır.



Şekil 1. Yükleme ve direncin olasılık yoğunluk fonksiyonları

#### 4. UYGULAMA

Hidrolik tasarım koşullarında ortalama akım derinliği 1.4 m, akım hızı 0.7 m/s, taban eğimi 0.0002 ve medyan tane çapı 4 mm olan bir taşkın yatağında yer alan ve çapı 1.6 m olan dairesel en-kesitli bir ayak etrafında gelişen oyulmadan kaynaklanan risk hesaplanacaktır.

Bu çalışmada genel taban oyulması ve daralma oyulması etkileri ihmal edilmekte; ayrıca köprünün taşkın yatağıyla ana yatak girişim bölgesi dışında olduğu kabul edilmektedir. Sunulan veri kullanıldığında tabanda taneyi harekete geçirecek ortalama akım hızının (1.1 m/s) tasarım akım hızından daha büyük olduğu görülmekte; diğer bir deyişle ayak etrafında temiz su oyulması koşulları geliştiği kabul edilmektedir. Akım koşullarının değişmediği durumlarda temiz su oyulması başlangıçta hızlı bir değişim gösterirken ilerleyen zamanla oyulma artış hızı azalmakta ve dengeli bir oyulma derinliğine asimtotik olarak yaklaşmaktadır [14]. Literatürde temiz su oyulma derinliğinin zamana karşı değişimini veren ifadeler incelendiğinde dengeli oyulma derinliğine ulaşmak için çok uzun süreler gerektiği anlaşılmaktadır. Dengeli oyulma derinliğine ulaşmak için gerekli zaman hakkında bazı kriterler öne sürülmüştür [21, 22, 23]. Genellikle 24 saatlik bir deney süresinde oyulma derinliğindeki artışın bir sınır değerinin altında kalması hali, dengeli oyulma koşullarına erişildiği kabulünü getirmiştir. Melville ve Chiew'a [22] göre bu artışın ayak çapının %5 değerinden az olması, Grimaldi ve diğerlerine [24] göre ayak çapının %1.7'sinden az olması, Fael ve diğerlerine [25] göre medyan tane çapının iki katından az olması koşulu tanımlanmıştır. Bir başka çalışmada ise Setia [26] laboratuvar koşullarında 100 saatlik bir sürenin bile dengeli oyulma derinliğine ulaşmak için yeterli olmadığını ifade etmiştir. Bu değer kullanılarak doğada buna karşı gelen tipik bir süre bulunabilir. Bu amaçla, laboratuvar koşullarında, örneğin 1/50 ölçeğinde gerçekleştirilen 100 saatlik deneylerin, Froude modeline göre doğada  $100*(50)^{0.5}=707$  saat gibi bir değere karşı geldiği görülmektedir. Ülkemizde ve benzer hidro-meteorolojik koşullara sahip bölgelerde bu kadar uzun süreli taşkın olası değildir. Bu durumda köprü ayağı temel derinliğini dengeli oyulma derinliği esas alınarak saptamak ekonomik olmayan çözümler gerektirecektir. Bu nedenle pratikte oyulma derinliğinin zamansal gelişiminden ziyade seçilen pik süreye karşı gelen oyulma derinliği, bu pik debinin bir anda akarsu sistemine yüklenmiş olduğu kabulüyle ele alınabilir [15, 27, 28, 29]. Bu çalışmadaki örnekte tasarım taşkın süresinin 4 saat olduğu kabul edilmektedir. Ayak temel derinliği 2.0 m alınarak bu değerlerin güvenilirliği çeşitli senaryolarla incelenecektir. Ayak temel derinliğinin maksimum oyulma derinliğine oranı emniyet faktörü olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışmada Yanmaz [30] tarafından gerçekleştirilen dairesel en-kesitli ayaklar etrafındaki temiz su oyulması verisi tekrar kullanılarak çoklu regresyon yöntemiyle korelasyon katsayısı 0.96 olarak elde edilen yeni bir ifade kullanılmaktadır:

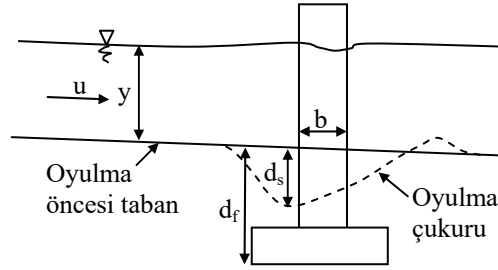
$$\frac{d_s}{b} = 0.085 F_d^{1.868} \left( \frac{b}{y} \right)^{0.171} T_s^{0.205} \quad (1)$$

Burada  $d_s$  ayak etrafında herhangi bir anda gelişen maksimum oyulma derinliği,  $b$  ayak çapı,  $y$  yaklaşım akım derinliği,  $F_d$  tane Froude sayısı,  $D_{50}$  tane medyan çapı, ve  $T_s$  boyutsuz zaman parametresidir. Tane Froude sayısı ve boyutsuz zaman parametresi şöyle ifade edilmektedir:

$$F_d = \frac{u}{\sqrt{g\Delta D_{50}}} \quad (2)$$

$$T_s = \frac{tD_{50}(\Delta g D_{50})^{0.5}}{b^2} \quad (3)$$

Burada  $u$  yaklaşım akımının ortalama hızı,  $t$  zaman,  $\Delta$  görelî yoğunluk,  $g$  ise yerçekimi ivmesidir. Oyulma olayını temsil eden etkili değişkenler Şekil 2'de temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. Oyulma olayındaki etkin değişkenler

Denklem (2) ve (3), Denklem (1)'de yerine konularak oyulma derinliği ilgili boyutlu değişkenler cinsinden yazılırsa şu ifade elde edilir:

$$d_s = 0.0084 u^{1.868} D_{50}^{-0.627} b^{1.3} y^{-0.171} t^{0.205} \quad (4)$$

Johnson [1] tarafından tanımlandığı gibi ayak etrafındaki oyulmaya karşı göçme olasılığı,  $d_f - d_s$  olarak tanımlanan emniyet aralığının (EA) negatif olma olasılığı ( $P_f$ ) olup, şöyle ifade edilebilir:

$$P_f = P(EA < 0) \quad (5)$$

Bu ifadede  $d_f$  köprü ayağı temel derinliğidir. Denklem (4) ile ifade edilen oyulma ifadesi kullanıldığında tanımlanan göçme olasılığı şöyle yazılabilir:

$$P_f = P(EA < 0) = P(d_f - 0.0084 u^{1.868} D_{50}^{-0.6265} b^{1.3} y^{-0.171} t^{0.205}) < 0 \quad (6)$$

Burada  $d_f$ ,  $b$ , ve  $t$  değişkenleri deterministik olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla bunların dışında kalan  $u$ ,  $D_{50}$  ve  $y$  bağımsız stokastik değişkenler olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada stokastik değişkenler için literatürde sunulmuş olan olasılık yoğunluk fonksiyonları (OYF) ve değişim katsayıları (COV) kullanılacaktır. Bu bağlamda daha önce gerçekleştirilen bazı çalışmalar [2, 8, 12, 31, 32, 33] esas alınmış ve bu değişkenlere atanan OYF ve COV bilgileri Çizelge 1'de Kombinasyon A satırında sunulmuştur. Ayrıca ilave hassasiyet analizleri yapılarak olası diğer OYF ve farklı COV değerlerinin analiz sonuçlarına etkisi farklı kombinasyonlarda değerlendirilmiştir (Bkz. Çizelge 1). Hassasiyet analizlerinin gerekçesi şöyle izah edilebilir. Daha önceki çalışmalarda önerilen OYF tipleri ve COV değerleri ilgili değişkenlerin istatistiksel analizine dayanmaktadır. Bu

*Akarsu Köprü Temellerindeki Oyulma Riskinin Değerlendirilmesi*

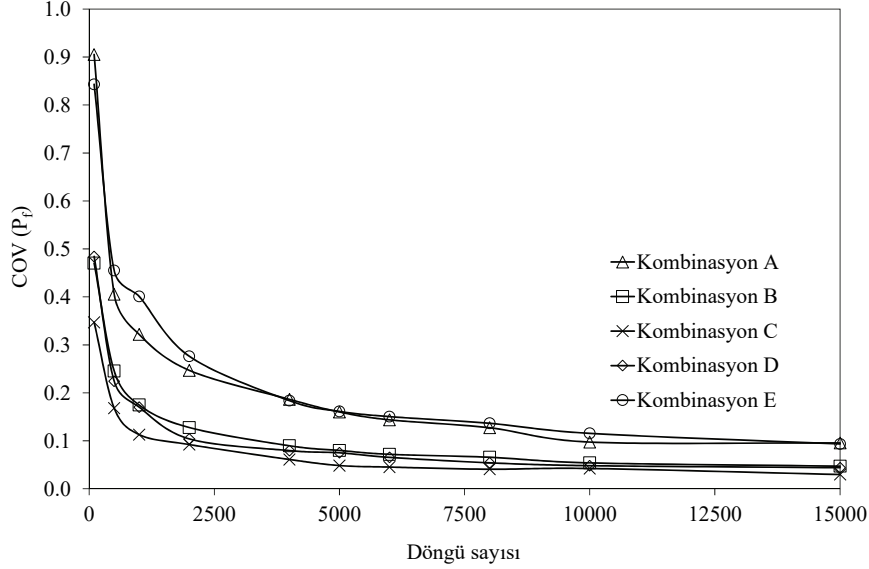
değişkenlerin daha önce çalışılan koşullardan farklı akım, ayak büyüklüğü/şekli ve taban malzemesi kullanılmasıyla elde edilecek yeni oyulma değerleri mevcut istatistiksel veri bankasını zenginleştirecektir. Böylece olası yeni verinin dahil edilmesiyle daha önce önerilen OYF ve COV değerlerinde değişim görülebilir.

Denklem (6) kullanılarak göçme olasılığı hesaplanırken Monte Carlo yöntemiyle rastgele sayılar üretilmektedir. Monte Carlo yönteminde uygulanacak döngü sayısının saptanması önemlidir. Az sayıda döngü kullanıldığında üretilen rastgele sayıların standart sapması fazla olmakta; dolayısıyla hassasiyet azalmaktadır. Diğer taraftan döngü sayısı arttıkça üretilen rastgele sayılar arasındaki standart sapma azalmakta ve bir ortalama değere yakınsamaktadır. Çizelge 1’de sunulan çeşitli kombinasyonlar için göçme olasılığının değişim katsayısı çeşitli döngü sayıları için hesaplanmıştır (Bkz. Şekil 3). Bu şekilden görüleceği gibi döngü sayısı arttıkça göçme olasılığının değişim katsayısı azalmaktadır. Bu katsayının 0.1 değerinden daha küçük olması halinde yeterli hassasiyetin elde edileceği kabul edilmektedir [1]. Analizlerde döngü sayısının 10000’den fazla olması durumunda bu kriter sağlanmaktadır. Bu nedenle tüm kombinasyonlarda döngü sayısı 15000 olarak kabul edilmiştir.

*Çizelge 1. Stokastik değişkenlere atanan OYF ve COV bilgileri*

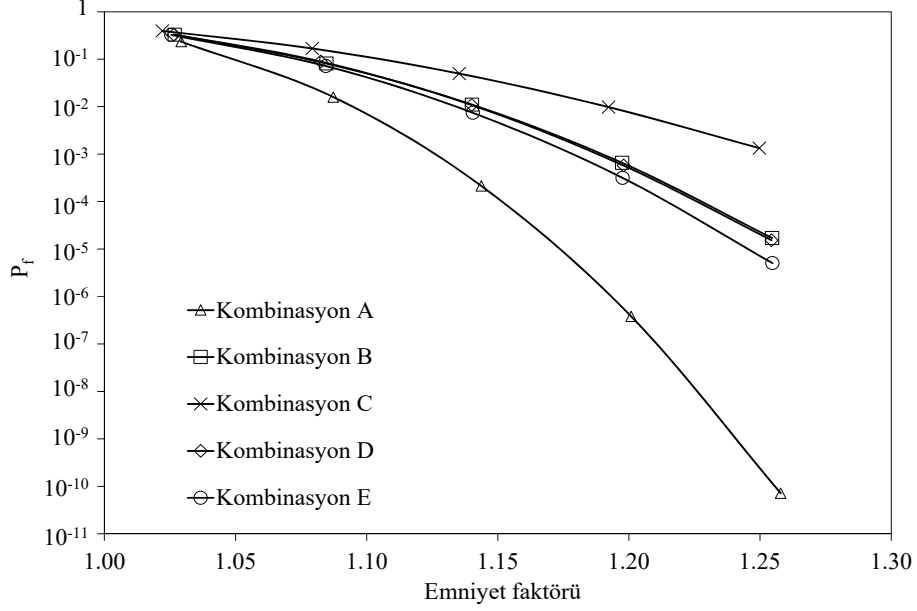
Değişken	Ortalama değer ( $\mu$ )	Kombinasyon	COV	OYF
y	1.4 m	A	0.10	Normal
		B	0.15	Normal
		C	0.20	Normal
		D	0.15	Normal
		E	0.15	Normal
u	0.70 m/s	A	0.010	Normal
		B	0.015	Normal
		C	0.020	Normal
		D	0.015	Üniform
		E	0.010	Üçgen
D <sub>50</sub>	4 mm	A	0.050	Normal
		B	0.075	Normal
		C	0.100	Normal
		D	0.075	Üniform
		E	0.075	Üniform





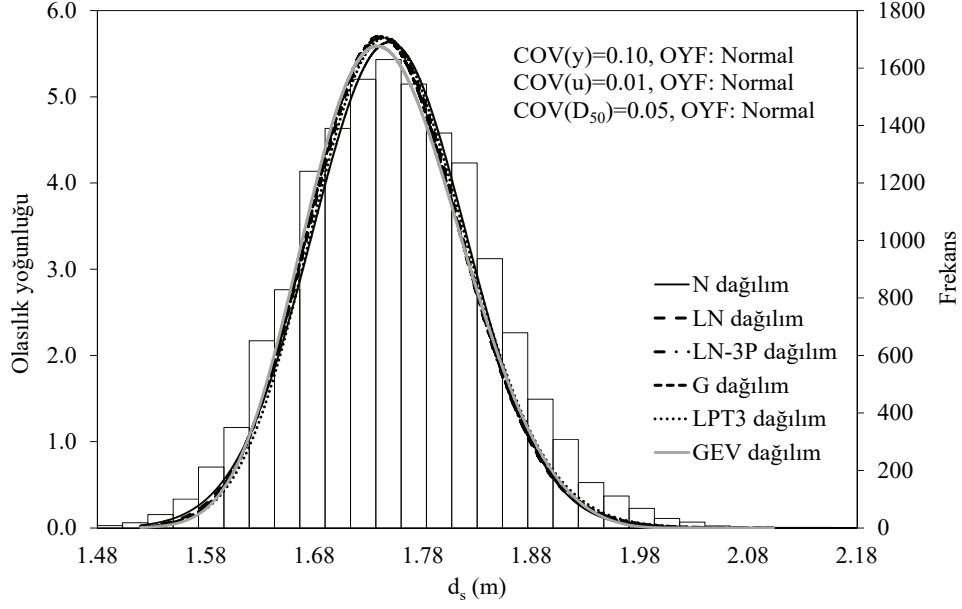
Şekil 3. Göçme olasılığı değişim katsayısının Monte Carlo döngü sayısı ile değişimi

Çizelge 1’de çeşitli kombinasyonlar olarak sunulan senaryolar için farklı göçme olasılıkları hesaplanmıştır. Bu olasılıkların emniyet faktörüne göre değişimi Şekil 4’te verilmektedir. Sabit temel derinliğinde herhangi bir kombinasyonda oyulma derinliği arttıkça emniyet faktörü azalmaktadır. Ayrıca stokastik nitelikteki değişkenlerin değişim katsayısı arttıkça kullanılan olasılık yoğunluk fonksiyonunun medyan değerinden gittikçe uzaklaşan bir aralıkta benzeşimler yapılmaktadır. Bu durumda medyan değerlerin sol tarafındaki değerler kullanıldığında daha küçük oyulma derinlikleri; sağ tarafındaki değerler kullanıldığında ise daha büyük oyulma derinlikleri bulunmaktadır. Ancak Monte Carlo benzeşiminde her değişkenin medyana göre sol ve sağ taraflarından alınan değerler rastgele nitelikte olduğu, yani eşit sayıda alınmadığı için 15000 kez yapılan döngüde en çok üretilen göçme olasılığı, aranan değer olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla değişim katsayıları arttıkça daha büyük oyulma derinliği üretilme olasılığı da artmaktadır (Bkz. Şekil 4). Kombinasyon A durumunda değişim katsayıları düşük tutulmuş ve tüm değişkenler normal dağılımla temsil edilmişlerdir. Kombinasyon C’de tüm değişkenler yine normal dağılımla temsil edilirken, kullanılan değişim katsayıları abartılarak Kombinasyon A’dakinin iki katı olarak alınmıştır. Bu durumda en büyük göçme olasılıkları bulunmuştur. Bilhassa Kombinasyon B ve D birbirine çok yakın sonuçlar vermekle birlikte, Kombinasyon E dağılımı da bunlara nispeten yakın değişim göstermiştir. Bu kombinasyonlarda değişim katsayıları bir durum haricinde (akım hızı) aynı alınmış, akım derinliğinde normal olasılık yoğunluğu, akım hızında normal, üniform ve üçgen olasılık yoğunluğu, tane çapında ise normal ve üniform olasılık yoğunluğu kullanılmıştır. Bu durumda olasılık yoğunluk fonksiyonu değişiminin değişim katsayısı değişimine göre daha az hassas olduğu sonucuna varılmıştır. Bu uygulama örneğinde makul bir göçme olasılığından (örneğin 0.001) daha düşük değerler elde etmek için emniyet faktörünün 1.2’den daha fazla olması gerektiği görülmektedir.

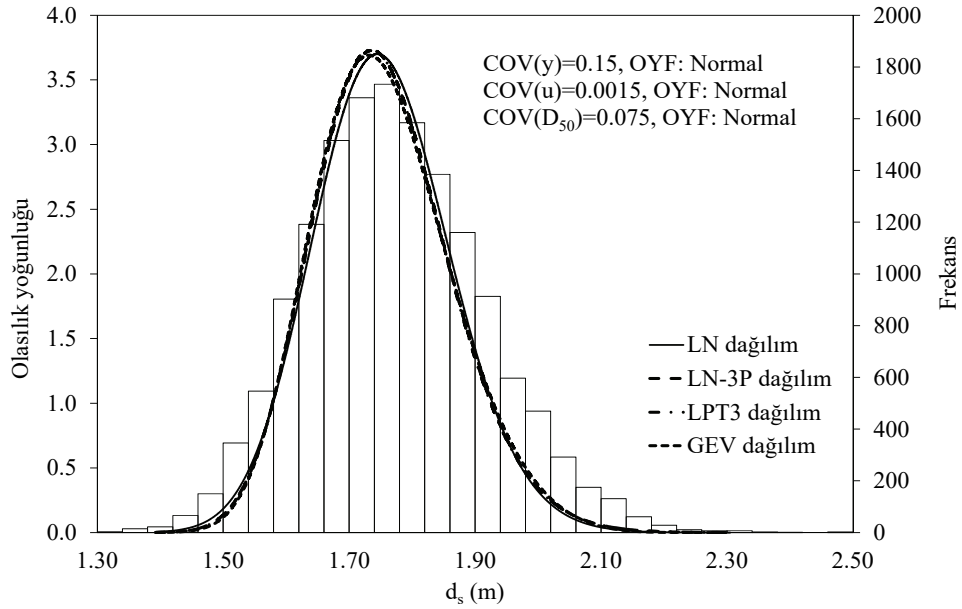


Şekil 4. Değişik kombinasyonlarda göçme olasılığının emniyet faktörüyle değişimi

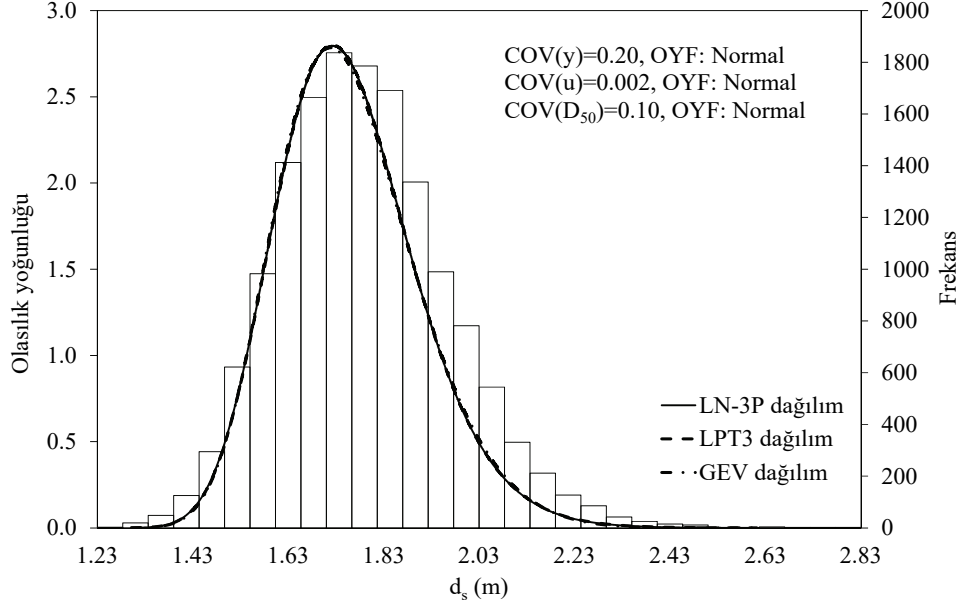
Tüm kombinasyonlar için Monte Carlo yöntemiyle üretilen rastgele oyulma derinliği değerlerinin frekans histogramları sırasıyla Şekil 5 ve 9 arasında sunulmaktadır. Bu frekans histogramlarının istatistiksel dağılımlarını tanımlamak amacıyla uygunluk testleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda su mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılan bazı dağılımlar (normal (N), log-normal (LN), 3 parametrelili log-normal (LN-3P), Gamma (G), log-Pearson Tip 3 (LPT3) ve genel ekstrem dağılım (GEV)) kullanılmıştır. Bu testlerde  $\alpha=5\%$  ve  $\alpha=10\%$  önem seviyelerinde Chi-kare ve Kolmogorov-Smirnov testleri ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu testlerin sonuçları Çizelge 2’de sunulmaktadır. Bu çizelgede, A kabul, R ret anlamında kullanılmıştır. Aynı önem seviyesinde iki testten birisi kabul, diğeri ret sonucu veriyorsa genel karar kabul olarak alınmaktadır. Her iki testin sonucu da ret ise genel karar ret olmaktadır. Aynı önem seviyesinde Kombinasyon A için oyulma derinliğinin istatistiksel dağılımının ele alınan tüm dağılımlarla ifade edilebileceği görülmüştür (Bkz. Çizelge 2). Şekil 5’te Kombinasyon A’nın frekans histogramı ve buna uyan tüm olasılık yoğunluk fonksiyonları gösterilmiştir. Benzeşimde test edilen her sınıf aralığının kaç kez kullanıldığını göstermek amacıyla frekans değerleri verilmiştir. Test edilen toplam frekans değeri 15000 olmaktadır. Benzer analizler diğer kombinasyonlar için de gerçekleştirilmiştir (Şekil 6-9). Kombinasyon B için oyulma derinliği değişimine LN, LN-3P, LPT3 ve GEV dağılımları; Kombinasyon C için LN-3P, LPT3 ve GEV dağılımlarının kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Kombinasyon D ve E için ise herhangi bir dağılım önerilmemektedir.



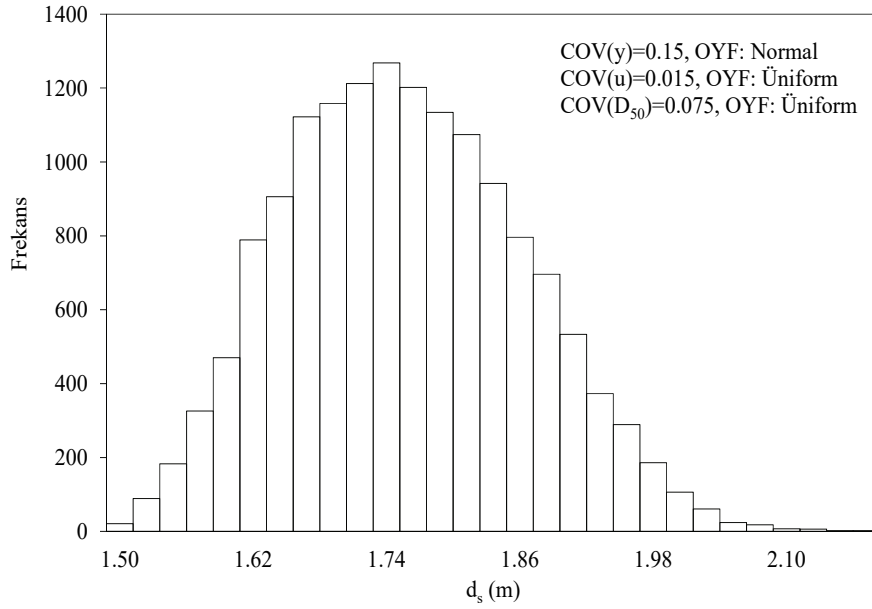
Şekil 5. Kombinasyon A için frekans histogramı



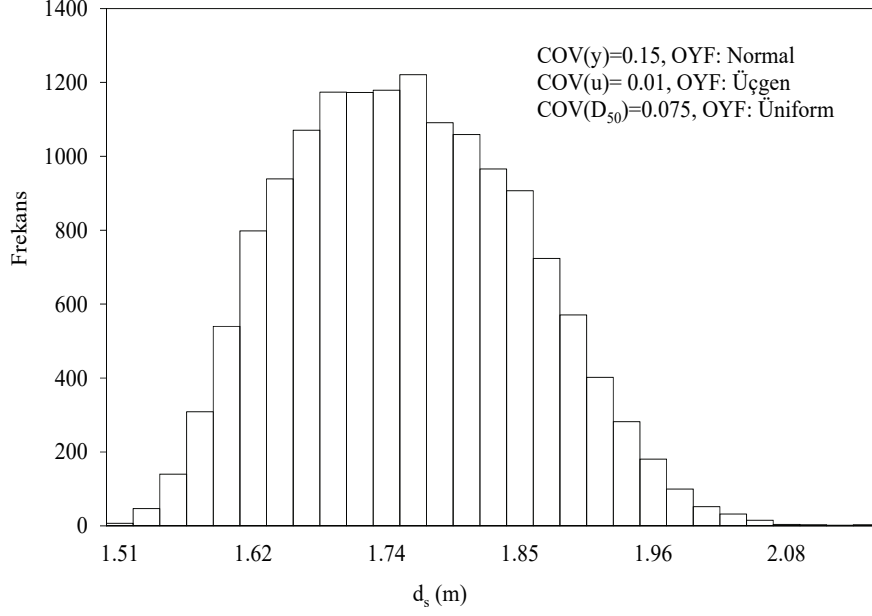
Şekil 6. Kombinasyon B için frekans histogramı



Şekil 7. Kombinasyon C için frekans histogramı



Şekil 8. Kombinasyon D için frekans histogramı



Şekil 9. Kombinasyon E için frekans histogramı

Çizelge 2. Olasılık yoğunluk fonksiyonlarının uygunluk testleri

Komb.	OYF	Chi-kare testi		Kolmogorov-Smirnov testi		Genel karar	
		$\alpha=0.10$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.05$
A	N	A	A	R	A	A	A
	LN	A	A	A	A	A	A
	LN-3P	A	A	A	A	A	A
	G	A	A	A	A	A	A
	LPT3	A	A	A	A	A	A
	GEV	-	-	A	A	A	A
B	N	R	R	R	R	R	R
	LN	A	A	R	A	A	A
	LN-3P	A	A	A	A	A	A
	G	R	R	R	R	R	R
	LPT3	A	A	A	A	A	A
	GEV	A	A	A	A	A	A
C	N	R	R	R	R	R	R
	LN	R	R	R	R	R	R
	LN-3P	A	A	A	A	A	A
	G	R	R	R	R	R	R
	LPT3	A	A	A	A	A	A
	GEV	A	A	A	A	A	A

Çizelge 2. Olasılık yoğunluk fonksiyonlarının uygunluk testleri (devam)

Komb.	OYF	Chi-kare testi		Kolmogorov-Smirnov testi		Genel karar	
		$\alpha=0.10$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.05$
D	LN	R	R	R	R	R	R
	LN-3P	R	R	R	R	R	R
	G	R	R	R	R	R	R
	LPT3	R	R	R	R	R	R
	GEV	R	R	R	A	R	R
E	N	R	R	R	R	R	R
	LN	R	R	R	R	R	R
	LN-3P	R	R	R	R	R	R
	G	R	R	R	R	R	R
	LPT3	R	R	R	R	R	R
GEV	R	R	R	R	R	R	

## 5. SONUÇLAR

Köprü ayakları etrafındaki oyulma ifadelerinde kullanılan başlıca değişkenlerin rastgele özellikleri ele alınarak hesaplanan göçme olasılıkları deterministik yöntemle hesaplanan değerlere göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Buna göre yapının ekonomik ömrü boyunca maruz kalabileceği olası olumsuz senaryolara göre hesaplanan göçme olasılıkları için arzu edilen emniyet faktörüne göre köprü ayağı temel derinliğine gerçekçi olarak karar verilebilir. Bu çalışmada bir uygulama örneğinde göçme olasılığının emniyet faktörüyle değişimi incelenmiştir. Sonuçlara göre, oyulma mekanizmasında yer alan değişkenlere atanan değişim katsayılarının artmasıyla göçme olasılıklarının arttığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla akarsu köprülerinin tasarımlarında çalışılan bölgedeki akarsu akım ve katı madde taşınım rejimlerine göre beklenmesi olası değişim katsayılarının kullanılması yöresel şartlara uygun olan daha sağlıklı temel tasarımları yapılabilir. İlgili analizlerde ilk yaklaşım olarak bu makalede Kombinasyon A olarak verilen istatistiksel bilgi kullanılabilir. Ancak mevcut istatistiksel verinin artmasıyla karakteri değişebilecek OYF ve COV değerlerinin etkilerini de düşünerek hassasiyet analizleri de yapılmalı ve olası en emniyetli tasarımı veren koşullar yersel şartlara göre saptanmalıdır.

### Semboller

- b : Ayak çapı  
COV : Değişim katsayısı  
 $d_f$  : Köprü ayağı temel derinliği  
 $d_s$  : Maksimum oyulma derinliği  
 $D_{50}$  : Tane medyan çapı  
EA : Emniyet aralığı

$f_S(s)$	: Yüklemenin olasılık yoğunluk fonksiyonu
$f_R(r)$	: Direncin olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F_d$	: Tane Froude sayısı
$g$	: Yerçekimi ivmesi
$G$	: Gamma dağılımı
GEV	: Genel ekstrem dağılımı
LN	: Log-normal dağılımı
LN-3P	: 3 parametrelili log-normal dağılımı
LPT3	: Log-Pearson tip 3 dağılımı
N	: Normal dağılımı
OYF	: Olasılık yoğunluk fonksiyonu
R	: Direnç
S	: Yükleme
t	: Zaman
$T_s$	: Boyutsuz zaman parametresi
u	: Yaklaşım akımının ortalama hızı
y	: Yaklaşım akım derinliği
$\alpha$	: Önem seviyesi
$\Delta$	: Göreli yoğunluk
$\sigma_g$	: Taban malzemesi dağılımının geometrik standart sapması

#### Kaynaklar

- [1] Johnson, P.A., Reliability-based Pier Scour Engineering, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 118(10), 1344-1358, 1992.
- [2] Johnson, P.A., Fault Tree Analysis of Bridge Failure Due to Scour and Channel Instability, ASCE Journal of Infrastructure Systems, 5(1), 35-41, 1999.
- [3] Johnson, P.A. ve Ayyub, B.M., Assessing Time-variant Bridge Reliability due to Pier Scour, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 118(6), 887-903, 1992a.
- [4] Johnson, P.A. ve Ayyub, B.M., Probability of Bridge Failure due to Pier Scour, Proceedings of the Water Resources Sessions at Water Forum 1992, ASCE, Baltimore, MD, 1992b.
- [5] Johnson, P.A. ve Simon, A., Reliability of Bridge Foundations in Modified Channels, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 123(7), 648-651, 1997.

- [6] Johnson, P.A. ve Ayyub, B.M., Modelling Uncertainty in Prediction of Pier Scour, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 122(2), 66-72, 1996.
- [7] Yanmaz, A.M., Uncertainty of Local Scouring Parameters around Bridge Piers, Turk. J. Engin. Environ. Sci., 25, 127 – 137, 2001.
- [8] Yanmaz, A.M. ve Çiçekdağ, Ö., Composite Reliability Model for Local Scour Around Cylindrical Bridge Piers, Canadian Journal of Civil Engineering, 28, 3, 520-535, 2001.
- [9] Yanmaz, A.M. ve Üstün, İ., Generalized Reliability Model for Local Scour around Bridge Piers of Various Shapes, Turkish J. Eng. Env. Sci., 25, 687-698, 2001.
- [10] Yanmaz, A.M., Dynamic Reliability in Bridge Pier Scouring, Turkish J. Eng. Env. Sci., 26, 367-376, 2002a.
- [11] Yanmaz, A.M. ve Çelebi, T., A Reliability Model for Bridge Abutment Scour, Turkish J. Eng. Env. Sci., 28, 67-83, 2004.
- [12] Köse, Ö. ve Yanmaz, A.M., Scouring Reliability of Bridge Abutments, Digest, Teknik Dergi, 1387-1402, 2010.
- [13] Mays, L., Water Resources Engineering, McGraw-Hill, New York, 2010.
- [14] Yanmaz, A.M., Köprü Hidroliği, ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 2002b.
- [15] Lagasse, P.F., Ghosn, M., Johnson, P.A., Zevenbergen, L.W. ve Clopper, P.P., Risk Based for Bridge Scour Prediction, Final Report, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2013.
- [16] Yanmaz, A.M. ve Çam, U.E., Bridge Scour Countermeasure Design: A Case Study”, Tenth International Congress on Advances in Civil Engineering”, 1, 11-20, 2012.
- [17] Yıldırım, M.S. ve Yanmaz, A.M., Köprü Ayakları Etrafındaki Koruyucu Kaplamanın Bilgisayar Destekli Tasarımı, Teknik Dergi, Cilt 25, 6757-6774, 2014.
- [18] Yanmaz, A.M. ve Apaydın, M., A Study on Bridge Scour Risk Assessment and Countermeasure Design, ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities, 26, 499-506, 2012.
- [19] Yanmaz, A.M., Caner, A. ve Berk, A., Renovation of a Safety-Inspection Methodology for River Bridges, ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities, 21, 382-389, 2007.
- [20] Caner, A., Yanmaz, A.M., Yakut, A., Avşar, Ö. ve Yılmaz, T., Service Life Assessment of Existing Highway Bridges with no Planned Regular Inspections, ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities, 22, 108-114, 2008.
- [21] Cardoso, A.H. ve Bettess, R., Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 125(4),388–399, 1999.



- [22] Melville, B.W. ve Chiew, Y., Time scale for local scour at bridge piers, *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), 59–65, 1999.
- [23] Simarro-Grande, G. ve Martín-Vide, J. P., Exponential expression for time evolution in local scour, *Journal of Hydraulic Research*, 42(6), 663–665, 2004.
- [24] Grimaldi, C., Gaudio, R., Cardoso, A.H. ve Calomino, F., Local scouring at bridge piers and abutments: Time evolution and equilibrium, *Proc., 3rd Int. Conf. on Fluvial Hydraulics*, 1657–1664, 2006.
- [25] Fael, C.M.S., Simarro-Grande, G., Martín-Vide, J.P. ve Cardoso, A.H., Local scour at vertical-wall abutments under clearwater flow conditions, *Water Resources Research*, 42(1), 388–399, 2006.
- [26] Setia, B., 3<sup>rd</sup> IASME / WSEAS Int. Conf. on Water Resources, Hydraulics and Hydrology (WHH '08), University of Cambridge, UK, Feb. 23-25, 2008.
- [27] Yanmaz, A.M. ve Altınbilek, H.D., Study of Time Dependent Local Scour Around Bridge Piers, *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 117, 1247-1268, 1991.
- [28] Yanmaz, A.M., Temporal Variation of Clear Water Scour at Cylindrical Bridge Piers, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33, 1098-1102, 2006.
- [29] Yanmaz, A.M. ve Köse, Ö., A Semi-Empirical Model for Clear Water Scour Evolution at Bridge Abutments, *Journal of Hydraulic Research*, 47, 110-118, 2009.
- [30] Yanmaz, A.M., Time-Dependent Analysis of Clear Water Scour Around Bridge Piers, *Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*, 1989.
- [31] Johnson, P.A., Uncertainty of Hydraulic Parameters, *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 122 (2), 112-114, 1996.
- [32] Yanmaz, A.M., Overtopping Risk Assessment in River Diversion Facility Design, *Canadian J. Civil Engineering*, 27, 319-326, 2000.
- [33] Muzzammil, M., Siddiqui, N.A. ve Siddiqui, A.F., Reliability Considerations in Bridge Pier Scouring, *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, 28(1), 1-18, 2008.

