KÖMÜRHAN KÖPRÜSÜ'NÜN SİSMİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ VE GÜÇLENDİRME ÖNERİLERİ

A. Domaniç[1], A. Bayraktar[2], A. C. Altunışık[2], B. Sevim[2], T. Türker[2], Y. Taş[3]

[1]*Yüksel Domaniç Mühendislik Limited Şirketi*
[2]*Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü*
[3]*Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü*
Email: armandomanic@gmail.com

1983-1986 yılları arasında inşa edilen Kömürhan köprüsü Türkiye'nin ilk dengeli konsol yöntemi ile imal edilmiş köprüsü olma özelliğini taşımaktadır. İmalat, orta ayaklarda her iki tarafa doğru hemen hemen eş zamanlı inşa edilen kutu kiriş segment betonlarının dökülüp, ardgerilmeli olarak bağlanmaları şeklinde yapılmıştır. Köprü, 135 metre uzunluğunda bir adet orta açıklık ve 76 metre boyunda iki adet kenar açıklıktan oluşmakta olup, toplamda 287 metre boya sahiptir. Köprü orta açıklığında mafsal bağlantı sistemi mevcuttur. Kömürhan Köprüsü, yapım yılı olan 1986 senesi itibari ile dönemin teknik esasları dahilinde oldukça küçük deprem ivmeleri (0.075 g) dikkate alınarak tasarlanmış olup, köprünün depreme karşı güvenliği kenar ayaklar ile üstyapıyı birbirlerine bağlayan Dwydaq çekme çubukları vasıtasıyla sağlanmaya çalışılmıştır. Fakat günümüz şartnamelerinde verilen deprem ivmeleri dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler, boyuna yöndeki deprem yüklemeleri altında kenar ayak-üstyapı bağlantı çubuklarından iletilen kuvvetlerin kenar ayaklar tarafından güvenle taşınamadığını ortaya koymuştur. Köprünün sismik performansı, ileri seviyede bir sonlu elemanlar yazılımı olan "ADINA" programı ve "SAP2000" yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar modelinin hazırlanması ve malzeme özelliklerinin tayin edilmesi sırasında, köprünün çeşitli bölgelerinden karotla alınan numunelerin dayanım sonuçları ve sahada gerçekleştirilen operasyonel modal analiz çalışmasının sağladığı veriler dikkate alınmıştır. Sonuçlar, mevcut yapısal sistemde değişiklik yapılmasının gereğini ortaya koymaktadır. Çeşitli analizler sonucunda, kenar ayaklardaki bağlantı çubuklarının iptal edilmesinden sonra hem viskoz damperlerin, hem de sürtünme damperlerinin kullanımı ile boyuna deprem ivmeleri altında kenar ayaklara aktarılan kuvvetlerin azaltılabileceği tepit edilmiştir. Diğer taraftan, kenar ayak-üstyapı bağlantı çubuklarının zamana bağlı deformasyonları engellemek açısından da etkili oldukları ve zaman içerisinde yüklenmiş olabilecekleri belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, kenar ayak bağlantı çubuklarının herhangi bir önlem alınmadan devre dışı bırakılmalarının üstyapı konsollarını açıklığa doğru yatay deplasman yapmaya zorlayabileceği ve konsol uçlarında ilave sehim oluşabileceği tespit edilmiştir. Dolayısıyla kenar ayaklar ile üstyapı arasındaki bağlantının, kayma limitlerine erişilene kadar statik yük aktarabilen sürtünme damperleri ile sağlanmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

1. Köprü Hakkında Bilgiler

1.1. Tarihçe

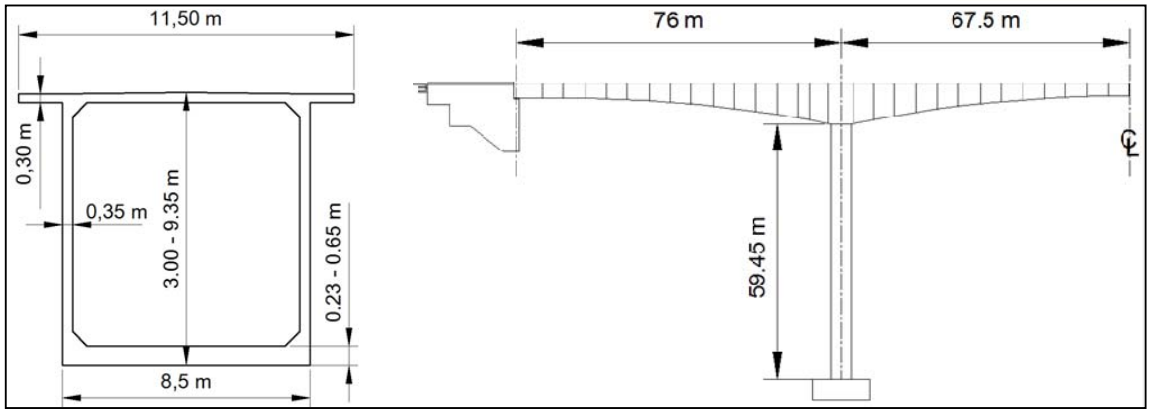
Bu çalışmaya konu olan Kömürhan Köprüsü, 1983-1986 yılları arasında inşaa edilmiştir. Bu yapı Türkiye'nin ilk dengeli konsol yöntemi ile imal edilmiş köprüsü olma özelliğini taşımaktadır (1). Köprü, Elazığ-Malatya Devlet yolunun 51. Km'sinde yer almaktadır (Resim 1-1). Köprünün yapımına 23/02/1983 tarihinde başlanılmış olup, yapı 08/04/1986 tarihinde tamamlanarak bölge trafiğe açılmıştır.

Resim 1-1: Kömürhan Köprüsünün günümüzdeki durumu

1.2. Üstyapı

Orta ayaklarda her iki tarafa doğru eş zamanlı inşa edilen kutu kiriş şeklindeki segmentler yan yana getirilip, ardgerilmeli olarak bağlanmıştır. Köprü, 135 metre uzunluğunda bir adet orta açıklık ve 76 metre boyunda iki adet kenar açıklıktan oluşmakta olup, toplamda 287 metre boya sahiptir.

Segmentlerin hemen hemen hepsi 5 m uzunluğundadır. Donatılı kutu kesitin yüksekliği orta ayak üzerinde 9.35 m olmakla beraber, parabolik bir azalım göstererek kenar ayaklarda 3.50 m'ye, ortadaki genleşme derzinde ise 3.00 m'ye inmektedir. Üstyapı genişliği 11.5 m'dir. Proje paftalarında belirtilmiş olan üstyapı beton sınıfı C35'e denk gelmektedir. Değişken üstyapı kesiti Şekil 1-1'de şematik olarak gösterilmektedir.

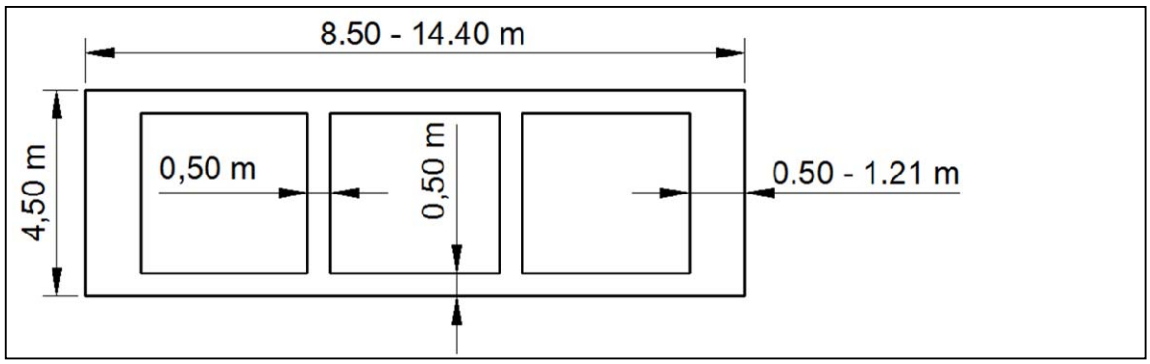


Şekil 1-1: Değişken üstyapı kesidi

Orta açıklıktaki üstyapı konsollarını birbirine bağlamak amacı ile kutu kesitin içinde çelik kirişlerden oluşan ve moment aktarmayan mafsal şeklinde tasarımlanan bir düzenek tertip edilmiştir. Buradaki hedef, orta açıklıktaki konsol uçlarını serbest bırakarak üstyapıda oluşacak ısıl genleşmeye mani olmamak, öte yandan bu iki uç arasında bir bağlantı oluşturarak düşey yükler altında üstyapı kısımlarının beraber hareket etmesini sağlamaktır.

1.3. Orta Ayaklar

Herbiri 59.5 m yüksekliğinde olan orta ayaklar 3 gözlü değişken kesitten oluşmaktadır. Kesit genişliği aayağın alt tarafında 14.4 m olmakla beraber, lineer şekilde azalarak üstte 8.5 m'ye düşmektedir. Hidrostatik dengenin korunması için ayak çeper ve göz duvarlarında su geçişine imkan veren boşluklar bırakılmıştır. Orta ayak temelleri 24x13,5 m. plan boyutlarına ve 5 m. derinliğine sahiptir. Proje paftalarında belirtilen orta ayak ve temel beton sınıfı C35'e denk gelmektedir. Değişken ayak kesiti Şekil 1-2'de gösterilmektedir.



Şekil 1-2: Değişken orta ayak kesidi

1.4. Kenar Ayaklar

Kömürhan köprüsünün Elazığ tarafı kenar ayağı her biri 25 m. uzunluğunda olmak üzere 60 adet, Malatya tarafı kenar ayağı ise her biri 40 m. uzunluğunda olma üzere 60 adet ankraj çubuğu ile kayaya bağlanmıştır. Bu Ø36'lık ankraj çubukları S1080 çelik sınıfına sahiptir. Ayrıca, köprü üstyapısını kenar ayak perdesine bağlamak amacıyla her bir ayakta 40 adet olmak üzere, yağ dolu polietilen boru içinden geçirilen, S420 kalitesinde Ø50 çapında çekme çubukları kullanılmıştır. Çubukların uzunluğu Malatya kenar ayağı tarafında 3,7 metre, Elazığ tarafında ise 4.7 metredir. Kenar ayakların inşaasında C25'e denk beton malzemesi kullanılmıştır.

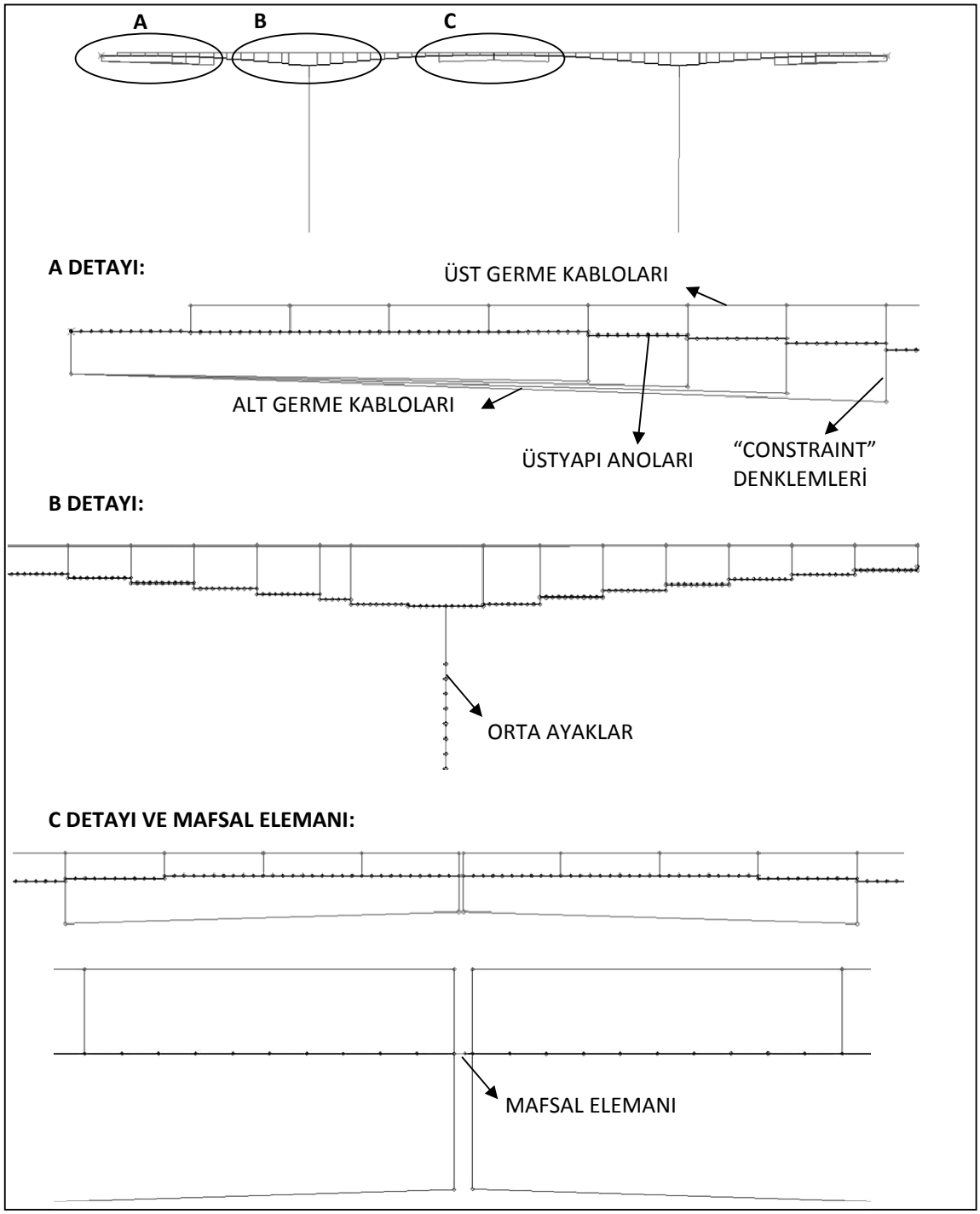
2. Yapısal Analiz Modelinin Hazırlanması

2.1. Genel İzahlar

Kömürhan Köprüsü'nün deprem ivmeleri altındaki davranışı, ileri seviyede bir sonlu elemanlar yazılımı olan "ADINA" programı ve "SAP2000" yazılımı kullanılarak incelenmiştir.

Sonlu elemanlar modeli hazırlanırken, üstyapı ve ayaklar çubuk elemanlardan oluşturulmuştur. Ardgerme kabloları yine moment aktarmayan çubuk elemanlar kullanılarak (truss elements) simüle edilmiştir. Bu model tekniği, katı hacim elemanları ile oluşturulan modellerin sağladığı gerilme değerleri yerine, doğrudan betonarme kesit hesaplarına esas olan moment ve kuvvet tesirlerinin elde edilebilmesini sağlamaktadır. Ayrıca bu şekilde, yapısal analizlerin çözüm süresinin ve bu çözümler sonucunda depolanan veri miktarının makul limitlere çekilmesi ve fazla sayıda analizin yapılabilmesi mümkün hale gelmektedir.

Değişken yükseklikli üstyapı anolarının her biri ortalama kesit özellikleri ile modele katılmıştır. Yine değişken özellikteki ayaklar da 10 ayrı kesit tipi kullanılarak simüle edilmiştir. Tüm elemanlar kendi geometrik merkezlerinden geçmekte olup, ara bağlantılar "constraint" denklemleri kullanılarak sağlanmıştır. Analiz modelinin Şekil 2-1'de gösterilmektedir.



Şekil 2-1: Analiz modelinin görünümü

2.2. Üstyapı Kesitleri

2.2.1. *İdealizasyon*

Değişken kesitli köprü üstyapısı, her ano boyunca sabit kesitlerle temsil edilmiştir. Bu kesitin geometrik özellikleri, ilgili anonun baş ve son kesit özelliklerinin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Her bir üstyapı anosunun ağırlık merkezinin geçtiği kot da, yine aynı şekilde baş ve son kesitlerinin merkezlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Analizlerde, ardgermeli olan üstyapının çatlamamış (gross) atalet momentleri kullanılmıştır. Yapılan sensitivite analizleri sonucunda, deprem hesapları ve zamana bağlı deformasyonların analizi için oluşturulan modellerde her anoyu temsil eden çubuk elemanların tek bir sonlu elemanla temsil edilmesi yeterli görülmüş olup, hareketli araç yüklerinin analizi için hazırlanan modellerde ise bu anolar 0.5 m uzunluğunda parçalara bölünmüştür.

2.2.2. *İdealizasyon Yönteminin ve Kesit Özelliklerinin Doğrulanması*

Çubuk elemanlarla idealize edilmiş üstyapı kesitinin rijitliğini doğrulamak amacı ile, sadece Malatya orta ayağı ile genleşme derzi arasında kalan konsol bölümün yer aldığı ayrı bir çubuk model hazırlanmıştır. Ön germe kabloları modele katılmamıştır. Kesitin başlangıç noktasının (Malatya tarafı orta ayak üstü) sınır şartları tam ankastre olarak empoze edilmiştir.

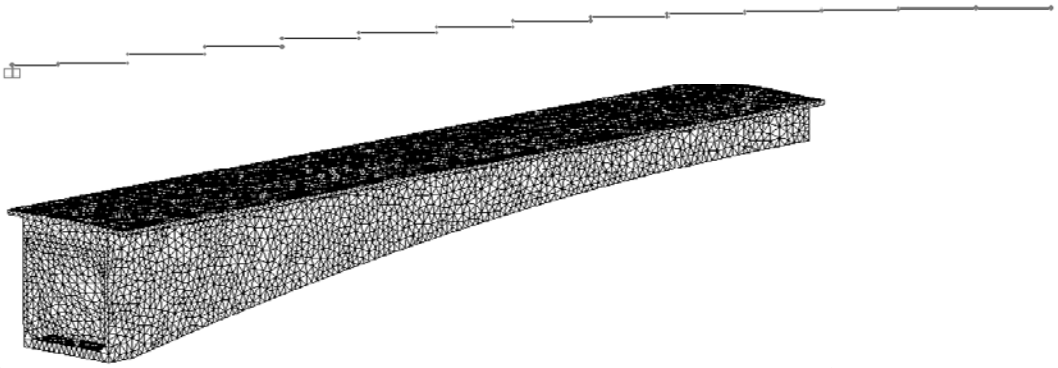
Daha sonra ise ADINA programı kullanılarak, üstyapının aynı bölümü tetrahedral katı elemanlarla gerçek geometrisiyi yansıtacak bir biçimde modellenmiştir.

Her iki tip model de çeşitli sonlu eleman boyutları, yani farklı diskretizasyon değerleri kullanılarak analiz edilmiştir. Üstyapı kesitlerinin kendi ağırlıkları altında konsol ucunda elde edilen düşey deplasman ve dönme değerleri Tablo 2-1'de verilmektedir. Maksimum eleman kenar uzunluğunun 0.5 m olduğu katı eleman modelinin sonuçları referans kabul edilmiş ve diğer modellerden elde edilen değerlerin hata oranları hesaplanmıştır.

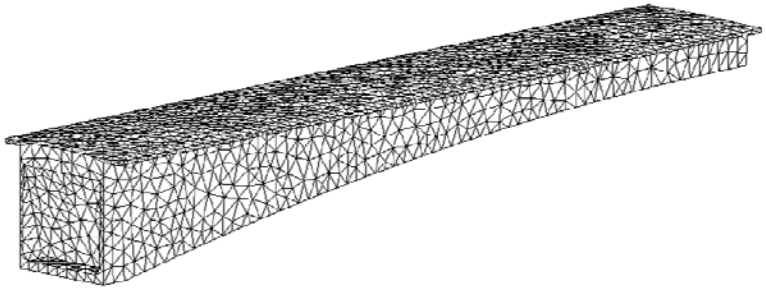
Sonuçlar incelendiğinde, çubuk elemanların diskretizasyon değerlerinin deplasmanlara olan etkisinin ihmal edilebilir mertebelerde olduğu görülmüştür. Dolayısıyla analiz koşulları özellikle daha fazla elemanın kullanımını gerektirmedikçe, her anonun bir sonlu elemanla temsil edildiği çubuk eleman modelinin yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Bu şekilde elde edilen hata oranları, deplasman ve rotasyon değerleri için sırasıyla %0.1 ve %3.2 gibi oldukça küçük mertebelerde kalmıştır. Bu neticeler, her bir anonun ortalama özellikleri ile simüle edilmesinin sonuçlara kayda değer bir hata payı getirmediğini de göstermektedir. Modellerin görünümleri Şekil 2-2'te verilmektedir.

Tablo 2-1: Çeşitli model denemeleri sonucunda elde edilen değerler ve hata oranları

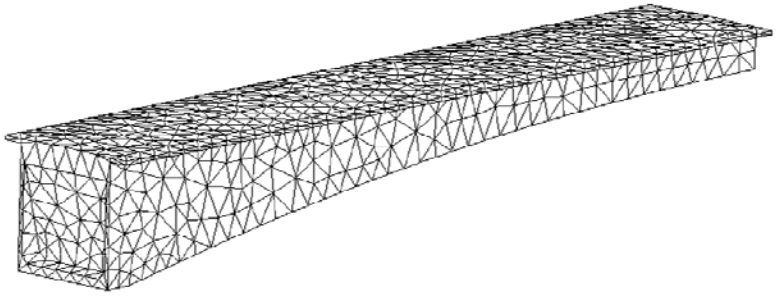
Model Tipi	#	Maximum Sonlu Eleman Uzunluğu (m)	Düşey Deplasman (mm)	Rotasyon (10^{-3} rad)	Deplasman Hatası (%)	Rotasyon Hatası (%)
Çubuk Elemanlar	1	0.5	145	3.62	0.7	3.2
	2	5.0	145	3.62	0.7	3.2
Katı Elemanlar	3	0.5	144	3.51	-	-
	4	1.0	140	3.39	-2.8	-3.5
	5	1.5	130	3.14	-9.7	-10.6



Model 3: En büyük kenar boyutu 0.5 m olan katı tetrahedral elemanlar kullanılmıştır.



Model 4: En büyük kenar boyutu 1.0 m olan katı tetrahedral elemanlar kullanılmıştır.



Model 5: En büyük kenar boyutu 1.5 m olan katı tetrahedral elemanlar kullanılmıştır.

Şekil 2-2: Tablo 2-1'de özetlenen modellerin görünümleri

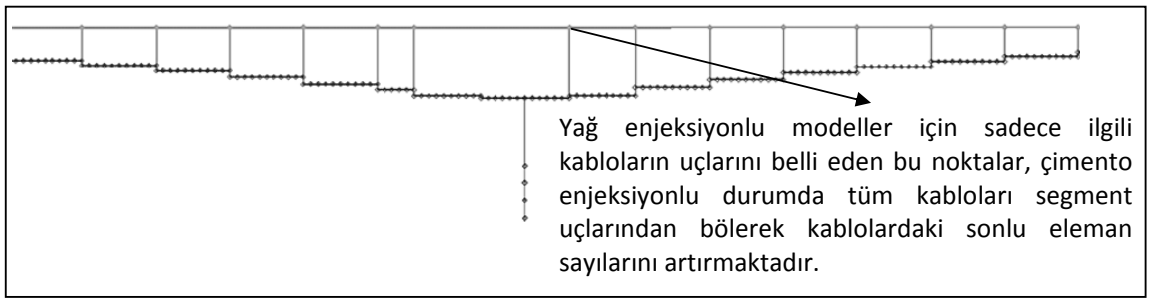
2.3. Ardgerme Kabloları

Kablolar, moment aktarmayan "truss" elemanlar ile simüle edilmiştir.

İnşaat sırasında, kablolarının gerilme işleminin ardından uygulanan çimento veya yağ enjeksiyonu hakkında proje dokümanlarında herhangi bir ayrıntıya rastlanmamıştır. Bu belirsizliğin sonuçları etkileyip etkilemediğini öğrenmek amacı ile çeşitli sensitivite analizleri yapılmıştır.

Yağ enjeksiyonunun uygulandığı durumlarda, ardgerme kablosunun kesit içinde aderansa sahip olmadan serbestçe deformasyon yapabileceği varsayılmıştır. Bu modelde, her kablo çifti tek bir sonlu elemanla temsil edilmekte olup, kesit uçlarına proje paftalarındaki ortalama düşey lokasyonlarında bağlanmıştır. Kabloların düşey ve yatay yörüngelerindeki değişimler ihmal edilmiştir (Şekil 2-3).

Çimento enjeksiyonunun uygulandığı durumda ise, ardgerme kablolarının kesitteki betonla aderans içinde olduğu ve kesitin deformasyonuna uygun davranacağı varsayılmıştır. Dolayısıyla, kablolar her kesitin baş ve son noktalarının hizasında ayrı elemanlara bölünmüş ve bu noktalarda kesit düzlemi ile aynı hareketleri yapmaları sağlanmıştır (Şekil 2-3).



Şekil 2-3: Çimento veya yağ enjeksiyonlu kabloların simüle edilmesi

Her iki varsayım ile hazırlanan modellerin hem ölü yükler altındaki tepkileri, hem de modal özellikleri karşılaştırılmış ve aradaki farkların ihmal edilebilir seviyelerde olduğu görülmüştür.

Yağ enjeksiyonu uygulamasını dikkate alan analiz modellerinin çok daha az kablo elemanı içermesi ve sonuçların da enjeksiyon tipinden etkilenmediğinin tespit edilmesi üzerine deprem modelleri bu şekilde hazırlanmıştır.

Tek bir kablodaki ardgerme kuvveti kablo elemanlarına eşdeğer birim uzamalar şeklinde uygulanmıştır.

2.4. Orta Ayak Kesitleri

Değişken kesitli orta ayaklar on parçaya ayrılmış ve her bir parça ortalama kesit boyutları ile tahkik edilmiştir.

Yatay deprem yüklemeleri altında, kesitlerdeki eksenel kuvvetlerin küçük bir değer aralığında değişeceği varsayımıyla çatlamış kesit rijitlikleri ölü yükler altında hesaplanan eksenel kuvvetler dikkate alınarak elde edilmiştir. Bu yargı, deprem analizlerinin sonuçları ile de hemen hemen doğrulanmıştır. Sensitivite analizleri sonucunda her bir sabit kesitli parçanın, deprem ve zamana bağlı deformasyonların analizi için tek bir sonlu elemanla temsil edilmesi yeterli görülmüştür. Hareketli araç yükleri analiz edilirken ise bu parçalar 10'ar adet sonlu elemana bölünmüşlerdir.

Köprünün mevcut durumunda orta ayak kesitlerinin büyük bölümünün suyun içinde olduğu görülmektedir. Ayırca barajın doluluk durumuna bağlı olarak su seviyesi değişebilmektedir. Bu durumu simüle edebilmek amacıyla farklı su seviyelerini dikkate alan üç adet deprem modeli hazırlanmıştır. İlk durumda ayakların tamamen suyun üstünde kaldığı, ikinci durumda yarı yüksekliklerinin su içerisinde olması, son durumda ise tüm ayak boyunun suyun altında kaldığı seviyeler simüle edilmiştir. Ayak içerisindeki su kütleleri, "Eurocode 8 – Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures" (2) isimli şartnameye göre hesaplanmış olan dış su basıncına eşdeğer fiktif kütlelerle toplanarak orta ayak parçalarının düğüm noktalarına atanmıştır.

2.5. Kenar Ayak Mesnet Şartları

Köprünün mevcut durumunda üstyapının köprü boyuna yönündeki hareketi "Bumper" mesnetler ve "Dwydaq" çekme çubukları vasıtası ile sınırlanmıştır. Analiz modellerinde kenar ayakların köprü boyuna yönündeki mesnet şartları, zemine ve açıklığa doğru hareketlerde sırasıyla bumper mesnetin ve çekme çubuklarının rijitliklerini yansıtacak şekilde oluşturulmuştur. Ayrıca, çekme çubuklarını simüle eden elemanlar için bilineer çelik malzemesinin özellikleri kullanılarak elasto-plastik bir yük-deplasman eğrisi tanımlanmıştır.

Bumper mesnetler, basınç yönünde bu rijitlik değerine sahip olup diğer yönde ise kuvvet aktarmayan elemanlar ile simüle edilmiştir. SAP2000 ve ADINA yazılımlarında mevcut olan asimetrik yük-deplasman eğrilerine sahip yay elemanları bu amaçla kullanılmıştır.

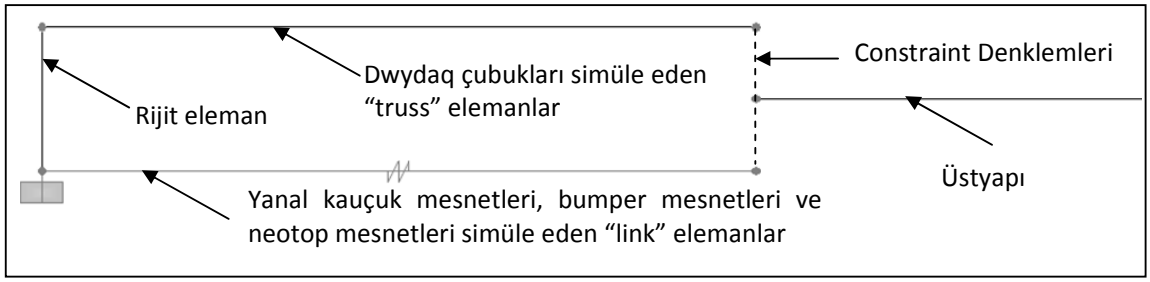
Dwydaq çekme çubukları ise, bağlantı çubuklarının toplam rijitliğine eşdeğer bir kesit alanının atandığı ve sadece çekme yükü alabilen birer adet çubuk eleman ile simüle edilmiştir. Bu elemanlar, ilettikleri çekme kuvvetleri donatıların toplam yenilme yükünü aştığında plastik rejime geçecek şekilde tanımlanmıştır. SAP2000 modellerinde "tension limit" ve "plastic hinge" özellikleri atanan "truss" elemanları kullanılmıştır. ADINA programında ise, yine "truss" elemanına "bilinear plastic" malzeme ve "gap" özellikleri atanarak eşdeğer kenar ayak mesnet şartı sağlanmıştır.

Buraya kadar açıklanmış olan mesnet sisteminin ve dwydaq çekme çubuklarının üstyapı rotasyonlarını engellemesi pek mümkün gözükmemektedir.

(3)Gerek Dwydaq çekme çubuklarının yağ dolu polietilen borular içerisinden geçirilmiş olması, gerekse üstyapının oturduğu neotop mesnetlerin boyuna ve enine yönde kayıcı olmaları, üstyapının

rotasyonlara karşı direnç göstermesini engelleyerek küçük miktarlarda dönmelere izin verecektir. Dolayısıyla üstyapı uçları tüm rotasyon eksenlerinde serbest bırakılmıştır.

Kenar ayaktaki bu mesnet şartlarınını yansıtan sonlu elemanlar konfigurasyonu Şekil 2-4'de gösterilmektedir.



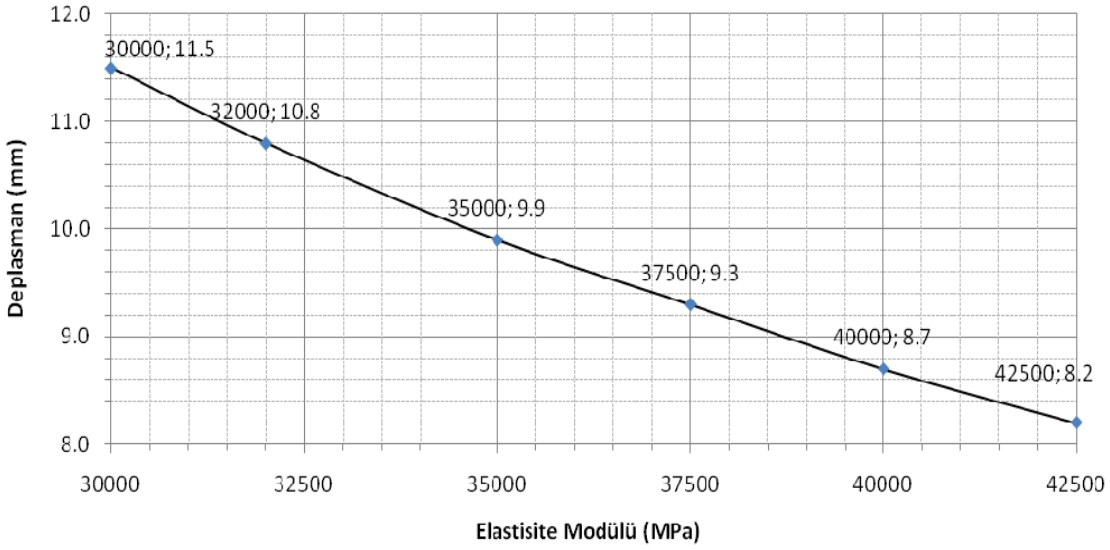
Şekil 2-4: Kenar ayak mesnet konfiürasyonunun görünümü

2.6. Malzeme Özelliklerinin Seçimi

Beton malzemesinin dayanımı, karotların tek eksenli dayanım ve schmidt çekici test sonuçları dikkate alınarak üstyapı ve ayaklar için 29 MPa olarak dikkate alınmıştır. Birim hacim ağırlığı da üstyapı için ortalama 23.5 kN/m^3, ayaklar için ise 24 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. Bu değerler karot numunelerinden elde edilen sonuçlara kesitlerdeki mevcut donatı kütlelerinin eklenmesi ile elde edilmiştir.

Betonun elastisite modülü değerini tahmin edebilmek çeşitli denemeler yapılmıştır ve statik araç yükleme testinin sonuçları ile uyum yakalanmaya çalışılmıştır. Yerinde yapılan yükleme testinde kullanılan kamyon yükleri analiz modeline uygulanmış ve çeşitli beton elastisite modülü değerleri için üstyapı orta noktasındaki deplasmanlar hesap edilmiştir.

Genleme derzinin her iki tarafına birer kamyonun yerleştirildiği yük durumu sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 2-5'da gösterilmektedir. Saha testinde ise, bu yük durumu altında köprü orta noktasının düşey deplasmanı 9.5 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 2-5 incelendiğinde, E=37500 MPa değerinin bu sonuca oldukça yakın bir deplasman değeri verdiği görülmektedir.



Şekil 2-5: Çeşitli elastisite modülü değerleri kullanılarak elde edilen düşey deplasman değerleri

Son aşamada ise, seçilen bu malzeme özellikleri için hesap edilen doğal titreşim frekansları operasyonel modal analiz çalışmasının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapının ilk 10 modu için verilen titreşim frekanslarının birbiriyle uyumu Tablo 2-2'te görülmektedir (3).

Tüm bu değerlendirmeler ışığında belirlenen malzeme özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

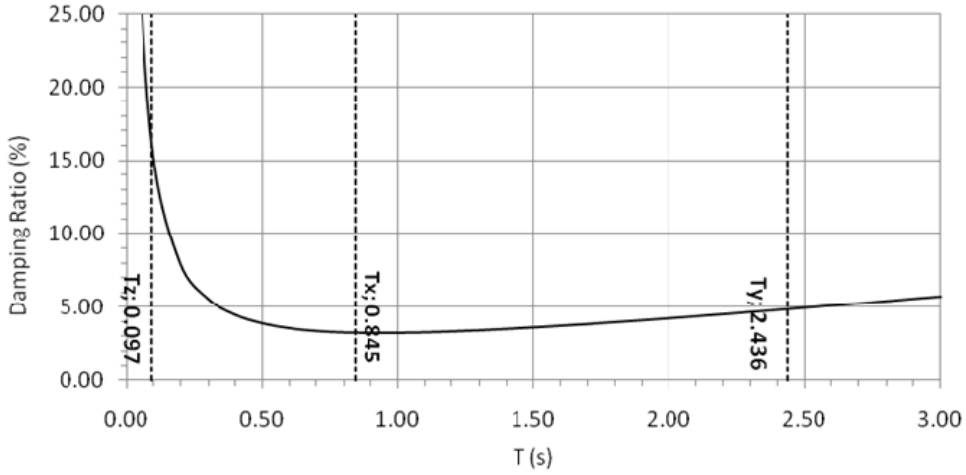
Beton	**Donatı Çeliği**	**Ardgerme Çeliği**	**Ankraj Çeliği**
E= 37500 MPa	E= 200000 MPa	E= 195000 MPa	E= 200000 MPa
f_c= 29 MPa	f_y= 420 MPa	f_y= 1570 MPa	f_y= 1080 MPa
	f_u= 500 MPa	f_u= 1770 MPa	f_u= 1230 MPa

Tablo 2-2: Analiz modelinin titreşim frekansları ile operasyonel modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Mod #	**Yön**	**Operasyonel Modal Analiz**		**Analiz Modeli**	
		favg (Hz)	**Tavg (s)**	**favg (Hz)**	**Tavg (s)**
1	Y	0.776	1.289	0.746	1.344
2	Z	1.023	0.978	1.041	0.961
3	Y	1.859	0.538	1.740	0.576
4	Z	2.262	0.442	2.229	0.452
5	Z	2.728	0.367	2.589	0.386
6	X	3.127	0.320	3.254	0.307
7	X	3.466	0.289	3.483	0.287
8	Z	4.633	0.216	4.618	0.218
9	Z	6.591	0.152	6.132	0.164
10	Y	7.438	0.135	7.515	0.133

2.7. Sönüm Katsayılarının Belirlenmesi

Dinamik analizlerde kullanılacak Rayleigh Damping katsayıları 0.3-2.5s period aralığı için ortalama sönüm oranını %5 civarında tutacak şekilde belirlenmiştir. Aşağıdaki sönüm oranları ve en yüksek su seviyesinin dikkate alındığı model için hakim modların periyodları da gösterilmiştir (Şekil 2-6).



Şekil 2-6: Seçilen Rayleigh Damping katsayıları ile elde edilen sönüm oranları

3. Mevcut Durum Deprem Analizleri

3.1. Hesap Yönteminin ve Kullanılan Parametrelerin Belirlenmesi

Deprem analizleri gerçekleştirilirken, DLH Genel Müdürlüğü tarafından hazırlattırılmış ve 2007 yılında yürürlüğe girmiş olan "Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Esasları" (4) isimli teknik yönetmelik esas alınmıştır.

Kutu kesitli orta ayakların kesme kapasitelerinin tahkikleri ile orta ayak temellerinin gerilme ve betonarme taşıma gücü tahkikleri "AASHTO Standart Specifications for Highway Bridges 17. Edition" (5) şartnamesine göre yapılmıştır. Orta ayakların burulma tahkikleri ise "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02)" (6) şartnamesi ve "Notes on ACI 318-02 Building Code Requirements for Structural Concrete" (7) isimli raporda yer alan açıklamalar uyarınca yapılmıştır.

3.1.1. *Zemin Sınıfının Belirlenmesi*

Kenar ayakların oturduğu kaya ortamında yapılmış olan sondaj çalışmaları ve jeofizik sismik kırılma etütlerinin sonuçları yorumlanarak, zemin sınıfı ve bu zeminin dinamik analizlere temel teşkil edecek olan parametreleri belirlenmiştir. Baz alınan şartnamede (4) deprem spekturumunun hazırlanmasına esas teşkil eden zemin sınıfları aşağıdaki şekilde açıklanmaktadır.

- ***A Sınıfı***: Sert kaya, kayma dalgası hızı, $\overline{v}_s$ > 1500 m/sn
- ***B Sınıfı***: Kaya, (760 m/sn < $\overline{v}_s$ ≤ 1500 m/sn)
- ***C Sınıfı***: Çok sıkı zeminler ve yumuşak kaya, (360 m/sn < $\overline{v}_s$ ≤ 760 m/sn) veya
- $\overline{N}$ > 50 veya $\overline{s}_u$ > 100 kPa
- ***D Sınıfı***: Katı zeminler, (180 m/sn < $\overline{v}_s$ ≤ 360 m/sn) veya (15 ≤ $\overline{N}$ ≤ 50) veya
- (50 kPa ≤ $\overline{s}_u$ ≤ 100 kPa)
- ***E sınıfı***: $\overline{v}_s$ < 180 m/sn veya $\overline{N}$ < 15 veya $\overline{s}_u$ < 50 kPa olan zemin profili veya 3 metreden
- kalın yumuşak kil bulunan zemin profili (*PI* >20, *w* ≥ %40 ve $\overline{s}_u$ < 25 kPa)
- ***F Sınıfı***: Sahaya özel değerlendirme gerektiren zeminler

Zemin etüt çalışmalarının sonucunda, Malatya kenar ayak tarafında yer alan kayanın Gabro ve Serpantinit birimlerinden oluştuğu belirlenmiştir. Sismik kırılma deneyi sonuçlarına kenar ayak temel kotuna ait kayma dalga hızı V_S= 2000 m/s 'dır. Şartnameye göre bu zemin "**A: sert kaya ($V_S \geq 1500$ m/s)"** sınıfına girmektedir.

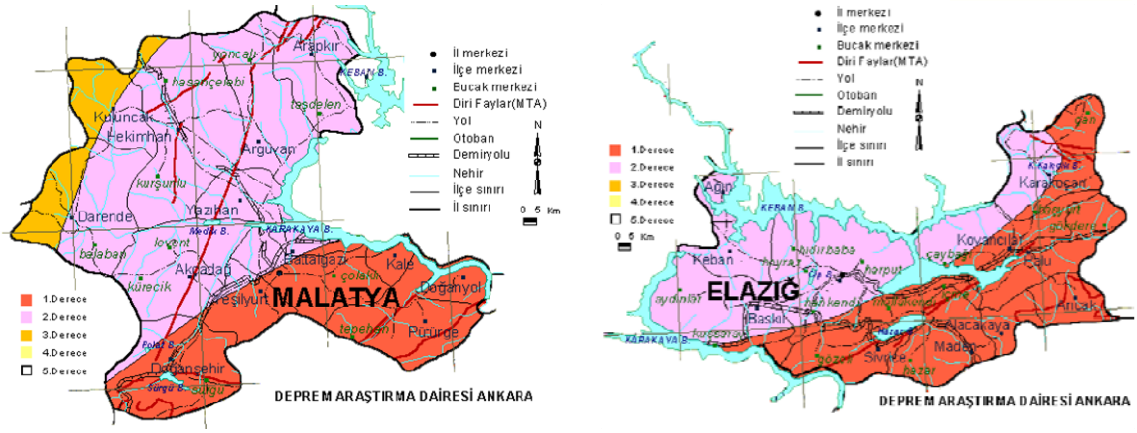
Elazığ kenar ayak tarafında yer alan kayanın da Malatya tarafında olduğu gibi Gabro ve Serpantinit birimlerinden oluştuğu belirlenmiştir. Sismik kırılma deneyi sonuçlarına kenar ayak temel kotuna ait kayma dalga hızı V_S= 1900 m/s 'dır. Bu değer için zeminin **"A: sert kaya ($V_S \geq 1500$ m/s)"** sınıfına girdiği belirlenmiştir.

3.1.2. *Spektral İvme Değerlerinin Tespiti ve Deprem Kayıtlarının Üretimi*

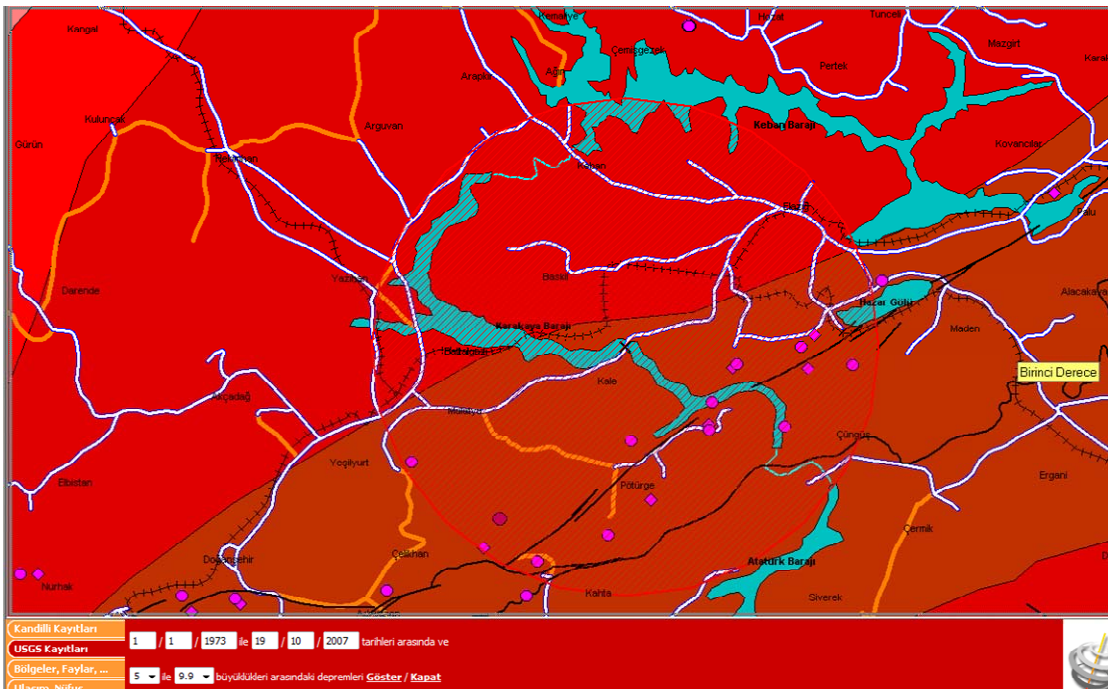
Proje alanı ve yakın çevresi T.C. Bayındırlık Bakanlığı'nın yayınladığı Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası'na (8) göre 1. Derece Deprem Bölgesi içinde yeralmaktadır (Şekil 3-1).

Bölgedeki sismik aktivite proje alanının doğusundan geçen Doğu Anadolu Fay sisteminin ana kırığı ve buna bağlı tali faylanmalardan kaynaklanmaktadır. Aşağıdaki sayısal haritada (9) köprü yakın çevresinde oluşmuş deprem lokasyonları ve aktif faylar birlikte gösterilmektedir (Şekil 3-2).

Tablo 3-1'ten takip edilebileceği üzere Doğu Anadolu Fay sistemi üzerinde kaydedilmiş olan depremlerin büyüklüğü 6.0 değerinin altındadır. Mevcutların en büyüğü 14.06.1964 yılında meydana gelmiş olan 6.0 büyüklüğündeki depremdir. Kullanılan büyüklük ölçekleri değişmekle beraber, hangi ölçeğin kullanıldığı her kayıt için belirtilmemiştir.



Şekil 3-1: Türkiye deprem bölgeleri haritası



Şekil 3-2: Türkiye sayısal deprem haritası

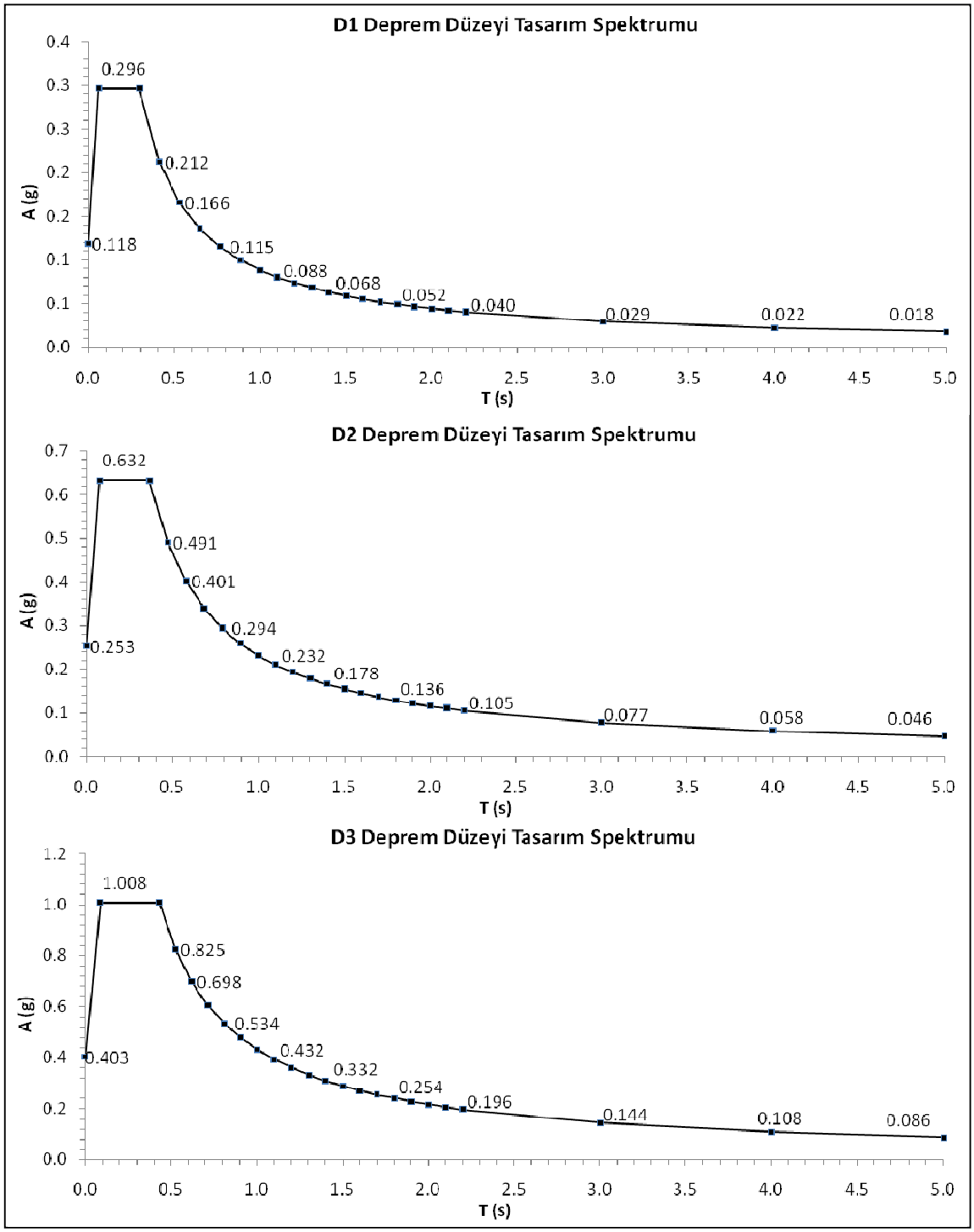
Tablo 3-1: Yakın Dönemde Meydana Gelmiş Depremler (Kandilli Kayıtları)

Tarih	Saat (GMT)	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Büyüklük
21.02.2007	11:05	38.37	39.32	5	5.9 (M_l)
09.02.2007	02:22	38.39	39.06	5	5.3 (M_l)
26.11.2005	15:56	38.26	38.81	9	5.2 (M_d)
11.08.2004	15:48	38.41	39.21	5	5.5 (M_l)
26.02.2004	04:13	38.01	38.25	6	5.0 (M_l)
13.07.2003	01:48	38.32	39.00	5	5.7 (M_d)
20.01.1981	08:27	38.05	38.59	24	5.0
30.10.1968	16:51	37.99	38.56	3	5.0
14.06.1964	12:15	38.13	38.51	3	6.0
23.04.1964	14:23	38.09	38.75	57	5.0
08.11.1950	10:08	38.27	39.16	50	5.0
09.05.1950	09:20	38.24	38.32	70	5.0
25.04.1949	23:09	38.27	38.99	80	5.3
08.02.1930	05:20	38.52	39.40	0	5.1

Esas alınan şartname uyarınca spektral ivme üç farklı deprem düzeyi için (D1, D2, D3) belirlenmiştir. ((4), Bölüm: 1.2.1)

- **(D1) Deprem Düzeyi:** Bu deprem düzeyi, yapıların servis ömürleri boyunca meydana gelebilmesi olasılığı fazla olan, göreli olarak sık ancak şiddeti çok yüksek olmayan deprem yer hareketlerini ifade etmektedir. (D1) düzeyindeki depremin 50 yılda aşılma olasılığı %50, buna karşı gelen dönüş periyodu ise 72 yıldır.
- **(D2) Deprem Düzeyi:** Bu deprem düzeyi, yapıların servis ömürleri boyunca meydana gelebilmesi olasılığı çok fazla olmayan, seyrek ancak şiddetli deprem yer hareketlerini ifade etmektedir. (D2) düzeyindeki depremin 50 yılda aşılma olasılığı %10, buna karşı gelen dönüş periyodu ise 475 yıldır.
- **(D3) Deprem Düzeyi:** Bu deprem düzeyi, yapıların maruz kalabileceği en şiddetli deprem yer hareketini ifade etmektedir. (D3) düzeyindeki bu çok seyrek depremin 50 yılda aşılma olasılığı %2, buna karşı gelen dönüş periyodu ise 2475 yıldır.

Köprünün coğrafi koordinatları kullanılarak ((4), Ek-A)., gerekli zemin sınıfı düzeltmeleri ve hesaplar yapıldıktan sonra her bir deprem düzeyi için Şekil 3-3'te verilen deprem ivme spektrumları elde edilmiştir ((4), Bölüm 1.2.2).



Şekil 3-3: Hesaplanan deprem ivme spektrumları

Bir sonraki aşamada yukarıda hesaplanmış olan spektrum eğrileriyle uyumlu deprem ivme kayıtları üretilmiştir. Bu amaçla, öncelikli olarak orjinal deprem kayıtlarının modifiye edilmesi yöntemi benimsenmiştir. Çalışmada çeşitliliği ve yeterli emniyeti sağlamak amacı ile, aşağıda belirtilen depremlere ait üç adet ivme kaydı temin edilmiştir.

- **1. No'lu kayıt:** 17 Ağustos 1999 Gölcük-Kocaeli depremi, Düzce ölçüm istasyonu, doğu-batı kaydı (M_w= 7.4)
- **2. No'lu kayıt:** 13 Temmuz 2003 Doğanyol-Malatya depremi, Malatya ölçüm istasyonu, doğu-batı kaydı (M_d= 5.7)
- **3. No'lu kayıt:** 26 Kasım 2005 Pötürge-Malatya depremi, Malatya ölçüm istasyonu, doğu-batı kaydı (M_d= 5.2)

Daha sonra bu kayıtlar FFT (Fast Fourrier Transform) metodu ile frekans uzayında bileşenlere ayrılıp, iteratif yöntemlerle hedef spektrum eğrilerine yaklaşacak şekilde ölçeklendirilmişlerdir.

Bu yönteme ek olarak, üç adet yeni deprem kaydı seçilmiş ve bu kayıtlar frekans içerikleri değiştirilmeden, doğrudan skalar bir büyükle çarpılarak ölçeklendirilmişlerdir. AASHTO sismik izolasyon şartnamesi (10) uyarınca ölçeklendirilmiş kayıtların SRSS metodu ile elde edilen yatay bileşke spektrumlarının ortalamasının, yapının hakim periyodunun 0.5 ile 1.5 katı arasında kalan ivmeler için tasarım ivme spektrumunun 1.3 katından yüksek olması gerektiğini belirtmektedir.

3.1.3. *Hedeflenen Hasar Düzeyleri*

Esas alınan şartnameye (4) göre, köprüler aşağıda belirtilmiş olan üç adet önem sınıfından birine dahil edilmektedir (özel, normal ve basit köprüler).

Kömürhan Köprüsü'nün Malatya ve Elazığ arasında ulaşımı sağlayan en kısa güzergah üzerinde bulunması ve bu sebeple hemen hemen alternatifsiz olması dikkate alındığında, "Özel Köprü" sınıfına sokulmasının uygun olacağı ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla aşağıda verilen performans düzeyleri hedeflenmiştir (Tablo 3-2).

Tablo 3-2: Özel köprüler için hedeflenen performans düzeyleri

Köprü Sınıfı	**(D1) Deprem Düzeyi**	**(D2) Deprem Düzeyi**	**(D3) Deprem Düzeyi**
Özel Köprüler	–	Minimum Hasar	Kontrollü Hasar

Hasar seviyelerinin tanımı esas alınan şartnamede aşağıdaki gibi yapılmaktadır (4):

- **Minimum Hasar Performans Düzeyi:** Ddeprem etkisi ile hiç hasar meydana gelmemesi veya meydana gelecek yapısal hasarın çok sınırlı olması durumunu tanımlayan performans düzeyidir. Bu durumda köprüde trafik kesintisiz olarak devam eder veya meydana gelebilecek aksamalar birkaç gün içinde kolayca giderilebilecek düzeyde kalır.
- **Kontrollu Hasar Performans Düzeyi:** Deprem etkisi altında çok ağır olmayan ve onarılabilir hasarın meydana gelmesine izin verilen performans düzeyi olarak tanımlanır. Bu durumda, köprü operasyonunda kısa süreli (birkaç gün veya hafta) aksamaların meydana gelebilir:

Bu çalışmada, tüm deprem düzeyleri için şekil değiştirmeye göre tasarım yöntemleri esas alınmıştır. Esas alınan şartnamenin ilgili bölümü ((4), Bölüm 3.2.4.8) uyarınca orta ayak kesitlerinde çelik ve beton malzemeleri için izin verilen deformasyon miktarları aşağıda verilmektedir (Tablo 3-3). Aynı esaslar dahilinde üstyapı tabliyesinde ise plastik mafsal oluşumuna izin verilmemekte ve kesitlerin eğilme altında elastik rejimde kalması hedeflenmektedir. Kenar ayak-üstyapı bağlantısını sağlayan Dwydaq çekme çubukları için de yine Tablo 3-3'da donatı çeliği için verilmiş olan deformasyon limitleri kullanılacaktır.

Tablo 3-3: Beton ve çelik deformasyon limitleri

Birim şekildeğiştirme	**Performans Düzeyi**	
	Minimum Hasar (D2 Deprem Düzeyi)	**Kontrollü Hasar (D3 Deprem Düzeyi)**
Beton basınç birim şekildeğiştirmesi	0.004	0.020
Donatı çeliği birim şekildeğiştirmesi	0.010	0.040

3.2. Mevcut Durum Deprem Analizlerinin Sonuçları

Sismik analizlerin sonuçları, D3 (2475 yıllık) ve D2 (475 yıllık) düzeylerinde boyuna yöndeki deprem yüklemeleri altında kenar ayak-üstyapı bağlantı çubuklarından iletilen kuvvetlerin kenar ayaklar tarafından güvenle taşınamadığını ortaya koymuştur. Analizler sonucunda kenar ayaklarda stabilite kaybı olmamakla birlikte, büyük mertebelerde deplasman istemleri gözlenmiş ve betonarme taşıma kapasitelerinde yüksek oranlarda aşılmalar ortaya çıkmıştır. D1 (72 yıllık) düzeyi deprem etkilerinin ise kenar ayaklar tarafından güvenle taşınabildiği görülmüştür. Enine yöndeki deprem yüklemeleri altında ise, D3 düzeyi için orta ayakların burulma kapasitelerinin aşılacağı ve orta ayak temellerinde problemler yaşanacağı tespit edilmiştir. D2 ve D1 deprem düzeyleri enine yön deprem ivmeleri altında orta ayaklarda ve temellerde yetersizlik görülmemiştir.

Tüm analiz sonuçlarının özeti

Tablo 3-4‘da verilmektedir. Depreme karşı yeterli performans gösteremeyen öğeler “**X**”, gösterebilenler ise ”√” işareti ile simgelenmiştir.

Tablo 3-4: Deprem analizleri sonuçlarının özeti

TAHKİK EDİLEN UNSURLAR			**DEPREM DÜZEYİ**		
			D1	**D2**	**D3**
Malatya Kenar Ayağı	Dwyaq Çubuklar	Birim Uzamalar	√	√	√
	Bumper Mesnet	Yük Kapasitesi	√	**X**	**X**
	Neotop Mesnetler	Yük Kapasitesi	√	√	**X**
	Yanal Kauçuk Mesnetler	Yük Kapasitesi	√	**X**	**X**
	Betonarme	Moment Kapasitesi	√	**X**	**X**
		Kesme Kapasitesi	√	**X**	**X**
	Genel Davranış	Zemin Gerilmeleri	√	√	√
		Stabilite Durumu	√	√	√
Elazığ Kenar Ayağı	Dwyaq Çubuklar	Birim Uzamalar	√	√	√
	Bumper Mesnet	Yük Kapasitesi	√	**X**	**X**
	Neotop Mesnetler	Yük Kapasitesi	√	√	**X**
	Yanal Kauçuk Mesnetler	Yük Kapasitesi	√	**X**	**X**
	Betonarme	Moment Kapasitesi	√	**X**	**X**
		Kesme Kapasitesi	√	**X**	**X**
	Genel Davranış	Zemin Gerilmeleri	√	√	√
		Stabilite Durumu	√	√	√
Orta Ayaklar	Betonarme	Moment Kapasitesi	√	√	√
		Kesme Kapasitesi	√	√	**X**
		Burulma Kapasitesi	√	√	**X**
	Temeller	Zemin Gerilmeleri	√	**X**	**X**
		Moment Kapasitesi	√	**X**	**X**
		Kesme Kapasitesi	√	√	**X**
Üstyapı	Betonarme	Moment Kapasitesi	√	**X**	**X**
Mafsal	Dayanım	Moment Kapasitesi	√	**X**	**X**
		Kesme Kapasitesi	√	**X**	**X**
		Mesnet Kapasiteleri	√	**X**	**X**

3.3. Güçlendirme Alternatifleri

Mevcut durum analiz sonuçlarının ışığında, köprüdeki öncelikli problemin boyuna yönde deprem yükleri altında kenar ayaklarda, orta ayak temellerinde ve üstyapıda meydana gelmesi beklenen tesirlerin güvenle taşınamaması olduğu ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, mevcut durum itibari ile güçlendirilmeleri pek de mümkün olmayan orta ayaklara, kenar ayaklara ve dolayısıyla bunların temellerine etkiyen tesirlerin azaltılmasına çalışılmıştır.

Geçmişte çeşitli köprüler için yapılmış olan güçlendirme çalışmalarının ve literatürde bu konuyla ilgili yer alan bilgilerin de ışığında, en uygun çözümlerin kenar ayaklar mesnet şartlarının değiştirilmesi ve/veya kenar ayak ile üstyapıyı sismik sönümleyiciler ile bağlamak olacağı düşünülmüştür.

Sismik sönümleyicilerin çok tercih edilen iki tipi aşağıda belirtilmiştir.

- Viskoz sönümleyiciler (Viscous Dampers)
- Sürtünme sönümleyicileri (Friction Dampers)

Bilindiği gibi, viskoz sönümleyiciler iki ucu arasındaki bağıl hız oluştuğu takdirde kuvvet aktarabilmekte, dolayısıyla sönümleme yapabilmektedir. Böyle bir bağıl hızın söz konusu olmadığı durumlarda ise (termal deplasmanlar gibi) herhangi bir kuvvet aktarmayarak deplasmana izin vermektedirler.

Sürtünme sönümleyicileri ise aygıttaki statik sürtünme dayanımının aşılması durumunda, iki uç arasında deplasman oluşumuna bağlı olarak enerji sönümlemektedir. Servis durumunda ise, bir miktar kuvvet taşıyabilerek gerektiğinde elastik bir bağlantı elemanı olarak görev yapabilmektedir.

Bu açıklamalar ışığında, köprüde bu tarz sismik sönümleme aygıtlarının en verimli şekilde çalışabileceği, bir başka deyişle bağıl hız ve deplasmanların en fazla olacağı bağlantı yerlerinin kenar ayaklar olacağı ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, bu damperlerin etkili bir şekilde çalışabilmesi için kenar ayaklardaki mesnet şartlarının değiştirilmesinin gerektiği ortadadır. Bu yargı yapılan analizlerle de desteklenmiştir. Dwydaq çekme çubukları ve bumper mesnetler aynı şekilde muhafaza edildiğinde, sisteme damperlerin eklenmesi halinde kenar ayak reaksiyonlarının azalmadığı gözlenmiştir.

Köprünün bir diğer esas problemi de enine yöndeki D3 düzeyi deprem yüklemeleri altında orta ayaklara gelen yüksek burulma itkileri ve temel reaksiyonlarının güvenle taşınamamasıdır. Bu tesirleri azaltmak amacıyla da çeşitli denemeler yapılmış, fakat orta ayakları güçlendirmek ve temel ebatlarını büyütmek dışında uygun bir çözüm bulunamamıştır.

Orta ayak temellerin güçlendirilmelerinin ise yaklaşık 45 m suyun altında olmalarından dolayı hemen hemen mümkün olmadığı ortadadır. Bu sebepten dolayı güçlendirmeye esas deprem düzeyinin D2 (475 yıl dönüş periyodu) olmasına karar verilmiştir.

3.3.1. *Alternatif 1: Kenar Ayak Mesnet Şartının Boyuna Yönde Serbest Hale Getirilmesi*

Bumper Mesnetler ve çekme çubukları devre dışı bırakılarak kenar ayakların köprü boyuna yönünde kayıcı hale getirilmesinden sonra hem D3, hem de D2 düzeyi için deprem analizleri tekrarlanmıştır. D3 düzeyi yüklemesinde üstyapının kenar ayaklarda 43 cm civarında deplasmanlar yaptığı görülmüştür.

Kolonların ise alt ve üst kısımlarında moment kapasitelerinin sırasıyla %25 ve %40 civarlarında aşıldığı gözlenmiştir. Temellerin de kolonlardan aktarılan tesirleri taşıyamadığı ortaya çıkmıştır.

D2 deprem yüklemesinde ise üstyapı deplasmanları 25 cm civarında kalmıştır. Kolonlar tamamen elastik limitler dahilinde eğilme yapmış olup, orta ayak temellerinin ise ayaklardan aktarılan tesirleri taşıyabildiği görülmüştür.

3.3.2. *Alternatif 2: Viskoz Damperler*

Viskoz damperler kullanılarak yapılmış olan çeşitli denemeler sonucunda, her bir kenar ayakta 6 adet 1250 kN yük kapasitesine sahip damperin kullanılmasının uygun bir çözüm olabileceğine karar verilmiştir. Analizler neticesinde kenar ayak reaksiyonları D2 deprem düzeyleri için taşınabilir mertebelerdedir. Üstyapı deplasmanları ise aynı deprem yüklemeleri için sırasıyla 9 cm ve 5 cm'in altında kalmıştır. Orta ayak tesirleri hem ayaklar hem de temeller tarafından güvenle taşınabilecek limitler dahilinde kalmıştır. Seçilen damperlerin özellikleri şu şekildedir:

- 1250 kN kuvvet kapasitesi
- c= 2000 kN.s/m
- α= 0.3
- K= 235000 kN/m

3.3.3. *Alternatif 3: Sürtünme Damperleri*

Sürtünme damperlerinin kullanıldığı analizler sonucunda ise, her kenar ayakta yine 1250 kN'luk 6 adet sürtünme damperinin kullanımı ile makul sonuçlar elde edilebilmiştir. Kenar ayak reaksiyonları D2 deprem düzeyi için damperin limiti olan 7500 kN civarında elde edilmiştir. Üstyapı deplasmanları ise aynı deprem yüklemeleri için sırasıyla 11 cm ve 5 cm'in altında kalmıştır. Orta ayak tesirleri hem ayaklar hem de temeller tarafından güvenle taşınabilecek limitler dahilinde kalmıştır.

3.3.4. *Sonuçlar ve Güçlendirme Sisteminin Seçimi*

Kenar ayakların boyuna yönde kayıcı hale getirilmeleri ve herhangi bir sismik sönümleyici kullanılmaması durumunda ise, köprünün D2 düzeyi deprem performansının yapısal elemanların

taşıma gücü açısından kabul edilebilir seviyelere çekilebildiği, fakat üstyapı deplasmanlarının oldukça büyük seviyelere eriştiği gözlenmiştir.

Boyuna yöndeki ivmeler altında D2 deprem düzeyleri için viskoz ve sürtünme damperlerinin kulanımı ile yapının performansının genel olarak yeterli seviyelere çekilebileceği kanısına varılmıştır.

Güçlendirme sisteminin seçiminde öncelikli olarak dikkate alınan husus, köprüdeki zamana bağlı deformasyon istemleri sebebiyle sebebiyle kenar ayaklarda yer alan çekme çubuklarının 4500 kN'a varan büyüklükte bir kuvvetle yüklenmiş olma ihtimalleridir. Bu çekme çubuklarının tümden devre dışı bırakılmasından sonra, üstyapının açıklığa doğru yaklaşık olarak 5 cm deplasman yapabilme olasılığı mevcuttur.

Bu durumda çekme çubuklarındaki mevcut kuvvetleri yeni bir sisteme aktarmak gereği doğmaktadır. Teorik olarak, sürtünme damperlerinin kullanımı ile bu hedefe ulaşılabilmektedir. Sürtünme damperlerinin kenar ayaklara montajından sonra bağlantı çubukları devre dışı bırakılır ise, sürtünme damperleri bu yükleri taşımaya başlayacaktır. 1250 kN yük kapasitesine sahip damperlerden her kenar ayakta 6 adet kullanılması ile toplam 7500 kN statik yük kapasitesi elde edilebilmektedir. Isıl deplasmanlardan dolayı bir kenar ayak bağlantısında oluşacak toplam kuvvetlerin de 1500 kN dolaylarında olduğu görülmüştür. Bu durumda damperlerin toplam kapasitesi servis durumunda 6000 kN civarına erişebilecek kuvvetleri taşımaya yetecektir.

Ancak sürtünme damperlerinde uzun süreli sabit yükler altında gevşemeler oluşabileceği, dolayısıyla üstyapının zaman içerisinde açıklığa doğru deplasman yapabileceği endişesi mevcuttur. Literatür aramaları sonucunda sürtünme damperlerinin uzun süreli servis yükleri altında nasıl bir performans gösterdiğine ilişkin bir yayına rastlanmamıştır.

Bu endişeleri giderebilmek amacıyla yeni bir güçlendirme önerisi geliştirilmiştir. Bu sistemde, önce çekme çubuklarının belli bir bölümü devre dışı bırakılacak ve mevcut servis yüklerini güvenli bir şekilde taşıyabilecek miktarda çubuk yapıyı desteklemeye devam edecektir. Daha sonra ise sürtünme damperleri yapıya monte edilecek ve böylece bu damperler uzun süreli servis yüklerini almayacaklardır. Isıl genleşmeler altında her bir kenar ayak bağlantısında oluşması beklenen ±1500 kN büyüklüğündeki kuvvetler ise çekme çubukları ve sürtünme damperleri arasında paylaştırılacaktır.

Mevcut durumda çekme çubuklarında herhangi bir yük bulunmaması durumunda ise, üstyapıyı kenar ayağa doğru uzatmaya çalışacak olan ısıl kuvvetler sadece sürtünme damperleri ile karşılacaktır. Fakat, bu ısıl kuvvetlerin sürekli olmaması ve mertebelerinin küçük olması sebebiyle önceki paragraflarda belirtilmiş olan endişeler geçerli olmamaktadır. Belirtilen bu konfigürasyonu somutlaştırmak amacıyla yapılan hesaplar aşağıda verilmektedir.

Çubuklarda mevcut olan yükler 4500 kN civarındadır. Bir adet çekme çubuğunun elastik taşıma kapasitesi şu şekilde hesap edilebilir:

$$\boldsymbol{F_{ç}} = \pi * \frac{50^2}{4} * \frac{420}{1000} \approx 824\ kN$$

Mevcut yüklerin yaklaşık olarak 2'ye eşit bir güvenlik faktörü ile taşınabilmesi için gereken çubuk adedi aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$\boldsymbol{n} = 4500 * 2/824 \approx 11$$

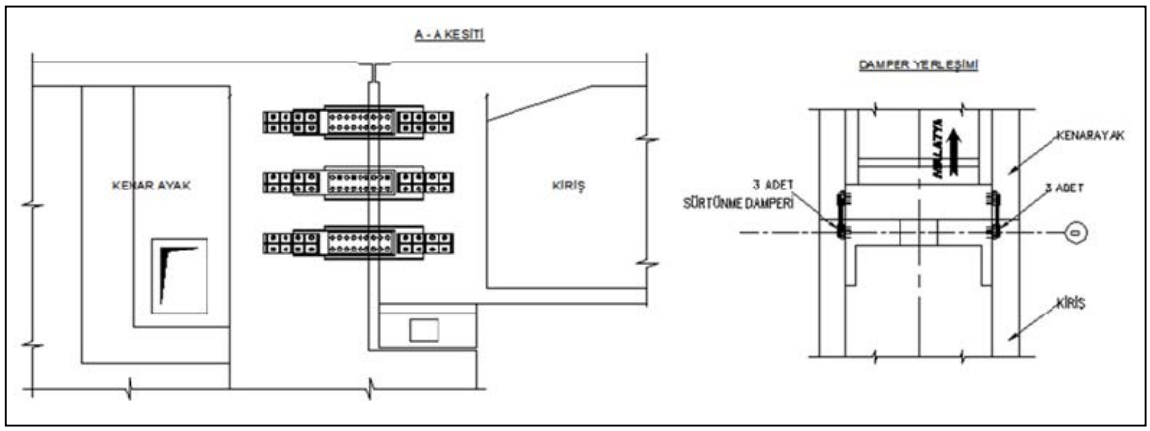
Çekme çubuklarının yerleşiminin simetrik olabilmesi için 10 adet çubuğun devrede kalmasına karar verilmiş olup, bu durumda güvenlik faktörü $\boldsymbol{G.F.} = 824 * 10/4500 \approx 1.83$ gibi makul bir değerde kalmaktadır. Isıl kuvvetlerin sadece damperler tarafından taşınacağı varsayımı yapıldığında her bir kenar ayaktaki damper grubunun toplam 1500 kN yük taşıması gerekmektedir. Her bir kenar ayakta 1000 kN yük kapasitesine sahip damperlerden 6 adet kullanılarak, bu yükün emniyetli bir şekilde taşınabileceği düşünülmektedir.

Bu konfigurasyon sonucunda, deprem anında üstyapıdan kenar ayağa iletilecek olan maksimum kuvvetler aşağıdaki gibi olacaktır:

Açıklığa doğru: $\sum \boldsymbol{F} = 6 * 1000 + 10 * 824 = \mathbf{14240\ kN}$

Kenar ayağa doğru: $\sum \boldsymbol{F} = 6 * 1000 = \mathbf{6000\ kN}$

Üstyapıdan iletilecek olan bu yüklerin hem Malatya hem de Elazığ kenar ayakları tarafından güvenle taşınabileceği tespit edilmiştir. Sürtünme damperlerinin yerleşimi Şekil 3-4'te şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3-5: Sürtünme damperi bağlantısının şematik gösterimi

4. Sonuçlar

Yapım yılı itibari ile tasarımda oldukça düşük deprem ivmeleri dikkate alınmış olup, günümüzün bilgileri ışığında beklenen deprem büyüklükleri için yapının performasını tahkik etmek ihtiyacı doğmuştur.

Sismik analizlerin sonuçları, D2 (475 yıllık) düzeylerinde boyuna yöndeki deprem yüklemeleri altında kenar ayak-üstyapı bağlantı çubuklarından iletilen kuvvetlerin kenar ayaklar tarafından güvenle taşınamadığını ortaya koymuştur. Orta ayaklarda ve temellerde yetersizlik görülmemiştir.

Onarım ve güçlendirme önerileri ile ilgili özet bilgiler ve inşaat sıraları aşağıda verilmiştir.

1- Üstyapının kenar ayaklara oturduğu bölgelerde yer alan neotop mesnetler çıkartılacak ve yerlerine elastomer mesnetler yerleştirilecektir.
2- Kenar ayak-üstyapı bağlantısını sağlayan çekme çubuklarının dörtte üçü gevşetilerek, bağlantı her bir kenar ayakta 10 adet çubukla sağlanacaktır. Üstyapı ile kenar ayak perdesi arasında yer alan yastık (bumper) mesnetler de devre dışı bırakılacaktır.
3- Kenar ayaklar ile üstyapı arasına sürtünme damperleri monte edilecektir.

5. Referanslar

1. *Mühendislik Haberleri Dergisi, Sayı: 442-443.* s.l. : TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.

2. **CEN.** *TS EN 1998-2: Eurocode 8 – Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures.* s.l. : TSE, 2006.

3. *Vibration Characteristics of Kömürhan Highway Bridge Constructed with Balanced Cantilever Method.* **Alemdar Bayraktar, Ahmet Can Altunişik, Bariş Sevim, Temel Türker, Arman Domaniç, and Yavuzhan Taş.** 2, s.l. : Journal of Performance of Constructed Facilities, 2009, Cilt 23.

4. **DLH.** *Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Esasları.* s.l. : DLH.

5. **AASHTO.** *Standart Specifications for Highway Bridges 17. Edition.* s.l. : AASHTO, 2002.

6. **ACI-COMMITTEE-318.** *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) And Commentary (ACI 318r-02).* s.l. : ACI.

7. **PCI.** *Notes on ACI 318-02 Building Code Requirements for Structural Concrete.* s.l. : PCI.

8. http://www.deprem.gov.tr/linkhart.htm. *http://www.deprem.gov.tr/.* [Çevrimiçi]

9. http://www.sayisalgrafik.com.tr/deprem/tr_frames.htm. *http://www.sayisalgrafik.com.tr/.* [Çevrimiçi]

10. **AASHTO.** *Guide Specifications for Seismic Isolation Design.* s.l. : AASHTO, 2000.