

# Demiryolu köprülerinin sistem güvenilirlik indislerinin belirlenmesi

**Varol AKAR\***, **Erdoğan UZGİDER**

*İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul*

## Özet

*Yapılan çalışmada, Güvenilirlik Teorisinin esasları ve bir sonlu elemanlar metodu kullanılarak demiryolu köprülerinin servis yükleri altında güvenilirlik indislerini belirleyen pratik ve etkin bir yöntem geliştirilmiştir. Demiryolu servis yüklerinin, olasılık dağılım fonksiyonları ile istatistik parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, geometrik ve malzeme bakımından lineer olmayan etkiler ile düğüm noktalarının yarı rijit davranış özelliklerinin dikkate alındığı bir yapı analiz programı geliştirilmiştir. Bu program yardımıyla mevcut demiryolu hatlarında hizmet veren çelik kafes kirişli bir köprünün modellenmesi yapılmış ve köprü üzerindeki bir elektrikli lokomotifin farklı konumları için göçme mekanizmaları ve bu göçme mekanizmalarına ait eleman göçme sıraları belirlenmiştir. Eleman seviyesindeki güvenilirlik indislerinden köprünün sistem güvenilirlik indisi saptanmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** *Güvenilirlik indisi, göçme mekanizması, servis yükleri.*

## Determination of system reliability indices of railway bridges

### Abstract

*In this study, by using theory of reliability and a finite element method, a practical and effective method determining safety indices of existing railway bridges under service loads has been developed. At present, safety evaluation studies on railway bridges subject to increasing axle loads and traffic density resulting from various economic and technological developments are important. For this purpose an efficient algorithm has been developed to define the potential failure mechanisms of the bridge structures. Then using potential mechanisms and employing theory of reliability an algorithm has been developed which defines system reliability depending on element reliability. In order to define probability distribution functions of railway service loads and statistical parameters (standard deviation, variation coefficient, etc.) of these functions, approximately five hundred freight and passenger train settings in operation for a year have been investigated. A structural analysis program taking into consideration geometrically and materially non linear effects and characteristics of semi-rigid behaviour of joints in the system of bridges has been developed. The steel truss bridges, giving service on Turkish Railway Network have been modelled by using the program and bridge failure mechanisms and order of failure of members for each failure mechanism, for each different position of an electric locomotive on the bridge have been set out. System safety indice of the bridge are then determined by utilising safety indices of each member.*

**Keywords:** *Safety indices, Failure mechanisms, Service loads.*

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Varol AKAR. varol\_akar@yahoo.com.; Tel: (312) 309 05 15 dahili: 4341.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Demiryolu köprülerinin servis güvenilirlik indislerinin tanımlanması için bir yöntem" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 30.05.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 22.06.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Ülkemiz demiryolu hatlarında mevcut servis yükleri altında hizmet veren muhtelif cins ve açıklıklardaki yaklaşık 24000 adet köprünün %80'ini yaşları 50 ve üzerinde olan köprüler oluşturmaktadır. Sanayileşmekte olan birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de mevcut finans kaynaklarının sınırlı oluşu, bu köprülerde bakım çalışmalarının istenilen şekilde yerine getirilmesini engellemektedir. Mevcut dış koşullar, artan dingil basınçları ve tren hızları altında demiryolu köprülerinin yük taşıma kapasitelerinin değerlendirilmesi ve bu servis yükleri altında güvenilirliklerinin belirlenmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır.

Köprü taşıyıcı sistemlerinin ve bunları oluşturan elemanların mevcut yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi; bir çoğu deterministik olmayan yük ve mukavemete ait parametreler ile köprü sisteminin davranışının modellendiği yapı analiz metodlarında yer alan bazı kabullerden kaynaklanan belirsizliklerin, yapısal güvenilirlik teorisi yardımıyla hesaplanmasına bağlıdır. Bu rasgele değişkenlerin değeri, olasılık dağılım fonksiyonlarının belirlenmesiyle tanımlanır (Frangopol, 1999).

Köprü sistemlerinin davranışı, güvenilirlik analizlerinde seri, paralel ve karışık sistem kabullerine göre modellenmektedir. Seri sistemlerde yapı sistemlerinin, herhangi bir elemanın taşıma kapasitesine erişmesiyle göçtüğü, paralel sistemlerde ise sistemlerin, tüm elemanların taşıma kapasitelerine eriştikten sonra göçmeye uğradıkları kabul edilmektedir. Bu nedenle, yapı sistemlerinin seri, paralel veya seri-paralel karışık modellendiği güvenilirlik analiz modellerinin yapının gerçek davranışına uygunluğunun belirlenebilmesi, bu yapı sistemlerine ait tüm göçme modlarının tanımlanabilmesi durumunda mümkündür. Bazı köprü sistemlerinin yüzlerce eleman teşkil olduğu ve içten hiperstatik özelliği taşıdığı göz önünde bulundurulduğunda, bu sistemlerin tüm göçme modlarının belirlenmesi çok detaylı ve zaman alıcı bir çalışma gerektirir (Frangopol, 1999).

Köprü elemanlarının süneklik seviyesi (düktilite), eleman mukavemetleri arasındaki korelasyon ile

yük etkileri arasındaki korelasyon yapı sistemlerinin güvenilirliği üzerinde önemli bir rol oynar. Özellikle her bir elemana etkiyen yükler arasında veya elemanların mukavemetleri arasında korelasyonun olması, köprü sistemlerinin güvenilirliğinin bulunması çalışmalarını kompleks hale getirir. Problemi basitleştirmek amacıyla, yapı sistemlerinin güvenilirliği ile ilgili birçok alt ve üst sınır teoremleri geliştirilmiştir (Nowak ve Collins, 2000).

Bu çalışmada, sonlu elemanlar metodu kullanılarak geliştirilen bir algoritma yardımıyla mevcut demiryolu köprülerinin servis yükleri altında güvenlik indislerini belirleyen pratik ve etkin bir yöntem geliştirilmiştir. Bu amaçla, köprü taşıyıcı sistemlerinin gerçek davranışlarının ve mukavemetlerinin belirlenmesi için, geometrik bakımdan lineer olmayan davranışın stabilite fonksiyonları ile ifade edildiği, malzeme bakımından lineer olmayan etkiler ile sistemdeki düğüm noktalarının yarı rijit davranış özelliklerinin dikkate alındığı ve köprü sistemleri üzerinde katar yüklerinin her bir konumuna ait köprü göçme mekanizmalarını ve eleman göçme sırasını yük arttırımı tekniği ile belirleyen yapı analiz programı oluşturulmuştur.

Köprü sistemlerinin davranışlarını karakterize eden parametrelerin (malzeme ve yük karakteristikleri) istatistik değerleri (ortalama değer, standart sapma, varyans,...vs). köprüye ait proje dokümanlarından, TU-850 BRIDGES projesi (Uzgider vd., 1996) kapsamında yapılan testlerden elde edilen bilgilerden ve işletilmekte olan tren dizilerine ait bir takım bilgilerin yer aldığı (tren dizilerinin tertibi, hızları, seyir süreleri ve istasyonlara varış ve kalkış zamanları...vs) tren trafik belgelerinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu istatistik değerler Güvenilirlik Teorisi'nin Esasları ve geliştirilen sonlu eleman programı kullanılarak belirlenen göçme mekanizmaları ve her bir göçme mekanizması için belirlenen eleman göçme sıralarından ifade edilerek, her bir köprü elemanı için hesaplanan güvenilirlik indislerine bağlı olarak köprü taşıyıcı sistemine ait güvenilirlik indisini hesaplayan bir algoritma geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada; ülkemiz demiryolu şebekesinde hizmet

veren ve mesnet açıklığı 100 m olan bir kafes kirişli çelik demiryolu köprüsü, geliştirilen bilgisayar programı yardımıyla modellenmiş ve E43000 tipi elektrikli lokomotifin köprü üzerindeki her bir konumu için göçme mekanizmaları ve bu göçme mekanizmalarına ait eleman göçme sırası belirlenmiştir. Elde edilen göçme mekanizmaları ve eleman göçme sıraları değerlendirilerek eleman seviyesindeki güvenilirlik indislerinden yararlanılarak köprü sistemine ait güvenilirlik indisi belirlenmiş ve elde edilen analiz sonuçları yorumlanmıştır.

### **Mukavemet parametrelerinin istatistik değerleri**

Köprü taşıyıcı sistemlerini oluşturan elemanların mukavemetlerini belirleyen ve birçoğu deterministik olmayan rasgele değişkenlere ait istatistik parametreler; bu köprülerin inşa edildikleri tarihler dikkate alınarak mevcut projeleri üzerindeki bilgilerden veya köprü sistemini oluşturan elemanlardan alınacak yeter sayıda numuneler üzerinde yapılacak malzeme test sonuçlarının değerlendirilmesinden elde edilmektedir. Ancak, çoğu zaman köprü üzerindeki elemanlardan yeter sayıda eleman numunesi alınması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, mevcut demiryolu köprülerinin eleman mukavemetlerine ait rasgele değişkenlerin istatistik parametreleri, köprüye ait proje dokümanları üzerinde yazılı malzeme karakteristikleri esas alınarak ve bu tür malzeme üzerinde daha önce yapılmış malzeme testlerine dayalı çalışmalardan elde edilmiştir.

TCDD'ye ait hatlarda bulunan ve değişik tarihlerde inşa edilmiş köprülere ait malzeme karakteristiklerinin derlenmesi ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Yapılan bu çalışma kapsamında, TCDD hatlarında hizmet gören demiryolu köprülerine ait proje dokümanları üzerinde yapılan arşiv çalışmalarında özellikle 1920'den sonra inşa edilmiş çelik köprülerin St37 ve St48 çeliğinden, 1920'den evvel inşa edilmiş köprülerin ise ilk nesil hadde profili (Wrought iron) imal edilmiş oldukları belirlenmiştir. UIC'ye üye ülke demiryolu işletmelerinde bu yıllarda imal edilmiş

köprü elemanlarında yapılan deneysel çalışma sonuçlarına dayalı istatistik parametreler UIC 778-2 kodunda verilmiştir.

### **Servis yüklerine ait parametrelerin istatistik değerleri**

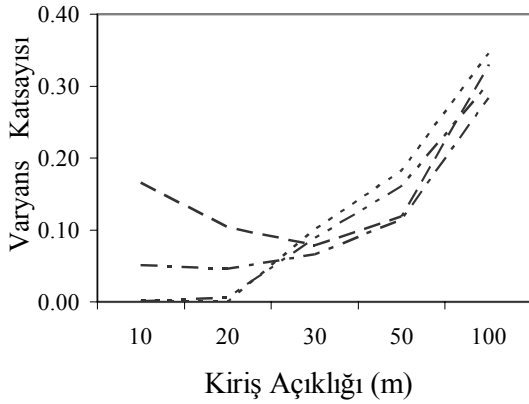
Ülkemiz demiryolu (TCDD) hatlarında bulunan köprülerin maruz kaldığı servis yüklerini belirlemek amacıyla, hatlarında kullanılan lokomotif ve vagonların karakteristik özellikleri (boyutlar, darası, yük kapasitesi, toplam ağırlık, dingil basıncı, .vs.) belirlenmiş, dingil tertiplerine göre sınıflandırılması yapılmıştır. Tren trafiği yoğunluğu bakımından diğer hatlara göre daha yoğun olan Haydarpaşa-Ankara hat kesimi ile kömür ve cevher taşımacılığının yoğun olarak yapıldığı Irmak-Zonguldak hat kesiminde bir yıl içerisinde işleyen yaklaşık 500 adet yük ve yolcu treninin teşkilleri (dizideki lokomotif ve vagon tip ve düzenleri) incelenmiştir. Bu hat kesimindeki tren trafiği bilgilerinden elde edilen istatistik değerlerden yararlanılarak, demiryolu köprülerinin maruz kaldığı servis yüklerinin olasılık dağılım fonksiyonları ile bu dağılımlara ait ortalama değer, standart sapma ve varyans katsayısı istatistik parametreleri belirlenmiştir.

Demiryolu köprülerine etkileyen servis yüklerinin, BE Çelik Demiryolu Köprülerinin Hesabı için Alman standardında yer alan S1950 ve UIC 776-1'de tanımlanan UIC 71 standart dizayn katar yükleri ile mukayeseleri yapılmıştır. Mevcut TCDD hatlarındaki servis yüklerinin belirlenmesi için bu çalışma kapsamında tren trafiklerinin incelendiği, Haydarpaşa-Ankara ve Irmak-Zonguldak hat kesimindeki mevcut demiryolu yüklerinin standart dizayn katar yüklerine göre mukayesesinde, kiriş açıklığının 30 m'nin üzerinde olması durumunda mevcut demiryolu yüklerinin S1950 katar yüküne oranı %40 ve UIC-71 katar yüküne oranını ise %50 seviyelerine kadar düşmektedir.

Olasılık dağılım fonksiyonlarını tanımlayan önemli boyutsuz büyüklük olan varyans katsayısının kiriş açıklığına göre değişimi Şekil 1'de verilmiştir. İstanbul-Ankara ve Irmak-Zonguldak hat kesimindeki tren trafiğine ait

varyans katsayısı değişiminin 0,001-0,346 arasında olduğu görülmektedir.

Irmak-Zonguldak hattında işleyen trenlerden rasgele seçilen 25 adet ve Ankara-İstanbul hattında işleyen trenlerden ise rasgele seçilen 35 adet tren dizisi olmak üzere farklı tipte lokomotif ve vagonlardan oluşan toplam 60 adet tren dizisinin 100 m açıklığındaki basit kirişte meydana getirdiği maksimum açıklık momenti değerleri kullanılarak yapılan istatistik çalışmalar sonucunda, bu kesit tesirlerine ait olasılık yoğunluk ve eklenik yoğunluk fonksiyonu Şekil 2'de verilmiştir.

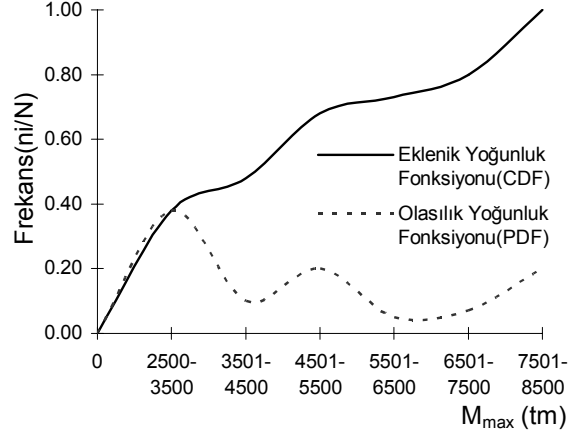


- Haydarpaşa-Ankara Açıklık Momenti Varyans Katsayısı
- ..... Irmak-Zonguldak Açıklık Momenti Varyans Katsayısı
- . - . Haydarpaşa-Ankara Kesme Kuvveti Varyans Katsayısı
- - - - Irmak-Zonguldak Kesme Kuvveti Varyans Katsayısı

Şekil 1. Varyans katsayısı değişimi

Haydarpaşa-Ankara ve Irmak-Zonguldak hat kesimlerindeki tren trafiği ile ilgili olarak bu çalışmada elde edilen istatistik bilgiler doğrultusunda belirlenen demiryolu servis yüklerine ait olasılık dağılımın teorik standart dağılım tipleri olan normal ve lognormal dağılımlara uyum göstermediği  $\chi^2$  istatistik testi sonuçlarından tespit edilmiştir. Ancak, çok sayıda değişkene sahip durum fonksiyonlarının olasılık dağılımı-

nın normal dağılıma yakınlığı dikkate alındığında, kiriş açıklığı, katar ağırlığı, dingil basıncı, dingillerin konfigürasyonu, katarların pozisyonu ve sayısı gibi birçok değişkene sahip demiryolu servis yüklerine ait olasılık dağılımı standart normal dağılım olarak kabul edilmiştir (Madsen vd., 1986).



Şekil 2. Tren trafiği olasılık dağılımı

TCDD hatlarındaki servis yüklerine ait değişkenlerin istatistik değerlerinin belirlenmesi amacıyla, yük ve yolcu tren trafiği dağılımı bakımından karakteristik özelliğe sahip Haydarpaşa-Ankara ve Irmak-Zonguldak hat kesimlerindeki yük ve yolcu tren trafiği verilerinin istatistik değerlendirme çalışmalarından elde edilen bu olasılık dağılım fonksiyonları, TCDD İşletmesi hatlarında işleyen tren trafiği için yapılan ilk çalışmanın ürünleridir.

### Geliştirilen yapı analiz programı

Karakteristik katar yükü pozisyonlarına göre köprü göçme mekanizmalarını belirlemek amacıyla, üç boyutlu yarı rijit birleşimleri olan çerçeve sistemlerin geometrik ve malzeme bakımından lineer olmayan davranışlarının incelendiği Kim vd., (2001); Kim vd., (2002) tarafından geliştirilen yöntemden yararlanılmış ve çeşitli mühendislik problemlerinin bilgisayar ile çözümü için Smith ve Griffiths, (1988)'de yer alan Fortran programlama dilinde yazılmış program ve alt-programlar incelenerek, geometrik ve malzeme bakımından lineer olmayan yarı rijit üç boyutlu çerçeve sistemlerin analizini gerçek-

leştiren bir yapı analiz programı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yapı analiz programında, üç boyutlu sistemlerin geometrik lineer olmayan davranışı eleman üzerindeki eksenel kuvvetin basınç veya çekme olmasına bağlı olarak hesaplanan stabilite fonksiyonları ile ifade edilmiştir. Malzeme bakımından lineer olmayan davranış ise, elastik sınır ötesinde elastisite modülünde oluşan tedrici azalışın, elemanda oluşan eksenel kuvvetin akma gerilmesi anındaki eksenel kuvvete oranına bağlı olarak hesaplandığı CRC'nin (The Column Research Council) Tangent Modülü ( $E_t$ );

$P \leq 0.5 * P_Y$  ise;

$$E_t = 1.0 * E \quad (1)$$

$P > 0.5 * P_Y$  ise;

$$E_t = [ 4 * ( P / P_Y ) * E * ( 1 - ( P / P_Y ) ) ] \quad (2)$$

kullanılmıştır (Kim vd., 2001). (1) ve (2) denklemlerinde  $P_Y = \sigma_Y \times A$ , P:Eksenel kuvvet, E:Elastisite modülü,  $\sigma_Y$ :Akma gerilmesi, A: Brüt kesit alanını ifade etmektedir.

Ayrıca artan gerilme seviyeleri altında eleman uçlarında plastik mafsal oluşumundan meydana gelen tedrici rijitlik kayıplarının eleman uçlarındaki eğilme momenti ve eksenel kuvvete bağlı olarak;

$P/P_Y \geq (2/9) * (M_y/M_{yn}) + (2/9) * (M_z/M_{zn})$  ise ;

$$\alpha = P/P_Y + (8/9) * (M_y/M_{yn}) + (8/9) * (M_z/M_{zn}) \quad (3)$$

$P/P_Y < (2/9) * (M_y/M_{yn}) + (2/9) * (M_z/M_{zn})$  ise;

$$\alpha = P/2 * P_Y + (M_y/M_{yn}) + (M_z/M_{zn}) \quad (4)$$

$\alpha \leq 0.5$  ise;

$$\mu = 1.0 \quad (5)$$

$\alpha > 0.5$  ise;

$$\mu = 4 * \alpha * ( 1 - \alpha ) \quad (6)$$

ifade edilmiştir (Kim vd., 2001). (3-6) denklemlerinde  $\alpha$  ve  $\mu$  :Kesitteki kısmi plastikleşmenin eleman rijit matrisinde etkisinin göz önüne alındığı katsayıları,  $M_{yn}, M_{zn}$  : y ve z eksenlerindeki nominal eğilme dayanımını,  $M_y, M_z$  : y ve z eksenlerindeki eğilme momentlerini ifade etmektedir.

Analizi yapılan yapı sistemlerinin her bir elemanın yeterli yanal destekler ile tutulduğu dikkate alınarak yanal burulmanın muhafaza edildiği kabul edilmiştir. Köprü sistemlerini oluşturan eleman kesitleri "kompak" yani kesitte herhangi bir lokal burkulma olmadan önce kesitin tam plastik momente erişebildiği kesitlerdir. Köprü elemanlarında oluşan kesit tesirleri LRFD-93 "Loads and Resistance Factor Design" da tanımlanan sınır değerlere eriştiklerinde elemanların taşıma güçlerini yitirerek göçtükleri kabul edilmiştir. Geliştirilen program kullanılarak yapılan analizlerde, köprü taşıyıcı sisteminin maruz kaldığı katar yükleri her bir konumda iteratif olarak arttırılarak, her bir yük arttırımında elemanlarda oluşan iç ve dış kuvvetlerin belirli bir toleransla eşitliği sağlanıncaya kadar sistem iteratif olarak çözülmekte ve her bir iterasyonda elemanlarda oluşan eksenel kuvvete ve uç momentlerine bağlı olarak sistem rijitlik matrisi modifiye edilmektedir.

Her bir yük artırımında elemanlarda oluşan kesit tesirlerinin sınır değerler ile mukayesesi yapılmakta, sınır değerleri aşılarak taşıma gücünü yitiren elemanların rijitlik kaybı sistemin rijitlik matrisinde dikkate alınmakta ve sınır değerleri aşılın bu elemanlar eleman sıra numarasına ve göçme sırasına göre aşılın sınır değer belirtilecek program çıktısında verilmektedir.

Taşıyıcı sistemlerin orta noktasında her bir yük adımında oluşan deplasmanın, taşıyıcı sistemin tren trafiği bakımından işlevini yitirerek göçme durumuna ulaştığı kabul edilen maksimum deplasman değeri ile kıyaslaması yapılmakta ve deplasman değerinin bu değeri aşması durumunda taşıyıcı sistemin göçmeye uğradığı program tarafından uyarılmaktadır. Taşıyıcı sistemin orta noktasında oluşan deplasman değerinin maksimum sınır değerine ulaşmadan sisteme

ait rijitlik matrisinin diyagonal üzerinde bulunan değerlerden birinin sıfır olmasıyla sistemin taşıma gücünün yitirildiği durum program tarafından ikaz edilmektedir.

### Göçme mekanizmaları ve eleman güvenilirlik indislerinin belirlenmesi

Geliştirilen yapı analiz programı kullanılarak bu demiryolu köprülerinde yapılan göçme analizlerinde, köprü taşıyıcı sistemlerinin açıklık ortasında oluşacak deplasmanın  $\delta = L / 900$  değerine erişmesi ile enleme ve boylama kiriş elemanlarından herhangi birinin birleşim (enleme - boylama kiriş birleşimi veya enleme - alt başlık kiriş birleşimi) veya eleman yük taşıma kapasiteleri göçme sınır değeri olarak belirlenmiştir. Bu sınır değerlerin aşılması halinde, mevcut boylama kirişleri üzerine ahşap travers vasıtasıyla oturan raylarda tren geçiş güvenliğini aksatacak derecede aşırı sehim değerleri oluşacağından, köprü taşıyıcı sisteminin kendisinden beklenen işlevi yitirerek göçtüğü kabul edilecektir.

Köprü taşıyıcı sisteminin güvenilirlik indisi belirlenmek istenilen çelik kafesli demiryolu köprüleri üzerinde verilen katarın farklı konumları için dingil yükleri (yük çarpanı k) iteratif olarak arttırılarak her bir k değeri için analizler, demiryolu köprülerinin taşıyıcı sistemlerinin kendisinden beklenen işlevi yitirerek göçtükleri kabul edilen ve yukarıda tanımlanan göçme sınır değerlerine ulaşıncaya kadar tekrarlanmaktadır. Katarın köprü üzerindeki her bir konumu için elde edilen göçme mekanizmalarına ait eleman göçme sıraları geliştirilen program yardımıyla belirlenmektedir. Köprü elemanlarının verilen katar yüklerine göre güvenilirlik indislerinin hesabında, Uzgider vd., (1996)'da yer alan teknik raporda verilen yöntem kullanılmıştır. Çelik demiryolu köprülerin boyutlandırılmasında emniyet gerilmeleri kavramını (Allowable Stress Design) esas alan BE Çelik Demiryolu Köprülerinin Hesabı için Alman standardı ile çelik elemanların stabilitesi için Alman Standardı olan DIN 4114'deki spesifikasyonları kullanılmaktadır. Buna paralel olarak her bir köprü elemanı için yük taşıma oranı (reyting factor) RF;

$$RF = \frac{(\sigma_y / v \times \omega) - \sigma_g}{\varphi \times \sigma_p} \quad (7)$$

ifadesi ile hesaplanmıştır. Verilen ifadede; v: Güvenlik faktörünü,  $\omega$ : Burkulma katsayısını,  $\sigma_g$ : Ölü yüklerden oluşan gerilmeyi,  $\sigma_p$ : Normalize ve faktörize edilmiş (yük çarpanı k ile çarpılmış) katar yükleri hesaplanmış olan gerilmeyi,  $\varphi$ : Titreşim katsayısını ifade etmektedir.

Yük taşıma oranı RF = 1 olacak şekilde eleman güvenilirlik indisi  $\beta$  ;

$$\beta = \frac{v(1+k_s V_s) - (1-k_r V_r)}{(1+k_s V_s)\alpha_r V_r v + \alpha_s V_s (1-k_r V_r)} \quad (8)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Denklemlerde;

$$\alpha_r = \frac{\sigma_r}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \quad (9)$$

$$\alpha_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \quad (10)$$

$$v = \frac{\sigma_y / \omega}{\varphi \sigma_p + \sigma_g} \quad (11)$$

(8-11) denklemlerinde  $k_r, k_s$  : Mukavemet ve dış yüke ait ((Nominal değer-ortalama değer) / standart değer) oranı,  $\sigma_r, \sigma_s$  : Mukavemet ve dış yüke ait standart sapma,  $V_r, V_s$  : Mukavemet ve dış yüke ait varyasyon katsayılarını ifade etmektedir.

Köprü elemanlarına ait titreşim katsayısı ( $\varphi$ )0 , Uzgider vd., (1996)'daki NATO destekli "Eski Demiryolu Köprülerinin Rehabilitasyonu" projesi kapsamında köprü üzerinde yapılan ölçümlerden yararlanılarak hesaplanan değerler kullanılmış ve köprü elemanlarına ait güvenilirlik indislerinin belirlenmesinde,  $k_s = 1.2820$ ,  $\alpha_s = 0.7100$ ,  $V_s = 0.1256$ ,  $k_r = 1.2820$ ,  $\alpha_r = 0.7100$

ve  $V_r = 0.1600$  değerleri esas alınmıştır. Yukarıda belirtilen yöntemi esas alan ve verilen normal ve faktörize edilmiş katar yüklerinin köprü üzerindeki konumlarına göre çelik kafes kirişli köprü elemanlarının güvenilirlik indislerini hesaplayan analiz programı (SAFETY) geliştirilmiştir.

### Geliştirilen güvenilirlik algoritması

Genel olarak taşıyıcı sistemlerde birden fazla sayıda göçme modundan söz edilebilir. Bu nedenle, sistem içindeki en zayıf göçme modunun belirlenebilmesi için mümkün olan her bir karakteristik göçme oluşum dizisinin tespiti ve bunların her birinin göçme olasılığının belirlenebilmesi için tetkiki gerekir. Her bir sistem karakteristik göçme oluşum dizisi, taşıyıcı sistemi oluşturan elemanlardan, yük taşıma kapasitelerini kaybetmeleri halinde taşıyıcı sistemin göçmesine neden olanlarca oluşturulur. Dolayısıyla ele alınan bir taşıyıcı sistem için göçme oluşum dizisi, taşıyıcı sistemi göçmeye götürecek eleman yük taşıma kayıplarını ve bunların sırasını içerir. Başka bir deyişle her bir karakteristik göçme oluşum dizisi, belirli bir sayıda eleman yük taşıma kaybı hallerinden oluşmakta ve bunların oluşum sırasını vermektedir. Bir karakteristik göçme oluşum dizisinin oluşumunun olasılığı, bu dizinin içerdiği taşıyıcı elemanların her birinin yük taşıma kapasitesi kaybetme olasılıklarının çarpımına eşittir. Böylece,  $P(\text{dizi } j)$  j'inci karakteristik göçme oluşum dizisinin oluşumunun olasılığı ise;

$$P(\text{dizi } j) = \prod_{i=1}^k P(E_{ji}) \quad (12)$$

burada,  $P(E_{ji})$ : j'inci karakteristik göçme oluşum dizisindeki i'inci taşıyıcı elemanın yük taşıma kaybı olasılığı, k ise bu dizideki eleman sayısıdır.

Böylece bir taşıyıcı sistemin göçme olasılığının alt limiti, bu sisteme ait karakteristik göçme oluşum dizilerinin olasılıklarının en büyüğüne eşittir. Buna göre taşıyıcı sistemin göçme olasılığı şöyle verilebilir (Bilal ve İbrahim, 1990).

$$\max_{j=1}^n P(\text{dizi } j) \leq P_{FS} \leq 1 - \prod_{j=1}^n [1 - P(\text{dizi } j)] \quad (13)$$

Burada, n: toplam karakteristik göçme oluşum dizisi sayısıdır.

Köprü taşıyıcı sisteminin katar yükünün köprü üzerindeki m farklı pozisyonunun her biri için farklı karakteristik göçme oluşum dizisi söz konusu olacaktır. Bu durumda katarın tam geçişi için (13) ifadesinden farklı bir ifade yazılabilir;

$$AS \leq P_{FS} \leq \text{ÜS} \quad (14)$$

Burada, AS her bir katar pozisyonu için söz konusu olacak karakteristik göçme oluşum dizilerinin oluşum olasılıklarının alt sınırının en büyüğü, ÜS ise üst sınırının en büyüğüdür.

Bir köprü taşıyıcı sistemi seri ve paralel taşıyıcı eleman sistemlerinin bir araya gelmesi ve bazen de hiperstatiklik özelliği göstermesi nedeniyle, öncelikle yüksek kaliteli bir algoritma ve buna dayalı bir bilgisayar programı kullanılarak muhtemel karakteristik göçme oluşum dizilerinin saptanması gerekir. Bu çalışmada böyle bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritmanın adımları aşağıda verilen c,d ,e ve f adımlarından oluşmaktadır.

- Proje dokümanlarından yararlanılarak ön modelleme yapmak
- Köprü üzerinde dinamik ve statik testler yapılarak, test sonuçlarının kullanılması suretiyle a. adımda hazırlanan köprü modelinin kalibrasyonu
- Köprü taşıyıcı sistemlerinin davranışlarını karakterize eden parametrelerin (malzeme ve yük karakteristikleri) istatistik değerlerin (ortalama değer, standart sapma, varyans,...vs) belirlenmesi
- Eleman seviyesindeki yük taşıma kaybı olasılıklarının tespiti
- Her bir katar pozisyonu için köprü taşıyıcı sistemine ait karakteristik göçme oluşum dizilerinin belirlenmesi
- (d) 'de bulunan eleman seviyesindeki göçme olasılıklarından hareketle, sistemin karakteri-

ristik göçme oluşum dizilerinin kullanılması suretiyle, tüm sistemin göçme olasılığının belirlenmesi.

### Uygulama

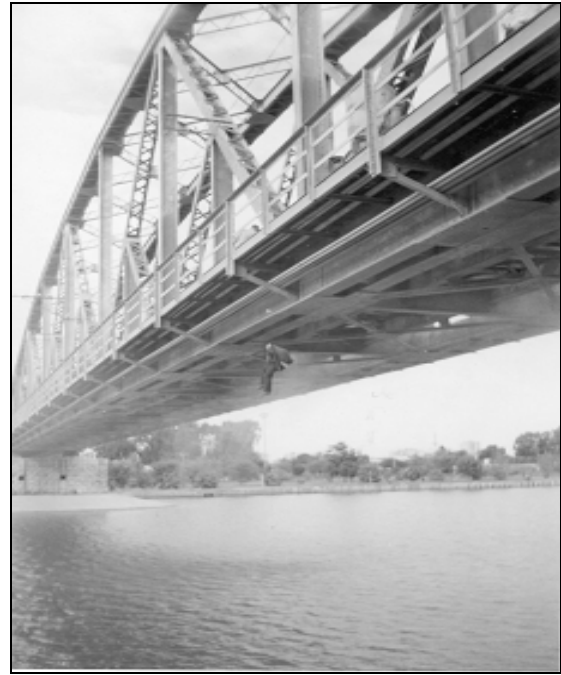
Mevcut demiryolu şebekesinin Adana-Toprakkale hat kesiminde hizmet vermekte olan çelik kafes kirişli köprü üzerinde E43000 tipi katarın (Şekil 3) 30 farklı konumu için, geliştirilen bilgisayar programı (NONKIMS) kullanılarak göçme analizleri yapılmıştır. Bu amaçla görünüşü Şekil 4'de ve planı Şekil 5'de görülen 100 m. hesap açıklığına sahip çelik kafes kirişli demiryolu köprüsü, mevcut projelerine uygun olarak, geliştirilen bilgisayar programı kullanılarak modellenmiştir. Çelik köprüye ait elemanlar St 37 çeliğinden imal edilmiş olup, birleşim elemanı olarak St 34 kalitesinde perçinler kullanılmıştır. Kafes kirişli köprünün mevcut projelerinde yer alan eleman birleşim detaylarından yararlanılarak eleman uç birleşim dayanımları hesaplanmıştır.



Şekil 3. E43000 tipi elektrikli lokomotif

Yapılan analizde, E43000 tipi katarın her bir konumu için köprü sistemini göçmeye götüren göçme mekanizmaları Şekil 6'da ve her bir göçme mekanizmasında eleman sınır değerleri veya eleman uç birleşim dayanımları aşılarak göçmeye uğrayan elemanların göçme sırası Şekil 7'de verilmiştir. Köprü göçme mekanizma-

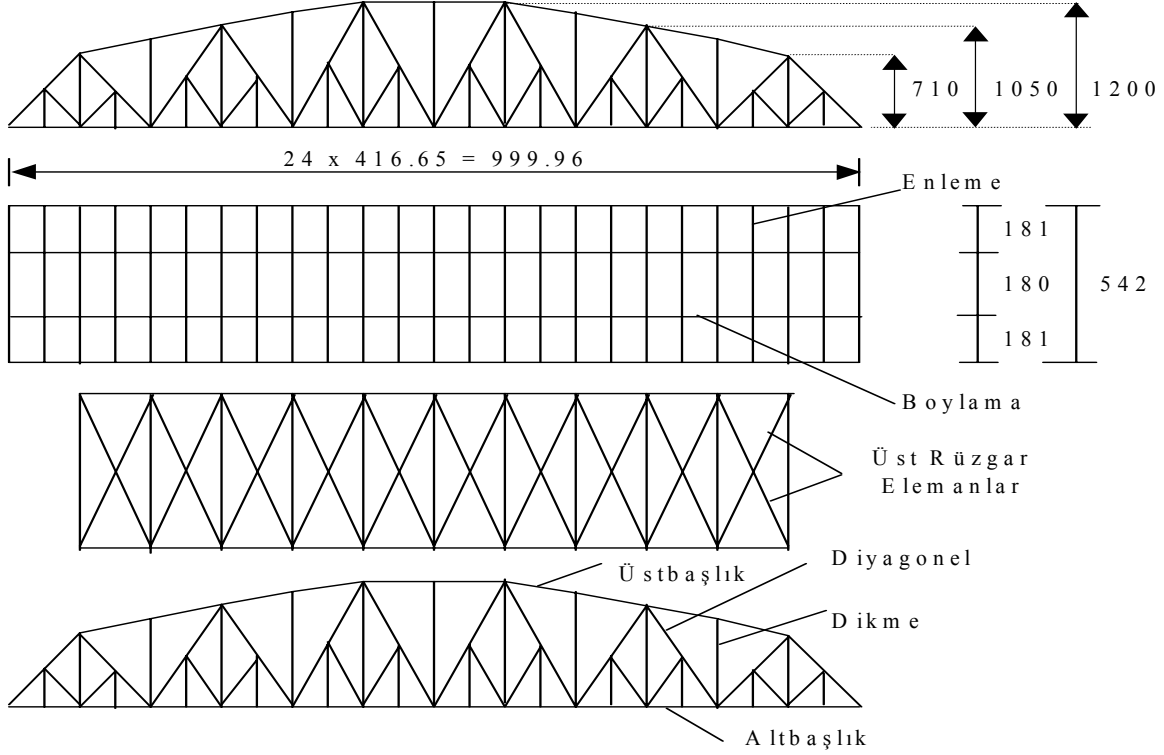
larında eleman sınır değerleri aşılarak göçmeye uğrayan elemanlar koyu kesik çizgiler ile gösterilmiştir. Göçme analizinde, müsaade edilebilir emniyet gerilmeleri yöntemi esas alınarak hesaplanan enleme - boylama kiriş birleşimi ve enleme - alt başlık kiriş birleşim dayanımlarının enleme, boylama ve alt başlık kiriş eleman sınır değerlerine göre yeterince büyük olduğu kabul edilmiştir. Normal ve faktörize edilmiş katar yüklerinin konumlarına göre elemanların güvenilirlik indisleri bu çalışmada geliştirilen bilgisayar analiz programı (SAFETY) ile hesaplanmıştır.



Şekil 4. 100 m mesnet açıklıklı çelik kafes kirişli köprü

E43000 tipi katarın çelik kafes kirişli köprü üzerinde her bir farklı konumu için belirlenen göçme mekanizmaları ve her bir göçme mekanizmasının eleman göçme sıraları ile normal ve faktörize edilmiş katar yükü konumlarına göre hesaplanan eleman seviyesindeki güvenilirlik indisleri dikkate alınarak her bir göçme mekanizmasının oluşma olasılığı denklem 12'deki ifade kullanılarak belirlenmiştir. Denklem 13 ve 14'deki ifadeler yardımıyla çelik kafes kirişli köprünün verilen katar yükü için taşıyıcı sistem güvenilirlik indisi hesaplanmıştır.





Şekil 5. 100 m mesnet açıklıklı demiryolu çelik kafes kirişli köprüünün planı

Buna göre, mesnet açıklığı 100 m olan çelik kafes kirişli köprüünün taşıyıcı sistem geçme olasılığı ( $P_{FS}$ );

$$4.62E-29 \leq P_{FS} \leq 3.96E-09$$

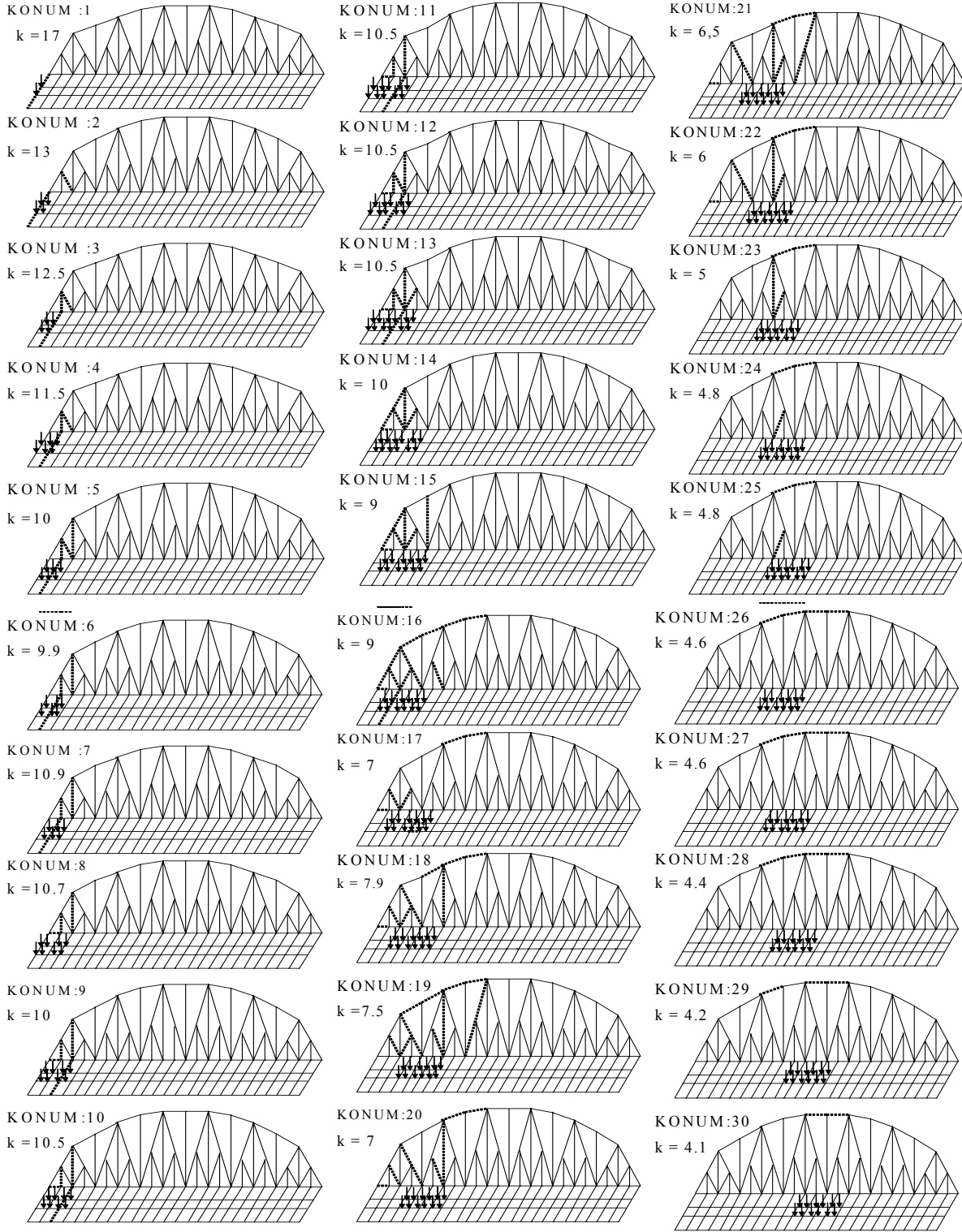
olarak belirlenmiştir.

### Sonuçlar

Bu çalışmada, geometrik ve malzeme bakımından lineer olmayan etkiler ile sistemdeki düğüm noktalarının yarı rijit birleşim

davranış özelliklerinin dikkate alındığı yetenekli bir bilgisayar programı geliştirilerek, verilen katar yüklerine göre köprülerin karakteristik geçme oluşum dizileri belirlenip, oluşturulan algoritma ile eleman seviyesindeki geçme olasılıklarından hareketle köprü sisteminin geçme olasılığını (veya güvenilirlik indisini) belirleyen pratik ve etkili bir yöntem geliştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır:

- Geliştirilen bilgisayar programı yardımıyla, yüzlerce eleman'dan oluşan çelik demiryolu köprülerinin muhtemel katar konumlarına göre geçme mekanizmaları etkin bir şekilde belirlenebilmekte ve verilen algoritma sayesinde bu tip demiryolu köprülerinin sistem güvenilirlik indisleri pratik ve etkin bir şekilde belirlenebilmektedir.
- Köprü elemanlarının süneklik seviyesi (düktilite), eleman mukavemetleri arasındaki korelasyon ile yük etkileri arasındaki korelasyon köprü sistemlerinin güvenirliliği üzerinde önemli bir rol oynar ve belirlenmesi güçtür. Problemi basitleştirmek için birçok alt ve üst sınır teoremleri geliştirilmişlerdir. Yapılan bu çalışmada geliştirilen algoritma ile köprü sistemlerinin güvenirlilik indislerinin daha dar bir aralıkta tanımlanabildiği görülmüştür.
- TCDD'ye ait hatlarda bulunan ve değişik tarihlerde inşa edilmiş köprülere ait



Şekil 6. Katar konumuna göre oluşan göçme mekanizmaları



malzeme karakteristiklerinin derlenmesi ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yapılan bu çalışmada, TCDD hatlarında hizmet gören demiryolu köprülerine ait proje dokümanları üzerinde yapılan arşiv çalışmalarında özellikle 1920'den sonra inşa edilmiş çelik köprülerin St37 ve St48 çeliğinden, 1920'den evvel inşa edilmiş köprülerin ise ilk nesil hadde profilinden (Wrought iron) imal edilmiş oldukları belirlenmiştir.

- Mevcut TCDD hatlarındaki servis yüklerinin belirlenmesi için bu çalışma kapsamında tren trafiklerinin incelendiğinde, mevcut demiryolu yüklerinin standart dizayn katar yüklerine göre yapılan mukayesede, kiriş açıklığının 30 m'nin üzerinde olması durumunda mevcut demiryolu yüklerinin S1950 katar yüküne göre %40 ve UIC-71 katar yüküne göre ise %50 seviyelerine kadar düştüğü görülmüştür.
- TCDD'nin mevcut hatlarında bulunan demiryolu köprülerinin bu standart dizayn katar yüklerine göre boyutlandırıldığı dikkate alındığında, servis yükleri altında demiryolu köprülerinde rezerv bir kapasitenin bulunduğu görülmüştür.
- Yapılan uygulamanın sonuçları değerlendirildiğinde, bu çalışmada geliştirilen ve köprü güvenilirlik seviyesini belirleyen algoritmanın, etkin nitelikte olduğu gözlenmiştir.

## Teşekkür

Çalışmaya verilen desteklerden dolayı TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü teşekkürle anılır.

## Kaynaklar

- Bilal, A. ve Ibrahim, A., (1990). Posttensioned Trusses: Reliability and Redundancy, *Journal of Structural Engineering*, **116**, 1507-1521.
- DIN 4114, *Stahl im Hochbau 13. Auflage* (1963). Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf.
- Frangopol, Dan M., (1999). *Bridge Safety and Reliability*, ASCE, USA.
- Kim, Seung-Eock ve Choi, Se-Hyu, (2001). Practical advanced analysis for semi-rigid space frames, *International Journal of Solids and Structures*, **38**, 9111-9131.
- Kim, Seung-Eock, Park, Moon-Ho, ve Choi, Se-Hyu., 2002. 3-D Second-order plastic-hinge analysis accounting for lateral torsional buckling, *International Journal of Solids and Structures*, **39**, 2109-2128.
- Madsen, H.O., Krenk, S. ve Lind, N.C., (1986). *Methods of Structural Safety*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs.
- Nowak, A.S. ve Collins, K.R, (2000). *Reliability of Structures*, Mc Graw-Hill Higher Education, Boston.
- Smith, I.M. ve Griffiths, D.V., (1988). *Programming The Finite Element Method, Second Edition*, John Willey & Sons, Chichester.
- Uzgider, E., Sanli, A., Piroğlu, F. ve Çağlayan, B. O., (1996). General report for the bridge tests conducted in 1992, 1993 and 1994, NATO Science for stability programme, TU-850-BRIDGES Research Project Report 4, *published by the Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Structural Department, Istanbul / Turkey*.
- UIC 776-1, *International Union of Railways Code*,(1994). Loads to be considered in railway bridge design, UIC, France.
- UIC 778-2, *International Union of Railways Code*,(1986). Recommendations for determining the carrying capacity of existing metal structures, UIC, France.