

Mesnetlerinden Farklı Yer Hareketi Etkisindeki Kablo Destekli Köprülerin Yapı-Zemin Etkileşim Analizi

Hüseyin KARTAL¹
Kurtuluş SOYLUK²

ÖZ

Bu çalışmada eşit merkez açıklığına sahip asma ve eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışının karşılaştırılması amacıyla önce merkez açıklığı 1000 m olan bir eğik kablo askılı köprü ile bir asma köprü sistemi tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan köprülerin dinamik davranışlarını incelemek için köprülere üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulanıp, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlar için zaman-tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamasının ve yapı-zemin etkileşiminin her iki köprü modelinde de yapısal tepkileri genel olarak arttırdığı gözlenmiştir. Bunun yanında, üniform ve mesnetlerden farklı yer hareketi uygulanmasına bağlı olarak hangi köprü sisteminin daha fazla etkilendiğine ilişkin değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Asma köprü, eğik kablo askılı köprü, mesnetlerinden farklı yer hareketi, yapı-zemin etkileşimi.

ABSTRACT

Soil-Structure Analyses of Cable-Supported Bridges under Multiple-Support Excitation

In this study, it is intended to compare the dynamic behavior of suspension and cable-stayed bridges for equal center span lengths. For this purpose, a suspension and a cable-stayed bridge with center spans of 1000 m are designed so that a realistic comparison can be made. Then, uniform and multiple-support ground motions are applied to the bridges to determine their dynamic responses. Nonlinear time history analyses are carried out for cases where the soil-structure interaction is taken into account and ignored. The results show that the multiple-support excitation as well as the soil-structure interaction generally increase the structural

Note:

- Yayın Kurulu'na 18 Kasım 2021 günü ulaşmıştır. 16 Aralık 2022 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mayıs 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.
- <https://doi.org/10.18400/tjce.1224420>

1 Kartal Proje, Ankara, Türkiye
kartalhuseyin@hotmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-5132-1205>

2 Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye
ksoyluk@gazi.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-3039-0332>

responses for both bridge models. On the other hand, depending on the uniform and multiple-support motions, the sensitivity of each bridge model is explored.

Keywords: Cable-stayed bridge, suspension bridge, multiple-support excitation, soil-structure interaction.

1. GİRİŞ

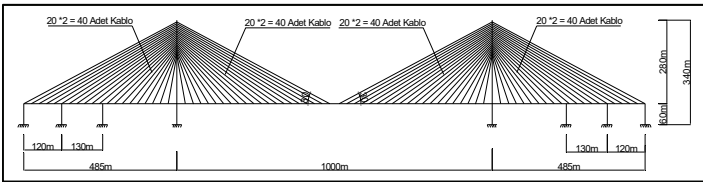
Son yıllara kadar eğik kablo askılı köprüler orta açıklıkları (400-700m) geçmek için tercih edilirken, asma köprüler uzun açıklıkları (>1000m) geçmek için tercih edilmekteydi. Fakat son zamanlarda köprü sektöründeki yapım teknolojilerindeki gelişmeler ve doğru analizler ile birlikte, eğik kablo askılı köprüler de daha uzun açıklıklar için tercih edilmeye başlanmıştır. Bu durumda uzun açıklıklı köprü sistemlerinde, köprü tipine karar vermek için asma ve eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışlarının detaylı incelenmesi büyük öneme sahiptir. Eğik kablo askılı köprüler ile asma köprülerin deprem esnasında dinamik davranışları farklılık gösterdiğinden eşit açıklıklara sahip bu köprülerin dinamik davranışlarının detaylı tanımlanması gereklidir. Uzun açıklıklı asma ve eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışının karşılaştırılması ile ilgili olarak günümüze kadar yapılmış olan çalışmalarda köprü merkez açıklıkları farklı uzunluklarda olduğundan, söz konusu köprü sistemlerinin dinamik davranışlarının daha gerçekçi bir karşılaştırmasının yapılabilmesi için bu çalışmada merkez açıklıkları 1000 m olan bir adet asma köprü ile bir adet eğik kablo askılı köprünün tasarımı yapılmış ve nümerik model olarak kullanılmıştır. Tasarımı tamamlanan eğik kablo askılı ve asma köprülerde kritik deprem yüklemelerini belirleyebilmek için, sert, orta ve yumuşak olmak üzere üç farklı zemin grubuna ait kayıtlar kullanılarak üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketleri tanımlanmış ve köprü sistemlerine uygulanmıştır. Köprü modellerine uygulanan yer hareketleri, rasgele titreşim teorisi esas alınarak üretilirken, üretilen her bir yer hareketi EC8'de tanımlanan B, C ve D zemin sınıflarına karşılık gelen sert, orta ve yumuşak zemin cinsleri ile uyumlu olacak şekilde elde edilmiştir. Köprülerin dinamik tepkisine yapı-zemin etkileşiminin etkisini belirlemek için yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlar her iki köprü için de ayrı ayrı ele alınıp karşılaştırmaları yapılmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı köprü modellerinde, ana kulelerin ve kenar ayakların mesnetlendiği noktalardaki zeminler doğrusal elastik yaylar ile temsil edilmiştir. Mesnet noktalarında, her bir ötelenme ve dönme için eşdeğer Winkler yatak katsayısı (k) hesaplanmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği köprü modellerinde ise ankastre mesnet uygulaması yapılmıştır. Geçmişte asma ve eğik kablo askılı köprülerde yapı zemin etkileşiminin köprülerin dinamik davranışına etkisini ayrı ayrı inceleyen çalışmalar olmasına rağmen eşit merkez açıklığa sahip asma ve eğik kablo askılı köprüler için yapı zemin etkileşiminin de dikkate alınarak dinamik tepkilerinin karşılaştırıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Saadeghvaziri vd. [1] çalışmalarında mevcut köprülerde yapı-zemin etkileşiminin dinamik davranışa olan etkisini incelemişlerdir. Temel altı zemin dönme ve ötelenme rijitliği olan yaylar ile temsil edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, eğik kablo askılı köprülerin analizlerinde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasının büyük öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Soneji ve Jangid [2] ana kaya üzerine rijit kazık temel gruplarıyla mesnetlenmiş eğik kablo askılı köprü sisteminin dinamik davranışına yapı-zemin etkileşiminin etkisini incelemişlerdir. Kazık temel etrafındaki zeminin köprü davranışını önemli ölçüde değiştirdiği görülmüştür. Liang vd. [3] çalışmalarında uzun açıklıklı bir eğik kablo askılı köprünün mesnetlendiği kazıklı temellerin

dinamik davranışını zemin-kazık-köprü etkileşimini dikkate alarak incelemişlerdir ve mesnetli kule sistemlerinde kazık başlarındaki maksimum eğilme momentlerinin azaldığı belirtilmiştir. Zheng ve Takeda [4] çalışmalarında bir eğik kablo askılı köprü için yapı-zemin etkileşiminin sistemin dinamik davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, kütle yay modelinin zemini temsil etmek için uygun bir model olduğu belirtilmiştir. Siddharth vd. [5] çalışmalarında yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak sert, orta sert ve yumuşak zemin sınıfları için eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışında temel derinliğinin etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda zemin sınıfının eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışında büyük etkisinin olduğu, özellikle yumuşak zeminlerin yapının hakim periyotlarını %30 artırdığı belirtilmiştir. Lyngs vd. [6] İzmit Körfez Geçişi Asma Köprüsü'nün sismik analizleri için yapı-zemin etkileşiminin modellenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmanın sonucunda, temel altı zeminin ve zemin ile temel arasında bulunan ara dolgu elemanlarının lineer olmayan elemanlar ile modellenerek yapılan analizlerin daha gerçekçi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Miao ve Tang [7] Dalian Gulf Asma Köprüsü'nün 3 boyutlu dinamik davranışına kazık-zemin etkileşiminin etkisini incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda yapı zemin etkileşiminin yapısal deplasmanları ve kesit tesirlerini artırdığı belirtilmiştir. Keshishian [8] çalışmasında köprü türü uzun açıklıklı yapıların rasgele titreşim analizi ile çözümünde yer hareketindeki değişim ve yapı-zemin etkileşiminin etkisini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda yer hareketindeki değişimin köprü davranışı üzerinde daha etkili olduğu ve yapı-zemin etkileşiminin sonuçları küçülebileceği gibi, arttırılabileceği de gözlenmiştir. Khan ve arkadaşları [9] çalışmalarında zeminin yaylar ve sönümleyiciler ile modellendiği eşdeğer modal enerji yöntemini kullanarak yapı-zemin etkileşiminin yelpaze tipi eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Mesnetlerdeki yer hareketleri arasındaki korelasyon etkileri dikkate alınarak yapı-zemin etkisinin göz önünde bulundurulduğu ve ihmal edildiği durumlar için yapılan dinamik analizler neticesinde, yapı-zemin etkileşiminin dikkat alındığı durumlarda korelasyon etkisinin daha fazla olduğu belirtilmiştir. Soyuk ve Sıcacık [10] eğik kablo askılı köprülerde, değişen yer hareketi bileşenleri için yapı-zemin etkileşimi analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda eğik kablo askılı köprülerin dinamik analizi için farklı yer hareketi ve zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Kuyumcu ve Ateş [11] çalışmalarında değişerek yayılan yer hareketleri etkisindeki köprülerde zemin–temel–köprü etkileşiminin etkisini incelemişlerdir. Zeminin rijitlikleri yaylar ve sönümleyiciler ile tariflenmiş ve yapının dinamik davranışı sert, orta sert ve yumuşak olmak üzere üç ayrı zemin sınıfı için incelenmiştir. Çalışmanın neticesinde, yapı-zemin etkileşiminin, özellikle yumuşak zeminler için, köprünün dinamik davranışı üzerinde büyük önemi olduğu vurgulanmıştır. Ateş ve arkadaşları [12] mesnetlerinden farklı yer hareketinin ve yapı-zemin etkileşiminin kazıklı temelleri olan eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapı-zemin etkileşimi Winkler modeli tabanlı dinamik empedans fonksiyonları ile dikkate alınmıştır. Çalışmanın sonucunda yapı-zemin etkileşiminin ve mesnetlerinden farklı yer hareketlerinin eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışı üzerinde önemli etkileri olduğu ve birlikte düşünülmesi gerektiği belirtilmiştir. Shiravand ve Parvanehro [13] çalışmalarında yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak eğik kablo askılı köprülerin lineer olmayan dinamik davranışına sismik yer hareketinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda farklı zemin türlerinin yapısal tepkileri artırdığı belirtilmiştir. Tochaei ve arkadaşları [14] çalışmalarında yakın fay yer hareketinin ve yapı-zemin etkileşiminin eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışına etkilerini incelemişlerdir. Yapı–zemin etkileşimi box-spring sistem ile temsil edilmiştir.

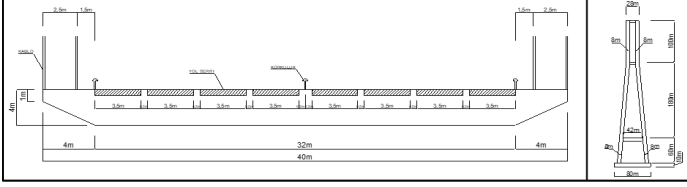
Çalışmanın sonucunda yakın fay etkisinde ve yumuşak zeminlerde yapısal tepkilerin arttığı belirtilmiştir. Kartal ve Soyluk [15] ve Soyluk ve arkadaşları [16] çalışmalarında sırasıyla homojen ve heterojen zemin durumları için farklı merkez açıklıklara sahip bir eğik kablo askılı köprü ile bir asma köprünün dinamik davranışını karşılaştırmışlardır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı çalışmaların sonucunda üniform yer hareketi etkisi için eğik kablo askılı köprünün daha duyarlı olduğu belirtilmiştir. Soyluk ve Karaca [17] çalışmalarında kablo destekli köprülerin dinamik davranışına yakın fay ve uzak fay yer hareketi etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda yakın fay yer hareketinin eğik kablo askılı köprüye oranla asma köprünün dinamik davranışı üzerinde daha büyük bir etkisinin olduğu belirtilmiştir. Kartal ve Soyluk [18] çalışmalarında asma köprülerin dinamik davranışına yapı-zemin etkileşiminin etkisini incelemişlerdir. Çalışmaların sonucunda asma köprülerde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durum için elde edilen yapısal tepkilerin daha büyük olduğu ve yapı-zemin etkileşimi etkisinin zemin sınıfına göre değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir. Dumanoglu ve Adanur [19] asma köprülerin antisinkronize dinamik analizi üzerine çalışmışlardır. Çalışmanın sonucunda, asma köprülerin dinamik analizleri yapılırken eş-fazlı yer hareketi yanında zıt fazlı yer hareketinin ve deprem dalgalarının bir mesnetten diğerlerine ulaşma zamanlarının, buna bağlı olarak farklı hızların dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Kartal ve Soyluk [20] çalışmalarında eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışına yapı-zemin etkileşiminin etkisini incelemişlerdir. Çalışmaların sonucunda eğik kablo askılı köprülerin tasarımı yapılırken köprülerin inşaa edileceği bölgedeki zemin sınıfının köprünün deprem yükleri altındaki davranışı üzerinde büyük etkisinin olduğunu ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

2. EĞİK KABLO ASKILI KÖPRÜ GENEL ÖZELLİKLERİ VE SONLU ELEMAN MODELİ

Tasarımı yapılan eğik kablo askılı köprünün toplam uzunluğu 1970 m'dir. Köprünün merkez açıklığı 1000 m olup kenar açıklık mesafeleri ise 485 m'dir. Orta açıklık ve kenar açıklık tabliyesi çelikten oluşmaktadır (Şekil 1). Ana kulelerin yüksekliği 340 m'dir ve ters Y şeklinde tasarlanmıştır. Kablo yerleşim şekli yelpaze sistem olarak düşünülmüştür. Ana kule temellerinin genişliği 40m, boyu 80m ve kalınlığı da 10 m'dir. Ana kule zemine mesnetlendiği nokta ile tabliye arasındaki düşey mesafe 60 m olup tabliye üstünden ana kule tepe noktasına olan düşey mesafe 280 m'dir. Ana kule ve tabliye en kesiti Şekil 2'de gösterilmiştir. Köprü ayakları temelleri yüzeysel temel olarak tasarlanmıştır ve kule ayakları temellere ankastre olarak bağlanmıştır. Kenar açıklıklarda ise 120 m ve 250 m'lik kısımlarda ilave ayaklar olup köprü tabliyesi bu noktalarda düşey yönde mesnetlenmiştir [21].

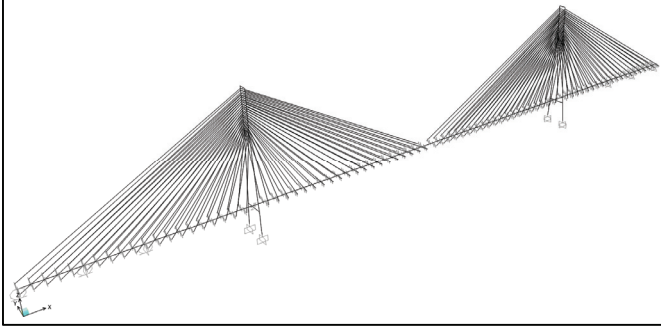


Şekil 1 - Eğik kablo askılı köprü genel görünümü



Şekil 2 - Eğik kablo askılı köprü ana kule ve tabliye en kesiti

Köprü'nün 3 boyutlu sonlu eleman modeli SAP 2000 Advanced 19.1.0 [22] sonlu eleman programı kullanılarak oluşturulmuştur. Ana kulelerin ve tabliyenin modellenmesinde çubuk elemanlar kullanılmıştır. Kabloların modellenmesinde SAP 2000 programının içinde mevcut bulunan özel kablo elemanları kullanılmıştır. Modelde toplam 384 düğüm noktası, 223 çubuk eleman, 160 adet kablo eleman ve 162 adet bağlantı elemanı kullanılmıştır. Şekil 3'de köprü'nün 3 boyutlu sonlu eleman modeli gösterilmiştir.



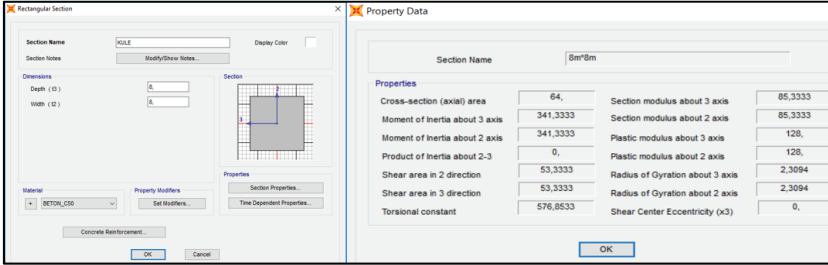
Şekil 3 - Eğik kablo askılı köprü'nün 3 boyutlu sonlu eleman modeli

Tablo 1 - Malzeme mekanik özellikleri

Yapısal Çelik Sınıfı (S 355)	Akma Gerilmesi (f_y) (N/mm ²)	Kopma Gerilmesi (f_u) (N/mm ²)	Elastisite Modülü (E) (N/mm ²)	Kayma Modülü (G) (N/mm ²)	Poisson (U)
	355	510	210000	80769	0,30
Kablo Çelik Sınıfı (EN 10138-3)	Akma Gerilmesi (f_y) (N/mm ²)	Kopma Gerilmesi (f_u) (N/mm ²)	Elastisite Modülü (E) (N/mm ²)	Kayma Modülü (G) (N/mm ²)	Poisson (U)
	1582	1860	195000	-	-
Beton Sınıfı (C 50)	Karakteristik Basınç Dayanımı (f_{ck}) (N/mm ²)	Karakteristik Çekme Dayanımı (f_{ctk}) (N/mm ²)	Elastisite Modülü (E) (N/mm ²)	Kayma Modülü (G) (N/mm ²)	Poisson (U)
	50	2,5	37000	15416	0,20

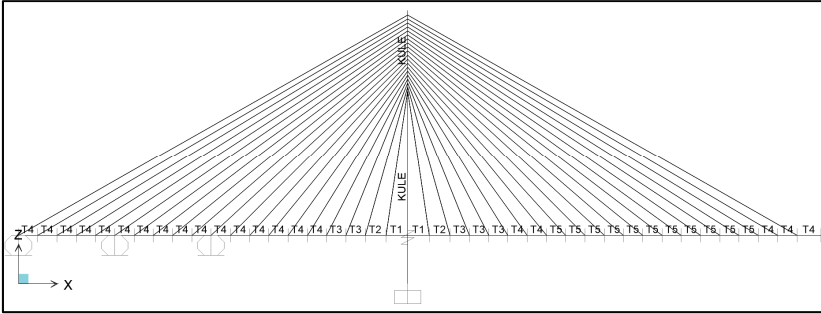
Orta açıklık ve kenar açıklık tabliyesi çelikten oluşmaktadır ve çelik kesitler köprü boyunca değişiklik göstermektedir. Tabliyede kullanılan çelik sınıfı S355 olarak seçilmiştir. Ana kule ve temellerde kullanılan betonarme donatı çeliği malzemesi ise S420 olarak seçilmiştir. Ana kule ve temeller için C50 beton sınıfı kullanılmıştır. Tabliye, ana kule ve kablolarda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Ana kuleler 340 m yüksekliğinde ve ters Y şeklinde betonarme sistem olarak tasarlanmıştır. Ana kule ve ana kule ayaklarını birbirine bağlayan yatay kirişlerin en kesiti 8 m x 8 m’dir. Eğik kablo askılı köprü için sonlu eleman modelinde oluşturulan ana kule kesiti ve geometrik özellikleri de Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4 - Eğik kablo askılı köprü ana kule kesiti ve geometrik özellikleri

Çelik malzemeden oluşan orta ve kenar açıklık tabliye kesitleri köprü boyunca değişiklik göstermektedir. Eğik kablo askılı köprü için tabliye kesitleri bilgisayar modelinde Şekil 5’de gösterilen dağılıma göre tanımlanmıştır.



Şekil 5 - Eğik kablo askılı köprü için çelik tabliye kesitleri

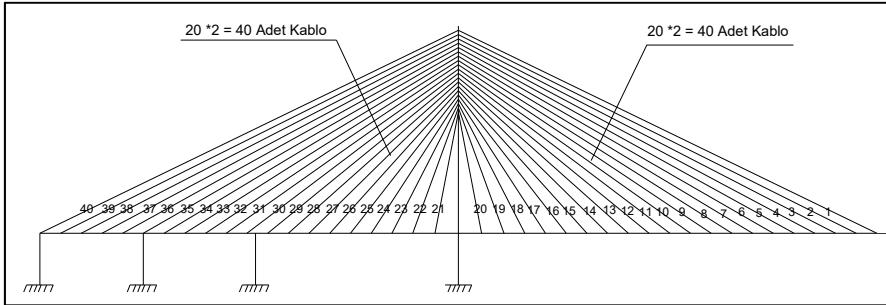
Tabliye genişliği 40 m, tabliye yüksekliği de 4 m’dir. Kabloların tabliyeye bağlantı noktaları arası mesafe 24 m’dir. Ortotropik kutu kesitli tabliye aerodinamik bir enkesite sahiptir. Eğik kablo askılı köprü için bilgisayar modelinde oluşturulan çelik tabliye kesitlerin geometrik özellikleri Şekil 6’da gösterilmiştir.

Property Data			
Section Name: T1			
Properties			
Cross-section (axial) area	2.6972	Section modulus about 3 axis	3.993
Moment of inertia about 3 axis	8.6415	Section modulus about 2 axis	13.0966
Moment of inertia about 2 axis	262.036	Plastic modulus about 3 axis	4.5703
Product of inertia about 2-3	0	Plastic modulus about 2 axis	22.8102
Shear area in 2 direction	0.3117	Radius of Gyration about 3 axis	1.7899
Shear area in 3 direction	0.8315	Radius of Gyration about 2 axis	9.8566
Torsional constant	8.7805	Shear Center Eccentricity (x3)	0
OK			

Property Data			
Section Name: T5			
Properties			
Cross-section (axial) area	1.2095	Section modulus about 3 axis	1.78
Moment of inertia about 3 axis	3.9292	Section modulus about 2 axis	6.2948
Moment of inertia about 2 axis	125.9184	Plastic modulus about 3 axis	2.0476
Product of inertia about 2-3	3.958E-04	Plastic modulus about 2 axis	10.6896
Shear area in 2 direction	0.2151	Radius of Gyration about 3 axis	1.8024
Shear area in 3 direction	0.5968	Radius of Gyration about 2 axis	10.2034
Torsional constant	6.8858	Shear Center Eccentricity (x3)	0
OK			

Şekil 6 - Eğik kablo askılı köprü tabliyesi T1 ve T5 kesiti geometrik özellikleri

Kablolarla oluşan sehim nedeniyle kablo elastisite modülü azalmaktadır. Yükün artmasıyla kablodaki sehimin azalması sonucu kablolarla ortaya çıkan lineer olmayan bu etkiyi dikkate almak için literatürde yaygın olarak kullanılan Ernst tarafından önerilen denklem ile hesaplanan eşdeğer elastisite modülü kullanılmıştır [23]. Kabloların yataydaki boyları ve çapları değişkenlik gösterdiğinden her bir kablo için eşdeğer elastisite modülü hesaplanmıştır. Kabloların genel yerleşimi Şekil 7’de, genel özellikleri de Tablo 2’de gösterilmiştir.

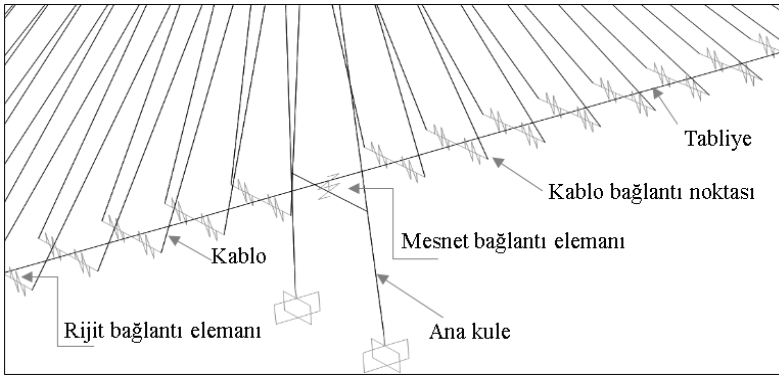


Şekil 7 - Eğik kablo askılı köprü kablo yerleşimi ve numaraları

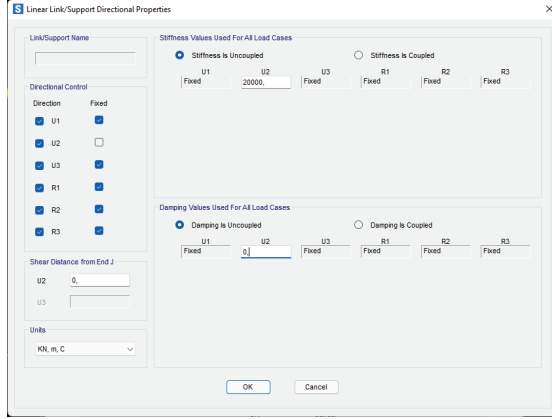
Tabliyenin kütlesi tabliye kenar uçlarında kabloların bağlandığı noktalarda toplanmıştır [24]. Küteller köprünün enine, boyuna ve düşey yönünde tanımlanmıştır. Tabliye çubuk elemanları ile ana kule çubuk elemanları birbirine bağlantı elemanları ile birleştirilmiştir. Bu bağlantı elemanları düşeyde ve enine yönde sabit olup, köprü boyuna yönünde 20000 kN/m’lik rijitliğe sahiptir. Ayrıca tabliye çubuk elemanları ile kablolar arasında rijit bağlantı elemanları tanımlanarak tabliye ile kablo bağlantısı gerçekçi bir şekilde sağlanmıştır. Şekil 8’de tabliyenin ana kuleye bağlantısı ve rijit bağlantı elemanları gösterilmiştir. Tabliyenin kenar ayaklar üzerindeki bağlantısı, köprünün boyuna yönünde kayar mesnet olarak diğer yönlere ise sabit mesnet olarak düzenlenmiştir. Tabliyesinin ana kuleye mesnetlenme şartları Şekil 9’da gösterilmiştir [21].

Tablo 2 - Eğik kablo askılı köprü kablo özellikleri

ORTA AÇIKLIK KABLoları					KENAR AÇIKLIK KABLoları				
Kablo no	Kablo Boyu (m)	Kablo yerleşimi	Kablo çapı (mm)	Kablo alanı (mm ²)	Kablo no	Kablo Boyu (m)	Kablo yerleşimi	Kablo çapı (mm)	Kablo alanı (mm ²)
1	485	Ø7 * 400	174	15448	40	485	Ø7 * 400	174	15448
2	461	Ø7 * 400	174	15448	39	461	Ø7 * 400	174	15448
3	437	Ø7 * 400	174	15448	38	437	Ø7 * 400	174	15448
4	413	Ø7 * 400	174	15448	37	413	Ø7 * 400	174	15448
5	389	Ø7 * 400	174	15448	36	389	Ø7 * 400	174	15448
6	365	Ø7 * 400	174	15448	35	365	Ø7 * 400	174	15448
7	341	Ø7 * 400	174	15448	34	341	Ø7 * 400	174	15448
8	317	Ø7 * 330	160	13062	33	317	Ø7 * 330	160	13062
9	293	Ø7 * 330	160	13062	32	293	Ø7 * 330	160	13062
10	269	Ø7 * 330	160	13062	31	269	Ø7 * 330	160	13062
11	245	Ø7 * 330	160	13062	30	245	Ø7 * 330	160	13062
12	221	Ø7 * 330	160	13062	29	221	Ø7 * 330	160	13062
13	197	Ø7 * 220	136	9438	28	197	Ø7 * 330	160	13062
14	173	Ø7 * 220	136	9438	27	173	Ø7 * 330	160	13062
15	149	Ø7 * 220	136	9438	26	149	Ø7 * 330	160	13062
16	125	Ø7 * 220	136	9438	25	125	Ø7 * 220	136	9438
17	101	Ø7 * 220	136	9438	24	101	Ø7 * 220	136	9438
18	77	Ø7 * 180	119	7226	23	77	Ø7 * 180	119	7226
19	53	Ø7 * 180	119	7226	22	53	Ø7 * 180	119	7226
20	27	Ø7 * 180	119	7226	21	27	Ø7 * 180	119	7226



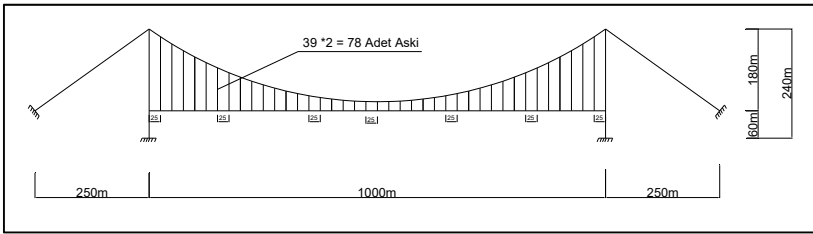
Şekil 8 - Köprü tabliyesinin ana kuleye bağlantısı ve rijit bağlantı elemanları



Şekil 9 - Eğik kablo askılı köprü tabliyesinin ana kuleye mesnetlenme şartları

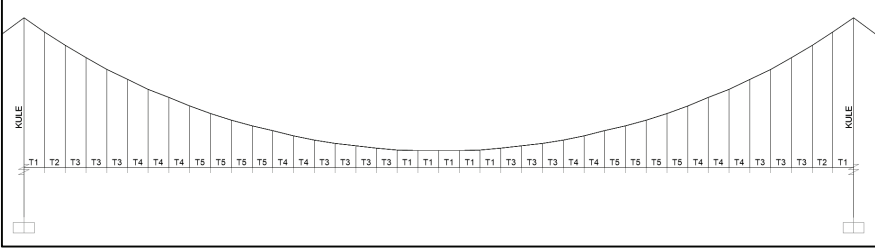
3. ASMA KÖPRÜ GENEL ÖZELLİKLERİ VE SONLU ELEMAN MODELİ

Tasarımı yapılan asma köprünün toplam uzunluğu 1500 m'dir. Köprünün merkez açıklığı 1000 m olup kenar açıklık mesafeleri ise 250 m'dir (Şekil 10). 4 m yüksekliğindeki köprü tabliyesi 40 m toplam genişliğe sahip olup, çelikten oluşmaktadır ve çelik kesitler köprü boyunca değişkenlik göstermektedir. Asma köprü için tabliye kesitleri bilgisayar modelinde Şekil 11'de gösterilen dağılıma göre tanımlanmıştır. Ana kule 240 m yüksekliğinde ve H şeklinde betonarme olarak tasarlanmıştır (Şekil 12). Ana kule ve ana kule ayaklarını birbirine bağlayan yatay kirişlerin en kesiti 8 m x 8 m'dir. Asma köprü için sonlu eleman modelinde oluşturulan ana kule kesiti ve geometrik özellikleri eğik kablo askılı köprü ile aynı olup daha önce Şekil 4'de gösterilmiştir. Ana kablolar kuleden 250 m uzaklıkta beton bloklara ankre edilmiştir. Köprü ayak temelleri yüzeysel temel olarak tasarlanmıştır ve kuleler temellere ankastre olarak mesnetlenmiştir. Ana kule temellerinin genişliği 40 m, boyu 80 m ve kalınlığı da 10 m'dir [25].

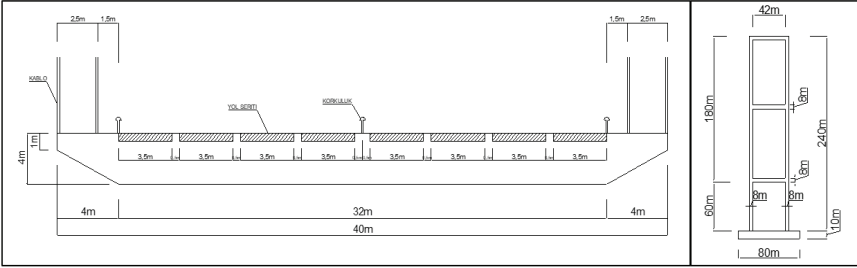


Şekil 10 - Asma köprü genel görünümü

Köprünün 3 boyutlu sonlu eleman modeli SAP 2000 Advanced 19.1.0 sonlu eleman programı kullanılarak oluşturulmuştur. Ana kulelerin ve tabliyenin modellenmesinde çubuk elemanlar kullanılmıştır. Asma köprü için oluşturulan çelik tabliye enkesiti ve enkesitlerin geometrik özellikleri eğik kablo askılı köprü ile aynı olup daha önce Şekil 6'da gösterilmiştir.

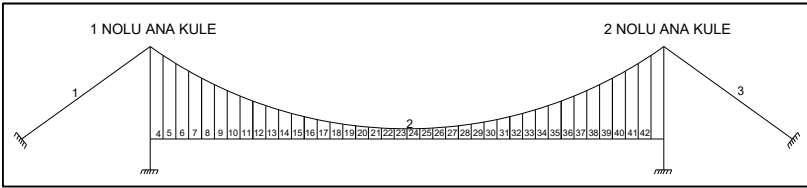


Şekil 11. Asma köprü çelik tabliye kesitleri



Şekil 12 - Asma köprü tabliye ve ana kule en kesiti

Askı halatlarının modellenmesinde SAP 2000 programının içinde mevcut bulunan özel kablo elemanları kullanılmıştır. Ana kablo ve askı halatları genel yerleşimi Şekil 13'de, genel özellikleri de Tablo 3'de gösterilmiştir.

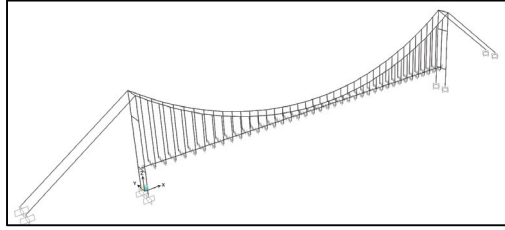


Şekil 13 - Asma köprü ana kablo ve askı halatları yerleşimi

Modelde toplam 271 düğüm noktası, 110 çubuk eleman, 162 adet kablo eleman ve 82 adet bağlantı elemanı kullanılmıştır. Şekil 14'de asma köprü'nün 3 boyutlu sonlu eleman modeli gösterilmiştir. Modelde tabliye çubuk elemanları ile askı halatları arasında rijit bağlantı elemanları tanımlanarak gerçek durumu yansıtacak şekilde tabliye ile askı halatı bağlantısı sağlanmıştır. Tabliyenin ana kuleye mesnetlendiği noktalarda, düşeyde ve enine yönde sabit olan ancak köprü eksenini boyunca 20000 kN/m'lik bir rijitliğe sahip olan bağlantı elemanları kullanılmıştır. Tabliyenin ana kuleye mesnetlenme şartları eğik kablo askılı köprü ile aynı olup daha önce Şekil 9'da gösterilmiştir. Tabliyenin kütlesi tabliye ile askı halatlarının bağlandığı noktalarda toplanmıştır [25].

Tablo 3 - Asma köprü ana kablo ve askı halat özellikleri

Kablo No	Kablo Boyu (m)	Kablo Çapı (mm)	Kablo Alanı (mm ²)	Kablo No	Kablo Boyu (m)	Kablo Çapı (mm)	Kablo Alanı (mm ²)
1	310	700	326952.5	21	21	160	13062.40
2	1067	700	326952.5	22	20.5	160	13062.40
3	310	700	326952.5	23	21	160	13062.40
4	163	160	13062.40	24	23	160	13062.40
5	147	160	13062.40	25	26	160	13062.40
6	132	160	13062.40	26	29	160	13062.40
7	118	160	13062.40	27	33	160	13062.40
8	106	160	13062.40	28	38	160	13062.40
9	94	160	13062.40	29	44	160	13062.40
10	84	160	13062.40	30	50	160	13062.40
20	23	160	13062.40	40	163	160	13062.40



Şekil 14 - Asma köprü 3 boyutlu sonlu eleman modeli

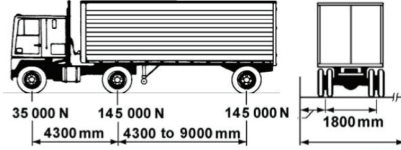
4. KÖPRÜLERİN TASARIMINDA KULLANILAN YÜKLER

Köprü yapı elemanlarının zati yükü kesit tariflerine göre SAP 2000 programı tarafından hesaplanmıştır. Köprü tabliesinde kullanılan ilave kaplama ve ekipman ağırlıkları ise Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4 - Köprü tabliesi ilave kaplama ve ekipman ağırlıkları

Yük Cinsi	Birim Ağırlık	Kalınlık	Yük Değeri
Asfalt	24.0 kN/m ³	8 cm	1.92 kN/m ²
İzolasyon	22.0 kN/m ³	1 cm	0.22 kN/m ²
Korkuluk	-	-	1.50 kN/m
Otokorkuluk	-	-	0.50 kN/m
Köprü üzeri aydınlatma	-	-	0.10 kN/m
Pilon Asansörü	-	-	0.15 kN/m

Trafik yüklemesi AASHTO- LRFD 2007 [26] Kısım 3.6.1.2.2'ye göre yapılmıştır. Yüklemede, köprü'nün tamamına üniform yayılı sabit trafik yükü uygulanırken, köprü boyunca 4 şeridin tamamının taşıt ile dolu olduğu durum incelenmiştir. Trafik yüklemesinde taşıt tipi olarak AASHTO'da tarifli tasarım kamyonu kullanılmıştır. Tasarım kamyonu ölçüleri ve yük değerleri Şekil 15'de gösterilmiştir.



Şekil 15 - Tasarım kamyonu ölçüleri ve yük değerleri [24]

Yaya yüklemesi olarak AASHTO- LRFD 2007 Kısım 3.6.1.2.2'ye göre tabliye üzerinde 3,60 kN/m² yaya yükü alınmıştır. Yaya şeridi genişliği 2,50 m'dir. Toplam 18,00 kN/m değerindeki yaya yükü (2 x 3,60 kN/m² x 2,50 m) köprü tabliyesinin tamamına uygulanmıştır. Rüzgâr yüklemesi AASHTO- LRFD 2007 Kısım 3.8'e göre yapılmıştır. Tasarım rüzgâr hızı 160 km/sa olarak kabul edilmiştir ve elde edilen rüzgâr basıncı tabliye ve ana kulelere uygulanmıştır. Deprem yüklerinin hesabında AASHTO- LRFD 2007 Kısım 3.10 kullanılmıştır. Köprüye etki eden deprem yükü için davranış spektrum analizi yapıp mod birleştirme yöntemi kullanılmıştır. Deprem bölgesi = 4, Ao = 0,40, Yapı önem katsayısı = 1.5 parametrelerine göre davranış spektrum grafiği oluşturulmuştur ve köprü'nün her iki yönünde deprem yükü uygulanmıştır.

5. DEPREM HAREKETİNİN TANIMLANMASI

Tasarımı yapılan eğik kablo askılı ve asma köprüde kritik deprem yüklemelerini belirleyebilmek için sert, orta ve yumuşak olmak üzere üç farklı zemin grubu için üretilen kayıtlar üniform ve farklı yer hareketleri şeklinde köprü sistemlerine uygulanmıştır. Yer hareketi kayıtları rasgele titreşim teorisi esas alınarak üretilirken, üretilen her bir yer hareketi EC8'de tanımlanan B, C ve D zemin sınıflarına karşılık gelen sert, orta ve yumuşak zemin cinsleri ile uyumlu olacak şekilde elde edilmiştir.

Yer hareketi üretmek üzere bu çalışmada Hao ve arkadaşları [27] tarafından önerilen simülasyon yöntemi esas alınmıştır. Söz konusu yöntem, uygunluk fonksiyonu ile spektral yoğunluk fonksiyonlarına bağlı olarak farklı yer hareketlerinin üretilmesinde kullanılmaktadır. i ve j mesnet noktalarındaki ivmeler için uygunluk fonksiyonu,

$$\gamma_{ij}(i\omega) = \frac{S_{ij}(i\omega)}{\sqrt{S_{ii}(w)*S_{jj}(w)}} \quad (1)$$

Burada, $S_{ii}(w)$ ve $S_{jj}(w)$ sırasıyla, i ve j mesnetlerindeki yer hareket ivmelerine ait spektral yoğunluk fonksiyonlarını gösterirken, $S_{ij}(i\omega)$ i ve j mesnetlerindeki yer hareket ivmeleri

arasındaki karşıt-spektral yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir. Uygunluk fonksiyonu ise aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\gamma_{ij}(i\omega) = |\gamma_{ij}(\omega)|^i \gamma_{ij}(i\omega)^w \gamma_{ij}(i\omega)^s = |\gamma_{ij}(\omega)|^i \exp[i(\theta_{ij}(\omega)^w + \theta_{ij}(\omega)^s)] \quad (2)$$

Burada $\gamma_{ij}(\omega)^i$ ve $\gamma_{ij}(i\omega)^w$, $\gamma_{ij}(i\omega)^s$ sırası ile korelasyon, dalga-yayımla ve zemin etkilerini ifade etmektedir. Zemindeki dalgaların yayılması esnasında yansıması ve kırılması sonucu oluşan korelasyon etkisi için, Harichandran ve Vanmarcke [28] tarafından önerilen ve yaygın olarak kullanılan model dikkate alınmıştır. Dalgaların mesnet noktalarına varış süreleri arasındaki farktan kaynaklanan dalga-yayımla etkisi,

$$\theta_{ij}(\omega)^w = -\frac{wd_{ij}^L}{v_{app}} \quad (3)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Burada v_{app} görünen dalga yayılma hızını ifade etmekte olup, d_{ij}^L dalga yayılma doğrultusunda mesnetler arasındaki yatay izdüşüm uzaklığını göstermektedir. Lokal zemin koşullarındaki farklılıklardan kaynaklanan zemin etkisi ise,

$$\theta_{ij}(\omega)^s = \tan^{-1} \frac{Im[H_i(i\omega)H_j(-i\omega)]}{Re[H_i(i\omega)H_j(-i\omega)]} \quad (4)$$

ile tanımlanırken, burada $H_i(i\omega)$ zemin katmanlarındaki filtrasyonu temsil eden zemin frekans davranış fonksiyonudur.

Yer ivmesinin spektral yoğunluk fonksiyonu için, Clough ve Penzien [29] tarafından geliştirilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılmaktadır.

$$S_{ii}(\omega) = S_0 \frac{w_g^4 + 4\zeta_g^2 w_g^2 \omega^2}{(w_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 w_g^2 \omega^2} \frac{\omega^4}{(w_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2 w_f^2 \omega^2} \quad (5)$$

Burada S_0 , spektral yoğunluk fonksiyonunun ordinat değerini gösterirken, w_g ve ζ_g , sırasıyla birinci filtreye ait doğal frekansı ve sönüm oranını, w_f ve ζ_f ise ikinci filtreye ait parametre değerlerini ifade etmektedir. Yer hareketi elde etmek için, ilk olarak belirtilen spektral yoğunluk fonksiyonları ile uyumlu stasyonere rasgele işlem örnekleri $\ddot{u}_1(t)$, $\ddot{u}_2(t)$, ..., $\ddot{u}_n(t)$, oluşturulmaktadır (Hao ve arkadaşları [27]). Bu amaçla,

$$\ddot{u}_k(t) = \sum_{m=1}^k \sum_{l=1}^N A_{km}(w_l) \cos[w_l t + \theta_{km}(w_l) + \phi_{ml}(w_l)] \quad (6)$$

kullanılmaktadır. Burada $w_l = l\Delta w$, $\Delta w = w_N/N$, w_N üst kesim frekansını, $\phi_{ml}(w_l)$ $0-2\pi$ aralığında üniform dağılım gösteren rasgele faz açısını (ϕ_{ml} ve ϕ_{rs} $m=r$ ve $n=s$ olması dışında istatistiksel olarak bağımsız olmalıdır), k mesnet noktalarını ifade etmekte olup, $A_{km}(w_l)$ ve $\theta_{km}(w_l)$ ise oluşturulmuş kayıtların genlik ve faz açısını ifade etmektedir.

Deprem hareketinin stasyonere olmayan bir işlem olması nedeniyle farklı mesnet noktalarındaki stasyonere olmayan yer hareket ivmeleri, stasyonere olarak elde edilen yer

hareketlerinin stasyoner olmayan bir şekil fonksiyonu ile çarpılması sonucu elde edilmektedir.

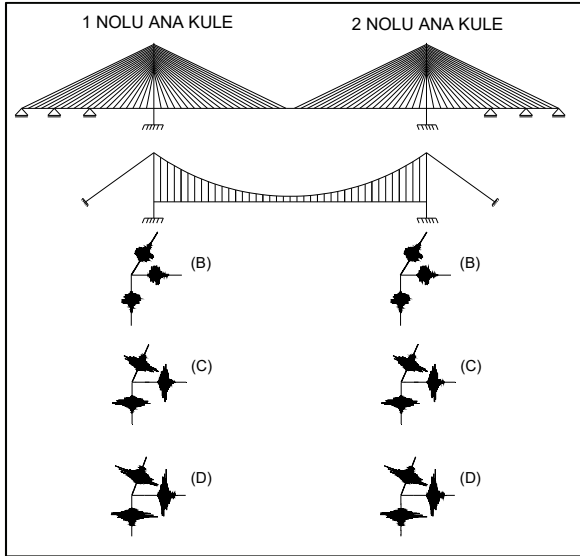
$$a_k(t) = \xi(t)\ddot{u}_k(t) \quad (7)$$

Şekil fonksiyonu $\xi(t)$ aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\xi(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 \leq t \leq t_0 \\ 1 & t_0 < t \leq t_n \\ \exp(-0.394(t - t_n)) & t_n < t \end{cases} \quad (8)$$

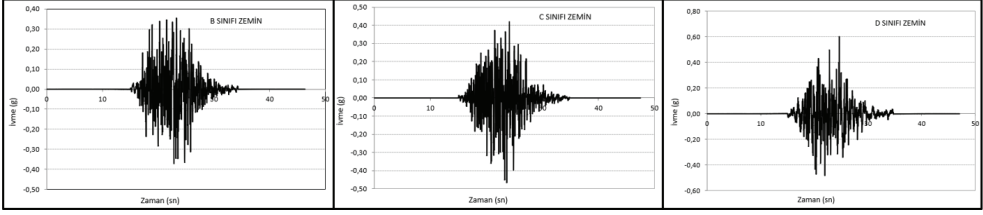
Burada t_0 ve t_n dominant deprem titreşim bölgesindeki stasyoner bölümüm başlangıç ve bitiş sürelerini göstermektedir. Bu çalışmada $t_0=4s$ ve $t_n=10s$ değerleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada oluşturulan tüm yer hareket ivme kayıtları, %5 sönüm oranı için ve 0.3g PSA'ya göre normalize edilmek suretiyle, Eurocode 8 [30] ile uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir.

Üniform yer hareketi için köprü modelinin mesnetlerinde EC8'e göre sınıflandırılmış homojen sert (B), orta (C) ve yumuşak (D) zemin koşulları dikkate alınmıştır. B, C ve D sınıfı zemin için elde edilen ivme-zaman kayıtları kullanılarak köprülere enine, boyuna ve düşey doğrultuda olmak üzere üç yönlü üniform yer hareketleri uygulanmıştır. Düşey doğrultuda uygulanan yer hareketi, yatay bileşen 2/3 çarpılmak suretiyle elde edilmiştir. Köprü sistemlerine uygulanan üniform yer hareketleri Şekil 16'da gösterilmiştir.



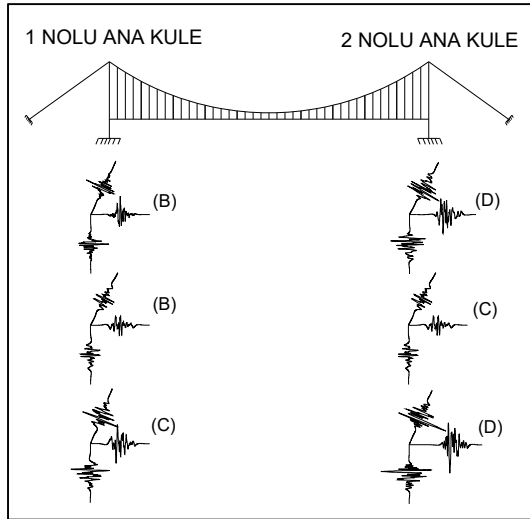
Şekil 16 - Köprü sistemlerine uygulanan üniform yer hareketleri

Üniform yer hareketi durumunda köprü sistemlerine uygulanmak üzere B, C ve D sınıfı zemin için elde edilen ivme-zaman kayıtları Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17 - B, C ve D sınıfı zemin ivme-zaman kayıtları

SAP2000 programında yerdeğiştirme-zaman fonksiyonu kullanılarak farklı yer hareketi uygulanabildiğinden, üniform yer hareketi uygulamasından farklı olarak mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamasında yerdeğiştirme-zaman kayıtları kullanılmıştır. Yerdeğiştirme kayıtları ivme kayıtlarına bağlı olarak elde edilirken, DEEPSOIL v7.0 [31] yazılımı ile eksen düzeltmesi yapılmıştır. Farklı yer hareketi analizi için yer hareketi üretilirken önce zemin homojen alınmış olup, yer hareketi değişimi dalga-yayıma ve korelasyon etkisi ile dikkate alınmıştır. Bu durumda köprülerin 1 nolu ana kule mesnetlerine ve köprülerin bu yakasındaki diğer mesnetlere aynı yer hareketleri enine, boyuna ve düşey yönde olmak üzere üç doğrultuda uygulanırken, 2 nolu ana kule mesnetlerine ve köprülerin bu yakasındaki diğer mesnetlere dalga yayılma ve korelasyon etkisi dikkate alınarak belirlenen yer hareketleri yine üç doğrultuda uygulanmıştır. Dalga yayılma hızları B, C ve D zemin cinsi için sırasıyla 720 m/s, 360 m/s ve 180 m/s olarak dikkate alınmıştır.

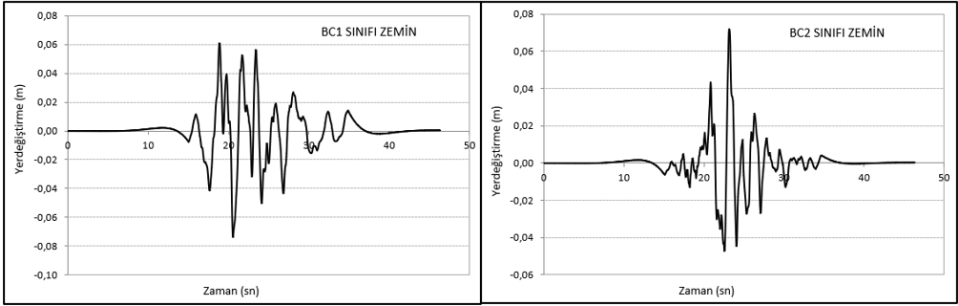


Şekil 18 - Asma köprüye uygulanan mesnetlerinden farklı yer hareketleri

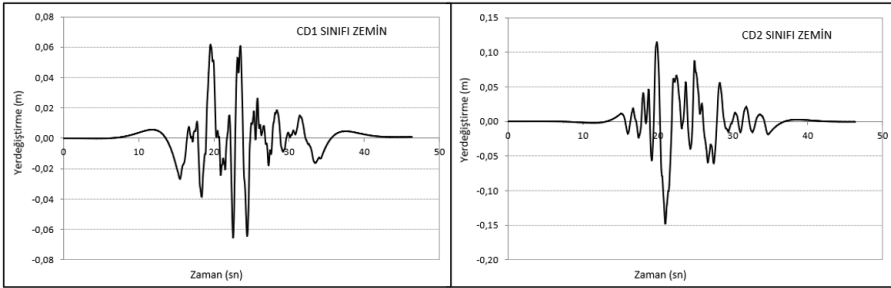
Daha sonra 1 nolu ana kule mesnetleri ile köprülerin bu yakasındaki diğer mesnetlerdeki zemin cinsi aynı olmak üzere, 2 nolu ana kule mesnetleri ile köprülerin bu yakasındaki diğer mesnetlerdeki zemin cinsi farklı alınarak, iki yakadaki zemin cinsinin farklı olması durumu

için de farklı yer hareketi uygulaması yapılmıştır. Zemin cinsindeki farklılık yanında dalga-yayıma ve korelasyon etkisinden kaynaklanan yer hareketi değişimi de dikkate alınmıştır. Heterojen zemin cinsi olarak BC, BD ve CD durumları dikkate alınmıştır. BC kısaltması ile tanımlanan farklı yer hareketi için, köprü modellerinin 1 nolu ana kulesinin bulunduğu yakadaki mesnetlerin sert (B) zemin sınıfı üzerine inşa edildiği kabul edilirken, diğer yakasındaki mesnetlerin orta (C) zemin sınıfı üzerine inşa edildiği kabul edilmiştir. Köprü sistemlerine uygulanan mesnetlerinden farklı yer hareketleri Şekil 18’de gösterilmiştir.

Eğik kablo askılı köprüde ana kule mesnetleri harici diğer mesnetler köprü’nün boyuna yönde kayar mesnet olduklarından bu mesnetlere boyuna yönde yer hareketi uygulanmamıştır. Deprem yüklemeleri için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmış olup söz konusu analizlerde köprülerin kendi ağırlıkları da göz önünde bulundurulmuştur. Asma köprüye uygulanan BC ve CD sınıfı zemin için üretilmiş farklı yer hareketine ait yerdeğiştirme-zaman kayıtları Şekil 19 ve Şekil 20’de gösterilmiştir.



Şekil 19 - Asma köprü 1 ve 2 nolu yakada uygulanan BC sınıfı zemin yerdeğiştirme -zaman kayıtları



Şekil 20 - Asma köprü 1 ve 2 nolu yakada uygulanan CD sınıfı zemin yerdeğiştirme -zaman kayıtları

6. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN TANIMLANMASI

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı köprü modellerinde, ana kulelerin ve kenar ayakların mesnetlendiği noktalarda zeminler doğrusal elastik yaylar ile temsil edilmiştir. Mesnet noktalarında, her bir ötelenme ve dönme için eşdeğer Winkler yatak katsayısı (k)

hesaplanmıştır. Yatak katsayısı hesapları FEMA 356 [32] Bölüm 4'e göre yapılmıştır. Zemin sınıflarına göre zeminin dönme ve ötelenme rijitlikleri değiştiğinden her üç zemin sınıfı (B, C, D) için ayrı hesaplamalar yapılmıştır. Her iki köprü ana kule temellerinin de aynı boyutlarda olmasından dolayı her bir ana kule temeli için hesaplanan zemin rijitlikleri her iki köprü ana kule mesnet noktalarına da uygulanmıştır. Eğik kablo askılı köprü'nün kenar açıklık temelleri için de ayrıca yatak katsayısı hesabı yapılmıştır. Köprü temellerinin zemine mesnetlendiği noktalarda temellerin dönme ve ötelenme rijitlikleri için kullanılan formüller aşağıda verilmiştir. [32]

$$\text{Temel enine yönde ötelenme rijitliği (Kx)} = [(G \times B) / (2 - \nu)] \times [3,4 \times (L/B)^{0,65} + 1,2]$$

$$\text{Temel boyuna yönde ötelenme rijitliği (Ky)} = [(G \times B) / (2 - \nu)] \times [3,4 \times (L/B)^{0,65} + 0,4 \times L / B + 0,8]$$

$$\text{Temel düşey yönde ötelenme rijitliği (Kz)} = [(G \times B) / (1 - \nu)] \times [1,55 \times (L/B)^{0,75} + 0,8]$$

$$\text{Temel boyuna yönde dönme rijitliği (Kxx)} = [(G \times B^3) / (1 - \nu)] \times [0,4 \times (L/B) + 0,1]$$

$$\text{Temel enine yönde dönme rijitliği (Kyy)} = [(G \times B^3) / (1 - \nu)] \times [0,47 \times (L/B)^{2,4} + 0,034]$$

$$\text{Temel düşey yönde dönme rijitliği (Kzz)} = (G \times B^3) \times [0,53 \times (L/B)^{2,45} + 0,51]$$

Burada, "G" kayma modülünü, "B" temel genişliğini, "ν" poisson oranını, "L" de temel boyunu ifade etmektedir. Köprü temelleri için hesaplanan ötelenme ve dönme rijitlikleri köprü sonlu elamanlar modellerinde yay olarak her bir ana kulenin ve kenar ayakların mesnet noktalarında tariflenmiştir. Her üç zemin sınıfı için ana kule ve kenar açıklık temellerinin dönme ve ötelenme rijitlikleri Tablo 5 ve Tablo 6'da gösterilmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği köprü modellerinde ise ankastre mesnet uygulaması yapılmıştır.

Tablo 5 - Asma ve eğik kablo askılı köprü ana kule temelleri dönme ve ötelenme rijitlikleri

Ana Kule Temelleri (B = 40m, L = 80m, ν=0.5)						
Zemin Sınıfı	Kx (kN/m)	Ky (kN/m)	Kz (kN/m)	Kxx (kN.m)	Kyy (kN.m)	Kzz (kN.m)
B	501389577	532078262	784121731	3.31438E+11	9.26065E+11	6.27155E+11
C	75499776.91	80120911.8	118073886	49908256881	1.39448E+11	94437660923
D	15544071.72	16495481.84	24309329.47	10275229358	28709845636	19443047837

Tablo 6 - Eğik Kablo Askılı Köprü Kenar Ayak Temelleri Dönme ve Ötelenme Rijitlikleri

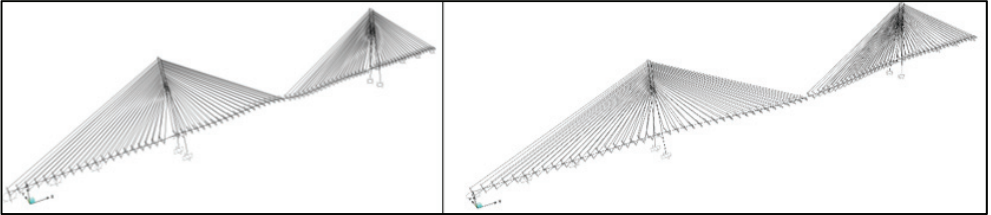
Kenar Ayak Temelleri (B = 10m, L = 40m, ν=0.5)						
Zemin Sınıfı	Kx (kN/m)	Ky (kN/m)	Kz (kN/m)	Kxx (kN.m)	Kyy (kN.m)	Kzz (kN.m)
B	183590877	206607390.7	298297588.4	9782018349	75534907083	46994656134
C	27645309.92	31111161.09	44917968.78	1472986748	11374126811	7076505406
D	5691681.454	6405239.048	9247817.101	303261977.6	2341731990	1456927584

7. NÜMERİK ANALİZLER

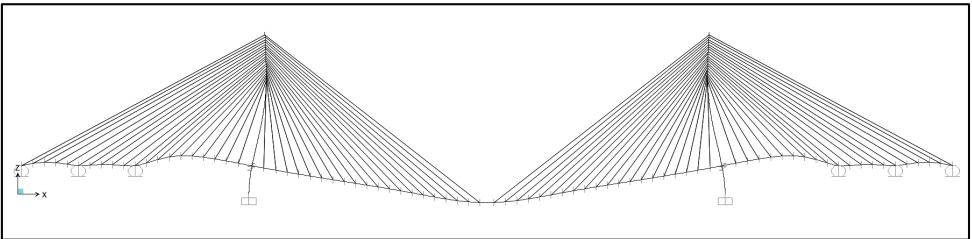
Dikkate alınan köprü sistemlerin üniform ve farklı yer hareketleri etkisindeki analizleri hem yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı hem de ihmal edildiği durumlar için yapılmış ve elde edilen bulgular karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sert, orta ve yumuşak zemin cinsleri dikkate alınarak üretilen üniform ve farklı yer hareketleri için gerçekleştirilen dinamik analizler neticesinde ana kulelerde ve tabliyelerde elde edilen yer değiştirme ve kesit tesirlerinin karşılaştırmaları yapılmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumlar “YZE” olarak, ihmal edildiği durumlar ise “ANKR” olarak adlandırılmıştır. Çalışmada dikkate alınan köprülerin geometri, kütle ve rijitlik özelliklerinin farklı olması nedeniyle, yapısal tepkilerin farklı olması beklenen bir durumdur. Burada yapılan karşılaştırmanın amacı, üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması durumları için söz konusu köprülerin performansını belirlemek ve deprem hareketinin üniform veya farklı olarak uygulanması durumunda, yapı-zemin etkileşimine de bağlı olarak, ne derece etkilendiklerini göreceli olarak karşılaştırmaktır. Böylelikle, bu çalışmanın amacına uygun olarak, merkez açıklığının 1000m’ye ulaştığı uzun açıklıklı kablo-destekli köprü sistemlerinde, deprem kuvvetleri açısından köprü tipinin seçimine karar verebilmek için bir değerlendirme yapılabilmesi hedeflenmiştir.

7.1. Modal Analiz Sonuçları

Eğik kablo askılı köprü analizlerinde 50 mod dikkate alınmış olup, kütle katılımı boyuna yönde %92, enine yönde %91 olarak gerçekleşmiştir. Köprünün modal analizi sonucunda elde edilen ilk üç mod şekilleri Şekil 21 ve Şekil 22’de gösterilmiştir. Köprünün 1. modu boyuna yöndeki salınım modudur ve 11.88 sn’lik doğal periyota sahiptir. 2. modu yatay yöndeki eğilme modudur ve 8,75 sn’lik periyota sahiptir. 3. modu düşey yöndeki eğilme modudur ve 5,97 sn’lik periyota sahiptir. Diğer modlar burulma modları olup periyodları da çok yakın olduğundan burada gösterilmemiştir.



Şekil 21 - Eğik Kablo Askılı Köprü 1. ve 2. Mod Şekilleri



Şekil 22 - Eğik Kablo Askılı Köprü 3. Mod Şekli

Eğik kablo askılı köprü için düşey yöndeki eğilme frekansı hesabı Chinese Wind-resistant Design Specification for Highway Bridges [33] Bölüm 5’de yer alan ampirik formüller kullanılarak da hesaplanmıştır.

$$f_b = 150 / L \quad (9)$$

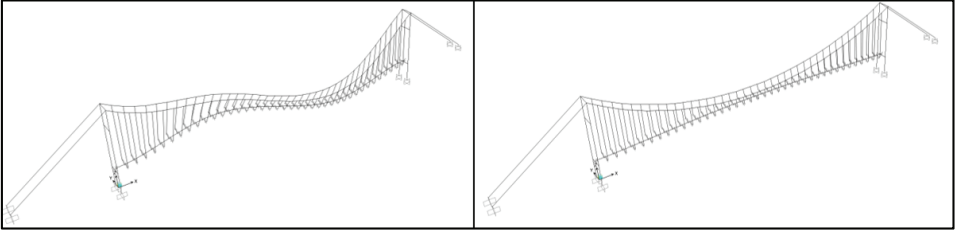
L = Köprü merkez açıklığı (Kenar açıklık mesnetli) = 1000 m

$$f_b = 0,15 \text{ Hz}$$

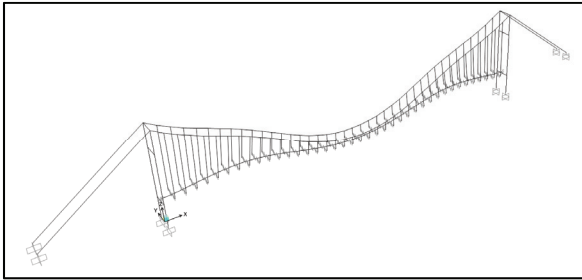
$$T_b (\text{Düşey Periyot}) = 1 / f_b = 6,67 \text{ sn}$$

Sonlu eleman yazılımı ile elde edilen düşey yöndeki eğilme modu 5,97 sn olup, yukarıdaki formülasyon ile elde edilen $T = 6,67$ sn değerine yakın olduğu görülmektedir.

Asma köprü analizlerinde 50 mod dikkate alınmış olup, kütle katılımı boyuna yönde % 93, enine yönde % 90 olarak gerçekleşmiştir. Köprünün modal analizi sonucunda elde edilen ilk üç mod şekilleri Şekil 23 ve Şekil 24’de gösterilmiştir. Köprünün 1. modu düşey yöndeki antisimetrik eğilme modudur ve 9,93 sn’lik doğal periyota sahiptir. 2. modu yatay yöndeki eğilme modudur ve 9,22 sn’lik periyota sahiptir. 3. modu düşey yöndeki eğilme modudur ve 7,01 sn’lik periyota sahiptir. Diğer modlar burulma modları olup periyotları da çok yakın olduğundan burada gösterilmemiştir.



Şekil 23 - Asma Köprü 1. ve 2. Mod Şekilleri



Şekil 24 - Asma Köprü 3. Mod Şekli

Dikkate alınan eğik kablo askılı ve asma köprü sistemlerinin kütle ve rijitlik özelliklerindeki farklılıklar yanında, mesnet koşullarındaki farklılığa da bağlı olarak modal davranışlarında

da farklılıklar ortaya çıkmıştır. Örneğin eğik kablo askılı köprü için ilk beş modun x ve y doğrultusundaki kütle katılım oranı %70 civarında iken, asma köprüde x doğrultusundaki katılım 19. modda, y doğrultusundaki katılım ise 8.modda %70'i geçmektedir. Söz konusu bu farklılıkların yapısal tepkiler üzerinde de etkili olduğu düşünülmektedir.

Asma köprü için düşey yöndeki simetrik ve antisimetrik eğilme frekansı hesapları da Chinese Wind-resistant Design Specification for Highway Bridges [33] Bölüm 5'de yer alan ampirik formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_b = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{EI \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 + 2H_g}{m}} \quad (10)$$

L = Köprü merkez açıklığı (Kenar açıklık mesnetli) = 1000 m

EI = Düşey eğilme rijitliği ($1,73 \times 10^{12}$ N/m²)

Hg = Sabit yükler altında ana kabloda oluşan yatay çekme kuvveti ($7,84 \times 10^7$ N)

m = Tabliye ve ana kablonun birim boy ağırlığı (25280 kg/m)

fb = 0,094 Hz

Tb (Düşey Periyot)= 1/ fb = 10,63 sn

Sonlu eleman yazılımı ile elde edilen düşey yöndeki antisimetrik eğilme modu 1. mod olup bu moda ait periyot değeri 9,93 sn'dir. Yukarıdaki formülasyon ile elde edilen T = 10,63 sn değerinin, sonlu eleman yazılımı ile elde edilen değere yakın olduğu görülmektedir. Asma köprü için düşey yöndeki simetrik eğilme frekansı da aşağıdaki formülasyon ile hesaplanmıştır.

$$f_b = \frac{0.1}{L} \sqrt{\frac{E_c A_c}{m}} \quad (11)$$

L = Köprü merkez açıklığı (Kenar açıklık mesnetli) = 1000 m

Ec = Ana kablo elastisite modülü ($1,95 \times 10^{11}$ N/m²)

Ac = Ana kablo kesit alanı (0,33 m²)

m = Tabliye ve ana kablonun birim boy ağırlığı (25280 kg/m)

fb = 0,159 Hz

Tb (Düşey Periyot)= 1/ fb = 6,29 sn

Sonlu eleman yazılımı ile elde edilen düşey yöndeki simetrik eğilme modu 3. mod olup bu moda ait periyot değeri 7,01 sn'dir. Yukarıdaki formülasyon ile elde edilen T = 6,29 sn değeri ile sonlu eleman yazılımı ile elde edilen değerin yine yakın olduğu görülmektedir.

7.2. Yer Değiştirmeler

Her üç zemin sınıfı için yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlar göz önünde bulundurularak uygulanan yer hareketleri neticesinde en fazla yer değiştirme değerlerinin elde edildiği eğik kablo askılı ve asma köprü sistemlerinin tabliye orta noktalarında ve eğik kablo askılı köprü sistemi ana kule tepe noktası ile asma köprü sistemi ana kule orta noktası için elde edilen yer değiştirme değerleri, merkez açıklık uzunluğuna ve kule yüksekliğine bölünmek suretiyle oransal olarak Tablo 7'de gösterilmiştir. Yer hareketlerinin asma ve eğik kablo askılı köprü üzerindeki göreceli etkilerini belirleyebilmek için, eğik kablo askılı köprü için elde edilen yer değiştirme oranları asma köprü için elde edilen yer değiştirme oranları ile normalize edilmiştir.

Hem yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı hem de ihmal edildiği üniform yer hareketi uygulanması neticesinde eğik kablo askılı köprü tabliyesinde elde edilen düşey yer değiştirme değeri oranları asma köprü tabliyesinde elde edilen yer değiştirme değeri oranlarına göre her üç zemin sınıfı için de daha büyük çıkmış olup aradaki fark ortalama olarak %30 mertebesindedir. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması neticesinde sert-yumuşak (BD) ile sert-orta (BC) heterojen zemin sınıfları için asma köprü tabliyesinde elde edilen düşey yer değiştirme değeri oranlarının eğik kablo askılı köprü tabliyesinde elde edilen yer değiştirme değeri oranlarına göre sırasıyla %44 ve %24 daha büyük olduğu, orta-yumuşak (CD) heterojen zemin sınıfı için elde edilen değerlerin ise oldukça yakın olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ve homojen zemin ortamının dikkate alındığı mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması neticesinde homojen yumuşak (DD) zemin cinsi için eğik kablo askılı köprü tabliyesinde elde edilen düşey yer değiştirme değeri oranının asma köprü tabliyesinde elde edilen yer değiştirme değeri oranına göre %39 daha büyük olduğu, homojen sert (BB) ve homojen orta (CC) zemin sınıfları için elde edilen değerlerin ise oldukça yakın olduğu gözlenmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması durumunda sert-yumuşak (BD) ile sert-orta (BC) heterojen zemin sınıfları için asma köprü tabliyesinde elde edilen düşey yer değiştirme değeri oranlarının eğik kablo askılı köprü tabliyesinde elde edilen yer değiştirme değeri oranlarına göre sırasıyla %39 ve %27 daha büyük olduğu, orta-yumuşak (CD) heterojen zemin sınıfı için elde edilen değerlerin ise yakın olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve homojen zemin ortamının dikkate alındığı mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması durumunda homojen orta (CC) zemin cinsi için asma köprü tabliyesinde elde edilen düşey yer değiştirme değeri oranının eğik kablo askılı köprü tabliyesinde elde edilen yer değiştirme değeri oranına göre %14 daha büyük olduğu, homojen sert (BB) ve homojen yumuşak (DD) zemin sınıfları için elde edilen değerlerin ise oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.

Kule yatay yer değiştirme oranları incelendiğinde, hem yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı hem de ihmal edildiği durumda üniform yer hareketinin uygulanması neticesinde her üç zemin sınıfı için de eğik kablo askılı köprüde elde edilen maksimum yatay yer değiştirme değeri oranlarının asma köprüde elde edilen maksimum yer değiştirme değeri oranlarına göre daha büyük olduğu gözlenmiştir. Orta (CC) zemin sınıfı için ankastre durumda söz konusu oran %93 mertebesindedir. Mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması durumunda ise genel olarak asma köprüde elde edilen maksimum yatay yer değiştirme değeri oranları, eğik kablo askılı köprüde elde edilen maksimum yer değiştirme değeri oranlarına göre daha büyük çıkmıştır. Bunun yanında ankastre durumda sert-orta (BC) heterojen zemin sınıfı için eğik

kablo askılı köprü kule yatay yerdeğiştirme değeri oranının asma köprü kulesinde elde edilen yerdeğiştirme değeri oranına göre %30 mertebesinde daha büyük olduğu gözlenmiştir.

Tablo 7 - Tabliye ve ana kulelerde elde edilen maksimum yer değİştirme oranları

Yer Hareketi	Tabliye Orta Noktası Düşey Deplasman Oranları (u1/L)			Kule Yatay Deplasman Oranları (u2/h)		
	Kablo Askılı Köprü L=1000m (a)	Asma Köprü L=1000m (b)	Oran (a/b)	Kablo Askılı Köprü – Kule Tepe Noktası h=340m (a)	Asma Köprü - Kule Orta Noktası h=240m (b)	Oran (a/b)
Üniform Yer Hareketi BB (ANKR)	0.152	0.149	1,02	0.403	0.249	1.62
Üniform Yer Hareketi CC (ANKR)	0.221	0.162	1.36	0.724	0.375	1.93
Üniform Yer Hareketi DD (ANKR)	0.363	0.296	1.23	0.994	0.638	1.56
Üniform Yer Hareketi BB (YZE)	0.202	0.155	1.30	0.470	0.350	1.34
Üniform Yer Hareketi CC (YZE)	0.252	0.176	1.43	0.793	0.423	1.87
Üniform Yer Hareketi DD (YZE)	0.406	0.311	1.31	1.106	0.883	1.25
Farklı Yer Hareketi BD (ANKR)	0.398	0.711	0.56	0.653	0.933	0.70
Farklı Yer Hareketi BC (ANKR)	0.302	0.399	0.76	0.662	0.508	1.30
Farklı Yer Hareketi CD (ANKR)	0.485	0.477	1.02	0.797	1.121	0.71
Farklı Yer Hareketi BB (ANKR)	0.314	0.294	1.07	0.597	0.571	1.05
Farklı Yer Hareketi CC (ANKR)	0.328	0.314	1.04	0.756	0.714	1.06
Farklı Yer Hareketi DD (ANKR)	0.683	0.492	1.39	1.056	0.950	1.11
Farklı Yer Hareketi BD (YZE)	0.506	0.832	0.61	0.772	1.220	0.63
Farklı Yer Hareketi BC (YZE)	0.339	0.465	0.73	0.721	0.737	0.98
Farklı Yer Hareketi CD (YZE)	0.602	0.612	0.98	0.836	1.468	0.57
Farklı Yer Hareketi BB (YZE)	0.378	0.397	0.95	0.648	0.671	0.97
Farklı Yer Hareketi CC (YZE)	0.353	0.410	0.86	0.917	1.069	0.86
Farklı Yer Hareketi DD (YZE)	0.756	0.762	0.99	1.186	1.263	0.94

(u1 : Düşey Yerdeğiştirme (mm), u2 : Yatay Yerdeğiştirme (mm))

Yapı-zemin etkileşimi hem eğik kablo askılı köprüde hem de asma köprüde, üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması için tabliye düşey yer değİştirmelerini ve kule yatay yer değİştirmelerini arttırmıştır. Yapı-zemin etkileşiminden dolayı mesnetlerden farklı yer hareketi uygulanması durumunda eğik-kablo askılı köprü modeline ait kule ve tabliye yer

değiştirmelerinde gözlemlenen ortalama artış miktarı, üniform yer hareketi uygulaması için elde edilen artış miktarına yakın çıkarken, asma köprü modelinde mesnetlerden farklı yer hareketi uygulanması durumunda gözlemlenen ortalama artış miktarı, üniform yer hareketi uygulaması için elde edilen artış miktarından daha fazla olmuştur.

Tabliye düşey yerdeğiştirmeleri ile kule yatay yerdeğiştirmeleri için elde edilen sonuçlar, üniform yer hareketi etkisinde eğik kablo askılı köprünün asma köprüye oranla daha fazla etkilendiğini gösterirken, mesnetlerden farklı yer hareketi uygulaması durumunda asma köprünün genel olarak daha fazla etkilendiğini ortaya koymaktadır.

7.3. Eğilme Gerilmeleri

Eğik kablo askılı köprü tabliyesi için en büyük eğilme gerilmesi, maksimum momentin meydana geldiği tabliyenin ana kuleye mesnetlendiği noktalarda meydana gelmektedir. Bu nedenle eğik kablo askılı köprü tabliyesi için maksimum eğilme gerilmesi değeri (σ_{max}), tabliyenin ana kuleye mesnetlendiği noktalarda elde edilen eğilme momenti (M_{max}) değeri dikkate alınarak elde edilmiştir. Asma köprü tabliyesi için ise en büyük eğilme gerilmesi maksimum momentin meydana geldiği tabliyenin orta noktasında meydana geldiğinden, asma köprü tabliyesi için maksimum eğilme gerilmesi değeri (σ_{max}), tabliyenin orta noktasında elde edilen eğilme momenti (M_{max}) dikkate alınarak belirlenmiştir. Her iki köprü modelinde de en büyük eğilme gerilmesi maksimum momentin meydana geldiği ana kulelerin zemine mesnetlendiği noktalarda meydana gelmektedir. Bu nedenle her iki köprü sistemi ana kuleleri için maksimum eğilme gerilmesi değeri (σ_{max}), ana kulelerin zemine mesnetlendiği noktalarda elde edilen eğilme momenti (M_{max}) değerine bağlı olarak elde edilmiştir. Her üç zemin sınıfı için, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlar da göz önünde bulundurularak uygulanan yer hareketleri neticesinde eğik kablo askılı ve asma köprülerin tabliyelerinde ve ana kulelerinde elde edilen maksimum eğilme gerilmesi değerleri ve oranları Tablo 8 ve Tablo 9'da gösterilmiştir.

Hem yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı hem de ihmal edildiği durumda üniform ve farklı yer hareketi uygulanması için asma köprü tabliyesinde elde edilen eğilme gerilmeleri, eğik kablo askılı köprü tabliyesinde elde edilen eğilme gerilmelerinden daha büyük çıkmıştır. Üniform yer hareketi uygulaması için asma köprü tabliyesinde elde edilen eğilme gerilmeleri ortalama %10, farklı yer hareketi uygulaması için ise ortalama %15 daha büyük çıkmıştır.

Üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması için yapı-zemin etkileşimi her iki köprü modelinde de tabliye eğilme momentlerini arttırmıştır. Üniform yer hareketi durumunda eğik kablo askılı köprüde yapı-zemin etkileşimi tabliye eğilme momentlerini tüm zemin cinsleri dikkate alındığında ortalama %23,1 arttırırken, mesnetlerden farklı yer hareketi uygulaması durumunda ortalama %16,8 arttırmıştır. Asma köprü için elde edilen oranlar ise sırasıyla %25,2 ve %17,3'dir.

Tasarımı yapılan eğik kablo askılı köprü tabliyesinin mütemedi olmasından dolayı en büyük eğilme gerilmeleri tabliye ile köprü ayağının birleşim noktasında meydana gelmektedir. Asma köprü ise tek açıklıklı basit mesnetli sistem olarak çalıştığından en büyük eğilme gerilmeleri köprü açıklığı ortasında meydana gelmektedir. Söz konusu bu yapısal farklılığın, köprü tabliyelerinde eğilmeden kaynaklanan gerilmelerde gözlemlenen farklılığın nedeni olduğu düşünülmektedir.

Tablo 8 - Tabliyelerde elde edilen maksimum eğilme gerilmesi değerleri ve oranları

Yer Hareketi	Eğik Kablo Askılı Köprü Tabliyesinin Ana Kuleye Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Eğilme Gerilmesi (kN/m ²) (a)	Asma Köprü Tabliyesi Orta Noktasında Elde Edilen Eğilme Gerilmesi (kN/m ²) (b)	Oran (a/b)
Üniform Yer Hareketi BB (ANKR)	120681	129092	0.93
Üniform Yer Hareketi CC (ANKR)	125579	142872	0.88
Üniform Yer Hareketi DD (ANKR)	149694	164630	0.91
Üniform Yer Hareketi BB (YZE)	147825	165828	0.89
Üniform Yer Hareketi CC (YZE)	155491	178749	0.87
Üniform Yer Hareketi DD (YZE)	184005	200864	0.92
Farklı Yer Hareketi BD (ANKR)	183835	235204	0.78
Farklı Yer Hareketi BC (ANKR)	148164	190101	0.78
Farklı Yer Hareketi CD (ANKR)	165840	203951	0.81
Farklı Yer Hareketi BB (ANKR)	146672	166978	0.88
Farklı Yer Hareketi CC (ANKR)	173380	179103	0.97
Farklı Yer Hareketi DD (ANKR)	175956	195514	0.90
Farklı Yer Hareketi BD (YZE)	204994	262492	0.78
Farklı Yer Hareketi BC (YZE)	175607	228203	0.77
Farklı Yer Hareketi CD (YZE)	198796	235431	0.84
Farklı Yer Hareketi BB (YZE)	173492	204912	0.85
Farklı Yer Hareketi CC (YZE)	193736	204890	0.95
Farklı Yer Hareketi DD (YZE)	212820	233445	0.91

Kule eğilme gerilmelerine ait oranlar incelendiğinde, hem yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı hem de ihmal edildiği durumda üniform yer hareketi uygulanması neticesinde eğik kablo askılı köprü kulesinin zemine mesnetlendiği noktada elde edilen eğilme gerilmelerinin, asma köprü kulesinde elde edilen eğilme gerilmelerine oranları genel olarak 1'e yakın çıkmıştır. Sonuçlar arasındaki en büyük farklılık DD yumuşak zemin sınıfı için gözlenmiş olup asma köprü kulesindeki eğilme gerilmesi değerleri eğik kablo askılı köprü kulesi eğilme gerilmesi değerlerinden %10 mertebesinde daha büyük çıkmıştır. Hem yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı hem de ihmal edildiği durumda mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması neticesinde her üç zemin sınıfı için de asma köprü kulesinde daha büyük eğilme gerilmesi değerinin ortaya çıktığı görülmektedir. Farklı yer hareketi uygulaması için asma köprü kulesinde elde edilen eğilme gerilmesi değerleri ortalama %19 daha büyük çıkmıştır.

Üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması için yapı-zemin etkileşimi her iki köprü modelinde de kule eğilme momentlerini arttırmıştır. Üniform yer hareketi durumunda eğik kablo askılı köprüde yapı-zemin etkileşimi kule eğilme momentlerini ortalama %12,7 arttırırken, mesnetlerden farklı yer hareketi uygulaması durumunda ortalama %13,4 arttırmıştır. Asma köprü için elde edilen oranlar ise sırasıyla %13,9 ve %14,7'dir.

Tablo 9 - Ana kulelerde elde edilen maksimum eğilme gerilmesi değerleri ve oranları

Yer Hareketi	Eğik Kablo Askılı Köprü Ana Kulesinin Zemine Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Eğilme Gerilmesi (kN/m ²)	Asma Köprü Ana Kulesinin Zemine Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Eğilme Gerilmesi (kN/m ²)	Oran (a/b)
	(a)	(b)	
Üniform Yer Hareketi BB (ANKR)	17433	17545	0.99
Üniform Yer Hareketi CC (ANKR)	20117	19489	1.03
Üniform Yer Hareketi DD (ANKR)	30555	33511	0.91
Üniform Yer Hareketi BB (YZE)	19693	20068	0.98
Üniform Yer Hareketi CC (YZE)	23061	21915	1.05
Üniform Yer Hareketi DD (YZE)	34408	38144	0.90
Farklı Yer Hareketi BD (ANKR)	29019	36971	0.78
Farklı Yer Hareketi BC (ANKR)	20275	32095	0.63
Farklı Yer Hareketi CD (ANKR)	32963	39294	0.84
Farklı Yer Hareketi BB (ANKR)	26461	31340	0.84
Farklı Yer Hareketi CC (ANKR)	32624	35173	0.93
Farklı Yer Hareketi DD (ANKR)	40793	42296	0.96
Farklı Yer Hareketi BD (YZE)	33651	43556	0.77
Farklı Yer Hareketi BC (YZE)	23319	37454	0.62
Farklı Yer Hareketi CD (YZE)	34046	44401	0.77
Farklı Yer Hareketi BB (YZE)	32307	39678	0.81
Farklı Yer Hareketi CC (YZE)	34713	41874	0.83
Farklı Yer Hareketi DD (YZE)	46450	49188	0.94

7.4. Eksenel Gerilmeler

Her iki köprü sistemi tabliyeleri için de en büyük eksenel gerilmeler maksimum eksenel kuvvetin meydana geldiği tabliyenin ana kuleye mesnetlendiği noktalarda meydana geldiğinden, her iki köprü tabliyesi için maksimum eksenel gerilme değeri (σ_{max}), tabliyenin

ana kuleye mesnetlendiği noktalarda elde edilen aksel kuvvet (N_{max}) değerine bağlı olarak belirlenmiştir. Bunun yanında, ana kulelerdeki maksimum aksel gerilme değeri (σ_{max}), ana kulelerin zemine mesnetlendiği noktalarda elde edilen maksimum aksel kuvvet (N_{max}) değerine bağlı olarak elde edilmiştir. Her üç zemin sınıfı için, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlar da göz önünde bulundurularak uygulanan yer hareketleri neticesinde eğik kablo askılı ve asma köprü sistemlerinde tabliyenin ana kuleye mesnetlendiği noktalarda ve ana kulenin zemine mesnetlendiği noktalarda elde edilen aksel gerilme değerleri ve oranları Tablo 10 ve Tablo 11’de gösterilmiştir. Üniform ve farklı yer hareketi uygulamasının asma ve eğik kablo askılı köprü üzerindeki etkilerini belirlemek için, eğik kablo askılı köprü için elde edilen maksimum aksel gerilme değerleri ile asma köprü için elde edilen maksimum aksel gerilme değerleri arasındaki oran verilmiştir. Her üç zemin sınıfı için hem yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı hem de ihmal edildiği durumda üniform yer hareketi uygulanması neticesinde eğik kablo askılı köprü

Tablo 10 - Tabliyelerde elde edilen maksimum aksel gerilme değerleri ve oranları

Yer Hareketi	Eğik Kablo Askılı Köprü Tabliyesinin Ana Kuleye Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Aksel Gerilme (kN/m ²)	Asma Köprü Tabliyesinin Ana Kuleye Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Aksel Gerilme (kN/m ²)	Oran (a/b)
	(a)	(b)	
Üniform Yer Hareketi BB (ANKR)	14120	1790	7.89
Üniform Yer Hareketi CC (ANKR)	14327	2473	5.79
Üniform Yer Hareketi DD (ANKR)	16041	3577	4.48
Üniform Yer Hareketi BB (YZE)	15723	2369	6.64
Üniform Yer Hareketi CC (YZE)	16006	2722	5.88
Üniform Yer Hareketi DD (YZE)	16980	3949	4.30
Farklı Yer Hareketi BD (ANKR)	16368	3408	4.80
Farklı Yer Hareketi BC (ANKR)	15079	2270	6.64
Farklı Yer Hareketi CD (ANKR)	16872	2971	5.68
Farklı Yer Hareketi BB (ANKR)	14582	2756	5.29
Farklı Yer Hareketi CC (ANKR)	15105	3780	4.00
Farklı Yer Hareketi DD (ANKR)	18303	4242	4.31
Farklı Yer Hareketi BD (YZE)	18787	3251	5.78
Farklı Yer Hareketi BC (YZE)	17475	2666	6.55
Farklı Yer Hareketi CD (YZE)	19811	3907	5.07
Farklı Yer Hareketi BB (YZE)	18444	3210	5.75
Farklı Yer Hareketi CC (YZE)	17279	3925	4.40
Farklı Yer Hareketi DD (YZE)	20703	4643	4.46

tabliyesinde elde edilen eksenel gerilmelerin asma köprü tabliyesinde elde edilen eksenel gerilmelere göre belirgin şekilde daha büyük olduğu gözlenmiştir. Sonuçlar arasındaki en büyük farklılık BB sert zemin sınıfı için gözlenmiş olup özellikle sert zemin (BB) sınıfı için eğik kablo askılı köprü tabliyesinde elde edilen eksenel gerilme değeri, asma köprü tabliyesinde elde edilen eksenel gerilmeye göre 7,89 kat daha fazla çıkmıştır. Benzer şekilde, hem yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı hem de ihmal edildiği durumda mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulanması neticesinde, üniform yer hareketi etkisinde olduğu gibi her üç zemin sınıfı için de eğik kablo askılı köprü tabliyesinde daha büyük eksenel gerilme değerlerinin ortaya çıktığı görülmektedir. Sonuçlar arasındaki en büyük farklılık sert-orta (BC) heterojen zemin sınıfı için gözlenmiş olup, söz konusu analiz durumu için köprüler arasında 6,64 kat mertebesinde farklılık gözlenmiştir.

Tablo 11 - Ana kulelerde elde edilen maksimum eksenel gerilme değerleri ve oranları

Yer Hareketi	Eğik Kablo Askılı Köprü Ana Kulesinin Zemine Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Eksenel Gerilme (kN/m ²)	Asma Köprü Ana Kulesinin Zemine Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Eksenel Gerilme (kN/m ²)	Oran (a/b)
	(a)	(b)	
Üniform Yer Hareketi BB (ANKR)	8346	6898	1.21
Üniform Yer Hareketi CC (ANKR)	7802	7138	1.09
Üniform Yer Hareketi DD (ANKR)	8399	7504	1.12
Üniform Yer Hareketi BB (YZE)	9149	8069	1.13
Üniform Yer Hareketi CC (YZE)	8850	7964	1.11
Üniform Yer Hareketi DD (YZE)	9492	8270	1.15
Farklı Yer Hareketi BD (ANKR)	9524	9436	1.01
Farklı Yer Hareketi BC (ANKR)	9342	8750	1.07
Farklı Yer Hareketi CD (ANKR)	10418	9653	1.08
Farklı Yer Hareketi BB (ANKR)	9325	9266	1.01
Farklı Yer Hareketi CC (ANKR)	10465	9784	1.07
Farklı Yer Hareketi DD (ANKR)	11581	10378	1.12
Farklı Yer Hareketi BD (YZE)	10302	10041	1.03
Farklı Yer Hareketi BC (YZE)	10975	9501	1.16
Farklı Yer Hareketi CD (YZE)	11034	10042	1.10
Farklı Yer Hareketi BB (YZE)	10150	9898	1.03
Farklı Yer Hareketi CC (YZE)	11860	10920	1.09
Farklı Yer Hareketi DD (YZE)	13078	11498	1.14

Kule eksenel gerilmeleri incelendiğinde, hem yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı hem de ihmal edildiği durumda üniform ve farklı yer hareketi uygulanması neticesinde her üç zemin sınıfı için de eğik kablo askılı köprü kulesinin zemine mesnetlendiği noktada elde edilen eksenel gerilme değerlerinin, asma köprü kulesinde elde edilen eksenel gerilme değerlerine göre kısmen daha büyük olduğu görülmüştür. Sonuçlar arasındaki en büyük farklılık üniform yer hareketi durumunda BB (ANKR) yumuşak zemin sınıfı için gözlenmiş olup eğik kablo askılı köprü kulesindeki eğilme gerilmesi, asma köprü kulesindeki gerilmeden %21 daha büyük çıkmıştır.

Her iki köprü modeli arasındaki farklılık ortalama %10 mertebesindedir. En büyük eksenel yükler her iki köprü modeli için de tabliye ile köprü ayağının birleşim noktasında meydana gelmektedir. Eğik kablo askılı köprüde kenar açıklıklarda da tabliye olması nedeniyle dengeli konsol prensibinden dolayı tabliyeye ve kulelere aktarılan eksenel yük daha fazla olmaktadır. Bu nedenle eğik kablo askılı köprü kuleleri ve özellikle de tabliyesi eksenel gerilmelere karşı beklenildiği gibi daha hassastır.

7.5. Kesme Gerilmeleri

Eğik kablo askılı köprü tabliyesi için en büyük kesme gerilmesi, maksimum kesme kuvvetinin meydana geldiği tabliyenin ana kuleye mesnetlendiği noktalarda meydana geldiğinden, eğik kablo askılı köprü tabliyesi için maksimum kesme gerilmesi değeri (τ_{max}), tabliyenin ana kuleye mesnetlendiği noktalarda elde edilen kesme kuvveti (V_{max}) değeri dikkate alınarak elde edilmiştir. Asma köprü tabliyesi için ise en büyük kesme gerilmesi maksimum kesme kuvvetinin meydana geldiği tabliyenin orta noktasında meydana geldiğinden, asma köprü tabliyesi için maksimum kesme gerilmesi değeri (τ_{max}), tabliyenin orta noktasında elde edilen kesme kuvveti (V_{max}) dikkate alınarak belirlenmiştir.

Her iki köprü ana kuleleri için en büyük kesme gerilmesi maksimum kesme kuvvetinin meydana geldiği ana kulelerin zemine mesnetlendiği noktalarda meydana gelmektedir. Bu nedenle her iki köprü sistemi ana kuleleri için de maksimum kesme gerilmesi değeri (τ_{max}), ana kulelerin zemine mesnetlendiği noktalarda elde edilen kesme kuvveti (V_{max}) değerine bağlı olarak elde edilmiştir. Her üç zemin sınıfı için, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlar da göz önünde bulundurularak uygulanan üniform ve farklı yer hareketi neticesinde köprü tabliyelerinde ve ana kulelerde elde edilen maksimum kesme gerilmesi değerleri ve oranları Tablo 12 ve Tablo 13'de gösterilmiştir.

Hem üniform hem de farklı yer hareketi uygulaması için eğik kablo askılı köprü tabliyesinin, kesme gerilmesi açısından asma köprü tabliyesine oranla daha fazla etkilendiği görülmüştür. Sonuçlar arasındaki en büyük farklılık, BB sert zemin sınıfının dikkate alındığı üniform yer hareketi uygulaması için %73 mertebesinde elde edilmiştir.

Kule kesme gerilmelerine ait oranlar incelendiğinde, hem yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı hem de ihmal edildiği durumda üniform ve farklı yer hareketi uygulanması neticesinde her üç zemin sınıfı için de asma köprü kulesinin zemine mesnetlendiği noktada elde edilen kesme gerilmesi değerlerinin, eğik kablo askılı köprü kulesinde elde edilen kesme gerilmesi değerlerine göre daha büyük olduğu görülmüştür.

Tablo 12 - Tabliyelerde elde edilen maksimum kesme gerilmesi değerleri ve oranları

Yer Hareketi	Eğik Kablo Askılı Köprü Tabliyesinin Ana Kuleye Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Kesme Gerilmesi (kN/m ²) (a)	Asma Köprü Tabliyesinin Ana Kuleye Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Kesme Gerilmesi (kN/m ²) (b)	Oran (a/b)
Üniform Yer Hareketi BB (ANKR)	20141	11624	1.73
Üniform Yer Hareketi CC (ANKR)	20305	13332	1.52
Üniform Yer Hareketi DD (ANKR)	22351	16226	1.38
Üniform Yer Hareketi BB (YZE)	23005	14538	1.58
Üniform Yer Hareketi CC (YZE)	23138	15119	1.53
Üniform Yer Hareketi DD (YZE)	25470	19535	1.30
Farklı Yer Hareketi BD (ANKR)	22108	19897	1.11
Farklı Yer Hareketi BC (ANKR)	21393	14099	1.52
Farklı Yer Hareketi CD (ANKR)	21575	17620	1.22
Farklı Yer Hareketi BB (ANKR)	21580	14950	1.44
Farklı Yer Hareketi CC (ANKR)	22970	17242	1.33
Farklı Yer Hareketi DD (ANKR)	26983	21410	1.26
Farklı Yer Hareketi BD (YZE)	28772	26560	1.08
Farklı Yer Hareketi BC (YZE)	24852	18493	1.34
Farklı Yer Hareketi CD (YZE)	27884	19789	1.41
Farklı Yer Hareketi BB (YZE)	25663	16132	1.59
Farklı Yer Hareketi CC (YZE)	25892	19693	1.31
Farklı Yer Hareketi DD (YZE)	29984	24569	1.22

Tablo 13 - Ana kulelerde elde edilen maksimum kesme gerilmesi değerleri ve oranları

Yer Hareketi	Eğik Kablo Askılı Köprü Ana Kulesinin Zemine Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Kesme Gerilmesi (kN/m ²) (a)	Asma Köprü Ana Kulesinin Zemine Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Kesme Gerilmesi (kN/m ²) (b)	Oran (a/b)
Üniform Yer Hareketi BB (ANKR)	445	830	0.54
Üniform Yer Hareketi CC (ANKR)	526	954	0.55
Üniform Yer Hareketi DD (ANKR)	792	1416	0.56
Üniform Yer Hareketi BB (YZE)	470	872	0.54
Üniform Yer Hareketi CC (YZE)	576	1093	0.53

Tablo 13 - Ana kulelerde elde edilen maksimum kesme gerilmesi değerleri ve oranları (devam)

Yer Hareketi	Eğik Kablo Askılı Köprü Ana Kulesinin Zemine Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Kesme Gerilmesi (kN/m ²)	Asma Köprü Ana Kulesinin Zemine Mesnetlendiği Noktada Elde Edilen Kesme Gerilmesi (kN/m ²)	Oran (a/b)
	(a)	(b)	
Üniform Yer Hareketi DD (YZE)	890	1536	0.58
Farklı Yer Hareketi BD (ANKR)	1538	2315	0.66
Farklı Yer Hareketi BC (ANKR)	1407	2142	0.66
Farklı Yer Hareketi CD (ANKR)	1909	2035	0.94
Farklı Yer Hareketi BB (ANKR)	1499	2113	0.71
Farklı Yer Hareketi CC (ANKR)	1534	2322	0.66
Farklı Yer Hareketi DD (ANKR)	2257	2982	0.76
Farklı Yer Hareketi BD (YZE)	1771	2655	0.67
Farklı Yer Hareketi BC (YZE)	1630	2313	0.70
Farklı Yer Hareketi CD (YZE)	2245	2370	0.95
Farklı Yer Hareketi BB (YZE)	1649	2264	0.73
Farklı Yer Hareketi CC (YZE)	2012	2491	0.81
Farklı Yer Hareketi DD (YZE)	2451	3145	0.78

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada merkez açıklıkları eşit (1000 m) olmakla birlikte, belirli bir geometriye sahip bir eğik kablo askılı köprü ile geometrik özelliklerinin farklı olduğu bir asma köprü sisteminin dinamik davranışı, köprülere üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulanmak suretiyle, yapı-zemin etkileşimi etkisi de dikkate alınarak belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Çalışma sonucunda, deprem hareketinin köprü mesnetlerine üniform veya farklı uygulanması durumunda eğik kablo askılı ve asma köprü sistemlerine ait yapısal tepkilerin farklılaştığı gözlenmiştir. Her iki köprü modeli için de maksimum yapısal tepkiler genel olarak mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulanması neticesinde ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla uzun açıklıklı kablo-destekli köprü sistemlerinin analizinde klasik bir yaklaşım olan üniform yer hareketi dikkate alınmasının yeterli olmayacağı, zemin cinsinde bağlı olarak deprem hareketi değişim etkisinin dikkate alınarak her bir köprü mesnedine farklı yer hareketi uygulanarak da analizlerin yapılması gerektiği görülmüştür.

Üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulanması durumunda, yapı zemin etkileşiminin dikkate alınması hem eğik kablo askılı köprüde hem de asma köprüde yapısal tepkileri arttırmıştır. Bunun yanında çalışmadan elde edilen sonuçlar, eğik kablo askılı ve asma köprülerin tasarımı yapılırken köprülerin inşa edileceği bölgedeki zemin sınıfının

köprünün deprem yükleri altındaki davranışı üzerinde büyük etkisinin olduğunu ve yapı-zemin etkileşiminin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Dikkate alınan yapı elemanına, yapısal tepkiye ve uygulanan yer hareketine (üniform/farklı) bağlı olarak, bazen eğik kablo askılı köprünün bazen de asma köprünün daha fazla etkilendiği, sistematik bir değişimin olmadığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, genel bir değerlendirme olarak, mesnetlerden farklı yer hareketi uygulanması durumunda asma köprünün eğik kablo askılı köprüye göre daha fazla etkilendiği, üniform yer hareketi uygulanması durumunda ise eğik kablo askılı köprünün daha fazla etkilendiği ifade edilebilir. Bu durum seçilecek köprü türüne karar verilirken, deprem hareketinin değişiminin dikkate alınarak yapı mesnetlerine farklı yer hareketinin uygulandığı mesnetlerden farklı yer hareketi uygulamasının da etkili olabileceğini göstermektedir.

Bu çalışma sonucunda deprem hareketinin yapı mesnetlerine üniform ve farklı olarak uygulanmasına bağlı olarak, uzun açıklıklar için köprü tipi seçimine yönelik değerlendirmelerde bulunulmuştur. Ancak nihai köprü tipi seçimine deprem kuvvetleri yanında köprü açıklığı, rüzgâr kuvveti, maliyet, inşaat aşamaları vb. etkenler de dikkate alınarak karar verilmelidir. Örneğin, köprü açıklığı arttıkça özellikle eğik-kablo askılı köprülerde kule yüksekliğinin oldukça artması, köprü seçimine etki edecek önemli etkenlerden bir tanesi olarak gözükmemektedir. Diğer taraftan, eğik kablo askılı ve asma köprü modellerine ait kule tipinin, tabliye tipinin, kablo geometrisinin, mesnetlenme koşullarının, malzeme özelliklerinin vb. köprülerin dinamik davranışı üzerinde önemli etkisinin olacağı düşünülürse, bu çalışmada dikkate alınan ve belirli geometrik özelliklere sahip eğik kablo askılı ve asma köprü sistemleri için elde edilen sonuçlar genelleştirilmemelidir.

Kaynaklar

- [1] Saadeghvaziri, M.A., Yazdani-Motlagh A.R., and Rashidi S., Effects of soil structure interaction on longitudinal seismic response of MSSS bridges. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20 (1-4), 231-242, 2000.
- [2] Soneji B.B., Jangid R.S., Influence of soil–structure interaction on the response of seismically isolated cable-stayed bridge. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28 (4), 245-257, 2008.
- [3] Liang F., Jia Y., Sun L., Xie W. and Chen H., Seismic response of pile groups supporting long span cable stayed bridge subjected to multi support excitations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101, 182-203, 2017.
- [4] Zheng J. and Takeda, T., Effect of soil-structure interaction on seismic response of PC cable stayed bridge. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14(6), 427-437, 1995.
- [5] Siddharth G., Chandresh H. and Jatin D., Effect of foundation depth on seismic response of cable stayed bridge by considering soil-structure interaction. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 3(2), 121-132, 2011.
- [6] Lyngs J., Kasper T., Bertelsen K., Modelling of soil-structure interaction for seismic analyses of the İzmit Bay Bridge. A proceeding of the 18. International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris-Fransa, 763-768, 2013.

- [7] Miao F. and Tang D., 3-D seismic response of self-anchored cable-stayed suspension bridge under pile-soil-structure interaction. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, (20), 6, 2015.
- [8] Keshishian, P. G. Analysis of interconnected systems accounting for spatial variability of ground motions and soil-structure interaction. Doktora Tezi, University of California, Berkeley, 2001.
- [9] Khan, R. A., Ahmad, S., and Datta, T. K., Effect of soil-structure interaction on seismic risk of FAN type cable stayed bridges. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 6(2), 47-56, 2004.
- [10] Soyluk, K., and Sıcacık, E. A., Soil-structure interaction analysis of cable-stayed bridges for spatially varying ground motion components. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 35, 80-90, 2012.
- [11] Kuyumcu Z., and Ateş Ş., Effect of soil – foundation – bridge interaction subjected to spatially varying earthquake ground motion. 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, Tirana, 2013.
- [12] Ateş Ş., Tonyalı Z., Soyluk K., Semberou S. M. A., Effectiveness of soil-structure interaction and dynamic characteristics on cable-stayed bridges subjected to multi support excitation. *International Journal of Steel Structures*, 18(2), 554-568, 2017.
- [13] Shiravand M.R., Parvanehro P., Spatial variation of seismic ground motion effects on nonlinear responses of cable stayed bridges considering different soil types. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 104-117, 2019.
- [14] Tochaei E.N., Taylor T. and Ansari F., Effect of near-field ground motions and soil-structure interaction on dynamic response of a cable stayed bridge. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 133, 106-115, 2020.
- [15] Kartal H. ve Soyluk K., Kablo destekli köprülerin dinamik davranışlarının karşılaştırılması. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Hatay-Türkiye, 1-13, 25-27 Eylül, 2013.
- [16] Soyluk, K., Kartal, H. and Adanur, S. Comparison of Dynamic Behaviour of Long-Span Cable-Supported Bridges Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics (VEESD 2013), Paper No: 224, 28-30 August, Vienna, Austria, 2013.
- [17] Soyluk K. ve Karaca H., Near-fault and far-fault ground motion effects on cable-supported bridges. X International Conference on Structural Dynamics, Rome-Italy, 3077-3082, 10-13 September, 2017.
- [18] Kartal H. ve Soyluk K., Asma köprülerin dinamik davranışına yapı-zemin etkileşiminin etkisi. 8. Uluslararası Çelik Yapılar Sempozyumu, Konya-Türkiye, 96-107, 24-26 Ekim, 2019.
- [19] Dumanoglu, A. A., ve Adanur S., Asma köprülerin antisinkronize dinamik analizi. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi, 11(53), 2179-2197, 2000.

- [20] Kartal H. ve Soyluk K., Eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışına yapı-zemin etkileşiminin etkisi. 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Ankara-Türkiye, 51, 01-02 Kasım, 2019.
- [21] H. Kartal. Eşit merkez açıklığa sahip uzun açıklıklı asma ve eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışının karşılaştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye, 2018.
- [22] SAP 2000 V19.1.0. Integrated finite elements analysis and design of structures, Computers and Structures, Inc, Berkeley, CA, 2015.
- [23] Troitsky M.S., Cable-stayed Bridges : Theory and design, BSP Professional Books, 2nd edition, 1988.
- [24] Wilson J.C., Gravelle W., Modelling of a cable-stayed bridge for dynamic analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 20 (8), 707-721, 1991.
- [25] Kartal H. and Soyluk K., Design of a suspension bridge having 1000m center span length. International Civil Engineering and Architecture Conference, Trabzon-Turkey, Vol.1, 1457-1490, 17-20 April, 2019.
- [26] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. (2007). American Association of State Highway and Transportation Officials, 4.th Edition.
- [27] Hao, H., Bolt, B.A. and Penzien, J. (1989). Effects of spatial variation of ground motions on large multiply-supported structures. Reprot No: UCB/EERC-89/06; Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, California.
- [28] Harichandran, R.S. and Vanmarcke, E.H., Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time. J. Eng. Mech. Div., ASCE **112**: 154-174, 1986.
- [29] Clough, R.W. and Penzien, J., Dynamics of Structures. McGraw Hill, Inc., 1993.
- [30] Eurocode8. Design of structures for earthquake resistance. General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels, 2004.
- [31] Hashash Y., Musgrove M., Park D., Tsai C.C., Philips C., Groholski D.R. DEEPSOIL v7.0, 1-D Wave Propagation Program for Geotechnical Site Response, User Manual, University of Illinois at Urbana-Campaign, 2021.
- [32] FEMA 356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [33] Professional Recommendatory Standard of the People's Republic of China, Wind-resistant Design Specification for Highway, December, 2004.

