

## **Kirişli Hasarlı Köprülerin Yapısal Güvenilirliğe Dayalı Değerlendirmesi**

**Umut Yıldırım<sup>1</sup>**

### **Öz**

Bu çalışma ile amaç, ilgili her türlü yapıya uyarlanabilir Yapısal Sağlık İzleme yönteminin, yapıdaki eskimeyi veya anlık değişiklikleri tespit ederek gerekli hallerde yapının bakım ve onarımını ivedilikle sağlayıp ömrünü uzatmasını sağlayan bir süreç yönetimi geliştirmektir. Bunun için Avrupa Birliği Marie Curie Araştırma Programı tarafından desteklenen SmartEN projesi kapsamında, Yaşam Döngüsü Yönetiminin ve Yapı Sağlık İzleme yöntemlerinin güçlü yönlerini birleştirmek ve faydalarını göstermek için genel bir çerçeve ve süreç geliştirmek amaçlanmıştır. Yapısal sistem tanımlama araçları, gerçek modları ve yapısal tepkileri yakalama yeteneği sağlar. Ancak bu parametreler, Yaşam Döngüsü Yönetiminin için anlamlı değildir, bu parametrelerin eyleme geçirilebilir verilere dönüştürülmesi için güvenilirlik endeksine çevrilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, yapısal elemanların veya yapının kendisinin güvenilirlik endeksini veya mevcut yapısal özelliklerinde değişiklik veya değişim nedeniyle yetersizlik olasılığını bulmak için mevcut hizmet verilebilirlik veya sınır limit durum fonksiyonu için bir tür parametre veya eğilimin tanımlanması gerekir. Bu çalışmada, Avusturya'nın Reibersdorf kentinde bulunan S101 ardgerilmeli betonarme köprü girişinin güvenilirlik değerlendirilmesi incelenmiştir. Aşamalı-hasarlı test senaryosunda; ardgerilmiş donatı miktarındaki kaybın, çekme kuvvetlerinin kesit alanında da bir azalmaya yol açacağı varsayılmaktadır. Mesnet ve açıklık hali için iki ayrı güvenilirlik analizi durumu göz önünde bulundurulmuştur. Uygulanan yöntem, doğrusal olmayan bir sonlu eleman yapısal modeli, trafik yükü için olasılık modeli ve hasarlı girişin özellikleri, boyutları ve donatı yerleşimi ile ilgili dayanım modelini içermektedir. Güvenilirlik, birinci dereceden güvenilirlik yöntemi kullanılarak güvenilirlik endeksi cinsinden tahmin edilmiştir. Köprü güvenilirlikleri, nihai sınır durumları için hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Risk Yönetimi, Yapısal Güvenilirlik, Yapısal Güvenlik, Yapı Sağlık İzleme, Yaşam Döngüsü Yönetimi

## **Reliability-Based Assessment of Girder-Damaged Bridges**

### **Abstract**

This study aims to develop a process management that enables the Structural Health Monitoring method, which can be adapted to any relevant structure, to detect aging or instantaneous changes in the structure, to provide immediate maintenance and repair of the structure when necessary and to extend its life. To this end, within the scope of the SmartEN project supported by the European Union Marie Curie Research Program, it is aimed to develop a general framework and process to combine the strengths of Life Cycle Management and Structural Health Monitoring methods and demonstrate their benefits. Structural system

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Doğu Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazimağusa e-posta / e-mail: [umut.yildirim@emu.edu.tr](mailto:umut.yildirim@emu.edu.tr) ORCID No: 0000-0002-5919-1695

identification tools provide the ability to capture real modes and structural responses. However, these parameters are not meaningful for Lifecycle Management, these parameters need to be translated into reliability index to be converted into actionable data. Therefore, to find the reliability index or failure probability of the structural elements or the structure itself, it is necessary to define some kind of parameter or trend for the current serviceability limit or ultimate limit state function. In this research, the structural reliability evaluation of S101 post-tensioned reinforced concrete bridge girder located in Reibersdorf, Austria was investigated. In the progressive-damaged test scenario; it is assumed that the loss in the amount of post-tensioned reinforcement will also lead to a reduction in the cross-sectional area of the tensile forces. Two separate reliability analysis cases were considered for the support and span of the S101 Bridge. The applied method included a nonlinear finite element structural model, a probability model for traffic load, and a resistance model related to the properties, dimensions and reinforcement placement of the damaged girder. Structural reliability was estimated in terms of reliability index using the first order reliability method. Bridge reliability was calculated for ultimate limit states.

**Keywords:** Life-Cycle Management, Risk Management, Structural Safety, Structural Health Monitoring, Structural Reliability

## 1. GİRİŞ

Güvenilirlik teorisinin uygulanması, güvenlik, servis kolaylığı ve dayanıklılık açısından yapısal tasarımın iyileştirilmesiyle sonuçlanmıştır. Modern tasarım şartnamelerinde güvenilirlik teknikleri giderek daha fazla kullanılmaktadır. Günümüzde birçok araştırmacı, yeni yapısal güvenilirlik analizi yöntemlerinin daha da geliştirilmesi üzerinde çalışmaya devam etmektedir. Uzun yıllar boyunca, yapısal güvenliği etkileyen çeşitli parametrelerin rastgele doğası mühendislerin ilgisini çekmiştir. Doğa yasaları hakkında daha fazla bilgi toplanana kadar, 'deneme-yanılma' ve sezgi yoluyla yapısal güvenliği sağlıyorlardı. Günümüzde mevcut olan matematiksel teoriler, yapısal güvenlik değerlendirmeleri için rasyonel bir temel sağlamaya yetecek kadar veri ve sonuç ilişkisi olduğundan malzeme ve yapısal davranışı gerçeğe yakın ölçüde tanımlamaktadır (Nowak ve Collins,2000).

Max Mayer 1926 yılında ve Wierzbicki 1936'da yük ve dayanım parametrelerinin rastgele özelliklere sahip olduğu ve her bir yapının sonlu ve sınırlı bir dayanım yetersizliği olasılığına sahip olduğunu ve yapısal güvenlik problemlerinin çözümünde matematiksel bir formülasyonun gerçekleştirilebileceğini gösterdi. Max Mayer ve Wierzbicki'nin geliştirdiği kavramlar 1950'lerde Freudenthal tarafından geliştirildi (Nowak ve Collins, 2000). 1960'larda, limit kapasitesi ve yapısal dayanımın analizindeki olasılık kavramları ilk olarak araştırmacılar Augusti ve Baratta (1972) tarafından geliştirilmiştir. Koşullu olasılık ilkeleri kullanılarak kiriş-kolon çerçeve yapılarının limit kapasitesi Corotis ve Nafday (1989) tarafından analiz edildi.

Yapısal yetersizlik olasılığını değerlendirmek için pratik araçların ve verimli yöntemlerin kapsamlı gelişimiyle ilk olarak 1960'ların sonlarında ve 1970'lerin başlarında Cornell ve Lind tarafından yapılmıştır. Cornell ve Lind'in yaklaşımları, limit durum fonksiyonunu, kullanılan rastgele parametrelerin ortalama değerlerini kullanıp, tahmin ederek, lineerleştirilmiş bir limit durum fonksiyonu olarak kullandılar (Nowak ve Collins, 2000). Yetersizlik olasılığının tahmini Hasofer (1974) tarafından önerilmiştir. Basitleştirilmiş prosedür, sınır koşullarıyla (tüm değişkenler için tahmini bir sınır durumu ve "tasarım noktasında" tanımlanan bir olasılık) doğrusal olmayan bir matematiksel programlama problemini içeriyordu.

Çeşitli dağılımların ilişkisiz rastgele değişkenlerinin standartlaştırılmış normal dağılımlara dönüştürülmesi Rackwitz ve Flessler (1978) tarafından önerilmiştir. Honfi vd. (2012), şu anda modern güvenilirlik analizinde kullanılan başlıca araçlardan biri olan ilişkili rastgele değişkenlerin standartlaştırılmış forma dönüştürülmesi için Rosenblatt (1952) dönüşüm prosedürünü kullanmışlardır (Nowak ve Collins, 2000). Yaygın olarak kullanılan bir başka dönüşüm, Der Kiureghian ve Liu (1986) tarafından çalışılıp sunulan Nataf dönüşümüdür. Yaygın

olarak kullanılan güvenilirlik analizi yöntemleri, tasarım noktasında birinci veya ikinci dereceden güvenilirlik yöntemlerini kullanılarak limit durum fonksiyonunun yaklaşıklığına dayanır. Gelişmiş ikinci dereceden güvenilirlik yöntemleri, (Breitung, 1984; Fiessler vd., 1979; Nowak ve Collins, 2000) gibi araştırmacılar tarafından detaylandırılmıştır. Simülasyon teknikleri, yetersizlik olasılığını tahmin etmek için başka bir yaklaşımdır. En popüler olanı Nowak ve Collins (2000) tarafından kullanılan Monte Carlo Metodu simülasyon tekniğidir. Simülasyon tekniklerinin kullanılmasıyla yetersizlik olasılığının belirlenmesinin doğruluğu sınırlıdır ve yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmek için çok sayıda sayısal simülasyon gereklidir. Bu yöntem, fiziksel testlerin pahalı olduğu durumlarda çok kullanışlı ve özellikle pratik bir araç haline gelir.

Yapısal sistem güvenilirliği pek çok araştırmacının ilgilendiği bir alandır. Köprüler genellikle seri ve paralel yapısal sistemlerin bir kombinasyonundan oluşur. Yapısal göçme mekanizması davranışının ve yapısal taşıyıcı elemanlar arasındaki ilişki derecesinin belirlenmesi, değerlendirilmesi çok zor, hatta çoğu zaman imkansızdır. 1982'de Moses, artımlı yük yaklaşımını ortaya koyarak ve hem sünek hem de gevrek yapısal bileşenler için göçme mekanizma davranışını belirlemek için bir prosedür önerdi. Göçme mekanizmasının tanımlanması, 1988'de Rashedi ve Moses tarafından da tartışıldı. Köprü değerlendirmesine uygulanan güvenilirlik modelleri, 1988'de Nowak ve Tharmabala tarafından ele alındı. 1987'de Moses ve Verma, köprülerin yük taşıma kapasitelerini güvenilirlik ilkeleriyle değerlendirmek için bir yük ve direnç yaklaşımı kullandı, Zhou 1987'de bir köprünün sistem güvenilirliğini hesaplamak için birbirine entegre örnekleme tekniği geliştirdi. Hem Tantawi hem de Zhou, köprü sistem güvenilirliğinin kiriş güvenilirliğinden daha yüksek olduğunu buldu (Nowak ve Collins, 2000). Yapısal sistem güvenilirliği analizi için pratik prosedürler 1990'da Nowak ve Zhou ve 1991'de Tabsh ve Nowak tarafından önerildi. Göçme, aşırı kabul edilemez bir sapma olarak tanımlandı. 1999'da Estes ve Frangopol, beş bitişik kirişten üçünde taşıma kapasitesi yetersizliğinin meydana geldiğinde hasar oluşumu meydana geldiğini varsaydılar. Ditlevsen, hasar olasılığının sınırlarını hesaplamak için koşullu olasılığı kullandı, Grigoriu kırılman elemanlara sahip paralel bir sistemi tartıştı ve Rackwitz, korelasyonun sistem performansı üzerindeki etkisini fark etti (Nowak ve Collins, 2000).

Son yıllarda, yapısal sistemler için izleme teknikleri ve algılama sistemleriyle, yeni veya mevcut yapıların ani değişen durumlar için müdahale planlamasında (bakım, onarım, rehabilitasyon), giderek daha önemli hale geldiler. Bununla birlikte, güvenilirlik değerlendirme ve tahmin modellerinde yapısal izleme verilerine dayalı olarak tahmin modellerinin güncellenmesi müdahale stratejilerini etkilediğinden, uygulanan stratejiler izleme sistemleri sayesinde mevcut bütçelerin verimli bir şekilde harcanmasına katkı sunmuştur (Frangopol vd., 2008). Bakım ve onarım bütçelerinin optimum dağılımı için yaşam boyu maliyet değerlendirmesi gereklidir. Yaşam döngüsü için objektif karar verme, doğru ve ayrıntılı veriler ve güvenilir tahmin araçları gerektirir (Catbas and Frangopol, 2008). Okasha ve Frangopol (2012) işte bu nedenle, yapısal sağlık izlemesinden elde edilen bilgilerin bir Yaşam Döngüsü Yönetimi çerçevesinde bütünleştirilmesi için bir yaklaşım önermiştir. Bu yaşam döngüsü sistem performansı, Bayes güncelleme kavramları kullanılarak (Straub, 2014) Yapısal Sağlık İzleme ile elde edilen bilgiler dahil edilerek nicelleştirilir. Etkili ve verimli hizmet ömrü yönetimi, bozulan bir yapının yapısal güvenliğini sağlaması ve hizmet ömrünü uzatması için esastır. Hizmet ömrü yönetiminde karşılaşılan zorluklar, yapısal hasarların tespit edilmesi ve tanımlanması, yapısal performansın değerlendirilmesi ve tahmin edilmesi ile ilgili belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Kim ve Frangopol (2018) eşzamanlı olarak optimize edilecek beş hedefe dayalı olasılıksal bir optimum Yapı Sağlığı İzleme planlaması önermektedir: (a) beklenen hasar tespit gecikmesini en aza indirmek, (b) beklenen bakım gecikmesini en aza indirmek, (c) hasar tespit zamanına dayalı güvenilirlik endeksini en üst düzeye çıkarmak, (d) beklenen hizmet ömrü uzatmasını en üst düzeye çıkarmak, ve (e) beklenen yaşam döngüsü maliyetini en aza indirmek. Belirsizlik altındaki yapıların ve altyapıların yaşam döngüsü performansını modelleme, analiz etme,

tasarlama, sürdürme, izleme, yönetme, tahmin etme ve optimize etmeye ilişkin kararlar, toplam beklenen maliyet dikkate alınarak, entegre bir güvenilirliğe dayalı yaşam döngüsü çok amaçlı optimizasyon çerçevesi tarafından desteklenmelidir (Frangopol, 2018). Günümüzde, akıllı telefonlar, kullanışlı kablosuz sensör ağı bileşenleri yardımıyla, kendi kendini yöneten (merkezi veya dağıtılmış), otonom bir Yapısal Sağlık İzleme sistemi oluşturabilir ve yapısal mekanizmalar kullanıcı ile algılama ve sunucu bilgi işlemiyle birleştirebilir ve ardından güncellenmiş sonlu elemanlar modeline dayalı olarak yapısal güvenilirliği değerlendiren siber-fiziksel sistemin bir metodolojisini ve çerçevesi uygulanabilir (Ozer ve Feng, 2019).

Genellikle altyapı için önem taşıyan pahalı, büyük ve uzun hizmet vermesi gereken yapıların yapısal sistem güvenilirliği analizi için yapılacak hesaplamaların yapının ömrü boyunca birçok kez tekrarlanması gerektiğinden verimli bir yapısal analiz, güvenilirlik, değerlendirme ve karar verme prosedürü gerektirir; örnek olarak bir köprü gibi yapısal sistem güvenilirliğini aralıklı veya aralıksız olarak izlemek, tedbir almak, gerekli bakım-onarımı yapmak için Yapısal Sağlık İzleme teknikleriyle birlikte proaktif yönetim mekanizmaları geliştirerek yapının hizmet yükleri altında sorunlar yaşanmaması ve ömrünü uzatmak için güvenilirlik tekniklerinin verimli bir şekilde birleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma ile amaç, S101 köprüsünün yapısal elemanlarının aşamalı-hasarlı testi sırasındaki göçme olasılığı ve yapısal güvenilirliğinin gerekli ve yeterli sistem tanımlama araçlarıyla sağlanabileceğini ortaya koymaktır.

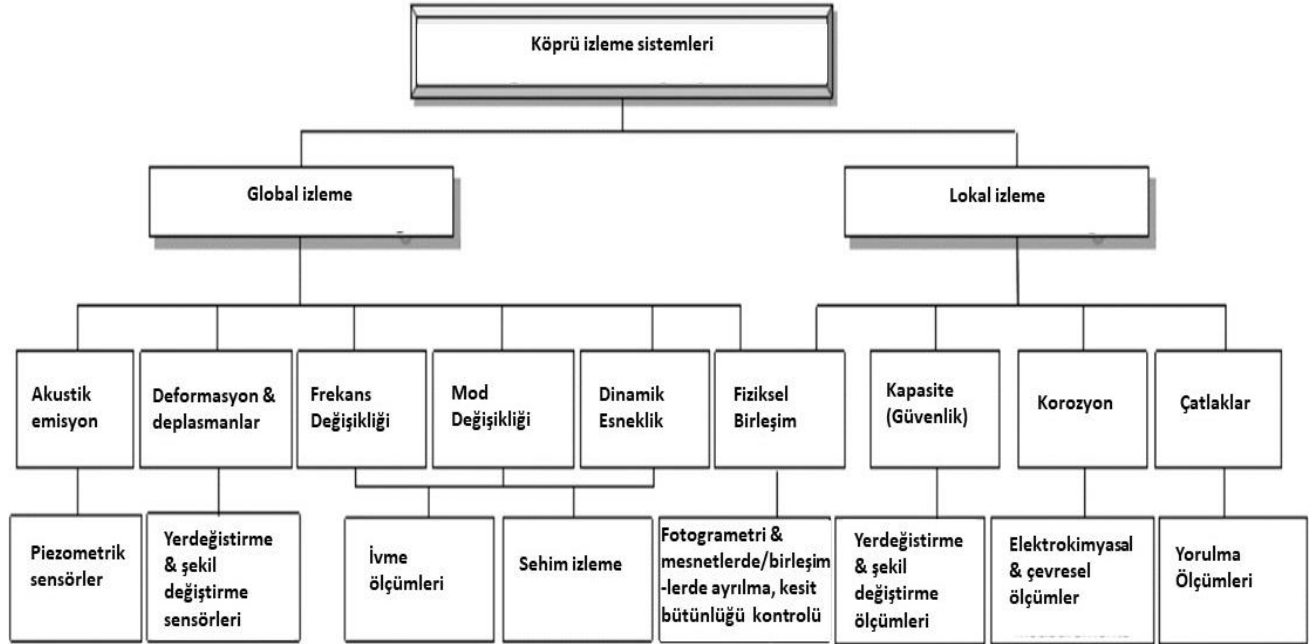
## **2. GÜVENİLİRLİĞE DAYALI ANALİZ ÇERÇEVELERİ**

Avusturya'daki S101 köprüsünün global yapısal sistemin tanımlanmasından sonra ikinci adım, aşamalı hasar verilmiş veya genel ifade ile hasar almış ve hasar alması beklenen, kontrolü gerektiren bir köprünün, yapısal güvenlik açısından güvenilirlik yöntemlerini kullanarak analizinin yapılmasıdır. Buradaki ana fikir, hasarı lokalize etmek ve elde edilebilecek mümkün olan en iyi bilgiden yararlanan veya herhangi bir ilgili yapıya uyarlanabilir bir çerçeve ve süreç geliştirmektir. Bu bilgiler, yapıdaki veya yapı elemanlarındaki hasar durumunun niteliği ve niceliği için teorik ve ampirik modelleri, görsel inceleme verilerini ve Yapı Sağlık İzleme yoluyla elde edilen verileri içerebilir. Yapı Sağlık İzleme, yapısal elemanlarda deformasyon/şekil değiştirme miktarı, yapısal sistemin göreceli yer değiştirmesi ile ilgili gerçek modları ve gerçek yapısal tepkileri yakalama yeteneği sağlar. Ek olarak, mevcut hasarları etkin bir şekilde izleyebilen teknolojiler mevcuttur. Şekil 1, global ve yerel izleme stratejilerini, toplanan bilgi türünü ve ilgili ölçüm türlerini gösterir.

Bu bilgilerin yardımıyla, ilgili yapının veya yapı elemanlarının belirli zaman aralıklarında veya anlık olarak yapısal güvenilirlik endekslerini güncellemek ve hesaplamak için kullanılabilir. Açık ki, Yaşam Döngüsü Yönetimi ve Yapısal Sağlık İzleme paydaşlarının her biri, her bir yaklaşımın sunduğu güçlü yanları birleştirerek fayda sağlar; yapısal sistem veya elemanın güvenilirlik endeksleri yardımıyla hasarı önleyici tedbirler almak, bunun için gerekli bakım ve onarımı sağlamak hem maliyetlerin azaltılmasını sağlar; aynı zamanda da karar verme sürecine katkıda bulunur. Yapısal güvenilirliğe dayalı yaşam döngüsü yönetimi, örnek olarak köprü yöneticilerine maliyet, güvenlik ve duruma ilişkin pratik bir öngörücü görüş sunar, ancak birçok bakımdan gerçek yapısal performans hakkında bilgi eksikliği vardır. Yapısal Sağlık İzleme teknikleri, bir yapı üzerindeki yapısal davranışı ve talepleri etkili bir şekilde yakalar, ancak bu bilgiyi köprü yöneticileri için eyleme geçirilebilir verilere çevirmede çok etkili değildir.

Yapısal Sağlık İzleme öncelikli olarak hasar tespitine ve aşamasına odaklanmışken, köprü yöneticileri servis verilebilirlik ve yapısal güvenilirlik konularına odaklanır: " (a) Yapının yük taşıma kapasitesi veya dayanımı değişti mi? (b) Tek tek yapısal elemanların ve tüm yapısal sistemin yetersiz dayanımda olma olasılıkları ve derecesi nedir? (c) Hasarın önlenmesi için hangi bakım yapılmalıdır? ve (d) Trajik şekilde göçme dayanım yetersizliğinin olasılığı nedir?"

Sonuç olarak, Yapısal Sağlık İzlemesi'nin amacı, bir yapının güvenliği ve güvenilirliği ile ilgili rasyonel karar vermeyi ve güvenlik endişeleri ortaya çıktığında yapılacak uygun eylemleri kolaylaştırmak olmalıdır.



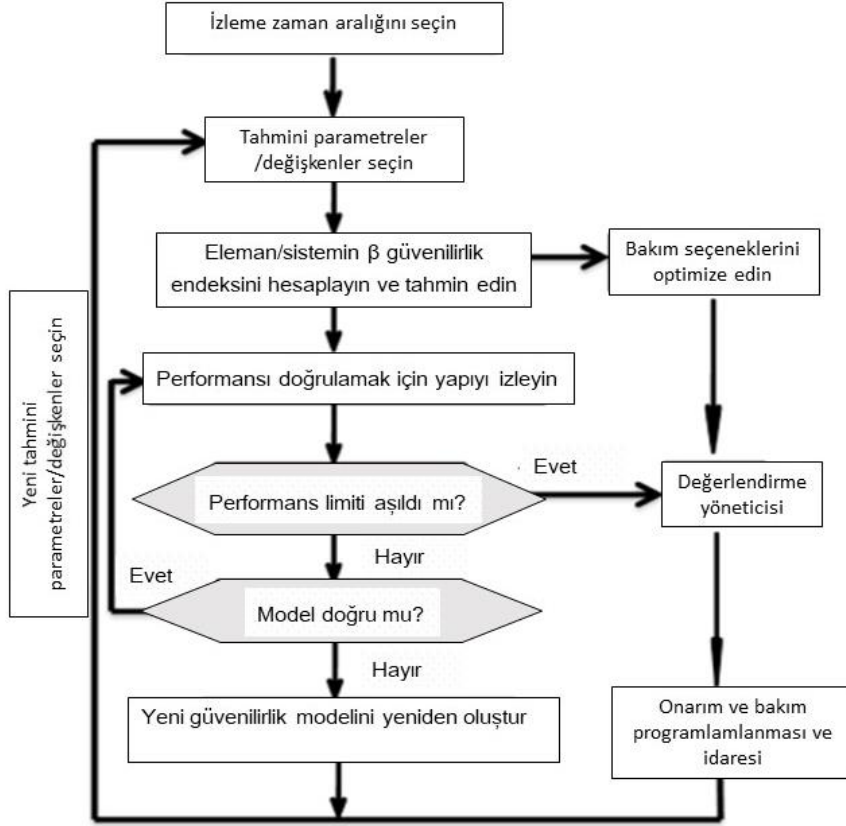
Şekil 1. Köprülerde ortak izleme stratejileri (Messervey, 2008).

Çerçeve eylem planı, performans fonksiyonlarını kullanarak kritik hasar durumlarının seçilmesi ve modellenmesiyle başlar. Bu denklemlerdeki herhangi bir rastgele değişkenin duyarlılık analizi, Yapısal Sağlık İzleme aracılığıyla hangi rastgele değişkenlerin izlenmesinin en kritik olduğunu belirler. Bu, görev odaklı bir izleme çözümünün geliştirilmesine olanak sağlar. Bu ilk çerçeve planı, izleme çözümü için kalıcı olabilir veya sahaya getirilen mobil ekipmanla spesifik test yapılabilir. Yapısal Sağlık İzleme verileri toplandıktan sonra rastgele değişken giriş parametrelerini doğrulamak veya iyileştirmek için kullanılır. Buna göre Yaşam Döngüsü Yönetimi modeli ayarlanır ve güvenilirlik endeksi yeniden hesaplanır.

Yaşam Döngüsü Yönetimi çerçevesinin işlevselliği ve güçlü bir yönetim aracı sağlama potansiyeli için, varlık yöneticisi ile uygulanmak istenen yönetim prosedürün birbiriyle ya da bir sorumlu varlık değerlendirme uzmanının programlanmış olan sistemle etkileşime geçmesini sağlayan yazılım ve/veya donanıma veri girişi gerektirir. Yapısal Sağlık İzleme, performans kriterlerinin ve sınır durumlarının oluşturulmasına ve gerekli hallerde ikaz vermesine izin verir. Bunlar kolaylıkla kritik gerilme seviyeleri, herhangi bir birleşimin dönmesi, korozyonun başlaması, çatlak genişliği, eğrilik, sehim veya inceleme veya bakım gerektiren kritik yükler olabilir. Bu uyarı işaretleri bir kez belirdiğinde, varlık yöneticisi için belirli bir ilgi alanı hakkında eyleme geçirilebilir bilgileri sağlar. Yapı ve güncelleme süreci, Yaşam Döngüsü Yönetimi modeli ve Yapısal Sağlık İzleme verileri birbirinden farklılaşana kadar herhangi bir işlem gerektirmez. Bu noktada, rastgele değişken girdi verileri değiştirilir, Yaşam Döngüsü Yönetimi modeli güncellenir ve varlık yöneticisine güvenilirlik, maliyet, kullanım ömrü ve bakım seçeneklerinin güncellenmiş bir optimizasyonu sağlanır. Periyodik veya sürekli proaktif yönetimin genel çerçevesi, Şekil 2 'de görüldüğü gibi modellenabilir (Messervey, 2008).

İstatistiksel bilgiler, ilk tasarım verilerinin yanı sıra ilgili tüm inceleme ve bakım kayıtları veya eğilimlerinin temel girdisini sağlar. Limit durum fonksiyonu değişkenlerinin her birine, arka plandaki istatistiksel bilgilerini yansıtan bir Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu atanır. Analiz programı, limit durum fonksiyonları tarafından kullanılan parametrelerin her biri için değerler

belirler (atanan yoğunluk fonksiyonlarına göre) ve Monte Carlo Simülasyonu veya Birinci ve İkinci Derece Güvenilirlik Yöntemlerini kullanarak güvenilirliği hesaplar.



Şekil 2. Periyodik veya sürekli proaktif yönetimin çerçevesi (Messervey (2008)'den uyarlanmıştır)

Kullanılan tahmin tekniği, performansı tanımlamak için hasarmekanizması ve sınır durum fonksiyonlarının tanımlarına dayanır. Güvenilirliğe dayalı kullanılan yöntem, veri girişi yapılma yeteneği sağlar; Bilgisayar programlama bilgisi gerektirmeden kayıtları düzenleme ve limit durum fonksiyonlarının test edilmesine olanak sağlar. Denetim ve bakımla ilgili istatistiksel veri tabanlarını sürekli olarak güncelleyerek, atanan dağılımlar mevcut koşulların yanı sıra geçmiş eğilimleri de yansıtacak ve böylece etkin bir tahmin için daha gerçekçi bir temel sağlayacaktır.

### 3. YAPISAL GÜVENİLİRLİK

Güvenilirlik, yetersizlik olasılığının matematiksel bir formülasyonudur. En temel haliyle anlam olarak güvenilirlik şu şekilde tanımlanabilir;

$$\text{Güvenilirlik} = 1 - p_f \quad (1)$$

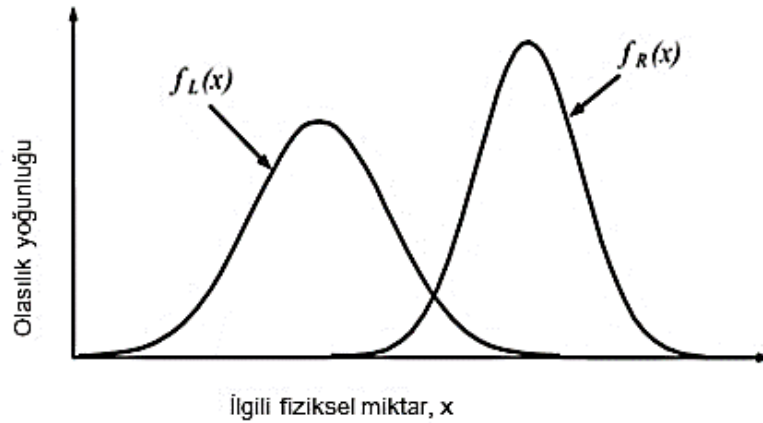
Yapısal güvenilirlik, klasik güvenilirliğin bir alt bilim dalı veya yakın çalışma alanıdır. Bir biri ile yakından ilişkilidir, ancak aynı zamanda birkaç keskin ayrım da vardır. Yapısal güvenilirlik ihtiyacı (klasik güvenilirlikten farklı olarak) iki faktörden kaynaklanmaktadır. Birincisi, toplumun kullanımında olan altyapıların uzun ömürleri gereği, ilgili aşırı yüklerin rastgeleliği ve seyrekliği ve çevresel koşulların dinamik doğası (sürekli değişen), ilgili tüm yapı türlerini ilgili tüm koşullarda istatistiksel olarak gözlemlemeyi imkansız hale getirir (yaşam süresini tanımlamak için). İkincisi, yapısal uygulamalar çoğunlukla gözlemlenmesi imkansız olabilecek performans ölçüleriyle ilgilidir. Bu performans ölçüleri veya gereksinimler, sınır durumlar

olarak adlandırılır ve sonuçta ortaya çıkan güvenilirlik hesaplamaları, bu sınır durumlarının ihlali ile ilgilidir.

Genel olarak ve güvenlik açısından, bir yapının kapasitesi R (dayanım, direnç, yorulma ömrü vb.), yük talebi L'yi (yük, moment, gerilme aralıkları, yorulma döngüleri vb.) aşarsa, bir yapı güvenli kabul edilir;

$$R > L \vee R - L > 0 \vee R/L > 1 \quad (2)$$

Bir yapının yük taşıma kapasitesi, beklenen yükler, her biri ile ilişkili belirsizlikler ve yüklerin etkileri rastgele değişkenlerle temsil edilir. Rastgele değişkenler farklı değerler alabilir ve herhangi bir belirli değer olasılığı, olasılık yoğunluk fonksiyonu ile tanımlanır. Rastgele bir değişkeni tanımlamada kullanılan en önemli ölçütler, ortalama, medyan, mod değerleri ve bir dağılım ölçüsü sağlayan standart sapmasıdır. Yapısal güvenilirlik, performans fonksiyonu  $g = R - L$ 'nin olasılıksal bir değerlendirmesini yapmak için kullanılır; burada R ve L, sırasıyla dayanım ve yük etkisidir (bkz. Şekil 3).



Şekil 3. Yapısal güvenilirliğin grafiksel gösterimi

#### 4. YAPISAL GÜVENİLİRLİK PROSEDÜRÜ

Yapılar ve bileşenleri, inşaat ve hizmet sırasında uygulanan eylemleri hesaba katmak için iyi performanslarını garanti edecek ve arzu edilen bir güvenilirlik düzeyine sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu amaçla, inşaat mühendisliği olasılıksal bir güvenilirlik değerlendirmesini kullanır. Yeni yapıların tasarımı ve mevcut yapıların değerlendirilmesi, aşıldığında yapısal hasara yol açan (nihai) veya yapıyı kullanmayı imkansız kılan (hizmet verilebilirlik) sınır durumlarının doğrulanmasını gerektirir.

Eylemler (yükler) ve yapısal dayanım, yük taşıma kapasitesi, R), bir yapının durumunu kesin olarak etkileyen değişkenlerdir. Malzemenin mekanik özelliklerinden, bir yapının geometrisinden, yüklerden vb. gelen belirsizlikleri içerir. Bu belirsizlikler ancak olasılık kullanılarak ölçülebilir. Bu nedenle yapıların tasarımı, kararların belirsizlik ve sınırlar altında alındığı bir süreçtir. Gerçek girdi verileri ile matematiksel bir olgusal model arasındaki rasyonel tutum ve anlaşma, yapısal güvenilirlik endişesidir.

Bir yapının güvenilirliği, bir yapının işlevi ve istenen performansı ile ilgili tasarım gerekliliklerini yerine getirmemesi durumudur. Bu, bir yapının çökmesi, yapısal bir dayanımdaki yetersizlik veya başka bir eksiklik, bir yapının yerine getirilmemiş hizmet talepleri, yani aşırı deformasyonlar, titreşimler vb. olabilir. Yapıların genellikle bir dizi olası hasar senaryoları

vardır. Yapıların çoğu için tüm hasardurumlarını incelemek, kritik ve öncelikli durumlar dışında imkansızdır. Bu nedenle, temsili dayanımdaki yetersizlik senaryoları seçilmelidir. Analiz genellikle belirtilen hasar durumlarına göre yapısal güvenilirliğin bir tahminini içerir. Yapıdaki tüm şekil/yer değiştirme durumları ayrı ayrı ele alınmalıdır. Bu nedenle, bir yapının güvenilirliği, sistemin belirli bir süre boyunca belirli bir sınır durumu ile ilgili belirli bir hasar durumuna ulaşmama olasılığıdır.

## 5. STANDART DEĞİŞKENLER VE OLASILIK DAĞILIMLARI

Rastgele bir değişkenin temel olasılık özellikleri, ortalama, varyans ve standart sapma açısından tanımlanır. Bir dağılım işlevi, rastgele değişkenlerin olasılık özelliklerinin tanımını tamamlar, ancak bazen bilinmezliğini korur. İki tür rastgele değişken vardır: kesikli ve sürekli. Ayrık bir rastgele değişken yalnızca ayrık değerler alabilir. Olasılığı, olasılık kütle fonksiyonu tarafından verilir,  $P_x(x_i)$ . Sürekli bir rastgele değişken, sürekli bir değer aralığı alabilir ve olasılığı ile tanımlanır,  $f_x(x)$ .

*Ortalama:* Rastgele bir değişken üzerindeki tüm gözlemlerin ortalamasıdır. Orijine ilişkin ilk an olarak da tanımlanır. Sürekli rastgele değişkenler için ortalama ( $\mu$ ) şu şekilde hesaplanabilir:

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f_x(x) dx \quad (3)$$

Ayrık rastgele değişkenler için ortalama şu şekilde verilir:

$$\mu = \sum_{i=1}^n x_i \cdot P_x(x_i) \quad (4)$$

Tüm n gözlemlere eşit ağırlıklar verilirse, o zaman ayrık bir rastgele değişkenin ortalaması şu şekilde verilir:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

*Varyans:*  $\sigma^2$  ortalamasının ikinci momentidir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 \cdot f_x(x) dx \quad (6)$$

Ayrık değişken için varyans şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \cdot P_x(x_i) \quad (7)$$

Tüm n gözlemlere eşit ağırlık verilirse, varyans aşağıdaki gibi olur:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (8)$$

*Standart Sapma* ( $\sigma$ ), bir olasılık dağılımı varyansın karekökü olarak tanımlanır.

*Varyasyon Katsayısı*, olarak tanımlanan boyutsuz bir niceliktir.

$$\text{Varyasyon Katsayısı} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (9)$$

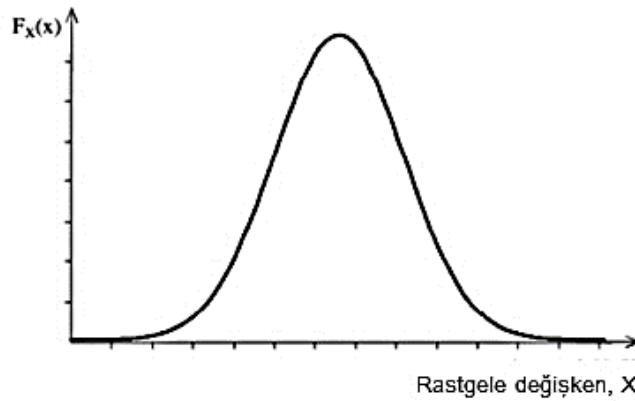


*Olasılık Dağılımları:* Ayrık ve sürekli dağılımların birçok türü vardır. En yaygın olarak kullanılanlar sürekli dağılımlardır: tek tip, normal, log normal, üstel ve gama. Bu bölümde normal dağılım sunulmuştur, çünkü bu çalışmada kullanılan tek dağılım budur. Dağılımlarla ilgili daha fazla ayrıntı, örneğin [12]'de bulunabilir.

*Normal dağılım (Gauss dağılımı):* En yaygın olarak kullanılan olasılık dağılımıdır ve aşağıda verilen olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahiptir.

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{x \cdot \pi}} \cdot \exp \left[ \frac{-1}{2} \cdot \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (10)$$

Bu işlev, Şekil 4'te gösterildiği gibi grafiksel olarak temsil edilir.



Şekil 4. Normal bir rastgele değişkenin Olasılık ve Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu

Standart normal dağılım,  $\mu_x = 0, \sigma_x = 1$  parametrelerini kullanan Gauss dağılımının özel bir durumudur. Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu  $\phi(z)$  ve Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu  $\Phi(z)$  olarak ifade edilir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[ \frac{-1}{2} \cdot (Z)^2 \right] = f_z(z) \quad (11)$$

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[ \frac{-1}{2} \cdot (Z)^2 \right] dz \quad (12)$$

## 6. GÜVENİLİRLİK ENDEKSİ

Güvenlik endeksi olarak da adlandırılan değerlendirme güvenilirlik endeksi, dayanım yetersizliği olasılığının etkili bir ölçüsüdür. Yapısal bileşenlerin güvenilirliğini hesaplamak için birkaç yöntem vardır: gelişmiş birinci ve ikinci dereceden ikinci moment yöntemleri, simülasyon teknikleri, vb. 1960'ların sonlarında birinci dereceden ikinci moment formülasyonu Cornell (1967) tarafından geliştirildi. Bu yöntemlerde daha ileri gelişmeler Hasofer (1974) ile Rackwitz ve Flessler (1978) tarafından yapılmıştır. Birinci dereceden ikinci moment yöntemleri birçok pratik problemi çözmek için kullanılabilir. İkinci moment kavramı, genellikle emniyet ve güvenilirliğin pratik nicelleştirilmesinde kullanılır. İnşaat mühendisliği tasarımında kullanılan şartnamelerin kalibrasyonlarında, örnek olarak emniyet gerilmeleri ve katsayıları veya yük ve dayanım katsayıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Birinci dereceden ikinci moment yaklaşımı, sonuçların doğruluğu, gerekli girdi verileri, hesaplama maliyeti veya formülasyonun basitliği ile

ilgili olarak birkaç kategoriye ayrılabilir. Soares vd. (2002) indirgenmiş değişken koordinatları sisteminde orijinden limit durum fonksiyonuna en kısa mesafe olarak güvenilirlik indeksi tanımını sundu (bkz. Şekil 5). Geometri kullanılarak güvenilirlik indeksi şu şekilde hesaplanabilir:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \quad (13)$$

Tüm değişkenler boyutsuz formlarda ifade edilmelidir. Bu nedenle, indirgenmiş değişkenler ( $Z_R$ ,  $Z_L$ ) tanımlanmalıdır;

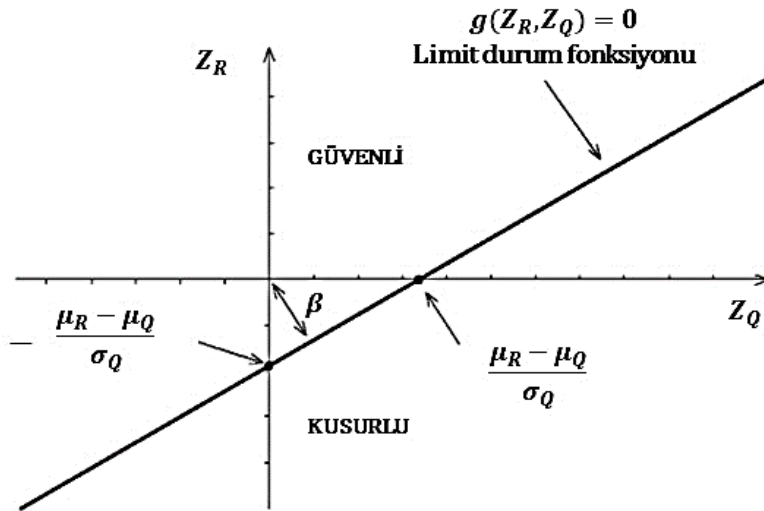
$$Z_R = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad (14)$$

$$Z_L = \frac{L - \mu_L}{\sigma_L} \quad (15)$$

Dayanım ( $R$ ) ve yük ( $L$ ), azaltılmış değişkenler şeklinde de ifade edilebilir:

$$R = \mu_R + Z_R \sigma_R \quad (16)$$

$$L = \mu_L + Z_L \sigma_L \quad (17)$$



Şekil 5. Azaltılmış değişkenler uzayındaki en kısa mesafe olarak tanımlanan güvenilirlik indeksi

Bu nedenle limit durum fonksiyonu  $g(R, L) = R - L$  indirgenmiş değişkenler cinsinden aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir:

$$g(Z_R, Z_L) = \mu_R + Z_R \sigma_R - \mu_L - Z_L \sigma_L \quad (18)$$

Güvenilirlik indeksi, yük etkileri ve güçteki belirsizliğin önemini kabul eder. Dört temel parametre olan dayanım ve yükü, sırasıyla ortalama değerleri ve standart sapmaları,  $\mu_R$ ,  $\mu_L$  ve  $\sigma_R$ ,  $\sigma_L$  birleştirir.

Bu çalışmada kullanılan limit durum fonksiyonu doğrusaldır. Doğrusal olmaması durumunda, tasarım noktası  $\beta$ 'yi en kısa mesafeye karşılık gelecek şekilde azaltılmış değişken uzayda bulmak

için yinelemek gerekli olacaktır. Ayrıca Hasofer-Lind yaklaşımı, korelasyonsuz rastgele değişkenler için güvenilirlik endeksini değerlendirir. Bu nedenle, eğer ilk değişkenler korelasyonluysa, bunlar korelasyonsuz rastgele değişkenlere dönüştürülmelidir. Yetersizlik olasılığı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir;

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (19)$$

burada  $\Phi$  standart normal dağılım fonksiyonudur. Rastgele değişkenler normal olarak dağılmış ve korelasyonsuz ise hesaplama kesin sonuçlar verebilir. Aksi takdirde, yalnızca bir yaklaşıklık sağlar.

## 7. S101 KÖPRÜSÜNÜN YAPISAL GÜVENİLİRLİK ANALİZİ ÜZERİNE VAKA ÇALIŞMASI

Çoğu tasarım şartnamesi, yapısal sınır durumları kavramına dayanmaktadır. Sınır durum tasarımının felsefesi, uygulanan yükler ile yapının yapısal tepkisi (yük taşıma kapasitesi, dayanım) arasındaki dengeyi varsayar. Bu nedenle, inşaat ve hizmet ömrü boyunca farklı olası yapısal davranış senaryoları için formüle edilen her bir sınır durumu için belirli bir yük ve dayanım faktörleri seti gereklidir.

Yapısal güvenilirlik analizine ilişkin olarak tipik üç tür sınır durumu kullanılır:

1. Yapısal kapasite kaybını temsil eden nihai sınır durumları.
2. İşlevselliğin bozulmasından kaynaklanan yetersizliği temsil eden Servis verilebilirlik sınır durumları.
3. Tekrarlanan yükleme etkisi altında yapısal bir bileşen için mukavemet kaybını temsil eden yorulma sınır durumları.

### 7.1. Vaka Çalışmasının Tanımı

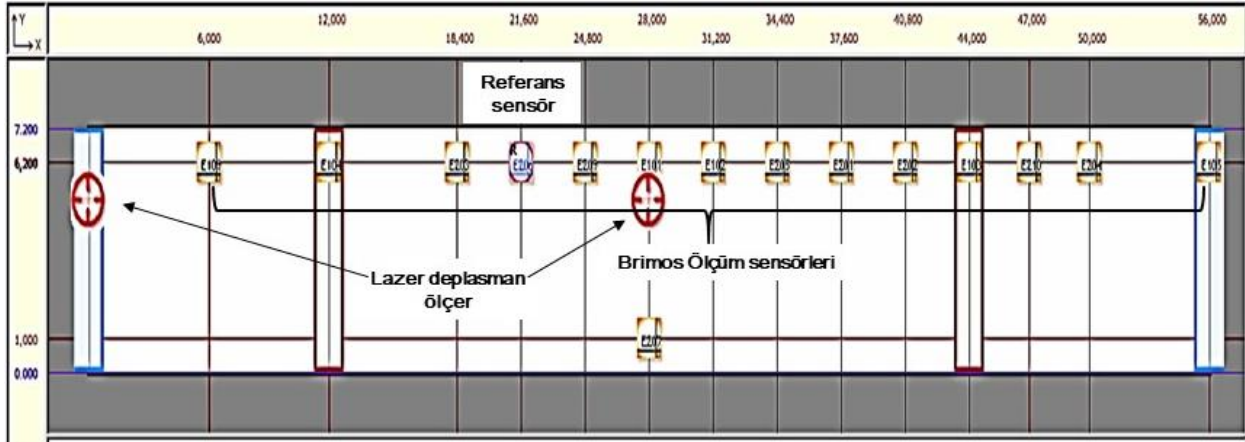
Test edilen S101 Üst Geçit Köprüsü, Yukarı Avusturya'nın, Viyana kentinin batı tarafında yer alan Reibersdorf kentinde bulunuyordu. Köprü, Avusturya'nın A1 Westautobahn ulusal karayolunun üzerinden geçmekteydi. Şekil 6'da görüldüğü gibi ana açıklığı 32 m, yan açıklıkları 12 m ve genişliği 6,6 m olan tabliyesi ardgermeli kirişlerle desteklenen bir betonarme köprüydü. Köprü 1960 yılında inşa edildi ve altından ek otoyol şeridine yer açmak için 2008 yılında yıkılması gerektiğinde hala iyi durumdaydı. (VCE, 2009).



Şekil 6. S101 Üstgeçit köprüsündeki hasar testine genel bakış (VCE, 2009)

## 7.2. Ölçüm ve Veri Algılama Sistemi

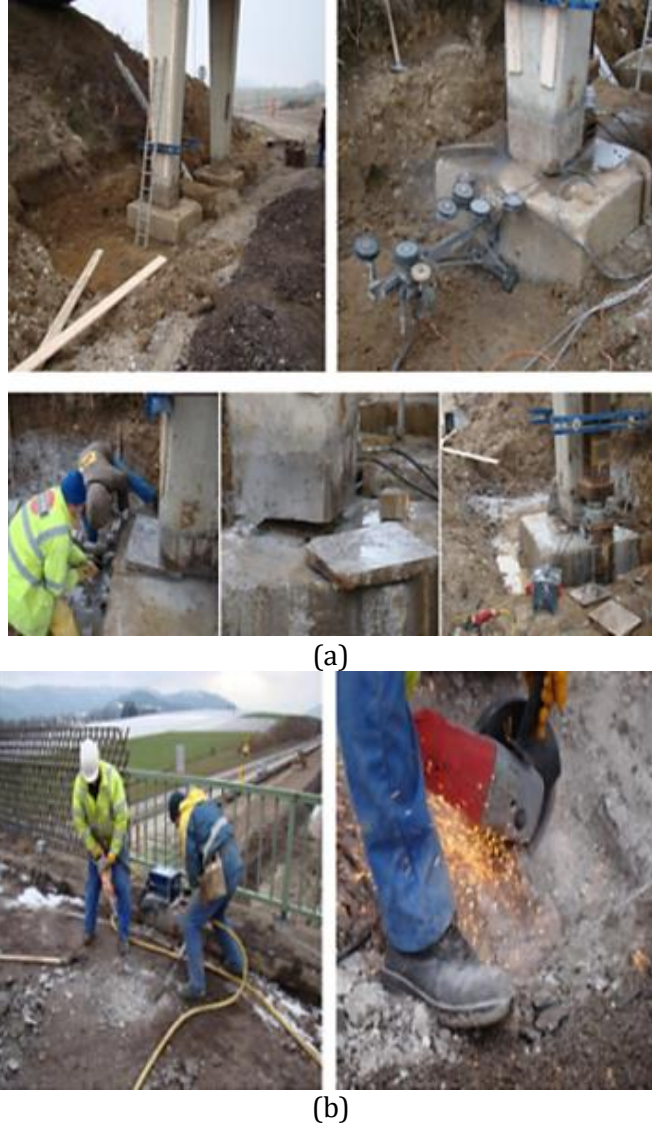
Yıkımdan önce, 10-11 Aralık 2008 tarihlerinde VCE danışmanlık şirketi ve Tokyo Üniversitesi ekibi tarafından iki günlük bir titreşim ölçümü yapıldı (Siringoringo vd., 2011). İlk gün, modal parametrenin ilk tahminlerini elde etmek için bir ortam titreşim testi yapıldı. Titreşimin ana kaynağı köprünün altındaki karayolu trafiğiydi. Ele alınan algılama sistemi, kısa ve uzun açıklıklarda ön ölçüm düğüm noktalarına yerleştirilmiş on adet üç eksenli ivmeölçer CV-373'ten oluşuyordu. Tüm aşamalı hasar testine, Şekil 7'de gösterilen kalıcı bir sensör yerleşim düzeni içeren BRIMOS ölçümü eşlik etti.



Şekil 7. Sensör düzeni - Aşamalı hasar testi sırasında BRIMOS sensör yerleşimi (VCE, 2009)

## 7.3. Aşamalı Hasar Testi Çalışması

Yıkım öncesi 10-12 Aralık 2008 tarihlerinde üç günlük titreşim ölçümü yapılmıştır. İlk gün, modal parametrenin üç eksenli ivmeölçerlerle (hasarsız durumda) ilk tahminlerini elde etmek için bir ortam titreşim testi yapıldı. İkinci gün, temel seviyesinin hemen üzerindeki köprü ayağı kesilerek hasar meydana getirildi. Kesim iki kez yapıldı ve her bir kesim yaklaşık 5 cm kalınlığındaydı. Kesim işlemi sırasında, köprü ayağına paralel bir çelik kolon yerleştirilerek, çelik çubuklarla köprü ayaklarına bağlanmıştır. Çelik kolon geçici bir destek görevi görerek ve işlevi kolonun altındaki hidrolik bir kriko ile kontrol edildi. Hidrolik kriko içindeki basınç serbest bırakılarak kesilen köprü ayağının oturması başlatıldı. Sonuç olarak, geçici çelik kolon yaklaşık 1 cm yerleşti (Hasarlı-b) ve hemen ardından payandanın ilaveten 1 cm düşey doğrultuda oturması (Hasarlı-c) meydana geldi. Çelik kolon 1 cm daha indirildikten sonra toplam köprü ayağının oturması 2 cm'ye kadar yükseldi. Son olarak, çelik kolon 3 cm'ye kadar indirildi ancak köprünün toplam oturması sadece 2,7 cm (Hasarlı-d) oldu. Bu noktadan sonra herhangi bir düşey oturma gözlenmemiş ve payanda çelik kolonu tamamen askıda kalmıştır. Son aşamada, ayak ve temel arasındaki boşluğu doldurmak için bir çelik levha yerleştirildi. İkinci ve üçüncü gün arasında, tendonların kesilmesi, yerel ardçekme takviyesi kaybının yapının dinamik özellikleri üzerindeki etkilerini göstermeyi amaçladı. Bu amaçla kuzeybatı payandanın yukarısındaki alanda dört tendon kesilmiştir. Üç tanesi tamamen kesildi, sonuncusu ise sadece kısmen kesildi. Tüm adımlar Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8: (a) Köprü ayağının kesim işlemleri ve (b) platformun kesilen tendonları (VCE, 2009)

#### 7.4. Yapısal Model

Bu çalışmada nihai sınır durum ele alınmıştır. Öngerilmeli beton köprü kirişinin eğilme kapasitesi (eğilme momenti), güvenilirlik analizi için bir parametre olarak kullanılır. Hareketli trafik yükleri altında kiriş başına tasarım hareketli yük momentlerinin değerleri, şerit başına hareketli yük momentine karşılık gelmektedir (şerit genişliği 3,6 m).

*Sınır durum işlevi:* Tek yönlü eğilme altındaki beton plakalar için doğrusal bir gerilme dağılımı varsayılırsa, kesit boyunca çekme kuvvetlerine karşı dayanımın yalnızca donatı çeliği tarafından sağlandığı düşünülebilir. Güvenilirlik analizinde kullanıldığı şekliyle eğilme dayanımı için sınır durum fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$f_{lim}(x) = M_u - M_d \quad (20)$$

burada,  $M_u$ , kirişin nihai eğilme momentidir ve  $M_d$ , kiriş başına uygulanan servis momentidir.

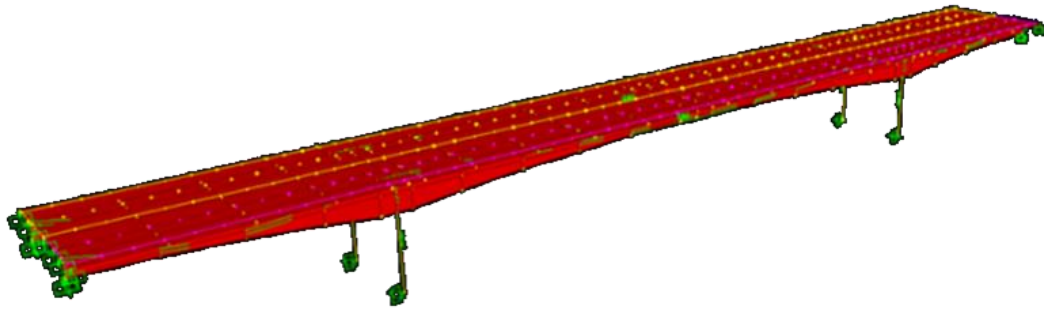
#### 7.5. Yük Modeli

Karayolu köprülerinin ana yük bileşenleri sabit yük, hareketli yük, dinamik yük, çevresel yükler (sıcaklık, rüzgar, deprem) ve diğer yüklerdir (çarpışma, frenleme). Bir köprü üzerindeki toplam

yük; sabit ve hareketli yük bileşenlerinin toplamı olarak kabul edilir. Ölü yük, köprüye kalıcı olarak bağlanan yapısal ve yapısal olmayan elemanların kendi ağırlıklarından kaynaklanan yerçekimi yüküdür.

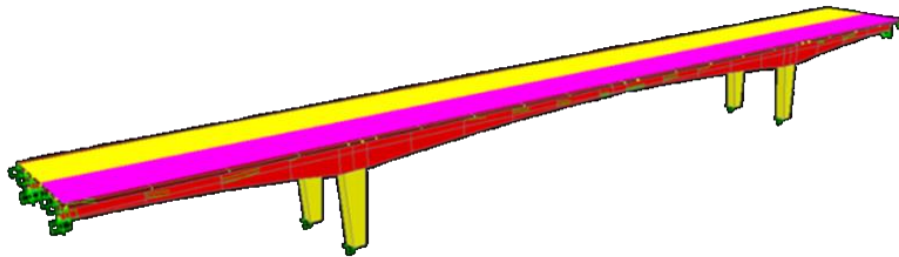
Hareketli yük, köprü üzerinde hareket eden araçlar tarafından üretilen bir dizi kuvveti kapsar. Kamyon yükleri ile ilgili araştırmalar, hareketli yükün coğrafi bölgeden bölgeye ve hatta bir bölge içinde, sahaya özel olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada hareketli yükün hem statik hem de dinamik etkileri ele alınmıştır. Hareketli yükün etkisi, açıklık uzunluğu, kamyon ağırlığı, aks yükleri, aks konfigürasyonu, aracın köprü üzerindeki konumu (enine ve boyuna), köprüdeki araç sayısı (çoklu mevcudiyet), giriş açıklığı, giriş aralığı ve yapısal elemanların rijitliği gibi birçok parametreye bağlıdır. Hareketli trafik yükleri altında giriş başına tasarım hareketli yük momentlerinin değerleri, şerit başına hareketli yük momentine karşılık gelir (şerit genişliği 3,6 m'dir) (Honfi vd., 2012; Thoft-Christensen, 1998; Val vd., 1998).

Bu çalışmada, kamyon dingilleri arasındaki yük dağılımı ve dingil aralığı parametreleri HSN-44-1 tipi araçtan alınmıştır. Tabliye kirişleri sürekli kiriş olarak tasarlanan bu karayolu köprüsünde hareketli yük analizi durumları, SAP 2000 yazılımının veri tabanında bulunan çeşitli aks/dingil yük miktarları için yükün tabliye üzerinde etkilendiği etkitme noktalarını, diğer bir deyimle yük etkime çizgilerini hesaplar (bkz. Şekil 9b) ve Şekil 10'da görüldüğü gibi SAP 2000 yazılımı yardımıyla maksimum ve minimum tepki miktarlarını elde etmek için şerit yüklemesinin tüm permütasyonlarını çözer. Analiz sırasında kullanılan tasarım hareketli yükü, her biri 142 kN'lık iki dingilden (1,83 m'lik aralık) ve 35 kN'luk bir ön yükten oluşur.



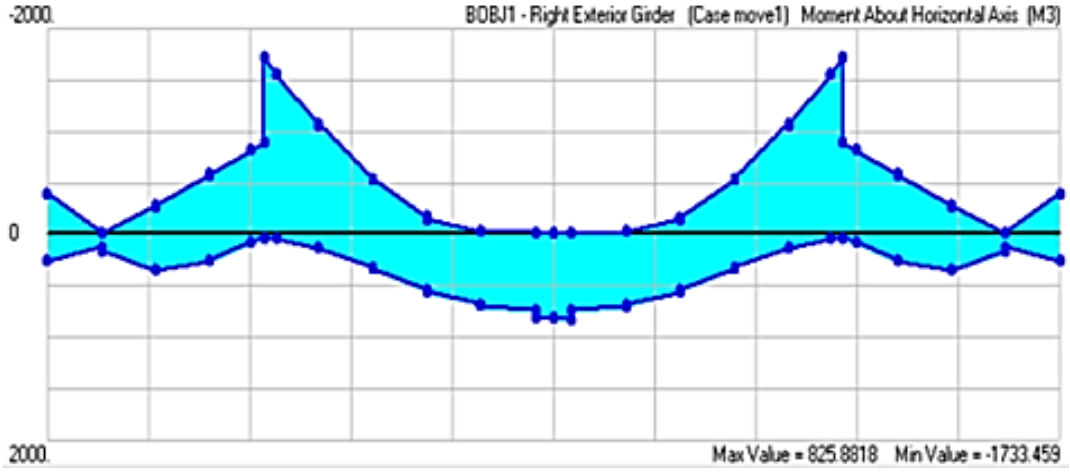
(a)

- Sap2000 yazılımıyla sol şerit(gidiş) yük etkitme alanları (HSN-44-1 tipi
- Sap2000 yazılımıyla Sağ şerit(geliş) yük etkitme alanları (HSN-44-1 tipi araç)

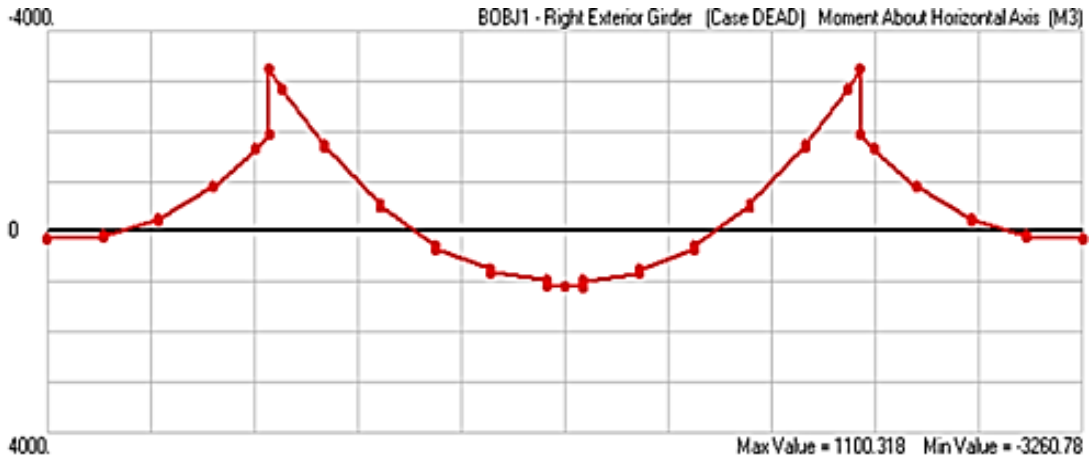


(b)

Şekil 9: (a) S101 köprüsünün SAP 2000 yapısal modeli  
(b) Şerit genişlikleri ve yük etkitme çizgilerinin etki ettiği yükleme alanları



(a)



(b)

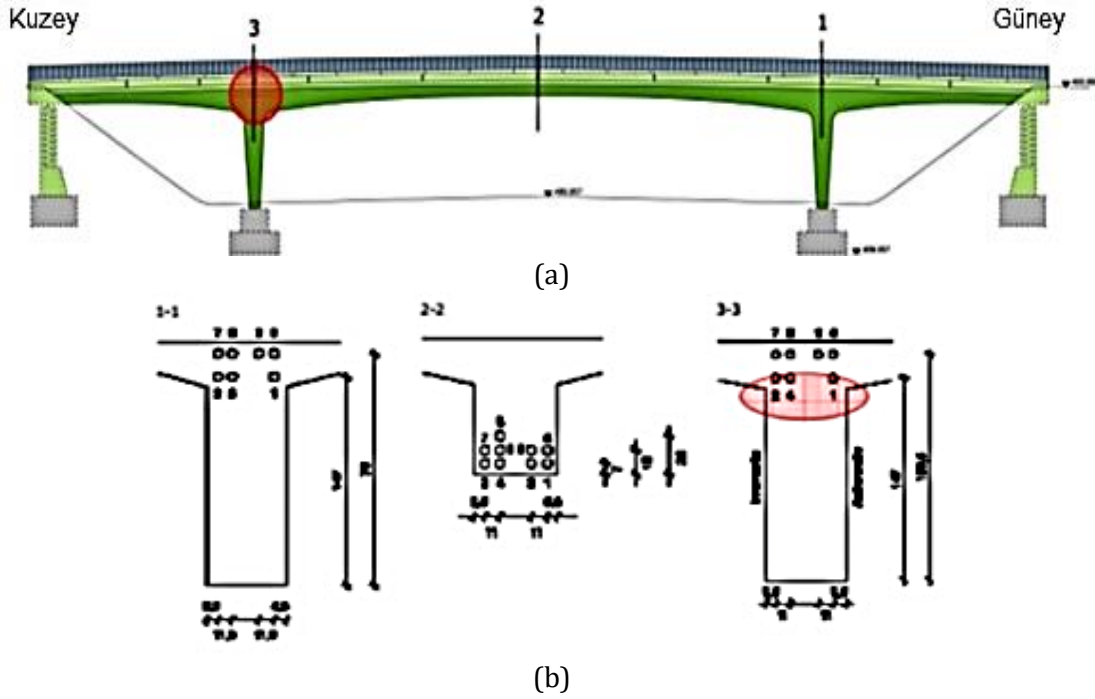
Şekil 10. Tabliyenin mesnetlendirildiği sağdaki sürekli kirişin (a) hareketli ve (b) ölü yükler altındaki momenti

### 7.6. Dayanım Modeli

S101 köprüsünün betonarme tabliyesi, toplamda sağda ve solda olmak üzere iki sürekli kiriş tarafından taşınıp, yüklerin dağılımı köprü ayaklarına iletilir. Sürekli kiriş olarak projelendirilen köprü kirişlerinin yükseklikleri, açıklık boyunca değişir ve mesnette maksimum yüksekliğe ulaşır. Köprü'nün beton tabliyesi, her bir köprü kirişi için şerit başına 0,21 m kalınlığındadır ve açıklık boyunca 18.15 kN/m ölü yükü oluşturur. Bölüm 7.5' te bahsi geçen yük modelinin, kamyon ve araba trafiğini gerçekliğe en yakın şekliyle modellemek, kiriş üzerindeki etkilerinin çoğunu kapsayan hareketli yük momenti talebini maksimize etmek için şerit yüklemesinin tüm permütasyonları analiz edilir. Sürekli, kiriş boyunca seçilen hareketli yükleme koşulu için maksimum moment,  $M_{max}$ , kirişin mesnetinde ve orta açıklığında sırasıyla 3921 kN.m ve 3068 kN.m'dir.

Köprü kirişin belirtilen beton dayanımı,  $f_c = 30$  MPa'dır. Ardgerilmeli çeliğin nihai dayanımı ise 400 MPa'dır. Tüm tasarım yüklerini kiriş açıklığında taşımak için toplam 42x9 tane telli çelik halatın (her biri 42 mm çapında) gerekli olduğu hesaplanarak dizayn edilmişti. Bunlardan dördü merkezi olarak yerleştirilmiş halatlar (iki sıra halinde konumlandırılmış) olup, kirişin ortasında konumlandırılmış yedi halat, mesnetlerde her biri yatayda 4 ve 3 halattan oluşan iki seviyede yerleştirilmişti. Kirişin enine kesiti içinde 100 mm aralıklarla yerleştirilmiş 12 mm çapında etriyeler kullanılmıştı. Kirişin kesitleri ve çelik halatlarının konumları Şekil 11'de görülmektedir.

Kesilen çelik halatların kiriş içindeki konumu kırmızı renk ile görülmektedir. Beton kiriş için doğrusal şekil değiştirme dağılımının, kesit boyunca Soares vd. (2002) ile Wong vd. (2005)'de verildiği gibi çekme ve basınç kuvvetlerine karşı direnç gösterdiği varsayılmıştır. Beton ve çelik donatıların hesaplarda kullanılan temel denklemleri, Modifiye Kent-Park Modeline dayanmaktadır. Sürekli kiriş kesitinin nihai momenti sırasıyla orta açıklıkta 4707 kN.m ve kiriş mesnedinde ise 17313 kN.mdir.



Şekil 11. Sürekli kirişte çelik kablo tendonların (a) konumu ve (b) kesitlerde gösterimleri (VCE, 2009)

### 7.7. Sonuçlar ve Tartışmalar

S101 köprü kirişinin yetersizlik olasılıkları birinci dereceden güvenilirlik yöntemi ile tahmin edilir. Elde edilen ölü momentin, 0,1'lik bir varyasyon katsayısı ile normal olarak dağıldığı varsayılır. Hareketli yük momentin ortalama değeri, yük etkime çizgileri altında hesaplanan değeridir. Varsayılan hareketli yük momentini ile ortalama hareketli yük momentini arasındaki ilişki şu şekilde yazılır;

$$M_l = M_m + 1.64\sigma \quad (21)$$

Burada  $\sigma$  standart sapmadır ve l ve m alt simgeleri sırasıyla hareketli ve ortalama yük momentini değerlerini belirtir. Yukarıdaki bağıntı kullanılarak kirişin ortalama moment değerlerinin standart sapması 0,1 varyasyon katsayısı ile hesaplanır (Low ve Hao, 2002). Bu varsayımlar kullanılarak, Tablo 1'de görüldüğü gibi Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi ile kirişin güvenilirlik endeksi ve olasılığı hesaplanmıştır.

Tablo1. Hasarlı-hasarsız senaryolarda kirişin güvenilirlik sonuçları

Senaryolar	Güvenilirlik endeksi, $\beta$		Oran	Yetersizlik olasılığı, $p_f$		Oran
	Mesnet	Açıklık		Mesnet	Açıklık	
<b>Hasarsız</b>	2.5825	1.3056	1.97	0.0049	0.0958	0.0511
<b>Çelik Halatı Hasarlı</b>	2.0577	1.0600	1.94	0.0198	0.1446	0.1369



Elde edilen sonuçlar neticesinde; Hasarsız kiriş kesitinin güvenilirlik endeksi açıklıkta ve mesnette sırasıyla 1,306 ve 2,582'dir. Burada görüldüğü gibi mesnetteki kiriş kesitinin açıklıktaki kiriş kesitine göre daha güvenilir olduğu çıkarılmıştır. Çünkü, S101 köprü kirişi sürekli kiriş olarak projelendirildiğinden mesnet bölgesindeki kesitinin yüksekliği nedeniyle moment taşıma kapasitesi açıklıktaki kiriş kesitine göre daha yüksektir. Bu nedenle tabloda görüldüğü üzere Hasarsız durumdayetersizlik olasılığı açıklıkta (0.096) mesnetekine (0.005) göre daha fazladır. Aynı durum, Mesnette Çelik Halatı Hasarlı durum içinde söz konusudur. Burada dikkat edilecek husus; mesnet ve açıklık bölgesindeki Çelik Halatı Hasarlı durumdaki S101 kirişinin, hasarsız duruma göre güvenilirlik endeksi oranının 1.97'den 1.94'e azalarak, yetersizlik olasılığı oranının da 0.0511'den 0.1369 yükselerek iki kattan fazla artış göstermesidir.

## 8. SONUÇ

Avrupa Birliği destekli SmartEN araştırma projesinin ana amaçlarından birisi, özellikle büyük ve pahalı alt ve üst yapıların servis ve hizmet ömürlerini ve verimliliklerini arttırmak için sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Yönetimi ile birlikte etkin bir yönetim yöntemi geliştirmektir. Bunu sağlamak için izlenen yollardan bazıları deneysel verileri kullanarak bu yönetim prosedürlerini uygulanabilirliğini araştırmaktır. Sonuç olarak;

- Yapı Sağlığı İzleme teknolojileri, büyük ve pahalı alt ve üst yapıların tasarım ve yönetim yöntemleriyle entegrasyonu hem yeni bir mühendislik bakış açısı hem de ekonomik anlamda bir verimlilik sağlar.
- Çünkü, herhangi bir yapının, kritik hasar durumları ve bölgeleri seçildikten sonra, Yapı Sağlığı İzleme teknikleri yoluyla, yapıya özel performansa dayalı tasarım kontrolü, bakım, hasar durumu, müdahale ve değerlendirme için şantiye ortamına ait koşulları ve verileri değerlendirmede yetenek sağlar.
- Yapı Sağlığı İzleme yoluyla elde edilen veriler yalnızca mevcut kritik yapıların durumunu daha iyi anlamak için değil, aynı zamanda gelecekteki yapıların güvenlik tasarımını geliştirmek için de olasılık hesaplarının şartnamelerde daha da kullanılabilir olmasına fırsat yaratır.
- Yapı Sağlığı İzleme teknolojileri yardımıyla, yapısal ve çevresel yüklemeyi göz önünde bulundurarak, performansı ve yapıdaki değişiklikleri izlemek etkin Yaşam Döngüsü Yönetimi'nin akıllı ve verimli kararlar almasına katkıda bulunur.
- Ayrıca yapısal sistem algılama ve tanımlama araçları; sürdürülebilir, verimli, aktif ve proaktif yönetim stratejilerine yardımcı olabilir. Böylece, yapı ve yapısal elemanlarının Yaşam Döngüsü değerlendirmesini tahmin etmek ve yönetim stratejilerini değerlendirmek için seçilen etkin parametreler kullanılarak, güvenilirlik endeksi ve yetersizlik olasılığı daha gerçeğe yakın hesaplanabilir.

Gelecekteki herhangi bir altyapı veya üstyapı yönetim programı için Yapı Sağlığı İzleme teknolojilerinin kritik bir rolü olacağı açıktır. Bu, izleme alternatiflerini karşılaştırırken yapısal güvenilirliğe dayalı yapılan bir değerlendirme, Yaşam Döngüsü Yönetimi ve riskin dikkate alınması gerektiği anlamına gelir.

## KAYNAKLAR

Augusti, G., & Baratta, A. (1972). Limit and shakedown analysis of structures with stochastic strengths variations. *Journal of Structural Mechanics*, 1(1), 43-62. <https://doi.org/10.1080/03601217208905332>

Breitung, K. (1984). Asymptotic approximations for multinormal integrals. *Journal of Engineering Mechanics*, 110(3), 357-366. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1984\)110:3\(357\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1984)110:3(357))

Catbas, F. N., & Frangopol, D. M. (2008). Concepts and issues of structural health monitoring for structural reliability and decision making. In World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology (pp. 470-470). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439828441>

Cornell, C. A. (1967). Bounds on the reliability of structural systems. Journal of the Structural Division, 93(1), 171-200.

Corotis, R. B., & Nafday, A. M. (1989). Structural system reliability using linear programming and simulation. Journal of Structural Engineering, 115(10), 2435-2447. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1989\)115:10\(2435\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:10(2435))

Der Kiureghian, A., & Liu, P. L. (1986). Structural reliability under incomplete probability information. Journal of Engineering Mechanics, 112(1), 85-104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1986\)112:1\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1986)112:1(85))

Fiessler, B., Rackwitz, R., & Neumann, H. J. (1979). Quadratic limit states in structural reliability. Journal of the Engineering Mechanics Division, 105(4), 661-676.

Frangopol, D. M., Strauss, A., Kim, S. (2008). Bridge Reliability Assessment Based on Monitoring. Journal of Bridge Engineering, 13(3): 258-270. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2008\)13:3\(258\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:3(258))

Frangopol, D. M. (2018). Structures and Infrastructure Systems: Life-Cycle Performance, Management, and Optimization. Routledge. London. <https://doi.org/10.1201/9781351182805>

Hohenbichler, M., & Rackwitz, R. (1988). Improvement of second-order reliability estimates by importance sampling. Journal of Engineering Mechanics, 114(12), 2195-2199. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1988\)114:12\(2195\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1988)114:12(2195))

Honfi, D., Mårtensson, A., & Thelandersson, S. (2012). Reliability of beams according to Eurocodes in serviceability limit state. Engineering Structures, 35, 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.003>

[Kassem](#), M. M., Nazri, F. M., [Farsangi](#), E. N., Öztürk, B. (2021). Improved vulnerability index methodology to quantify seismic risk and loss assessment in reinforced concrete buildings. Journal of Earthquake Engineering, 1(36), 6172-6207. <https://doi.org/10.1080/13632469.2021.1911888>

[Kassem](#), M. M., Nazri, F. M., [Farsangi](#), E. N., Öztürk, B. (2022). Development of a uniform seismic vulnerability index framework for reinforced concrete building typology. Journal of Building Engineering, 47 (2022), 103838. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103838>

Kim, S., & Frangopol, D. M. (2018). Multi-objective probabilistic optimum monitoring planning considering fatigue damage detection, maintenance, reliability, service life and cost. Structural and Multidisciplinary Optimization, 57(1), 39-54. <https://doi.org/10.1007/s00158-017-1849-3>

Low, H. Y., Hao, H. (2002). Reliability analysis of direct shear and flexural failure modes of RC slabs under explosive loading. Engineering Structures, 24(2), 189-198. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00087-6)

Messervey, T. B. (2008). Integration of structural health monitoring into the design, assessment and management of civil infrastructure. Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Lehigh Üniversitesi. Nowak, A.S. and Collins, K.R. (2000). Reliability of Structures. McGraw-Hill, New York.

Okasha N. M., Frangopol, D. M. (2012) Integration of structural health monitoring in a system performance based life-cycle bridge management framework. Structure and Infrastructure Engineering, 8(11), 999-1016. <https://doi.org/10.1080/15732479.2010.485726>

Ozer, E., & Feng, M. Q. (2019). Structural reliability estimation with participatory sensing and mobile cyber-physical structural health monitoring systems. *Applied Sciences*, 9(14), 2840. <https://doi.org/10.3390/app9142840>

Rackwitz, R., & Flessler, B. (1978). Structural reliability under combined random load sequences. *Computers & Structures*, 9(5), 489-494. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(78\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0045-7949(78)90046-9)

Siringoringo D. M., Fujino Y., Nagayama T.(2013).Dynamic Characteristics of an Overpass Bridge in a Full-Scale Destructive Test. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(6), 691-701. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000280](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000280)

Soares, R. C., Mohamed, A., Venturini, W. S., & Lemaire, M. (2002). Reliability analysis of non-linear reinforced concrete frames using the response surface method. *Reliability Engineering & System Safety*, 75(1), 1-16. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00043-6)

Straub, D. (2014). Value of information analysis with structural reliability methods. *Structural Safety*, 49(2014), 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2013.08.006>.

Thoft-Christensen, P. (1998). Assessment of the reliability profiles for concrete Bridges. *Engineering Structures*, 20(11), 1004-1009. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00196-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00196-X)

Thoft-Christensen, P., & Baker, M. J. (2012). *Structural reliability theory and its applications*. Springer Science & Business Media, Berlin.

Val, D. V., Stewart, M. G., & Melchers, R. E. (1998). Effect of reinforcement corrosion on reliability of highway bridges. *Engineering Structures*, 20(11), 1010-1019. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00197-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00197-1)

Vienna Consulting Engineers (VCE). (2009). Progressive damage test S101 Flyover Reibesdorf. Rep. No. 08/2308, VCE, Vienna, Austria.

Wong, S. M., Hobbs, R. E., & Onof, C. (2005). An adaptive response surface method for reliability analysis of structures with multiple loading sequences. *Structural safety*, 27(4), 287-308. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2005.02.001>