

KÖPRÜ HALATLARININ KALAN DAYANIMININ OLASILIK HESAPLARI İLE DEĞERLENDİRMESİ

Khaled M. Mahmoud*

* Bridge Technology Consulting, New York, USA
(Çeviren: Alp Caner, Altan Böncü)

ÖZET

Geçmiş senelerde köprü halat dayanımlarını tespit etmek için bir çok metot geliştirilmiştir. Bu metotların bir çoğu muayeneler sırasında yapılan görsel incelemelere dayanmakta ve gerçek halat kopma davranışını inandırıcı bir şekilde açıklayamamaktadır. Bir kablonun dayanımı içindeki tellerin nihai dayanımının sekant nihai birim gemesi ile ilişkilendirilebilir. Fakat hasar görmüş tellerin nihai birim germelerindeki yüksek oranlı değişimler birim germe verilerinin de değerlendirme içine alınmasını gerektirmiştir. Bu çalışma içerisinde dayanım ve birim germe arasındaki yüksek aralıklı değişim için olasılık hesaplamaları yapılmıştır. Bu olasılık modelleri için kırılmış tellerin test verileri ve sahadaki muayene sonuçları kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Köprü, Halat Dayanımı, Olasılık

ABSTRACT

There has been several strength models developed over the last few years for the strength evaluation of bridge cables. Most of these models rely on visual assessment of wire condition determined during inspection and do not provide convincing mechanism of a cable failure mechanism. Additionally, the assessment of the cable strength is evaluated based on the wire ultimate strength, with a secant regard to the wire ultimate strain. However, the wide variation observed in the ultimate strain of degraded wires requires that the strain data be included in the assessment model parameters. In the present paper, a probabilistic model that considers a multivariate relationship between the strength and the strain is proposed. The model input parameters are test data, and inspection findings of broken and cracked wires.

Keywords: Bridge, Cable Strength, Probability

1. GİRİŞ

Köprülerin ana halatları yüksek bir güvenlik katsayısı ile tasarlandığından dolayı oluşan çürümeler, paslanmalar, gerilme pas çatlakları, paslanma yorulmaları ve hidrojen gevrekliği olan etkiler altında işlevini yapmaya devam etmektedir. Buna rağmen köprü halatının matematiksel olarak dayanım değerlendirmesini yapabilmek için test verilerine ve saha muayene kayıtlarına ihtiyaç vardır.

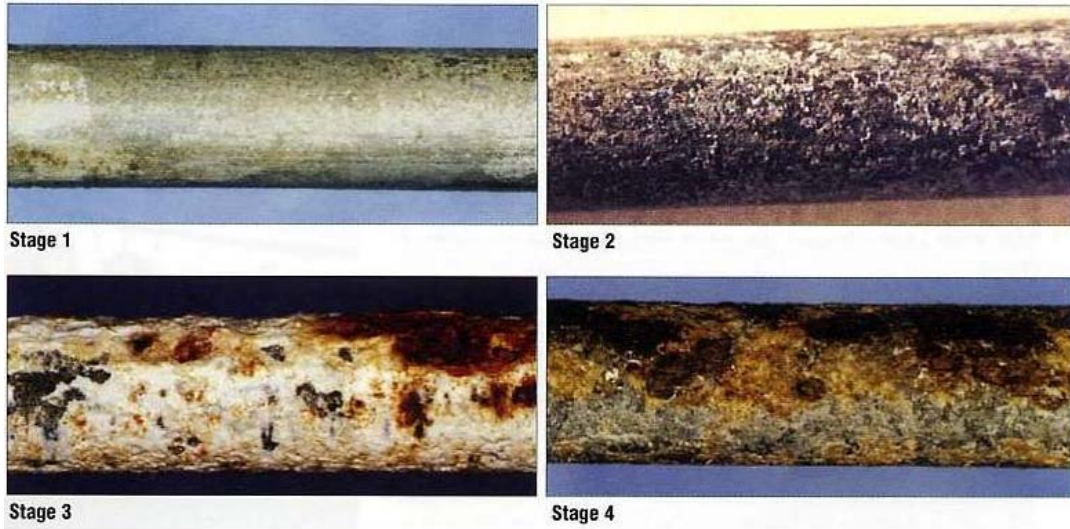
Hopwood ve Havens [1] paralel teli köprü halatlarının dayanımını bulabilmek için paslanma hasarlarını bir ölçek içerisinde puanlamışlardır. Kriterleri telin çürüme derecesi ile alakalandırılmıştır.

Aşama 1: Tellerin çinko kaplamasının okside olması, beyaz paslanma

Aşama 2: Telin bütün kesitinin beyaz pas olması

Aşama 3: Telin içerisinde metalin %20-30 oranında paslanması

Aşama 4: Telin tümünün paslanması



Şekil 1. Paslanma Aşamaları

Şekil 1 de gösterilen paslanmalar sadece görseldir ve hasarın matematiksel olarak tespitini sağlamamaktadır. Bundan daha önceki modellerde sadece tek tek tellerin nihai dayanımına bakılmıştır [2], [3] ve [4]. Buna rağmen, bir çok asma köprü halat test verileri tellerin birim germe özelliklerinin değiştiğini göstermiştir. Bu değişim telin süneklik limitini de etkilemesine rağmen önceki modeller tarafından hesaba katılmamıştır. Birim germedeki değişim, çok yüksek bir aralıkta olduğu için olasılık hesaplamaları tavsiye edilir hala gelmiştir. Tellerin çürümesi dolayısıyla oluşan mekanik özelliklerdeki değişim çok fazla miktarlarda olmaktadır. Telin elastik modulundeki, E , nihai gerilme dayanımındaki, σ_u , ve nihai birim gerilmesindeki, ϵ^u , değişimler daha sonraki paragraflarda gösterilecektir. Asma bir köprünün güvenlik durumu ancak bu parametrelerin modele girilmesi ile sağlanabilir. Aynı zamanda bu parametrelerin birbirlerini nasıl etkilediği de önemli bir husustur. Amaç kablodaki güvenlik faktörünü bir olasılık hesabı içerisinde *güvenirliliğini* tespit etmektir.

Bu çalışmada önerilen metot önceki metotlara tellerin sünekliğini ve çürümesini katarak geliştirmiştir. Bu çalışmanın iki amacı vardır

1. Tek bir telin dayanım çürümesinin (azalmasının) uzun zamanda etkileri ve bunun halat sistemine olan etkisi
2. Köprü halatının kalan ömrünün zamana bağlı çürüme kinematığı ile ilişkilendirilmesi

Köprü halatlarının güvenilirlik analizleri tellerin teker teker parametrik istatistiksel modellenmesine bağlıdır. Kablo dayanımlarını doğru bir şekilde istatistiksel olarak modelleyebilmek için, kablo hasar bozulma sürecini bilmek ve halatı oluşturan tellerin davranışlarını doğru bir şekilde anlamak gerekir. Teller doğrusal olmayan bir davranış gösterir. Tellerin doğrusal olmayan davranışını bulabilmek için akma sınırından sonra olan eğilimi bilmek gerekir. Laboratuvar sonuçlarında görülebileceği gibi bozulma parametreleri olan paslanma, hidrojen kırılma ve çatlama tellerin birim germe seviyelerine bağlıdır. Bozulmaya maruz kalan tellerin nihai birim germedeki büyük değişimler istatistiksel parametreler içine katılmalıdır. Bu durum içerisinde Monte Carlo benzetimi kablo dayanımını bulmakta kullanılabilir doğru bir metottur. Bu önerilen metot içerisinde tellerin tek tek dayanımlarındaki değişimler iki ana parçaya ayrılabilir; birincisi teller arası farklılıklar ve ikincisi de telin uzunluğu boyunca olan değişimdir. Bu ikinci faktör zayıf halka etkisine neden olur ve kablo uzunluğu arttıkça kablo dayanımı azalabilir. Aynı zamanda her tel değişik mekanik özelliklere sahip olabilir ve bu yüzden her tel değişik doğrusal olmayan davranışa sahip olabilir. Önerilen halatlar için kullanılacak mekanik özellikler test örneklerindeki bozulma eğilimleri göz önüne alınarak yapılabilir. Halatların istatistiksel modeli tüm tellerin gerilme-birim germe ilişkisini için Monte Carlo benzetimini kullanarak yapılabilir. Tellerin gerilme ve birim germe halat dayanımının rassal değişimi olan çatlama ve kırılmış tellerin olması şeklinde modellenebilir.

Önerilen istatistiksel modelin değerlendirmesi için kullanılan girdiler kablo dayanımındaki bozulmaların saha muayenesi sırasında elde edilen test tellerinden edinilmiştir. Kablonun son durumunu anlamak için yapılan güvenilirlik analizi saha muayenesi sırasında bulunan kırılmış ve çatlama tellerin bozulma özelliklerinden elde edilmiştir.

2. TELLERİN MODELLENMESİ

Yüksek dayanımlı çelik teller köprü halatının ana parçalarıdır. Bu çalışma içerisinde telin doğrusal olmayan gerilme-birim germe davranışı sırasında akma dayanımı σ_e , elastik modulus E , nihai gerilme σ_u ve nihai birim germe ε_u değişkenleri kullanılmıştır. Rassal değişkenler vektörü aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$[X]^T = [\sigma_e, E, \varepsilon_u, \sigma_u]^T \quad (1)$$

Her değişken en doğru istatistiksel metot kullanılarak en iyi temsil eden değer ile tespit edilecektir. Rassal değişkenlerin dağılımına bakarak yapılan data için en temsili eğilimin bulunmasında hep pozitif değerler elde edilmesi gerekmektedir. Üç adet asimptotik dağılımdan biri olan Weibull dağılımı, Tip III dağılımı, sınırlar ile çevrilmiştir. Bunun tersine olarak Gumbel ve Frechet dağılımları, Tip I ve Tip II, ise sınırlar ile çevrilmemiştir. Tip 1 dağılımı kablo dayanımını bulmakta kullanılır [3] ve [4]. Tip 1 dağılımında minimum değerlere uygun eğilim bulunur ise, negatif değerlerin ortaya çıkma olasılığı vardır ki bu da imkânsızdır. Dolayısıyla Weibull

veya lognormal dağılım tercih edilebilir. Eğer rassal değişken X Weibull dağılımında ölçek parametresi olarak $\delta > 0$ ve şekil parametresi olarak $\beta > 0$ kullanıyor ise olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f(x) = \frac{\beta}{\delta} \left(\frac{x}{\delta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\delta}\right)^\beta}, \dots x > 0 \quad (2)$$

Burada orta değer ve varyant olarak aşağıdaki değerler alınabilir.

$$\mu = \delta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \delta^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \delta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right]^2 \quad (4)$$

Yoğunluk fonksiyonu için lognormal bir dağılım seçilir ise:

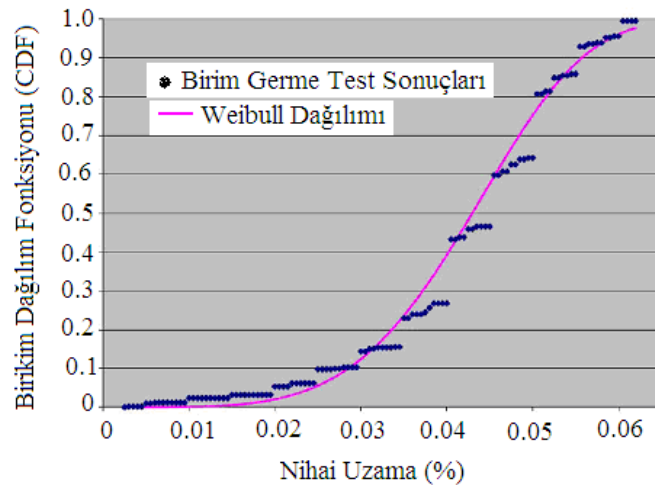
$$f(x) = \frac{1}{\xi x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2}, \dots 0 \leq x < \infty, \dots \xi > 0 \quad (5)$$

Burada λ ve ξ^2 orta değer ve varyanttır ve aşağıdaki denklemlerden elde edilir.

$$\mu = e^{\left(\lambda + \frac{\xi^2}{2}\right)} \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \mu^2 (e^{\xi^2} - 1) \quad (7)$$

Harlow ve diğerlerinin [5] de bahsettiği gibi Weibull dağılımı, halat dayanım dasetasını anlatmakta en iyi çözümdür. Not etmek gerekir ki, kritik olmayan durumlarda Weibull dağılımı lognormal veya diğer dağılımlara göre tercih edilmeyebilir. Bu karar ancak datayı en uygun temsil edebilecek bir dağılım seçildiğinde bulunabilir. Weibull dağılımı asma köprü halatların alınan birim germe doneleri için en uygun şekilde temsil için Şekil 2’de gösterilmiştir.

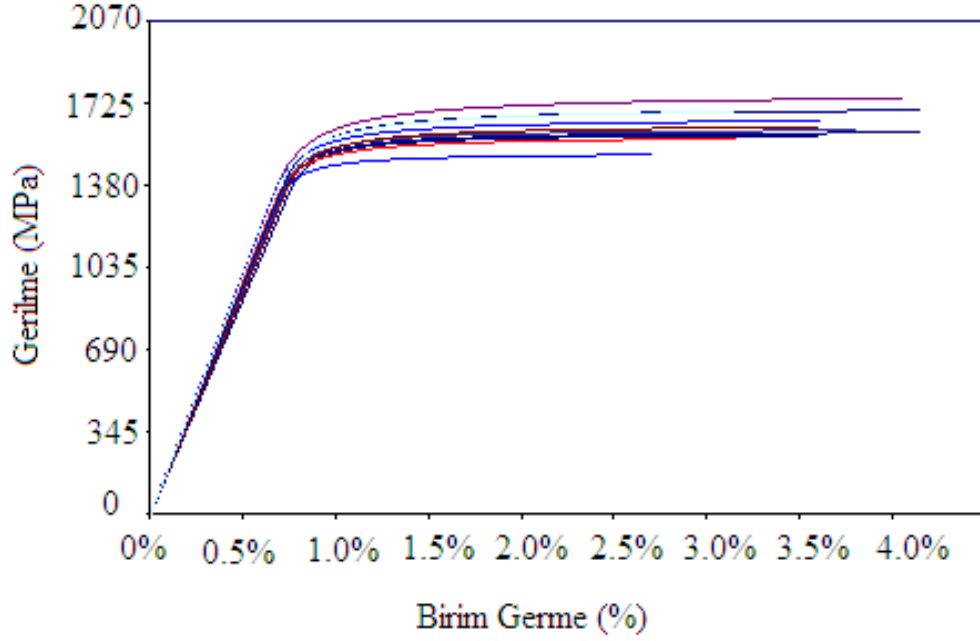


Şekil 2. Weibull dağılımı ile en uygun nihai birim germe

Her tel belli sayıda parçaya bölündükten sonra dört değişken $[\sigma_e, E, \sigma_u, \varepsilon_u]$ bir biri ile alakalandırılmış ve bir bağılaşım matrisi oluşturulmuştur.

$$[\rho_{ij}] = \frac{Cov(x_i, x_j)}{\sqrt{Var(x_i) \cdot Var(x_j)}} \quad (8)$$

Rassal değişkenler $[\sigma_e, E, \sigma_u, \varepsilon_u]$ rassal örnekleme ile tel gerilme-birim germe davranışını Şekil 3 de gösterildiği gibi belirlemede kullanılmışlardır.

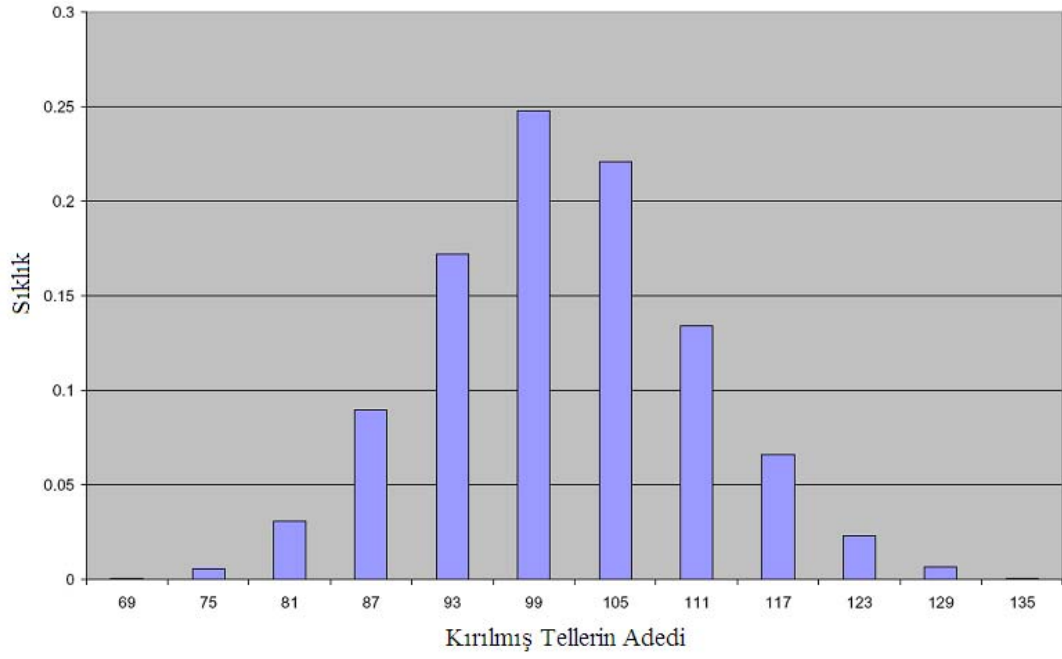


Şekil 3. Tel parçaları için gerilme-birim germe eğrisi

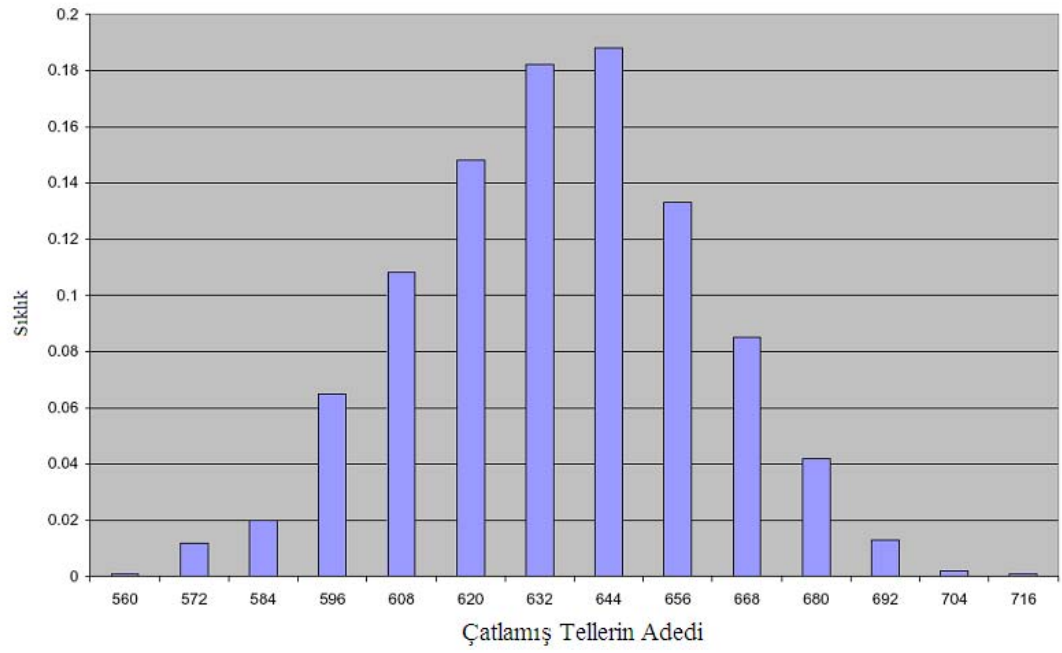
3. KIRILMIŞ VE ÇATLAMIŞ TELLERİN ADEDİNİN BELİRLENESİ

Burada not etmeliyiz ki, mevcut saha muayeneleri ve laboratuvar test doneleri incelendikten sonra en kötü durumdaki teller belirlenebilir. Paslanmanın aşamalarındaki belirlemedeki öznellikten dolayı tellerin gerçekte ne aşamada olduğunu bulmak zor olabilir, mesela 4. derece tel paslanmasında karar vermekte yapılacak hata gibi. Dolayısı ile görsel değerlendirmeden çıkacak sonuçlardaki güvenilirlik, test verileri ile yapılan değerlendirmeye göre daha az güvenli çıkabilir.

Kırılan tellerin adedini belirlemek için kullanılan istatistiksel metot için gereken girdiler arasında tellerin kırılma olasılığı, p_0 , ve tellerin çatlama olasılığı, p_1 , vardır. Şekil 4 ve 5 de kırılmış ve çatlama teller için tipik bir gösterim yapılmıştır.



Şekil 4. Kırılmış Tellerin Sıklığı



Şekil 5. Çatlamış Tellerin Sıklığı

4. TELLERİ GERİ KAZANIM UZUNLUĞU

Kenetlenme veya geri kazanın uzunluğu, tümü ile telin bozulmuş kesitinden tümü ile fonksiyonel olan kesitine kadar tel boyunca olan uzunluğudur. Kenetlenme uzunluğunun efektif sayılabilmesi için tel boyunca başka bir bozulma daha olmaması gerekmektedir. Tellerin birlikte sarılması sırasında veya gerilirken veya halat kemerinden dolayı teller arasında önemli derecede radyal basınç meydana gelir ve sürtünme kuvveti meydana gelir. Bu radyal basınçtan dolayı çatlamış tel belli bir mesafe sonrasında taşıma kapasitesini geri kazanır. Kırılmış tel içerisinde gerilme olmayacağından dolayı poisson etkisinden dolayı genişlemeye çalışır. Halat dışarıdan sarılı olduğu için içindeki teller fazla genişemez ve teller arası temas kuvvetleri artar. Bu sebeple de bozulmuş kesitten uzaklaştıkça teller içerisinde eksenel gerilmeler meydana gelir.

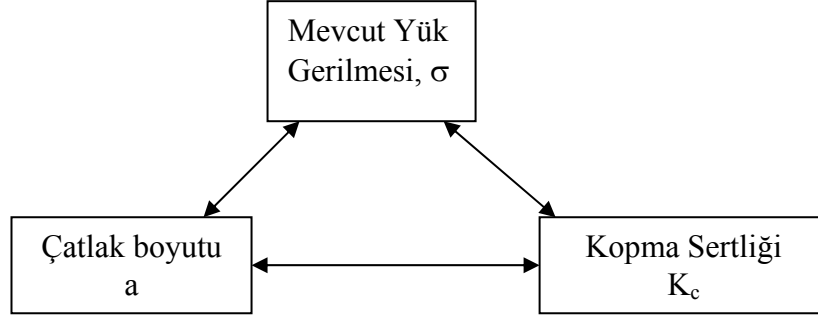
Raof ve Huang'nın [6] temas gerilme teorisine göre 7697 telden oluşan 457 mm çapındaki halatın kenetlenme uzunluğu 1,5 metre olarak kabul edilir. 1990 sonlarında yapılan halatın sarılmamış bölgelerinden yapılan tel kesimlerinden sonra önemli derecede akustik olaylar meydana gelmiştir. Bir telin kopmasından ortaya çıkan miktar ve enerji direk olarak enerji kaybı ile ilgilidir. Kırılmış bir telin kırılan iki ucu arasındaki mesafe ne kadar bir enerji kaybolduğunu belirlemede kullanılmaktadır. 2000'lerin başında tel kesimleri sarılı durumda bulunan aynı halatın değişik yerlerinde yapıyordu. Bu durumda da sargısı alınmış halatlarda gözlenen kesim sonrası ayrışma daha fazla miktarlar da oluyordu. Bu inceleme de halat sargısının kırılmış bir telde kenetlenme uzunluğunu aşağı çektiğini gösterdi.

Sargısız halatlarda sahada yapılan muayene sırasında dış tellerin kayma durumunu göz önüne alan iki adet limit dayanım durumuna bakılabilir. Üst limit olarak bütün kırılmış teller bir üst panelde eski dayanımlarına kavuşur. Aşağı limit olarak da panelde kırılmamış teller olmasına rağmen aşağı panelde kırılmış olanlar var ise onların dayanım etkileri yarıya düşürülür.

5. ÇATLAMIŞ TELLERİN DAYANIM DEĞERLENDİRMESİ

Gevrek ve yüksek dayanımlı malzemeler için en küçük çatlama bile kırılmayı tetikleyebilir. Kablo dayanımını anlayabilmek için kırılma mekanizmasını çok iyi anlamak gerekir. Bütün çatlaklar defo olmasına rağmen bütün defolar çatlak olmayabilir. Mesela hacimsel kusurlarda defo olarak kabul edilir.

Köprü halatlarında çatlamış tellerin bulunması hasara dayalı analizleri önemli hale getirir. Geleneksel yapı analizinde malzeme dayanımı ve mevcut yükleri bilmek önemlidir. Dayanım mevcut yüklerden fazla ise elemanların tasarımının yeterli olduğu kabul edilir. Bu tip bir yaklaşımda gevrek kırılmaya engelleyecek bir güvenlik katsayısı kullanılır. Fakat çatlak bir durumda kopma malzemenin akma sınırının altına hata servis taşıma gerilmesinin seviyelerine kadar gerileyebilir. Kopma analizinde malzeme dayanımı yerine çatlağın boyutu ve kopma sertliği, Kc, kullanılır. Kopma sertliği malzemenin gevrek kırılmaya olan direnci olarak ifade edilebilir. Halatın kopma değerlendirilmesi aşağıda gösterildiği gibi üçlü bir ilişki ile tanımlanabilir.



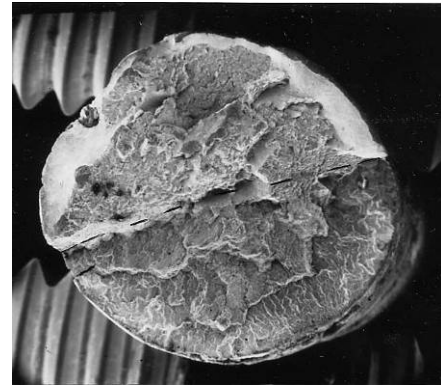
Şekil 6. Kopma Mekanik İlişkisi

Kopmaya dayalı analiz matematiksel üç parametre arasında bir ilişki yaratır ve bir çatlağın ilerisinde bir gerilme alanı meydana gelir ve buna gerilme şiddeti, K_1 faktörü denir. K_1 gerilme şiddeti K_c kopma sertliğinden az olduğu sürece çatlakta gevrek bir kırılma olmaz. Kopma sertliği ilk kez olarak Bridge Technology Consulting [8] tarafından ölçülmüş ve değerlendirilmiştir.

Asma köprülerin kopmuş kablolarında yapılan incelemeler sonucunda, yüzey çatlaklarının ön kısmında bir şekil değiştirmenin meydana geldiği anlaşılmaktadır. Çatlak genişliğinin artması öncesinde çatlak, Şekil 7 (a) da görüldüğü gibi yarı yuvarlak bir ön kısım almaya yönelim gösterir. Çatlak derinliğinin kesit çapına oranı (a/D) 0,5' e yaklaşp çatlak genişledikçe, Şekil 7 (b) deki gibi ön kısım yassılaşarak düz bir şekil alır. Halat, her bir telin paylaştığı yükten gelen çekmeye maruz kalır. Buna ek olarak tel, kendisini doğrultan (düzleştiren) eğilme gerilmesine maruz kalır. Dolayısıyla her tür gerilme yoğunluğu ve kopma sertliği değerlendirmesine yukarıda söz edilen iki önemli husus da (çatlak ön kısmında meydana gelen şekil değişikliği ve teli düzleştiren eğilme gerilmesi) dahil edilmelidir.



(a) Yarı Yuvarlak Çatlak Önü



(b) Düz Çatlak Önü

Şekil 7. Çatlak Genişlemesi Sırasında Çatlak Önü Şekil Değişimi

Çekme ve eğilme gerilmelerine maruz kalan köprü telleri için gerilme yoğunluğu etkisi çözümleri geliştirilmiştir [8]. Gerilme yoğunluğu etkisi için çözümler, çatlak önü şekil değişimini ve teldeki eğilme gerilmesini göz önüne alır. Çatlamış tel oranının belirlenmesinde kesin bir değerlendirme elde edilebilmesi için halatın kopma sertliğinin belirlenmesi gereklidir.

Kopma sertliği, K_c , ' nin belirlenmesinden sonra çatlamış tel popülasyonunun dayanımı, $\sigma_{cracked}$, řu ilişki ile belirlenir :

$$\sigma_{cracked} = \frac{K_c}{F \sqrt{\pi a_c}} \quad (9)$$

Burada a_c kritik çatlak derinliği ve F çatlak geometrisinden kaynaklı bir parametredir.

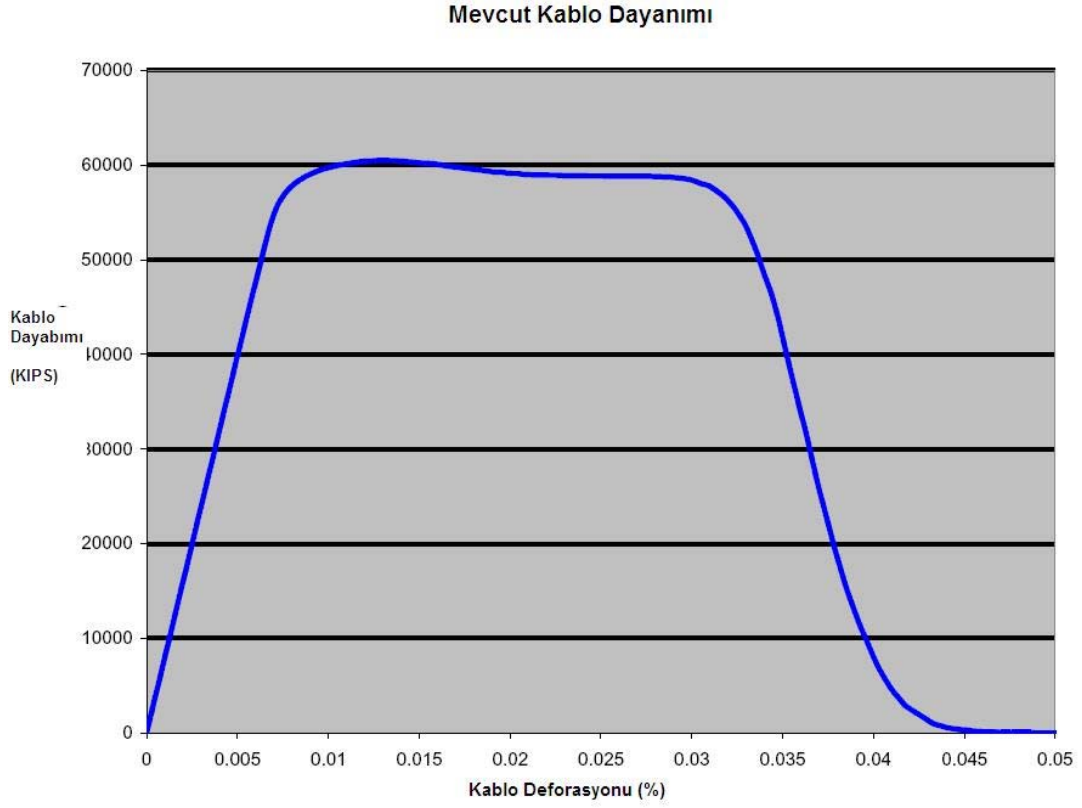
6. KABLO DAYANIMI DEĞERLENDİRMESİ

Kablo yapımında paralel tel düzeni, teller için etkileşim ve karmaşık bir işlem sonucu yük ve deformasyon paylaşımına olanak tanır. Önceki çözümlerde, řu hesaplamalar yapılmıştır :

- Çatlamış tellerin de dahil edildiği, tüm tel popülasyonu için Monte Carlo simülasyonu ile gerilme-birim boy değiştirme eğrisinin oluşturulması. Girdi parametreleri tel test verileridir.
- Çatlamış ve kopmuş tellerin, asma kablosunun her paneline dağıtılması. Yapılan model hesaplamalarında, çatlamış ve kopmuş tel sayısı rassal değişken olarak üretilmiştir.
- Çatlamış tel dayanımı, malzeme özelliği olan kopma sertliği, K_c , değerinin oluşturulmasına dayanan kopma mekanizması kavramları temel alınarak değerlendirilmiştir.

Yukarıdakiler, kablo dayanımı değerlendirmesindeki temel taşları oluşturur. Daha önceden gösterildiği gibi, bir telin kopması, fazla yük veya fazla deformasyondan kaynaklı oluşan yük etkisi altında görölmektedir. Bu iki limitten her hangi birinin açılması durumunda tel parçası yetersiz kalır ve kopar. Kablo deformasyonu, her basamakta her bir telin süneklik limiti, yani uzama kontrolünün yapıldığı artımsal metodla gerçeleştirilir. Süneklik limitine ulaşıldığında, tel yük taşıyan mekanizma dışında bırakılır. Bu işlem tüm tel popülasyonu kopana kadar tekrar edilir ve kablounun yük-deplasman eğrisi elde edilir.

Değerlendirilen bir kablodaki etkin teller, kablo dayanımı için bir üst sınırın elde edildiği incelenen paneldeki kopmuş tellerin dışarda bırakılması ile belirlenir. Diğer taraftan, gözlem amacıyla panel sargılarının açılması sırasında dış etki ile kırılan tellerin kaymaları için alt sınır kablo dayanımı da değerlendirilir. Alt sınır olarak, değerlendirilen kablo panelinde etkin teller, aynı bölümdeki kırılmış telleri ve panelin iki tarafındaki yan panellerde yer alan oluşmamış kırık tel sayılarını dışarda bırakacak şekilde belirlenir. Dolayısıyla, incelenen panelin iki yanındaki panelde yer alan kırık tel sayılarının yarısı, incelenen panele eklenir.



Şekil 8. Tipik Bir Panelde Kablo Dayanımı

7. SONUÇLAR

Paralel telli köprü kablolarının olasılıksal değerlendirilmesi sunulmuştur. Tahrip olmuş tellerin nihai birim germe değerlerinde görülen büyük değişkenlik dolayısıyla önerilen modelde birim germe istatistiksel bir parametre olarak alınmıştır. Parametrelere verilen çeşitlilik ile Monte Carlo simulasyonu kablo dayanımının hesaplanmasında uygun bir araç olmuştur. Önerilen modelin verilerini, gözlem sırasında elde edilen tel örnekleri oluşturmuştur.

KAYNAKÇA

[1] NCHRP Report 534, 2004, Guidelines for Inspection and Strength Evaluation of Suspension Bridge Parallel- Wire Cables, *Transportation Research Board*..

[2] Hopwood, T. and Havens, J.H. 1984, "Inspection prevention and remedy of suspension bridge cable corrosion problems", *Research Report UKTRP-84-15, Kentucky Transportation Research Program, University of Kentucky, Lexington*.

- [3] Haight et al., 1997, Cable safety factors for four suspension bridges", *ASCE Journal of Bridge Engineering*, Vol. 2, No.4, pp. 157-167.
- [4] Matteo et al., 1994, Safety analysis of suspension bridge cables: Williamsburg Bridge, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 120 (11), pp. 3197-3211.
- [5] Harlow et al., 1983, Lower tail analysis of the distribution of load sharing systems, *Journal of Applied Probability*, 20, pp. 358-367.
- [6] Raoof and Huang, 1992, Wire recovery length in suspension bridge cable, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, NO. 12, pp. 3255-3267.
- [7] Anderson, 1991, *Fracture Mechanics Fundamental and Applications*, CRC Press.
- [8] Bridge Technology Consulting, 2007, Main cable investigation at the Mid-Hudson Suspension Bridge-Fracture toughness identification of main cable wire. *Technical Report prepared for the New York State Bridge Authority*, New York.