

Köprü Ayakları Etrafındaki Koruyucu Kaplamanın Bilgisayar Destekli Tasarımı

M. Sinan YILDIRIM*

A. Melih YANMAZ**

ÖZ

Akarsu geçişli köprülerde, akım alanı içerisinde kalan köprü ayakları çevresinde gelişen yerel oyulmalar, köprü emniyetini olumsuz etkilemektedir. Özellikle mevcut köprülerde, taban oyulmalarını önlemek için yapılan düzenleme yapılarının nitelikli bir şekilde tasarımı ve uygulanması ile köprülerde meydana gelen hasarların önüne geçmek mümkün olmaktadır. Bu çalışma kapsamında, köprü açıklığındaki oyulmalara karşı literatürde kabul gören kriterlere göre ayaklar etrafına yapılacak çeşitli kaplamaların tasarımı için VB.Net dilinde bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Programın uygulaması için Türkiye'nin Rize ilinde yer alan mevcut bir köprü projesi ele alınmış; akım, taban malzemesi ve yapısal özellikler göz önünde tutularak köprü bölgesindeki olası yatak oyulmaları belirlenmiştir. Elde edilen değerler ışığında çeşitli koruma yapısı seçenekleri arasından yapısal, zemin, hidrolik ve ekonomi gibi etmenleri göz önünde bulunduran bir seçim kriteri yardımı ile kısmi harçlı rıprapın anılan köprü projesi için uygulanabilirliği teyit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Köprü, köprü ayağı, oyulma önleyici düzenleme yapısı, rıprap

ABSTRACT

Computer-Aided Design of Armoring Type Bridge Scour Countermeasures

Local scouring at piers of river bridges affects the bridge safety adversely. Proper design and implementation of scour countermeasures can limit potential bridge failures. This study deals with the description of a computer program developed in VB.Net language to design armoring type bridge scour countermeasures. This program is applied to a bridge located in Rize, Turkey. To this end, flow, bed material, and bridge structural characteristics are defined to determine the maximum depths of scour at bridge elements. Using this information, various alternatives are tested from constructional, geotechnical, hydraulics, and economic feasibility viewpoints. Based on a selection index, partially grouted rıprap is found to be a suitable countermeasure for the cited project.

Keywords: Bridge, pier, scour countermeasure, rıprap.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 30.05.2013 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2014 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane - sinan.yildirim@metu.edu.tr

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

1. GİRİŞ

Köprüler, ulaşırma ağlarının en önemli yapısal elemanları arasında yer almaktadır. Güvenli bir ulaşırma sistemin sağlanması ve böylelikle olası can ve mal kayıplarının önlenmesi açısından, köprülerin emniyetinin tetkik edilmesi çok önemlidir. Akarsu köprülerinin yapısal tasarımları gerçekleştirilirken hidrolik kaynaklı etkenler de mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır [1], [2], [3]. Alüvyon tabanlı akarsular üzerinde inşa edilen köprülerde akarsu yatağında meydana gelebilecek oyulmalar, köprülerin emniyetini olumsuz etkileyen en önemli hidrolik faktörlerin başında gelmektedir. Diğer hidrolik kaynaklı etkenler, taşkınlar esnasında taşınan kaba malzemenin köprü açıklığında birikerek tıkanmaya yol açması ve böylece artan akım hızı etkisiyle oyulma potansiyelinin artması; yüksek akımlarda memba su seviyesinin artarak köprü tabliyesine alttan kaldırma kuvveti uygulaması veya daha da yükselen su seviyesinin tabliyeden savaklanma yaratması; çok fazla daralan akım alanı nedeniyle yersel hidrolik sıçrama oluşma potansiyeli ve akarsu tabanından uzun sürelerle ve fazla miktarda taban malzemesi çekilmesi nedeniyle taban profilinin alçalması ve yakın civardaki köprü veya diğer hidrolik yapıların temellerine olumsuz etki yapması olarak sayılabilir [4]. Ülkemizde pek çok köprüde bu etkenlerin hepsinin bir arada görülebileceği durumlara maalesef rastlanmaktadır.

Genellikle diğer yapılara oranla dış etkenlere daha savunmasız maruz kalma durumunda olan köprülerin tasarımında pek çok belirsizlik vardır. Bu belirsizlikler başlıca hidrolojik, hidrolik, geoteknik, yapısal tasarımlarda ve yapım aşamalarında rastlanan niteliktedir. Belirsizliklerin mertebesinin tam olarak saptanamadığı durumlarda köprülerin hangi seviyedeki riske maruz kaldıkları da bilinmemektedir. Akarsu köprülerinin tasarım aşamasında her köprü için kendi özel koşullarını göz önünde bulundurarak ayrı ayrı belirsizlik ve güvenilirlik analizi yapılması, daha emniyetli ve ekonomik tasarımların gerçekleşmesine olanak sağlayacaktır. Bu konuda daha geniş bilgi için ilgili kaynaklara bakılması önerilmektedir ([5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15]). Tasarımı yeni yapılacak köprülerde yapı-geoteknik-hidrolik etkileşimli yaklaşımlar kullanılarak tasarımdaki belirsizlikler azaltılmalıdır. Diğer taraftan mevcut köprülerde hasara karşı kısmi koruma veya tamir yapılmasının yanı sıra, ayaklar etrafına yersel şartlara uygun bir koruyucu tabaka yapılması önerilmektedir. Böylece mevcut emniyet seviyesi daha yukarı çekilecektir.

Bu makalede akarsu köprülerinin emniyetini artırmayı gözetmek amacıyla ayaklar etrafına yapılacak koruyucu kaplamanın bilgisayar destekli tasarımını gerçekleştiren bir program ve uygulaması sunulacaktır. VB.Net dilinde yazılan CM-Design isimindeki programla [16] ilgili yersel verinin girdi olarak sunulduğu program, bir derecelendirme sistemine bağlı olarak koruyucu kaplama seçeneklerini gözden geçirerek en uygun çözümü sunmaktadır. Programın uygulaması Rize ilinde sahile yakın bir köprü için yapılmaktadır.

2. YEREL OYULMA MEKANİZMASI

Bu bölümde akarsu köprüleri civarında oluşan taban oyulmaları kısaca gözden geçirilmektedir. Daha geniş bilgi için [4] numaralı kaynağa başvurulabilir. Akarsu tabanındaki oyulma, akımın taşıma gücü ile tabandaki malzemenin, mansap yönüne taşınması olarak nitelendirilir. Akarsu tabanında meydana gelen bu olgu, özellikle

köprünün akım alanı içerisinde kalan yapısal elemanlarının çevresindeki taban malzemesinin taşınmasına neden olarak, bu elemanların zemin ile etkileşimini kısıtlayarak yapısal denge problemlerine yol açabilmektedir.

Akarsuda, membadan sürüntü yükü taşınım durumuna bağlı olarak temiz su oyulması veya hareketli taban oyulması oluşmaktadır. Temel olarak akarsularda meydana gelen oyulmalar daralma oyulması, yerel oyulma ve uzun dönemli taban oyulması olarak üç ana başlık altında incelenebilmektedir. Bu oyulma tiplerinden daralma oyulması, akarsu kesitinin daralması sonucu artan yersel akım hızıyla bağıntılı olarak akarsu tabanındaki malzemenin mansap yönünde taşınması olarak tanımlanır. Taşınan bu malzeme genellikle akım şiddetinin azaldığı kesit genişleme bölgelerinde birikme eğilimi göstermektedir. Daralma oyulması özellikle akarsu akım alanının daraldığı köprü kesitlerinde kritik bir rol oynayarak köprü güvenliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Yerel oyulma, akım alanındaki ayaklar etrafında oluşan çevrıntiler nedeniyle meydana gelmektedir. Akım boyunca nispeten düz bir çizgide ilerleyen akımın akış çizgisi, köprü ayakları çevresinde değişime uğrayarak ayağın memba yüzünde oluşan durgunluk basınç düzlemiyle karşılaşır. Yüzeyden tabana doğru etkisini azaltan durgunluk basıncı nedeniyle ayağın memba yüzünde bir düşey akım oluşur. Bu akım, ayağın memba tarafındaki tabanı oyma eğilimindedir. Düşey akım, yaklaşım akımıyla birleşerek bir çevrinti oluşmasına neden olur. Bu çevrinti, at-nalı çevrintisi ismini almaktadır. Çevrinti etkisiyle tabandan sökülen gevşek malzeme akımla mansaba taşınır ve böylece oyulma çukuru genişlemeye ve derinleşmeye başlar. Ayağın arka tarafında ise kayma gerilmesi değişimlerinden oluşan kuyruk çevrıntıleri, at nalı çevrıntiler kadar etkili olmamakla birlikte oyulma mekanizmasında benzer rol oynamaktadır. Oyulma çukuru belli bir büyüklüğe ulaştıkça çukur içindeki kayma gerilmelerinin etkisi azalmaya başlar. Çukurdaki kayma gerilmesi mertebesinin çukurdaki gevşek malzemeyi harekete geçirecek kritik kayma gerilmesi seviyesinin de altına inmesiyle oyulma çukurunun hacmi sabit kalmakta ve denge durumuna erişilmektedir. Membadan sürüntü yükü gelmeyen temiz su oyulması halinde dengeli duruma oldukça uzun bir sürede ulaşılır. Hareketli taban durumunda ise maksimum oyulma derinliği dengeli oyulma derinliği etrafında salınım gösterir [4], [17]. Yeterince derine inilmemiş köprü temellerinde büyük oyulma çukurları oluştuğunda ayak etrafındaki toprak direnci kaybolacağından köprü çökme ve yıkılma eğiliminde olmaktadır. Köprülerdeki yerel oyulma mekanizması hakkında daha geniş bilgi için [4] ve [17] numaralı kaynaklara başvurulabilir.

Köprü ayaklarındaki oyulmanın karmaşık mekanizması yüzünden literatürde oyulma derinliğini çeşitli parametreler ile ilişkilendiren çok sayıda ampirik ve daha az sayıda yarı-ampirik çalışma mevcuttur [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]. Köprü kenar ayakları için de benzer şekilde bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir (Bkz. [4], [17]). Bu çalışmada, köprü ayakları için oyulma derinliğini mümkün olduğunca önemli parametrelerle ifade eden ve geniş veri ile kalibre edilmiş olan bir ifade kullanılmaktadır. Bu bağlamda, temiz su ve hareketli taban koşulları için önerilen ve literatürde Colorado State University (CSU) denklemi olarak da bilinen Richardson ve Davis [32] yöntemi tercih edilmektedir.

$$\frac{d_s}{b} = 2.0K_s K_\alpha K_b K_z \left(\frac{d_0}{b} \right)^{0.35} F_r^{0.43} \quad (1)$$

Burada d_s ayak etrafındaki maksimum oyulma derinliği, b akıma dik yöndeki ayak genişliği, K_s ayak burun şekli için düzeltme faktörü (uçları yuvarlatılmış ayaklar için 1.0, küt burunlu ayaklar için 1.1), K_a yaklaşım akımının ayak aksıyla yaptığı açığa göre düzeltme faktörü, K_b akarsu tabanında oluşan taban şekillerinin direnç etkisini gösteren katsayı, K_z akarsu tabanındaki dane dağılımı nedeniyle olası zırhlama etkisi için düzeltme faktörü, d_0 =yaklaşım akım derinliği ve F_r yaklaşım akımının Froude sayısıdır. Denklem (2) hakkında ayrıntılı bilgi için [32] numaralı kaynağa başvurulabilir.

3. OYULMA ÖNLEYİCİ KAPLAMA ELEMANLARI

Köprü alt yapı elemanlarının, akarsu yatağındaki oyulmaların etkisinden korunması amacıyla çeşitli düzenleme elemanları geliştirilmiştir. Bunlar, membada yatak üzerine konuşlandırılan ve akımı saptırmayı ve dolayısıyla köprü ayağına yaklaşan hız bileşenini azaltmayı hedefleyen memba plakaları veya küçük memba kazık grupları; bizzat ayak üzerine yerleştirilen disk veya ayakta boşluk oluşturulması; veya tabanda ayaklar etrafına yerleştirilen koruyucu kaplamalardır. Membada ve ayak üzerinde önerilen düzenlemeler henüz deneysel inceleme aşamasındadır. Bazıları sadece hidrolik açıdan bir değere sahip olup, yapısal tasarımları uygun değildir. Örneğin köprü ayağı içinde belli uzunluk ve genişlikte bir boşluk bırakılmasıyla memba yüzündeki düşey akımın etkisi azaltılmakta ve böylece oyulma olayı kontrol altına alınmaktadır. Ancak bu düzenleme, ayağın taşıma gücünü azalttığı için yapısal açıdan uygun görülmemektedir. Bu çalışmada, dünya ölçeğinde daha yaygın olarak kullanılan ve akarsu taban malzemesini akımın oluşturduğu aşındırıcı kuvvetlere karşı korumayı amaçlayan koruyucu kaplama tasarımı üzerinde durulmaktadır. Bu bağlamda, riprap, kısmi harçlı riprap ve geçmeli beton blokların tasarım kriterleri, son çalışmaları kapsayacak şekilde gözden geçirilmektedir. Ülkemizde bilhassa taşkınlar sonrasında bazı köprü ayakları etrafına su kotunun da üzerine kadar çıkılarak riprap döküldüğü gözlenmektedir. Ancak belli bir kritere göre yapılmadığı düşünülen bu uygulamayla ayaklar etrafındaki akımın türbülans etkisi daha da artmakta ve dökülen taşların dengesi bozulmaktadır. Bu nedenle, sunulan makalenin bir amacı da pratik uygulamada dikkat edilmesi gereken hususları irdelemektir.

Uygun boyutlardaki taşların köprü ayakları çevresine yerleştirilmesiyle uygulaması yapılan riprap, özellikle civarda uygun bir taş ocağı olması halinde temin kolaylığı, akarsu tabanındaki değişimlere uyum sağlaması ve uygulama sonrası bakım kolaylığı gibi etmenler nedeniyle oldukça sık kullanılan bir oyulma önleyici koruma yapısıdır. Riprapın oyulmaları önleme üzerindeki etkinliğine birçok araştırmada dikkat çekilmektedir [17], [33]. Bununla birlikte bazı uygulamalarda riprap ve diğer alternatif oyulma önleyici çözümlerin ortak kullanımına da rastlanmaktadır [34]. Riprap tasarımı kapsamında temel olarak riprap taşlarının boyutunun belirlenmesi amaçlanmaktadır. Taban seviyesinde bulunan bir riprapı harekete geçirmeye çalışan dinamik sürüklenme ve kaldırma kuvvetleriyle taşın hareketine karşı direnç gösteren su altındaki ağırlığı göz önünde bulundurularak yapılan denge analizi sonucunda riprap büyüklüğünün yaklaşım akım hızının karesiyle değiştiği ispat edilebilir. Bu şekilde ifade edilen pek çok bağıntı çıkarılmıştır [17]. Bu çalışmada kullanımı pratik olan ve emniyetli sonuçlar veren Isbach bağıntısı [35] kullanılmıştır. Bu bağıntıda riprap medyan çapı (D_{r50}) şöyle bulunmaktadır:

$$D_{r50} = \frac{0.692(Ku)^2}{2g\Delta} \quad (2)$$

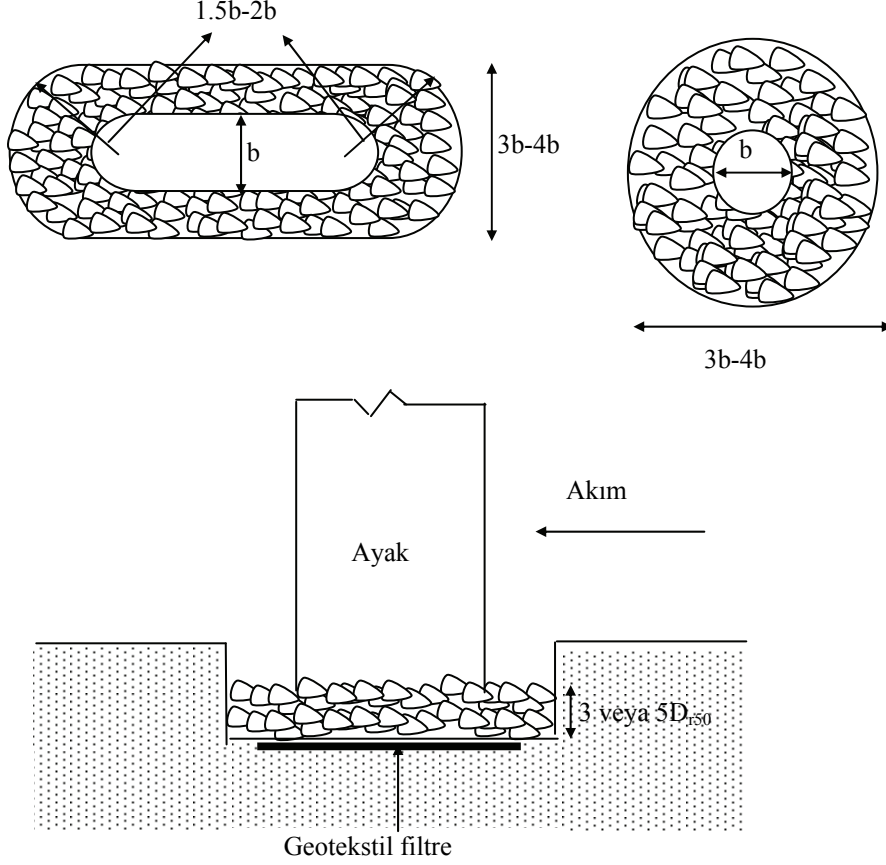
Burada u köprü ayağı membaidaki maksimum hız, K ayak şekil faktörü, g yerçekimi ivmesi ve Δ görelî yoğunluktur. Riprap uygulamasında, taşların birbirleri ile sıkı bir şekilde kenetlenmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla kullanılan taşların belli bir dane dağılımına sahip olması arzu edilmektedir. Çizelge 1’ de Denklem (2) ile belirlenen riprap medyan boyutu (D_{r50}) yardımı ile seçimi yapılan riprap dane dağılımı sınıfları gösterilmektedir.

Çizelge 1. Riprap uygulaması için tavsiye edilen dane dağılımı sınıfları [36]

Sınıf	D_r	D_{r100}	D_{r15}	D_{r15}	D_{r50}	D_{r50}	D_{r85}	D_{r85}
	(cm)	(mak)	(min)	(mak)	(min)	(mak)	(min)	(mak)
I	15.2	30.5	9.4	13.2	14.5	17.5	19.8	23.4
II	22.9	45.7	14.0	19.8	21.6	26.7	29.2	35.6
III	30.5	61.0	18.5	26.7	29.2	35.6	39.4	47.0
IV	38.1	76.2	23.4	33.0	36.8	44.5	49.5	58.4
V	45.7	91.4	27.9	39.4	43.2	52.1	59.7	69.9
VI	53.3	106.7	33.0	47.0	50.8	61.0	69.9	82.6
VII	61.0	121.9	36.8	53.3	58.4	69.9	78.7	94.0
VIII	76.2	152.4	47.0	66.0	72.4	87.6	99.1	116.8
IX	91.4	182.9	55.9	80.0	86.4	105.4	119.4	141.0
X	106.7	213.4	64.8	92.7	101.6	123.2	138.4	163.8

Riprap uygulamasında önerilen riprap katman kalınlığı, akarsuyun akım koşullarına göre $3D_{r50}$ ve $5D_{r50}$ arasında seçilebilmektedir. Şekil 1’de tipik bir köprü ayağı etrafındaki riprap uygulama detayı görülmektedir [17, 36]. Kaplanan riprap tabakasının taban seviyesindeki türbülans etkisini artırmaması için üst kotunun akarsu talveg kotunu geçmemesi gerekmektedir. Riprap uygulamasının altındaki ince toprağın erozyonu sonucunda koruyucu tabakada oturma oluşmasının önlenmesi amacıyla uygulama katmanının altına kum-çakıl veya geosentetik bir filtre tabakası yerleştirilmelidir [36].

Yeterli büyüklükte riprap elde edilememesi veya pahalı olması durumunda daha küçük boyutta riprap kullanılarak aralarındaki boşluğun kısmen harçla doldurulması literatürde rastlanan son uygulamalardan birisidir. Bu uygulamaya kısmi harçlı riprap (KHR) denilmektedir [36]. Ülkemizde henüz uygulaması olmayan bu tasarımda riprap taşlarının arasındaki boşluğun kısmi oranda (boşluk hacminin yaklaşık %50 si) beton harcı ile doldurulmasıyla yarı esnek ve dengeli bir eleman elde edilerek normal riprapa kıyasla daha küçük taşların kullanılmasının önü açılmaktadır. Bu şekilde, uygulamadaki riprap kalınlığının önemli ölçüde azaltılması sağlanıp daha ekonomik bir tasarım elde edilebilmektedir. Yanmaz ve Apaydın [37] ile Yanmaz ve Çam [38] bu uygulamanın yapılabilirliğini ve ekonomik şartlarını ülkemizdeki bazı mevcut köprü projelerinde

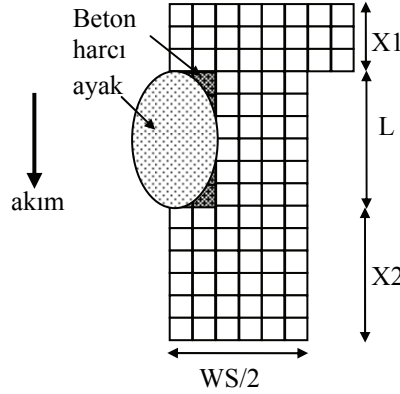


Şekil 1. Köprü ayağı etrafındaki riprap uygulama detayı [17, 36]

denemişler ve ekonomik sonuçlar elde etmişlerdir. KHR uygulamasında, Çizelge 1'deki II, III ve IV nolu riprap sınıflarının kullanılması önerilmektedir [36]. Zira I nolu riprap sınıfının kullanılması ile yapılan uygulamalarda beton harcının, taşların boşluklarında yeterli derinliğe ulaşması zorlaşarak dengeli bir yapının sağlanması güçleşmekte; büyük riprap sınıflarında ise taşlar arasındaki boşlukların harçla doldurulması tam olarak gerçekleşmemekte ve harcın bağlayıcı özelliği etkisiz kalmaktadır. Böylece her iki uç durumda da taşkın sırasında meydana gelen yüksek debi geçişlerinde taşlar yerlerinden sökülerek akarsu akımı ile taşınmakta ve koruma yapısının etkinliği azalmaktadır. KHR uygulamasında kullanılacak riprap sınıfının seçiminde herhangi bir bağıntı bulunmamakla birlikte aynı uygulamada öngörülen riprap sınıfından daha küçük bir sınıf seçilerek beton harcının bağlayıcılık katkısı ile daha ekonomik bir oyulma önleyici çözüme ulaşılabilmektedir. Tipik bir KHR uygulamasında Şekil 1'de sunulan detaydaki 5b kaplama mesafesi 4b, önerilen riprap katman kalınlığı ise akarsuyun akım koşullarına göre $2D_{r50}$ ve $4D_{r50}$ arasında seçilebilmektedir. Böylece taş büyüklüğü, tabaka kalınlığı ve kaplama

yüzey alanı riprap uygulamasına göre daha düşük tutulmakta ve daha ekonomik çözüm elde dilmektedir. Riprap uygulamasında olduğu gibi, KHR kaplamasının altına uygun bir filtre tabakasının yerleştirilmesi önerilmektedir [36]. KHR, diğer seçeneklere göre ekonomik olmasına rağmen, etkinlik derecesi uygulamanın başarısına bağlıdır. Özellikle beton harcının uygun bir şekilde enjeksiyonu optimum bir KHR performansı için oldukça önemli olmakla birlikte, uygulamada taşlar arasındaki boşluğun büyük oranda doldurulması sonucu oldukça rijit ve geçirgenliği az bir koruma yapısı ortaya çıkabilmekte, bu da KHR'nin oyulma önleyici performansını olumsuz yönde etkilemektedir [39].

Uygun şekilde boyutlandırılmış beton blokların birbirlerine kablolar ile bağlanmasıyla oluşturulan Geçmeli Beton Blok (GBB) sistemi, akımın akarsu tabanındaki aşındırıcı karakterine karşı zırh etkisi oluşturarak oyulmayı önlemeyi amaçlamaktadır. Ülkemizde henüz uygulaması olmayan ve riprap kaplamaya göre nispeten daha pahalı bir oyulma önleyici düzenleme olan GBB, akarsu tabanındaki değişimlere iyi şekilde uyum gösterebilmektedir. Genellikle kanal cidarlarının ve şevlerinin korunması amacıyla uygulaması yapılan GBB'nin, köprü ayak oyulmalarına karşı kullanımı literatürde oldukça az sayıdadır. GBB sisteminde, filtrasyon işlevinin sağlanması amacıyla beton plakların altında geotekstil malzeme ve yaklaşık bir metre kalınlığında bir granüler filtre katmanının kullanılması önerilmektedir [36]. Uygulama aşamasında ayakla GBB arasında boşluk kalmaması için beton harcı kullanılmaktadır. Ancak bu işlemin maliyeti ekonomik analizlerde ihmal edilecek düzeydedir [40]. GBB tasarımında koruma alanının boyutları, sistemin oyulma önleyici performansı açısından oldukça önemlidir. GBB uygulaması için Şekil 2'de görüldüğü şekilde bir koruma alanı boyutlandırılması önerilmiştir [35]. Bu koruma alanının tasarım detayları $WS=2.5d_s+b$; $X1=1.25d_s$ ve $X2=3d_s$ olarak önerilmektedir.



Şekil 2. GBB uygulaması için koruma alanı boyutları [35]

Bir sonraki bölümde tanıtılan "CM-Design" programı GBB uygulamasında beton blokların denge analizini de yapmaktadır. Ayrıca bu çalışmada ele alınmayan kafes tel koruma da (gabyon) program uygulamaları arasında yer almaktadır [16].

Bir köprü projesi için uygun oyulma önleyici düzenleme yapısının seçimi bazı bilinmezlikler nedeniyle zordur. Bu açıdan, sadece uygulama maliyeti esas alınarak yapılan seçimlerde birçok etmen göz ardı edilmekte ve sağlıklı bir düzenleme yapısı seçimi yapılamamaktadır. Johnson ve Niezgoda [41] en uygun oyulma önleyici düzenleme yapısının seçilmesinde risk tabanlı bir seçim yöntemi önermişlerdir. Lagasse ve diğerleri [36] ise ayrıca fiziki ömür çevrim maliyetini de hesaba katarak akarsu özellikleri, uygulama sonrası bakım, performans, proje inşasındaki zorluklar gibi etmenleri de içeren bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde, her oyulma önleyici düzenleme seçeneği için hesaplanan bir seçme indisi önerilmiş ve en uygun seçeneğin en büyük seçme indisine (SI) sahip seçenek olması esas alınmıştır. Seçme indisi (SI) şu ifadeden bulunmaktadır [36]:

$$SI = \frac{S1 \times S2 \times S3 \times S4}{LCC} \quad (3)$$

Burada S1, S2, S3, S4 sırasıyla taban malzeme büyüklüğü ve taşınım özelliği, akarsuda kaba malzeme ve buz taşınması özelliği, yapım ve uygulama kısıtlamaları ile bakım-onarım şartlarına bağlı derecelendirme faktörleri; LCC ise projenin fiziki ömür çevrim maliyetidir. S1 ile S4 arasındaki derecelendirme puanları 0 (en zayıf) ile 5 (en iyi) arasında değişmektedir. Bu puanlarla ilgili detaylı bilgi [36] numaralı kaynakta sunulmaktadır. Çam, önerdiği bir uygulama projesinde LCC için projenin yıllık toplam maliyetini kullanmıştır [42]. Bu maliyetin belirlenmesinde ülkemiz uygulamalarına göre 50 yıllık proje ömrü ve %10 faiz oranı kullanılmıştır. Yıllık maliyetin belirlenmesinde riprap, KHR ve GBB için yıllık bakım ve amortisman giderleri toplam proje uygulama maliyetinin sırasıyla %0.3, %0.2 ve %0.1'i olarak alınmıştır [40].

Uygun bir oyulma düzenleme yapısının seçiminde, yapının tasarım parametrelerini belirleyen en önemli unsur olan tasarım debisi havza hidrolojik rejimine, köprünün konumuna ve özelliklerine göre değişim gösterebilir. Tali yolları geçen köprülerde 50 yıl mertebesinde olan bu değer, ana yollardaki köprüler için şartlara göre 100 ile 500 yıl arasında seçilebilir [4], [43]. Tasarımda maliyet ve emniyet arasındaki ilişkiyi incelemek için çeşitli taşkın dönüş aralıklı debilerle yapılan tasarımlara dayanan bir hassasiyet analizi sonucunda en uygun düzenleme yapısı çözümü bulunabilmektedir. Bu makalede bu yaklaşım izlenmiştir. Daha hassas bir yaklaşım ise, her köprünün kendine özgü yersel koşullarına göre hidro-ekonomik analizle saptanan optimum dönüş aralığının belirlenmesidir [44]. Ancak bu yöntemde, köprüdeki hasardan etkilenen civardaki tüm yapı ve kullanımların taşkın risk haritalarına dayanarak detaylı yıllık hasarlarının tespit edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla böyle bir analizin hassasiyeti, temini bazen mümkün olmayan verinin güvenilirliğine bağlıdır.

4. CM-DESIGN PROGRAMI

Bu makalede sunulan kaplama tasarımlarını gerçekleştirmek için VB.Net dilinde CM-Design isimli, kullanımı kolay ve kullanıcıyı yönlendirici bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım Windows işletim sisteminin çeşitli versiyonlarında çalışmaktadır. Bu yazılımın iki farklı ara yüzü bulunmaktadır. İlk ara yüzde riprap, KHR, gabyon kaplama ve GBB seçenekleri için tasarım opsiyonları bulunmakta; kullanıcı ilgili tuşa bastığında o tasarım

için gerekli girdi parametreleri sırayla tanımlanmaktadır. Daha sonra seçilen tasarımın çıktı parametreleri ekranda görünmektedir. Bu işlemin çalışılan tüm seçenekler için tekrar edilmesi durumunda seçme indisi değerleri de ayrıca hesaplanabilmektedir. Yazılımın ikinci ara yüzünde, gerçekleştirilen bu hesaplar için S1 ve S4 arasındaki faktörlerle bakım, onarım birim fiyatları girdi olarak yazılıma tanıtılmakta ve sonuçta seçme indisi değerleri çıktı olarak verilmektedir. Kullanıcı, en büyük SI değerini veren seçeneği, yersel şartlar ve ülke pratik uygulamaları vb. hususları da göz önünde bulundurarak seçmektedir.

5. UYGULAMA

Bu çalışma kapsamında, uygulama örneği için Türkiye'nin Rize ilinde yer alan Taşlıdere Çayı üzerinde denize yaklaşık 300 m mesafede bulunan çift karayolu köprüsü seçilmiştir. Önemli ölçüde trafik yüküne sahip olan köprü'nün mansap ve mambadan çekilmiş görünümü Şekil 3'te gösterilmektedir. Söz konusu çalışma sahası, Türkiye'nin Doğu Karadeniz bölgesinde yer aldığı için bölgeye özgü topoğrafik ve hidro-meteorolojik özellikleri yansıtmakta, bölgede önemli taşkınlar görülebilmektedir. Bölgenin yerel karakteristik özellikleriyle beraber, akarsuların çevresindeki hatalı arazi kullanım uygulamaları neticesinde akarsu kesitlerinin genel anlamda daraldığı gözlenmekte, özellikle nehir taşkın yatağının taşkın koruma duvarları ile daraltıldığı dikkate alındığında taşkın sırasında köprü kesitinde nispeten yüksek akım hızları beklenmektedir. Ayrıca yapılan kum çekimi gibi hafriyat çalışmaları nedeniyle akarsuyun dengesi bozulmakta ve taban seviyesi alçalma problemleri yaşanmaktadır [45]. Bu nedenlerle seçilen köprü için ayaklar etrafına koruma projesi geliştirilmesi önemli bir husustur.



(a)

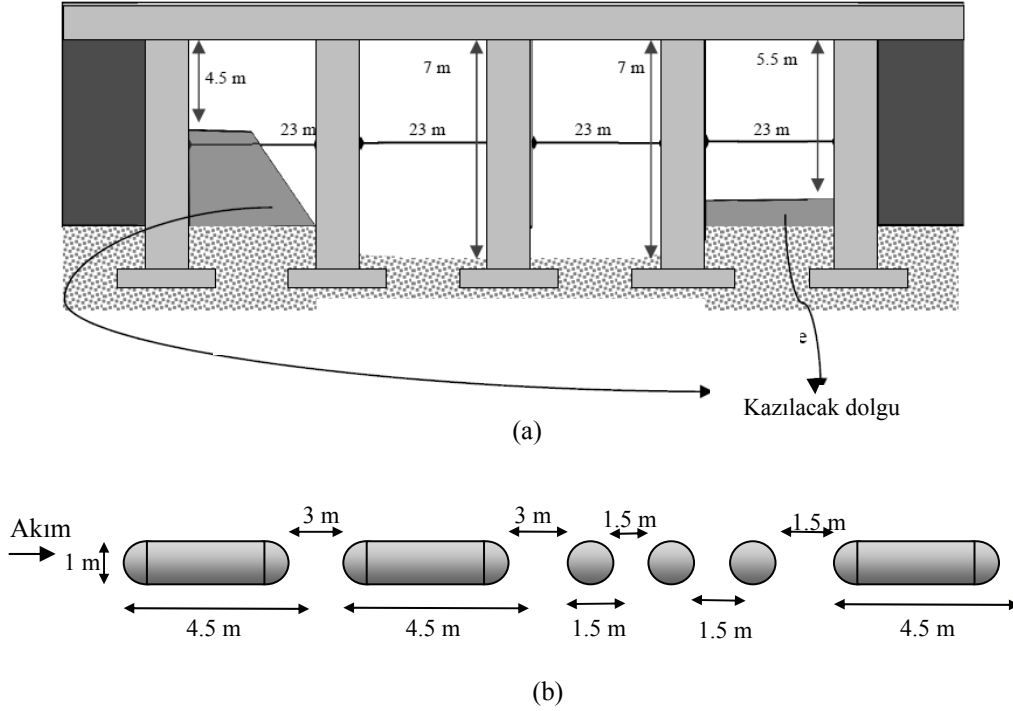
(b)

Şekil 3. Köprü çevresinden görünüm: (a) mamba, (b) mansap

Bu çalışmada köprü ayakları için oyulma önleyici yapı tasarımı, köprü'nün akım alanı içinde kalan sağ orta ve sol olarak nitelendirilen aksları üzerindeki ayakları için uygulanmıştır. Her aks boyunca birbirine benzer karakterde 6 adet köprü ayağı bulunmakla beraber, bu ayaklardan 3 tanesi 1.5 m çapında dairesel ayaktır. Yersel inceleme sonucunda

Köprü Ayakları Etrafındaki Koruyucu Kaplamanın Bilgisayar Destekli Tasarımı

aksların akarsu akımıyla paralel olduğu görülmüştür. Akıma paralel olarak konumlandırılan köprü ayaklarının uzunluğunun, oyulma derinliği üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu kabul edilmektedir [46]. Ayrıca akıma engel teşkil eden en önemli ayak, akım yönündeki ilk ayak olduğu için, köprü ayaklarının hidrolik modelinde ardışık ayaklar yerine 28.5 m boyunda ve 1.0 m eninde tek bir köprü ayağı kullanılmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi ayak uzunluğu olarak kabul edilen 28.5 m, oyulma hesabında kullanılmamış; ancak koruyucu kaplama tasarımında değerlendirilmiştir. Köprü ayaklarının kesit ve plan görünümü şematik olarak Şekil 4'te temsil edilmektedir. Köprü kesiti incelendiğinde, özellikle sağ ve sol akslar üzerindeki köprü ayakları ile akarsu cidarları arasındaki bölgenin rüsubat ve hafriyat artıkları ile dolmuş olduğu görülmektedir. Söz konusu hafriyat çalışması ile bu bölgenin boşaltılarak akım alanının genişletilmesi amaçlanmıştır. Söz konusu hafriyat maliyeti her oyulma önleyici düzenleme yapısı için sabit kabul edileceğinden ekonomik analizde göz önüne alınmamıştır.



Şekil 4. Köprü ayaklarının şematik görünümü: (a) kesit (b) plan

Söz konusu havzanın, gerekli hidro-meteorolojik çalışmaları Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nce yapılmıştır. Bu bağlamda, 1/25000 ölçekli bölgesel harita kullanılarak havza toplam drenaj alanı 327 km² olarak belirlenmiş ve ayrıca çalışılan en-kesit geometrik özellikleri saptanmıştır. Yine aynı kurumun gerçekleştirdiği frekans analizi sonuçlarına göre 100, 500 ve 1000 yıllık dönüş aralıklı taşkınların pik debileri sırasıyla 750.3 m³/s, 970

m^3/s ve $1064 m^3/s$ olarak bulunmuştur. Akarsuyun modelleme çalışması çerçevesinde 12 adet akarsu en-kesiti kullanılmıştır. Çalışılan akarsu diliminde plandaki görünümün çok düz olması ve akımların ana yatakta kalması nedeniyle su yüzü profillerinin hesabında tek boyutlu modeller emniyetli olarak kullanılabilir. Bu bağlamda analizlerde yukarıda verilen debiler kullanılarak HEC-RAS yazılımı uygulanmıştır [47]. Akarsuyun taban malzemesi özelliklerini belirlemek için, her kesit ve köprü ayakları çevresinden taban malzemesi örnekleri alınmıştır. Yapılan elek analizleri sonucunda çalışılan bölgeyi temsil edecek taban malzemesinin %50 sinin ve %95 inin geçtiği elek çapları sırasıyla 0.32 cm ve 6.5 cm olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlardan görüleceği gibi tabanda ince ve kaba çakıl arasında geniş dağılımlı olarak değişen gevşek malzeme bulunmaktadır. Bu nedenle akarsu tabanında zırhlanma etkisi olduğu düşünülmüş ve ayaklar etrafındaki oyulma derinliği hesabında bu husus göz önünde bulundurulmuştur.

Model çerçevesinde akarsu kesitleri için Manning pürüzlülük katsayıları, Chow [48] tarafından önerilen yöntemle dayanılarak ana kanal ve taşkın yatakları için sırasıyla 0.065 ve 0.07 olarak belirlenmiştir. Kurulan model, kararlı akarsu rejiminde 100, 500 ve 1000 yıllık dönüş aralıklı pik debiler için çalıştırılarak model çıktıları olan köprü ayakları çevresindeki akım hızı ve derinliği gibi parametreler belirlenmiştir. Köprü ayakları çevresindeki olası oyulma derinlikleri, yine bu parametreler yardımıyla, CSU metodu ile tüm akslar üzerindeki köprü ayakları için hesaplanmıştır. Bu aşamada akarsu tabanının hareketli olduğu belirlenerek akarsu tabanındaki zırhlanma olgusu ile birlikte hesaplamada dikkate alınmıştır. Sol, orta ve sağ ayaklar çevresinde oluşabilecek maksimum oyulma derinlikleri 100 yıl dönüş aralıklı debi için sırasıyla 2.42 m, 2.44 m ve 2.00 m olarak belirlenmiştir.

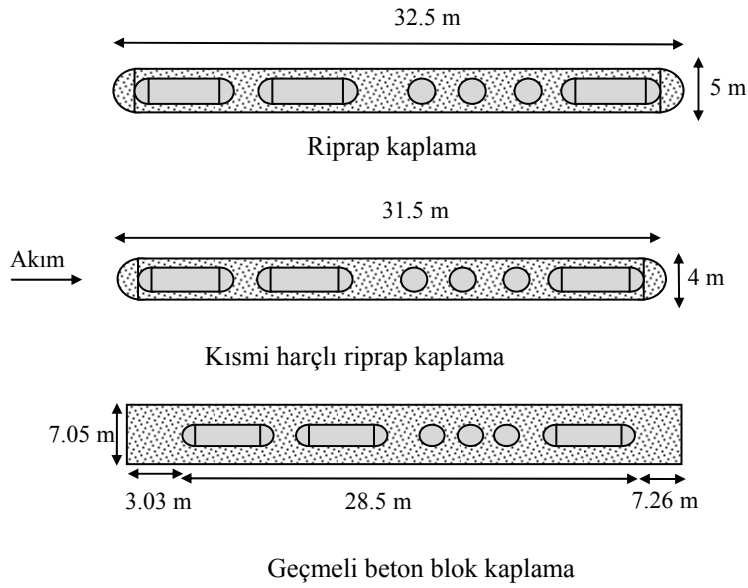
6. BULGULAR

Bulunan oyulma derinlikleri ve diğer model parametreleri yardımıyla riprap ve KHR için ön tasarımlar yapılarak uygulama maliyetleri bulunmuştur. Bu seviyede, GBB sistemi daha önce de bahsedildiği gibi köprü ayak oyulmalarına karşı sıklıkla kullanılmamasına rağmen, maliyet karşılaştırma amacı ile çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Bahsedilen oyulma önleyici yapıların ön tasarım evresinde, her seçenek için koruma alanının en, boy ve uygulama derinliği gibi tasarım detayları daha önce sunulan kriterlere göre belirlenerek uygulama maliyet kalemleri hesaplanmıştır. 100 yıl dönüş aralıklı taşkın için yapılan çalışma kapsamında değerlendirilen oyulma önleyici düzenleme yapılarının plandaki ön tasarım detayları Şekil 5'te görülmektedir.

100 yıl dönüş aralıklı taşkın debisi göz önüne alınarak tasarlanan koruyucu kaplama yapıları için toplam uygulama maliyetleri 2012 yılının inşaat birim fiyatlarına göre hesaplanmıştır. Bu analizlerin yapıldığı sırada 1 Amerikan doları 1.8 TL değerindedir. Hesaplama kapsamında değerlendirilen maliyet kalemleri, riprap ve GBB maliyetleri, yatak malzemesinin kazılması, hafriyat sonucu çıkan malzemelerin taşınması, beton harç ve filtre maliyetleridir. Hesaplamalar sonucunda, projelerin toplam uygulama maliyetleri riprap, KHR ve GBB için sırasıyla 31570 TL, 15285 TL ve 58620 TL olarak bulunmuştur. Toplam uygulama maliyeti içindeki her maliyet kaleminin hesap detayları Yıldırım tarafından sunulmaktadır [16]. Kazı maliyetleri, toplam inşaat maliyetleri içerisinde önemli bir yer teşkil etmektedir. Ancak bu maliyet kaleminin özellikle KHR için riprapa oranla oldukça küçük olduğu gözlenmiştir [16]. Riprapa kıyasla daha küçük bir uygulama alanı ile

Köprü Ayakları Etrafındaki Koruyucu Kaplamanın Bilgisayar Destekli Tasarımı

tasarlanan KHR, aynı zamanda daha küçük riprap sınıfı kullanılarak tasarlanmakta; bu sayede riprap kalınlığı azalmaktadır. Sonuç olarak, kazı ve dolayısıyla hafriyat taşıma maliyetlerinin KHR için oldukça düşük olduğu gözlenmektedir. GBB sistemi, gerek GBB blok maliyetinin oldukça yüksek olması gerekse uygulama alanının genişliği nedeniyle seçenekler arasında yüksek uygulama maliyetiyle ön plana çıkmaktadır. Proje için en uygun oyulma düzenleyici yapının belirlenmesi amacıyla, her seçenek için seçim indisi belirlenmiştir. Sınanan seçeneklerde yıllık LCC değerleri riprap, KHR ve GBB için sırasıyla 3280 TL, 1588 TL, 6090 TL olarak hesaplanmıştır. Seçeneklerde kullanılan seçim indisinde yersel şartlara göre kabul değerler Çizelge 2’de sunulmaktadır.



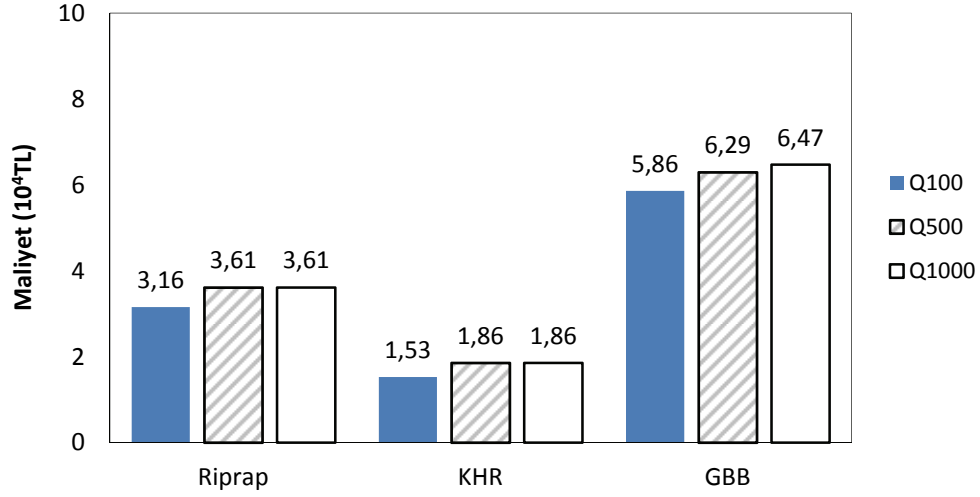
Şekil 5. 100 yıl dönüş aralıklı debi için oyulma önleyici düzenleme yapıları ön tasarım detayları

Çizelge 2. Seçim indisinde kabul edilen değerler

Seçenek	S1	S2	S3	S4	LCC (TL/yıl)
Riprap	5	3	5	5	3280
KHR	5	4	5	4	1588
GBB	4	4	5	3	6090

Her oyulma düzenleme yapısı için seçim indisinin belirlenmesi kapsamında çeşitli değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmelerde sırasıyla, akarsu yatak malzemesi kaba malzeme olarak belirlenmiş ve akarsu yatağında kum dalgacıklarının oluşabileceği

öngörülmüştür. Akarsu ile birlikte sürüklenen kaba sürüntü malzeme oranının ülkemizdeki diğer havzalara oranla daha fazla olduğu kabul edilmiştir. Zira Doğu Karadeniz bölgesi akarsularında, özellikle taşkınlarda çok fazla miktarda ve değişen boyutlarda malzeme taşınmaktadır. Kaplama uygulamasının özellikle akarsu akımının az olduğu yaz aylarında yapılması öngörülmüştür. Uygulama alanına malzeme ve ekipman erişiminin köprünün yerleşim merkezine yakın olması sebebiyle kolay olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımlar kapsamında hesaplanan seçim indisleri riprap, KHR ve GBB için sırasıyla 0.114, 0.252 ve 0.039 olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda en uygun oyulma önleyici düzenleme yapısı, en yüksek seçim indisine sahip olan KHR olarak öne çıkmıştır. Ancak maliyeti düşük olmakla birlikte KHR uygulaması esnasında gerekli özenin gösterilmesiyle arzu edilen kaplama davranışının bekleneceği vurgulanmalıdır.



Şekil 6. Farklı dönüş aralıklı taşkınlar için tasarlanan seçeneklerin uygulama maliyetleri

Daha önce de belirtildiği gibi Doğu Karadeniz bölgesi akarsularında büyük taşkın geçişlerinin yaşanması nedeniyle, bu çalışmada farklı dönüş aralıklı taşkınları değerlendirme kapsamında bir hassasiyet analizi yapılmıştır. Bu bağlamda, 100, 500 ve 1000 yıl dönüş aralıklı taşkınlar değerlendirilerek, ölçek ekonomisine göre seçim yapılması amaçlanmıştır. Bahsedilen taşkın dönüş aralıklarına göre tasarlanan koruyucu kaplama yapılarının maliyetleri Şekil 6'da gösterilmektedir. Bu şekil incelendiğinde, riprap ve KHR uygulamaları için 500 ve 1000 yıllık taşkın debileri ile yapılan tasarımların uygulama maliyetlerinin aynı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, köprü civarında akarsu enkesitinin nispeten geniş olmasıdır. Köprü bölgesinde yaklaşık 100 m civarında olan akarsu genişliği, büyük bir akım alanına sebep olmakta, 500 ve 1000 yıllık taşkın geçişlerinde akım hızı oldukça az değişmektedir. Bu nedenle, 500 ve 1000 yıllık tasarım debisi için aynı riprap sınıfı (Sınıf IV) seçilmekte ve aynı uygulama maliyetleri elde edilmektedir. Bu analizlerde sağ ve sol akslarla cidarlar arasında kalan bölgede biriken rüsubatın yerinden kaldırılacağı kabul edilmiştir. Yüksek dönüş aralıklı akımlarda (örneğin 500 ve 1000 yıllık)

membada ve ayaklar arasında hareketli tabanlı akım koşullarının oluşması beklenebilir. Bu durumda kullanılan modelin, katı madde taşınımı ve türbülans modüllerini de içeren daha hassas bir yazılımla kurulması gerekebilir. Yine şekilde görüldüğü üzere, GBB tasarımında koruma alanının köprü ayaklarındaki beklenen oyulma derinliği ile ilişkili olmasından dolayı, tasarımın detaylarının ve dolayısıyla proje uygulama maliyetinin debi değişimlerine karşı daha hassas olduğu gözlenmektedir. Ancak uygulama maliyeti KHR uygulamasına göre üç kattan daha fazladır.

7. TARTIŞMA

Makalenin bu bölümünde derecelendirme sistemine dayanan seçim kriteri tartışılmaktadır. Literatürde sunulan ayaklar etrafında uygulanabilecek kaplama projeleri için önerilen malzeme büyüklüğü ve kaplama alanı ayaklar etrafındaki oyulmayı durduracak şartlara göre tespit edilmiştir. Böylece her kaplama detayı kendi içinde emniyetli olup, kullanılan malzeme miktarı ve işçilik değiştiği için maliyetleri farklı olmaktadır. Ayrıca sadece ilk maliyet değerinin bir seçim kriteri olmaması ve önerilen koruma projesinin ekonomik ömrü boyunca da arzu edilen performansı göstermesi önemlidir. Bu makalede, bu nedenle tercih edilen seçim indisi yaklaşımında S3 ve S4 parametreleri dikkatle değerlendirilmeli ve uygulamaların yapımı esnasında gerekli özen gösterilmelidir. Örneğin, filtre tabakasının önerilen kriterlere göre serilmesi, taşların ayaklar etrafına rasgele değil birbirleriyle kenetlenme etkisi yaratacak şekilde tabana paralel olarak ve önerilen sırada yerleştirilmesi, vb. konular göz önünde bulundurulmalıdır. Uygulanacak tip seçimi, bir derecelendirme sistemine göre belirlendiği için sonuç, tasarımcının atayacağı değerden kısmen de olsa etkilenecektir. Bu durumda tasarım ve kontrol mühendislerinin mesleki deneyimi, uygulanan sistemin davranışının ve yersel koşulların yeterince bilinmesi gibi etkenler önem kazanacaktır. Ayrıca bilhassa yüksek akım dönemlerinden sonra koruma projesinin durumunun tetkik edilmesiyle gerekli olabilecek tamiratların zamanında yapılması halinde yapı emniyetinin artacağı vurgulanmalıdır.

SONUÇLAR

Bu makalede köprü ayakları etrafındaki oyulmaları kontrol etmek amacıyla yapılan kaplama elemanlarının tasarım kriterleri irdelenmiş ve bu amaçla geliştirilen ve Vb.Net dilinde yazılan "CM-Design" isimli program tanıtılmıştır. Bu program, Rize ilinde yer alan mevcut bir köprü projesine uygulanmıştır. Köprü bölgesinde planda düz olan akarsu için su yüzü profilleri HEC-RAS yazılımı ile çalışılmış, gerekli akım parametreleri geliştirilen programa girdi olarak sunulmuş ve çeşitli seçenekler için kaplama projeleri detaylandırılmıştır. Köprü bölgesindeki yersel akım, taban malzemesi, yapısal kısıtlamalar ve bakım, onarım gibi etkenlere dayanan bir seçim indisi kullanılarak ayaklar etrafındaki kaplama projesi için kısmi harçlı riprap uygulaması önerilmiştir. Ayrıca akımların dönüş aralığının tasarım üzerindeki etkisini araştırmak için bir hassasiyet analizi yapılmıştır. Köprü açıklığının geniş olması nedeniyle 500 ve 1000 yıl dönüş aralıklı akımların yaratacağı hidrolik koşullara göre bulunan riprap büyüklükleri için aynı sınıf malzeme kullanıldığından tasarımın boyutları ve maliyet 500 ve 1000 yıl dönüş aralıklı akımlarda değişmemiştir. Yörenin ani taşkınlarla ve yüksek akımlara sıklıkla maruz kalma özelliği göz

önünde bulundurularak 500 yıl dönüş aralıklı kısmi harçlı riprap kullanılması önerilmiştir. Bu tasarım 1000 yıllık akım şartlarında seçim indisi değişse de geçerlidir.

Semboller

b	akıma dik yöndeki ayak genişliği
D_{50}	taban malzemesi medyan çapı
D_r	riprap büyüklüğü
D_{r50}	riprap büyüklüğü medyan çapı
d_0	yaklaşım akım derinliği
d_s	ayak etrafındaki maksimum oyulma derinliği
F_r	Froude sayısı
g	yerçekimi ivmesi
GBB	geçmeli beton blok
K	ayak geometrisine bağlı faktör
K_s	Ayak burun şekli için düzeltme faktörü
K_α	Akımın açısı için düzeltme faktörü
K_b	Akarsu yatak özellikleri için düzeltme faktörü
K_z	Zırhlanma etkisi için düzeltme faktörü
L	ayak uzunluğu
LCC	fiziki ömür çevrim maliyeti
n	Manning pürüzlülük katsayısı
KHR	kısmi harçlı riprap
Q	debi
SI	seçim indisi
S1	taban malzeme büyüklüğü ve taşınım özelliğine bağlı derecelendirme faktörü
S2	akarsuda kaba malzeme ve buz taşınması özelliğine bağlı derecelendirme faktörü
S3	yapım ve uygulama kısıtlamalarına bağlı derecelendirme faktörü
S4	bakım-onarım şartlarına bağlı derecelendirme faktörü
U	tasarım hızı
WS	GBB alan genişliği
X1	GBB memba uzantısı
X2	GBB mansap uzantısı
Δ	görelî yoğunluk

Kaynaklar

- [1] Yanmaz, A.M. ve Kürkçüoğlu, S. Integrated Assessment of the Effects of the Type, Geometry and Structural Aspects of Bridge on Hydraulic Conditions, Proceedings of 6th International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul, Turkey, 2004.
- [2] Yanmaz, A. M. ve Kürkçüoğlu, S. Assessment of Hydraulic and Structural Interactions for Bridges, Proceedings of 4th International Conference on Hydroscience and Engineering Conference, Seoul, Korea, 2000.
- [3] Yanmaz, A. M. ve Bulut, F. Computer Aided Analysis of Flow Through River Bridges, CD-ROM Proceedings of World Water and Environmental Sciences Congress, ASCE, ISBN: 07844-0569-7, Orlando, ABD, 2001.
- [4] Yanmaz, A.M. Köprü Hidroliği, Birinci Baskı, ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 2002.
- [5] Johnson, P.A. Reliability-based pier scour engineering, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(10): 1344-1358, 1992.
- [6] Johnson, P.A., ve Ayyub, B.M. Modeling uncertainty in prediction of pier scour, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 122(2):66-72, 1996.
- [7] Yanmaz, A.M. ve Çelebi, T. Assessment of Uncertainties for Local Scouring Parameters Around Bridge Abutments, CD-ROM Proceedings of 2002 Conference on Water Resources Planning and Management, ASCE, Roanoke, ABD, 2002.
- [8] Yanmaz, A.M., ve Kocabıyık, B. Risk Assessment of Scour Vulnerable Bridges: A Case Study, CD-ROM Proceedings of 2002 Conference on Water Resources Planning and Management, ASCE, Roanoke, ABD, 2002.
- [9] Yanmaz, A.M. ve Çelebi, T. Evaluation of Scouring Reliability at Bridge Abutments”, CD-ROM Proceedings World Water and Environmental Resources Congress, ASCE, Salt Lake City, ABD, 2004.
- [10] Yanmaz, A.M. Investigation of the Effects of Uncertainties on the Reliability Estimation of a Hydraulic Structure, Proceedings of 6th International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul, 2004.
- [11] Yanmaz, A.M. Uncertainty of Local Scouring Parameters Around Bridge Piers, Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi, TÜBİTAK, Vol. 25, No: 2, 127-137, 2001.
- [12] Yanmaz, A.M., ve Üstün, İ. Generalized Reliability Model for Local Scour Around Bridge Piers of Various Shapes, Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi, TÜBİTAK, Vol. 25, No:6, 687-698, 2000.
- [13] Yanmaz, A. M., ve Çiçekdağ, Ö. Composite Reliability Model for Local Scour Around Cylindrical Bridge Piers, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 28, No:3, 520-535, June, 2001.
- [14] Köse, Ö., ve Yanmaz, A.M. Scouring Reliability of Bridge Abutments, Teknik Dergi, Vol. 21, No:1, 4919-4934, 2010.
- [15] Turan, K.H., ve Yanmaz, A.M. Reliability-based optimization of river bridges using artificial intelligence techniques, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol: 38, No:10, 1103-1111, 2011.

- [16] Yıldırım, M.S. Computer Assisted Design Methodology for Armoring Type Bridge Scour Countermeasures, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, Ankara, 2013.
- [17] Melville, B.W., ve Coleman, S.E. (2000). Bridge Scour, Water Resources Publications, LLC, Colorado, ABD, 2000.
- [18] Laursen, E.M. Scour at Bridge Crossings, Bulletin No:8, Iowa Highway Research Board, Ames, Iowa, ABD, 1958.
- [19] Laursen, E.M. An analysis of Relief Bridge Scour, Journal of Hydraulics Division, ASCE, 89(HY3), 93-118, 1963.
- [20] Carstens, M.R. Similarity Laws for Localized Scour, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 92(HY3), 13-36, 1966.
- [21] Hancu, S. Sur le Calcul des Affouillements Locaux Dans la Zone des Piles de Ponts, Proceedings 14 th IAHR Congress, 3: 299-313, 1971.
- [22] Neill, C.R. Guide to Bridge Hydraulics, Roads and Transportation Association of Canada, University of Toronto Press, Toronto, Kanada, 1973.
- [23] Breusers, H.N.C., Nicollet, G., ve Shen, H.W. (1977). "Local Scour Around Cylindrical Piers", Journal of Hydraulic Research, IAHR, 15(3), 211-252.
- [24] Jain, S.C., ve Fischer, E.E. Scour Around Bridge Piers at High Froude Numbers, Rapor No: F.H.W.A.R.D.:79-104, Federal Highway Administration, Washington D.C, ABD, 1979.
- [25] Jain, S.C., ve Fischer, E.E. Scour Around Bridge Piers at High Flow Velocities, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 106(HY11), 1827-1842, 1980.
- [26] Yanmaz, A. M. Time-Dependent Analysis of Clear Water Scour Around Bridge Piers, Doktora tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 1989.
- [27] Yanmaz, A.M., ve Altınbilek, H.D. Study of Time-dependent Local Scour Around Bridge Piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(10):1247-1268, 1991.
- [28] Yanmaz, A. M. Temporal Variation of Clear Water Scour at Cylindrical Bridge Piers, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 33, No: 8, 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, Vol.47, Issue 1, 110-118, 2009.
- [30] Johnson, P.A. Reliability-based Pier Scour Engineering, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(10): 1344-1358, 1992.
- [31] Melville, B.W. Pier and Abutment Scour: Integrated Approach, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(2), 125-136, 1997.
- [32] Richardson, E.V. ve Davis, S.R. Evaluating Scour at Bridges, Hydraulic Engineering Circular No:18, Yayın No: FHWA NHI 01-001, FHWA, US. Dept. of Transportation, Washington, D.C., ABD, 2001.
- [33] Ghorbani, B. A Field Study of Scour at Bridge Piers in Flood Plain Rivers, Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi, TÜBİTAK, 32, 189-199, 2008.

- [34] Yanmaz, A.M. ve Özdemir, E.C. A Feasibility Study on Bridge Scour Countermeasures, CD-ROM Proceedings World Water and Environmental Resources Congress, ASCE, Salt Lake City, ABD, 2004.
- [35] Lagasse, P. F., Zevenbergen, L. W., Schall, J. D., ve Clopper, P. E. Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures - Experience, Selection, and Design Guidelines, Hydraulic Engineering Circular (HEC) No. 23, Second Edition. FHWA Report No. FHWA NHI 01-003. Washington, D.C., 2001.
- [36] Lagasse, P. F., Clopper, P. E., Zevenbergen, L. W., ve Girard L. G. Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour, NCHRP Report 593 Transportation Research Board, Washington, D.C., 2007.
- [37] Yanmaz, A.M., ve Apaydın, M. A Study on Bridge Scour Risk Assessment and Countermeasure Design, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, Vol. 26, No:4, 499-506, 2012.
- [38] Yanmaz, A.M., ve Çam, U.E. Bridge Scour Countermeasure Design: A Case Study, Proceedings of Tenth International Congress on Advances in Civil Engineering, 2012, Vol. 1, 2012.
- [39] Parker, G., Toro-Escobar, C., ve Voigt, R.L., Jr. Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour, Users Guide (revised 1999) and Final Report, NCHRP Project 24-7, prepared for Transportation Research Board by St. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota, MN, 360 s, 1998.
- [40] Özdemir, C. E. A Feasibility Study on Bridge Scour Countermeasures, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2003.
- [41] Johnson, P. ve Niezgodá, S. Risk-Based Method for Selecting Bridge Scour Countermeasures, J. Hydraul. Eng., 130(2), 121–128, 2004.
- [42] Çam, U.E. Scour Countermeasure Design for Sequential Viaducts on Ankara-Pozantı Highway, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2012.
- [43] Richardson, E.V., Simons, D.B., ve Julian, P.Y. Highways in the River Environment, Design and Training Manual, FHWA, Washington, D.C., 1990.
- [44] Yanmaz, A.M., ve Coşkun, F. Hydrological Aspects of Bridge Design: Case Study, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 121(6), 411-418, 1995.
- [45] Önsoy, H. Doğu Karadeniz’de Kıyılara ve Dere Yataklarına Müdahaleler ve Beklenen Taşkınlar, Türkiye Mühendislik Haberleri, Cilt 420 No: 4 145-147, 2002.
- [46] Ahmed W. Abdeldayem, Gamal H. Elsaheed, ve Ahmed A. Ghareeb. The Effect of Pile Group Arrangements on Local Scour Using Numerical Models, Advances in Natural and Applied Sciences, 201, 141-146, 2011.
- [47] Brunner, G. W. HEC-RAS River Analysis System User’s Manual Version 3.1, California: US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), 2002.
- [48] Chow, V.T. Open Channel Hydraulics, McGraw- Hill, New York, 1959.