

Akarsu Köprülerinde Yıkılma Riskinin Azaltılması Üzerine Bir Çalışma

Meriç Selamoğlu

Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 06800, Ankara
Tel: (312) 210 24 84
E-Posta: smeric@metu.edu.tr

Melih Çalamak

Yard. Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, TED Üniversitesi, 06420, Ankara
Tel: (312) 585 01 01
E-Posta: melih.calamak@tedu.edu.tr

A. Melih Yanmaz

Prof. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 06800, Ankara
Tel: (312) 210 54 45
E-Posta: myanz@metu.edu.tr

Öz

Akarsu köprülerinin yıkılmasının veya aşırı derecede hasar görmesinin başlıca sebebi, köprülerin orta ve kenar ayakları etrafında oluşan aşırı yerel oyulmalardır. Köprülerin oyulma nedeniyle yıllık yıkılma riskini hesaplamada, Amerika Birleşik Devletleri, Federal Karayolu İdaresi tarafından geliştirilen HYRISK isimli bir yazılım kullanılmaktadır. Bu yazılım, bir veya bir dizi köprünün yıllık yıkılma riskini bir tahmin modeliyle hesaplamaktadır. Kullanılan risk tahmin modeli, akarsu köprülerinin aşırı yerel oyulmaya olan eğilimlerini ve köprü açıklıklarının akım taşıma kapasitesini değerlendirmektedir. Aynı zamanda, risk tahmininde, köprü civarında akarsu taban ve şev koşulları ile köprü altyapı elemanlarının yapısal koşulları da gözden geçirilmektedir. Bu koşullar, belirli puanlama sistemleri ile yazılıma tanımlanmakta ve bu koşullara karşılık gelen yıllık yıkılma riski hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde örnek bir köprü ele alınarak bu köprünün oyulma eğilimini azaltmaya yönelik akarsu boyunca ve köprü açıklığında yapılabilecek düzenlemelerin köprünün yıllık yıkılma riski üzerindeki etkileri ve hassasiyeti tartışılmaktadır.

Anahtar sözcükler: Akarsu köprüleri, Köprü ayaklarında yerel oyulma, Oyulma önleyici düzenlemeler, Risk değerlendirmesi, HYRISK

Giriş

Akarsu köprüleri, köprü ayakları etrafında yerel oyulma ve akarsu taban dengesizliği gibi hidrolik bağlantılı nedenlerden ötürü yıkılma veya aşırı derecede hasar görme riskine maruz kalmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) 1950 – 1990 yılları arasında yıkılan köprülerin yıkılma nedenleri araştırıldığında, %60 oranla hidrolik bağlantılı nedenlerin öne çıktığı görülmektedir (Shirole ve Holt, 1991; Lagasse ve diğ., 2007). Bu oran, 1966 – 2005 yılları arasında yıkılan köprülerde ise %58'dir (Briaud, 2006). Akarsu köprülerinin hidrolik bağlantılı yıkılmasına ise, %64 oranla orta ve kenar ayaklar etrafında oluşan aşırı yerel oyulmaların neden olduğu gözlenmiştir (Lin ve diğ., 2014). Şiddetli taşkınlardan dolayı ayaklar etrafında oluşan aşırı yerel oyulmalar, köprü ayaklarının yük taşıma kapasitesini düşürmekte ve köprünün yapısal dengesini bozmaktadır. Ülkemizde de birçok akarsu köprüsünün hidrolik-bağlantılı nedenlerden ve ayaklar etrafındaki aşırı yerel oyulmalardan dolayı yıkıldığı veya zarar gördüğü bilinmektedir. Bu durumu yansıtan en yakın örneklerden birisi, 2012 yılında Filyos Çayı üzerinde bulunan Çaycuma Köprüsü'nün yıkılmasıdır. Köprünün orta ayakları etrafında hem çevrinti hem de uzun dönemli taban malzemesi çekilmesi nedeniyle alçalan akarsu yatak seviyesi sonucunda oluşan aşırı yerel oyulmalar nedeniyle orta ayak kazıkları taşıma gücünü yitirmiş ve tabliye yükünü taşıyamamasından ötürü köprüde çökme meydana gelmiştir. Çaycuma Köprüsü'nün yıkılmasından dolayı 15 kişi yaşamını yitirmiştir (Sevindik, 2015).

Köprü ayakları etrafında aşırı yerel oyulmaların can kaybına ve yüksek maddi hasara yol açabilmesi, köprülerin servis ömrü içerisinde böyle kayıplara yol açmayacak şekilde tasarlanma gerekliliğini göstermektedir. Köprülerin uygun tasarımı ve inşasının yanı sıra, köprü alt ve üstyapı elemanları ile akarsu taban koşullarının düzenli olarak kontrol edilmesi, gerektiği takdirde oyulma önleyici düzenlemeler yapılması da önem teşkil etmektedir. Köprü ayakları etrafındaki oyulmalar tasarım debisi (100-yıl dönüş aralıklı) ve kontrol debisi (500-yıl dönüş aralıklı) altında incelenmelidir (AASHTO, 2007).

Bu çalışmada, köprülerin aşırı yerel oyulma nedeniyle yıllık yıkılma riskleri değerlendirilmiş ve oyulma önleyici düzenlemelerin yıllık yıkılma riskini azaltmadaki etkileri incelenmiştir. Bu bağlamda, ABD Federal Karayolları İdaresi'nin (FHWA) önerdiği risk tahmin modeli ve bu yöntemle ilgili olarak geliştirilen HYRISK (Pearson ve diğ., 2002) yazılımı kullanılmıştır. Risk tahmin modelinin uygulamasını göstermek amacıyla Doğu Karadeniz Bölgesi'nde Fol Deresi üzerindeki mevcut Fol-1 Köprüsü ile örnek bir uygulama yapılmıştır.

Risk Tahmin Modeli

Köprülerin ayaklar etrafında oyulmaya bağlı yıllık yıkılma riskini değerlendirmede FHWA'nın önerdiği risk tahmin modeli kullanılmıştır. Genel olarak bu model, bir köprünün oyulmaya bağlı yıllık yıkılma riskini, yıllık yıkılma olasılığı ile yıkılmadan dolayı ortaya çıkacak maliyetin çarpımı ile ifade etmektedir (Briaud, 2006). Dolayısıyla, bir köprünün oyulmaya bağlı yıllık yıkılma riskini etkileyen ana etkenler yıllık yıkılma olasılığı ve maliyeti olup, bu etkenler dikkatle belirlenmelidir. Risk tahmin modelinin kolay uygulanabilmesi, bir köprünün çeşitli senaryolar altında risklerinin görümlenmesi veya çok sayıda köprünün risklerinin kıyaslanabilmesi için FHWA tarafından geliştirilen HYRISK yazılımı kullanılmaktadır (Pearson ve diğ., 2002). Yıllık

yıkılma olasılığı ve maliyet hesabında birtakım değişkenler kullanılmaktadır. Bu değişkenler, FHWA uzmanları tarafından belirlenmiş olup, yine FHWA uzmanlarınca geliştirilen Ulusal Köprü Envanteri (NBI) isimli veri tabanında yer almaktadır. NBI veri tabanında ABD’de bulunan yaklaşık 600,000 köprünün bilgileri bulunmaktadır (FHWA, 1989). Risk tahmin modelinde, köprünün yıkılma durumunda tali yol kullanılırken fazladan katedilen yol uzunluğu, köprünün bulunduğu yol sınıflandırması, inşa edildiği yıl, günlük ortalama araç trafiği, köprünün işlev sınıflandırması, köprünün yapı tipi, köprü uzunluğu ve genişliği, köprünün savaklanma frekansı ve oyulma kritikliği derecesi gibi NBI değişkenleri kullanılmaktadır.

NBI değişkenleri kullanılarak oyulmaya bağlı yıllık yıkılma riski, Pearson ve diğerleri (2002) tarafından önerilen eşitlik ile hesaplanmaktadır:

$$R=KP_A C \quad (1)$$

Burada, K = köprü üstyapı ve temel cinsine bağlı düzeltme çarpanı, P_A = oyulmaya bağlı yıllık yıkılma olasılığı (1/yıl) ve C = yıkılmadan dolayı ortaya çıkacak toplam maliyettir (\$). Denklem (1)’de K çarpanı, köprünün üstyapısı ve temel cinsi değişmeyeceği için sabit bir sayıdır. Dolayısıyla, köprünün yıkılma riskini etkileyen değişkenler P_A ve C değişkenleridir. Burada, toplam maliyet, köprünün yıkılması durumunda yerine aynı köprüyü inşa etmenin maliyeti, yeni köprü inşası sırasında tali yol kullanılırken fazladan kat edilen yoldan dolayı araçlardaki işletim maliyeti ve yine tali yol kullanılırken kaybedilen zamanın kişiler ve ticari araçlar için yarattığı zarar maliyetinin toplamıdır. Maliyet değişkenleri ile beraber risk hesaplaması açık olarak şöyle ifade edilebilir:

$$R = KP_A \left[(C_1) + (C_2 D) + \left(C_3 \frac{D}{S} \right) \right] \quad (2)$$

Burada, C_1 = yeniden inşa maliyeti (\$), C_2 = toplam araç işletim maliyeti (\$/km), D = tali yol kullanılırken fazladan katedilen yol uzunluğu (km), C_3 = kişiler ve ticari araçlar için toplam kayıp zaman maliyeti (\$/saat) ve S = tali yolda azami hızdır (km/saat) (Pearson ve diğ., 2002). Denklem (2)’de yer alan maliyetlerin hesaplanması ile ilgili detaylara Apaydın (2010)’dan ulaşılabilir. Riski etkileyen maliyet değişkenlerinde, C_1 , C_2 ve C_3 değerleri, köprünün cinsi, günlük ortalama araç trafiği, kişiler ve ticari araçların saatlik maliyetlerine bağlı olan sabitlerdir. Dolayısıyla, D ve S değişkenleri maliyet hesabını etkilemekte olup, bu değişkenler köprünün yıkılması durumunda kullanılacak tali yolun özelliklerine bağlıdır.

Risk hesabında yer alan bir diğer değişken ise oyulmaya bağlı yıllık yıkılma olasılığıdır. Yıllık yıkılma olasılığı, P_A hesaplanırken, önce bir deneme yıkılma olasılığı, P_{tr} bulunur, daha sonra köprünün mevcut yaşına göre bu olasılık değiştirilir (Pearson ve diğ., 2002). Deneme yıkılma olasılığı, köprünün oyulma kritikliğine ve savaklanma frekansına göre bulunur. Çeşitli oyulma kritikliği ve savaklanma frekansı değerlerine bağlı deneme yıkılma olasılıkları Tablo 1’de sunulmuştur. Tablo 1’de yer alan P_{tr} değerleri, FHWA bünyesindeki köprü oyulması uzmanları tarafından belirlenmiştir (Stein ve Sedmera, 2006).

Tablo 1’de ilgili oyulma kritikliği derecesi ve savaklanma frekansına bağlı bulunan P_{tr} değeri kullanılarak Denklem (3) ile köprünün beklenen ömrü hesaplanır.

$$X_{90} = \frac{\log(1 - 0.90)}{\log(1 - P_r)} \quad (3)$$

Burada, X_{90} = binom dağılımına göre %90 güven aralığında köprünün beklenen ömrüdür (yıl). Köprünün mevcut yaşı beklenen ömürden yüksekse, köprünün beklenenden iyi durumda olduğu kabulü yapılır. Bu durumda, Denklem (3)'te X_{90} yerine köprünün mevcut yaşı girilerek yıkılma olasılığı hesaplanır ve bu değer P_A olarak Denklem (2)'de risk hesaplamasında kullanılır. Mevcut yaşı X_{90} 'dan küçük olduğu durumda ise Tablo 1'den bulunan P_r değeri değiştirilmeden Denklem (2)'de kullanılır. Yıllık yıkılma olasılığı ile ilgili ABD'de bazı eyaletlerin ulaşım birimleri detaylı çalışmalar yürütmüş olup, Tablo 1'de yer alan olasılık değerlerini güncellemişlerdir (Bkz. Stein ve Sedmera (2006)). Ancak bu çalışmalar eyaletler kapsamında yıkılan köprülerin verisi ile hesaplandığı için, daha genel bir bilgi vermesi bakımından bu çalışmada HYRISK yazılımındaki orijinal risk tahmin modeli olasılıkları kullanılmıştır.

Tablo 1 Köprülerin oyulma kritikliği ve savaklanma frekansına göre deneme yıkılma olasılığı (Pearson vd., 2002).

Oyulma Kritikliği	Savaklanma Frekansı			
	Çok Seyrek	Seyrek	Sık	Çok Sık
0 (Köprü yıkılmış)	1	1	1	1
1 (Köprünün yıkılması muhtemel)	1	1	1	1
2 (Çok kritik oyulma)	0.457	0.483	0.628	0.726
3 (Kritik oyulma)	0.248	0.267	0.398	0.495
4 (İleri derecede oyulma)	0.127	0.137	0.228	0.298
5 (Hafif oyulma)	0.005	0.006	0.031	0.057
6 (Bilinmeyen taban koşulları)	0.187	0.202	0.313	0.396
7 (Yapısal düzenlemeler yapılmış)	0.187	0.202	0.313	0.396
8 (Köprü ayakları çok iyi durumda)	0.003	0.004	0.014	0.028
9 (Köprü ayakları mükemmel durumda)	0.002	0.002	0.004	0.006

Köprünün deneme yıkılma olasılığı, Tablo 1'de görüldüğü üzere oyulma kritikliği ve savaklanma frekansına bağlıdır. Savaklanma frekansı taşkın şiddetine, köprü açıklığında akım taşıma kapasitesine ve köprünün bulunduğu yol sınıflandırmasına bağlıdır. Köprülerin oyulma kritikliği ise, ayaklar etrafında oyulma derinliği köprü yerinde ölçülmediği takdirde, köprünün altyapı elemanlarının yapısal koşulları ve gözlemlenebilen (niteliksel) oyulma seviyesi ile köprü civarındaki akarsu taban ve şev koşulları incelenerek belirlenebilir. Köprü altyapı elemanlarının koşulları Yanmaz ve diğerleri (2007) tarafından önerilen, köprü yerinde yapılacak gözlemlere dayalı derecelendirme yöntemi ile belirlenebilir. Akarsu taban ve şev koşulları ise, yine köprü yerinde yapılacak gözlemler yardımıyla Johnson ve diğerleri (1999) tarafından önerilen akarsu stabilite göstergeleri yöntemi ile belirlenebilir. Akarsu taban ve şev koşulları ile köprü altyapı elemanlarının yapısal koşullarının derece ve açıklamaları, ve bu değerlere bağlı oyulma kritikliği dereceleri Tablo 2'de sunulmuştur (Stein ve Sedmera, 2006). Ancak, Tablo 2'de sunulan derecelendirmelerde derece 6 ve derece 7, Tablo 1'de orijinal HYRISK derecelendirmelerinden farklıdır. Stein ve Sedmera (2006) tarafından güncellenmiş yıllık yıkılma olasılıkları Tablo 2'deki derecelendirmelere bağlı olarak monotonik bir davranış sergilememektedir. Ancak orijinal HYRISK tanımlarına göre Tablo 1'de görülen derece 6 ve derece 7 belirsiz durumları açıkladığı için, yıkılma olasılıklarında monotonik bir davranış görülmemektedir. Uygulama örneği üzerinde bu durum daha net irdelenecektir.

Tablo 2 Akarsu taban ve şev koşulları ile köprü altyapı elemanlarının yapısal koşullarına bağlı oyulma kritikliği dereceleri (Stein ve Sedmera, 2006).

Akarsu Taban ve Şev Koşulları	Köprü Altyapı Elemanlarının Yapısal Koşulları									
	0 (Köprü yıkılmış)	1 (Köprünün yıkılması muhtemel)	2 (Çok kritik durumda)	3 (Kritik durumda)	4 (Zayıf durumda)	5 (Vasat durumda)	6 (Yeterli durumda)	7 (İyi durumda)	8 (Çok iyi durumda)	9 (Mükemmel durumda)
0 (Köprü yıkılmış)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 (Köprünün yıkılması muhtemel)	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2 (Çok kritik durumda)	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3 (Kritik durumda)	0	1	2	2	3	4	4	4	4	4
4 (Zayıf durumda)	0	1	2	3	4	4	5	5	6	6
5 (Vasat durumda)	0	1	2	3	4	5	5	6	7	7
6 (Yeterli durumda)	0	1	2	3	4	5	6	6	7	7
7 (İyi durumda)	0	1	2	3	4	6	6	7	7	8
8 (Çok iyi durumda)	0	1	2	3	4	6	7	7	8	8
9 (Mükemmel durumda)	0	1	2	3	4	7	7	8	8	9

Uygulama

Akarsu köprülerinde oyulmaya bağlı yıllık yıkılma riskinin hesaplanması ve riskin azaltılmasına yönelik çalışmaların etkilerini incelemek için Doğu Karadeniz Bölgesi'nde Fol Deresi üzerinde bulunan Fol-1 Köprüsü ile örnek bir uygulama yapılmıştır. Vakfıkebir ve Tonya ilçelerini birbirine bağlayan yol üzerinde bulunan Fol-1 Köprüsü (41°02'08" K, 39°16'44" D) 1979 yılında inşa edilmiştir. İki adet dik duvar kenar ayak ve iki adet dörder silindir orta ayak grubu ile desteklenen köprüye ait trafik bilgilerini içeren NBI değişkenleri, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) 10. Bölge Müdürlüğü'nden elde edilmiştir.

Fol Deresi havzasının coğrafi ve hidrolojik özellikleri, daha önce Yanmaz ve Coşkun (1995) tarafından yürütülen bir çalışmadan elde edilmiştir. Havzanın taşkın frekans analizine göre 100-yıllık tasarım debisi, $Q_{100} = 181 \text{ m}^3/\text{s}$, 500-yıllık taşkın debisi ise $Q_{500} = 213 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak belirlenmiştir (Bilen, 1999). Köprü yakınında yer alan akım gözlem istasyonunda ölçülen en yüksek akım, $412 \text{ m}^3/\text{s}$ ile 1990 yılı taşkınında meydana gelmiştir (Apaydın, 2010). Yerel yetkililerden alınan bilgiye göre bugüne kadar köprüde savaklanma hiç gerçekleşmemiştir. Çeşitli dönüş aralıklı taşkın debileri altında Fol Deresi'nin su yüzü profili HEC-RAS yazılımı (Brunner, 2002) ile oluşturulmuştur. Oluşturulan su yüzü profilleri de, Q_{500} debisinde dahi köprüde savaklanma gerçekleşmediğini göstermektedir. Bu nedenle, yıllık yıkılma olasılığı hesaplarında savaklanma frekansı çok seyrek olarak belirlenmiştir.

Apaydın (2010) çalışması kapsamında köprü bölgesine yapılan arazi gezisinde, köprü altyapı elemanları ve akarsu koşulları hakkında bilgi toplanmıştır. Altyapı elemanlarının yapılan gözlemlere dayanılarak vasat durumda (derece 5) olduğu belirlenmiş ve makul bir emniyet seviyesinde olduğu saptanmıştır. Akarsu taban ve şev koşullarının ise

Johnson ve diğerlerinin (1999) yöntemi uygulanarak yine vasat durumda (derece 5) olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada, arazi gezisinde gözlenen koşulların halen geçerli olduğu varsayımı yapılmıştır. Saptanan köprü alt yapı ve akarsu koşullarına bağlı olarak oyulma kritikliği derecesi hafif oyulma (derece 5) olarak belirlenmiştir (bkz. Tablo 2). Ancak, HEC-RAS yazılımı ile Q_{100} ve Q_{500} debileri altında, sağ orta ayak grubunda kritik seviyede oyulma gerçekleşebileceği görülmüştür. Dolayısıyla, tasarım ve kontrol debileri altında köprü altyapı koşulları derecesi ve buna bağlı olarak oyulma kritikliği derecesinin 5'in altına düşeceği tahmin edilmektedir.

Köprü'nün yıkılması halinde kullanılacak en yakın tali yolda katedilen fazladan yol, $D = 1$ km, tali yoldaki azami hız ise $S = 50$ km/saat olarak belirlenmiştir. Köprü'nün üstyapı ve temel tipine göre K çarpanı 1.0 alınmıştır (Apaydın, 2010).

Köprü'nün yıkılması durumunda ortaya çıkacak maliyet Apaydın (2010) tarafından Amerikan Doları cinsinden hesaplanmış olup, göreceli bilgi vermesi açısından maliyetler güncellenmemiştir. Bu durumda, köprü'nün yeniden inşa maliyeti $C_1 = 481,074$ \$ olarak hesaplanırken, seçilen tali yolun özelliklerine bağlı olarak toplam araç işletim maliyeti $C_2 = 94,535$ \$/km, toplam kayıp zaman maliyeti ise $C_3 = 11,684,526$ \$/saat olarak bulunmuştur. Tali yol ile ilgili D ve S değişkenleri dikkate alınarak Denklem (2)'de görülen maliyetler hesaplandığında, araç işletim maliyeti 94,535 \$, kayıp zaman maliyeti 233,690 \$, toplam maliyet ise $C = 809,299$ \$ olarak bulunmuştur.

Fol-1 Köprüsünün Yıllık Yıkılma Riski

Fol-1 Köprüsünün mevcut durumunda oyulma kritikliği derecesi 5, savaklanma frekansı çok seyrek. Buna bağlı olarak, Tablo 1'den deneme yıkılma olasılığı 0.005 olarak bulunmuştur. Köprü'nün beklenen ömrü Denklem (3) ile hesaplandığında, köprü'nün mevcut yaşından (36 yıl) oldukça büyük bir yaş elde edilmektedir. Dolayısıyla, Tablo 1'de bulunan deneme yıkılma olasılığı değiştirilmeden yıllık yıkılma olasılığı, $P_A = 0.005$ olarak kullanılmıştır. Köprü'nün K çarpanı 1.0, toplam maliyeti ise $C = 809,299$ \$ olduğu için, oyulmaya bağlı yıllık yıkılma riski Denklem (1), kullanılarak $R = 4046$ \$/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu risk seviyesi, köprü'nün taşkına maruz kalmadığı zamanlar için hesaplanmıştır. Taşkın tasarım ve kontrol debileri altında, önceki bölümde de bahsedildiği gibi, özellikle sağ orta ayak grubunun kritik seviyede oyulmaya maruz kalması beklenmektedir. Bu durumda oyulma kritikliği derecesi 5'in altına düşecektir. Tablo 3'te, düşük oyulma kritikliği seviyelerinde bulunan deneme yıkılma olasılıkları, bu olasılıklar ile köprü'nün beklenen ömrü sunulmuştur. Beklenen ömürler köprü'nün mevcut yaşından düşük olduğu için Denklem (3) ile yıllık yıkılma olasılığı yeniden hesaplanmış ve buna bağlı yıllık yıkılma riski sunulmuştur.

Tablo 3 Fol-1 Köprüsü'nün taşkın altında oyulmaya bağlı yıllık yıkılma riski.

Oyulma Kritikliği	Deneme Yıkılma Olasılığı	Beklenen Ömür (yıl)	Yıllık Yıkılma Olasılığı	Risk (\$/yıl)
2	0.457	3.8	0.062	50,177
3	0.248	8.1	0.062	50,177
4	0.127	17.0	0.062	50,177

Tasarım ve kontrol taşkın debileri altında hesaplanan yıllık yıkılma riski, $R = 50,177$ \$/yıl çok yüksek bir risktir. Dolayısıyla, köprünün yıllık yıkılma riskini azaltmak için köprü ayakları etrafına koruyucu düzenlemeler ve akarsu taban ve şev koşullarını iyileştirici ıslah çalışmaları yapılmalıdır.

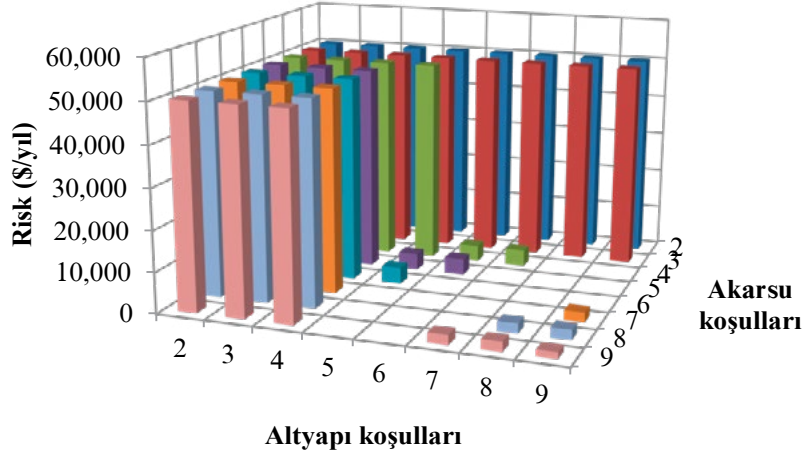
Oyulma Önleyici Düzenlemelerin Yıllık Yıkılma Riskine Etkileri

Fol-1 Köprüsü'nün altyapı elemanlarının yapısal koşulları ile akarsu taban ve şev koşullarının dereceleri 5, yani vasat durumdadır. Tablo 2'de farklı altyapı ve akarsu koşullarına bağlı oyulma kritikliği dereceleri verilmiştir. Bu oyulma kritikliği derecelendirmelerinde, derece 6 ve 7 Stein ve Sedmera (2006) tarafından yeniden adlandırılmış olup, Tablo 1'de sunulan orijinal HYRISK derecelendirme tanımlarından farklıdır. Stein ve Sedmera (2006), oyulma kritikliği derecelerini ve buna bağlı yıllık yıkılma olasılıklarını monotonik artış gösterecek şekilde yeniden düzenlemişlerdir. Ancak bu çalışmada orijinal HYRISK olasılıkları kullanıldığı için, Tablo 1 ve Tablo 2'de uyumsuzluk olmaması adına, derece 6 ve 7 dikkate alınmamıştır.

Johnson ve diğerlerinin (1999) yöntemi uygulanarak yapılan akarsu koşulları değerlendirmesinde belli başlı hususlar dikkate alınmıştır. Köprü açıklığında kum/çakıl birikmesi, akım alanının daralması, şevlerde erozyon, akarsu en-kesitlerinin düzensiz olması, bu değerlendirmede etkili olmuştur (Apaydın, 2010). Dolayısıyla, akarsu taban ve şev koşullarında birtakım iyileştirmeler gerekmektedir. Ancak, köprü altyapı elemanlarının mevcut durumu (derece 5) sabit tutularak sadece akarsu koşullarında iyileştirme yapılması durumunda, akarsu koşullarının derece 5'ten derece 9'a çıkması, oyulma kritikliği derecesini en yüksek seviyeye çıkaramamaktadır (bkz. Tablo 2). Aynı şekilde, köprü altyapı elemanlarının koşullarında iyileştirme yapılırken akarsu koşullarının mevcut durumu (derece 5) korunduğunda, yine Tablo 2'de görüldüğü üzere oyulma kritikliği derecesi yeterince yükselmektedir. Bu nedenle, Fol-1 Köprüsü'nün oyulmaya bağlı yıllık yıkılma riskini azaltma çalışmalarında, mutlaka akarsu taban ve şev koşulları, köprü altyapı elemanları ile beraber iyileştirilmelidir.

Akarsu taban ve şev koşullarını iyileştirmek için akarsu ıslahı, köprü açıklığında biriken malzemenin temizlenmesi, akım alanı içinde yetişen bitkinin temizlenmesi ve şev koruması yapılması önerilmektedir. Köprü altyapı elemanlarının iyileştirilmesi için ise ayaklar etrafına yerleştirilecek oyulma önleyici yapısal düzenlemeler yapılmalıdır. Köprünün yersel koşulları ile uygulama kolaylığı göz önüne alındığında, Fol-1 Köprüsü'nün altyapı elemanlarını güçlendirecek ve oyulmayı önleyecek düzenlemeler, kısmi harçlı riprap kaplama, harç dolgulu yastık ve taş sandık olarak belirlenmiştir. Bu düzenlemelerin, ayakların etrafına yerleşimi ve maliyet detayları Apaydın (2010) ve Yanmaz ve Apaydın (2012) çalışmalarında açıklanmıştır.

Fol-1 Köprüsü için, tüm akarsu koşulları ve köprü altyapı koşulları altında olası yıllık yıkılma riskleri Şekil 1'de sunulmuştur. Daha önce açıklandığı üzere, oyulma kritikliği derecesini 6 ve 7 yapan akarsu ve köprü altyapı koşul kombinasyonları ise boş bırakılmıştır. Şekil 1'de görüldüğü üzere, akarsu ve köprü altyapı koşulları taşkın dönemlerinde kritik seviyelere düştüğü takdirde, yıllık yıkılma riskleri (50,177 \$/yıl) çok yüksek olmaktadır. Köprünün taşkın dönemi haricindeki mevcut durumunda $R = 4046$ \$/yıl olup, akarsu ve altyapı koşullarında iyileştirme yapıldığı takdirde bu risk daha da azalacaktır.



Şekil 1. Altyapı ve akarsu koşullarına bağlı yıllık yıkılma riski.

Akarsu koşulları ve köprü altyapı koşullarında, yukarıda anılan iyileştirmeler yapıldığı takdirde, bu koşullar Tablo 4'te sunulan derecelere yükselecek, buna bağlı olarak yıllık yıkılma olasılıkları ve riskleri de belirgin bir şekilde düşecektir. Yapılacak iyileştirmelerin kusursuz olması halinde, yıllık yıkılma riski 1,619 \$/yıl'a kadar düşebilecektir. Yeterli seviyede iyileştirme olması halinde ise yıllık yıkılma riskinin 2,428 \$/yıl'a düşmesi beklenmektedir.

Tablo 4 Fol-1 Köprüsü'nün iyileştirme sonrası oyulmaya bağlı yıllık yıkılma riski.

Akarsu Koşulları	Köprü Altyapı Koşulları	Oyulma Kritikliği	Yıllık Yıkılma Olasılığı	Risk (\$/yıl)
7	9	8	0.003	2,428
8	8	8	0.003	2,428
8	9	8	0.003	2,428
9	7	8	0.003	2,428
9	8	8	0.003	2,428
9	9	9	0.002	1,619

ABD'de köprülerin yıllık yıkılma riskleri, 1,000 \$/yıl için kabul edilebilir risk, 10,000 \$/yıl için orta seviye risk, 100,000 \$/yıl için ise kabul edilemez risk olarak sınıflandırılmıştır (Briaud ve diğ., 2012). Ülkemizde de benzer risk sınıflandırmasını uygulamak ve yıllık yıkılma risklerini kabul edilebilir risk seviyesine yakın tutmak uygun olacaktır. Yapılacak iyileştirmeler sonrasında, köprü'nün oyulma kritikliğinin iyi seviyelerde korunması ve yıllık yıkılma riskinin yeniden yükselmemesi için köprü ve akarsu koşulları düzenli olarak incelenmeli ve gerekli görüldüğü takdirde yapılan düzenlemeler yenilenmeli veya iyileştirilmelidir.

Kullanılan Tali Yolun Yıllık Yıkılma Riskine Etkisi

Köprülerin yıllık yıkılma riski üzerinde kullanılan tali yolun özelliklerinin de etkili olduğu, Denklem (2)'de görülmektedir. Fol-1 Köprüsü örneğinde, köprü'nün yıkılması durumunda kullanılacak tali yolun özelliklerine göre araç işletim maliyeti ve kayıp

zaman maliyeti toplamda 328,225 \$ olarak hesaplanmıştır. Mevcut durumda kullanılabilir olan tali yolun ulaşımına kapanması durumunda, Doğu Karadeniz Bölgesi'nin coğrafi koşullarının zorluğu nedeniyle yeni bir tali yol ancak dağ yolundan verilebilecektir. Bu durumda, katedilecek fazladan yol, yani D artacak, tali yoldaki maksimum hız ise $S = 30$ km/saat'e düşecektir. Bu da, köprünün mevcut yıllık yıkılma olasılığı göz önüne alındığında ($P_A = 0.005$), yıllık yıkılma riski, $R = 4046$ \$/yıl değerini fazladan katedilecek her bir kilometre başına 779 \$/yıl daha artıracaktır. Dolayısıyla, köprünün yıkılması durumunda, trafiğin dağ yoluna yönlendirilmek suretiyle araç işletim ve kayıp zaman maliyetlerinin daha fazla artmaması için, köprü konumuna yakın olan tali yolun sürekli kullanılabilir durumda olması gerekmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, köprülerin oyulmaya bağlı yıllık yıkılma riskinin hesaplanmasını ve oyulma önleyici düzenlemelerin risk üzerinde etkilerini göstermek için Fol Deresi üzerinde bulunan Fol-1 Köprüsü ile örnek bir uygulama yapılmıştır. Hesaplama, FHWA'nın önerdiği risk tahmin modeli ve bu modelin pratik uygulaması için HYRISK yazılımı kullanılmıştır. Köprünün mevcut durumunda, hem taşkın dönemi dışı hem de tasarım ve kontrol taşkın debileri altında yıllık yıkılma riski hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak, Fol-1 Köprüsü oyulmaya karşı kritik çıkmış olup, yıllık yıkılma riski taşkın dönemi haricinde 4,046 \$/yıl, taşkın döneminde ise 50,177 \$/yıl olarak hesaplanmıştır. Yıllık yıkılma riskini azaltmak için akarsu taban ve şev koşullarında ve köprü altyapı elemanlarında iyileştirmeler yapılması gerektiği belirtilmiştir. Akarsu ıslahı ile beraber ayaklar etrafına kısmı harçlı riprap kaplama, harç dolgulu yastık ve taş sandık gibi oyulma önleyici düzenlemeler yapılması durumunda, yıllık yıkılma riski 1,619 \$/yıl'a kadar düşürülebilmektedir.

Kaynaklar

American Association of State Highway and Transportation Officials, (AASHTO). (2007) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 4. baskı. AASHTO, Washington, D.C.

Apaydın, M. (2010) A Study on Risk Assessment of Scour Vulnerable Bridges. Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Bilen, S. V. (1999) Investigation of Design Criteria for River Bank Protection Facilities. Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Briaud, J. L. (2006) Bridge Scour. Geotechnical News, Vol. 24, No. 3.

Briaud, J. L., Gardoni, P. ve Yao, C. (2012) Bridge Scour Risk. Proceedings of the 6th International Conference on Scour and Erosion, Paris.

Brunner, G. W. (2002) HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 3.1. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, California.

Federal Highway Administration (FHWA). (1989) Public Disclosure of National Bridge Inventory (NBI) Data. <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbi/20070517.cfm> adresinden 27.07.2015 tarihinde erişildi.

Johnson, P. A., Gleason, G. L. ve Hey, R. D. (1999) Rapid Assessment of Channel Stability in Vicinity of Road Crossing. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No. 6, 645–651.

Lagasse, P. F., Clopper, P. E., Zevenbergen, L. W. ve Girard, L. W. (2007) Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour. NCHRP Report 593. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Lin, C., Han, J., Bennett, C. ve Parsons, R. (2014) Case History Analysis of Bridge Failures due to Scour. Climatic Effects on Pavement and Geotechnical Infrastructure, 204–216.

Pearson, D., Stein, S. ve Jones, J. S. (2002) HYRISK Methodology and User Guide. Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-02-XXX. Federal Highway Administration, Virginia.

Sevindik, D. (2015) 15 kişinin öldüğü köprü faciası, soruşturma izni verilmeyince kapandı. <http://www.hurriyet.com.tr/gundem/28731460.asp> adresinden 27.07.2015 tarihinde erişildi.

Shirole, A. M. ve Holt, R. C. (1991) Planning for a Comprehensive Bridge Safety Assurance Program. Transportation Research Record, No. 1290, 137-142.

Stein, S. ve Sedmera, K. (2006) Risk-based Management Guidelines for Scour at Bridges with Unknown Foundations. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 24-25 Final Report. Springfield, VA.

Yanmaz, A. M. ve Apaydın, M. (2012) Bridge Scour Risk Assessment and Countermeasure Design. Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 26 No. 4, 499–506.

Yanmaz, A. M., Caner, A. ve Berk, A. (2007) Renovation of a safety-inspection methodology for river bridges. Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 21, No. 5, 382–389.

Yanmaz, A. M. ve Coşkun, F. (1995) Hydrological Aspects of Bridge Design: Case Study. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 121, No. 6, 411–418.