1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı
11-14 Ekim 2011 – ODTÜ – ANKARA

SİSMİK YÜKLERİN İNTEGRAL KÖPRÜ KAZIKLARINDA DÜŞÜK DEVİRLİ YORULMAYA ETKİLERİ

S.Erhan[1] ve M.Dicleli[2]

[1] *Araştırma Görevlisi, Mühendislik Bilimleri Bölümü, ODTÜ*
[2] *Profesör, Mühendislik Bilimleri Bölümü, ODTÜ*
Email:esemih@metu.edu.tr

ÖZET:

Bu çalışmada, sismik yüklerin, integral köprü kazıklarında, düşük devirli yorulmaya etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, 41 m uzunluğunda iki açıklığa sahip bir integral köprü ele alınmıştır. Ele alınan bu integral köprünün yapısal modeli kurulmuş ve kayada kaydedilmiş yedi farklı deprem ve çeşitli etkin yer ivmelerine göre zaman tanım analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarından yaralanarak, çelik kazıklarda sismik yüklerden dolayı oluşan toplam yorulma indeksleri hesaplanmıştır. Hesaplanmış olan bu toplam yorulma indeksleri sismik yüklerin integral köprülerin çelik kazıklarında düşük devirli yorulmaya etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda, sismik yüklerin, köprü kazıklarında düşük devirli yorulmaya etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu anlaşılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Sismik, integral köprü, H-tipi çelik kazık, yorulma

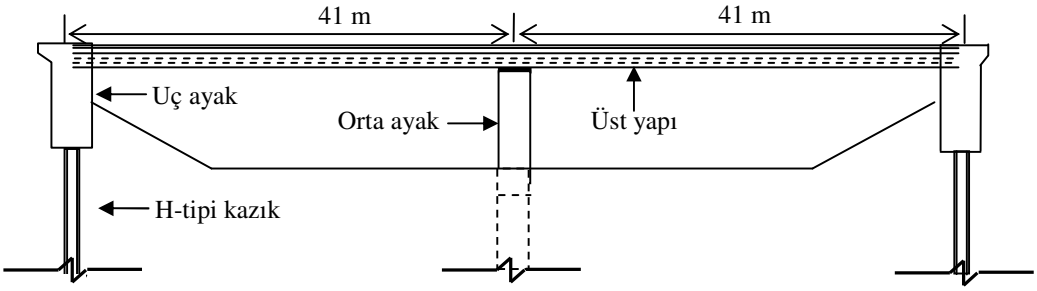
1. GİRİŞ

İntegral köprülerde, ısıl genleşme ve büzülmeler sırasında gerekli esnekliğin sağlanması için uç ayaklar tek sıra çelik H tipi kazıkla desteklenir. Orta şiddetli ve şiddetli depremlerde, sismik yükler etkisi ile bu çelik kazıklarda döngüsel deplasmanlar meydana gelir. Bu deplasmanlar, integral köprülerin çelik kazıklarında düşük devirli yorulmaya sebebiyet verebilir. Oluşan bu düşük devirli yorulma sebebiyle integral köprülerin servis ömürleri kısalabilir. Dolayısıyla, bu çalışmada, integral köprülerde sismik yüklerden dolayı oluşan döngüsel deplasmanların, düşük devirli yorulmaya etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, 41 m uzunluğunda iki açıklığa sahip bir integral köprü ele alınmıştır. Ele alınan bu integral köprünün yapısal modeli kurulmuştur. Daha sonra, kayada kaydedilmiş yedi farklı deprem seçilmiştir. Yapısal modeli oluşturulan integral köprünün, seçilmiş olan yedi deprem ve çeşitli etkin yer ivmelerine göre zaman tanım analizleri yapılmıştır. Zaman tanım analizleri sonuçlarından, çelik kazıkların döngüsel moment-dönme eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler vasıtasıyla, çelik kazıklarda sismik yüklerden dolayı oluşan, her bir döngüdeki birim şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Daha sonra, Koh ve Stephens (1991) tarafından önerilen yöntemle, düşük devirli yorulmadan ötürü göçmenin meydana gelmesi için gerekli döngü sayısı, her bir döngüde elde edilmiş birim şekil değiştirmeler cinsinden hesaplanmıştır. Bununla birlikte, göçmenin meydana geleceği döngü sayıları kullanılarak, Miner (1945) tarafından önerilen yöntemle, çelik kazıklarda deprem sonunda oluşacak olan toplam yorulma indeksi hesaplanmıştır. Hesaplanmış olan bu toplam yorulma indeksleri sismik yüklerin integral köprülerin çelik kazıklarında düşük devirli yorulmaya etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda, sismik yüklerin, köprü kazıklarında düşük devirli yorulmaya etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu anlaşılmıştır.

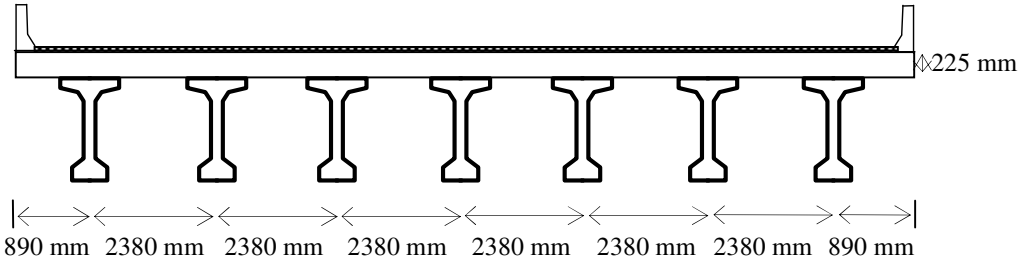
2. ÇALIŞMADA ELE ALINAN İNTEGRAL KÖPRÜNÜN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

Köprünün boyuna kesiti Şekil 4.3'de görüldüğü gibidir. Çalışmada ele alınan integral köprü, Kanada'nın Ontario kentinde inşa edilmiş olup, 41 m uzunluğunda iki açıklığa sahiptir (Şekil 1). Köprü 16 m genişliğe sahip olup,

225 mm kalınlığındaki köprü tabliyesi yedi adet öngermeli betonarme kirişle desteklenmektedir (Şekil 2). 4 m boyunda ve 1.5 m genişliğinde olan köprü uç ayağı, 12 adet çelik HP 310x174 tipi çelik kazıkla desteklenmiştir. Köprü orta ayağı dairesel kesitli üç adet betonarme kolondan oluşmaktadır.



Şekil 1. Köprünün boyuna kesiti



Şekil 2. Köprünün enine kesiti

2. ÇALIŞMADA ELE ALINAN PARAMETRELER

İntegral köprülerin çelik kazıklarında, sismik yüklerden dolayı oluşabilecek olan düşük devirli yorulma etkilerine temel zemini rijitliğinin, kazık ebadının ve oryantasyonunun etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, dört farklı zemin türü (gevşek, orta, orta-sıkı ve sıkı), iki farklı kazık ebadı (HP 310x174 ve HP 250x85) ve bu kazıkların kuvvetli veya zayıf eğilme eksenlerine göre yerleştirilme durumları göz önünde bulundurulmuştur.

3. İNTEGRAL KÖPRÜNÜN YAPISAL MODELİ

İntegral köprülerin çelik kazıklarında, sismik yüklerden dolayı oluşabilecek olan düşük devirli yorulma etkilerinin hesaplanabilmesi için, köprünün üç boyutlu yapısal modeli kurulmuştur. Köprü elemanlarının modellenmesi ile ilgili detaylar ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

3.1 Üst Yapının Modellenmesi

Köprü üst yapısı üç boyutlu kiriş elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Yapısal modelde, kirişler ve tabliyenin kompozit olarak çalıştığı farz edilmiştir. Köprü üst yapısının kütlesi 23.36 ton/m olarak hesaplanmıştır. Her açıklık on eşit parçaya bölünmüş ve bu parçalar arasındaki noktalara her bir parçanın kütlesi yerleştirilmiştir. Her kütle için, X ve Y yönlerinde ötelenme ve X ve Z eksenleri etrafında dönme olmak üzere, dört dinamik serbestlik derecesi tarif edilmiştir (statik serbestlik derecesi her noktada altı adettir). Geri kalan iki dinamik serbestlik derecesi, salınım da istenmeyen modların devreye girerek karışıklık yaratmasını engellemek için ihmal edilmiştir.

Üst yapının düzlem içi ötelenme rijitliği, diğer elemanların rijitliklerine oranla oldukça yüksektir. Dolayısıyla, uç ayak ve orta ayak bölgelerindeki birleşim bölgelerinde üst yapı enine doğrultuda, uzunluğu dış kirişlerin ağırlık merkezleri arasıdaki mesafe kadar olan, rijit elemanlarla modellenmiştir. Bu rijit elemanlar, kolonlardaki eksenel deformasyon ve köprü üst yapısındaki burulma, aynı zamanda üst yapıdaki düzlem içi dönme ve mesnetlerdeki deplasman arasındaki etkileşimi modellemek etmek için kullanılmıştır. Enine doğrultuda ki bu rijit eleman, köprü üst yapısının ağırlık merkezinden geçmektedir. Köprü üst yapısının ağırlık merkeziyle, mesnetlere kadar olan dikey mesafe de rijit elemanlarla modellenmiştir.

3.2. Alt Yapı Elemanlarının Modellenmesi

Köprü orta ayak kolonları ve başlık kirişleri üç boyutlu kiriş elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Kolonlar ve başlık kirişi birleşim bölgesi ise rijit elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Kolon ve başlık kirişi kütlelerinin yapısal modele atanması için, kolon üç parçaya bölünmüş ve her bir parçanın kütlesi hesaplanmıştır. Daha sonra, başlık kirişinin kolon başına düşen kütleleri hesaplanmıştır. Orta ayak ve başlık kirişinin birleşim noktasına, orta ayağın üst parçasından ve başlık kirişinden gelen kütlenin toplamı atanmıştır. Kolon boyunca diğer noktalara kolonların ilgili parçalarından hesaplanan kütleler atanmıştır. Kazıklar da benzer şekilde, üç boyutlu kiriş elemanlar kullanılarak modellenmiştir.

3.3. Köprü Zemin Etkileşiminin Modellenmesi

3.3.1 Kazık Zemin Etkileşim Modeli

Kazık zemin etkileşiminin deprem yükleri etkisi altındaki simülasyonu için Shirato ve diğ. (2006) tarafından önerilmiş olan histeretik model kullanılmıştır. Bu histeretik model için öncelikle monotonik yük deplasman (p-y) zarf eğrisi tanımlanmalıdır. Derin temellerin tasarımında, kum zeminler için p-y eğrileri olarak genellikle, Amerika Petrol Enstitüsünün (API) şartnamesindeki eğriler kullanılmaktadır. Bu şartnameye göre, kum zeminlerde herhangi bir H derinliğindeki yük deplasman ilişkisi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$P = A_f . P_u . \tanh\left[\frac{k.H}{A_f . P_u} . y\right] \tag{1}$$

burada; A_f statik ve döngüsel yükleme koşulları için önerilmiş olan bir katsayı olup döngüsel yükler için 0.9 olarak alınır, P_u, H derinliğindeki zemin taşıma gücü (kN/m) ve k ise yatak katsayısıdır.
Köprülerin yapısal modellerinde, kazık zemin etkileşiminden dolayı oluşan ışınımla sönümlemenin simülasyonu için kazık boyunca çeşitli aralıklarla yerleştirilen sönüm kutuları kullanılmıştır. Bu sönüm kutularının, sönüm oranları aşağıdaki ifadeden elde edilmiştir (Anandarajah 2005).

$$c = A . \rho . V_s \tag{2}$$

Bu ifade de, A kazık çapı ile kazık boyunca yerleştirilmiş sönüm kutularının arasındaki mesafenin çarpımından elde edilen alan, ρ zeminin yoğunluğu, V_s kayma dalgası hızıdır.

3.3.2 Uç ayak Dolgu Etkileşim Modeli

Uç ayak dolgu etkileşiminin deprem yükleri etkisi altındaki simülasyonu için Cole ve Rollins (2006) tarafından önerilmiş olan histeretik model kullanılmıştır. Bu histeretik model için öncelikle hiperbolik yük deplasman (p-y) eğrisi tanımlanmalıdır. Bu amaç için, Duncan ve Mokwa (2001) tarafından önerilen hiperbolik yük deplasman eğrisi tanımlanmıştır. Bu hiperbolik aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$P = \frac{y}{\frac{1}{K_{\max}} + R_f \frac{y}{P_{ult}}} \tag{3}$$

Bu ifadede, P_{ult} zemin taşıma gücünü, K_{max} eğrinin başlangıç eğimini göstermektedir. R_f ise 0.85 olarak alınmış bir katsayıdır.
Köprülerin yapısal modellerinde, uç ayak dolgu etkileşimi sırasında mevcut enerjinin bir kısmı ışınım yoluyla sönümlenir. Köprü uç ayakları ile arkalarında bulunan dolgunun, dinamik yükler etkisi altındaki davranışının, yapısal modeldeki simülasyonu sırasında bu sönüm etkisi dikkate alınmalıdır. Scott (1973) ve Jain ve Scott (1993) istinat duvarlarının dinamik yükler etkisi altında analiz sırasında oluşacak olan ışınımla sönümleme oranı için aşağıdaki formülü önermişlerdir.

$$c = \sqrt{\frac{2}{1-\nu}.G.\rho} \tag{4}$$

Bu ifade de, ν kayma dalga hızını, G kayma modülünü, ρ ise dolgu birim hacim ağırlığını ifade etmektedir.

3.3.3 Zemin kolonu Modeli

Köprülerin tasarımında, deprem esnasında temel zemininde meydana gelecek olan göreli deplasmanların etkileri genellikle ihmal edilir. Ancak, bu göreli deplasmanların ihmal edilmesi, köprülerin sismik yükler altındaki davranışının doğru tahmin edilememesine sebebiyet verebilir. Bu amaçla, deprem esnasında temel zeminin köprüye göre göreli hareketinin, yapısal modeldeki simülasyonu için, temel zemini zemin kolonu olarak modellenmiştir. Bu kolonlar modellenirken, temel zemini 3 m'lik katmanlara ayrılmış ve her katman için eşdeğer sönüm oranı ve kayma modülü proshake analizleri vasıtasıyla hesaplanmıştır. Daha sonra, zemin kolonu, eğilme rijitlikleri yüksek, kayma modülleri ise her katmanda ilgili zemin türünün kayma modülüne eşdeğer olan kiriş elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Zemin kolonunda sönüm etkisinin simülasyonu için, her katmanda Proshake analizlerinden elde edilen sönüm oranına sahip sönüm kutuları kullanılmıştır.

4. BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME CİNSİNDEN DÜŞÜK DEVİRLİ YORULMA

Yapısal elemanlarda, düşük devirli yorulma, tekrarlı yükler etkisi ile oluşan ve plastik birim şekil değiştirme meydana getirecek büyüklükte olan deplasmanlar yüzünden oluşur. Genellikle, malzemenin belirli bir bölgesinde göçmeye sebebiyet veren döngüsel deplasmanların sayısı, plastik birim şekil değiştirmenin bir fonksiyonu olarak tarif edilir. Bu tarif literatürde, birim şekil değiştirme cinsinden düşük devirli yorulma olarak adlandırılır. Bu tür bir yaklaşım, integral köprü uç ayaklarını destekleyen H-tipi çelik kazıklarda oluşacak olan düşük devirli yorulma etkisinin belirlenmesi için oldukça uygundur (Dicleli ve Albhaisi 2004). Koh ve Stephens (1991), düşük devirli yorulma etkisi altında, çelik malzemelerin göçmesine sebep olacak şiddetteki tekrarlı birim şekil değiştirme sayısının hesabı için bir formül önermiştir. Bu formül, her bir yükleme ve boşalmada oluşan toplam birim şekil değiştirmenin ε_a, bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\varepsilon_a = M(2N_f)^m \tag{5}$$

Bu ifade de, $M = 0.0795$, $m = -0.448$ ve N_f göçmenin meydana geleceği devir sayısıdır. Bu eşitlik, köprünün servis ömrü içerisinde H-tipi çelik kazıklarda, düşük devirli yorulma etkilerinden dolayı oluşması muhtemel bir göçme oluşana kadar gerçekleşebilecek olan maksimum birim şekil değiştirmelerin sayısını verir.
Köprüler, servis ömürleri boyunca sismik yükler ve ısıl yükler etkisi ile maruz kalacakları tekrarlı deplasmanlara karşı koyabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Köprü kazıklarında oluşacak olan bu tekrarlı deplasmanlar ve bu deplasmanların meydana getireceği birim şekil değiştirmeler, büyüklükleri farklı döngüler halinde gerçekleşebilir. Dolayısıyla, bu farklı şiddetteki birim şekil değiştirmelerden elde edilen N_f 'lerde (göçmenin meydana geleceği devir sayısı) farklıdır. Miner (1945), bir yapısal elemana etkiyen toplam yorulma indeksini, farklı şiddetlerdeki birim şekil değiştirmeler cinsinden aşağıdaki gibi ifade etmiştir.

$$\sum_i^n \frac{n_i}{N_i} \le 1 \tag{6}$$

Bu ifade de, n_i, aynı büyüklükte birim şekil değiştirmeye sahip döngü sayısı, N_i ise, bu büyüklükte döngüsel birim şekil değiştirmeye maruz kalan malzemenin göçmesi için gerekli döngü sayısıdır. Yukarıdaki ifade de, malzemeye n_i kez uygulanacak olan yükleme (veya deplasman) bu malzemenin yorulmadan dolayı servis ömrünün n_i/N_i oranında azalmasına sebep olacaktır. Bu oranların toplamı 1'e ulaştığında malzeme yorulmadan ötürü göçecektir.
İntegral köprülerin çelik kazıklarında düşük devirli yorulma etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, Miner Kuralı ile hesaplanan yorulma indeksleri karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları ile ilgili detaylar ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

5. ANALİZ SONUÇLARI

İntegral köprülerin çelik kazıklarında, sismik yüklerden dolayı oluşabilecek olan düşük devirli yorulma etkilerine temel zemini rijitliğinin, kazık ebadının ve oryantasyonunun etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, dört farklı zemin türü, iki farklı kazık ebadı ve bu kazıkların kuvvetli veya zayıf eğilme eksenlerine göre yerleştirilme durumları göz önünde bulundurulmuştur. Yapısal modelleri oluşturulan integral köprülerin, yedi farklı deprem verisi ve her bir depremin dört faklı etkin yer ivmesi (0.2g, 0.35g, 0.5g ve 0.8g) kullanılarak zaman-tanım analizleri yapılmıştır. Doğrusal olmayan zaman tanım analizleri sonuçlarından yararlanılarak, köprü kazıklarının histeretik moment-dönme eğrileri elde edilmiştir. Daha sonra, analiz sonuçlarından elde edilmiş olan moment-dönme ilişkilerini kullanarak, her bir döngüdeki pozitif (ε_{ap}) ve negatif (ε_{an}) birim şekil değiştirme büyüklüğünü hesaplayan bir matlab programı yazılmıştır. Bununla birlikte, her bir döngüde meydana gelen toplam birim şekil değiştirmelerin büyüklüğü aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_a = \frac{|\varepsilon_{ap}| + |\varepsilon_{an}|}{2} \tag{7}$$

Herbir döngü için elde edilmiş olan birim şekil değiştirmelerinin toplam büyüklükleri kullanılarak, Koh ve Stephens (1991) tarafından önerilen ve bir önceki bölümde verilmiş olan eşitlik yardımıyla, kazığın o büyüklükteki birim şekil değişmeden dolayı göçmesi için gerekli döngü sayısı hesaplanmıştır. Daha sonra, Miner kuralı yardımıyla, toplam yorulma indeksi hesaplanmıştır. Çalışmada ele alınan her bir deprem ve etkin yer ivmesi için, çeşitli zemin türleri, kazık ebadları ve oryantasyonları için elde edilmiş olan bu indeksler Tablo 1-

3'de verilmiştir. İlerleyen bölümlerde, zemin türü, kazık ebadı ve oryantasyonunun, integral köprü kazıklarında düşük devirli yorulmaya etkileri irdelenmiştir.

5.1 İntegral Köprü Kazıklarındaki Düşük Devirli Yorulmaya Kazık Ebadının Etkisi

İntegral köprü kazıklarında, kazık ebadının düşük devirli yorulmaya etkisi Tablo 1'de sunulmuştur. Sonuçlardan açıkça anlaşıldığı gibi, kazık ebadı arttığında, toplam yorulma indeksi azalmaktadır. Örneğin, Northridge depremi *(A_p=0.263 g)* ve 0.8 g etkin yer ivmesi göz önüne alınarak yapılmış olan zaman tanım analizleri sonucunda, toplam yorulma indeksi, HP 310x174 ebadında kazığa sahip köprü için, 0.0013 olarak hesaplanmıştır. Ancak, aynı deprem ve etkin yer ivmesi verisi kullanılarak, yapılmış olan zaman-tanım analizleri sonucunda toplam yorulma indeksi, HP 250x85 ebadında kazığa sahip köprü için, 0.0037 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, büyük ebada sahip köprü kazığının, eğilme kapasitesinin de büyük olması ve dolayısıyla plastik birim şekil değiştirmenin gerçekleşmesi için, daha büyük deplasman yapmasının gerekmesinden kaynaklanmaktadır. Daha küçük ebada sahip köprü kazıklarında ise (eğilme kapasiteleri küçük olduğu için), plastik birim şekil değiştirme daha küçük deplasmanlarda da gerçekleşebilir. Özetle, integral köprü kazıklarında, kazık ebadı azaldıkça, düşük devirli yorulma etkisi artar.

Tablo 1. Çeşitli kazık ebadları için elde edilmiş toplam yorulma indeksleri

Deprem	Kazık ebadı	A_p=0.35g		A_p=0.50g		A_p=0.80 g	
		Döngü sayısı	$\sum_i^n \frac{n_i}{N_i}$	Döngü sayısı	$\sum_i^n \frac{n_i}{N_i}$	Döngü sayısı	$\sum_i^n \frac{n_i}{N_i}$
Loma Prieta Ap=0.200 g	HP 310x174	85	0.0001	76	0.0003	59	0.0008
	HP 250x85	72	0.0003	79	0.0005	62	0.0011
Loma Prieta Ap=0.278 g	HP 310x174	80	0.0005	65	0.0007	62	0.0012
	HP 250x85	75	0.0008	72	0.0011	86	0.0021
Mammoth Lake	HP 310x174	55	0.0002	52	0.0005	42	0.0014
	HP 250x85	61	0.0006	63	0.0012	45	0.0019
Northridge Ap=0.263 g	HP 310x174	78	0.0007	52	0.0009	62	0.0013
	HP 250x85	74	0.0018	58	0.0030	61	0.0037
Northridge Ap=0.316 g	HP 310x174	93	0.0003	88	0.0006	79	0.0012
	HP 250x85	85	0.0011	86	0.0021	84	0.0026
San Fernando	HP 310x174	62	0.0004	42	0.0008	46	0.0010
	HP 250x85	56	0.0006	52	0.0009	62	0.0013
Whitter	HP 310x174	77	0.0001	72	0.0002	67	0.0006
	HP 250x85	80	0.0002	77	0.0005	81	0.0011

5.2 İntegral Köprü Kazıklarındaki Düşük Devirli Yorulmaya Temel Zemini Rijitliğinin Etkisi

Bu bölümde, temel zemini rijitliğinin, integral köprü kazıklarında oluşan düşük devirli yorulmaya etkileri araştırılmıştır. Tablo 3'de görüldüğü gibi, temel zemini rijitliği arttığında, integral köprü kazıklarında sismik yüklerden dolayı oluşan düşük devirli yorulma etkisi artar. Örneğin, Northridge depremi (A_p=0.263 g) ve 0.5 g etkin yer ivmesi göz önüne alınarak yapılmış olan zaman tanım analizleri sonucunda, toplam yorulma indeksi, orta sertlikteki kum zemin üzerine inşa edilmiş integral köprü kazıklarında, 0.0009 olarak hesaplanmıştır. Ancak, aynı deprem ve etkin yer ivmesi verisi kullanılarak, yapılmış olan zaman-tanım analizleri sonucunda toplam yorulma indeksi, sıkı kum zemin üzerine inşa edilmiş integral köprü kazıklarında, 0.0018 olarak hesaplanmıştır. Sıkı kum zeminlere inşa edilmiş integral köprü kazıklarında, düşük devirli yorulma etkisi artar.

Tablo 2. Çeşitli zemin rijitlikleri için elde edilmiş toplam yorulma indeksleri

Deprem	Zemin rijitliği	A_p=0.35g		A_p=0.50g		A_p=0.80 g	
		Döngü sayısı	$\sum_i^n \frac{n_i}{N_i}$	Döngü sayısı	$\sum_i^n \frac{n_i}{N_i}$	Döngü sayısı	$\sum_i^n \frac{n_i}{N_i}$
Loma Prieta Ap=0.200 g	Sıkı	60	0.0006	68	0.0008	83	0.0009
	Orta sıkı	56	0.0005	52	0.0007	52	0.0008
	Orta	85	0.0001	76	0.0003	59	0.0008
	Gevşek	82	0.0001	72	0.0002	63	0.0006
Loma Prieta Ap=0.278 g	Sıkı	55	0.0008	61	0.0013	63	0.0014
	Orta sıkı	79	0.0006	75	0.0008	70	0.0013
	Orta	80	0.0005	65	0.0007	62	0.0012
	Gevşek	68	0.0004	72	0.0005	65	0.0008
Mammoth Lake	Sıkı	41	0.0010	45	0.0014	45	0.0015
	Orta sıkı	52	0.0007	46	0.0011	48	0.0015
	Orta	55	0.0002	52	0.0005	42	0.0014
	Gevşek	65	0.0001	51	0.0003	53	0.0008
Northridge Ap=0.263 g	Sıkı	78	0.0010	80	0.0018	80	0.0024
	Orta sıkı	80	0.0008	74	0.0014	77	0.0020
	Orta	78	0.0007	52	0.0009	62	0.0013
	Gevşek	82	0.0005	78	0.0006	59	0.0008
Northridge Ap=0.316 g	Sıkı	80	0.0009	80	0.0013	85	0.0021
	Orta sıkı	78	0.0007	76	0.0011	72	0.0017
	Orta	93	0.0003	88	0.0006	79	0.0012
	Gevşek	85	0.0002	89	0.0005	81	0.0008
San Fernando	Sıkı	54	0.0005	63	0.0009	60	0.0010
	Orta sıkı	59	0.0005	59	0.0008	54	0.0010
	Orta	62	0.0004	42	0.0008	46	0.0010
	Gevşek	65	0.0002	43	0.0006	45	0.0008
Whitter	Sıkı	72	0.0005	67	0.0007	73	0.0007
	Orta sıkı	72	0.0003	70	0.0006	71	0.0007
	Orta	77	0.0001	72	0.0002	67	0.0006
	Gevşek	67	0.0001	69	0.0002	68	0.0004

5.3 İntegral Köprü Kazıklarındaki Düşük Devirli Yorulmaya Kazık Oryantasyonu Etkisi

İntegral köprü kazıklarında, kazık oryantasyonunun düşük devirli yorulmaya etkisi Tablo 2'de sunulmuştur. Sonuçlardan açıkça anlaşıldığı gibi, kazıklar kuvvetli eğilme ekseni yönünde yerleştirildiğinde, toplam yorulma indeksi azalmaktadır. Örneğin, Mammoth Lake depremi ve 0.8 g etkin yer ivmesi göz önüne alınarak yapılmış olan zaman tanım analizleri sonucunda, toplam yorulma indeksi, kuvvetli dönme ekseni yönünde yerleştirilmiş HP 310x174 ebadında kazığı sahip köprü için, 0.0014 olarak hesaplanmıştır. Ancak, aynı deprem ve etkin yer ivmesi verisi kullanılarak, yapılmış olan zaman-tanım analizleri sonucunda toplam yorulma indeksi, zayıf dönme ekseni yönünde yerleştirilmiş kazığa sahip köprü için, 0.0018 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, kazıkların kuvvetli dönme ekseni yönünde eğilme kapasitesinin büyük olması ve dolayısıyla plastik birim şekil değiştirmenin gerçekleşmesi için, daha büyük deplasman yapmasının gerekmesinden kaynaklanmaktadır. Özetle, integral köprü kazıkları zayıf dönme ekseni yönünde yerleştirildiğinde düşük devirli yorulma etkisi artar.

Tablo 3. Çeşitli kazık oryantasyonları için elde edilmiş toplam yorulma indeksleri

Deprem	Kazık oryantasyonu	A_p=0.35g		A_p=0.50g		A_p=0.80 g	
		Döngü sayısı	$\sum_i^n \frac{n_i}{N_i}$	Döngü sayısı	$\sum_i^n \frac{n_i}{N_i}$	Döngü sayısı	$\sum_i^n \frac{n_i}{N_i}$
Loma Prieta Ap=0.200 g	Kuvvetli	85	0.0001	76	0.0003	59	0.0008
	Zayıf	81	0.0002	87	0.0007	78	0.0011
Loma Prieta Ap=0.278 g	Kuvvetli	80	0.0005	65	0.0007	62	0.0012
	Zayıf	81	0.0009	68	0.0012	69	0.0023
Mammoth Lake	Kuvvetli	55	0.0002	52	0.0005	42	0.0014
	Zayıf	65	0.0004	67	0.0009	56	0.0018
Northridge Ap=0.263 g	Kuvvetli	78	0.0007	52	0.0009	62	0.0013
	Zayıf	81	0.0010	65	0.0015	69	0.0023
Northridge Ap=0.316 g	Kuvvetli	93	0.0003	88	0.0006	79	0.0012
	Zayıf	90	0.0006	96	0.0014	86	0.0019
San Fernando	Kuvvetli	62	0.0004	42	0.0008	46	0.0010
	Zayıf	61	0.0005	56	0.0009	58	0.0012
Whitter	Kuvvetli	77	0.0001	72	0.0002	67	0.0006
	Zayıf	81	0.0002	75	0.0004	75	0.0008

SONUÇLAR

Sonuç olarak, temel zemini rijitliğinin, kazık ebadı ve oryantasyonunun integral köprü kazıklarında sismik yüklerden dolayı oluşan düşük devirli yorulmayı büyük oranda etkilediği saptanmıştır. Buna rağmen, çeşitli yapısal ve geoteknik özelliklere sahip çok sayıda integral köprü ele alınarak yapılmış olan bu parametrik çalışmada, Miner kuralı ile hesaplanmış olan toplam yorulma indekslerinin oldukça düşük olduğu saptanmıştır. Tablolarda görüldüğü gibi bu oranlar, 0.0001 ve 0.0037 arasında değişmektedir. Bu sebepten dolayı, yapılan bu çalışmada, sismik yüklerden ötürü, köprü kazıklarında düşük devirli yorulma etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

Anandarajah,A., Zhang, J., and Ealy, C. (2005)"Calibration of dynamic analysis methods from field test data", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25:7-10, 763-772.

Cole, R.T. and Rollins K.M. (2006) "Passive earth pressure mobilization during cyclic loading" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132:9, 1154–1164.

Duncan, M. J and Mokwa, R. L. (2001) "Passive earth pressure: Theories and tests." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127:3, 248–257.

Duncan, M. J. and Chang, C. Y. (1970) ''Nonlinear analysis of stress and strain in soils'', ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Division 96:5, 1629–1653.

Koh, S.K and Stephens, R.I. (1990) "Mean stress effects on low cycle fatigue for a high strength steel" Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 14:4, 413–28.

Miner, M. A. (1945) "Cumulative Damage in Fatigue," ASME Journal of Applied Mechanics, 12, 159-164.