

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YAPIM AŞAMALARI VE FARKLI ZEMİN DURUMLARININ BETONARME
KÖPRÜLERİN YAPISAL DAVRANIŞLARINA ETKİSİ**

İnş. Müh. Erdal YILDIRIM

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İnşaat Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16.12.2010
Tezin Savunma Tarihi : 24.01.2011**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Recep NİŞANCI**

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Trabzon 2011

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Yapım Aşamaları ve Farklı Zemin Durumlarının Betonarme Köprülerin Yapısal Davranışlarına Etkisi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez jüri üyeliğinde bulunup tezimin tamamlanmasında önemli katkıları olan değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR ve Yrd. Doç. Dr. Recep NİŞANCI'ya şükranlarımı sunarım.

Akademik hayatım boyunca bana destek olan Hocalarıma çok teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım süresince bana her türlü desteği veren aileme müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Ayrıca, tüm desteğiyle yanımda olan eşime göstermiş olduğu sabırdan dolayı teşekkür eder, bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını ve Ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Erdal YILDIRIM
Trabzon 2011

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ.....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışı ile İlgili Çalışmalar.....	2
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği	6
1.4. Karayolu Köprülerinin Analitik Modellenmesi	7
1.4.1. Dengeli Konsol Yöntemi.....	8
1.4.2. Yapım Aşamalarının Dikkate Alınması	9
1.4.3. Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Dikkate Alınması	10
1.4.3.1. Basınç Dayanımı	11
1.4.3.2. Betonun Yaşı	11
1.4.3.3. Betonun Büzülmesi	12
1.4.3.4. Betonun Sünmesi.....	13
1.4.3.5. Çeliğin Gevşemesi.....	14
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	16
2.1. Giriş.....	16
2.2. Kömürhan Köprüsü	16
2.2.1. Kömürhan Köprüsü ve Geometrik Özellikleri	16
2.2.1.1. Köprü Tabliyesi.....	18
2.2.1.2. Köprü Ayakları ve Kenar Mesnetler	19
2.2.1.3. Orta Açıklık Mafsal Düzeneği	20

2.3.	Kömürhan Köprüsü'nün Statik Davranışının Belirlenmesi	22
2.3.1.	Tabliye Davranışı	28
2.3.2.	Köprü Ayaklarının Davranışı	30
2.3.3.	Temel Davranışı	32
2.4.	Kömürhan Köprüsü'nün Yapısal Davranışına Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Etkisinin Belirlenmesi	34
2.4.1.	Analizlerde Dikkate Alınan Yükleme Durumları	39
2.4.2.	Yapım Aşamalarına Bağlı Deformasyon Şekilleri	40
2.4.3.	Köprü Tabliyesinin Davranışı	42
2.4.4.	Köprü Ayaklarının Davranışı	44
2.4.5.	Temel Davranışı	46
3.	SONUÇLAR	49
4.	KAYNAKLAR.....	53

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yapım aşamaları ve farklı zemin durumlarının betonarme köprülerin yapısal davranışlarına olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, Elazığ-Malatya karayolunun 51. km'sinde bulunan Kömürhan Köprüsü üzerinde analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup; karayolu köprülerinin yapısal davranışı ile ilgili çalışmalar ve karayolu köprülerinin analitik modellenmesi bu bölümde sunulmaktadır. İkinci bölümde; yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmektedir. İkinci bölümde yapılan çalışmalar iki kısma ayrılmıştır. İlk kısımda, Kömürhan Köprüsü'nün proje verileri dikkate alınarak oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinden lineer statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde sert, orta ve yumuşak zemin türleri için analizler tekrarlanmış, analizler sonrasında tabliye uzunluğu ve ayak yüksekliği boyunca elde edilen yerdeğiştirme, eğilme momenti, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerleri ile temelde elde edilen yerdeğiştirmeler ve gerilmeler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İkinci kısımda, Kömürhan Köprüsü'nün lineer olmayan davranışı köprünün yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması için belirlenmiştir. Yapım aşamalı analizlerde beton malzemesi için elastisite modülündeki değişimler, rötre ve sünme etkileri, çelik malzemesi için ise çeliğin relaksasyonu dikkate alınmıştır. Analizler aksonrasında statik analizlerden elde edilen kesit tesirleri karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Üçüncü bölümde; tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

Anahtar Kelimeler : Karayolu Köprüsü, Sonlu Eleman Modeli, Yapım Aşamaları, Zaman Bağlı Malzeme Deformasyonları.

SUMMARY

Effects of Construction Stage and Different Soil Conditions on the Structural Behavior of Reinforced Concrete Bridges

In this thesis, structural behaviors of highway bridges are determined considering construction stages and different soil conditions. For this purpose, Kömürhan Highway Bridge located on the 51st km of Malatya-Elazığ Highway is selected and analytical studies are performed.

Three main sections are considered in this thesis. In the first section of the thesis; background of structural behavior of highway bridges and analytical modeling procedures of highway bridges are represented. The second section of the thesis is separated to two main parts. In the first part, finite element model of Kömürhan Highway Bridge are constituted and static behavior of are determined. In the analysis, strong, medium and soft soil conditions are considered. At the end of the analysis, displacements, bending moments, shear forces and axial forces along to the bridge deck and along to height of the bridge column are given with detail. In the second part, geometric nonlinearity is taken into consideration in the analysis using P-Delta plus large displacement criterion. The time dependent material strength variations and geometric variations are included in the analysis. Elasticity modulus, creep and shrinkage are computed for different stages of the construction process. The structural behaviour of the bridge at different construction stages has been examined. In the third section of the thesis; conclusions and some suggestions related to the thesis study are represented. Lastly, references and autobiography are represented.

Anahtar Kelimeler : Construction stages, Finite element model, Highway bridge, Time Dependent Material Properties.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Köprü üstyapısını oluşturan segmentlerin inşasına ait şematik gösterim	8
Şekil 2.1. Kömürhan Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar.....	17
Şekil 2.2. Kömürhan Köprüsü'nün plan, boy kesit ve eleman boyutları	18
Şekil 2.3. Değişken kesitli tabliye üst yapısı	19
Şekil 2.4. Değişken kesitli köprü orta ayaklarına ait kesit görünüşleri (ölçüler cm'dir)	20
Şekil 2.5. Orta açıklık genleşme derzindeki mafsal düzeneği (ölçüler mm'dir).....	21
Şekil 2.6. Orta açıklık genleşme derzindeki mafsal düzeneğine ait bazı fotoğraflar	22
Şekil 2.7. Kömürhan Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli ve eleman birleşim detayları.....	25
Şekil 2.8. Kömürhan Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modelleri	26
Şekil 2.9. Kömürhan Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modelleri.....	27
Şekil 2.10. Kömürhan Köprüsü'nün statik analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin, eğilme momentlerinin, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi.....	28
Şekil 2.11. Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen yatay ve düşey yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi	30
Şekil 2.12. Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi.....	31
Şekil 2.13. Kömürhan Köprüsü'nün statik analizleri sonucunda elde edilen eğilme momentlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi	32
Şekil 2.14. Kömürhan Köprüsü'nün statik analizleri sonucunda elde edilen maksimum ve minimum gerilmelerin olduğu andaki kontur diyagramları.....	33
Şekil 2.15. Kömürhan Köprüsü'nün ankastre mesnet durumu için çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli.....	35
Şekil 2.16. Kömürhan Köprüsü'nün yapı-zemin etkileşimini içeren durumu için çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli	36
Şekil 2.17. Beton (a) ve öngerilmeli çelik (b) için kullanılan gerilme-şekil değiştirme diyagramları	38
Şekil 2.18. Beton için zamana bağlı malzeme özelliği değişimleri	38

Şekil 2.19.	Öngerilmeli çelik için zamana bağlı malzeme özelliği değişimi.....	39
Şekil 2.20.	Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile tabliye ve ayaklara ait deformasyon değerleri	41
Şekil 2.21.	Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin, eğilme momentlerinin, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi.....	42
Şekil 2.22.	Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay ve düşey yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi.....	44
Şekil 2.23.	Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi	45
Şekil 2.24.	Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen eğilme momentlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi.....	46
Şekil 2.25.	Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen maksimum ve minimum gerilmelerin oluştuğu andaki kontor diygramları	47

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Segmentlerin inşası sırasında geçen sürenin ortalama iş bölümü (Kumar, 2003; Harputoğlu vd., 2007).	9
Tablo 2.1. Temel zeminine ait özellikler	23
Tablo 2.2. Kömürhan Köprüsü'nün analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri	24
Tablo 2.3. Analizler sonrasında temelde edilen maksimum düşey yerdeğiştirme değerleri	32
Tablo 2.4. Malzeme deformasyonlarının dikkate alınması için seçilmesi gereken analiz parametreleri	37
Tablo 2.5. Yapım aşamalı analizler sonrasında temelde elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirme değerleri	46

SEMBOLLER DİZİNİ

$E_{ci}(t)$	t günlük betonun elastisite modülü
E_{ci}	Betonun 28 günlük elastisite modülü
RH	% olarak atmosferdeki nem oranı
t	Betonun gün cinsinden yaşı
t_s	Beton için büzülmenin başladığı andan itibaren gün cinsinden yaşı
$f_{cm}(t)$	t günlük bir betonun basınç dayanımı
f_{cm}	Betonun 28 günlük basınç dayanımı
$\beta_{cc}(t)$	Betonun yaşına bağlı bir katsayı
β_c	Yüklemeden sonra devam eden sünme
β_s	Zamana bağlı devam eden büzülmeyi gösteren bir katsayı
β_{sc}	Çimento tipine bağlı olarak değişen bir katsayı
$\sigma_c(t_0)$	t_0 anındaki yüklemeye karşılık gelen gerilme
ρ_t	t saat sonraki relaksasyon
ε_{cso}	Kavramsal büzülme katsayısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Köprüler, geçmişi günümüze bağlayan önemli mühendislik yapılarındandır. Görünüşleri, bıraktıkları etkiler, üzerlerinden geçerken hissettirdikleri, çevrelerinde barındırdıkları ve konumlarıyla birbirinden farklı özellikler içeren köprüler, yüzyıllardır insanları birbirlerine kavuşturmaktadırlar. Ülkemizde yeralan ve karayolları üzerindeki önemli yapılardan biri olan köprüler, ilk dönemlerinde dar, küçük açıklıklı ve hafif yükleri taşıyabilecek nitelikte kâgir ve ahşap malzemelerden yapılıırken; günümüzde bu köprülerin yerini uzun açıklıklı betonarme ve çelik köprüler almıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün kuruluşu ile birlikte köprü yapımına hız verilmiş ve son yıllarda yeni tekniklerden yararlanılarak öngerilmeli ve ardgermeli betonarme köprüler yapılmaya başlanmıştır. Özellikle büyük nehirler, baraj gölleri ve derin vadi geçişlerinde uzun açıklıklı ve yüksek karayolu köprüleri inşa edilmektedir.

Betonarme karayolu köprülerinin yüksek yapım maliyetleri ve buldukları bölgelerdeki lojistik önemleri dikkate alındığında, bu tür mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının çok iyi belirlenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Çünkü, bu tür köprülerin zarar görmesi, can ve mal kaybının yanında şehirlerarası ulaşım bağlantısının da yok olması anlamına gelmektedir.

Betonarme köprüler gibi önemli mühendislik yapılarının tasarım aşamalarında ve ön boyutlandırmalarında genellikle sonlu eleman modelleri ve analizleri kullanılmaktadır. Analizler genellikle bilimsel dünyada kabul edilmiş ve yaygın olarak kullanılan sonlu eleman paket programları ile gerçekleştirilmektedir. Bu analizlerde inşa edilecek olan yapının statik, dinamik, lineer ve lineer olmayan davranışları belirli kabuller dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu kabullerin başında, yapıların sanki bir an içerisinde inşa edildiği, yüklendiği ve malzeme özelliklerinin inşa süresince değişmediği sıralanabilmektedir. Fakat dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen değişken kesitli uzun açıklıklı karayolu köprülerinin yapımı yıllar alabilmektedir. Bu nedenle bu tür köprülerin sonlu eleman analizleri sırasında köprünün yapım aşamalarının ve malzeme özelliklerindeki değişimlerin dikkate alınması gerekmektedir. Çözümlemeler sırasında bu

tür etkilerin dikkate alındığı sistemlerde eleman yüklerinin ve kesit tesirlerinin %50 civarında fazla elde edildiği görülmektedir (Karakaplan vd., 2009; Altunışık vd., 2009a; Altunışık vd., 2009b; Altunışık vd., 2010a).

1.2. Köprülerinin Yapısal Davranışı ile İlgili Çalışmalar

Bu kısımda, karayolu köprülerinin yapısal davranışlarının analitik yöntemler kullanılarak belirlendiği çalışmalara yer verilmektedir. 1910'lu yıllardan itibaren yapıların yapısal davranışlarının analitik yöntemler kullanılarak belirlenmesi devam etmektedir. İlerleyen bilgisayar teknolojisi ve analiz yöntemleri de dikkate alındığında, günümüze kadar karayolu köprüleri ile ilgili yapılan birçok analitik çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu nedenle, tezin literatür kısmında genellikle son 20 yıl içerisinde yapılan çalışmalara yer verilmektedir.

Karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerinin ve dinamik etkiler altındaki davranışlarının analitik olarak belirlenmesi konusunda geçmişten günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır. İlk dönemlerde yapılan çalışmalarda karayolu köprülerinin statik ve dinamik etkiler altındaki lineer davranışları çeşitli modelleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Daha sonra, lineer analiz sonuçlarının köprülerin yapısal davranışlarını daha gerçekçi bir şekilde yansıtması amacıyla sonlu eleman modellemelerinde yapı-zemin etkileşim problemi dikkate alınmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Özellikle, 1990-1999 yılları arasında Amerika, Japonya, Tayvan ve Türkiye'de meydana gelen büyük depremler, köprülerin analizlerinde lineer olmayan davranışın dikkate alınmasının önemini ortaya koymuş ve bu durum araştırmacılar tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Deprem gibi dinamik etkiler altında birçok köprüde meydana gelen hasarlar ve yıkılmalar karayolu köprülerinin dinamik etkilerden daha az etkilenmesini sağlayan izolasyon sisteminin ortaya çıkmasını ve bu sistemin sonlu eleman analizlerinde dikkate alınmasını zorunlu hale getirmiştir (Li, 1992; Spyarakos, 1992; Constantinou vd., 1993; Kakinuma vd., 1994; Adanur, 1997; Kawashima vd., 1997; Casas, 1999; Muto ve Cooper, 1999; Sritharan vd., 2000; Vlassis ve Spyarakos, 2001; Chaudhary vd., 2002; Park vd., 2002; Adanur, 2003; Tongaonkar ve Jangid, 2003; Ateş, 2004; Ateş vd., 2004; Aref vd., 2005; Kim vd., 2006).

Saiidi vd. (1998), Amerika'nın Nevada eyaleti sınırları içerisinde bulunan Reno-Sparks bölgesindeki 26 adet köprünün yapısal performanslarını belirlemiştir. Analizler

sonrasında köprü taşıyıcı sistem elemanlarının yerdeğiştirme davranışları, kesit tesirleri ve süneklik düzeyleri elde edilmiştir.

Friyba ve Pirner (2001), karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerini ve statik yükler altındaki lineer davranışlarını analitik olarak belirlemişlerdir.

Kwak ve Son (2002), dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen karayolu köprülerinin tasarım momentlerinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Yapılan çalışmada, endüstriyel ve ekonomik gelişmeler sonucunda uzun açıklıklı karayolu köprülerinin inşasında önemli derecede artış olduğu vurgulanmış, bu tür köprülerin inşasında sabit mesnetli ya da sürekli açıklıklı gibi inşa yöntemlerinin sürekli olarak geliştiği belirtilmiştir. Ayrıca, mevcut durumda dengeli konsol yönteminin bu inşa metotları arasında betonarme kutu kirişli köprülerin inşasında iş iskelesi gerektirmeyen en önemli metot olduğu ifade edilmiştir. Dengeli konsol yöntemi ile toplumsal alanlarda, trafiğin yoğun olduğu bölgelerde, derin vadi ve suyollarında kurulması zor ve pahalı olan iş iskelesine gerek duyulmaması diğer yöntemlere göre büyük avantajlar sağlamaktadır.

Kappos vd. (2002), yapı-zemin etkileşiminin karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerine ve kesit tesirlerine olan etkisini analitik olarak belirlemişlerdir. Çalışma kapsamında, dört açıklıklı ve toplam 200 m uzunluğunda kutu kesit taşıyıcı sisteme sahip karayolu köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Köprünün analizleri SAP2000 (2008) programında farklı eleman türleri için hem zemin dikkate alınmadan hem de sert, orta ve yumuşak zemin sınıfları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, zemine ait sönüm oranının dikkate alınıp alınmaması durumları için de analizler tekrarlanmıştır. Çalışma kapsamında, yapı-zemin etkileşiminin köprünün dinamik karakteristiklerine (frekans ve mod şekli) ve kesit tesirlerine (yerdeğiştirmeler, kesme kuvveti ve maksimum moment) olan etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Jeremic vd. (2004), 26 açıklıklı ve toplam 1140 m uzunluğundaki I-880 viyadüğünün sismik davranışına yapı-zemin etkileşiminin etkisini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Analizlerde ilk olarak, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmayıp köprü ayaklarının temele rijit olarak bağlandığı kabul edilmiştir. İkinci modelde ise, yapı-zemin etkileşimi eşdeğer yay elemanlarla hesaplara katılmıştır. Yay elemanlarının mekanik özellikleri zemin içerisindeki kazıklı temellerin sonlu eleman analizleri sonucunda hesap edilmiştir. Analizlerde lineer elastik davranış gösteren temel-zemin sistemi ve 50 yıl içerisinde olma olasılığı %10 olan deprem yer hareketi dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda, yapı-temel-zemin etkileşiminin dikkate alınmasıyla köprü yapısal elemanlarının bazılarında elde

edilen kesit tesirlerinde azalmaların, bazılarında ise artmaların meydana geldiği belirtilmiştir.

Kwak ve Son (2004), dengeli konsol yöntemini kullanarak inşa edilen köprülerde açıklık oranı hesabı üzerinde çalışma yapmışlardır. Çalışmada, dengeli konsol yöntemi basitçe köprü ayağından çıkan konsol bölümlerinin her iki tarafa dengeli bir biçimde uzatılarak orta açıklığa ulaşılması şeklinde tanımlanmıştır. Bu sırada açıklığı kapatma işleminde bir önceki ayaktan uzatılan yarım açıklık kullanılmaktadır. Konsol inşası ilk olarak 1950'lerin ilk yıllarında Avrupa'da ortaya çıkmıştır ve hala yüzlerce köprünün tasarım ve inşasında geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Almanya'daki birçok büyük köprü inşasında kullanılan yerinde döküm parçalardan farklı olarak, Fransa'da prefabrik segment yöntemi üzerinde durulmuştur. Segmentlerin yerinde dökümü ve prefabrik olarak kullanımı karşılaştırıldığında yerinde döküm segmentlerle köprü inşası oldukça yavaş bir yöntemdir ve bu metodda açık hava şartlarına maruz kalan betonun zamana bağlı deformasyonları genç betonun erken yüklenmesi sonucunda çok önemli bir hal alır. Diğer yandan prefabrik segment inşasının çok hızlı bir yapım metodu olduğu görülmüştür. Çalışmanın en önemli bölümleri şantiyede gerçekleştirilir ve burada segmentler açık hava şartlarından korunabilir.

Smith ve Hendy (2004), dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen, tabliye genişliği 21 m ve ana açıklığı 152.4 m olan ard gerilmeli İngiltere'deki Yeni Medway Köprüsü'nü incelemişlerdir.

Wang vd. (2004), dengeli konsol yöntemi kullanılarak inşa edilen asma köprülerin farklı yapım aşamaları dikkate alınarak yapısal davranışlarının belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada iki sayısal süreç üzerine durulmuştur; birinci süreçte ileriye dönük süreç analizi gerçekleştirilmiştir, diğerinde ise geçmiş süreç analizi gerçekleştirilmiştir. Birinci yöntem köprü inşasındaki birbirini takip eden inşa aşamalarını sonraki yöntem ise inşa yöntemini geriye dönük uygulanmasıdır. Her iki yöntemde de köprü yapımının inşa aşamasındaki başlangıç şekillerinin bulunmasında başarı ile uygulanabilir. Yapılan analiz sonuçlarına göre köprü şekli tasarlanıp inşa edilmektedir. Yapılan çalışmada estetik görünüm, ekonomik şartlar ve inşa kolaylığı açısından açıklık mesafesi 200 m'den 1000 m'ye, yani orta açıklıktan uzun açıklığa kadar olan köprülerde asma köprü modelinin daha uygun olduğunu vurgulanmıştır. Çalışmalarının amacı, konsol yöntemiyle inşa edilen asma köprünün sonlu eleman yöntemi kullanılarak başlangıç şekil

analizinin yapılmasıdır. Bu nedenle her iki doğrusal hesap yöntemi ve doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılarak ileriye dönük ve geçmiş süreç analizleri kurulmuştur.

Ateş vd. (2005), sürtünmeli sarkaç sistemi ile izolasyonu gerçekleştirilen beş açıklıklı ve toplam 293 m uzunluğundaki bir karayolu köprüsünün dinamik davranışını, değişerek yayılan yer hareketini kullanarak belirlemişlerdir. Farklı tür zemin sınıfları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler sonucunda dinamik karakteristikler ve kesit tesirleri elde edilmiştir. Çalışma kapsamında, izolasyonlu ve izolasyonsuz durumlar için elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış, deprem izolasyon sisteminin köprülerin dinamik davranışına olan etkisi vurgulanmıştır.

Chouw ve Hao (2008a), köprülerin dinamik davranışına yapı-zemin etkileşiminin ve değişerek yayılan yakın fay yer hareketinin etkisini analitik olarak belirlemişlerdir. Değişerek yayılan yer hareketi, farklı dalga hızı ve tutarlılık fonksiyonlarına sahip yakın fay yer hareketi modeli ile hesaba katılmıştır. Köprü yapısal davranışının sayısal hesaplamalarında yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmıştır. Çalışmada, yapısal analizlerde ve tasarımlarda dikkate alınan düzgün yayılan yer hareketi kayıtlarının ve sabitleştirilmiş temel köprü yapısal davranışının tam olarak belirlenmesinde etkili sonuçlar vermediği vurgulanmıştır. Ayrıca, çalışma ekibinin yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak düzgün ve değişerek yayılan yer hareketlerinin köprülerin taşıyıcı sistem elemanlarının dinamik davranışına olan etkisinin belirlenmesi konusunda gerçekleştirdikleri birçok çalışma mevcuttur (Hashimoto ve Chouw, 2003; Chouw ve Hao, 2004; Chouw ve Hao, 2005; Chouw ve Hao, 2008b).

Shattarat vd. (2008), köprülerin dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesinde lineer analiz yöntemlerinin kullanıldığını, lineer olmayan davranışın ise yaklaşık olarak belirlenen düzeltme katsayıları ile hesap edildiğini belirtmişlerdir. Çalışma kapsamında, iki açıklı ve kutu kesitli betonarme bir karayolu köprüsünün sismik davranışı lineer analizler kullanılarak belirlenmiş, elde edilen analiz sonuçlarından lineer olmayan davranış hesaplanmıştır. Hesaplanan analiz sonuçlarının doğruluğunu belirlemek amacıyla, lineer olmayan analiz yöntemlerinden Kapasite Spektrumu ve Elastik Olmayan Talep Spektrumu yöntemleri kullanılmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Erhan ve Dicleli (2009), yapı-zemin etkileşiminin ve uç ayak tabliye sürekliliğinin karayolu köprülerinin hareketli yük dağılımına etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, çeşitli yapısal, geoteknik ve geometrik özelliklere sahip çok sayıda integral (tek döküm ve

monolitik çalışan) ve basit mesnetli köprülerin iki ve üç boyutlu yapısal modelleri oluşturularak hareketli yükler altındaki analizleri gerçekleştirilmiştir. İki ve üç boyutlu analiz sonuçlarından, temel zemininin köprülerin taşıyıcı sistem elemanları için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayılarına etkileri belirlenmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda, yapı-zemin etkileşiminin integral köprülerin uç ayağı için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayılarını, büyük ölçüde etkilediği ve uç ayak tabliye sürekliliğinin özellikle kısa açıklıklı köprülerdeki hareketli yük dağılım katsayıları üzerinde oldukça etkili olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, yapı-zemin etkileşiminin köprülerin yapısal davranışlarına olan etkisi, çalışma ekibi tarafından hazırlanan diğer bir çalışmada da incelenmiştir (Dicleli ve Erhan, 2010).

Altunışık vd. (2010b), uzun açıklıklı, değişken kesitli ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen betonarme karayolu köprülerinin sonlu eleman analizlerinde yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması konusunda çalışmışlardır. Örnek olarak, Elazığ-Malatya karayolu üzerinde bulunan Kömürhan Köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında, yapım aşamalarını dikkate alınmadığı analizlerde gerçekleştirilmiş, elde edilen verilerin karşılıklı olarak irdelenmesi sonucunda karayolu köprülerinin yapısal davranışlarının belirlenmesinde bu analiz yönteminin çok etkili olduğu belirtilmiştir.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Yapılan literatür araştırmasının ilk kısmında karayolu köprülerinin lineer ve lineer olmayan statik ve dinamik davranışlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen birçok analitik çalışmanın olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların en önemli amacı, inşaları sırasında çok büyük maddi kaynaklar harcanan ve buldukları bölgelerde önemli lojistik değer taşıyan karayolu köprülerinin yapısal davranışlarını en iyi şekilde temsil edecek analitik modeli ve analiz yöntemini geliştirmektir. Fakat bu çalışmalar sırasında oluşturulan analitik modellemelerde yapının sanki bir an içerisinde inşa edildiği ve yüklendiği kabul edilmektedir. Bu tür çözüm yöntemleri her zaman güvenilir sonuçlar vermeyebilmektedir. Çünkü bu tür mühendislik yapılarının inşaları uzun zaman almakta ve maruz kaldıkları yükler yapım süresince devamlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla, analizler sırasında yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının da dikkate alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışmasında, dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen karayolu köprülerinin yapısal davranışlarının yapım aşamaları ve zaman bağlı malzeme deformasyonları dikkate alınarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, Ülkemizde bulunan ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen Kömürhan Köprüsü uygulama olarak seçilmiştir. Bu kapsamda hazırlanan tez   bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, genel bilgiler üzerinde durulmakta, konuyla ilgili yapılmış çalışmalara yer verilmekte ve konunun önemi vurgulanmaktadır. Bu bölümde, tez çalışmasının analitik kısmını oluşturan karayolu köprülerinin sonlu eleman yöntemiyle modellenmesi ve sonlu eleman yöntemine dayalı formülasyon gibi konulara yer verilmektedir.

İkinci bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmaktadır. Bu bölüm, iki kısıma ayrılmaktadır. Yapım aşamalarının dikkate alınmadığı birinci kısımda, uygulama için seçilen Kömürhan Köprüsü'n n iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri proje verileri dikkate alınarak oluşturulmuş, lineer statik analizler gerçekleştirilerek köprünün yapısal davranışı belirlenmiştir. Analizlerde farklı tür zemin sınıfları (sert, orta ve yumuşak zemin) dikkate alınmıştır. Yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı ikinci kısımda ise, Kömürhan Köprüsü'nün lineer olmayan statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde betonun zaman bağlı dayanım değişimi, elastisite modülünün değişimi, s nme ve rötre etkileri ile çeliğin relaksasyonu dikkate alınmıştır. Köprünün her iki analiz durumu için elde edilen kesit tesirleri birbiriyle karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır.

  nc  bölümde tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

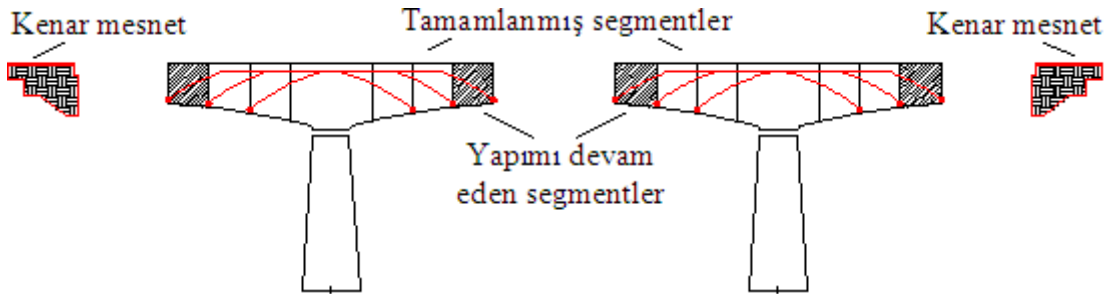
1.4. Karayolu Köprülerinin Analitik Modellenmesi

Köprüler, geçmişi günümüze bağlayan en önemli mühendislik yapılarının başında gelmektedir. Stratejik bakımdan da çok önemli bir yeri olan köprülerin, değişik taşıyıcı sisteme ve malzeme özelliklerine sahip birçok uygulaması günümüzde mevcuttur. Fakat uzun açıklıkların geçilmesi gereken yerlerde genel olarak betonarme köprüler, asma köprüler ve kablolu köprüler tercih edilmektedir. Bu köprü tipleri arasında özellikle betonarme karayolu köprüleri yapım aşamalarından ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarından daha fazla etkilenmektedir. Betonarme karayolu köprüleri ile geniş

ve uzun bir vadiyi maksimum açıklık ve minimum sayıda ayakla geçebilmek için en uygun ve en iyi yöntem yerinde dökme dengeli konsol yöntemidir.

1.4.1. Dengeli Konsol Yöntemi

Dengeli konsol yöntemi önerilmeli beton kullanılarak büyük açıklıkların geçilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, köprü üst yapısının her bir açıklığı, boyuna doğrultuda segment denilen parçalara bölünmekte ve bu segmentler parça parça inşa edilmektedir. Zeminden ek bir destek alınmadan, sabit bir noktadan dışarıya doğru konsol biçiminde uzanan ve yük taşıyabilen bir yapı ardışık adımlarla inşa edilmektedir. Köprü orta ayağının her iki tarafında birbirini dengeleyecek biçimde yapılan bu yapım tekniği Dengeli Konsol Yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Dengeli konsol yönteminde köprü üst yapısını oluşturan segmentlerin inşasına ait şematik gösterim Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Köprü üst yapısını oluşturan segmentlerin inşasına ait şematik gösterim

Dengeli Konsol Yöntemi enkesit yüksekliği sabit veya değişken olan her türlü üst yapı için kullanılabilir. Fakat gerek yapım sırasında gerekse yapım sonrasında statik zorlanmalara karşı en uygun form olarak değişken yükseklikli enkesit uygulaması tercih edilmektedir. Bu yöntemle inşa edilen köprülerde genellikle kutu kesitli üst yapı formu kullanılmaktadır. Köprü genişliğine bağlı olarak tek veya çok gözlü kutu kesit kombinezonları yapılabilmektedir. Köprü üst yapısı orta ayaklar ile monolitik olarak birleşebildiği gibi, orta ayak başlığına yerleştirilen mesnetler vasıtasıyla da üst yapı çözümleri gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca, aynı anda birçok ayakta üretim yapılabilmesi sayesinde esneklik ve hızlı bir iş programı hazırlanabilmekte, segment boyunca aynı hareketli kalıp defalarca kullanılabilir. Açıklık ortaları sürekli olarak geçilebildiği

gibi çeşitli çalışma prensiplerine göre hazırlanmış mafsal sistemleri de kullanılabilir.

1.4.2. Yapım Aşamalarının Dikkate Alınması

Dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen karayolu köprüleri genel olarak tabliye, ayaklar ve kenar mesnetlerden oluşmaktadır. Bu yöntemde önce orta ayaklar ve köprünün küçük bir kısmı, yerinde uygun bir kalıp sistemi ile inşa edilmektedir. Daha sonra orta ayakların her iki tarafına özel kalıp arabaları bağlanarak 3-5 m uzunluğundaki birer segment imal edilmektedir. Kalıp arabası kalıbın, betonun ve beton içerisindeki teçhizatın ağırlığını, bir önce dökülmüş olan segmente basarak taşımaktadır. Beton yeterli mukavemeti kazanınca, daha önce betonda bırakılmış kanallardan yüksek mukavemetli çelik kablolar geçirilmekte ve ardgerme tatbik edilmektedir. Ardgerme tatbik edilir edilmez kalıp arabası bir segment boyu kadar ötelenmekte ve yeni bir döngüye başlanmaktadır. Ayakların iki tarafındaki birer segmentin imal edildiği bir döngü, yaklaşık olarak 1 haftada tamamlanmaktadır (Kumar, 2003; Harputoğlu vd., 2007). Bu şekilde orta ayaklardan başlayan köprü inşaatı bir taraftan kenar mesnetlere bir taraftan da orta açıklığa doğru ilerlemektedir. Köprü orta noktasına gelindiğinde her iki taraftan gelen segmentler ya bir mafsal düzeneğiyle ya da kilit segmenti ile birleştirilmektedir. Maksimum yerdeğiştirmeler köprünün bu bölümünde meydana geldiği için inşa aşamasına çok özen gösterilmesi gerekmektedir. Köprü üstyapısını oluşturan segmentlerin inşası için geçen sürenin ortalama iş bölümü Tablo 1.1’de özetlenmektedir.

Tablo 1.1. Segmentlerin inşası sırasında geçen sürenin ortalama iş bölümü (Kumar, 2003; Harputoğlu vd., 2007).

Süre	Yapılan iş
1. Gün	Kalıp arabasının kurulması
2. Gün	Segment donatısının ve ardgerme kablo kılıflarının döşenmesi
3. Gün	Segmentin beton dökümüne hazır hale getirilmesi
4. Gün	Beton dökülmesi
5. Gün	Betonun mukavemet kazanması
6. Gün	Betonun mukavemet kazanması
7. Gün	Ardgerme yapılması

Köprüler gibi önemli mühendislik yapılarının sonlu eleman analizlerinde yapım aşamalarının modellenmesi sırasında aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmelidir:

- Bu tür köprülerin projelendirilme aşamalarından trafiğe açılma sürelerine kadar geçen süre içerisindeki bütün yapım aşamalarının ve detaylarının belirlenmesi gerekmektedir.
- Köprü taşıyıcı sisteminin (ayaklar, tabliye, mesnetler, ardgerme kabloları) hangi yapım aşamaları izlenerek inşa edildiği ve bu aşamaların ne kadar sürdüğüne ait detaylı bir iş planı hazırlanmalıdır.
- Geometrik parametreler için “P-Delta Etkisi” dikkate alınmalıdır.
- Hazırlanan iş planına göre, sonlu eleman modeli yapım aşamaları dikkate alınarak adım adım modellenmeli ve her bir elemana değişik bir grup ismi atanmalıdır. Özellikle bu aşama, analizin ilerleyen bölümlerinde büyük bir kolaylık sağlamaktadır.
- Modellemeler sonrasında toplam yapım aşaması adımı ve süresi belirlenmeli, buna bağlı olarak her bir yapım aşaması süresince eklenen ve boşaltılan yüklemeler ilgili atama isimleri dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir.
- Her bir adımdan elde edilen verilerin bir sonraki adıma eklenmesi için ilgili modüller seçilmeli, böylelikle analizlerin doğru sonuçlar vermesi sağlanmalıdır.
- Lineer olmayan parametreler literatüre uygun olarak seçilmelidir.

1.4.3. Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Dikkate Alınması

Yapım aşamalarının dikkate alındığı analizlerde, karayolu köprüleri gibi önemli mühendislik yapıları sahada yüklenici firma tarafından nasıl inşa ediyorsa, statik hesap yapan mühendisler de bu yapım aşamalarını zamana bağlı olarak bilgisayar ortamında bir araya getirmelidirler. Bunu yapmaya çalışan proje mühendislerinin zamana bağlı malzeme deformasyonlarını göz önüne almaları gerekmektedir. Çünkü köprü yapımı sırasında betonun elastisite modülü, sünme ve rötre katsayıları iklim şartlarına bağlı olarak sürekli değişikliğe uğrayacaktır. Örnek vermek gerekir ise yeni dökülen bir beton yaştır ve sadece sisteme bir ağırlık getirmektedir. Bu beton 7 günlük, 28 günlük veya 1000 günlük iken dayanımı sürekli değişmektedir. Betonun yaş durumundan yapının ekonomik zamanını tamamlamasına kadar olan değişimler yapım aşaması çözümlemesinin içerisine eklenebilir ve bu sayede gelecekte olabilecek hatalar engellenmeye çalışılabilmektedir (Karakaplan

vd., 2009). Bu gibi etkilerin dikkate alınmaması, orta açıklığa gelindiğinde tabliyenin her iki tarafından gelen segmentler arası kot farkı oluşmasına veya orta açıklığın zaman içerisinde tehlikeli boyutta sabit sehim verebilmesine neden olabilmektedir.

1.4.3.1. Basınç Dayanımı

Betonun t yaşındaki basınç dayanımı çimento tipine, sıcaklığa ve kür şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Betonun herhangi bir yaştaki basınç dayanımı,

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir (CEB-FIP, 1990). Burada, $\beta_{cc}(t)$ betonun yaşına bağlı bir katsayıdır ve aşağıdaki denklem yardımıyla hesap edilebilmektedir.

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (1.2)$$

Burada, $f_{cm}(t)$ t günlük bir betonun basınç dayanımı, f_{cm} betonun 28 günlük basınç dayanımı, t betonun gün cinsinden yaşını göstermektedir. $t_1=1$ gündür ve s çimento tipine bağlı olarak değişen 0.20, 0.25 ve 0.38 gibi bir katsayıdır.

1.4.3.2. Betonun Yaşı

Betonun elastisite modülü zamanla birlikte değişmektedir. Elastisite modülü,

$$E_{ci}(t) = E_{ci} \sqrt{\beta_{cc}(t)} \quad (1.3)$$

şeklinde hesap edilmektedir (CEB-FIP, 1990). Burada, $E_{ci}(t)$ t günlük betonun elastisite modülünü, E_{ci} betonun 28 günlük elastisite modülünü, $\beta_{cc}(t)$ ise betonun yaşına bağlı olarak belirlenen bir katsayıyı ifade etmektedir.

1.4.3.3. Betonun Büzülmesi

The CEB-FIP (1990) şartnamesine göre betonun toplam büzülme şekildeğiştirilmesi,

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cso} \beta_s (t - t_s) \quad (1.4)$$

denklemini ile hesap edilmektedir. Burada, ε_{cso} kavramsal büzülme katsayısını, β_s ise zamana bağlı devam eden büzülme gösteren bir katsayıyı ifade etmektedir. t betonun gün cinsinden yaşını, t_s ise beton için büzülmenin başladığı andan itibaren gün cinsinden yaşını göstermektedir. Kavramsal büzülme katsayısı aşağıdaki bağıntılar ile hesap edilebilmektedir.

$$\varepsilon_{cso} = \varepsilon_s(f_{cm}) \beta_{RH} \quad (1.5a)$$

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = \left[160 + 10 \beta_{sc} \left(9 - \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right) \right] \quad (1.5b)$$

Burada, f_{cm} MPa cinsinden betonun 28 günlük basınç dayanımını göstermektedir. f_{cmo} 10MPa'dır. β_{sc} ise çimento tipine bağlı olarak 4 ve 8 arasında değişen bir katsayıyı ifade etmektedir.

$$\left. \begin{array}{ll} \beta_{RH} = -1.55 \beta_{sRH} & 40\% \leq RH < 90\% \\ \beta_{RH} = 0.25 & RH \geq 99\% \end{array} \right\} \quad (1.6)$$

Burada,

$$\beta_{sRH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_o} \right)^3 \quad (1.7)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada, RH % olarak atmosferdeki nem oranını göstermektedir. RH_o 100%'dür. Zamana bağlı olarak devam eden büzülme,

$$\beta_s(t-t_s) = \sqrt{\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_0) + (t-t_s)/t_1}} \quad (1.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, h mm cinsinden ifade edilen kavramsal bir boyuttur ve $h = 2A_c/U$ ifadesi ile hesap edilmektedir. A_c kesit alanı, u ise atmosfer ile temas eden çevre uzunluğudur. $h_0=100\text{mm}$ ve $t_1=1$ gündür.

1.4.3.4. Betonun Sünmesi

Sünme etkisi CEB-FIP (1990) şartnamesinde sünme modeli olarak adlandırılan bir yaklaşımla hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımda, t_0 anında sabit bir gerilme için,

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \phi(t, t_0) \quad (1.9)$$

ifadesi dikkate alınmaktadır. Burada, $\sigma_c(t_0)$ t_0 anındaki yüklemeye karşılık gelen gerilmeyi, $\phi(t, t_0)$ ise sünme katsayısını göstermektedir. Bu katsayı,

$$\phi(t, t_0) = \beta_c(t-t_0)\phi_0 \quad (1.10)$$

ifadesi ile hesap edilmektedir. Burada, β_c yüklemeden sonra devam eden sünmeyi, t betonun gününü, t_0 ise yükleme anındaki betonun yaşını göstermektedir. Sünme katsayısı,

$$\phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (1.11a)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)}{0.46 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{1/3}} \quad (1.11b)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{f_{cmo}}}} \quad (1.11c)$$

$$\beta(t_o) = \frac{1}{0.1 + \left(\frac{t_o}{t_1}\right)^{0.2}} \quad (1.11d)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki bütün parametreler yukarıda açıklanmaktadır. Zamana bağlı olarak devam eden sünme,

$$\beta_c(t-t_o) = \left[\frac{(t-t_o)/t_1}{\beta_H + (t-t_o)/t_1} \right] \quad (1.12a)$$

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_o} \right)^{18} \right\} \frac{h}{h_o} + 250 \leq 1500 \quad (1.12b)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $t_1=1$ gün; $RH_o=100$ ve $h_o=100\text{mm}$ 'dir.

1.4.3.5. Çeliğin Gevşemesi

CEB-FIP (1990) şartnamesine göre, öngerilemeli çeliğin relaksasyonu 3 gruba ayrılmaktadır. Birinci grup, tel ve halat grupları için normal relaksasyonu; ikinci grup, tel ve halat grupları için gelişen ve devam eden relaksasyonu; son grup ise demir çubuklar ve donatılar için relaksasyonu göstermektedir.

30 yıla kadarki relaksasyon tahmini,

$$\rho_t = \rho_{1000} \left(\frac{t}{1000} \right)^k \quad (1.13)$$

bağıntısı ile hesap edilmektedir (CEB-FIP, 1990). Burada, ρ_t t saat sonraki relaksasyonu, ρ_{1000} ise 1000 saat sonraki relaksasyonu göstermektedir. $k \approx \log(\rho_{1000}/\rho_{100})$ yaklaşımında

k 1. grup için 0.12, ikinci grup için 0.19 olarak dikkate alınmakta, ρ_{100} ise 100 saat sonraki relaksasyonu göstermektedir. Normalde, relaksasyonun uzun süreli değerleri için uzun süreli testler yapılmaktadır. 50 yıl üzeri relaksasyon değerleri için 1000 saatlik relaksasyonun 3 katı dikkate alınmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, karayolu köprülerinin yapısal davranışlarının farklı tür zemin sınıfları için (sert, orta ve yumuşak zemin) yapım aşamaları ve zaman bağlı malzeme deformasyonları dikkate alınarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışmada, Kömürhan Köprüsü uygulama olarak seçilmiştir.

2.2. Kömürhan Köprüsü

2.2.1. Kömürhan Köprüsü ve Geometrik Özellikleri

Kömürhan Köprüsü, Elazığ-Malatya Karayolu'nun Fırat Nehri ile kesiştiği nokta olan 51. kilometresinde geçişi sağlayan köprüdür. Fırat'ın bu kesimindeki tek köprü olduğu için de lojistik önemi büyüktür. Köprü'nün yapımına 23.02.1983 tarihinde başlanılmış ve 08.04.1986 tarihinde tamamlanarak trafiğe açılmıştır. Kömürhan Köprüsü, Malatya ile Elazığ il sınırının tam ortasında olup 1986 yılından beri Karakaya baraj gölünün iki tarafını birbirine bağlamaktadır. Kömürhan Köprüsü yapılmadan önce Elazığ-Malatya illeri arasındaki ulaşım çeşitli yollarla yapılmaktaydı. 1930 yıllara kadar ulaşım sadece sal ve kayıklarla, daha sonra ise 1. Dünya savaşı yıllarında yapılmış olan ahşap bir köprüyle sağlanmıştır. Fakat suların yükselmesi ile birlikte ahşap köprü yıkılmış, dolayısıyla sal ve kayıklarla ulaşım tekrar dönmüştür. Bu nedenle Kömürhan Boğaz'ında betonarme bir köprü yapılması kararlaştırılmıştır. 1 Ağustos 1930 tarihinde başlayan betonarme köprü inşaatı 3 Nisan 1932 tarihinde tamamlanmıştır. Köprü'nün yapımcısı bir İsveç firması olan Nidgvist ve Helm Anonim Şirkettir. Köprü, esasında İsmet Paşa Köprüsü olarak isimlendirilmesine rağmen, Kömürhan Köprüsü olarak da anılmaktadır. Kömürhan Köprüsü, 109.60 m orta açıklık uzunluğuyla kemer tipinde yapıldığı dönem itibariyle dünyanın en büyük altıncı betonarme köprüsü olma özelliğini kazanmıştır. Uzun yıllar bölgeye hizmet eden bu ilk köprü'nün, Güneydoğu Anadolu

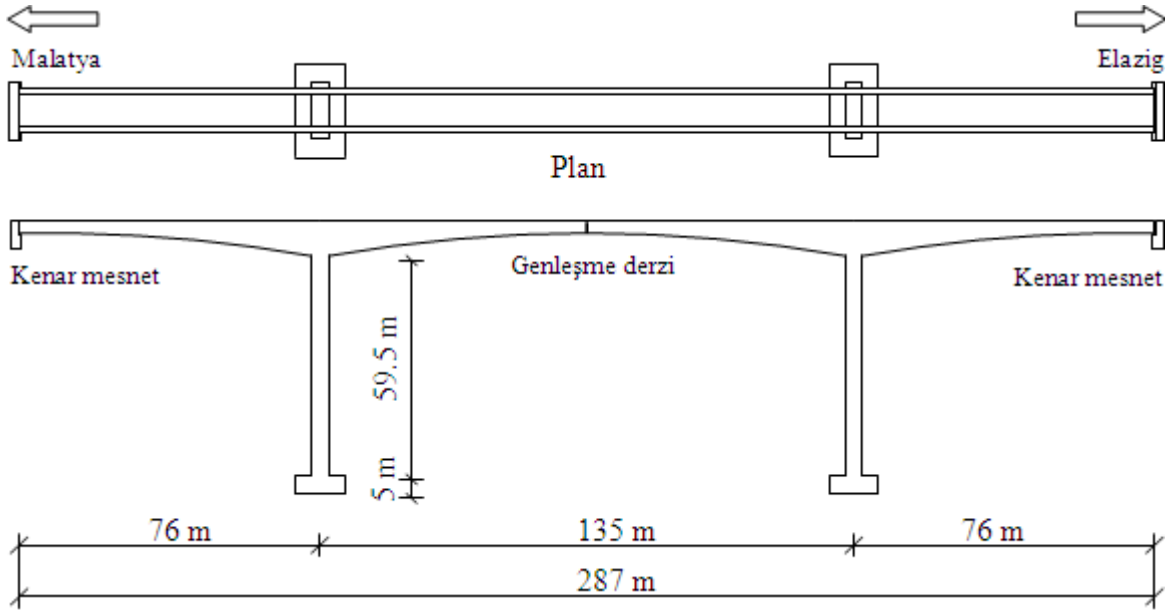
Projesi (GAP) kapsamında inşa edilmiş olan Karakaya Baraj Gölünün suları altında kalacağı öngörüldüğü için, boğaza yeni bir köprünün yapılması gerekmiştir.

Bu amaçla köprünün hemen yanına 1983–1986 yılları arasında bir yenisi inşa edilmiştir. Bu yeni yapı Türkiye'nin ilk dengeli konsol yöntemi ile inşa edilmiş köprüsü olma özelliğini taşımaktadır. Kömürhan Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar Şekil 2.1'de verilmektedir. Karakaya Barajı yapıldıktan sonra orijinal Kömürhan Köprüsü suyun altında kalmıştır.



Şekil 2.1. Kömürhan Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar

Kömürhan Köprüsü tek tabliyeye sahip, kutu kesitli ve öngerilmeli betonarme bir köprüdür. Köprü, ana açıklığı 135 m ve kenar açıklıkları 76 m olmak üzere toplam üç açıklıklıdır. Köprü toplam uzunluğu ve genişliği sırasıyla 287 m ve 11.5 m'dir. Köprü'nün inşası sırasında 1340 ton inşaat demiri, 143 ton öngerme kablosu ve 11000 m³ beton kullanılmıştır. Köprü boy kesiti ve eleman boyutlarına ait genel görünüşler Şekil 2,2'de verilmektedir. Köprü taşıyıcı sistemi başlıca tabliye, ayaklar, kenar mesnetler ve orta açıklık genişleme derzinden oluşmaktadır.



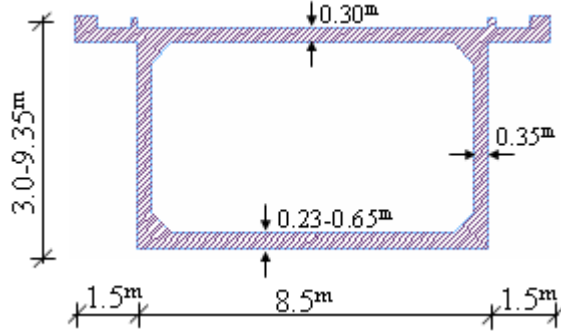
Şekil 2.2. Kömürhan Köprüsü'nün plan, boy kesit ve eleman boyutları

2.2.1.1. Köprü Tabliyesi

Kömürhan Köprüsü, 287 m uzunluğunda ve 11.5 m genişliğinde tek tabliyeye sahiptir. Tabliye üzerinde trafik biri gidiş ve biri de geliş olmak üzere iki şeritten sürdürülmektedir. Köprü'nün üst yapısı dengeli konsol ve öngerilmeli kutu kiriş sistemiyle inşa edilmiştir. Mevcut dengenin muhafazası, orta ayaklarda her iki tarafa doğru aynı zamanda inşa edilen segmentlerin yan yana getirilip, öngerilme ile bağlanmaları sonucu sağlanmıştır.

Tabliye, köprü orta noktasından itibaren Elazığ ve Malatya tarafına doğru 28'er adet olmak üzere toplam 56 adet segmentten oluşmaktadır. Segmentlerin tamamına yakın kısmı 5 m uzunluğundadır. Her bir segment donatılı kutu kesite sahiptir. Donatılı kutu kesitin

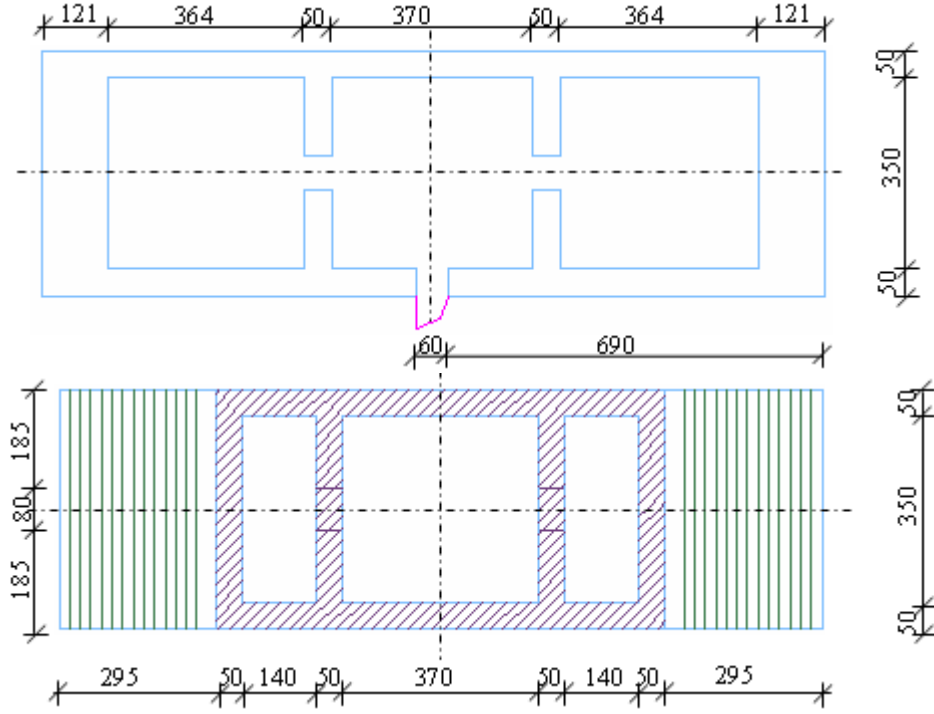
yüksekliği orta ayak üzerinde 9.35 m olmakla beraber, parabolik bir azalım göstererek kenar ayaklarda 3.50 m'ye, ortadaki genişleme derzinde ise 3.00 m'ye inmektedir. Kutu kesitin yan cidarlarının ve üst tabliyesinin kalınlığı tabliye uzunluğu boyunca sabit olup sırasıyla 0.35 m ve 0.30 m'dir. Alt tabliye kalınlığı ise kenar ayaklardan orta ayaklara kadar 0.23 m'den 0.65 m'ye kadar parabolik olarak artmaktadır. Değişken kutu kesitin şematik olarak gösterimi Şekil 2.3'te verilmektedir.



Şekil 2.3. Değişken kesitli tabliye üst yapısı

2.2.1.2. Köprü Ayakları ve Kenar Mesnetler

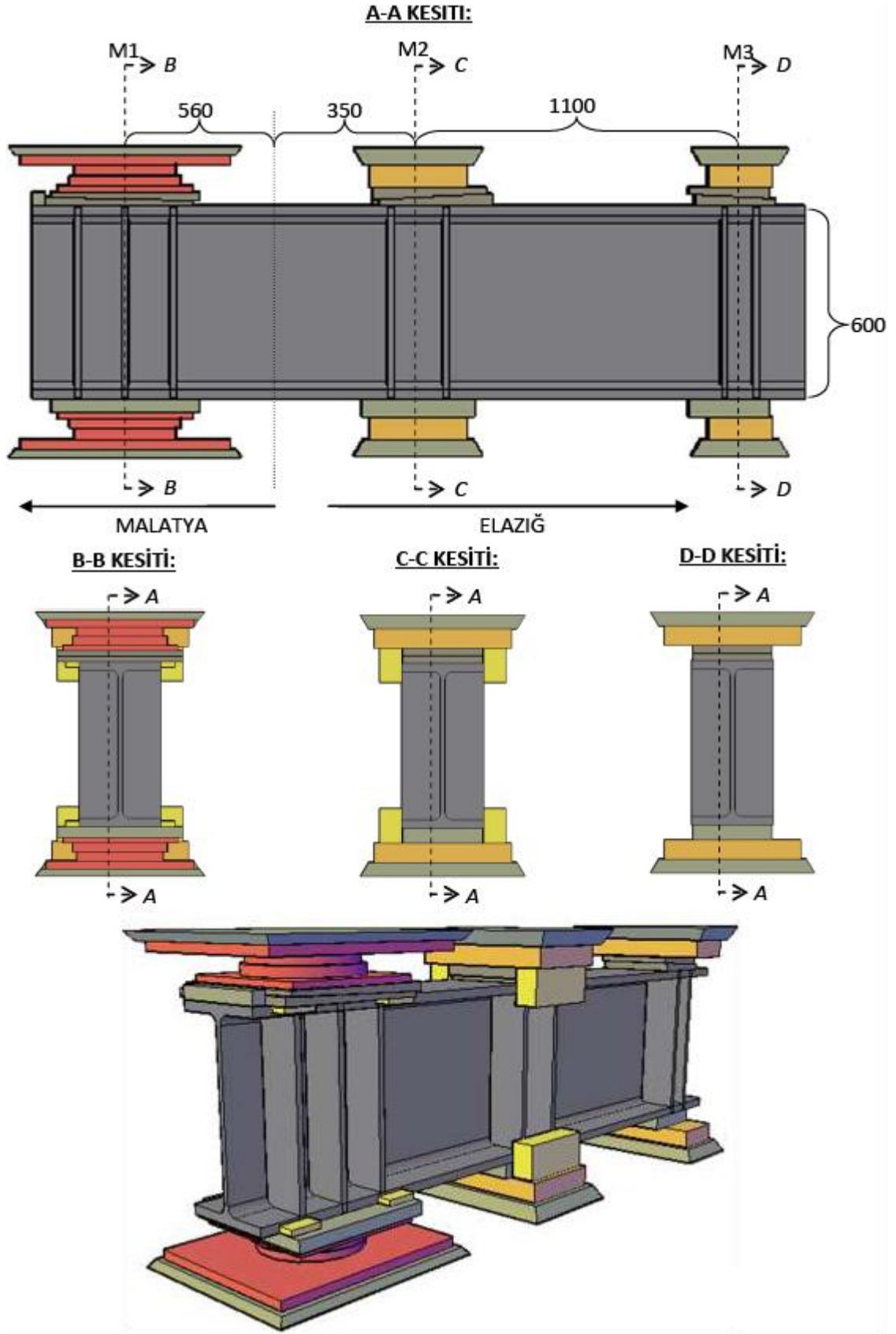
Kömürhan Köprüsü'nün Elazığ taraf kenar ayağı 60 adet 25 m boyunda, Malatya tarafı kenar ayağı ise 60 adet 40 m boyunda Ø 36'lık ankraj çubukları ile kayaya ankre edilmiştir. Ayrıca, köprü üstyapısını kenar ayak perdesine bağlamak amacıyla her bir ayakta 40 adet olmak üzere S420 kalitesinde Ø50 çapında çekme çubukları kullanılmıştır. Bu çubuklar Malatya kenar ayağı tarafında 3.7 m, Elazığ tarafında ise 4.7 m uzunluğundadır. Her biri 59.50 m yüksekliğinde olan orta ayaklar 3 gözlü değişken kesitten oluşmaktadırlar. Kesit genişliği alt tarafta 14.40 m olmakla beraber, lineer şekilde azalarak üstte 8.50 m'ye düşmektedir. Hidrostatik dengenin korunması için ayak çeper ve göz duvarlarında su geçişine imkân veren boşluklar bırakılmıştır. Kömürhan Köprüsü'nün orta ayak temelleri 24x13.5 m² kesit alanına ve 5 m derinliğe sahip demirli kütle betondur. Değişken ayak kesitine ait görünüşler Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4. Değişken kesitli köprü orta ayaklarına ait kesit görünüşleri (ölçüler cm'dir)

2.2.1.3. Orta Açıklık Mafsal Düzenegi

Kömürhan Köprüsü'nün orta açıklığında, üstyapı orta açıklık konsollarını birbirine bağlamak amacı ile kutu kesitin içinde çelik kirişlerden oluşan ve moment aktarmayan mafsal şeklinde tasarlanan bir düzenek oluşturulmuştur. Bu şekilde, orta açıklıktaki konsol uçları serbest bırakılmış ve ısı değişimi sebebiyle üstyapıda oluşacak genleşmelere izin verilmiştir. Ayrıca, iki uç arasında bir bağlantı oluşturularak düşey yükler altında üstyapının ortak hareket etmesini sağlanmıştır. Orta açıklık mafsal düzenegi iki adet IPB 600 kesitli çelik kirişten oluşmaktadır. Her bir kiriş Elazığ tarafında üstte ve altta ikişer adet sabit mesnetle, Malatya tarafında ise yine üstte ve altta birer adet düşey yük kapasiteli, enine ve boyuna yönde kayıcı mesnet ile üstyapıya bağlanmıştır. Bu şekilde Elazığ tarafında çelik kirişin dönme ve hareket serbestlikleri engellenerek tam ankastre bir bağlantı oluşturulmuştur. Malatya tarafındaki mesnetlerde ise dönmelere ve yatay yöndeki hareketlere izin verilmiş ve bu kısmın mafsal olarak hareket etmesi sağlamıştır. Ayrıca, enine doğrultudaki hareketi kenar takozlar ile engellenmiştir. Şekil 2.5'te orta açıklık mafsal düzeneginin şematik görünüşü, Şekil 2.6'da ise orta açıklık mafsal düzenegine ait bazı fotoğraflar verilmektedir.



Şekil 2.5. Orta açıklık genişleme derzindeki mafsalsı düzeneği (ölçüler mm'dir).



a) Tabliye birleşim bölgesinden görüşler



b) Kutu kesit içerisinde görünüşler

Şekil 2.6. Orta açıklık genişleme derzindeki mafsal düzeneğine ait bazı fotoğraflar

2.3. Kömürhan Köprüsü'nün Statik Davranışının Belirlenmesi

Kömürhan Köprüsü'nün statik davranışını analitik olarak belirlemek için köprü'nün iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri SAP2000 (2008) programında oluşturulmuştur. Kömürhan Köprüsü'nün iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri, aşağıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulmuştur.

- Köprü tabliyesi ve ayaklar altı serbestlik derecesine sahip çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. İki boyutlu modelde değişken yükseklikli üstyapı segmentlerinin ve ayakların her biri ortalama kesit özellikleri dikkate alınarak modele katılırken, üç boyutlu modellemede ise değişken kesitli elemanlar direk olarak tanımlanmıştır.
- İki boyutlu modelde tüm elemanlar kendi geometrik merkezlerinden geçirilmiş ve ara bağlantılar rijit çubuk elemanlar yardımı ile sağlanmıştır. Üç boyutlu modelde ise direk değişken kesitli eleman tipleri kullanılmıştır. Her bir orta ayak 50 adet sonlu

elemana bölünmüş olup, üstyapı segmentleri ise 0.5m uzunluğunda parçalara ayrılmıştır.

- Ardgerme kabloları moment aktarmayan çubuk elemanlar kullanılarak simüle edilmiştir ve üstyapı segment uçlarına proje verilerinde belirtilen düşey lokasyonlarında bağlanmıştır. Ardgerme yükleri birim uzamalar cinsinden etki ettirilmiştir.
- Kenar ayak mesnetleri yüksek rijitliklere sahip yaylarla tanımlanmıştır. Bu şekilde kenar ayakların düşey serbestlikleri tamamen tutulmuş, fakat diğer iki doğrultudaki hareketler yarı tutulu olacak şekilde temsil edilerek dönmelere izin verilmiştir.
- Orta açıklık genişleme derzindeki mafsal düzeneği yay eleman ile simüle edilmiştir. Yay elemanı boyuna yönde serbest olup, enine ve düşey hareketi yüksek rijitliğe sahip olacak şekilde modellenmiştir.

Kömürhan Köprüsü'nün statik davranışının belirlenmesi için yapı-zemin etkileşimini içeren farklı dört sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Modellemelerde dikkate alınan temel 24x12.5 m kesit alanına ve 5 m yüksekliğe sahiptir. Yapı-zemin etkileşimi ayakların oturduğu temele atanan yay elemanlarla simüle edilmiştir. Bu elemanların bazı özellikleri Tablo 2.1'de verilmektedir.

- Model 1: Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmamıştır. Köprü ayaklarında mesnet şartı olarak ankastre mesnet dikkate alınmıştır.
- Model 2: Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmıştır. Köprü ayaklarının oturduğu zemin sert zemin olarak dikkate alınmıştır.
- Model 3: Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmıştır. Köprü ayaklarının oturduğu zemin orta zemin olarak dikkate alınmıştır.
- Model 4: Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmıştır. Köprü ayaklarının oturduğu zemin yumuşak zemin olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 2.1. Temel zeminine ait özellikler

Sonlu Eleman Modeli	Sertlik Derecesi	Yay Tipi	Yatak Katsayısı (kN/m ³)
1	Sert	Basit	100.000
2	Orta	Basit	50.000
3	Yumuşak	Basit	20.000

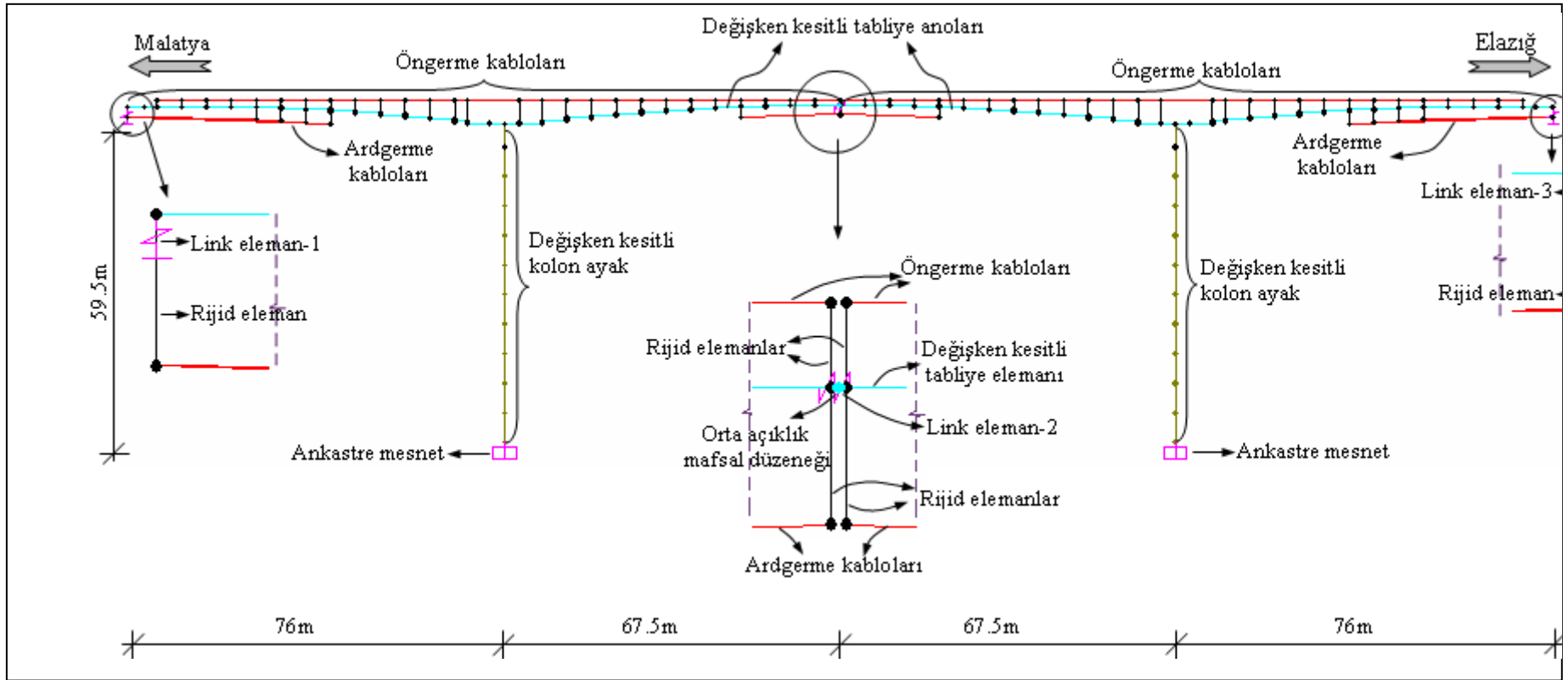
Kömürhan Köprüsü'nün modellenmesi sırasında dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.2'de verilmektedir. Kömürhan Köprüsü'nün yukarıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulan iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri Şekil 2.7-2.9'da verilmektedir.

Tablo 2.2. Kömürhan Köprüsü'nün analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri

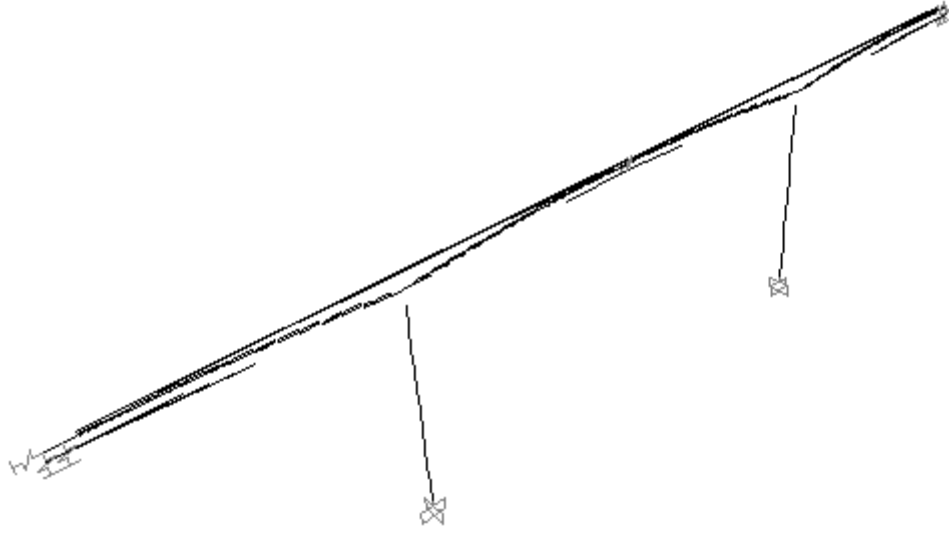
Eleman	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Tabliye	3.75E10	0.2	2500
Ayaklar	3.75E10	0.2	2500
Öngerme Elemanları	1.95E11	-	-
Rijit Elemanlar	1.00E15	0.3	-

Köprünün sonlu eleman analizlerinde aşağıda belirtilen yükleme durumları dikkate alınmıştır:

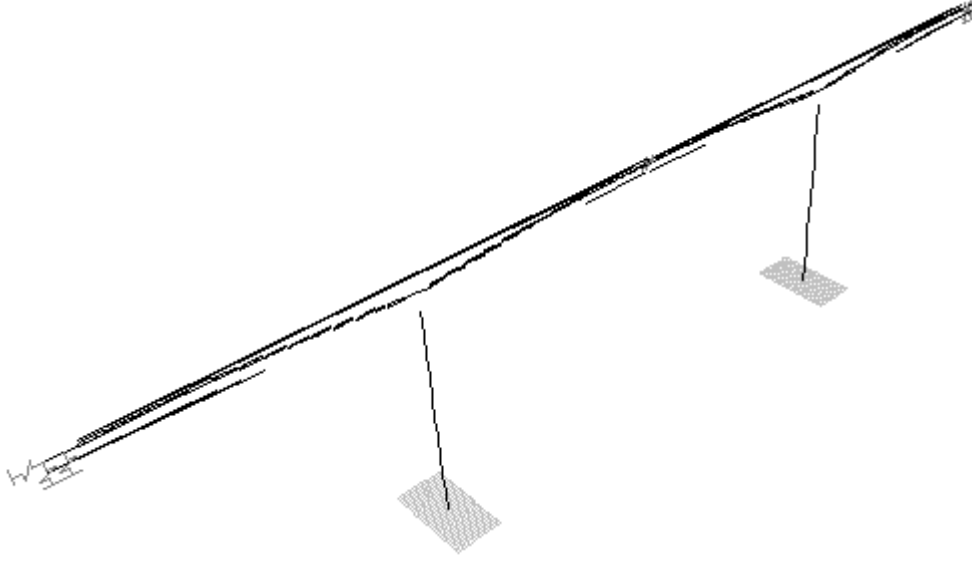
- Sabit Yük: Tüm elemanların kendi ağırlıklarıdır ve program tarafından direk olarak hesap edilmektedir.
- İlave Sabit Yükler: Asfalt, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek olarak etki eden ağırlıklardır 10 cm'lik asfalt dikkate alınarak ve gerekli şartnameler göz önünde bulundurularak her bir segment için yaylı yük şeklinde 40 kN/m olarak etki ettirilmiştir..



Şekil 2.7. Kömürhan Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli ve eleman birleşim detayları

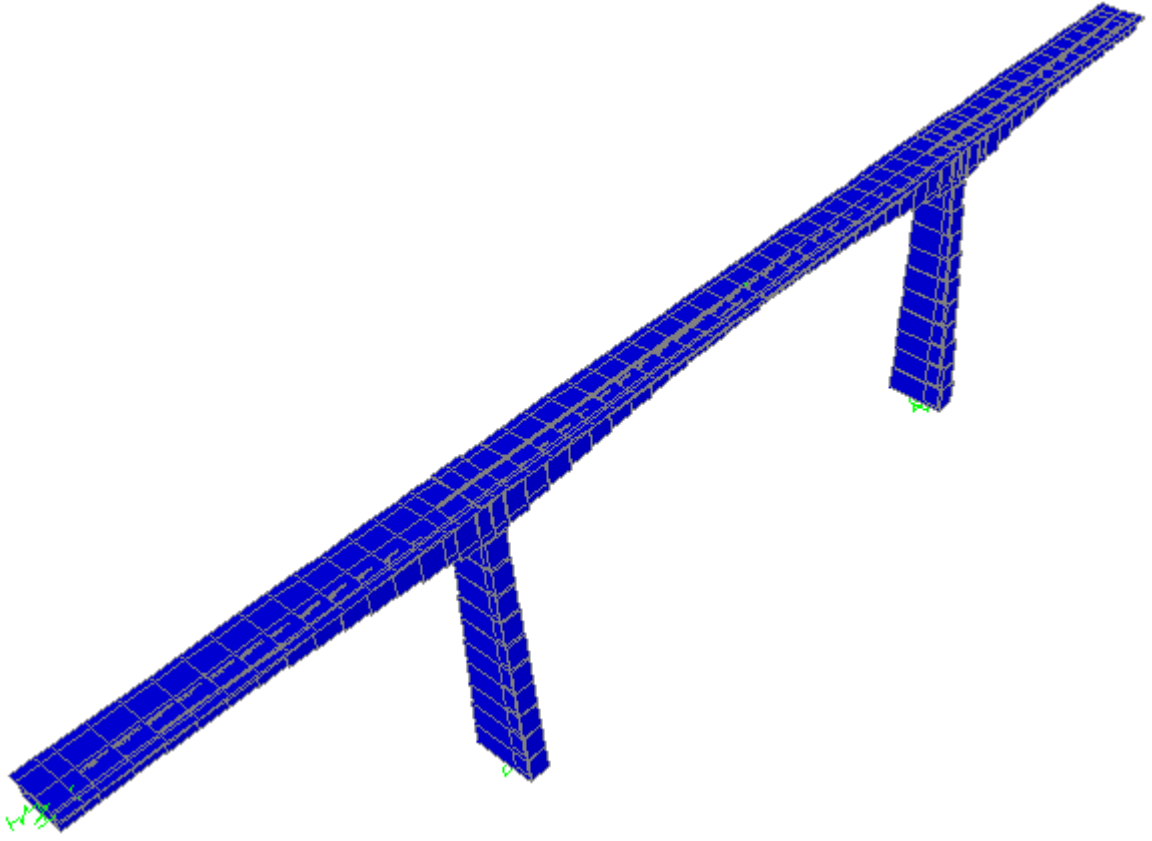


a) Ankastre mesnet durumu için

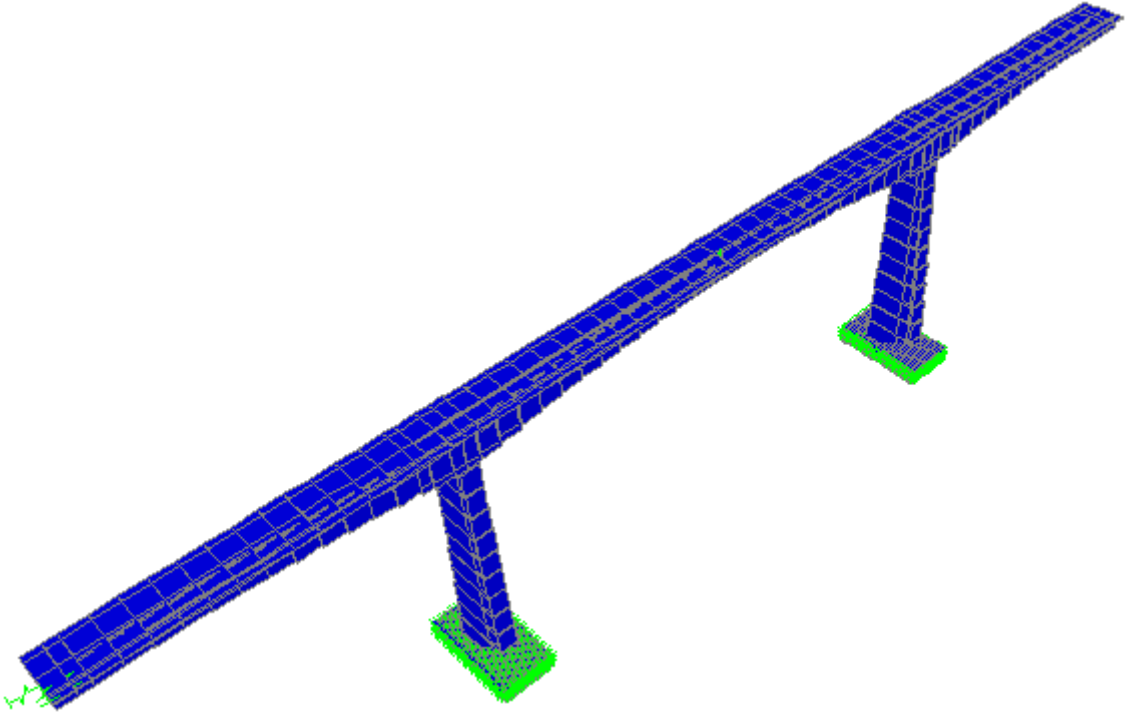


b) Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınması durumu için

Şekil 2.8. Kömürhan Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modelleri



a) Ankastre mesnet durumu için

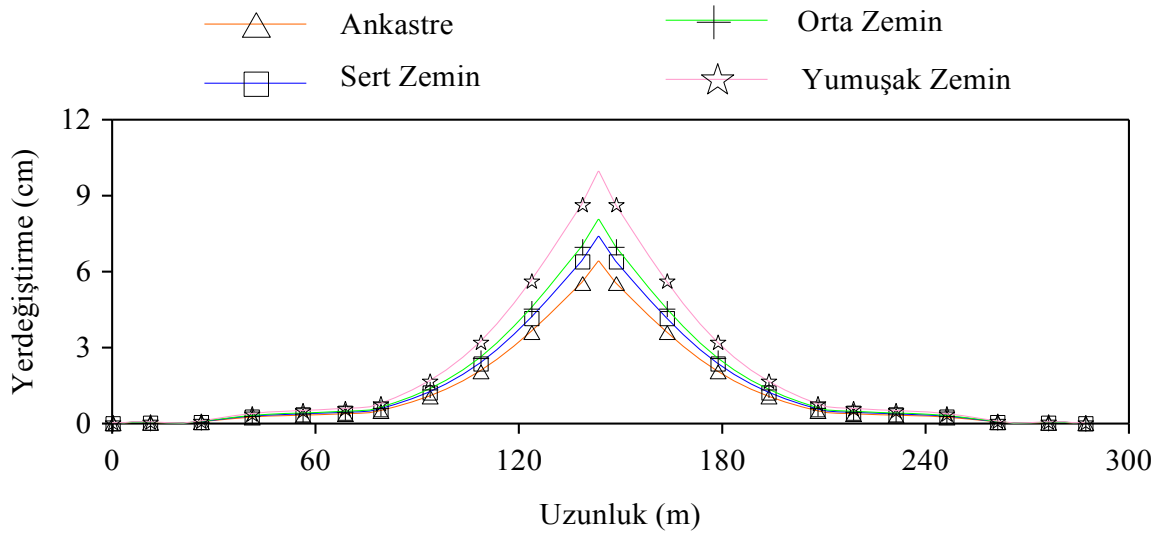


b) Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınması durumu için

Şekil 2.9. Kömürhan Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modelleri

2.3.1. Tabliye Davranışı

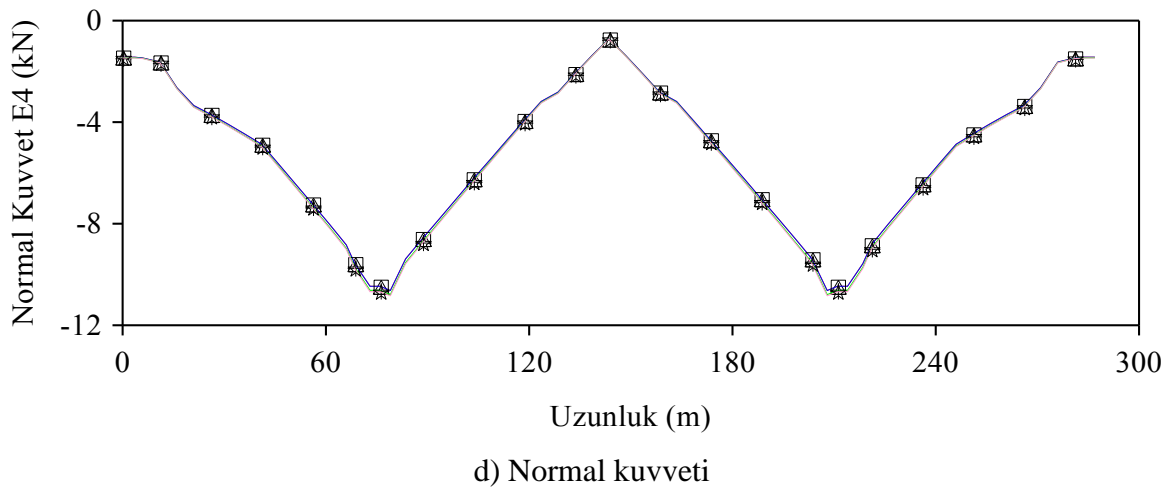
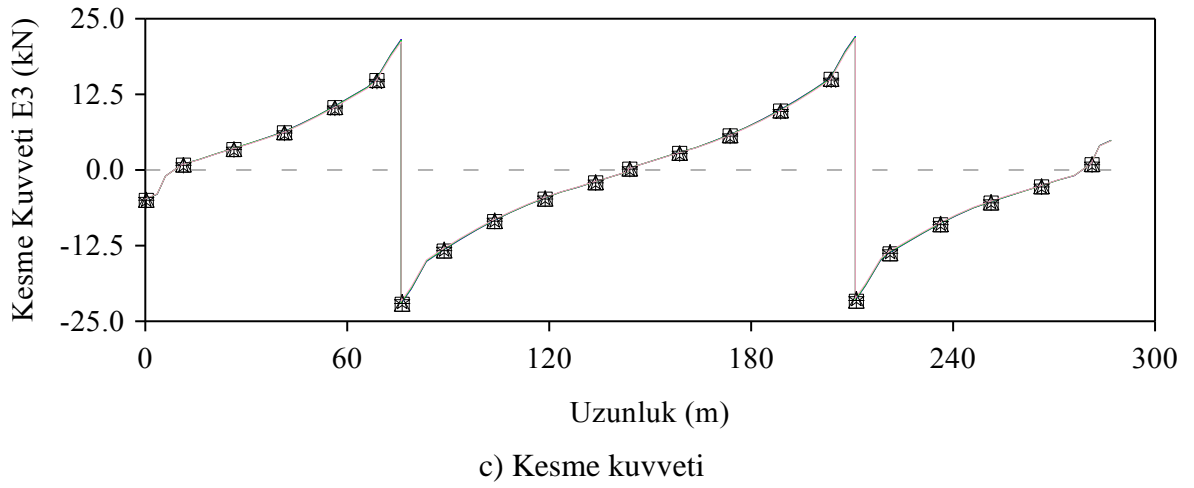
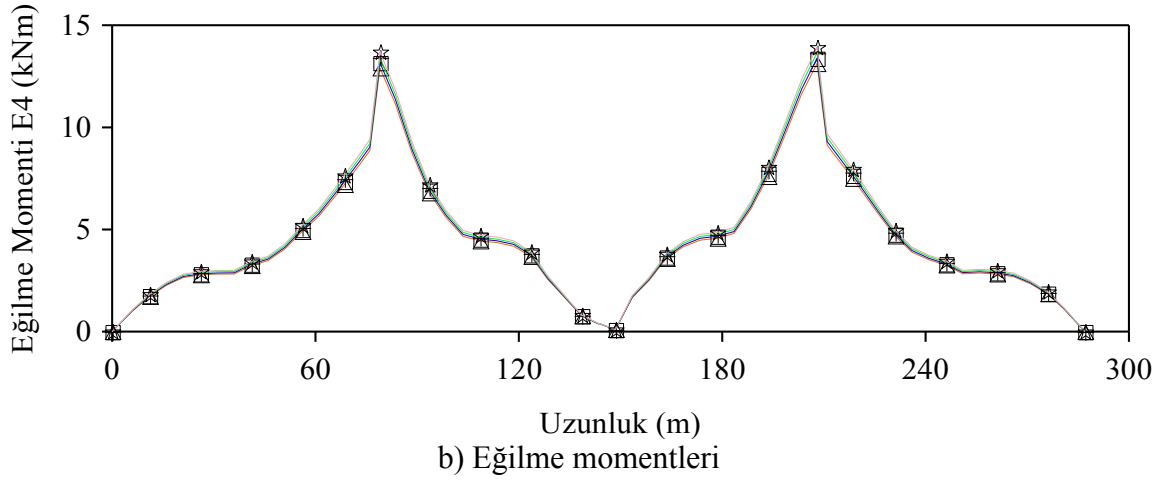
Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizler sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin, eğilme momentlerinin, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi Şekil 2.10'da verilmektedir. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi yerdeğiştirmeler köprü açıklık ortasına doğru artmakta, eğilme momenti ile kesme kuvveti ve normal kuvvet değerleri ise ayaklar üzerinde maksimum değere sahip olup köprü açıklık ortasında minimum değere ulaşmaktadır. Tabliye boyunca elde edilen yerdeğiştirmeler incelendiğinde en büyük yerdeğiştirmelerin yumuşak zemin durumunda, en küçük yerdeğiştirmelerin ise ankastre mesnet durumunda elde edildiği görülmüştür. Değişen zemin durumları için eğilme momenti, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerlerinde çok fazla bir değişiklik olmamıştır.



a) Yerdeğiştirmeler

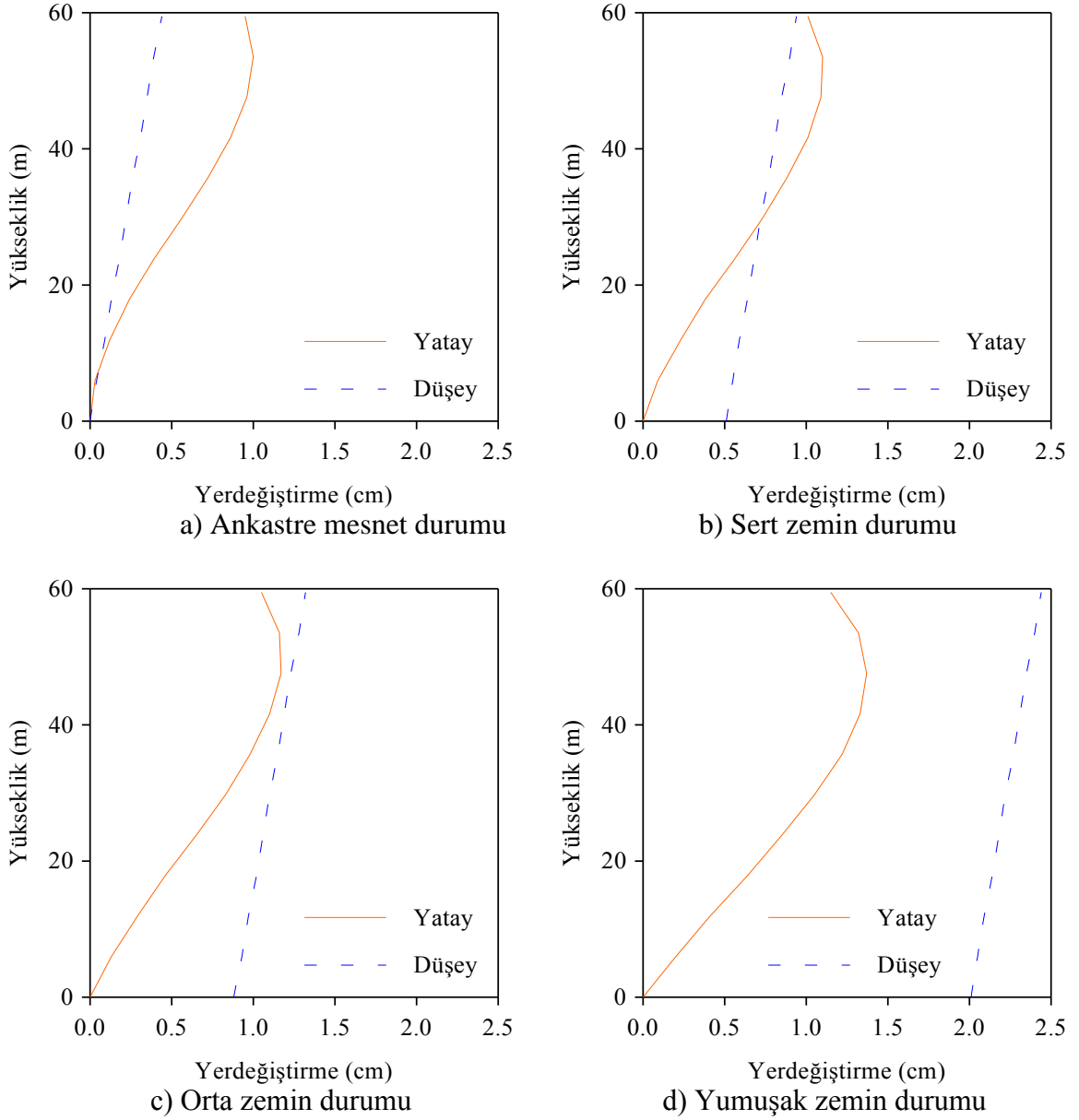
Şekil 2.10. Kömürhan Köprüsü'nün statik analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin, eğilme momentlerinin, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi

Şekil 2.10'un devamı



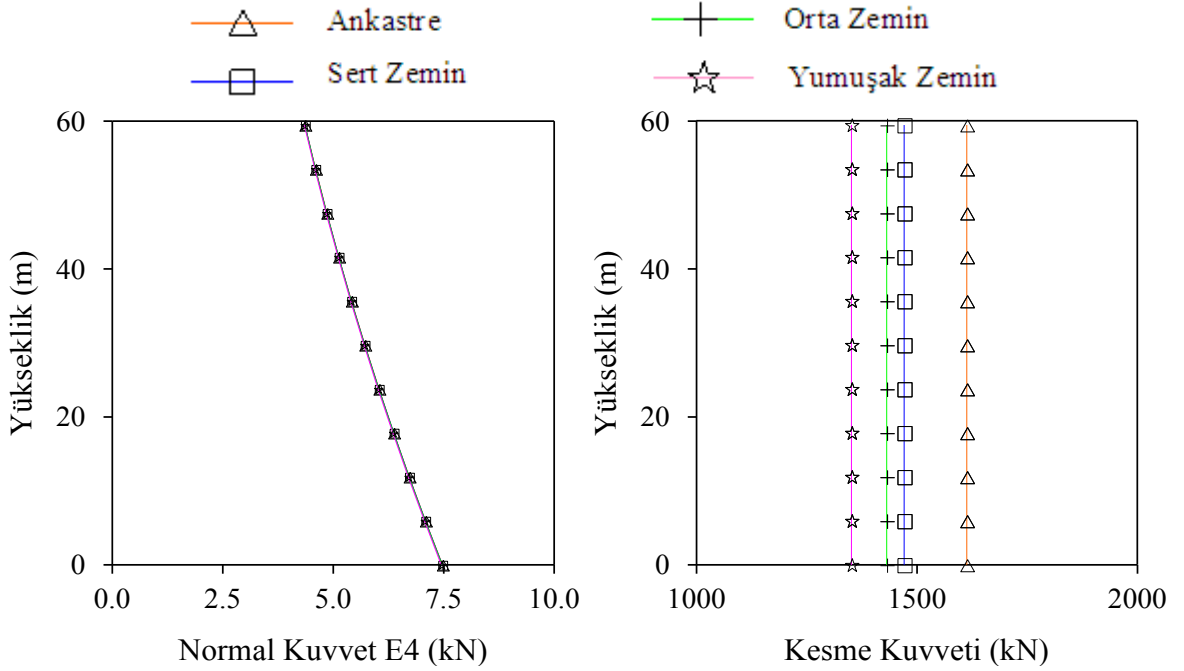
2.3.2. Köprü Ayaklarının Davranışı

Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen yatay ve düşey yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi Şekil 2.11'de verilmiştir. Şekil 2.11 incelendiğinde, yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca arttığı ve maksimum yerdeğiştirmenin yumuşak zemin durumu için ayak uç noktasında 2.44 cm olarak elde edildiği görülmektedir.



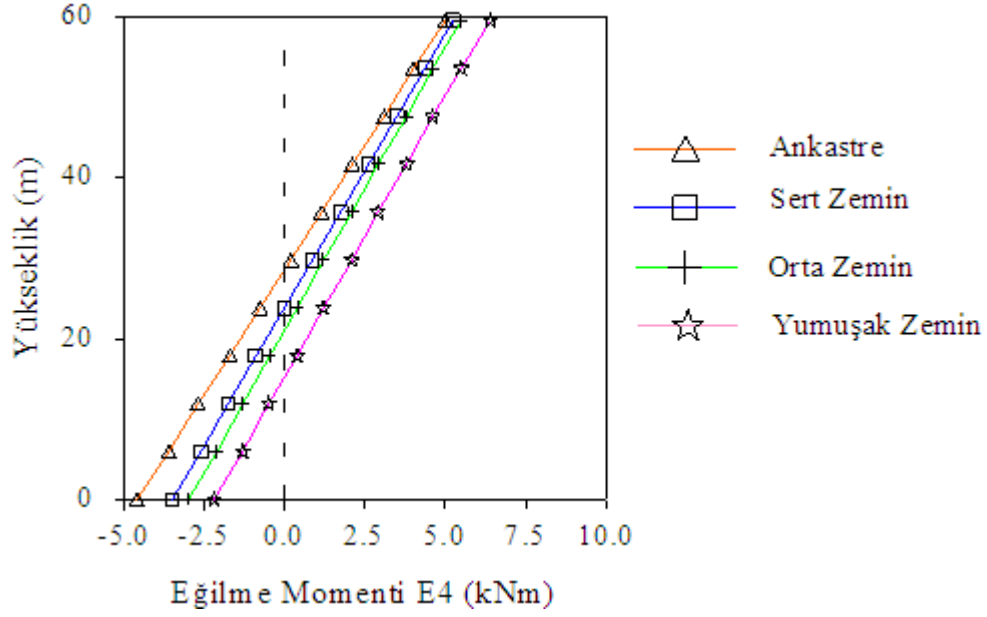
Şekil 2.11. Kömürhan Köprüsü'nn farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen yatay ve düşey yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi

Ayak yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri Şekil 2.12’de verilmektedir. Şekil 2.12 incelendiğinde, ayak yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin ise hemen hemen aynı kaldığı görülmektedir. Farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizler sonucunda normal kuvvet değerlerinin değişmediği, kesme kuvveti değerlerinin ise ankastre mesnet durumu için maksimum değeri aldığı sert, orta ve yumuşak zemin sınıfları için ise bir azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.



Şekil 2.12. Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi

Ayak yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri Şekil 2.13'te verilmektedir. Şekil 2.13 incelendiğinde, ayak yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin değişim gösterdiği, ayak ortasına doğru eğilme momenti değerlerinin yön değiştirdiği görülmektedir. Ayrıca, farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizler sonucunda eğilme momenti değerlerinin ankastre mesnet durumu için minimum değeri aldığı sert, orta ve yumuşak zemin sınıfları için ise bir artma eğiliminde olduğu görülmektedir.



Şekil 2.13. Kömürhan Köprüsü'nün statik analizleri sonucunda elde edilen eğilme momentlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi

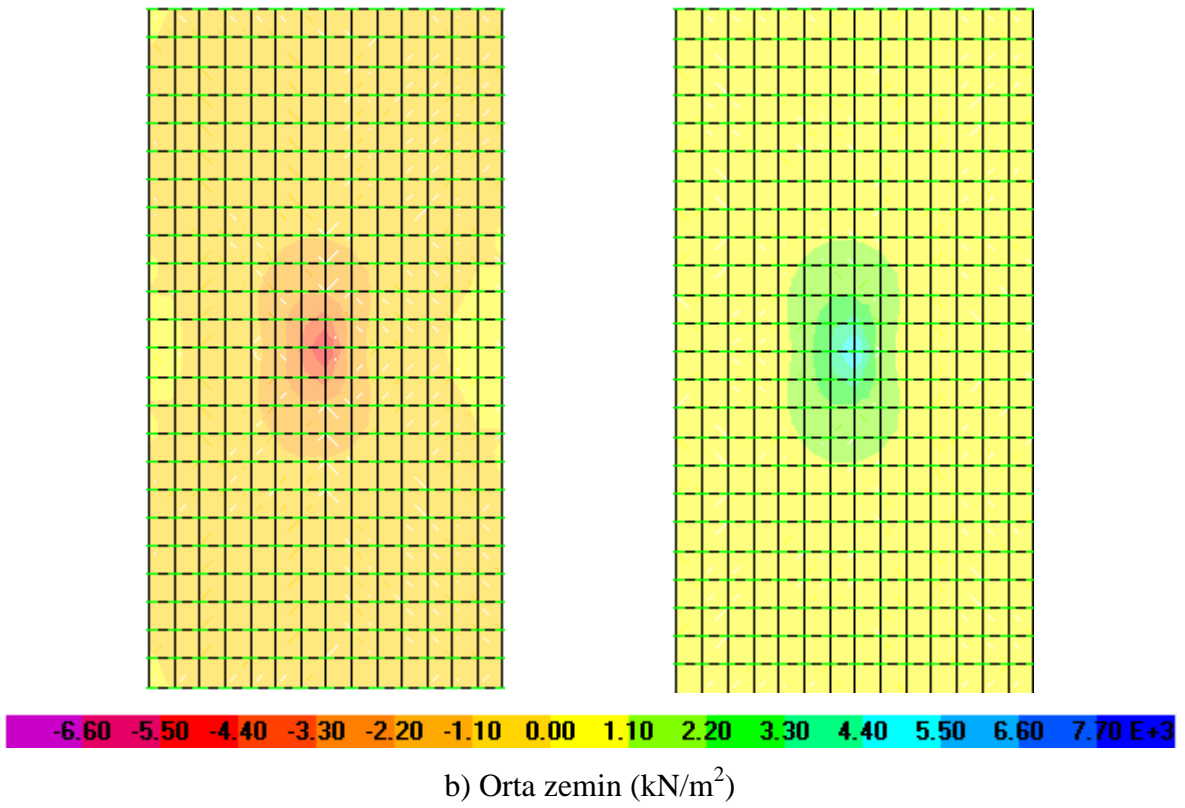
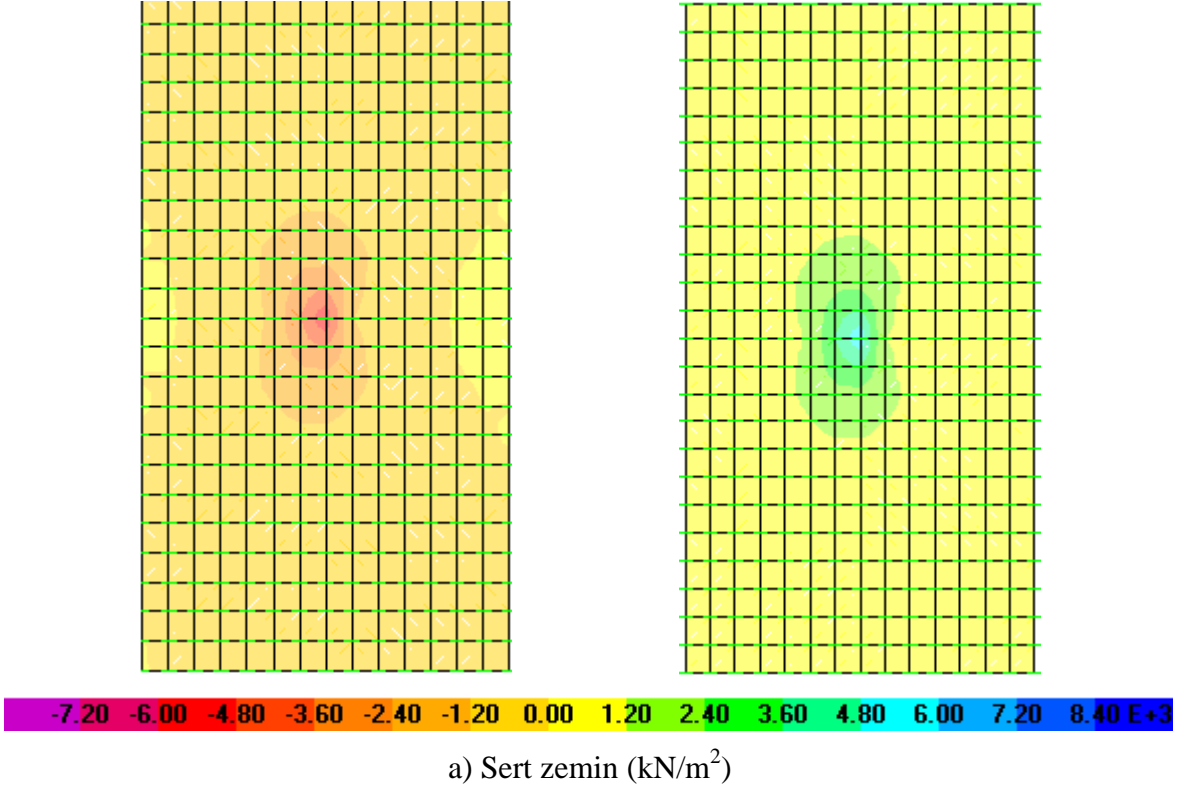
2.3.3. Temel Davranışı

Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda temelde elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeler Tablo 2.3'te verilmektedir. Tablo 2.3'ten de görüldüğü gibi sert zeminden yumuşak zemine doğru temelde elde edilen düşey yerdeğiştirmeler 5.1mm'den 20.1mm'ye kadar artmaktadır.

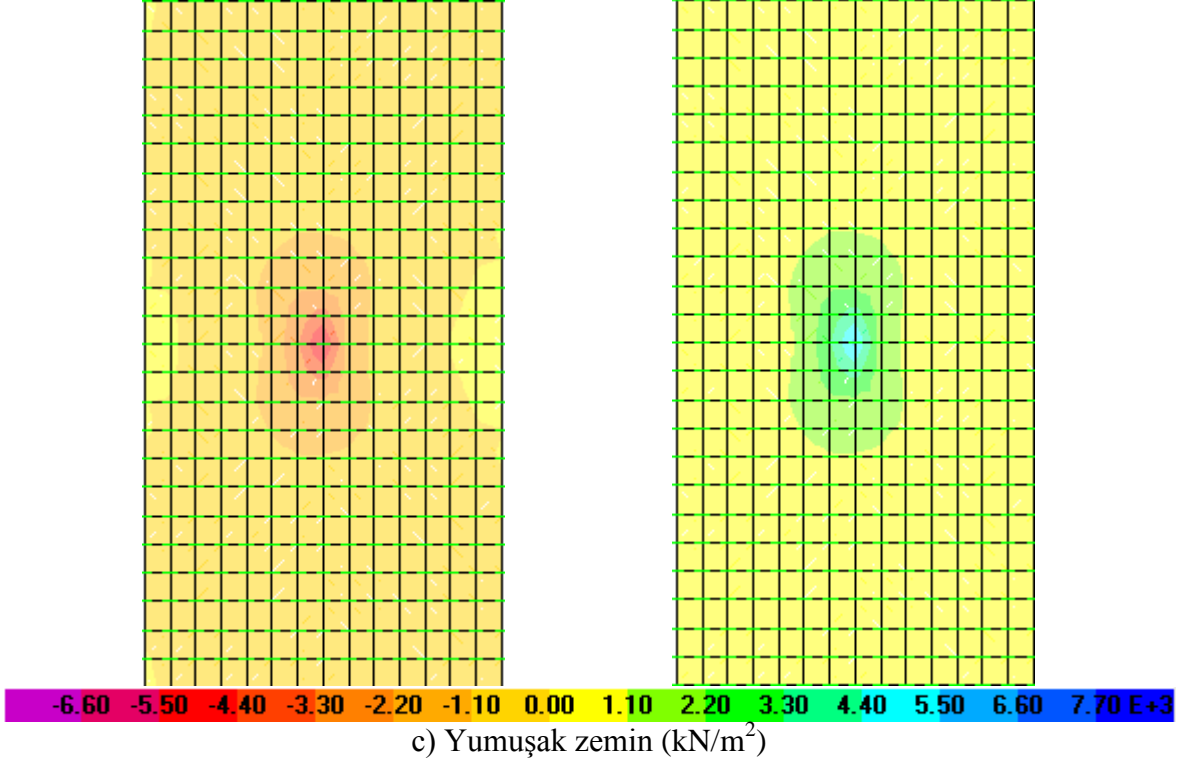
Analizler sonucunda temelde elde edilen maksimum ve minimum gerilmelerin oluştuğu andaki kontor diyagramları Şekil 2.14'te verilmektedir. Şekil 2.14'ten görüldüğü gibi maksimum ve minimum gerilmeler sert zeminde en büyük değeri alırken, orta ve yumuşak zemin türleri için azalmaktadır. Bütün zemin sınıfları için maksimum ve minimum gerilmeler kolon alt uç noktasında elde edilmiştir.

Tablo 2.3. Analizler sonrasında temelde edilen maksimum düşey yerdeğiştirme değerleri

Zemin Türü	Ankastre	Sert	Orta	Yumuşak
Yerdeğiştirmeler (mm)	0	5.1	8.8	20.1



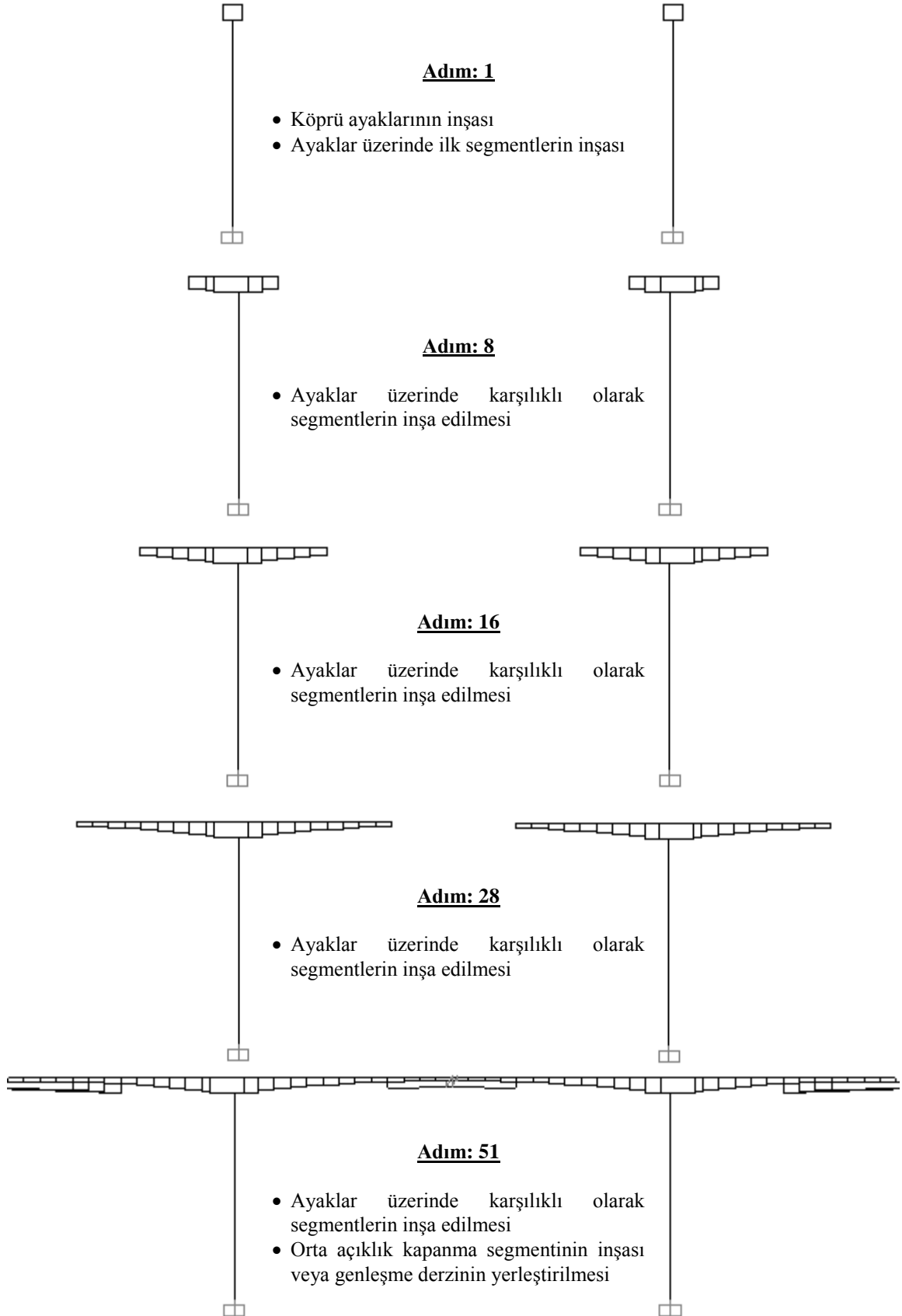
Şekil 2.14. Kömürhan Köprüsü'nün statik analizleri sonucunda elde edilen maksimum ve minimum gerilmelerin olduğu andaki kontur diyagramları



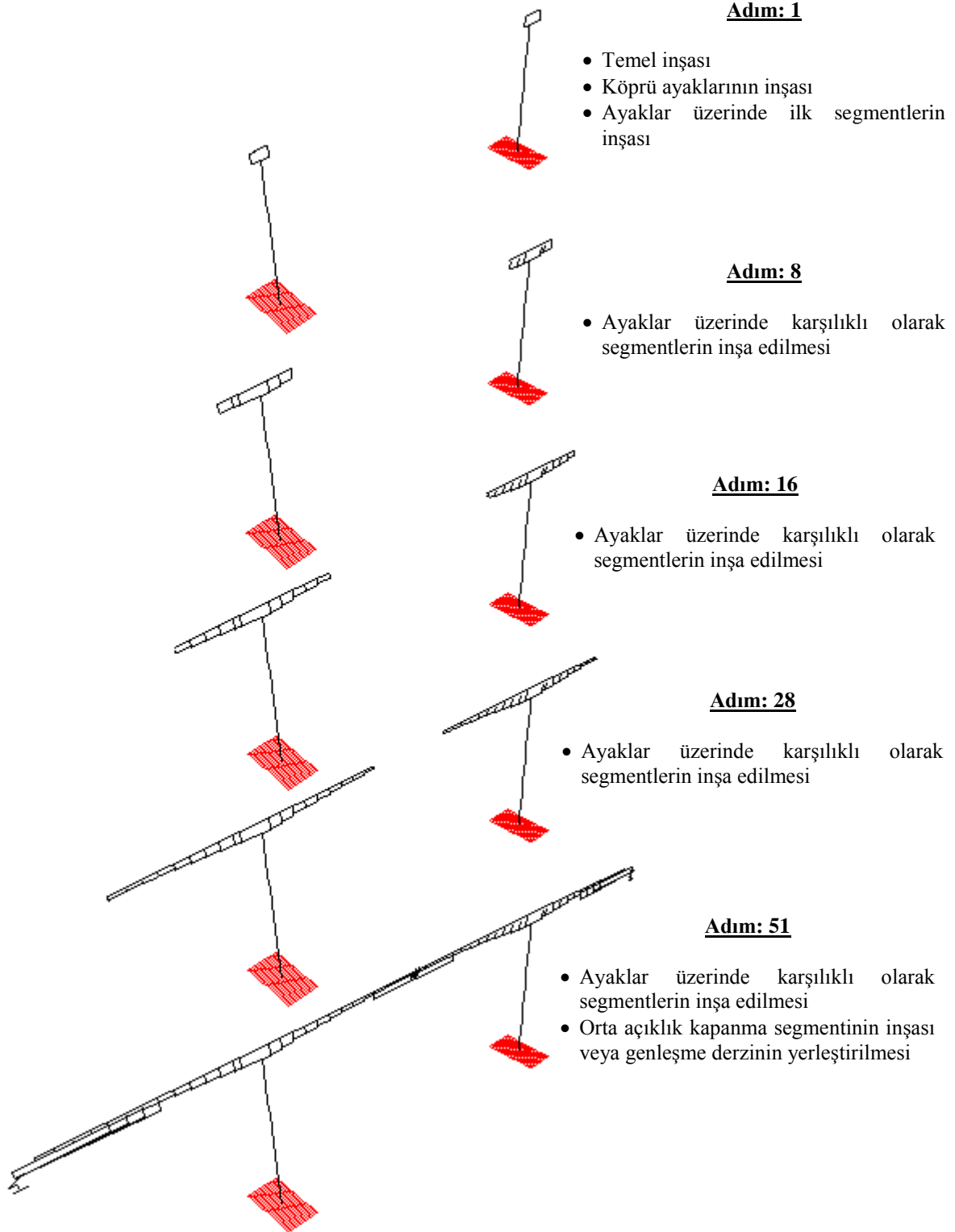
2.4. Kömürhan Köprüsü'nün Yapısal Davranışına Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Etkisinin Belirlenmesi

Kömürhan Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının etkisini belirlemek amacıyla köprünün sonlu eleman modeli proje hesap raporları dikkate alınarak toplam 51 adımda oluşturulmuştur. Modellemeler sırasında toplam adım sayısı ve maksimum iterasyon sayısı sırasıyla 200 ve 50 olarak dikkate alınmıştır. Kömürhan Köprüsü'nün çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli Şekil 2.15-2.16'da verilmektedir. Kömürhan Köprüsü'nün yapısal davranışına zamana bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla yapım aşamalı sonlu eleman modelinde beton malzemesi için elastisite modülündeki değişimler, rötre ve sünme etkileri, çelik malzemesi için ise çeliğin relaksasyonu dikkate alınmıştır. Çünkü beton ve çelik gibi yapısal malzemelerin bu özellikleri iklim şartlarına bağlı olarak devamlı değişkenlik gösterebilmektedir. Köprünün analizlerinde dikkate alınan malzeme parametreleri Tablo 2.4'te verilmektedir.

Beton ve çelik için zaman bağlı değişen malzeme özellikleri Şekil 2.17-2.19'da verilmektedir. Analizlerde dikkate alınan bu parametreler SAP2000 sonlu eleman programı içerisinde de bulunan CEB-FIP tasarım kodun yardımıyla belirlenmiştir. Köprünün inşasının başlamasından günümüze kadar geçen süre ortalama olarak 10000 gün olarak dikkate alınmıştır.



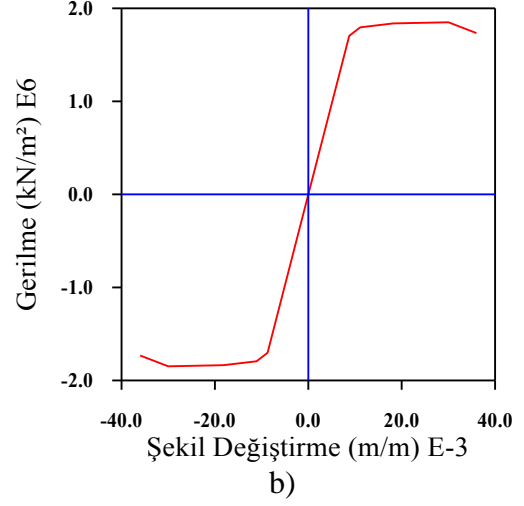
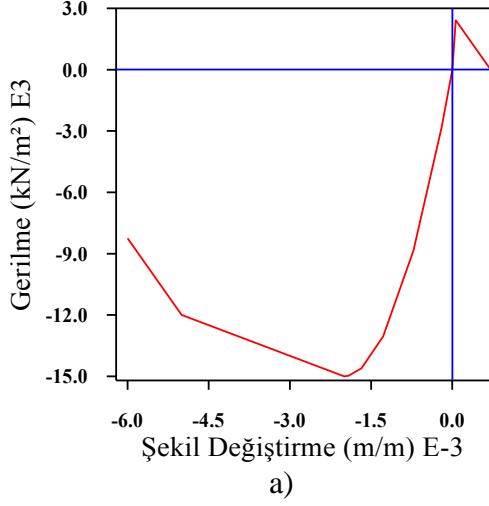
Şekil 2.15. Kömürhan Köprüsü'nün ankastre mesnet durumu için çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli



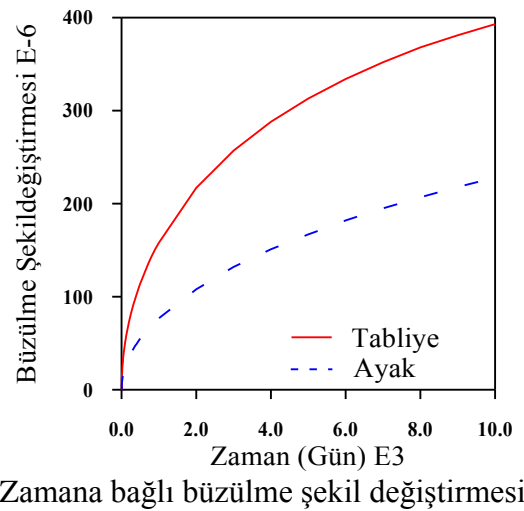
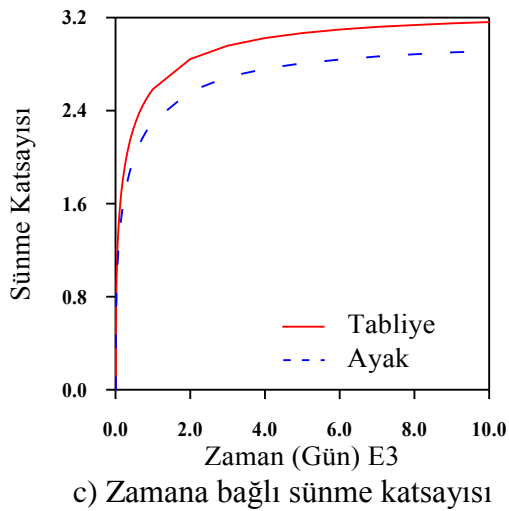
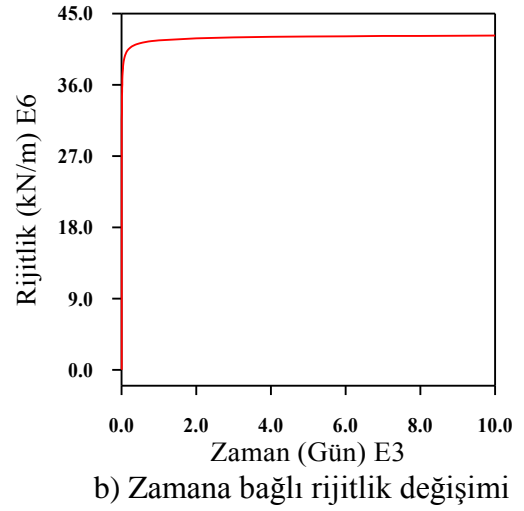
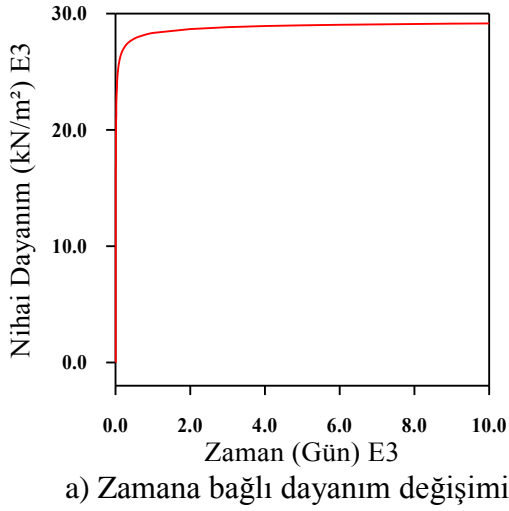
Şekil 2.16. Kömürhan Köprüsü'nün yapı-zemin etkileşimini içeren durumu için çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli

Tablo 2.4. Malzeme deformasyonlarının dikkate alınması için seçilmesi gereken analiz parametreleri

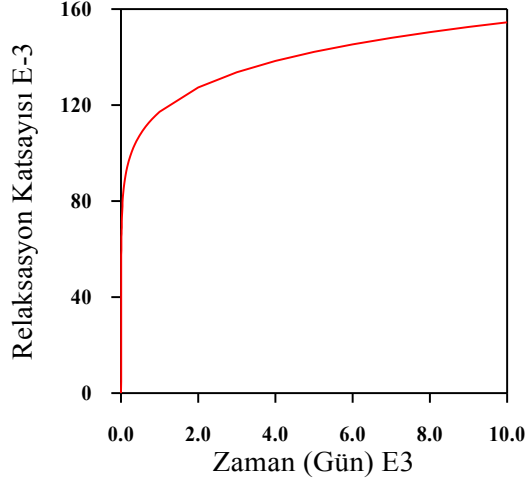
PARAMETRELER		TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARI		
		Tabliye	Ayaklar	Öngerilmeli Çelik
Malzeme Özelliği		Beton	Beton	Tendon
		Isotropik	Isotropik	Tek eksenli
Lineer Olmayan Malzeme Verileri	Histeresis (Gecikme) tipi	Kinematik	Kinematik	Kinematik
	Gerilme-Şekil değ. diyagramı	Kullanıcı Tanımlı	Kullanıcı Tanımlı	Kullanıcı Tanımlı
Zamana Bağlı Özellikler	Elastisite modülü	✓	✓	-
	Sünme	✓	✓	-
	Büzülme	✓	✓	-
	Sünme analiz tipi	Tam	Tam	-
	Beton çimentosu tip katsayısı	0.25	0.25	-
	Bağlı nem	60	60	-
	Sünmeye maruz kesit oranı	0.619	0.619	-
	Büzülme katsayısı	5	5	-
	Büzülme başlangıç zamanı	0	0	-
	Çelik relaksasyonu	-	-	✓
	Relaksasyon analiz tipi	-	-	Tam
	Parametre sınıfı	-	-	1



Şekil 2.17. Beton (a) ve öngerilmeli çelik (b) için kullanılan gerilme-şekil değişirme diyagramları



Şekil 2.18. Beton için zamana bağlı malzeme özelliği değişimleri



Şekil 2.19. Öngerilmeli çelik için zamana bağlı malzeme özelliği değişimi

2.4.1. Analizlerde Dikkate Alınan Yükleme Durumları

Kömürhan Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde aşağıda belirtilen yükleme durumları dikkate alınmıştır:

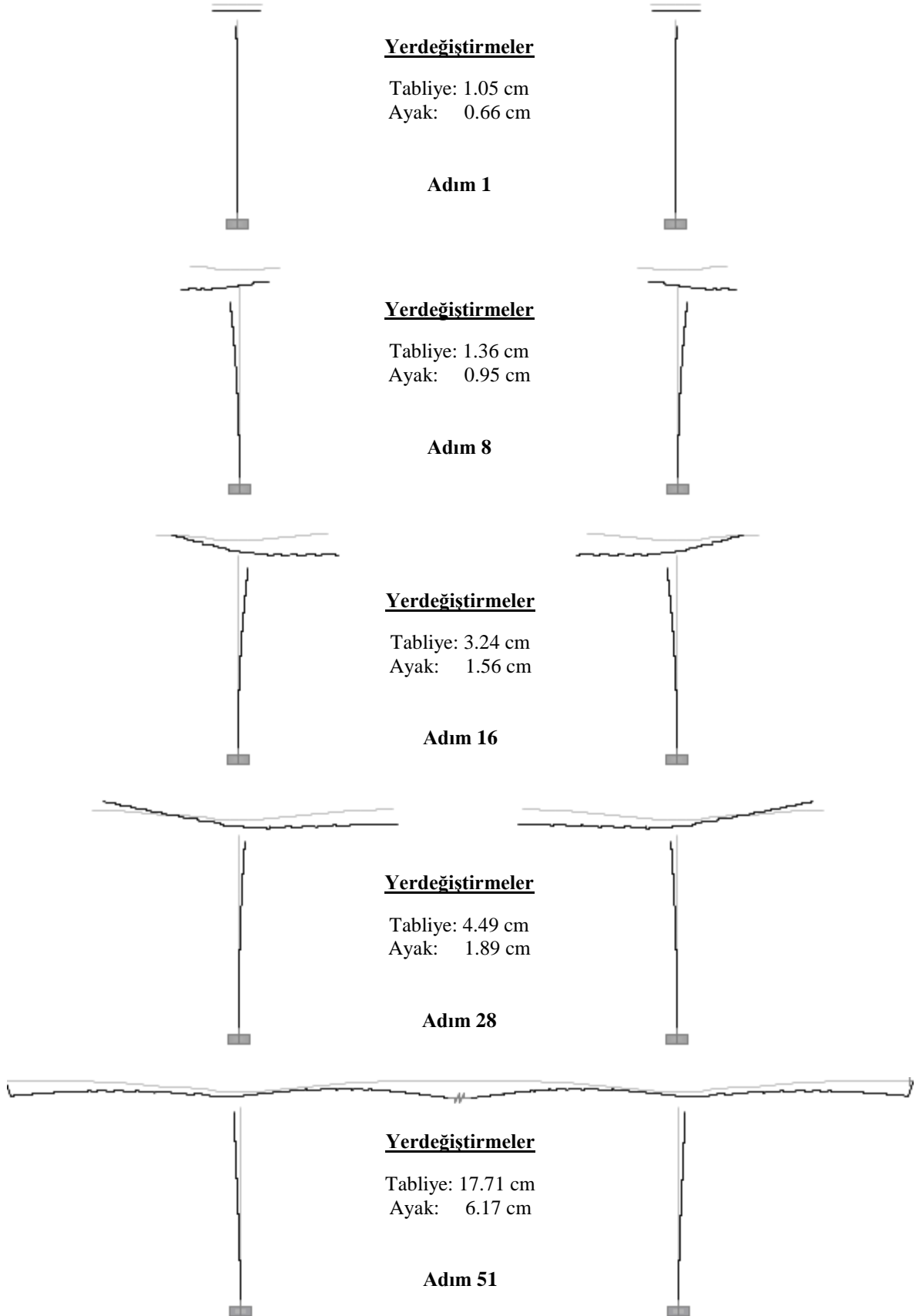
- Sabit Yük: Tüm elemanların kendi ağırlıklarıdır ve program tarafından direk olarak hesap edilmektedir.
- İlave Sabit Yükler: Asfalt, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek olarak etki eden ağırlıklardır 10 cm'lik asfalt dikkate alınarak ve gerekli şartnameler göz önünde bulundurularak her bir segment için yaylı yük şeklinde 40 kN/m olarak etki ettirilmiştir.
- Kalıp Arabası Yüğü: Bir segmentin yapımı öncesinde, önceki segmente uygulanan ve yapım bittiğinde sonraki segmente kaydırılan kalıp arabası yüküdür. Hesap Kontrol Raporunda baz alındığı gibi 600 kN olarak uygulanmaktadır. Hem çift numaralı hem de tek numaralı segmentlerde mevcuttur. Köprü yapımı bittiğinde tamamen iptal edilmektedir.
- Diyafram Yüğü: Köprü kenar ayaklarında ve orta açıklığındaki segment sonu perde duvarlarının ağırlıklarıdır. Hesap Kontrol Raporunda hesaplandığı şekliyle, her kenar ayakta 1117 kN, açıklık ortasında her iki tarafın 26. segmenti sonunda ise 261 kN olarak modele katılmıştır.

- Uzama Yüğü: Kablolara Hesap Kontrol Raporunda belirtilen öngerilme uygulayacak eşdeğer uzama yüküdür.
- Kriko Yüğü: Kenar ayak anoları bağlanmadan önce 27. segment' e uygulanması öngörölmüş olan 500 kN' lık kriko yüküdür. Hesap Kontrol Raporunda bunun yerine başka bir krikosuz alternatif uygulanacağı belirtilmiş olmasına rağmen, bilgi eksikliği yüzünden modelde bu şekli ile bırakılmıştır.
- Sıcaklık Etkisi: İklimsel değışikler nedeniyle oluşabilecek sıcaklık farklılıklarını dikkate alan yükür. Köprünün bulunduğu bölgeye bağılı olarak analizlerde +35C⁰ ile -35C⁰ olarak dikkate alınmıştır.

2.4.2. Yapım Aşamalarına Bağılı Deformasyon Şekilleri

Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile tabliye ve ayaklara ait deformasyon değerleri ankastre mesnet durumu için Şekil 2.20'de verilmektedir. Şekil 2.20'de göröldüğü gibi köprü yapımı ilerledikçe konsol uç noktalarında oluşan düşey deformasyonlar ile ayaklarda oluşan yatay deformasyonlar artmaktadır.

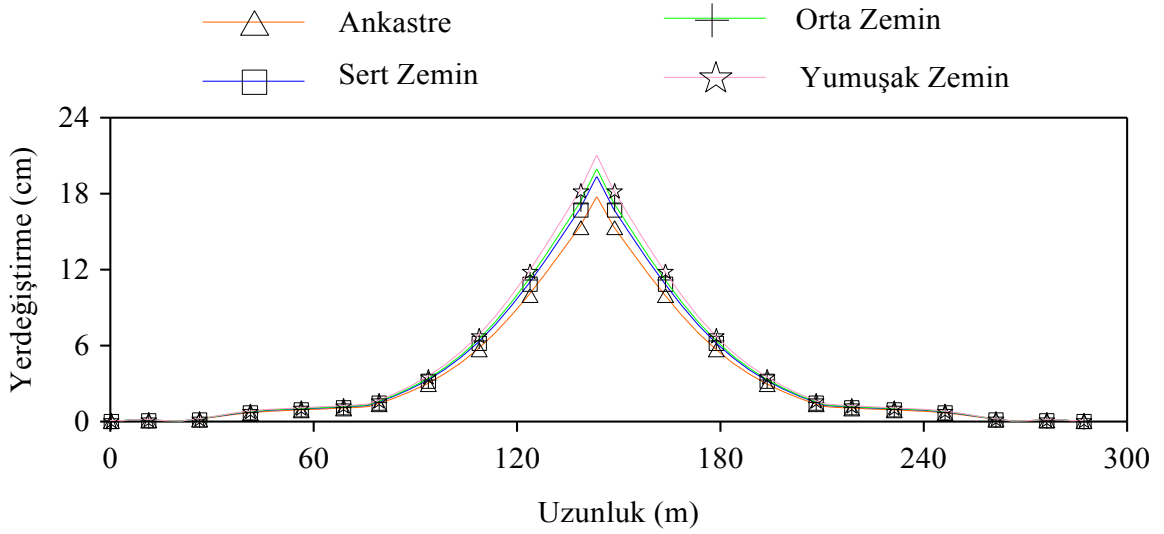
Yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığı analizlerden elde edilen deformasyon şekilleri ankastre mesnet durumuna benzer şekilde (Şekil 2.20) elde edilmiştir. Bu nedenle, sert, orta ve yumuşak zemin durumlarında elde edilen tabliye ortasına ait düşey yerdeğıştirmeler ile ayaklarda oluşan yatay yerdeğıştirmeler şekil halinde verilmemiştir.



Şekil 2.20. Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile tabliye ve ayaklara ait deformasyon değerleri

2.4.3. Köprü Tabliyesinin Davranışı

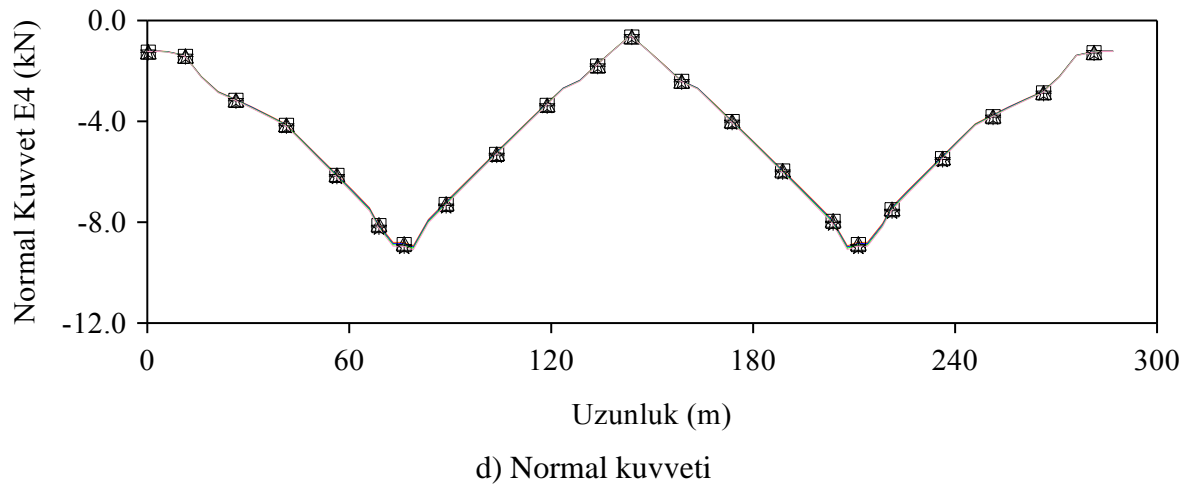
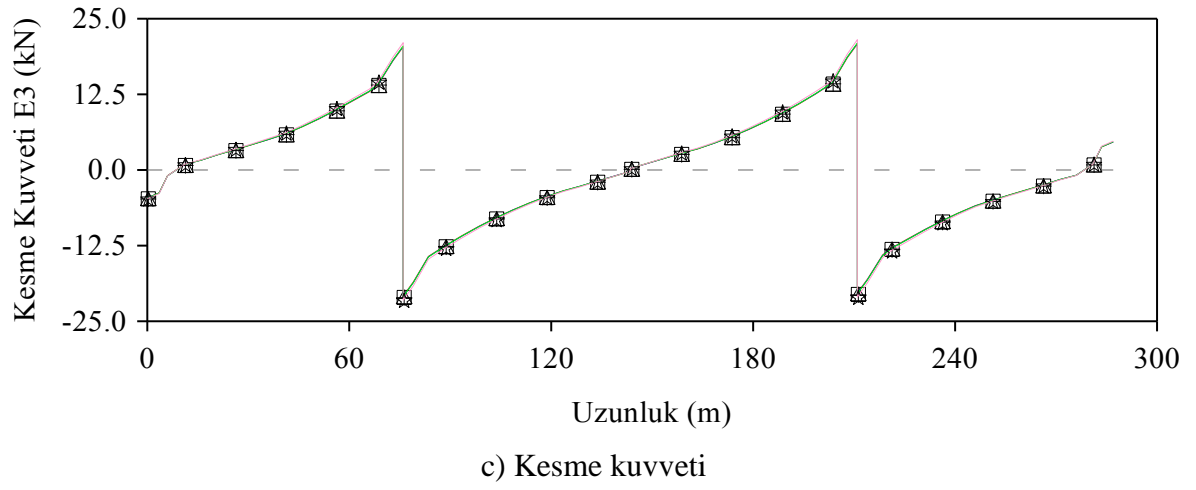
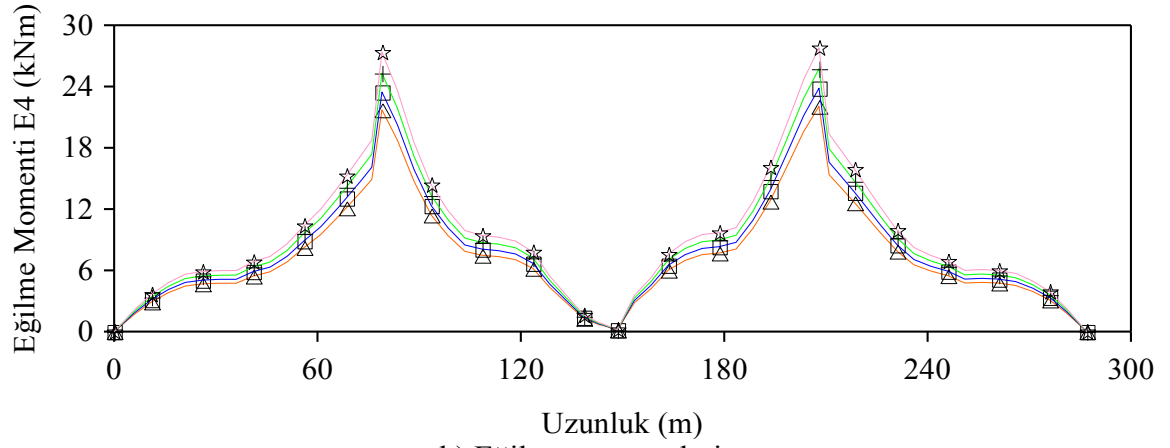
Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin, eğilme momentlerinin, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi Şekil 2.21'de verilmektedir. Şekil 2.21'de görüldüğü gibi yerdeğiştirmeler köprü açıklık ortasına doğru artmakta, eğilme momenti ile kesme kuvveti ve normal kuvvet değerleri ise ayaklar üzerinde maksimum değere sahip olup köprü açıklık ortasında minimum değere ulaşmaktadır. Tabliye boyunca elde edilen yerdeğiştirmeler incelendiğinde en büyük yerdeğiştirmelerin yumuşak zemin durumunda, en küçük yerdeğiştirmelerin ise ankastre mesnet durumunda elde edildiği görülmüştür. Değişen zemin durumları için eğilme momenti, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerlerinde çok fazla bir değişiklik olmamıştır.



a) Yerdeğiştirmeler

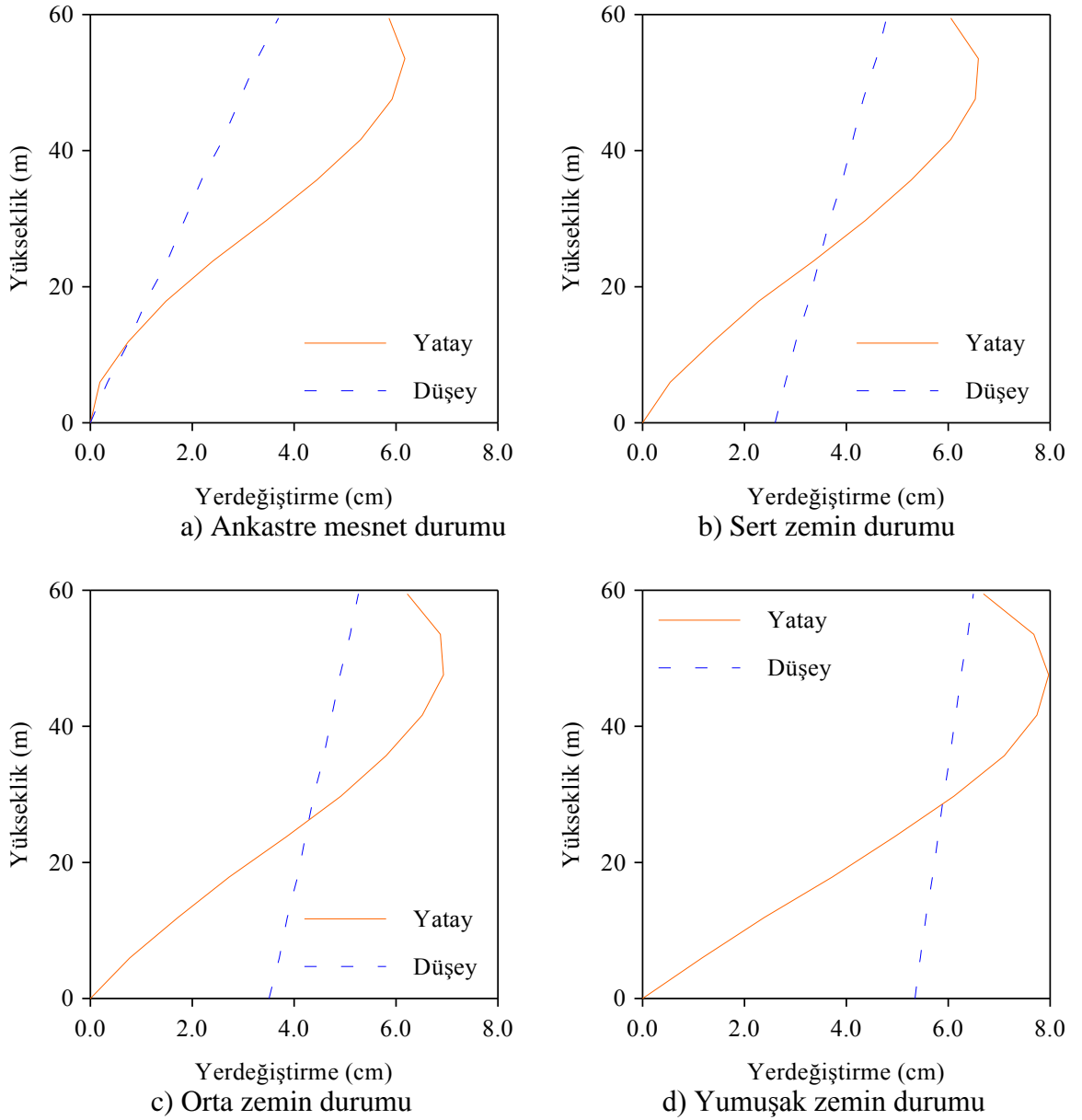
Şekil 2.21. Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin, eğilme momentlerinin, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi

Şekil 2.21'in devamı



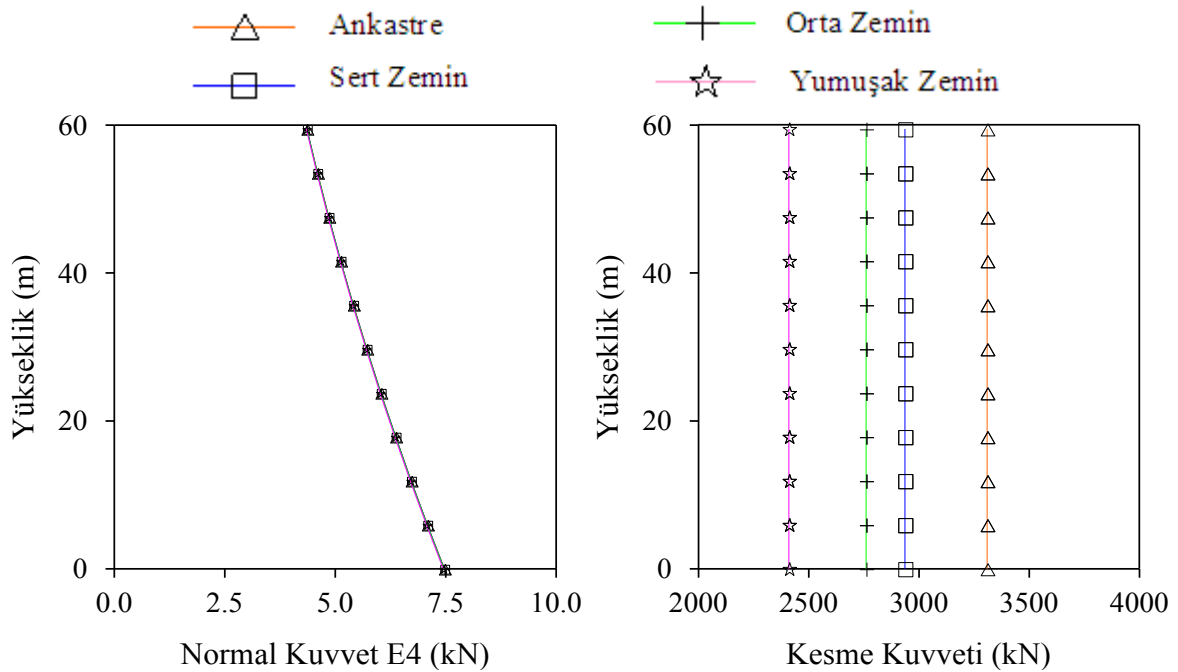
2.4.4. Köprü Ayaklarının Davranışı

Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay ve düşey yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi Şekil 2.22'de verilmiştir. Şekil 2.22 incelendiğinde, yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca arttığı ve maksimum yerdeğiştirmenin yumuşak zemin durumu için ayak uç noktasında 7.97 cm olarak elde edildiği görülmektedir.



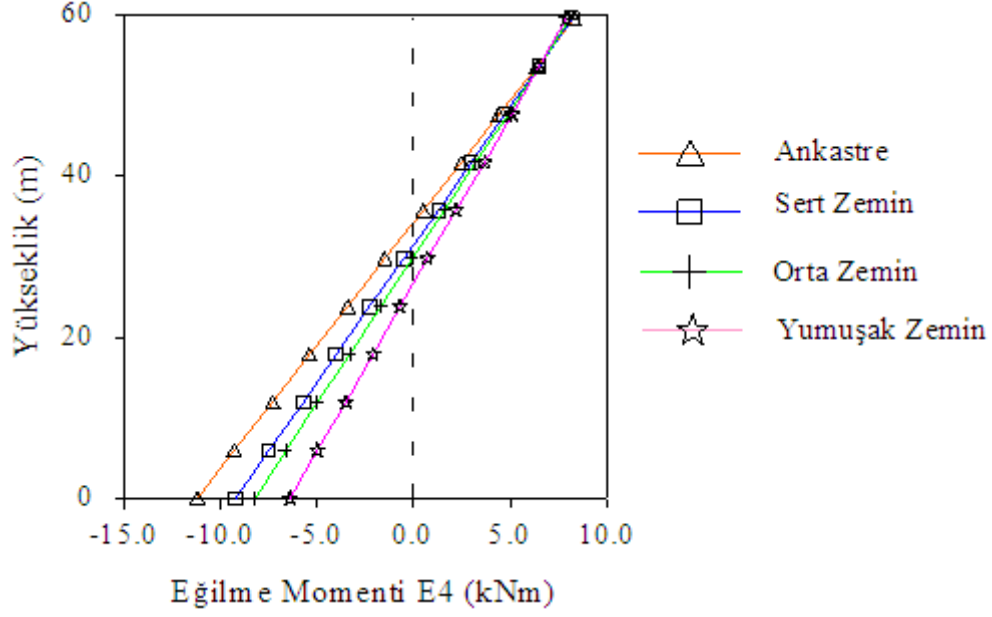
Şekil 2.22. Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay ve düşey yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi

Ayak yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri Şekil 2.23'te verilmektedir. Şekil 2.23 incelendiğinde, ayak yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin ise hemen hemen aynı kaldığı gorulmektedir. Farklı zemin turleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizler sonucunda normal kuvvet değerlerinin değişmediği, kesme kuvveti değerlerinin ise ankastre mesnet durumu için maksimum değerini aldığı sert, orta ve yumuşak zemin sınıfları için ise bir azalma eğiliminde olduğu gorulmektedir.



Şekil 2.23. Komurhan Koprusu'nun farklı zemin turleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi

Ayak yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri Şekil 2.24'te verilmektedir. Şekil 2.24 incelendiğinde, ayak yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin değişim gosterdiği, ayak ortasına doğru eğilme momenti değerlerinin yon değiştirdiği gorulmektedir. Ayrıca, farklı zemin turleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizler sonucunda eğilme momenti değerlerinin ankastre mesnet durumu için minimum değerini aldığı sert, orta ve yumuşak zemin sınıfları için ise bir artma eğiliminde olduğu gorulmektedir.



Şekil 2.24. Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen eğilme momentlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi

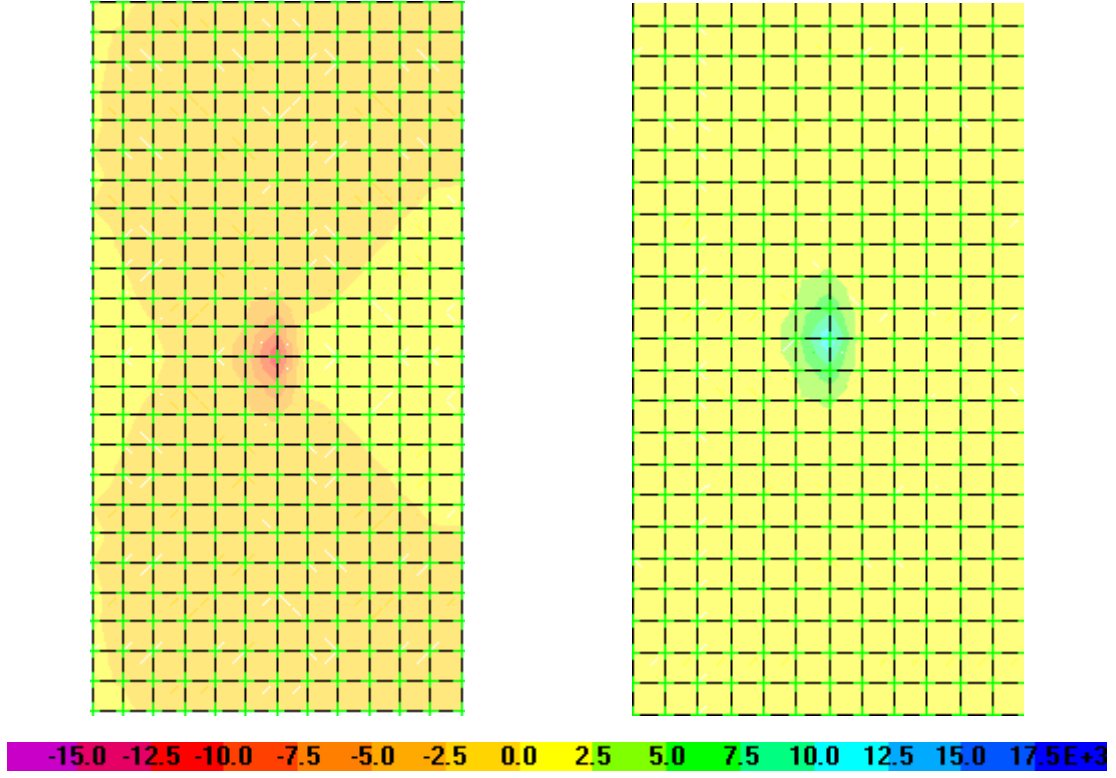
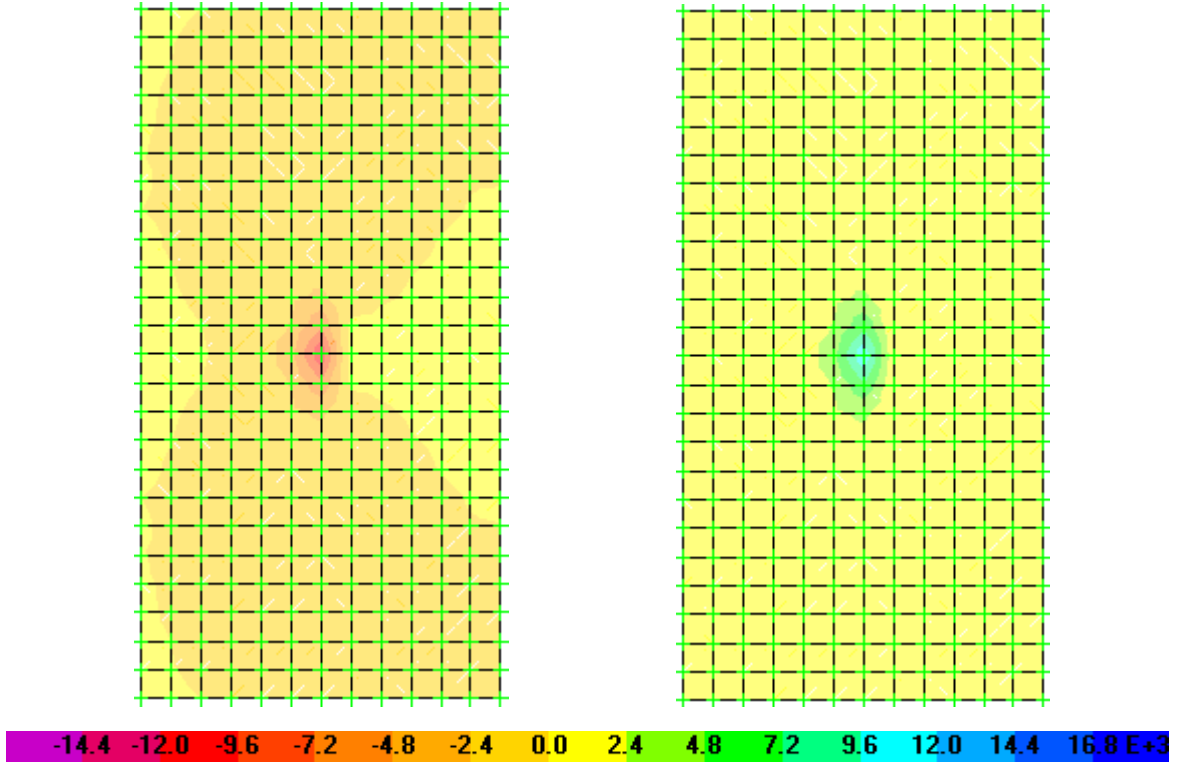
2.4.5. Temel Davranışı

Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda temelde elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeler Tablo 2.5'te verilmektedir. Tablo 2.5'te görüldüğü gibi sert zeminden yumuşak zemine doğru temelde elde edilen düşey yerdeğiştirmeler 11.0mm'den 27.9mm'ye kadar artmaktadır.

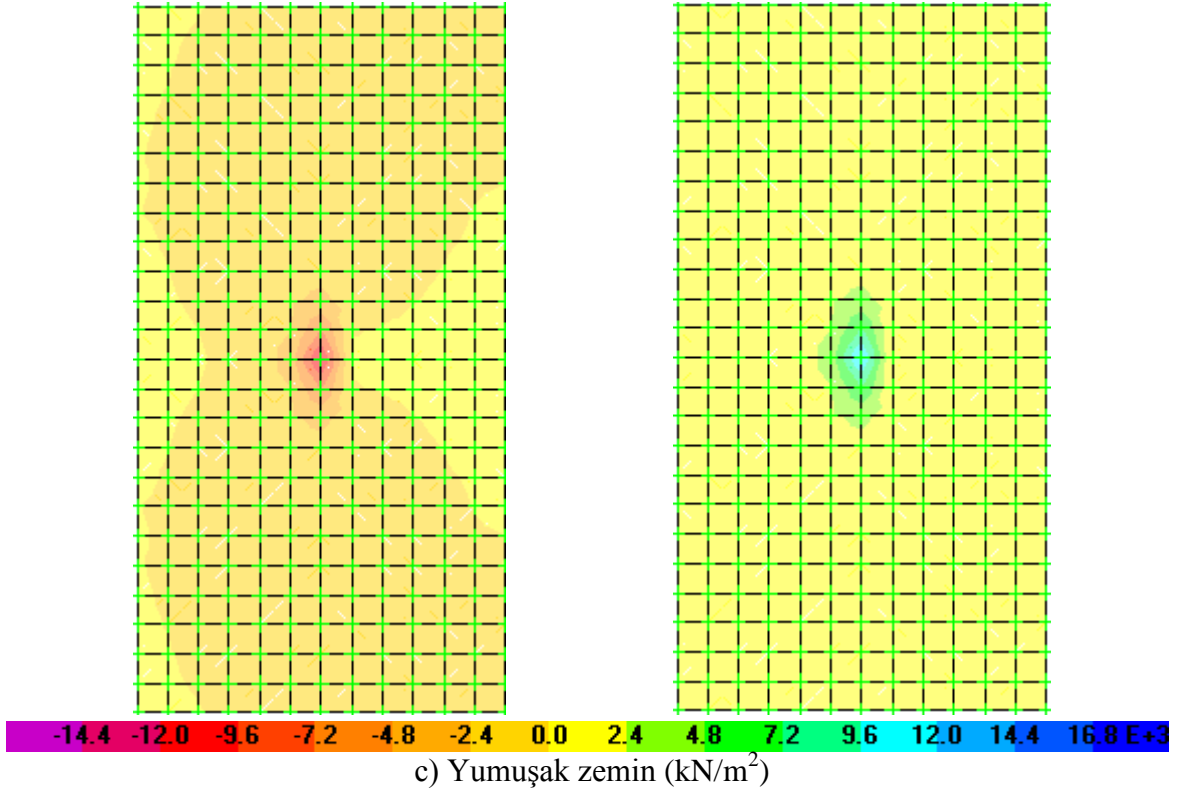
Analizler sonucunda temelde elde edilen maksimum ve minimum gerilmelerin oluştuğu andaki kontor diyağramları Şekil 2.25'te verilmektedir. Şekil 2.25'te görüldüğü gibi maksimum ve minimum gerilmeler sert zeminde en büyük değeri alırken, orta ve yumuşak zemin türleri için azalmaktadır. Bütün zemin sınıfları için maksimum ve minimum gerilmeler kolon alt uç noktasında elde edilmiştir.

Tablo 2.5. Yapım aşamalı analizler sonrasında temelde elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirme değerleri

Zemin Türü	Ankastre	Sert	Orta	Yumuşak
Yerdeğiştirmeler (mm)	0	11.0	15.7	27.9

a) Sert zemin (kN/m²)b) Orta zemin (kN/m²)

Şekil 2.25. Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen maksimum ve minimum gerilmelerin olduğu andaki kontor diyagramları



3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen karayolu köprülerinin yapısal davranışlarına yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının etkisi araştırılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar, iki kısma ayrılmıştır. Yapım aşamalarının dikkate alınmadığı birinci kısımda, uygulama için seçilen Kömürhan Köprüsü'nün iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri proje verileri dikkate alınarak oluşturulmuş, lineer statik analizler gerçekleştirilerek köprünün yapısal davranışı belirlenmiştir. Analizlerde farklı tür zemin sınıfları (sert, orta ve yumuşak zemin) dikkate alınmıştır. Yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı ikinci kısımda ise, Kömürhan Köprüsü'nün lineer olmayan statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde betonun zamana bağlı dayanım değişimi, elastisite modülünün değişimi, sünme ve rötne etkileri ile çeliğin relaksasyonu dikkate alınmıştır. Köprünün her iki analiz durumu için elde edilen kesit tesirleri birbiriyle karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

Yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınmadığı statik analizler sonucunda;

✓ Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin, eğilme momentlerinin, kesme kuvveti ve normal kuvvetlerinin tabliye boyunca değişimi dikkate alındığında, yerdeğiştirmelerin köprü açıklık ortasına doğru arttığı, eğilme momentleri ile kesme kuvveti ve normal kuvvet değerlerinin ise ayaklar üzerinde maksimum değere ulaşmış köprü açıklık ortasına doğru minimum değere ulaştığı görülmüştür. Maksimum düşey yerdeğiştirme değeri ankastre mesnet durumu için 6.41 cm olup, yumuşak zemin durumunda artarak 9.96 cm'ye çıktığı görülmüştür. Maksimum eğilme momenti, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerleri ise farklı tür zemin sınıfları için hemen hemen aynı kalmakta ve sırasıyla 1.3E5 kNm, 22E2 kN ve 10E3kN olarak elde edilmektedir.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen boyuna ve düşey yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi dikkate alındığında, hem boyuna hemde düşey yerdeğiştirmelerin köprü ayak yüksekliği boyunca arttığı görülmektedir. Maksimum boyuna yerdeğiştirme değeri

ankastre mesnet durumu için 0.95 cm olup, yumuşak zemin sınıfı durumunda artarak 1.15 cm'ye çıktığı görülmüştür. Maksimum düşey yerdeğiştirme değeri de ankastre mesnet durumu için 0.44 cm olup, yumuşak zemin sınıfında artarak 2.44 cm'ye yükseldiği görülmüştür.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi dikkate alındığında, normal kuvvet değerlerinin farklı tür zemin sınıfları için hemen hemen aynı değerlerde kaldığı ve ayak yüksekliği boyunca azaldığı görülmüştür. Kesme kuvveti değerleri ise ayak yüksekliği boyunca sabit olup, ankastre mesnet durumu için maksimum değere sahip olduğu ve yumuşak zemin sınıfına doğru azaldığı belirlenmiştir. Maksimum normal kuvvet değeri 7.5E4 kN olarak kolon alt ucunda elde edilmiştir.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi dikkate alındığında, ayak yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin değişim gösterdiği, ayak ortasına doğru eğilme momenti değerlerinin yön değiştirdiği görülmektedir. Ayrıca, farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizler sonucunda eğilme momenti değerlerinin ankastre mesnet durumu için minimum değeri aldığı sert, orta ve yumuşak zemin sınıfları için ise bir artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Maksimum eğilme momenti değeri ayak üst noktasında ankastre mesnet durumu için 5E4 kNm olup yumuşak zemin sınıfına doğru artarak 6.4E4 kNm değerine ulaştığı belirlenmiştir.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda temelde elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeler incelendiğinde, sert zeminden yumuşak zemine doğru elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin 5.1mm'den 20.1mm'ye kadar arttığı görülmektedir. Analizler sonucunda temelde elde edilen maksimum ve minimum gerilmelerin olduğu andaki kontor diyagramları dikkate alındığında, maksimum ve minimum gerilmelerin sert zeminde en büyük değerini aldığı, orta ve yumuşak zemin türleri için ise azaldığı görülmüştür. Bütün zemin sınıfları için maksimum ve minimum gerilmeler kolon alt uç noktasında elde edilmiştir.

Kömürhan Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla köprünün sonlu eleman modeli proje hesap raporları dikkate alınarak toplam 51 adımda oluşturulmuş, beton malzemesi

için elastisite modülündeki değişimler, rötre ve sünme etkileri ile çelik malzemesi için çeliğin relaksasyonu dikkate alınmıştır. Yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerin etkisini daha iyi belirlemek amacıyla elde edilen veriler yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen tabliye düşey yerdeğiştirmelerinin, eğilme momentlerinin, kesme kuvveti ve normal kuvvetlerinin tabliye boyunca değişimi dikkate alındığında, yerdeğiştirmelerin köprü açıklık ortasına doğru arttığı, eğilme momentlerinin ile kesme kuvveti ve normal kuvvet değerlerinin ise ayaklar üzerinde maksimum değere ulaşmış köprü açıklık ortasına doğru minimum değere ulaştığı görülmüştür. Maksimum düşey yerdeğiştirme değeri ankastre mesnet durumu için 17.71 cm olup, yumuşak zemin sınıfına doğru artarak 20.99 cm'ye çıktığı görülmüştür. Maksimum eğilme momenti, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerleri ise farklı tür zemin sınıfları için hemen hemen aynı kalmakta ve sırasıyla 2.5E5 kNm, 21.5E3 kN ve 8.9E3 kN olarak elde edilmektedir.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen boyuna ve düşey yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi dikkate alındığında, hem boyuna hemde düşey yerdeğiştirmelerin köprü ayak yüksekliği boyunca arttığı görülmektedir. Maksimum boyuna yerdeğiştirme değeri ankastre mesnet durumu için 5.86 cm olup, yumuşak zemin sınıfının durumunda artarak 6.69 cm'ye çıktığı görülmüştür. Maksimum düşey yerdeğiştirme değeri de ankastre mesnet durumu için 3.69 cm olup, yumuşak zemin sınıfının durumunda artarak 6.49 cm'ye yükseldiği görülmüştür.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi dikkate alındığında, normal kuvvet değerlerinin farklı tür zemin sınıfları için hemen hemen aynı değerlerde kaldığı ve ayak yüksekliği boyunca azaldığı görülmüştür. Kesme kuvveti değerleri ise ayak yüksekliği boyunca sabit olup, ankastre mesnet durumu için maksimum değere sahip olduğu ve yumuşak zemin sınıfı durumunda azaldığı belirlenmiştir. Maksimum normal kuvvet değeri 7.5E4 kN olarak kolon alt ucunda elde edilmiştir.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin ayak

yüksekliği boyunca değişimi dikkate alındığında, ayak yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin değişim gösterdiği, ayak ortasına doğru eğilme momenti değerlerinin yön değiştirdiği görülmektedir. Ayrıca, farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analizler sonucunda eğilme momenti değerlerinin ankastre mesnet durumu için minimum değeri aldığı sert, orta ve yumuşak zemin sınıfları için ise bir artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Maksimum eğilme momenti değeri ayak üst noktasında ankastre mesnet durumu için $8E4$ kNm olup yumuşak zemin sınıfı durumunda artarak $12E4$ kNm değerine ulaştığı belirlenmiştir.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün farklı zemin türleri dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda temelde elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeler incelendiğinde, sert zeminden yumuşak zemine doğru elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin 11.0 mm'den 27.9 mm'ye kadar arttığı görülmektedir. Analizler sonucunda temelde elde edilen maksimum ve minimum gerilmelerin olduğu andaki kontur diyagramları dikkate alındığında, maksimum ve minimum gerilmelerin sert zeminde en büyük değerini aldığı, orta ve yumuşak zemin türleri için ise azaldığı görülmüştür. Bütün zemin sınıfları için maksimum ve minimum gerilmeler kolon alt uç noktasında elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, betonarme karayolu köprüleri gibi yapımı uzun yıllar süren mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının doğru bir şekilde belirlenmesi için yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması çok büyük önem arz etmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında yapılan bazı öneriler maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Köprülerin yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı dinamik analizleri gerçekleştirilebilir.
- Farklı tür taşıyıcı sisteme sahip köprülerin yapısal davranışları da yapım aşamaları ve zamana bağlı malzeme deformasyonları dikkate alınarak belirlenebilir.

4. KAYNAKLAR

- Adanur, S., 1997. Asma Köprülerin Geometrik Olarak Lineer Olmayan ve Elastik Zemin Analjisi ile Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Adanur, S., 2003. Mesnetlerinden Farklı Dinamik Etkilere Mauz Asma Köprülerin Geometrik Olarak Lineer Olmayan Deterministik ve Stokastik Analizi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Altunışık, A.C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A. ve Sevim, B., 2010b. Output-Only System Identification of Post Tensioned Segmental Concrete Highway Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, (baskıda).
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., Adanur, S. ve Domaniç, A., 2009a. Karayolu Köprülerinin Sonlu Eleman Analizinde Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Deformasyonların Dikkate Alınması, *Yapı Dünyası Dergisi*, 161, 11-15.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., Adanur, S. ve Domaniç, A., 2010a. Construction Stage Analyses of Kömürhan Highway Bridge using Time Dependent Material Properties, *Structural Engineering and Mechanics*, 36, 2, 207-223.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., Domaniç, A. ve Adanur, S., 2009b. Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Köprülerin Davranışlarının Belirlenmesi, *Sakarya International Symposium of Earthquake Engineering*, October, Sakarya, Türkiye, *Bildiriler Kitabı*, 209-219.
- Aref, A.J., Kitane, Y. ve Lee, G.C., 2005. Analysis of Hybrid FRP-Concrete Multi-Cell Bridge Superstructure, *Composite Structures*, 69, 346-359.
- Ateş, Ş., 2004. Sürtünmeli Sarkaç Sistemi ile İzolasyonlu Karayolu Köprülerinin Değişerek Yayılan Yer Hareketi İçin Stokastik Analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ateş, Ş., Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., 2004. Sütünmeli Sarkaç Mesnet Modeli ile Taban İzolasyonu Yapılan Köprülerin Deprem Davranışının Belirlenmesi, *Türkiye İnşaat Mühendisliği On Yedinci Teknik Kongre ve Sergisi*, Nisan, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, *Bildiriler Kitabı*, .
- Ateş, Ş., Dumanoglu, A.A. ve Bayraktar, A., 2005. Stochastic Response of Seismically Isolated Highway Bridges with Friction Pendulum Systems to Spatially Varying Earthquake Ground Motions, *Engineering Structures*, 27, 1843-1858.

- Casas, J.R., 1999. Evaluation of Existing Concrete Bridges in Spain, Concrete International-Design and Construction, 21, 8, 48-53.CEB-FIP Model Code, 1990. Thomas Telford, ISBN: 0727716964.
- Chaudhary, M.T.A., Abe, M. ve Fujino, Y., 2002. Investigation of a Typical Seismic Response of a Base-Isolated Bridge, Engineering Structures, 24, 945-953.
- Chouw, N. ve Hao, H., 2004. Influence of SSI and Frequency Content of Non-Uniform Ground Motions on Bridge Girder POUNDINGS, Journal of Applied Mechanics, JSCE, 7, 841-851.
- Chouw, N. ve Hao, H., 2005. Study of SSI and Non-Uniform Ground Motion Effect on Pounding Between Bridge Girders, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, 717-28.
- Chouw, N. ve Hao, H., 2008a. Significance of SSI and Nonuniform Near-Fault Ground Motions in Bridge Response I: Effect on Response with Conventional Expansion Joint, Engineering Structures, 30, 141-153.
- Chouw, N. ve Hao, H., 2008b. Significance of SSI and Non-Uniform Near-Fault Ground Motions in Bridge Response II: Effect on Response with Modular Expansion Joint, Engineering Structures, 30, 1, 154-162.
- Constantinou, M.C., Tsepelas, P., Kim, Y.S. ve Okamoto, S., 1993. Taisei Corporation Research Program of Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of Friction Pendulum System, Rapor No:MCEER-93-0020, State University of New York at Buffalo.
- Dicleli, M. ve Erhan, S., 2010. Effect of Soil-Bridge Interaction on the Magnitude of Internal Forces in Integral Abutment Bridge Components due to Live Load Effects, Engineering Structures, 32, 129-145.
- Dönmez, C. ve Karakan, E., 2009. Köprülerde Deneysel Modal Analiz Uygulamaları, Teknik Dergi, 318, 4851-4863.
- Erhan, S. ve Dicleli, M., 2009. İntegral Köprülerde Hareketli Yük Dağılımına Yapı-Zemin Etkileşimi ve Uç-Ayak Tabliye Sürekliliğinin Etkileri, Teknik Dergi, 317, 4833-4850.
- Fryba, L. ve Pirner, M., 2001. Load Tests and Modal Analysis of Bridges, Engineering Structures, 23, 102-109.
- Harputoğlu, Z., Çelebi, N. ve Tulumtaş, F., 2007. Gülburnu Köprüsü, Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Kasım, Antalya, Türkiye, Bildiriler Kitabı, 225-236.
- Hashimoto, K. ve Chouw, N., 2003. Investigation of the Effect of Kobe Earthquake on a Three-Dimensional Soil-Structure System, Journal of Earthquake Engineering, JSCE, 27, 1-8.

- Jeremic, B., Kunnath, S. ve Xiong, F., 2004. Influence of Soil-Foundation-Structure Interaction on Seismic Response of the I-880 Viaduct, *Engineering Structures*, 26, 391-402.
- Kakinuma, T., Kawakami, K., Kamakura, K., Tani, H. ve Abe, N., 1994. Vibration Test of a Menshin Designed Multi-Span Continuous Prestressed Concrete Bridge, *Proceedings of the 3rd US-Japan Workshop on Earthquake Protective System for Bridges*, Rapor No: NCEER-94-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo.
- Kappos, A.J., Manolis, G.D. ve Moschonas, I.F., 2002. Seismic Assessment and Design of R/C Bridges with Irregular Congiguration, Including SSI Effects, *Engineering Structures*, 24, 1337-1348.
- Karakaplan, A., Caner, A., Kurç, Ö., Domaniç, A. ve Lüleç, A., 2009. Yapı Çözümlemesinde Yeni Bir Devir: Yapım Aşaması, *Teknik Dergi*, 321, 4905-4917.
- Kawashima, K., Unjoh, S. ve Mukai H., 1997. Seismic Strenthening of Highway Bridges, *Second U.S.-Japan Workshop on Seismic Retrofit of Bridges*, Rapor No: UCB/EERC-97/09, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Kumar, S., 2003. *Balanced Cantilever-A Specialist Method in Bridge Construction*, Editio, 1, 1-16.
- Kwak, H.G. ve Son, J.K., 2002. Determination of Design Moments in Bridges Constructed by Balanced Cantilever Method, *Engineering Structures*, 24, 639-648.
- Kwak, H.G. ve Son, J.K., 2004. Span Ratios in Bridges Constructed Using a Balanced Cantilever Method, *Engineering Structures*, 18,767-779.
- Li, H., 1992. *Thin-Walled Box Beam Finite Elements for Static Analysis of Curved Haunched and Skew Multicell Box Girder Bridges (Skew Bridges, Haunched Bridges, Box Girder Bridges)*, Doktora Tezi, Department of Civil Engineering, Carleton University, Canada.
- Mutobe, R.M. ve Cooper, T.R., 1999. Nonlinear Analysis of a Large Bridge with Isolation Bearings, *Computers and Structures*, 72, 279-292.
- Park, K.S., Jung, H.J. ve Lee, I.W., 2002. A Comparative Study on Seismic Performances of Base Isolated Systems for Multi-Span Continuous Bridge, *Engineering Structures*, 24, 1001-1013.
- Saiidi, M., Maragakis, E. ve Sanders, D., 1998. Evaluation and Seismic retrofit of Highway Bridge Substructures with Tapered Columns, *Construction and Building Materials*, 12, 2-3, 161-173.

- SAP2000, 2008. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.
- Shattarat, N.K., Symans, M.D., McLean, D.I. ve Cofer, W.F., 2008. Evaluation of Nonlinear Static Analysis Methods and Software Tools for Seismic Analysis of Highway Bridges, *Engineering Structures*, 30, 1335-1345.
- Smith, D.A. ve Hendy, C. R., 2004. Design of the New Medway Bridge, England Proceedings of the ICE-Bridge Engineering, 157, 1, 27–36.
- Spyrakos, C.C., 1992. Seismic Behaviour of Bridge Piers Including Soil Structure Interaction, *Computers and Structures*, 43, 373-384.
- Sritharan, S., Priestley, M.J.N. ve Seible, F., 2000. Nonlinear Finite Element Analyses of Concrete Bridge Joint Systems Subjected to Seismic Actions, *Finite Elements in Analysis and Design*, 36, 215-233.
- Tongaonkar, N.P. ve Jangid, R.S., 2003. Seismic Response of Isolated Bridges with Soil-Structure Interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, 287-302.
- Vlassis, A.G. ve Spyrakos, C.C., 2001. Seismically Isolated Bridge Piers on Shallow Soil Stratum with Soil-Structure Interaction, *Computers and Structures*, 79, 2847-2861.
- Wang, P.H., Tang, T.Y. ve Zheng, H.N., 2004. Analysis of Cable-Satyed Bridges During Construction by Cantilever Methods, *Computers and Structures*, 82, 329-346.

ÖZGEÇMİŞ

Erdal YILDIRIM, 1973 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Trabzon'da tamamladı. Lise öğrenimini Of Şat Lisesi'nde tamamladı. 1994 yılında Çukurova Üniversitesi, İnşaa Mühendisliği Bölümüne girdi. 1998 yılında Niğde Üniversitesine geçiş yaptı. 1999 yılında Niğde Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1999-2010 yılları arasında Doğu Holding, GEM-SAN Holding ve Merve İnşaat Ltd. Şti.' De şantiye şefi olarak çalıştı. Tarsus-Mersin Karayolu, POAŞ Trabzon Tank Sahası Islahı, Edirne TOKİ 2000 Konut Uygulaması İnşaatları çalıştığı önemli bazı projelerdendir. 2003 yılında Askerliğini tamamlamış olan YILDIRIM, evli ve iki çocuk babasıdır. Halen proje ve taahhüt işleri yapmakta olup iyi derecede İngilizce bilmektedir.