

**KÖMÜRHAN KÖPRÜSÜNDE ÖNGERİLME KAYIPLARI**

**Ümit KORKMAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MART 2013**

**ANKARA**



**KÖMÜRHAN KÖPRÜSÜNDE ÖNGERİLME KAYIPLARI**

**Ümit KORKMAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MART 2013**

**ANKARA**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ümit KORKMAZ

**KÖMÜRHAN KÖPRÜSÜNÜN  
ÖNGERİLME KAYIPLARI  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Ümit KORKMAZ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Mart 2013**

**ÖZET**

Bu çalışmada, Türkiye'nin ilk dengeli konsol yöntemi ile 1983-1986 yılları arasında yapılmış Kömürhan Köprüsü'nün öngerilme kayıpları ile zamana bağlı yer değiştirmelerinin, ANSYS programında malzeme özellikleri ve sınır koşullarındaki değişimler dikkate alınarak köprünün gerçek durumunu yansıtan sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Düşey yükler altında yerdeğiştirmeler, sünme, büzülme yerdeğiştirmeleri ve öngerilme kayıplarının hesaplanması amaçlanmıştır. Kenar mesneti karada olan, 143.50 m açıklıklı Kömürhan Köprüsü aşırı yerdeğiştirmeden dolayı onarıma ihtiyaç duymuştur. Sonlu elemanlar modeli oluşturulan köprüde kamyon yükü sonrası yerdeğiştirme, saha ölçümleri ile elde edilen yapıdaki gerçek yerdeğiştirmeler ile karşılaştırılıp öngerilme kayıplarının aşırı yerdeğiştirme üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada, köprü hasarlarının nedenlerini araştırmak amacı ile köprü ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışmanın geniş bir kısmını oluşturan modelleme işlemi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Kömürhan Köprüsünde 20 yılda öngerilme kayıplarından dolayı oluşan yerdeğiştirme, beklenenin çok üzerindedir. Köprüde beklenenin üzerinde gerçekleşen yerdeğiştirmelerin oluşturduğu hasarlar ve bu hasarların zamanla artacak olması sebebiyle yeni köprü yapılması planlanmaktadır.

**Bilim Kodu** : 911.1.144  
**Anahtar Kelimeler** : Kömürhan,  ngerilmeli köprü, ANSYS, Sonlu elemanlar analizi, kutu kesit, sünme, büzülme, öngerilme kayıpları  
**Sayfa Adedi** : 70  
**Tez Yöneticisi** : Prof. Dr. Sıddık ŞENER

**PRESTRESS LOSSES OF  
KÖMÜRHAN BRIDGE  
(M.Sc.Thesis)**

**ÜMİT KORKMAZ**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE**

**March 2013**

**ABSTRACT**

**This thesis illustrates the prestress losses and time dependent displacements of Kömürhan Bridge that is built by balanced cantilever method between the years 1983-1986, by ANSYS software. A 3D finite element model reflecting the real condition of the bridge is created with the ANSYS software by taking into account the changes in the material properties and in the boundary conditions. It is aimed to calculate the displacements under vertical loads, creep, shrinkage displacements and prestress losses. Due to excessive displacements, the 143.50 m spanning Kömürhan Bridge whose edge supports are located on the shore, needed to be repaired. The effects of the prestress losses on the excessive deformations are studied by comparing the deformations obtained by the finite element model of the bridge after the truck loads with the real deformations obtained by the measurements at site. In this thesis, it is aimed to investigate the causes of the damages on the bridge by modeling it with the ANSYS finite elements software. The information on the modeling step that comprises the huge part of this study is provided. The displacements of the Kömürhan Bridge due to the prestress losses in 20 years are higher than expected. Due to the damages caused by the excessive displacements and since these damages will continue to increase with time, it is being planned to build a new bridge.**

**Science Code : 911.1.144**

**Key Words : Kömürhan, prestress bridge, ANSYS, finite element analysis,  
box girder, creep, shrinkage, prestress losses**

**Page Number: 70**

**Adviser : Prof. Dr. Sıddık ŞENER**



## TEŞEKKÜR

Tez alıőması boyunca değerli öneri ve yardımlarını esirgemeyen, tez danışmanım ve değerli hocam Sayın Prof. Dr. Sıddık ŞENER'e teőekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışması boyunca ve modelleme aşamasında öneri ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Araő.Gör.Dr. Çağatay BELGİN'e, Araő.Gör. Yasin AğLAR'a ve tez çalıőmalarımnda çok emeği geçen İnş. Müh. Tuğrul SEZDİRMEZ'e teşekkür ederim.

Sevgi, sabır ve fedakârlılıklarıyla bu günlere ulaşmamı sağlayan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme minnet ve teőekkürlerimi sunarım.

**İÇİNDEKİLER****Sayfa**

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1.GİRİŞ.....	1
2. KÖMÜRHAN KÖPRÜSÜ.....	2
2.1. Donatı Yerleşimi.....	9
2.2. Alan ve Eylemsizlik Momentleri.....	11
3. KÖPRÜDE ZAMANLA OLUŞAN HASARLAR.....	14
4.KÖPRÜ ANALİZİ.....	16
4.1. Köprü Moment (M), Kesme (V) Kuvveti Diagramları.....	16
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	20
5.1. Malzeme Modelleri.....	21
5.1.1. Beton modeli.....	22
5.1.2. Betonun matematiksel modeli.....	23
5.2. Gerçek Sabitler.....	25
5.3. Sonlu Eleman Ağı.....	26
5.4. Öngerme Kablolarının Modellenmesi.....	27
5.5. Sınır Koşulları.....	30

	<b>Sayfa</b>
5.6. Yük Durumları .....	30
6. ANALİZ .....	35
6.1. Farklı Döşeme Kalınlıklı Kutu Kesitli Köprülerde Büzülme Yerdeğiştirmesi .....	48
6.2. B3 Model ile Sünme ve Büzülmenin Hesaplanması .....	52
6.3. Çeliğın Gevşemesi.....	63
6.4. Gerilme Kayıpları Sonucunda Yerdeğiştirme.....	64
7.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	70

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Köprü kesit özellikleri.....	12
Çizelge 5.1. DYWIDAG Ø15.2 mm çaplı çelik kablo teknik özellikleri.....	29
Çizelge 6.1. Deney ve ANSYS sonucu düşey yerdeğişirmelerin karşılaştırılması.....	37
Çizelge 6.2. Köprünün 7, 30 ve 10000 günlük büzülme yer değişirmeleri (C=30 ve $\epsilon_{\infty}$ =0.0013).....	51

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. a) Eski ve yeni (Su seviyesi henüz yükselmemişken) b)Yeni Kömürhan Köprüsü.....	2
Şekil 2.2. Kömürhan köprüsü dengeli konsol yöntemi ile yapımı.....	3
Şekil 2.3. Köprü boyuna kesiti.....	4
Şekil 2.4. a) Kömürhan köprüsü boyuna görünümü b) Değişken enine kesit görünümü.....	5
Şekil 2.5. Orta açıklık genişleme derzindeki mafsal düzeneğinde a) plan ve kesit b) görünüm c) fotoğraf.....	7
Şekil 2.6. Değişken orta ayak kesiti ve temeli.....	8
Şekil 2.7. Kesitlere göre boyuna öngerme donatı demeti sayısı.....	10
Şekil 2.8. Köprü boyunca değişken kesit alanı $A$ ( $m^2$ ) ve kesit ağırlık merkezi $y$ (m) .....	13
Şekil 2.9. Köprü boyunca eylemsizlik momenti $I$ ( $m^4$ ).....	13
Şekil 3.1. Köprü konsol ucunun dönmesi.....	15
Şekil 4.1. En elverişsiz yükleme durumu için $H_{30}S_{24}$ kamyonu.....	16
Şekil 4.2. Kendi ağırlığı ve ek ölü yüklerden dolayı oluşan a)kesme kuvveti ( $kN \times 10^3$ ) b) eğilme momenti diyagramı ( $kNm \times 10^3$ ).....	17
Şekil 4.3. Trafik yükü altında a)kesme ( $V$ ) kuvveti, b)eğilme momenti ( $M$ ) Diyagramları.....	18
Şekil 5.1. Katı model elemanları .....	20
Şekil 5.2. SOLID65 eleman tipinin geometrik özelliği.....	22
Şekil 5.3. Köprünün ANSYS modeli.....	23
Şekil 5.4. Hognestad beton modeli.....	24
Şekil 5.5. ANSYS de Hognestad beton modeli.....	25

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.6. Köprü boyunca değişken kesitler.....	27
Şekil 5.7. a) Kesit Gösterimi, b) Öngerme kablolarının kesit içerisindeki yerleşimleri (üst başlıktaki siyah çizgiler) .....	28
Şekil 5.8. Modele ait sonlu elemanlar ağı ve ana ayakta mesnetlenme.....	30
Şekil 5.9. ANSYS de Köprü ek ölü yük altında.....	31
Şekil 5.10. Saha incelemesinde kullanılan kamyon.....	31
Şekil 5.11. Köprü mesnet koşulları ve kamyon yüklemesi (konsol ucundaki aşağı doğru kırmızı vektörler).....	32
Şekil 5.12. Köprüde elverişsiz yüklemeler, trafik yüklemeleri a) bütün açıklıklarda, b) ana açıklık konsolunda.....	33
Şekil 5.13. ANSYS’de Köprüde elverişsiz yüklemeler, a) bütün açıklıklarda, b) ana açıklık konsolunda trafik yüklemesi .....	34
Şekil 6.1. Y1 yükleme durumu.....	35
Şekil 6.2. Y2 yükleme durumu.....	35
Şekil 6.3. Y3 yükleme durumu.....	36
Şekil 6.4. Nokta numaraları yerleşim planı.....	36
Şekil 6.5. Kendi ağırlığından dolayı konsol ucunda oluşan düşey yerdeğiştirme 24.451mm.....	38
Şekil 6.6. Ek ölü yükler, kendi ağırlığından dolayı konsol ucunda oluşan düşey yerdeğiştirme -6.518 mm.....	38
Şekil 6.7. Ek ölü yükler, kendi ağırlığı, 1 adet 200 kN, Y3 (Domaniç, Y, 2008) Kamyon yüklemesinden dolayı konsol ucunda oluşan düşey yerdeğiştirme -15.625 mm.....	39
Şekil 6.8. Ek ölü yükler, kendi ağırlığı, H <sub>30</sub> S <sub>24</sub> kamyon, yaya yüklemelerinden dolayı konsol ucunda oluşan düşey yerdeğiştirme -74.906 mm .....	39
Şekil 6.9. En büyük trafik yüklemesinin ana açıklık konsolunda uygulanması sonucu konsol ucunda oluşan düşey yerdeğiştirme -79.394 mm .....	40
Şekil 6.10. Yükleme durumları yerdeğiştirme grafiği.....	40

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.11. Köprü ana ayak yüzünde normal gerilmeler, trafik yüklemesi a)köprünün bütününde, b)yalnız ana açıklık konsolunda.....	42
Şekil 6.12. Köprü ana ayak yüzünde kesme gerilmeleri, trafik yüklemesi a)köprünün bütününde, b)yalnız ana açıklık konsolunda.....	43
Şekil 6.13. Köprü ana ayak yüzünden $x=9.2$ m kadar uzakta normal gerilmeler, trafik yüklemesi a)köprünün bütününde, b)yalnız ana açıklık konsolunda.....	44
Şekil 6.14. Köprü ana ayak yüzünden $d=9.2$ m kadar uzakta kesme gerilmeleri, trafik yüklemesi a)köprünün bütününde, b)yalnız ana açıklık konsolunda.....	45
Şekil 6.15. Köprü ana ayak yüzünden $x=9.2$ m kadar uzakta kesme gerilme grafiği, trafik yüklemesi a)köprünün bütününde, b)yalnız ana açıklık konsolunda.....	46
Şekil 6.16. Köprü ana ayak yüzünde normal gerilme grafiği, trafik yüklemesi a)köprünün bütününde b)yalnız ana açıklık konsolunda .....	47
Şekil 6.17. Değişken alt döşeme kalınlığına sahip kutu kesitli konsol kiriş.....	48
Şekil 6.18. Köprü konsol ucunun farklı başlık kalınlıklarından dolayı büzülme yerdeğiştirme - gün eğrisi.....	52
Şekil 6.19. Köprünün B3 Modele göre Sünme ve Büzülmeden dolayı yaptığı birim uzama- gün değişimi.....	62
Şekil 6.20. Köprünün Konsol ucunun B3 Model ve Çelik gevşemesi sonucu oluşan gerilme kayıpları ile ölü yüklere ilaveten 1 adet konsol ucunda 200 kN kamyon yüklemesi (Y3) sonucu yerdeğiştirmesi -139.8 mm.....	65
Şekil 6.21. Köprünün Konsol ucunun ölü yükler ile Y3 yükleme durumlarına göre düşey yerdeğiştirme $-x(m)$ grafiği.....	65

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$a$	Betondaki agrega miktarı
$A_s$	Donatı – kablo alanı
$c$	Betondaki çimento miktarı ( $\text{kg/m}^3$ )
$C$	Büzülme sabiti
$C_0$	Basit sünme için uygunluk fonksiyonu
$C_d$	Betonun bölgesel kurumasından kaynaklı sünme birim şekil değişikliği
$\delta$	Yerdeğiştirme
$\Delta M$ (MNm)	Birim moment
$D$	$2v/s$ hacmin yüzey alanına oranı
$D_x$ (m)	Birim uzunluk
$\varepsilon$	Birim şekil değişimi
$\varepsilon_{sh}, \varepsilon_{sh\infty}$	Büzülme uzaması, sonsuz büzülme uzaması daima $10^{-6}$ ile verilmektedir. $\varepsilon_{sh}$ daima eksidir.
$E$	Elastisite modülü
$\emptyset$	Donatı – kablo çapı
$f_c$	Betonun tasarım basınç dayanım
$f_{py}$	Akma gerilmesi
$f_{pu}$	Kopma gerilmesi
$q$	Deneysel katsayı
$J$	Toplam sünme birim şekil değişikliği
$h(t)$	Çevresel bağıl nem
$H(t)$	Kesit boşluklarında oluşan ortalama mekansal bağıl nem
$k$	Eğrilik



**Simgeler****Açıklama**

$k_h$	Nem etmeni katsayısı
$k_s$	Kesit alanı şekil katsayısı
$I_{ort}$	Ortalama eylemsizlik momenti
$M$	Moment
$N$	Normal kuvvet
$\sigma$	Gerilme
$\tau_{sh}$	Yarı zamandaki büzülme katsayısı
$S(t)$	Büzülme için zaman eğrisi
$t$	Zaman
$t'$	Sabit gerilmenin uygulanmaya başladığı gün
$t_0$	Kuruma başladığındaki elemanın gün olarak yaşı $t' > t_0$
$V$	Kesme kuvveti
$w$	Betondaki su miktarı
$\alpha$	Betonun ısı genleşme katsayısı
$\alpha_1$	Çimento katsayısı
$\alpha_2$	Beton kür durumuna bağlı katsayı

**Kısaltmalar****Açıklama**

<b>ACI</b>	American Concrete Institute
<b>FIP</b>	International Federation for Prestressing
<b>JICA</b>	Japan International Cooperation Agency
<b>USA</b>	United States of America

## 1.GİRİŞ

Kömürhan Köprüsü, Elazığ-Malatya karayolunun 51. kilometresinde, Fırat nehri üzerinde bulunmaktadır. Fırat nehri, Malatya ve Elazığ illerini birbirinden ayıran doğal bir sınır niteliğindedir. Bu iki ilimiz arasındaki ulaşım bağlantısı 1930'lu yıllara değin önce sadece sal ve kayıklarla, daha sonra ise 1.Dünya savaşı yıllarında yapılmış olan ahşap bir köprüyle sağlanmıştır. Ancak 1929 yılında suların 14 m kadar yükselmesi ile birlikte ahşap köprü yıkılmış, dolayısıyla sal ve kayıklarla ulaşımaya yeniden dönülmüştür. Bu duruma kalıcı bir çözüm bulmak amacıyla betonarme bir köprü yapılması göndeme gelmiş ve bunun için uygun yerin Kömürhan Boğazı olduğuna karar verilmiştir.

1 Ağustos 1930 tarihinde başlayan betonarme köprü inşaatı 3 Nisan 1932 tarihinde tamamlanmıştır. İsveç firması olan Nidgvist&Helm şirketi tarafından inşa edilmiş olan yapı, öncelikle İsmet Paşa Köprüsü olarak adlandırılmasına karşın, Kömürhan Köprüsü olarak da anılmaktadır. 109,6 m orta açıklığa sahip olan kemer tipindeki bu köprü, yapıldığı dönem itibariyle dünyadaki 6. en uzun açıklıklı köprü olarak nitelendirilmiştir.

Betonarme kemer köprü, Karakaya Barajının yapılması ile sular altında kalmıştır. Yerine Türkiye'nin ilk dengeli konsol yöntemi ile yapılmış olan öngerilmeli kutu kesitli 135m ana açıklıklı yeni Kömürhan köprüsü 1986 yılında tamamlanmıştır.

Bu çalışmada, yeni Kömürhan Köprüsü'nün ard gerilme kayıpları ile zamana bağlı yer değiştirmeleri bulunmuştur. Bunun için ANSYS programında malzeme özellikleri ve sınır koşullarındaki değişimler dikkate alınarak köprünün gerçek durumunu yansıtan sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Düşey yükler altında yerdeğıştirmeler, sünme, büzülme yerdeğıştirmeleri ve ard germe kayıplarının hesaplanması amaçlanmıştır. Kömürhan köprüsünün ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modeli oluşturulmuştur. Modellenen kesitlerde 18970 adet hexahedral (6 yüzlü prizma) isoparametrik eleman ve 29340 adet düğüm noktası kullanılarak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir.

## 2. KÖMÜRHAN KÖPRÜSÜ

Kömürhan köprüsü, uzun yıllar hizmet eden betonarme köprünün (Şekil 2.1a), Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) kapsamında inşa edilmiş olan Karakaya Baraj Gölünün suları altında kalması nedeni ile yapılmıştır. Eski betonarme köprünün hemen yanına 1983-1986 yılları arasında inşa edilmiştir. Bu yeni yapı Türkiye'nin ilk dengeli konsol yöntemi ile imal edilmiş öngerilmeli köprüsü olma özelliğini taşımaktadır.

Aşağıdaki fotoğrafta (Şekil 2.1) eski ve yeni Kömürhan Köprüleri bir arada gözükmektedir. Zaman içinde baraj gölü seviyesinin yükselmesi ile birlikte eski betonarme kemer köprü sular altında kalmıştır. Köprü yenilenmiş fakat ismi aynı kalmıştır.



a)



b)

Şekil 2.1. a) Eski ve yeni (Su seviyesi henüz yükselmemişken) b)Yeni Kömürhan köprüsü

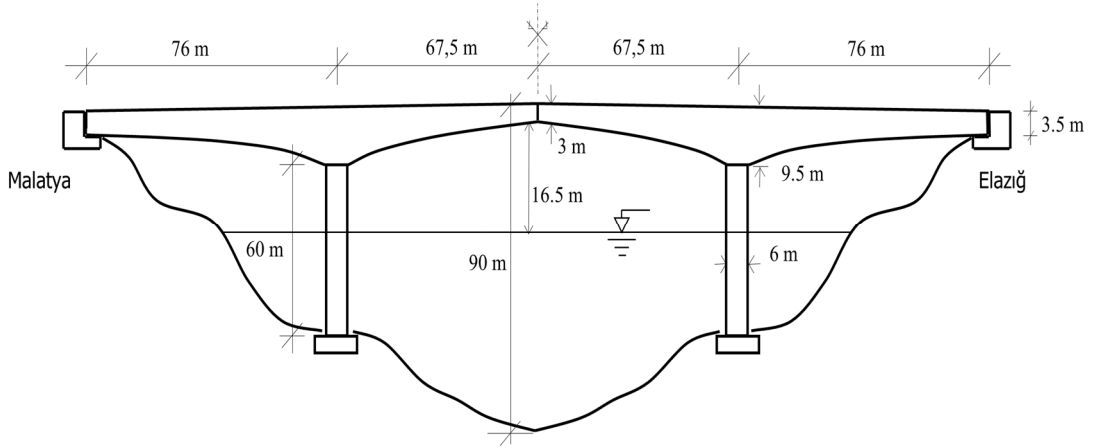
Yeni Kömürhan Köprüsü için başlangıçta Gamb ve HHS firmaları tarafından orta açıklığı 115 metre, kenar açıklıkları da 86 metre olmak üzere toplam 287 metre uzunluğunda gerber kirişli bir sistemin projesi hazırlanmıştır. Ancak yapım sırasında, nehrin içinde yer alan yüksek ayakların iskele imalatını g  kılacağı düşünülerek, yapım tipinde değişikliğe gidilip dengeli konsol sistemin (şekil 2.2) uygulandığı sonuç projeye geçilmiştir. STFA (Sezai Türkeş-Fevzi Akkaya) İnaşaat A.ř. tarafından yapımı gerçekleştirilen bu projenin müşavirliği Gamb ve Mott, Hay&Anderson firmaları tarafından yürütülmüş, ardgerme çalışmaları ise DSI (Dywidag Systems International) firmasınca gerçekleştirilmiştir. Yeni projede köprü toplam boyu sabit kalırken orta açıklık 115 metreden 135 metreye çıkartılmıştır. Yapımına 23.02.1983 tarihinde başlanılmış ve 08.04.1986 tarihinde tamamlanarak trafiğe açılmıştır.



şekil 2.2. Kömürhan köprüsü dengeli konsol yöntemi ile yapımı

Kömürhan köprüsü Türkiye'nin ilk dengeli konsol yöntemi ile yapılmış taşıyıcı sistemi kutu kesitli öngerilmeli köprüsüdür. Köprü, orta ayaklarda her iki tarafa doğru hemen hemen eř zamanlı inşa edilen kutu kesit parçalarının betonlarının dökülüp, ardgerilmeli olarak bağlanmaları biçiminde yapılmıştır. Köprü, 135 metre uzunluğunda bir adet orta açıklık ve 76 metre boyunda iki adet kenar açıklıktan oluşmakta olup, toplamda 287 metre boya sahiptir (şekil 2.3). Köprü orta açıklığında mafsal bağlantı sistemi vardır. Kömürhan Köprüsü, yapım yılları olan 1983-1986'da dönemin teknik kurallarına göre oldukça küçük deprem ivmeleri (0.075 g) gözönüne

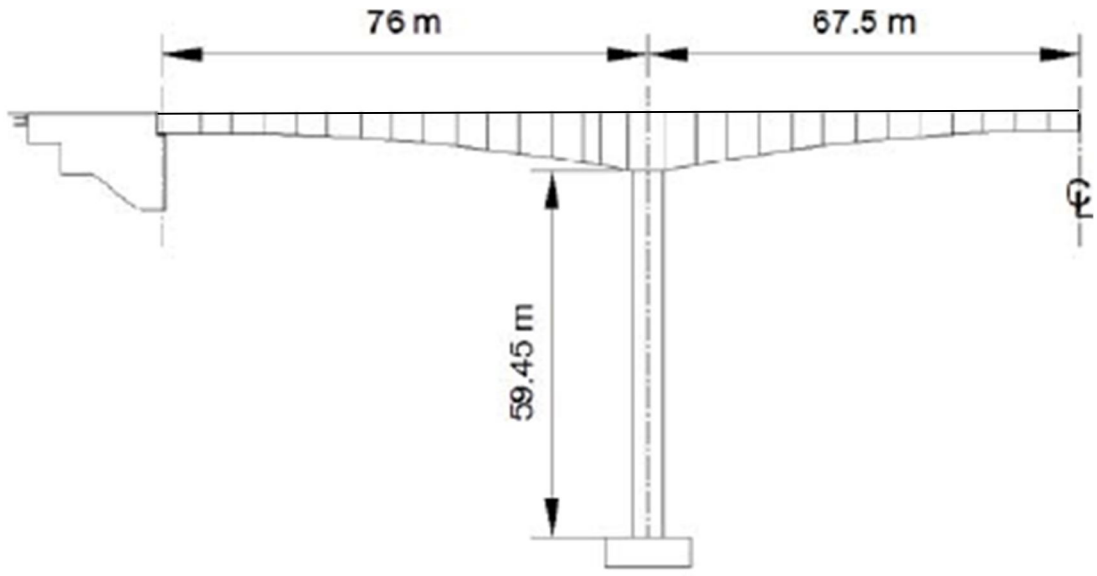
alınarak tasarlanmıştır. Köprünün depreme karşı güvenliği kenar mesnetler ile üstyapıyı birbirlerine bağlayan DYWIDAG çekme çubukları aracılığıyla sağlanmaya çalışılmıştır.



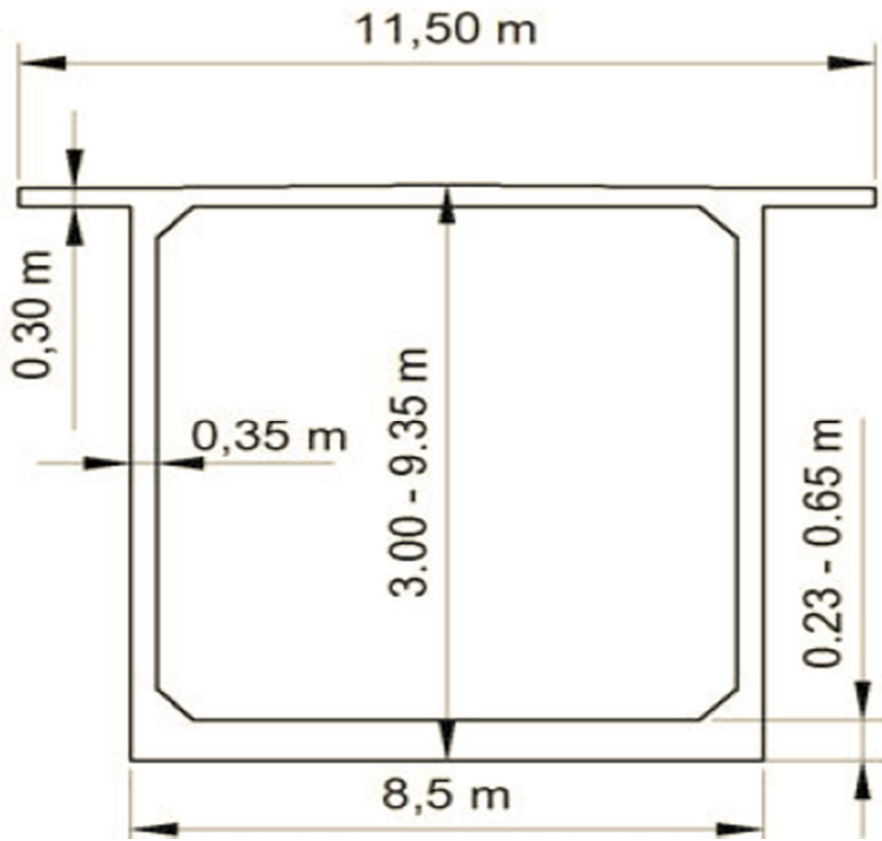
Şekil 2.3. Köprü boyuna kesiti

Statik dengenin korunması için kenar mesnet ile ana ayak arası 76 m, konsol boyu 67,5 m den büyük seçilmiştir. Ayrıca kenar açıklık mesnetinde kutu kesit yüksekliği 3,5 m iken ana açıklıkların ortasındaki yükseklik 3 m dir.

Her bir ayak üstüne oturan köprü parçası, 29 adet değişken kutu kesitli, yerinde dökme parçadan oluşmaktadır. Haftada bir parçanın döküldüğü varsayılabilir. Her bir parça donatılı kutu kesittir. Donatılı kutu kesitin yüksekliği orta ayak üzerinde 9,35m olmakla beraber, parabolik bir azalım göstererek kenar mesnetlerde 3,50m' ye, ana açıklık ortasındaki genişleme derzinde ise 3,00m' ye düşmektedir. Değişken kutu kesitli köprünün boyuna gösterimi simetrik olduğundan yarısı Şekil 2.4a'da, köprü kesiti Şekil 2.4b'de verilmektedir.



a)

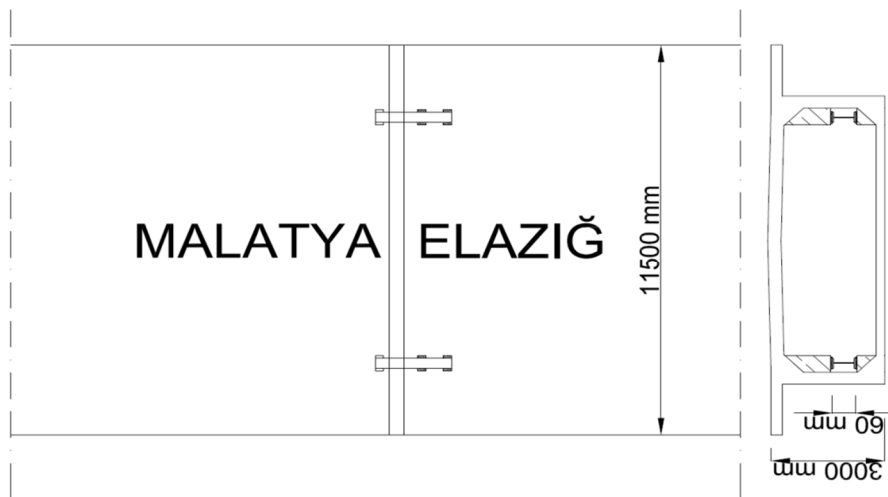


b)

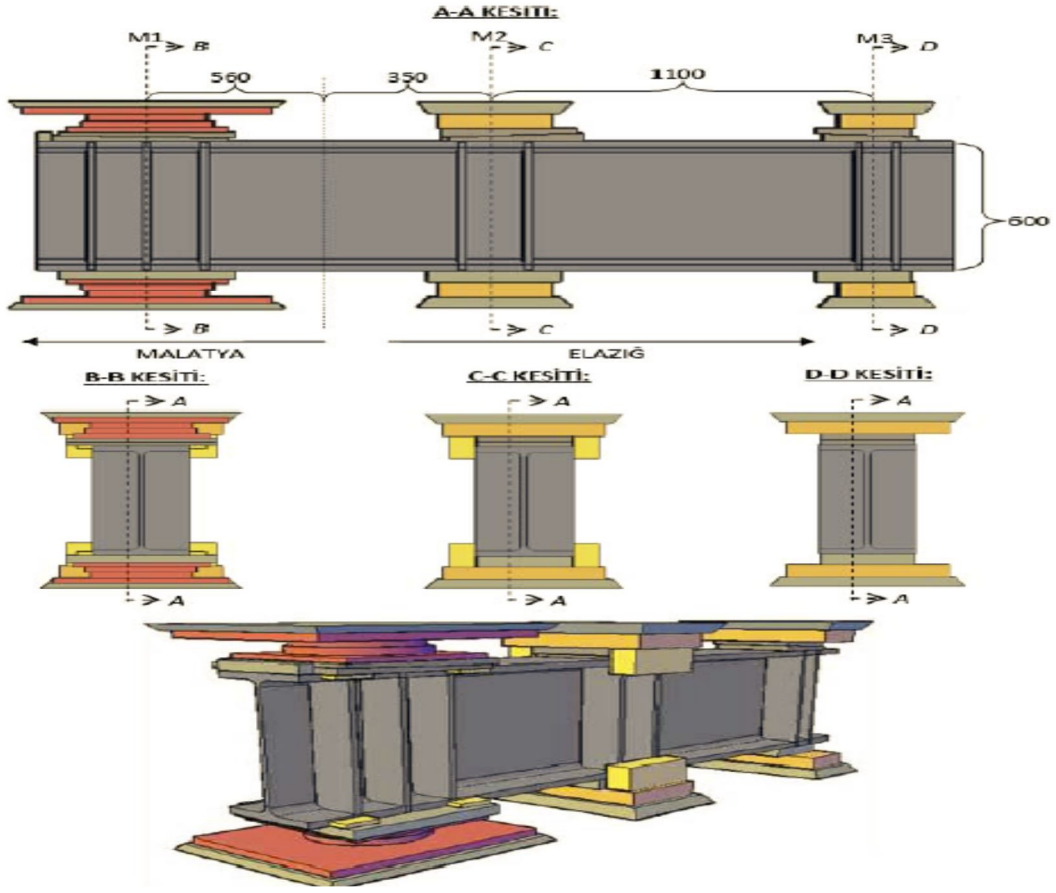
Şekil 2.4. a) Kömürhan köprüsü boyuna görünümü b) Değişken enine kesit görünümü

Kömürhan Köprüsü'nün orta açıklığında, üstyapı orta açıklık konsollarını birlikte çalışmasını sağlamak amacı ile kutu kesitin içinde çelik kirişlerden oluşan ve moment aktarmayan mafsal biçiminde tasarlanan bir düzenek oluşturulmuştur. Orta açıklık mafsal düzeneği iki adet IPB 600 kesitli çelik kirişten oluşmaktadır. Bu bağlantı ile düşey yükler altında üst yapının ortak hareket etmesini sağlamıştır. Bu şekilde, orta açıklıktaki konsol uçları serbest bırakılmış ve zamanla oluşacak sünme, rötre ve farklı ısı değişiminden oluşacak genişlemelere izin verilmiştir.

Açıklık ortasındaki IPB600 çelik kirişi 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 üst yapıya 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 sağlanmıştır. Ayrıca, enine doğrultudaki hareketi kenar takozlar ile engellenmiştir. Şekil 2.5a'da orta açıklık mafsal düzeneğinin şematik görünüşü, Şekil 2.5b'de ise orta açıklık mafsal düzeneğine fotoğraf verilmektedir.



a)



b)



Kutu kesit içi

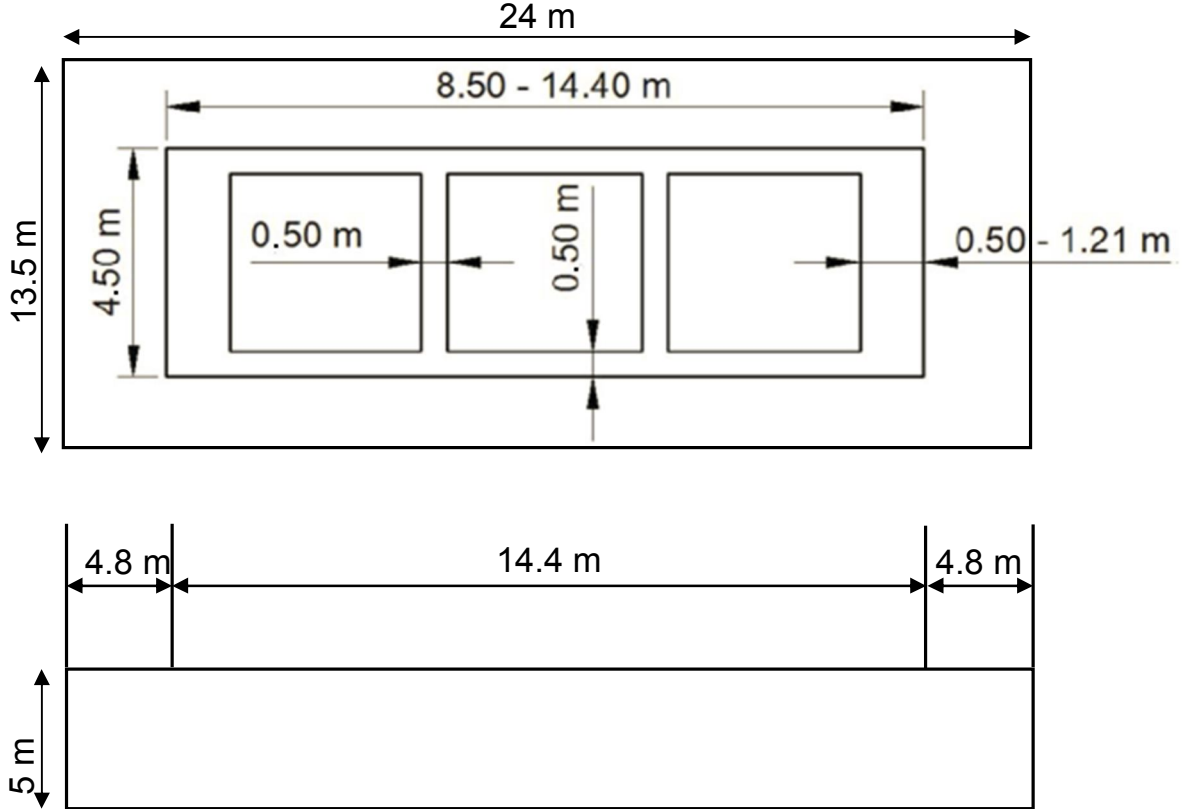
c)

Şekil 2.5. Orta açıklık genişleme derzindeki mafsal düzeneğinde a) plan ve kesit b) görünüm, c) fotoğraf



Köprüde tasarım dayanımı 35 MPa, yoğunluğu  $\rho=2325 \text{ kg/m}^3$  olan beton kullanılmıştır.

Kömürhan Köprüsü'nün Elazığ yönü kenar mesneti 60 adet 25 m boyunda, Malatya yönü kenar ayağı ise 60 adet 40 m boyunda  $\text{Ø}36$ 'lık ankraj çubukları ile kenar kayaya sabitlenmiştir. Ayrıca, köprü üst yapısını mesnete bağlamak amacıyla her bir mesnetde 40 adet olmak üzere S420 kalitesinde  $\text{Ø}50$  çapında çekme çubukları kullanılmıştır. Bu çubuklar Malatya kenar mesnetinde 3,7 m, Elazığ kenar mesnetinde ise 4,7 m uzunluğundadır. Her biri 59,50 m yüksekliğinde olan orta ayaklar 3 gözlü değişken kesitten oluşmaktadır (Şekil 2.6). Orta ayakların genişliği alt tarafta 14,40 m olmakla beraber, lineer şekilde üste doğru azalarak köprü döşemesinin mesnetinde 8,50 m'ye düşmektedir. Hidrostatik dengenin korunması için ayak çeper ve göz duvarlarında su geçişine olanak veren boşluklar bırakılmıştır. Kömürhan Köprüsü'nün ana ayak temelleri  $24 \times 13,5 \text{ m}^2$  kesit alanına ve 5 m kalınlığa sahip betonarmedir.

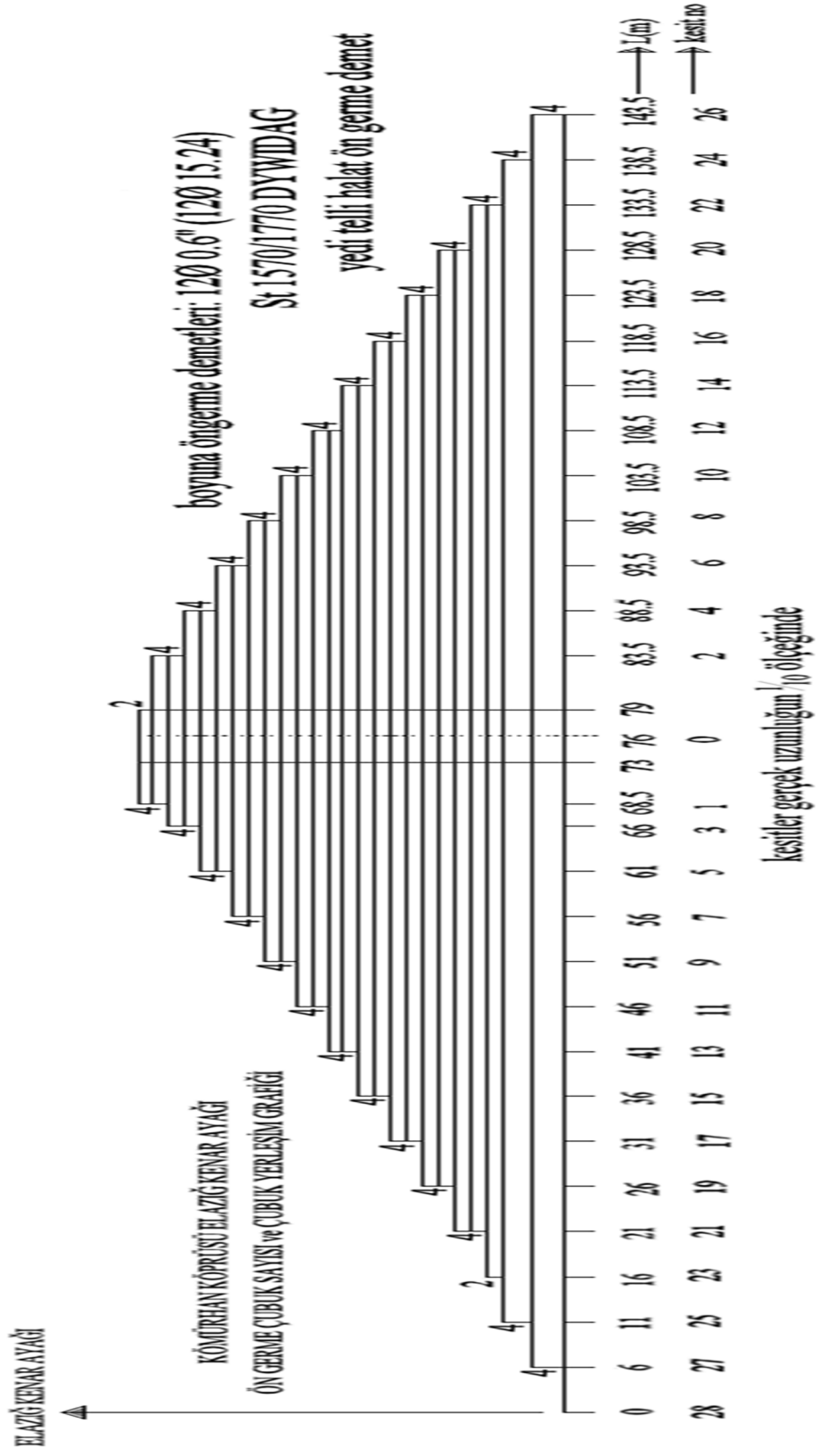


Şekil 2.6. Değişken orta ayak kesiti ve temeli

## 2.1. Donatı Yerleşimi

Kömürhan köprüsünün öngerme kabloları kesitlerde değişiklik göstermektedir. Şekil 2.7’de öngerme demeti sayıları ve kesitlere göre dağılımları gösterilmektedir.

Ana ayakta boyuna öngerme çeliği olarak Ø0.6'' (15,2 mm) lik St1570/1770 ve kayma kuvvetleri için Ø36 lık St1080/1230 Dywidag yüksek dayanımlı öngerme kabloları yerleştirilmiştir. Boyuna kabloların akma gerilmesi  $f_{py}=1570$  MPa, kopma gerilmesi  $f_{pu}=1770$  MPa ve Elastisite modülü  $E=195$  GPa’dır. Köprünün inşası sırasında 1340 ton inşaat demiri, 143 ton öngerme kablosu ve 11000 m<sup>3</sup> beton kullanılmıştır.



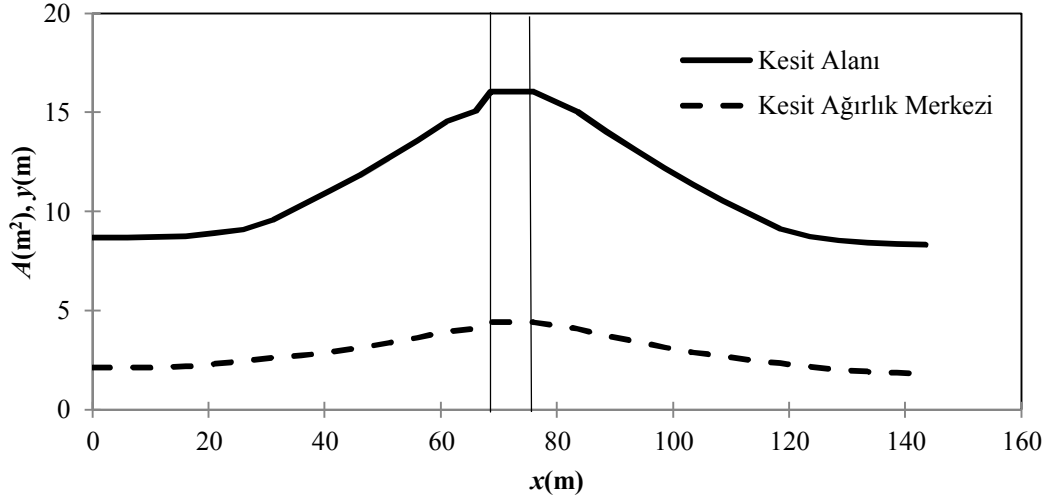
Şekil 2.7. Kesitlere göre boyuna öngerme donatı demeti sayısı

## 2.2. Alan ve Eylemsizlik Momentleri

Çizelge 2.1’de köprünün kesitlerinin kenar mesnete uzaklığı, ağırlık merkezi, alanı ile eylemsizlik momenti değerleri verilmektedir. Yapının tek ana ayak üzerinde kesitlerinin alan ve ağırlık merkezlerinin değişimi Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Köprünün  $x$ -koordinatı karaya oturan arka ucundan seçilmiştir.  $x=76$  m’de (ana ayak üzerinde) kesit alanı, ağırlık merkezi ve eylemsizlik momenti en büyük değere ulaşmaktadır.

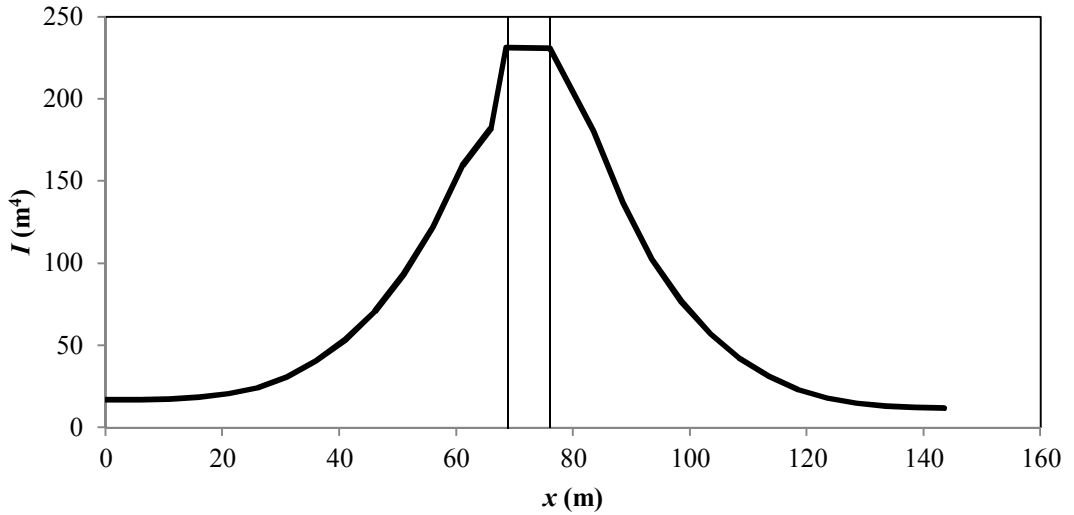
Çizelge 2.1. Köprü kesit özellikleri

KESİT	KENAR MESNETLERDEN BAŞLAYAN UZAKLIK (m)	AĞIRLIK MERKEZİ $y$ (m)	ALAN $A$ (m <sup>2</sup> )	EYLEMSİZLİK MOMENTİ $I$ (m <sup>4</sup> )
26	143,5	1,828	8,324	11,729
24	138,5	1,851	8,351	12,082
22	133,5	1,920	8,431	13,184
20	128,5	2,034	8,565	15,133
18	123,5	2,192	8,752	18,110
16	118,5	2,358	9,148	23,072
14	113,5	2,509	9,832	31,142
12	108,5	2,695	10,569	42,132
10	103,5	2,914	11,360	56,970
8	98,5	3,164	12,204	76,749
6	93,5	3,444	13,102	102,809
4	88,5	3,753	14,053	136,759
2	83,5	4,091	15,057	180,554
0	79,0	4,410	16,046	230,745
1	76,0	4,413	16,050	231,086
3	73,0	4,111	15,087	182,613
5	68,5	3,957	14,552	159,636
7	66,0	3,653	13,602	122,164
9	61,0	3,380	12,706	93,104
11	56,0	3,137	11,863	70,729
13	51,0	2,926	11,073	53,712
15	46,0	2,748	10,336	40,852
17	41,0	2,625	9,574	30,821
19	36,0	2,485	9,101	24,491
21	31,0	2,329	8,914	20,943
23	26,0	2,200	8,762	18,275
25	21,0	2,149	8,701	17,267
27	16,0	2,126	8,674	16,837
28A	11,0	2,126	8,674	16,837
30	6,0	2,126	8,674	16,837



Şekil 2.8. Köprü boyunca değişken kesit alanı  $A$  (m<sup>2</sup>) ve kesit ağırlık merkezi  $y$  (m)

Köprüyü oluşturan kesitlere ait eylemsizlik momenti değişimi Şekil 2.9'da verilmiştir. Köprü boyunca eylemsizlik momenti büyük değişim göstermektedir. Burada, betonun çatlama ve köprünün göçmeye kadar simetrik davrandığı varsayımları yapılmıştır.



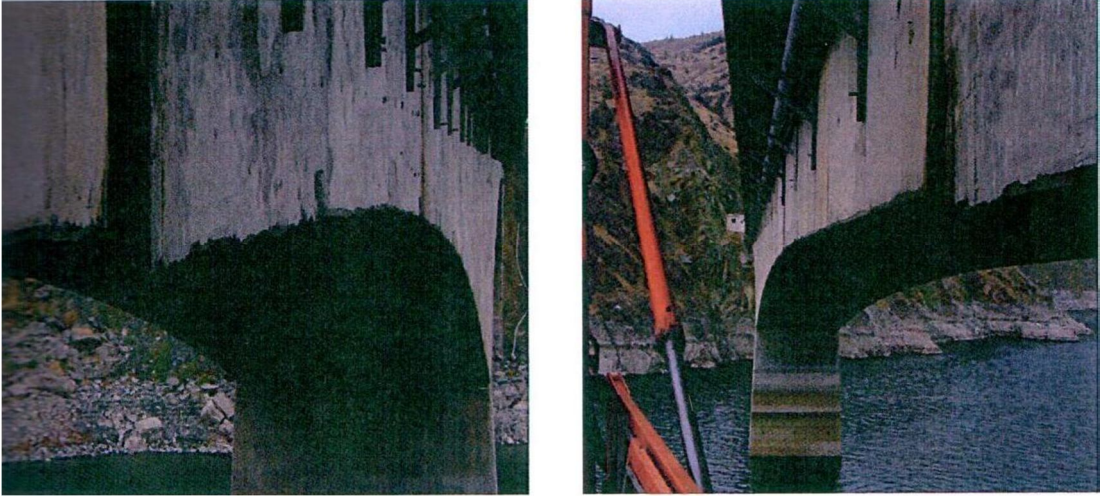
Şekil 2.9. Köprü boyunca eylemsizlik momenti  $I$  (m<sup>4</sup>)

### 3. KÖPRÜDE ZAMANLA OLUŞAN HASARLAR

Kömürhan Köprüsünün onarım – güçlendirme projelerinin hazırlanması için Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından açılan ihaleyi Yüksel Domaniç Mühendislik Limited Şirketi kazanmıştır. Y. Domaniç tarafından 8-9 Kasım 2007 (Domaniç, Y, 2008) tarihinde iki günlük bir arazi çalışması ile köprüde o güne kadar gerçekleşen hasarlar, bir ön inceleme raporu kapsamında köprünün onarım güçlendirme projesinin hazırlanması için gereken veriler elde edilmeye çalışılmıştır.

Bu rapor kapsamında konsollardaki yerdeğiştirme, kaplama, bordür, korkuluk, genişleme derzi, mafsal, kutu kesitli döşeme, mesnet, drenaj, orta ayak, temel, kenar mesnet hasarları elde edilmeye çalışılmıştır. Bu rapor sonucunda:

- Köprü kenar ve ortasında genişleme derzi bölgesinden aşağıya su akışı söz konusudur. Bu durum beton içerisinde yer alan donatının korozyonu açısından önemlidir. Orta mafsal bölgesinde olan su akışı burada yer alan çelik mafsal elemanların paslanmasına neden olmakta bu da sistemin düzgün çalışmasına engel olmaktadır.
- Köprü Malatya yönü kenar mesnet geri dolgusunda oturma olduğu görülmüştür.
- Yerinde yapılan gözlem ve ölçümlerle Malatya yönü konsol tabanının Elazığ yönü konsol tabanına göre 8-10 cm ye varan ölçülerde daha aşağıda olduğu belirlenmiştir. Bu kot farkı yanısıra genişleme açıklığı da kutu tabanından tavanına doğru gidildikçe azalmaktadır. Bu durum konsol ucunun bir miktar döndüğü anlamına gelmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Köprünün konsol ucunun dönmesi

- Yüksel Domaniç mühendisliğin yaptığı ölçümlere ek olarak Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü tarafından 12.31.2002-9.04.2007 arasında yapılan 11 adet nivelman ölçümlerinin sonucunda köprünün orta mafsalsal kısmının kenar mesnetlere göre yaklaşık 12-13 cm aşağıda olduğu görülmüştür.



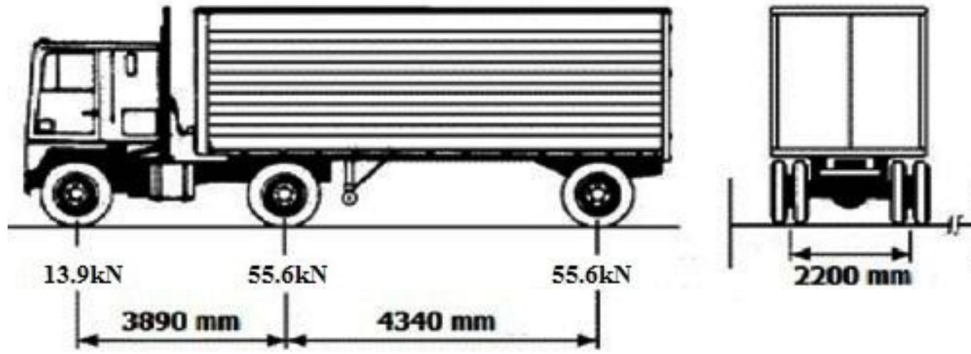
#### 4.KÖPRÜ ANALİZİ

Köprü dengeli konsol sistemiyle yapılmıştır. Köprünün kendi ölü yükünün yanı sıra ek ölü yükler, ortalama 90 mm asfalt kalınlığı, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek olarak etki eden ağırlıklardır. Ek olarak etki eden ağırlıklar 31 kN/m (Bayraktar ve diğ. 2009 a,b) köprü genişliği 11,5 m'ye bölünürse birim alandaki yayılı yük  $31 \text{ (kN/m)/11,5(m)}=2,7 \text{ kN/m}^2$  olarak dikkate alınmıştır. Köprüdeki en büyük zorlanmayı bulmak amacı ile kaldırımlarda  $2,94 \text{ kN/m}^2$  (300 kg/m<sup>2</sup>) yaya yükü ve trafik yüklemesi olarak arka arkaya yaklaşık 8,5 m boyunda 250 kN ağırlığında H<sub>30</sub>S<sub>24</sub> kamyonundan (Şekil 4.1) iki şeritte köprü yarı uzunluğu 143,5 m alındığında, kamyon sayısı

$$(143,5/8,5) \times 2 = 34 \text{ adet} \quad (4.1)$$

bulunur. Köprü genişliği 8,5 m alındığında yayılı yük

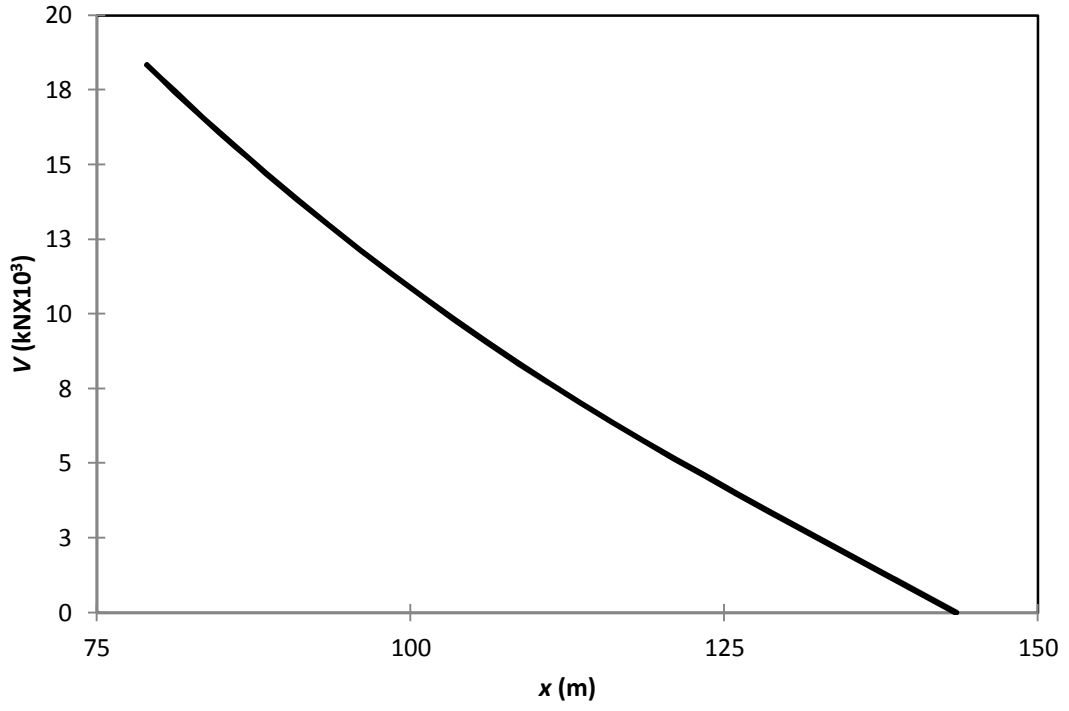
$$34 \times 250 / (8,5 \times 143,5) = 6,97 \text{ kN/m}^2 \text{ elde edilir.} \quad (4.2)$$



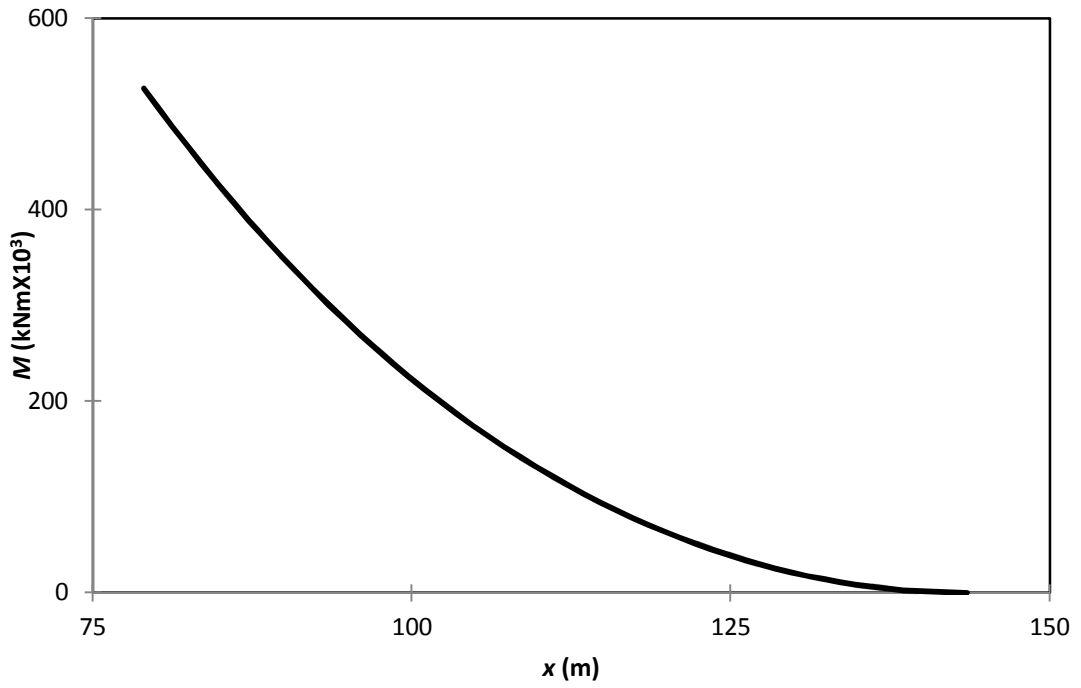
Şekil 4.1. En elverişsiz yükleme durumu için H<sub>30</sub>S<sub>24</sub> kamyonu

##### 4.1. Köprü Moment (*M*), Kesme (*V*) Kuvveti Diagramları

Köprünün asfalt, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek ölü yükleri ve kendi ağırlığından dolayı oluşan eğilme momenti ve kesme kuvveti diyagramlarına ait grafikler Şekil 4.2'de verilmiştir.



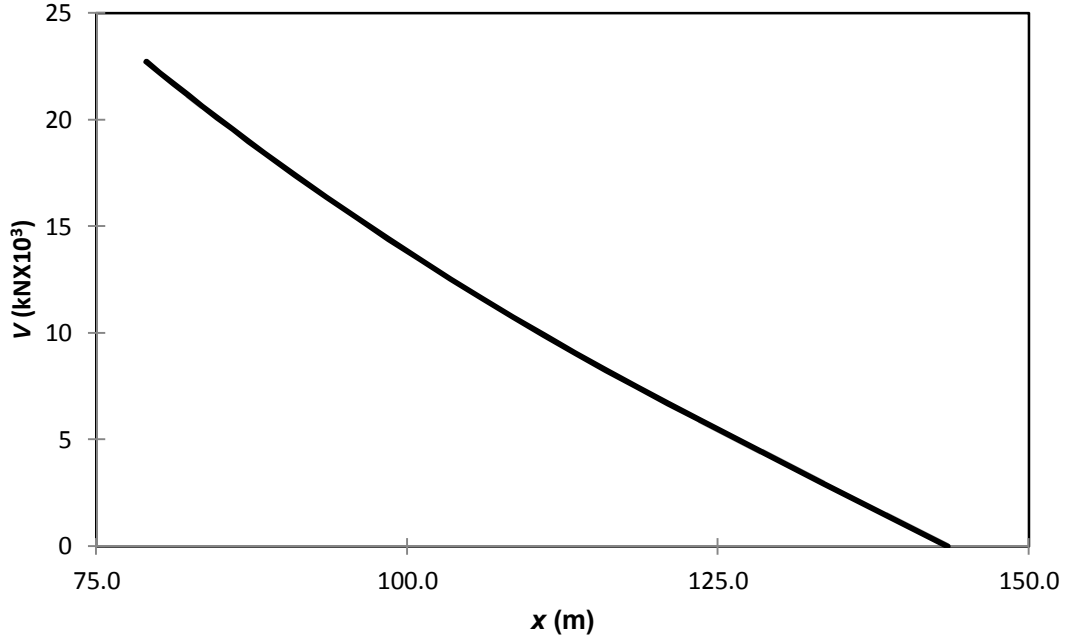
a)



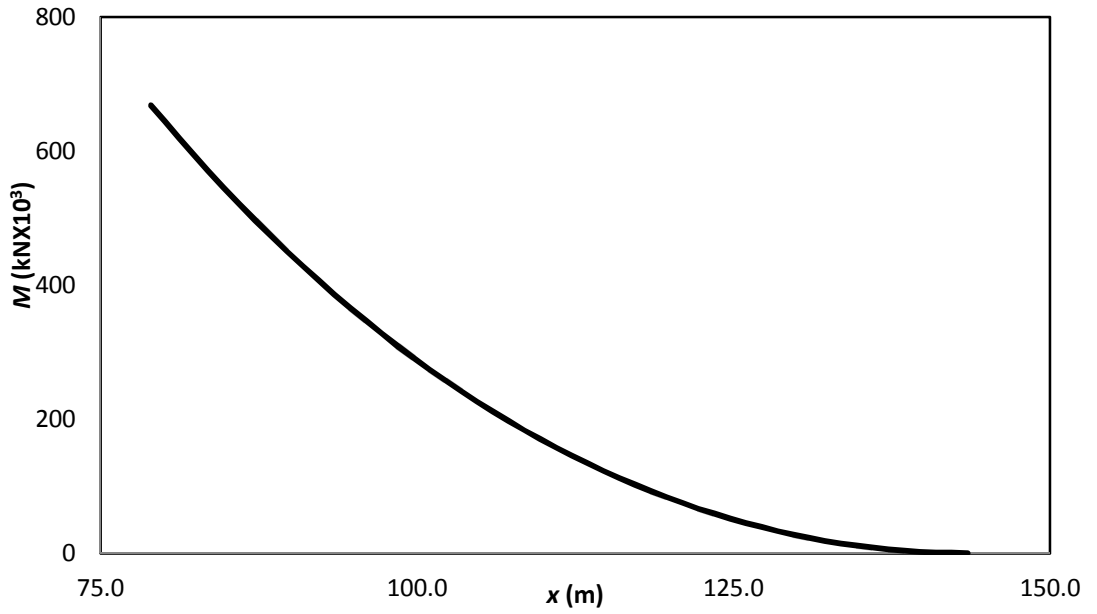
b)

Şekil 4.2. Kendi ağırlığı ve ek ölü yüklerden dolayı oluşan a) kesme kuvveti ( $\text{kN} \times 10^3$ ), b) eğilme momenti diyagramı ( $\text{kNm} \times 10^3$ )

Köprünün tamamen trafik yüklü olması durumunda,  
 $1,5 \times 2 \times (2,94 + 2,7) + 8,5 \times (2,7 + 6,97) = 99,12 \text{ kN/m}$  (4.3)  
 çizgisel yük olarak trafik yükü altında kesme kuvveti, eğilme momenti diyagramları  
 Şekil 4.3’de verilmiştir.



a)



b)

Şekil 4.3. Trafik yükü altında a)kesme ( $V$ ) kuvveti, b)eğilme momenti ( $M$ ) diyagramları

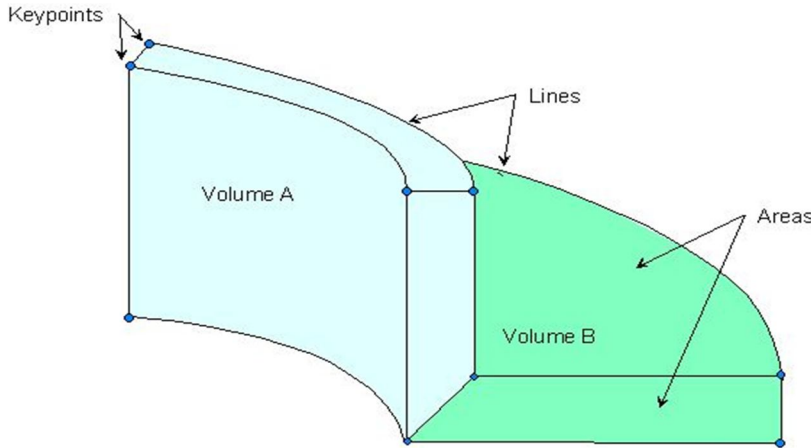
Kömürhan köprüsünün kendi ağırlığı ve ek ölü yüklerinden kaynaklı konsol tarafında ana ayak yüzünde kesme kuvveti  $18,3 \times 10^3$  kN (Şekil 4.2a), eğilme momenti  $526,9 \times 10^3$  kNm (Şekil 4.2b) olarak bulunmuştur. Trafik yükleri altında konsol tarafında ana ayak yüzünde kesme kuvveti  $22,7 \times 10^3$  kN (Şekil 4.3a) ve eğilme momenti  $668,6 \times 10^3$  kNm (Şekil 4.3b) olarak hesaplanmıştır.

## 5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Köprünün modelini oluşturmak için ANSYS v.12.1 sonlu elemanlar yazılımı seçilmiştir. Modelleme, gerçek bir sistemin bilgisayar ortamında oluşturularak özelliklerinin ve davranışının incelenmesidir. Böylece oluşturulan model üzerinde çalışmalar yapılarak, sistemin tasarım aşamasında dikkate alınan yük ve davranışıyla zaman içerisinde gerçekleşen öngerme kaybı elde edilebilir.

Bu çalışmanın geniş bir kısmını oluşturan modelleme işlemi ile ilgili olarak ANSYS v.12.1 yazılımında model oluşturma yöntemleri hakkında birtakım genel bilgilerin verilmesinin gerekli olduğu öngörülmüştür.

Farklı bir program kullanılarak ya da gerekli sıralamadan yararlanarak katı model oluşturulabilir. ANSYS v.12.1 programında ana menüde bulunan, Preprocessor (/PREP7) menüsüyle ya da komutlar yardımıyla model oluşturulabilir. Katı model oluşumunda sıralı bir yapılanma vardır. Anahtar noktaları (keypoints) ANSYS de modellemenin temelini oluşturmaktadır. Anahtar noktalarından çizgilerin (lines), çizgilerden alanların (areas), alanlardan hacimlerin (volumes) meydana geldiği aşağıdan yukarıya doğru bir yapılanmayla katı model oluşturulmaktadır (Şekil 5.1). Ayrıca malzeme kütüphanesi ile var olan katı hacimsel modellerden yararlanılarak yukarıdan aşağıya doğru bir yapılanmayla da katı model oluşturulabilmektedir.



Şekil 5.1. Katı model elemanları

Köprüyü oluşturan kutu kesitlerin kiriş yüksekliği, gövde genişliği, alt ve üst döşeme kalınlıklarının değişken ve farklı olmasından dolayı varolan hacimsel modellerden yararlanılamamıştır. Yani anahtar noktalarından başlanarak, hacim elemanlarına kadar adım adım modelleme işlemi aşağıdan yukarı gerçekleştirilmiştir.

Çizgiler (lines), anahtar noktalarında olduğu gibi etkin koordinat sisteminde tanımlanabilen ve katı modelin kenarlarını oluşturan modelleme elemanlarıdır. Oluşturulmaları anahtar noktalarıyla sınırlandırılmışlardır. Çizgi elemanı kiriş veya çizgiden alan oluşturmak için gereklidir. Çizgi elemanları, modelin özelliğine bağlı olarak oluşturulmalarında farklılıklar göstermektedir.

Alanlar (areas), üç boyutlu katı modelin yüzeyleri için veya iki boyutlu katı modelleri plaka (simetrik olmayan katı model, v.b) oluşturmak için kullanılır. Yapılacak olan modele uygun olarak iki boyutlu analiz seçenekleri kullanılabilir. Alan elemanları, kenarlarında çizgi, köşelerinde ise anahtar noktalarını barındırırlar. Alanlar, alan tanımlamak için veya alan elemanları yardımıyla hacim elemanları oluşturmak için gereklidirler. Bunun için gerekli sayıda alan elemanı modellemek gerekmektedir.

Hacim (volumes) elemanları, üç boyutlu katı model elemanlarını gösterir. Hacim elemanı oluşturulması için önceden alan, çizgi, anahtar noktası elemanlarının oluşturulması gerekmektedir.

### **5.1. Malzeme Modelleri**

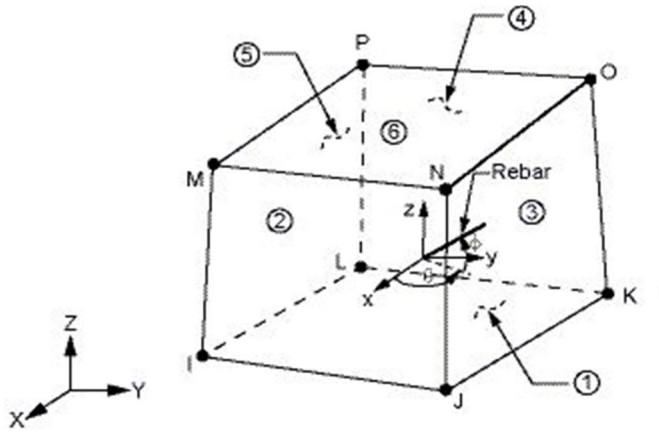
Köprünün modellenmesi sırasında, beton ve öngerme kabloları olmak üzere iki farklı malzeme modeli kullanılmıştır. Modellemede betonarme sistemin göçme anına kadar nonlineer eğilme davranışını tam olarak gösteren eleman tipi kullanılmıştır. ANSYS yazılımında beton modeli için yaygın olarak kullanılan SOLID65 eleman tipi bu davranışa son derece uygundur. Çalışmada gerilmesiz yardımcı donatı, beton elemanının içinde dağılmış olarak (smearing modelling) kabul edilmiş, donatı için

ayrıca bir eleman tipi kullanılmamıştır. Öngerme kabloları Link8 eleman tipiyle modellenmiştir.

### 5.1.1. Beton modeli

Modellenen köprü de, beton eleman olarak Solid65 eleman modeli seçilmiştir. SOLID65, programda yapısal katı eleman olarak kullanılmaktadır. SOLID65, 3 boyutlu modellemede donatılı ve donatısız olarak kullanılır. SOLID65 elemanı, 6 yüzeye, 8 düğüm noktasına, düğüm noktalarının her birinde 6 serbestlik derecesine sahiptir (Şekil 5.2) .

SOLID65 elemanının önemli davranışlarından birisi nonlinear malzeme özelliğidir. Üç yönde çekmede çatlak oluşumu, basınçta ezilme sığası, plastik yer değiştirme ve sünme özelliğine sahiptir. Ayrıca donatı çekme ve basınç yeteneğine sahip olup kesme dayanımı yoktur.

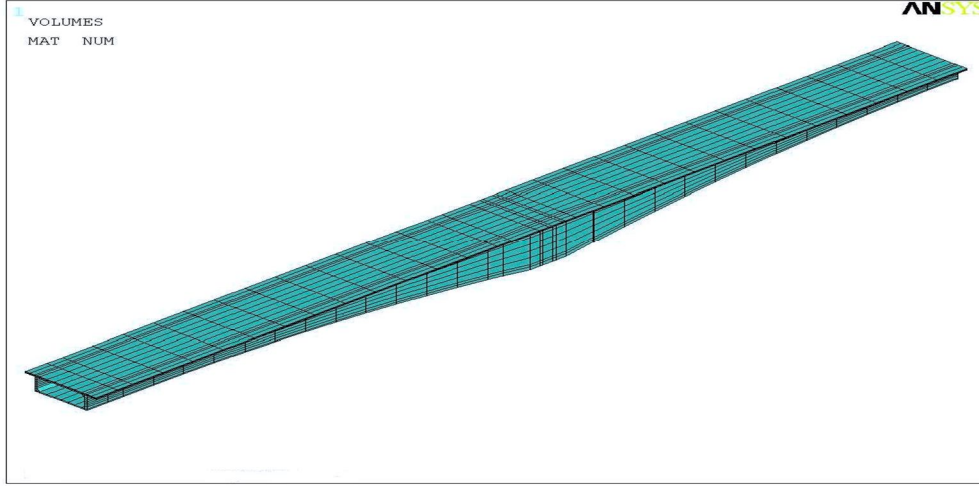


Şekil 5.2. SOLID65 eleman tipinin geometrik özelliği

Solid65 beton malzemesi ilk olarak izotropik kabul edilir. Donatılı olarak kullanıldığı zaman, donatı eleman boyunca hacimsel olarak dağıtılarak kullanılmaktadır.

Modellenen köprü de, 18970 adet hacimsel eleman kullanılmıştır (Şekil 5.3). Herhangi bir modelleme elemanı (lines, areas, volumes) ağlanarak (meshlenerek)

eleman oluşmaktadır. Elemanlar ağlanmadan (meshlenmeden) önce eleman özellikleri olan, gerçek sabitler (real constants), malzeme özellikleri (material models) ve eleman tiplerinin (element types) atanması işlemlerinin yapılması gereklidir.



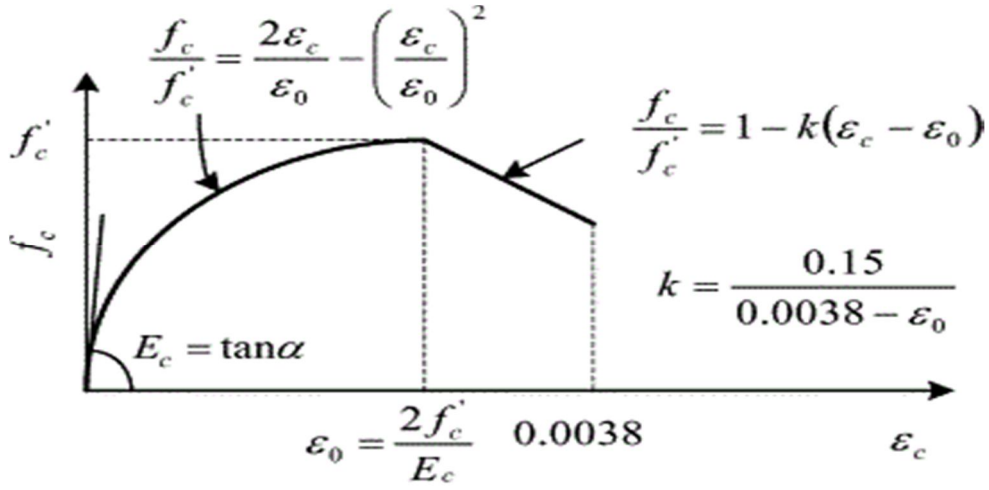
Şekil 5.3. Köprünün ANSYS modeli

### 5.1.2. Betonun matematiksel modeli

Betonun davranışı incelendiğinde, artan yükler ile çatlakların oluşması sonucunda rijitlik azalır ve dayanımının sonuna ulaştığında ise daha az yüklü liflere yük aktarımı oluşur. Böylece yeniden dağılım gereğince taşınan yükün azaldığı ve en büyük basınç dayanımından daha düşük bir seviyede beton ezilmesi sonucunda göçme olduğu gözlemlenmektedir.

Betonun bu davranışı için, deney sonuçlarına dayanan birçok matematiksel model öne sürülmüştür. Hognestad, Kent ve Park, Uzumeri ve Sheikh matematiksel modelleri bunlardan bazılarıdır (Ersoy, U., 2000). Bu çalışmada, bu modeller arasından sargısız beton için geliştirilen Hognestad modeli (Şekil 5.4) kullanılmıştır.



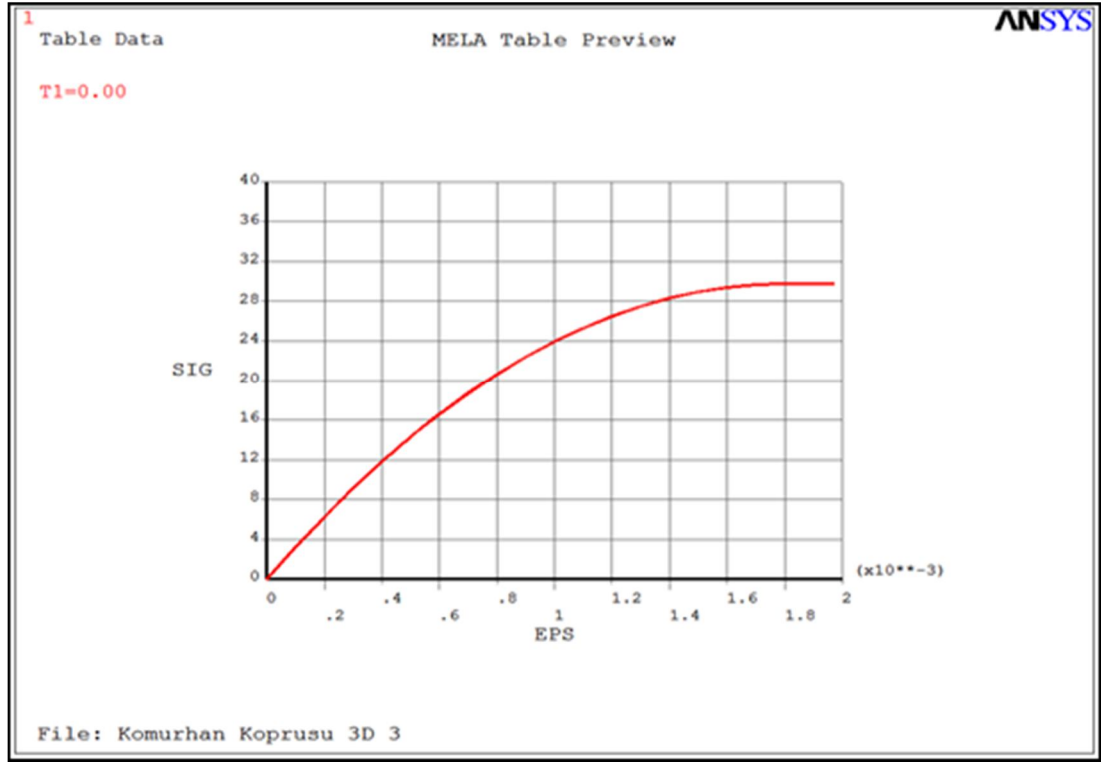


Şekil 5.4. Hognestad beton modeli

Köprü tasarımında, basınç dayanımı 35 MPa (Bayraktar ve diğ. 2009a,b) olan beton kullanılmıştır. Bu amaçla, C35 betonun Elastisite modülü olarak 32000 MPa (Bayraktar ve diğ. 2009a,b) lineer olarak tanımlanmıştır. TS500 ise  $E=32500\sqrt{f'_c}+14000=33227$  MPa vermektedir. Hognestad modeli betonun basınç altındaki davranışını modellemek için kullanılmıştır. ANSYS yazılımında beton malzemesi olarak multilineer izotropik hardening seçilerek nonlineer Hognestad beton modeli için elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme değerleri tanımlanmıştır.

Kendi ağırlığını bulabilmek için betonun yoğunluğu  $23,5 \text{ kN/m}^3$  (Bayraktar ve diğ. 2009a,b) olarak alınmıştır. Kendi ağırlığından dolayı oluşan ağırlığı, Z yönünde yerçekimi fonksiyonu tanımlanarak modele aktarılmıştır. Betonun Poisson oranı 0,2 alınmıştır.

ANSYS programına aktarılan Hognestad modeli Şekil 5.5'de gösterilmektedir.



Şekil 5.5. ANSYS de Hognestad beton modeli

## 5.2. Gerçek Sabitler

Modellenmiş olan elemanlara ait ek geometrik özellikleri tanımlamak için gerçek sabitler (Real Constants) kullanılmaktadır. Modellenen elemanların özelliklerine bağlı olarak tanımlanması gerekli olan gerçek sabitlerde farklılıklar göstermektedir. Örnek olarak, kiriş elemanı iki düğümün birleşmesi ile tanımlanır. Bu sadece kirişin uzunluğunu tanımlar. Kirişin profil özelliklerini belirlemek için, alan ve eylemsizlik momenti gibi, gerçek sabitleri kullanmak gerekir.

SOLID65 eleman tipinin gerçek sabitlerinde bir adet katı, üç adet donatı modeli olmak üzere dört adet model tanımlanabilmektedir. Üç adet donatı modeli, gerekli bilgiler girilerek betonun içine dağılmış olarak kullanılır. Bu şekilde ayrıca donatı malzemesi tanımlamaya gerek yoktur. Donatı elemanı olarak tanımlanması gereken gerçek sabit özellikleri şunlardır;

1. Donatının malzeme numarası
2. Hacim oranı: donatı hacminin toplam hacme oranı
3. Oryantasyon açıları: Donatının beton içerisindeki konumunu, eleman koordinat sisteminde derece olarak tanımlanmasını sağlar.

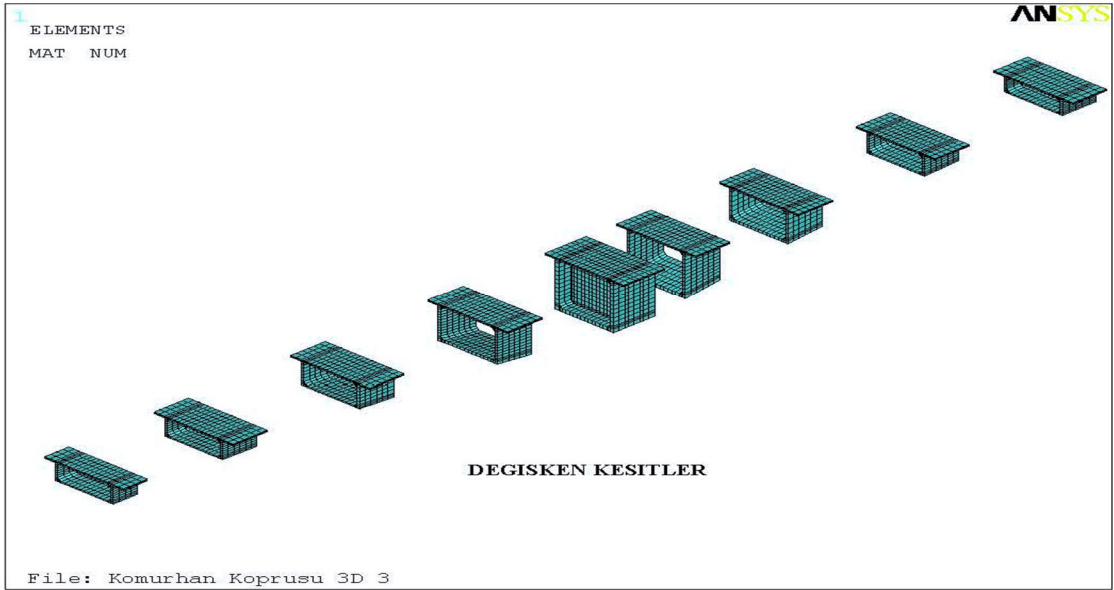
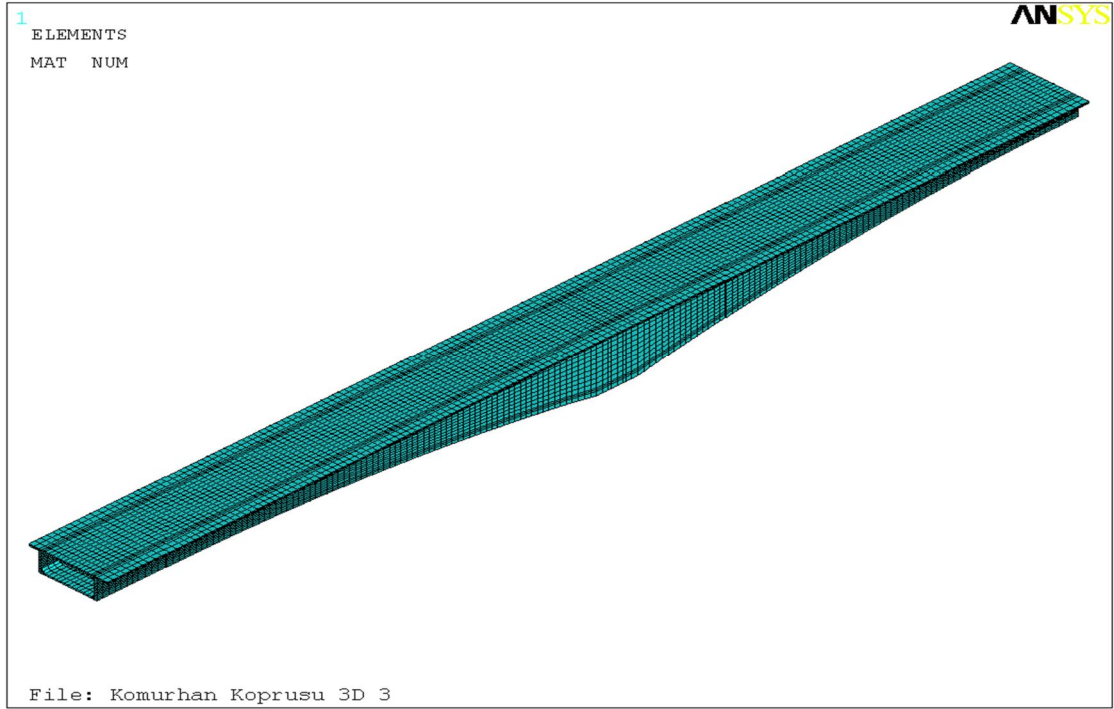
### 5.3. Sonlu Eleman Ağı

Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle bölgenin tamamı için sonuçların elde edildiği sayısal bir analiz tekniğidir.

Sonlu elemanlar analizinde, model elemanlarının sürekliliği korunmak suretiyle daha küçük elemanlara bölünerek çözüm yapılır. Sonlu elemanlar modelinde oluşturulan ağ boyutu (mesh boyutu) çözümün hata payının kabul edilebilir seviyede kalması için önemlidir. Ağ oluşturma işlemi tamamen program kontrolünde veya programa ağın boyutları belirtilerek ağ oluşturma işlemi yapılır.

Değişken kesitli köprüde, mesnetlerde daha sık olmak üzere farklı sayılarda sonlu elemanlara bölme, ağlama (mesh) işlemi yapılmıştır. Ağlama işleminden önce programın daha düzgün ağ yapabilmesi ve öngerme kablolarının daha rahat tanımlanabilmesi için hacim elemanlar, gövde de 7 adet, alt döşeme de 10 adet ve üst döşeme 14 adet belirtilmiştir. Üst döşemede öngerme kablolarının yerleştirilebilmesi için kalınlık boyunca 2'ye bölünerek ağlama işlemi öncesinde kılavuz niteliğinde bölme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemden sonra programa en az boyut girilerek eleman ağı oluşturulmuştur. Şekil 5,6'da oluşturulan sonlu eleman ağı gösterilmektedir.

Sonlu elemanlar ağının oluşturulmasından önce elemanlara ait, eleman özelliği, malzeme özelliği ve gerçek sabit değerlerinin atanması işlemi yapılmalıdır.

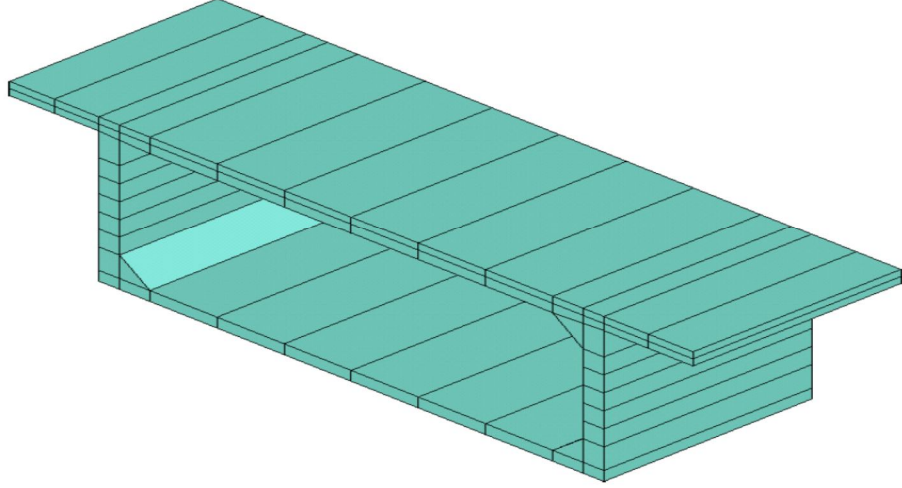


Şekil 5.6. Köprü boyunca değişken kesitler

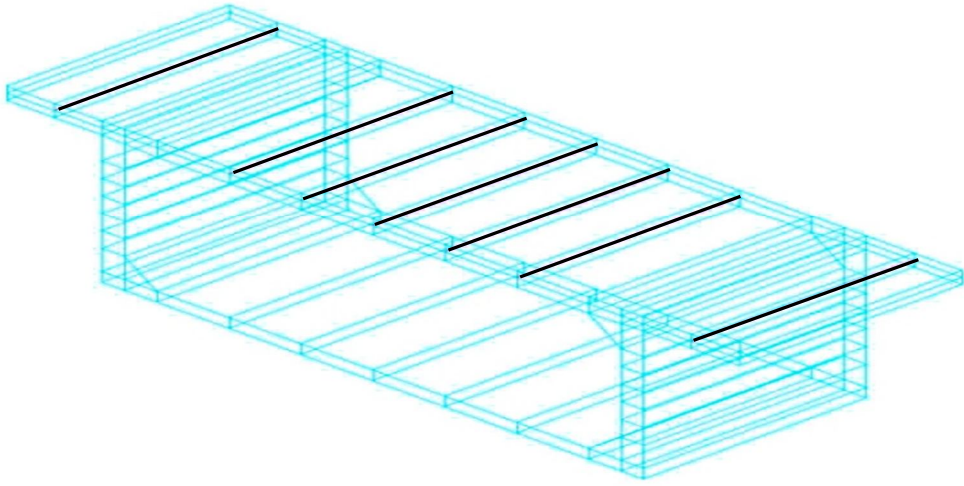
#### 5.4. Öngerme Kablolarının Modellenmesi

Modelleme de öngerme kabloları Link8 çizgi elemanı olarak tanımlanmıştır. Link8, ANSYS programında mühendislik uygulamalarında donatı olarak kullanılır. Bu eleman, kafes kirişleri, eğilebilir kabloları, bağlantı elemanlarını vs. modellemek için

de kullanılabilir. Link8 elemanının da her bir düğüm noktasında  $x$ ,  $y$ ,  $z$  yönlerinde üç yer değiştirme serbestlik derecesi vardır. Bu eleman tek eksenli çekme ve basınç özelliğine sahiptir.



a)



b)

Şekil 5.7. a) Kesit Gösterimi, b) Öngerme kablolarının kesit içerisindeki yerleşimleri (üst başlıktaki siyah çizgiler)

Modelde iki tabakalı üst başlık (Şekil 5.7a) ile öngerme kablolarının köprü üst başlığın orta noktalarına (Şekil 5.7b) yerleştirilmesi gösterilmiştir. Bu kesitler bölünerek hacimlerin çizgilerine öngerme kablolarının gerçek sabit (real constants) değerleri ve malzeme özellikleri atanmıştır. Gerçek durumdaki öngerme kablolarını


modellemek için bütün kesitlere toplam üst başlık donatı alanı 7'e bölünerek Link8 elemanı tanımlanmıştır.

Her bir kesitte bulunan öngerme kablosu alanı ve öngerme kuvveti özelliklerine göre gerçek sabitleri (Real constant) atanmıştır. Link8 elemanın gerçek sabitleri şunlardır;

1. Kesit alanları: Kesitlerde farklılıklar göstermektedir.
2. İlk uzama: Kabloları öngerme kuvvetlerinin verildiği kısımdır. Bunun için kablo özelliklerinin bilinmesi gereklidir.

Köprüde kullanılan 7 telli Ø15,2 mm çaplı büklüm (sarmal, toron, halat) kablonun teknik özellikleri Dywidag tanıtım kılavuzlarından şu şekilde alınmıştır.

Çizelge 5.1. DYWIDAG Ø15,2 mm çaplı çelik kablo teknik özellikleri



**Teknik Özellikleri**

		Ø15,2 mm (0,6")	
		EN 10138-3	ASTM A 416 Grade 270
Kopma dayanımı	N/mm <sup>2</sup>	1860	1860
Akma Sınırı (%0.1)*	N/mm <sup>2</sup>	1600	1582
Kesit Alanı	mm <sup>2</sup>	140	140
Birim Ağırlık	kg/m	1,095	1,102
Kopma Kuvveti	kN	260	260,7
Elastisite Modülü	N/mm <sup>2</sup>	195000	195000

$$E_s = 195 \text{ GPa}$$

$$\sigma = 1582 \times 0,7 \approx 1100 \text{ MPa}$$

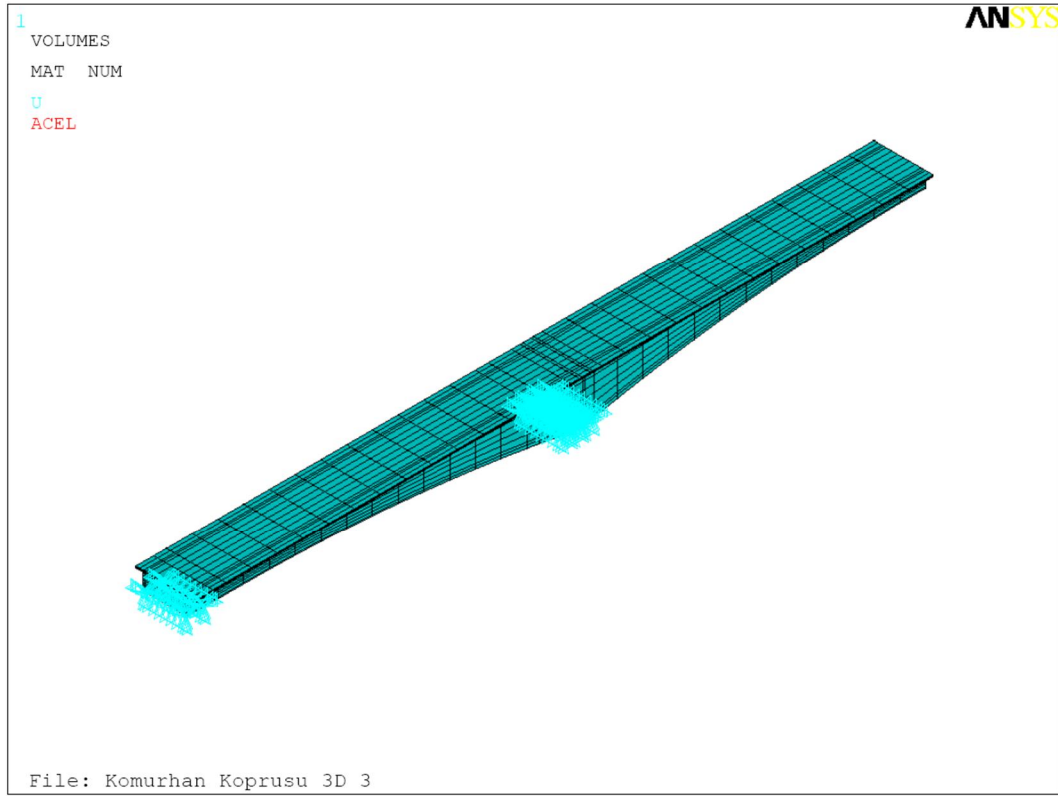
$$\epsilon = \sigma / E_s = 0,00564 \text{ (ilk uzama değeri)}$$

Öngerme kabloları, köprü kesitlerindeki üst başlık ağ elemanları sayılarıyla aynı tutularak Solid65 elemanlara düğümlerde birleştirilmiştir. Düğüm noktası birleştirme işlemi, Link8 ve Solid65 elemanlarının düğüm noktalarının birlikte hareket etmesini sağlamaktadır.

### 5.5. Sınır Koşulları

Köprünün ana ayağı ve kenar mesneti sabit mesnet olarak kabul edilmiştir. Ana ayağı oluşturan elemanların ve karaya temas eden uç anonun tabanındaki bütün düğüm noktalarında  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönlerindeki yerdeğişirmeler ve dönmeler tutulmuştur.

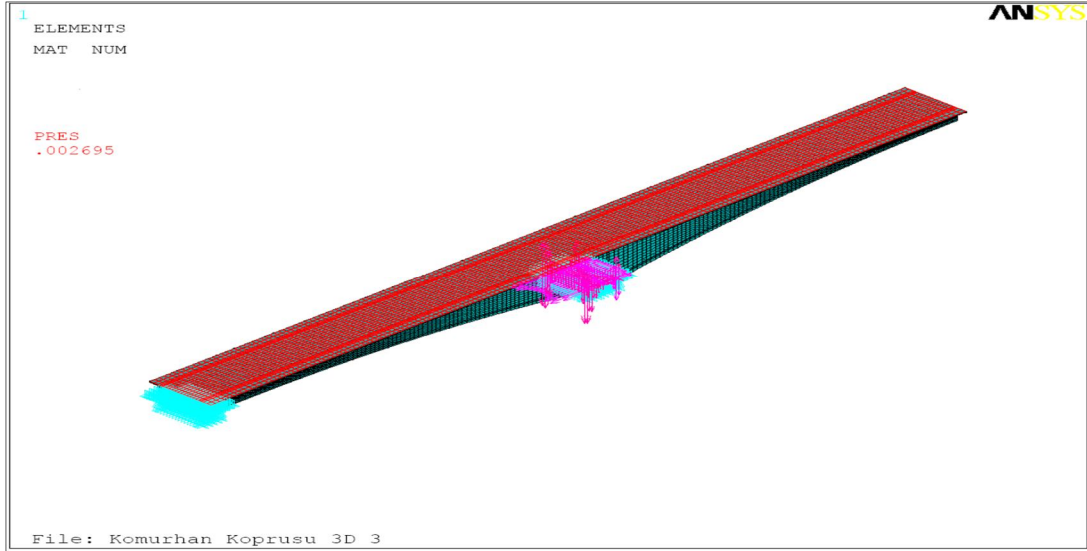
Şekil 5.8’de modele ait mesnet koşulları verilmiştir.



Şekil 5.8. Modele ait sonlu elemanlar ağı ve ana ayakta mesnetlenme

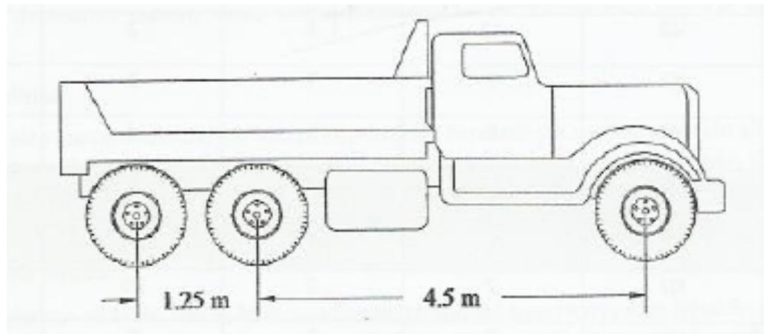
### 5.6. Yük Durumları

Asfalt, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek olarak etki eden ağırlıklar her bir parça için yaylı yük şeklinde (Sayfa 16)  $2,7 \text{ kN/m}^2$  olarak dikkate alınmıştır (Şekil 5,9).



Şekil 5.9. ANSYS’de Köprü ek ölü yük altında

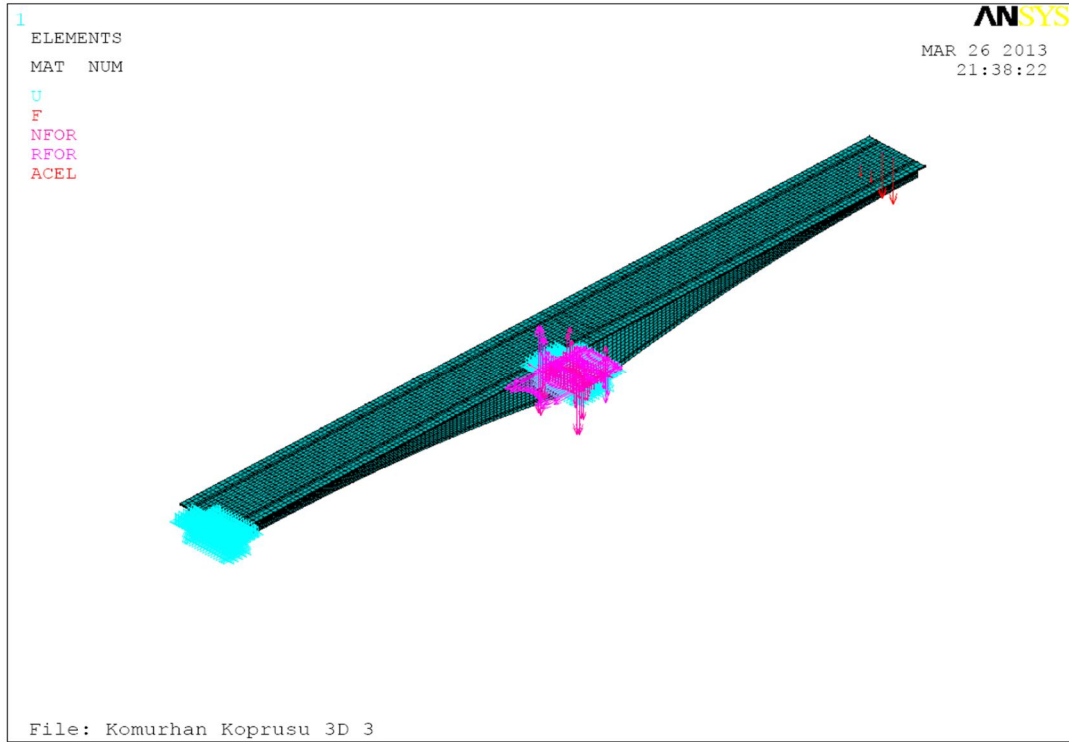
Köprüde onarım gerekip gerekmediğine karar vermek amacıyla köprü rijitliği deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen saha incelemesinde köprü konsollarına, Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü tarafından getirilen yaklaşık 200 kN ağırlığında kamyonun (Şekil 5.10) ağır tarafı konsolun 2 m ilerisine denk gelecek şekilde 1 adet kamyon yerleştirilmiştir. Konsol ucunun yaptığı en büyük yerdeğiştirme 0,010 m olarak ölçülmüştür (Domaniç, Y, 2008). Modelin rijitliğini karşılaştırabilmek amacıyla, köprü konsol uçlarına arka tekerlerin merkezi ile derz başlangıcı arasında 2 m boşluk bırakılıp her bir arka teker için 8 ton ( $1\text{kg}=9,81\text{ N}$ ), (SI birimlerinde) 78,5 kN yüklenmiştir (Şekil 5.11). Arka tekerlerin arası 1,25 m ve arka tekerler ile ön tekerlerin merkezi arasında 4,5 m uzaklık vardır (Şekil 5.10). Ön tekerlerin herbiri için 2 ton (19,6 kN) yüklenmiştir.



Şekil 5.10. Saha incelemesinde kullanılan kamyon



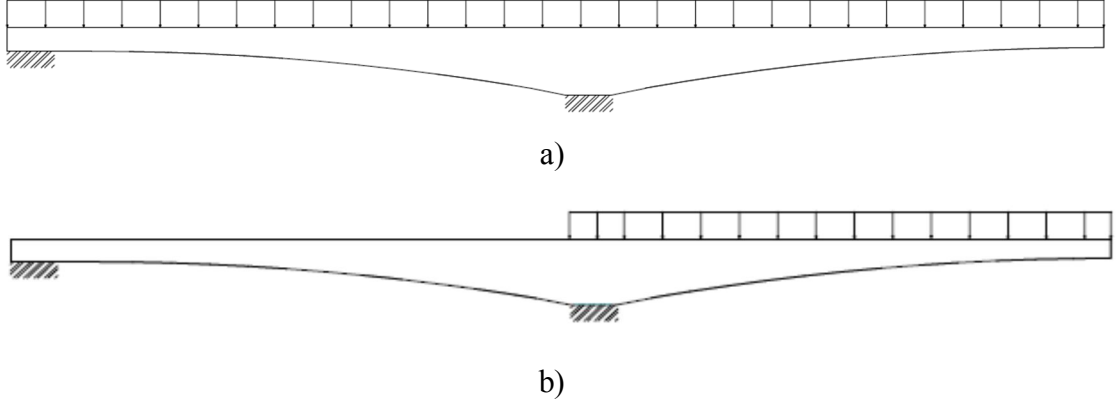
Yükleme yapılırken, akslar düğüm noktalarına tam olarak denk gelmediğinden en yakın düğüm noktalarına yüklemeye yapılmıştır.



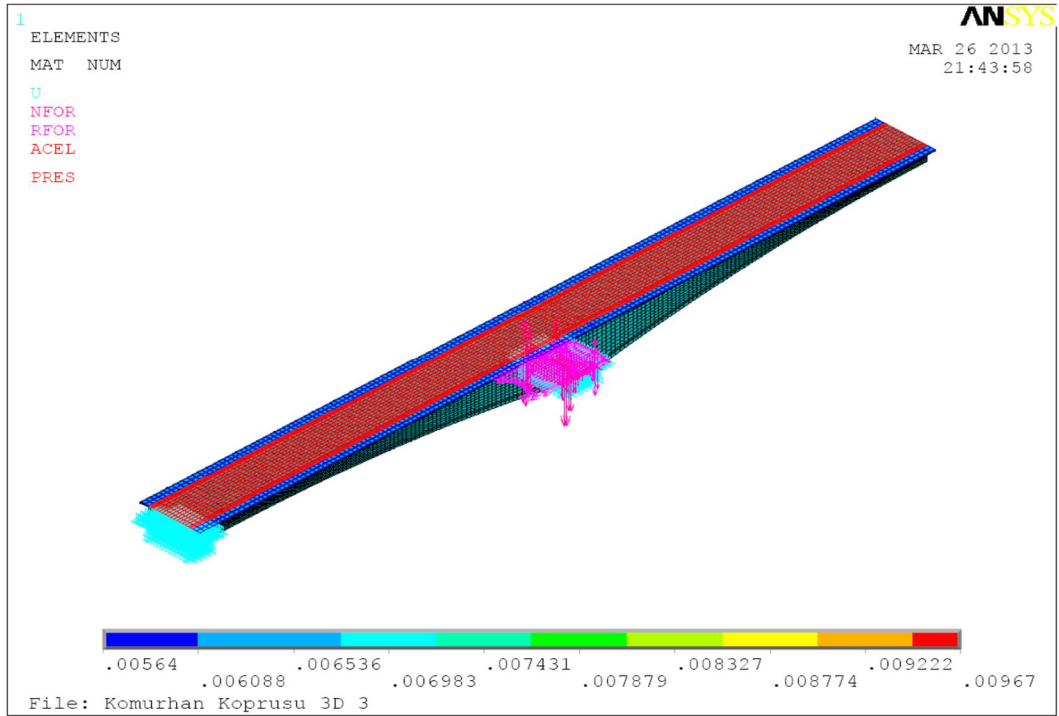
Şekil 5.11. Köprü mesnet koşulları ve kamyon yüklemesi (konsol ucundaki aşağı doğru kırmızı vektörler)

Köprüde en büyük zorlanmayı bulmak amacı ile ek ölü yüklerin yanısıra kaldırımlarda  $2,94 \text{ kN/m}^2$  ( $300 \text{ kg/m}^2$ ) yaya yükü ve trafik yüklemesi olarak arka arkaya yaklaşık  $8,5 \text{ m}$  boyunda  $250 \text{ kN}$  ağırlığında  $H_{30}S_{24}$  kamyon (Şekil 4.1). yüklemesi düşünülmüştür. İki şeritte (4.1) eşitliğinden 34 adet kamyon olmak üzere yayılı yük olarak (4.2) eşitliğinden  $6,97 \text{ kN/m}^2$  dikkate alınmıştır (Şekil 5.12).

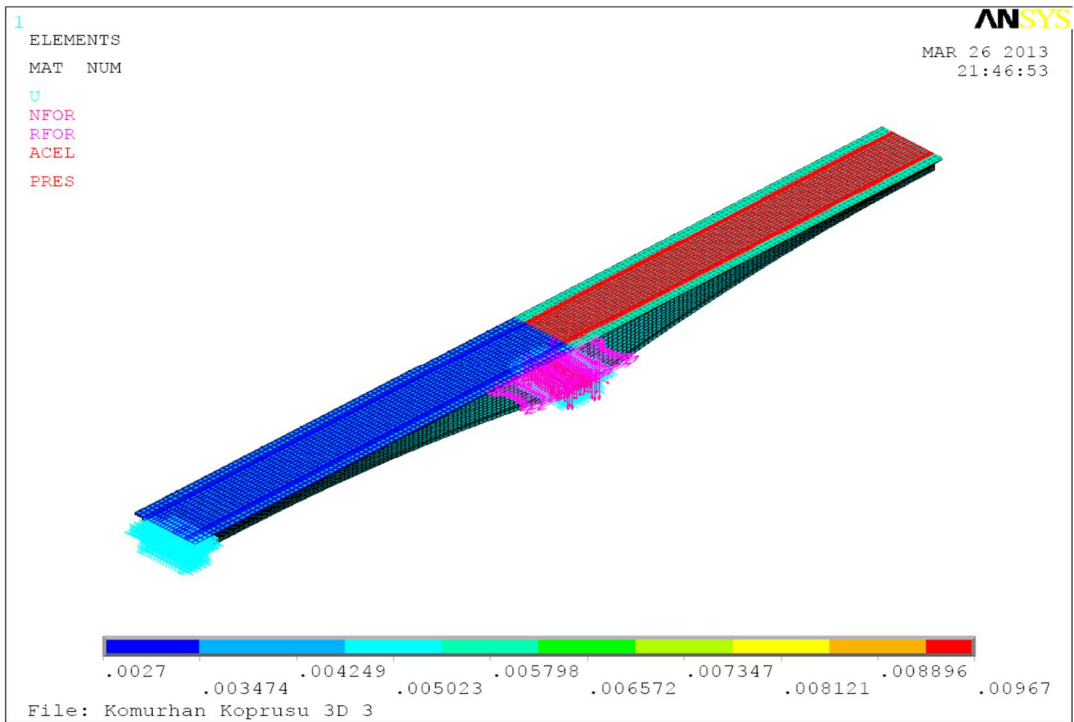
Köprüde elverişsiz yüklemeler olarak Şekil 5.12'de gösterilen iki tip yükleme yapılmıştır. Şekil 5.12a'da bütün kiriş trafik yükü ile yüklenmiştir. Şekil 5.12b'de ana açıklık konsolu trafik yükü ile yüklenmiştir.



Şekil 5.12. Köprüde elverişsiz yüklemeler, trafik yüklemeleri a) bütün açıklıklarda, b) ana açıklık konsolunda



a)



b)

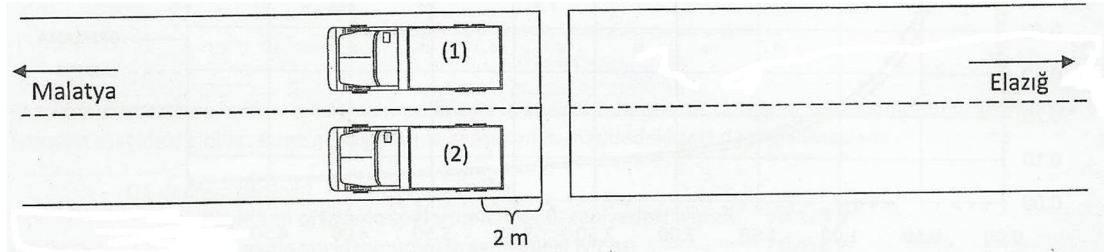
Şekil 5.13. ANSYS’de Köprüde elverişsiz yüklemeler, a) bütün açıklıklarda, b) ana açıklık konsolunda trafik yüklemesi

## 6. ANALİZ

Köprünün sonlu elemanlar analizi için lineer olmayan analiz yöntemi seçilmiştir. Bu modelin seçilmesindeki başlıca neden olarak betonun lineer olmayan bir davranış sergilemesidir. ANSYS'te lineer olmayan statik analizde, büyük yerdeğiştirme etkilerini dikkate alan çözüm seçeneği uygulanmıştır.

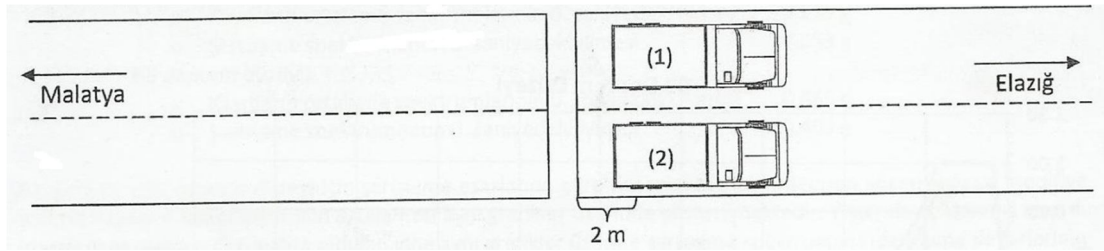
Kömürhan köprüsünün Yüksel Domaniç Mühendislik tarafından 2008 yılında tamamlanan ön inceleme raporu kapsamında yapılan saha çalışmasında 3 yükleme durumu gerçekleştirilmiştir. Bu yükleme durumları ön inceleme raporunda Y1, Y2 ve Y3 olarak isimlendirilmiştir.

Y1 yüklemesinde 2 adet yaklaşık 200 kN kamyon Malatya tarafı ana açıklık konsol ucuna yerleştirilmiştir (Şekil 6.1).



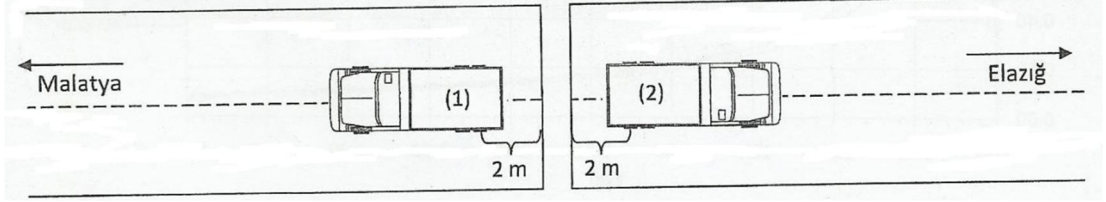
Şekil 6.1. Y1 yüklem durumu

Y2 yüklemesinde 2 adet yaklaşık 200 kN kamyon Elazığ tarafı ana açıklık konsol ucuna yerleştirilmiştir (Şekil 6.2).



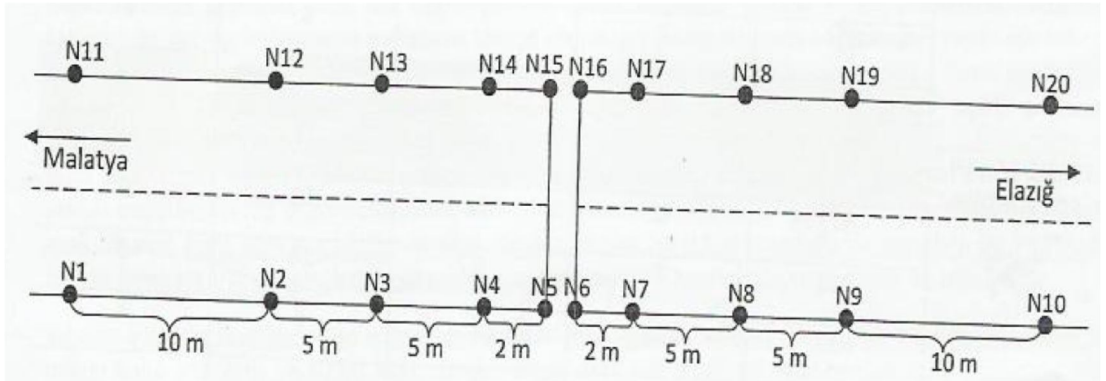
Şekil 6.2. Y2 yüklem durumu

Y3 yüklemesinde de iki konsol ucuna 1 adet yaklaşık 200 kN kamyon yüklenmiştir (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. Y3 yüklem durumu

Her üç yüklem durumunda da sağ ve sol bordür üzerinde toplam 20 noktada düşey yerdeğiştirme değerleri okunmuştur. Nokta numaraları aşağıdaki yerleşim planında gösterilmiştir (Domanıç, Y, 2008).



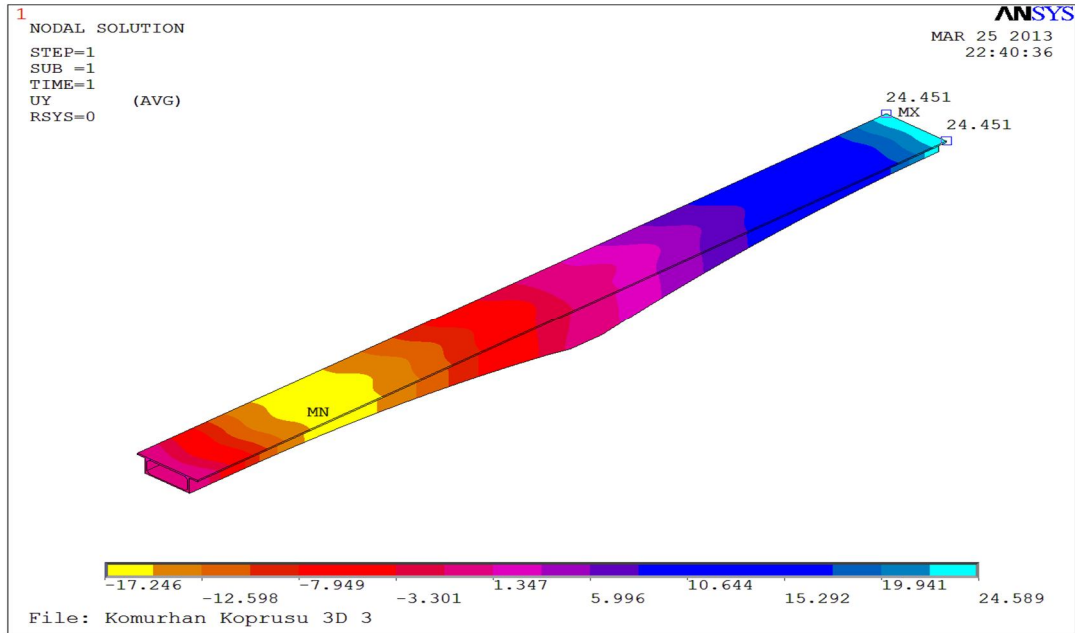
Şekil 6.4. Nokta numaraları yerleşim planı

Tez kapsamında ANSYS de köprünün simetrisinden dolayı tek ana ayak üzerinde bütün köprünün yarısının modellenmesi yapıldığından ve Y1 ile Y2 yüklemeleri bu yarı modelleme ile yapılamayacağından dolayı yalnız Y3 yüklemesi durumu ele alınmıştır.

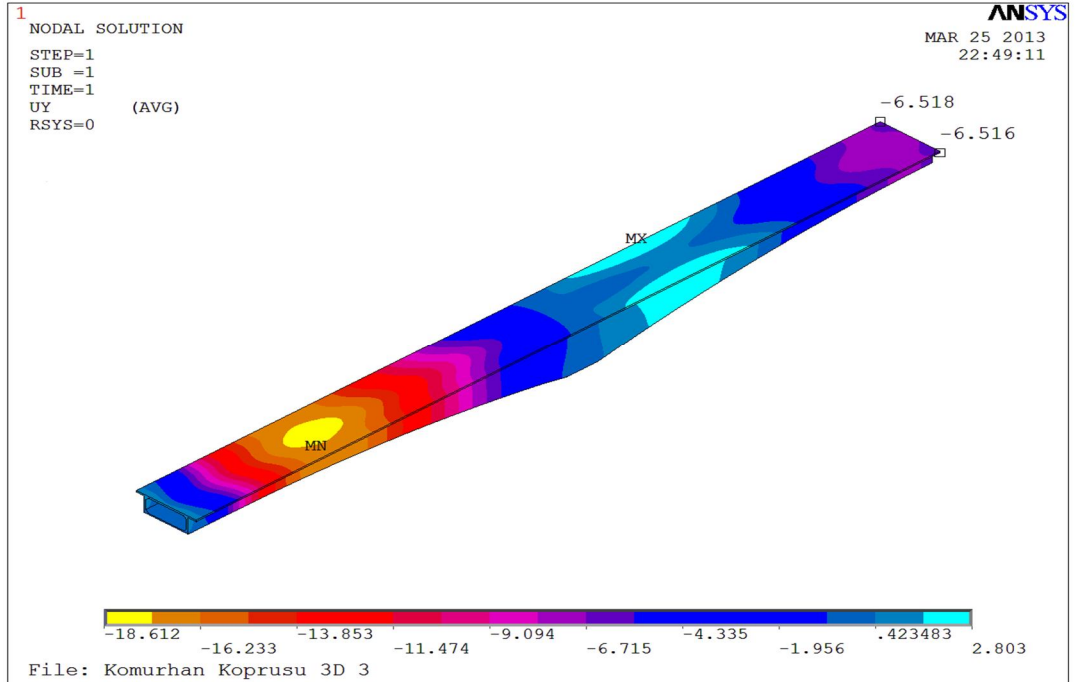
Çizelge 6.1. Deney ve ANSYS sonucu düşey yerdeğıştirmelerin karşılaştırılması

		Domaniç, 2009 mm	ANSYS analiz sonucu mm
		Y3	Y3
ELAZIĞ TARAFI,SAĞ BORDÜR	N6	9	9
	N7	9	9
	N8	8	7
	N9	6	6
	N10	4	4
ELAZIĞ TARAFI,SOL BORDÜR	N16	10	9
	N17	9	9
	N18	8	7
	N19	3	6
	N20	4	4

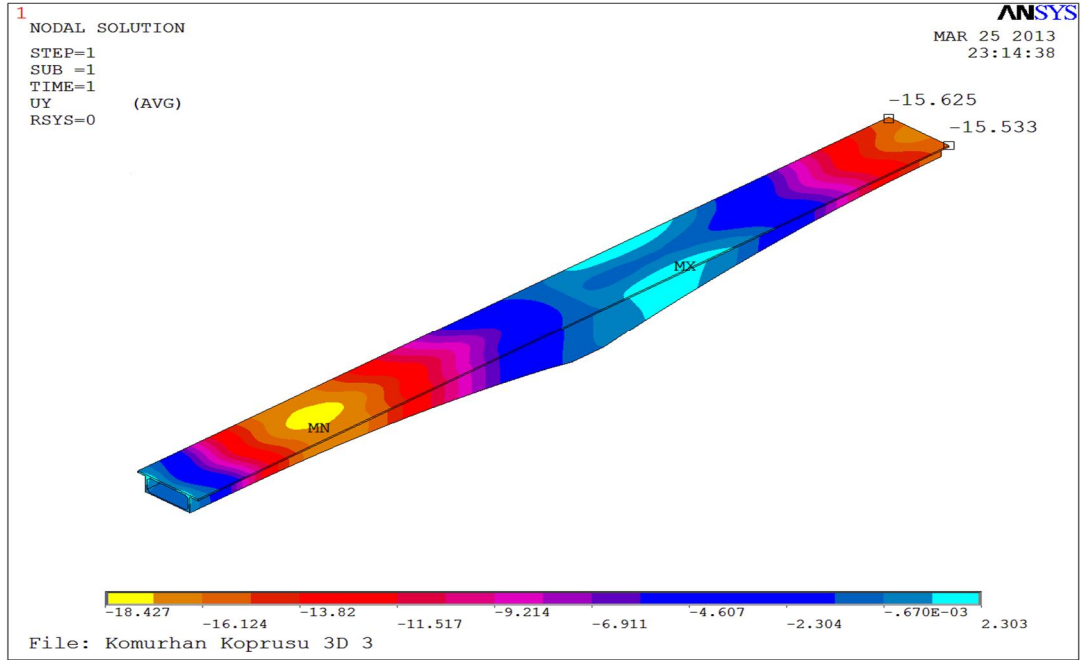
Köprü modelinin sonlu elemanlar yöntemiyle lineer olmayan analizi sonucunda, konsol ucundaki düşey yerdeğıştirme sadece kendi ağırlığı altında yukarı yönde 24,5 mm (Şekil 6.5) bulunmuştur. Kendi ağırlığı ve ek ölü yükler altında -6,5 mm (Şekil 6.6) bulunmuştur. Ölü yükler (kendi ağırlığı ve kaplama, asfalt, korkuluk gibi ek ölü yükler) ile konsol ucuna 1 adet 200 kN (Y3, Domaniç, Y, 2008) kamyon yüklemesi altında -15,6 mm (Şekil 6.7), ölü yükler ile 250 kN H<sub>30</sub>S<sub>24</sub> kamyonları ve yaya yükünden oluşan en büyük trafik yüklemesi (Şekil 5.12a) altında -74,9 mm (Şekil 6.8) bulunmuştur. En elverişsiz yükleme olarak ana açıklık konsolunda en büyük trafik yüklemesi (Şekil 5.12b) altında -79,4 mm (Şekil 6.9) yerdeğıştirme elde edilmiştir.



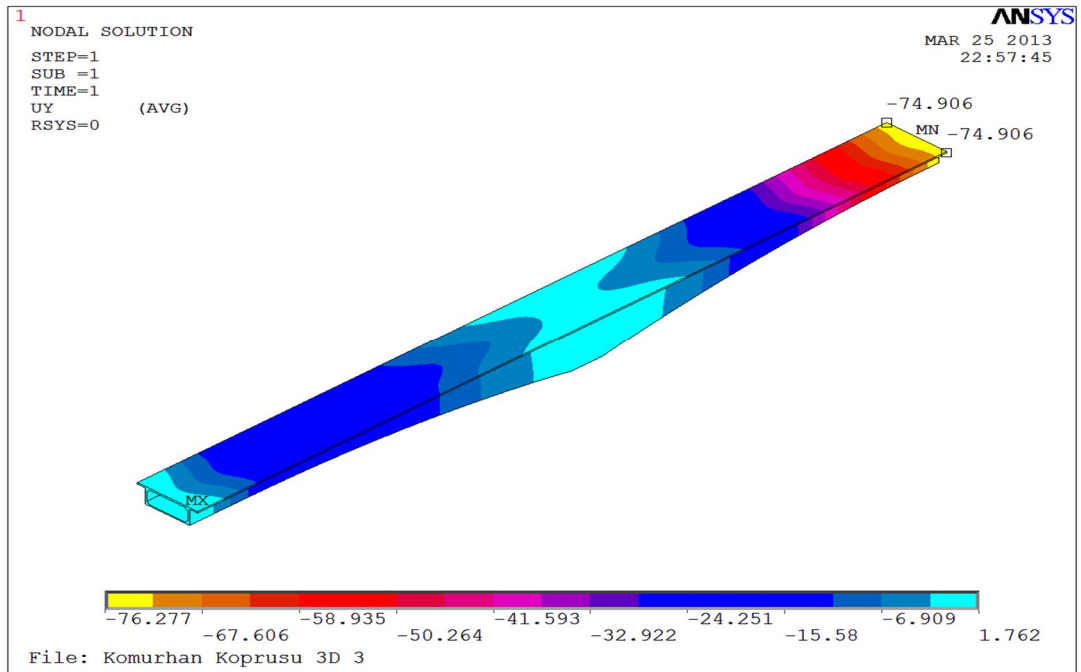
Şekil 6.5. Kendi ağırlığından dolayı konsol ucunda oluşan düşey yerdeğistirme 24,451 mm



Şekil 6.6. Ek ölü yükler ile kendi ağırlığından dolayı konsol ucunda oluşan düşey yerdeğistirme -6,518 mm

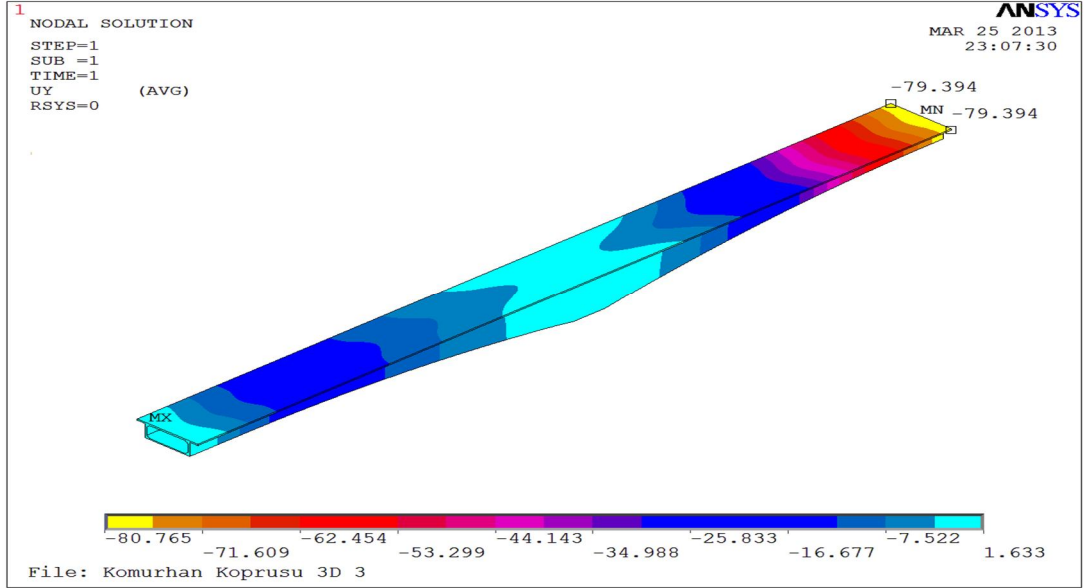


Şekil 6.7. Ek ölü yükler, kendi ağırlığı, 1 adet 200 kN, Y3 (Domaniç, Y, 2008) kamyon yüklemesinden dolayı konsol ucunda oluşan düşey yerdeğiştirme -15,625 mm



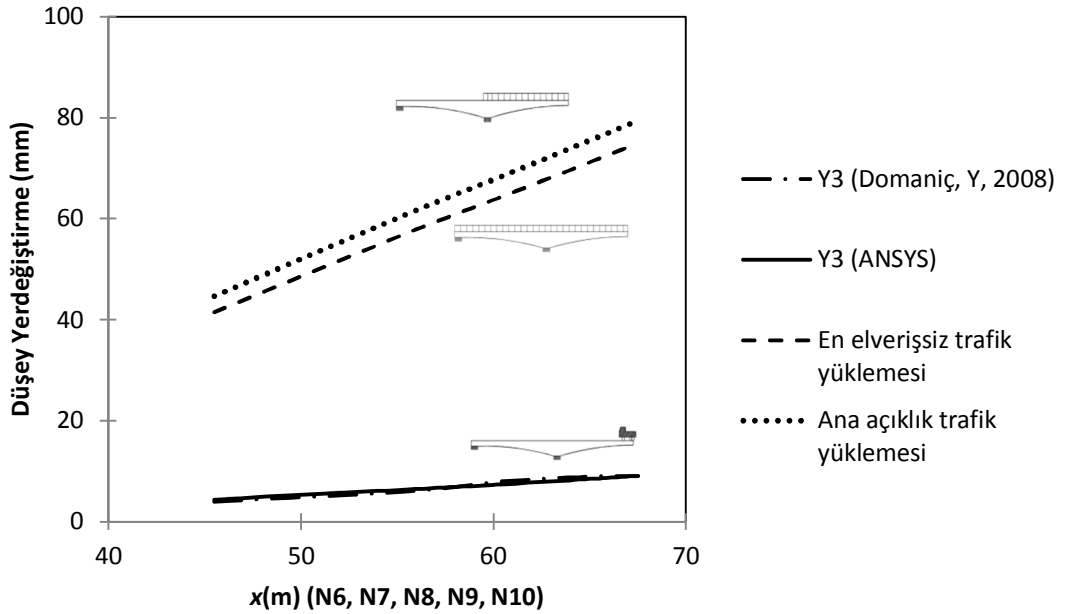
Şekil 6.8. Ek ölü yükler, kendi ağırlığı, H<sub>30</sub>S<sub>24</sub> kamyon, yaya yüklemelerinden dolayı konsol ucunda oluşan düşey yerdeğiştirme -74,906 mm





Şekil 6.9. En büyük trafik yüklemesinin ana açıklık konsolunda uygulanması sonucu konsol ucunda oluşan düşey yerdeğiştirme -79,394 mm

Ana açıklık konsolunda elde edilen deneysel ve ANSYS sonuçları Şekil 6.10'da verilmiştir.



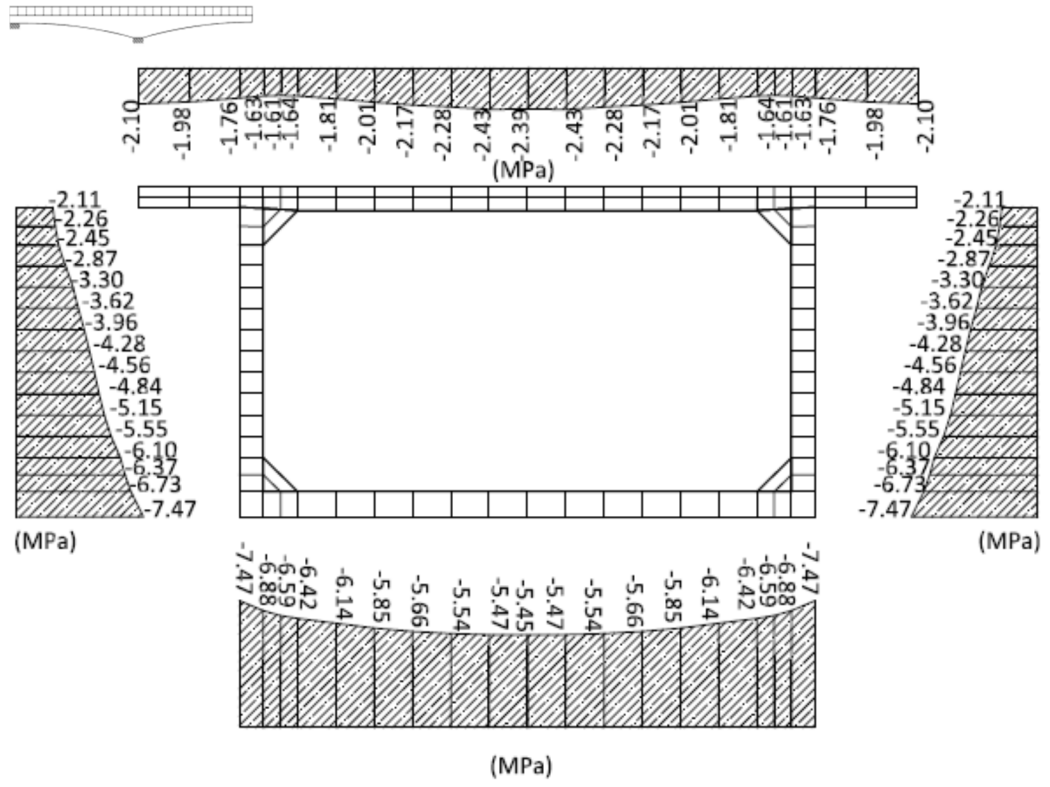
Şekil 6.10. Yükleme durumları yerdeğiştirme grafiği

Modelin rijitliği ile gerçeğe yakınlığının kıyaslanması açısından bakıldığında yapılan saha incelemelerinde gerçekleştirilen Y3 yüklemesi ile ANSYS de gerçekleştirilen Y3 yüklemesi sonuçları örtüşmektedir (şekil 6.10).

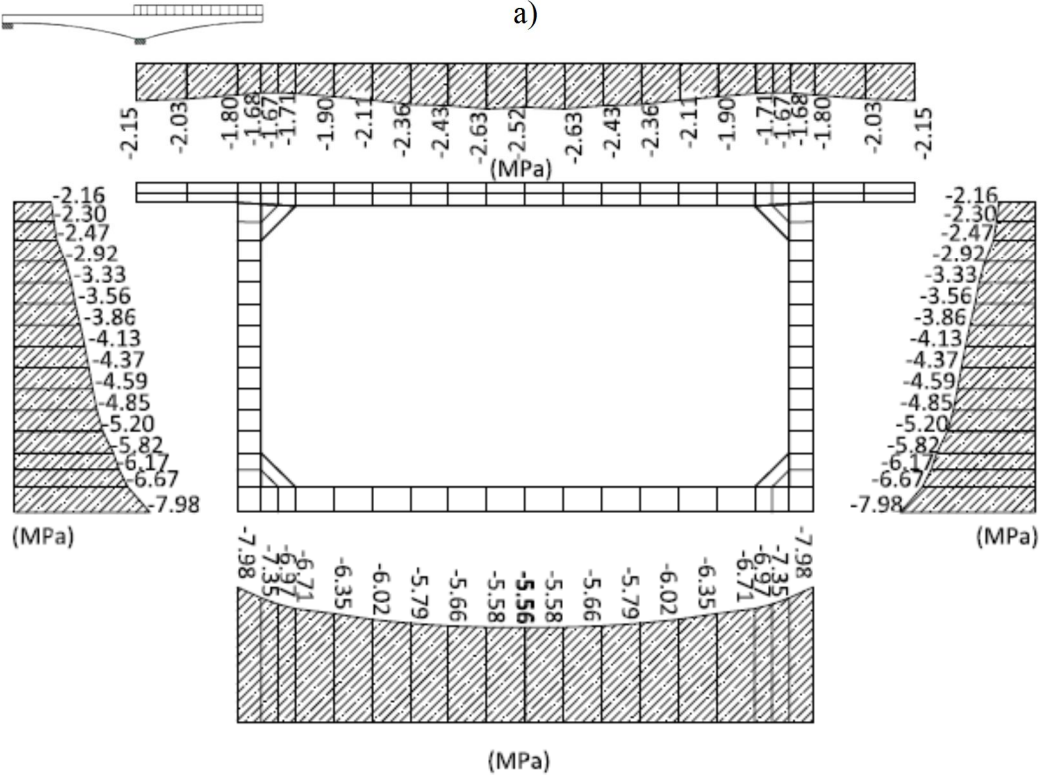
Gerçekleştirilen hesaplar sonucunda en elverişsiz yükleme durumunun sadece ana açıklığın trafik yüklemesi ile yüklenmesi olduğu bulunmuştur (şekil 6.10).

Köprü kesitinin değişken olmasından dolayı, alt ve st döşemelerde yerel gerilme farklılıkları olmaktadır. Basit kiriş kuramıyla yapılan incelemelerde bu farklılıklar göz ardı edilmiştir. şekil 6.11 ve şekil 6.12’de ana ayak yüzünde, şekil 6.13 ve şekil 6.14’de ana ayaktan yaklaşık  $x=9,2$  m ( $x=d$  kadar uzakta) sonra köprünün bütününde ve yalnız ana açıklık konsolunda trafik yüklü olmasından ötürü oluşan aksenal ve kesme gerilmeleri kesitte verilmiştir.

Köprünün  $x=9,2$  m ( $x=d$  kadar uzakta) kesme gerilme grafikleri şekil 6.15’de ve şekil 6.16’da mesnet yüzünde normal gerilme grafikleri verilmektedir.

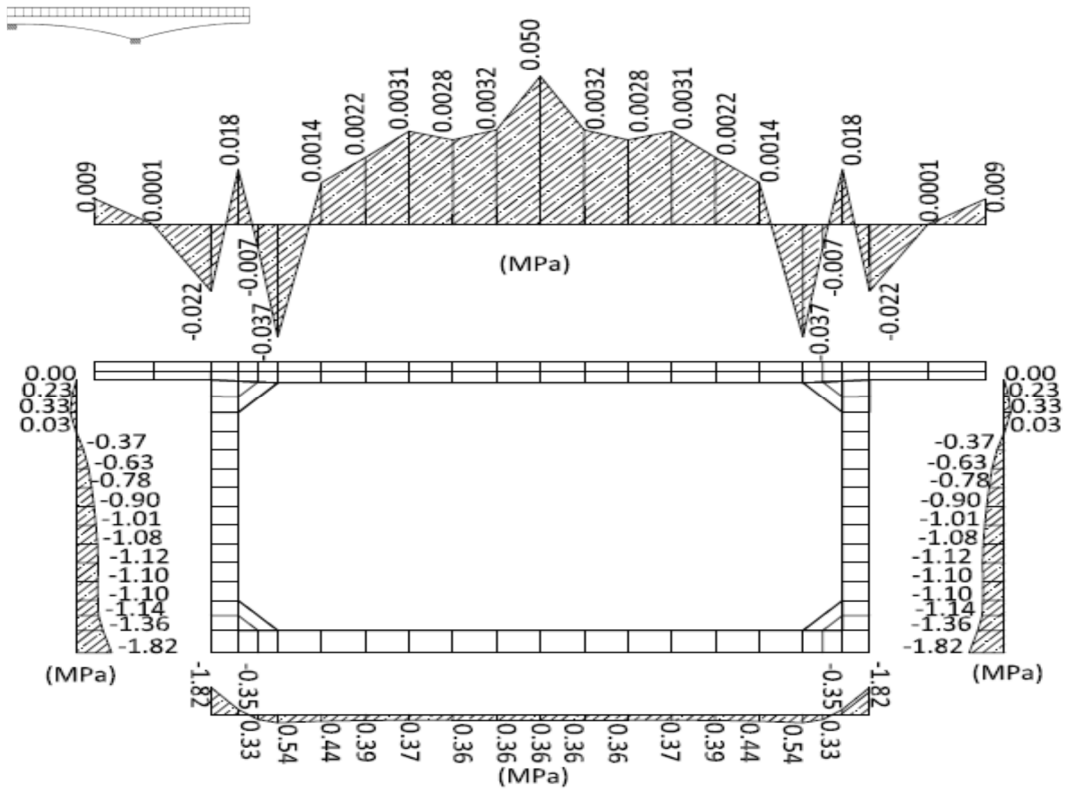


a)

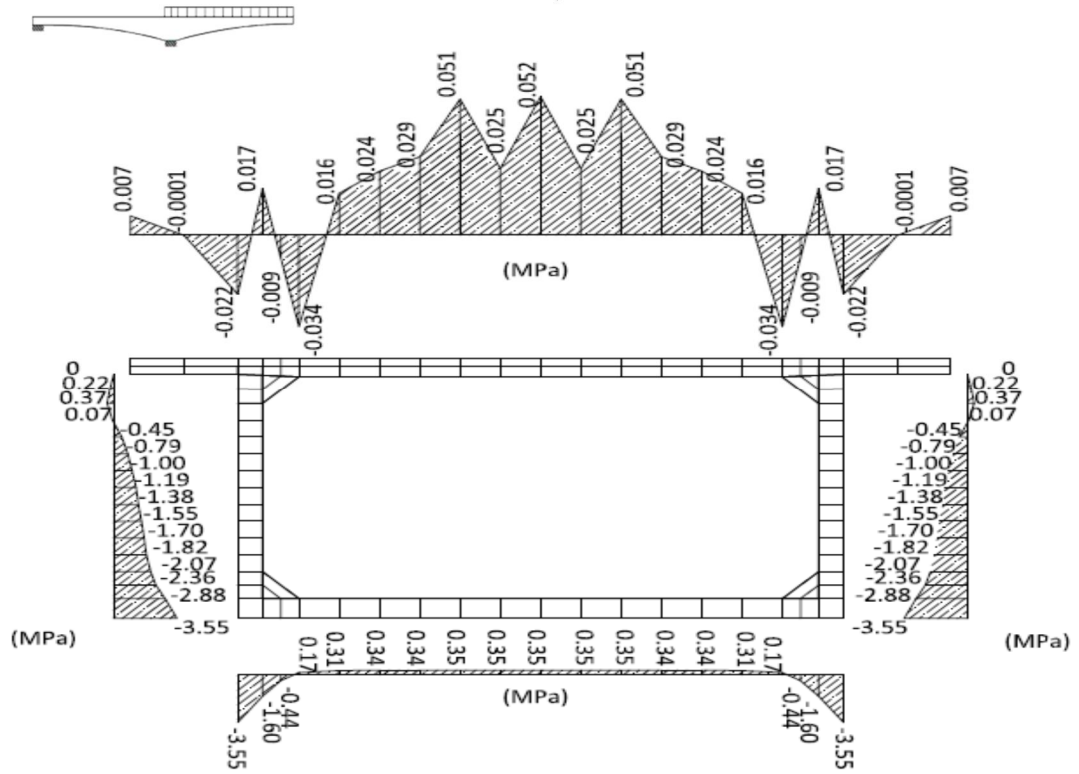


b)

Şekil 6.11. Köprü ana ayak yüzünde normal gerilmeler, trafik yüklemesi a) köprü'nün bütününde, b) yalnız ana açıklık konsolunda

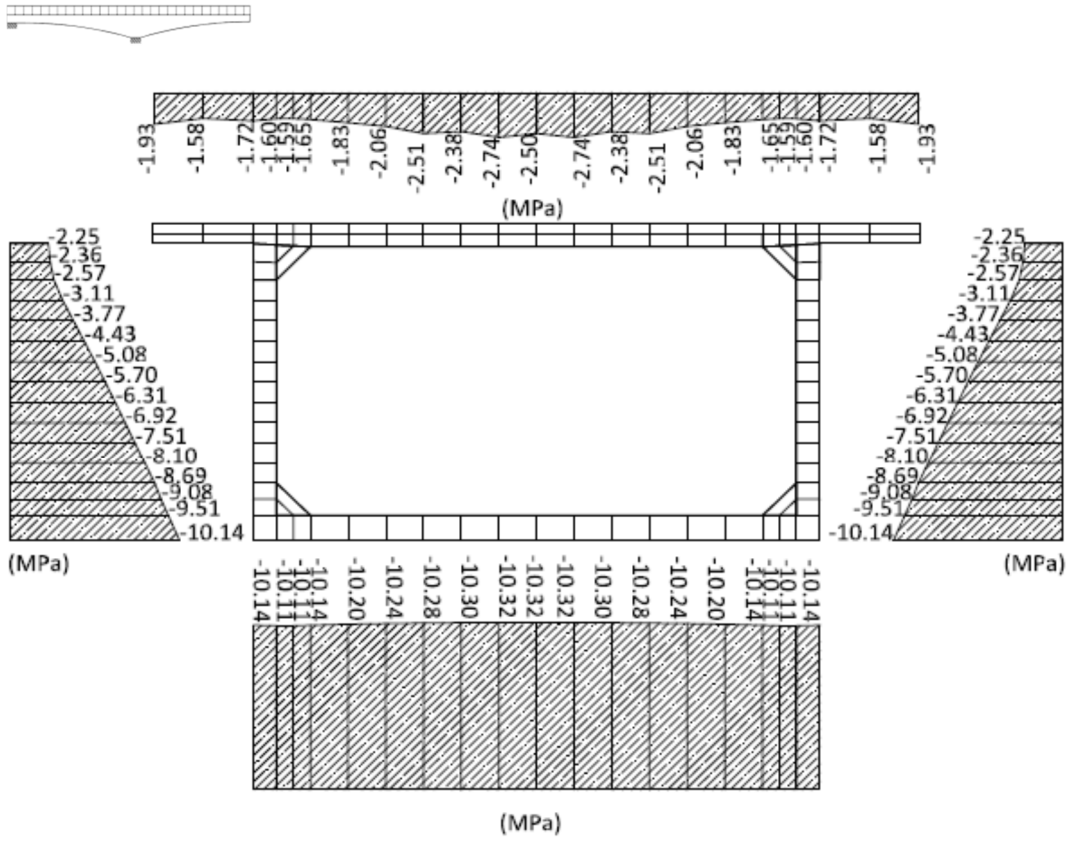


a)

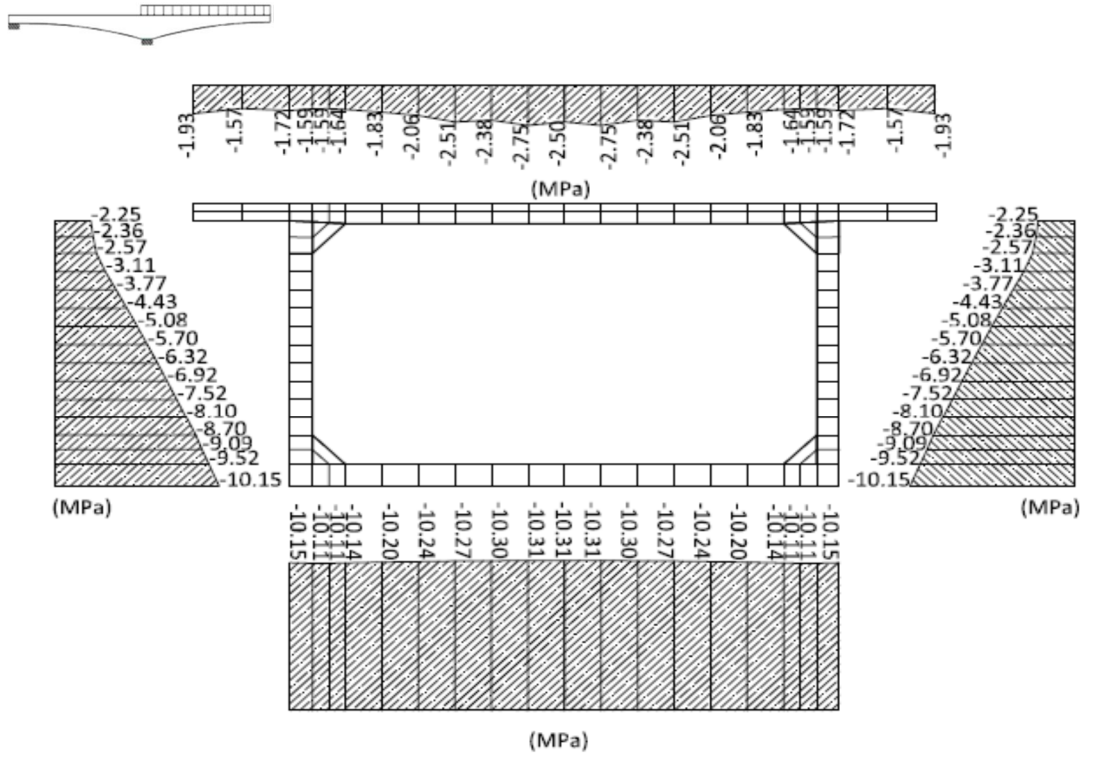


b)

Şekil 6.12. Köprü ana ayak yüzünde kesme gerilmeleri, trafik yüklemesi a) köprü'nün bütününde, b) yalnız ana açıklık konsolunda

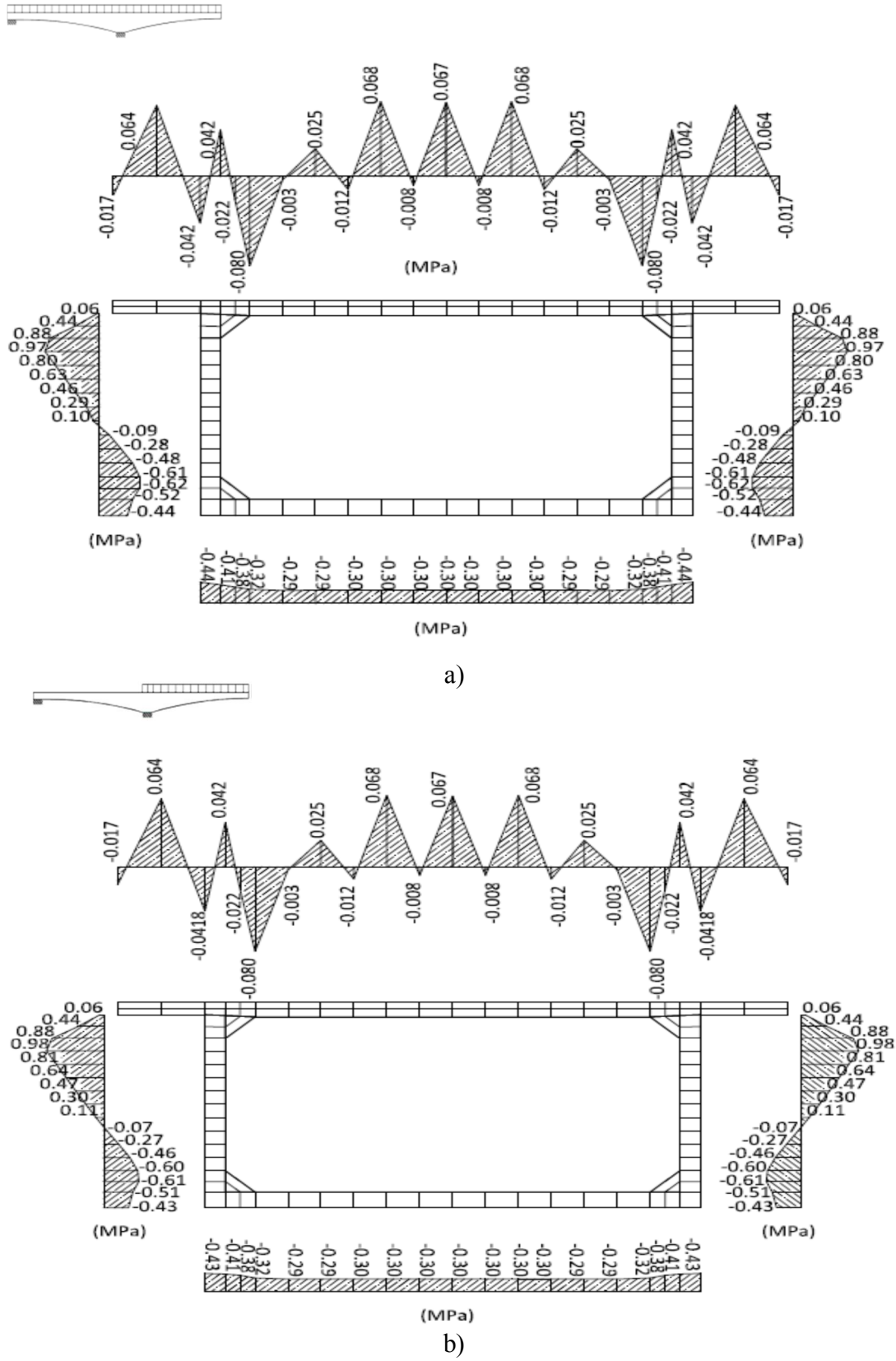


a)

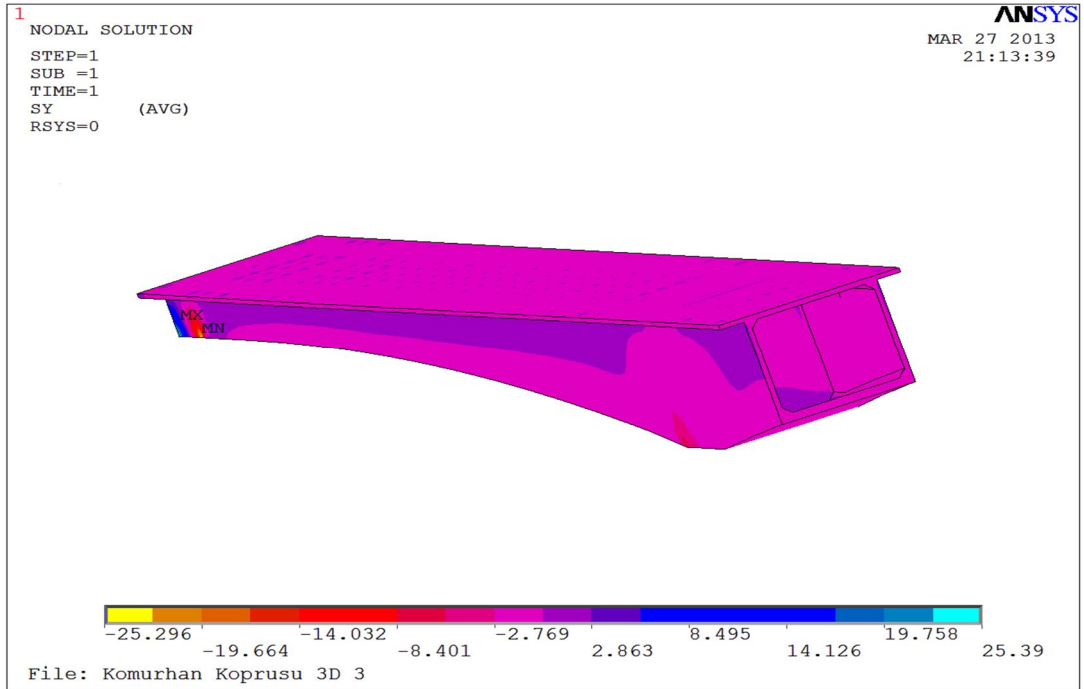


b)

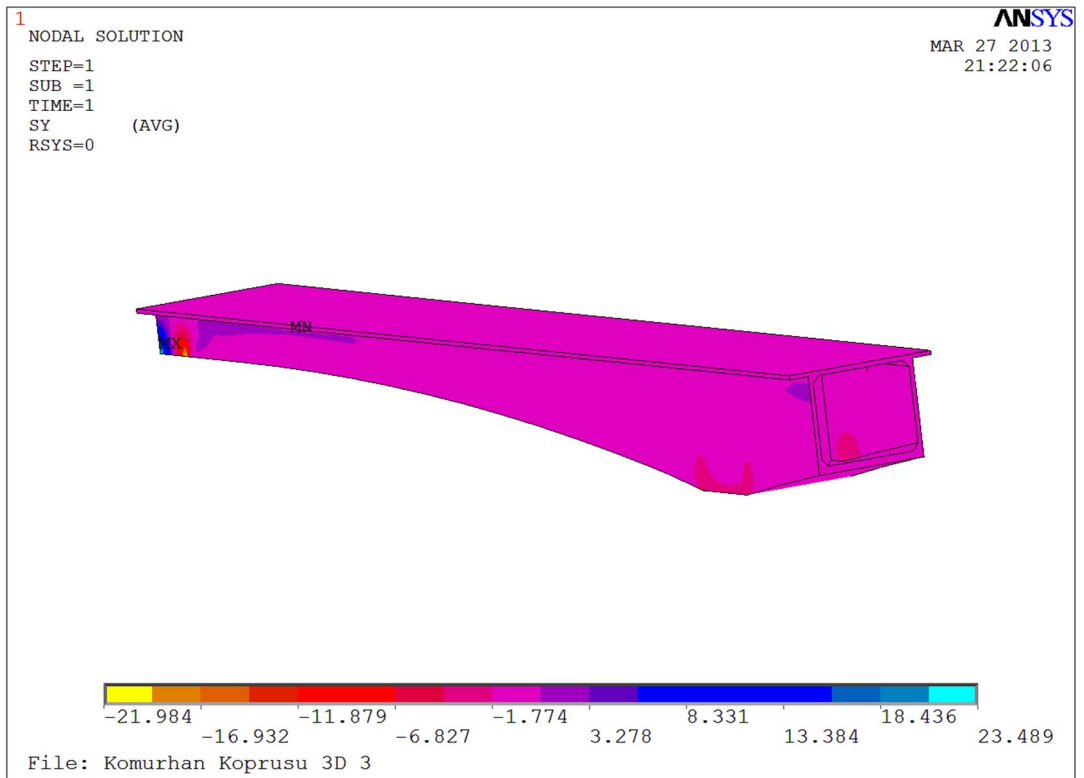
Şekil 6.13. Köprü ana ayak yüzünden  $x=9,2$  m kadar uzakta normal gerilmeler, trafik yüklemesi a) köprü'nün bütününde, b) yalnız ana açıklık konsolunda



Şekil 6.14. Köprü ana ayak yüzünden  $x=9,2$  m kadar uzakta kesme gerilmeleri, trafik yüklemesi a) köprü'nün bütününde, b) yalnız ana açıklık konsolunda

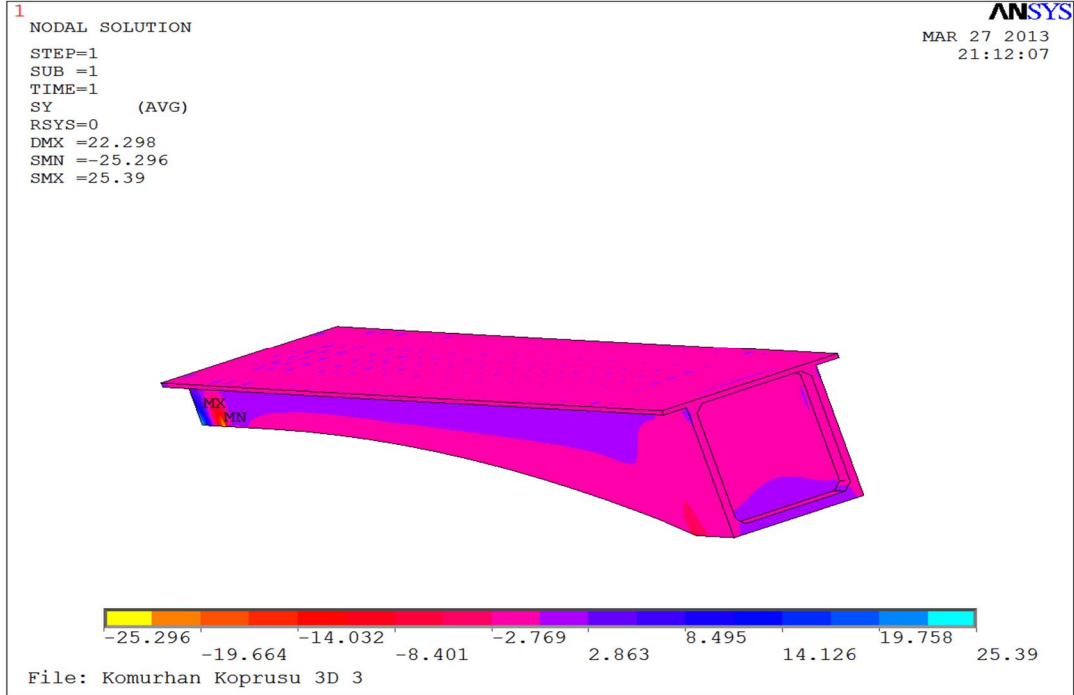


a)

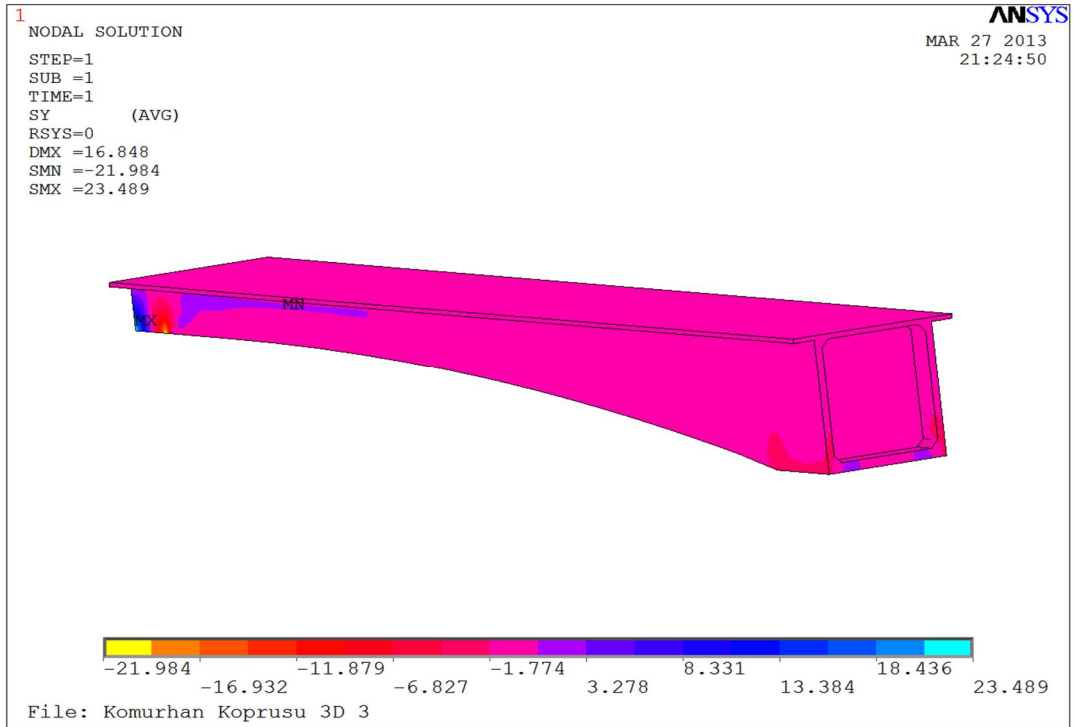


b)

Şekil 6.15. Köprü ana ayak yüzünden  $x=9,2$  m kadar uzakta kesme gerilme grafiği, trafik yüklemesi a) köprü'nün bütününde, b) yalnız ana açıklık konsolunda



a)



b)

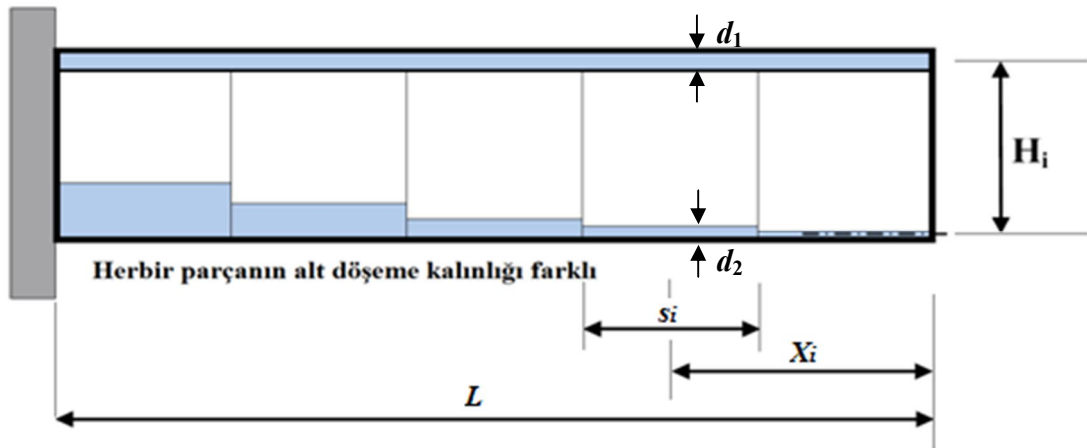
Şekil 6.16. Köprü ana ayak yüzünde normal gerilme grafiği, trafik yüklemesi  
a) köprü'nün bütününde, b) yalnız ana açıklık konsolunda



### 6.1. Farklı Döşeme Kalınlıklı Kutu Kesitli Köprülerde Büzülme Yerdeğiştirmesi

Kutu kesitli öngermeli köprü kirişlerinde ölü ve hareketli yükten dolayı aşağı yönde yerdeğiştirme, öngirme kuvvetinden dolayı da yukarı yönde yerdeğiştirme gerçekteşir. Büzülme, beton döküm işleminden hemen sonra başlayıp, betonun kalınlığına bağlı olarak zamanla devam eder. Kutu kesitli köprü kirişlerinde alt ve üst döşemenin farklı olmasından dolayı oluşan büzülme farklılığı, kesitte gerilme farklılıklarına yol açar.

Aşağıda açıklanan bu kısa örnek, denklemlerle desteklenmiş olup herkesin elle hesap yapabileceği açıklayıcı bir örnektir. Konsol kiriş uzunluğu “ $L$ ” olarak kabul edilmektedir (şekil 6.17).



şekil 6.17. Değişken alt döşeme kalınlığına sahip kutu kesitli konsol kiriş

Konsol kirişin çevre koşullarında kuruyan, kutu kesit gövdesine sahip, ağırlıksız gövdeli ve iki kenarı farklı kalınlıklara sahip  $d_1$  ve  $d_2$ , düzgün dağılı değişik parçalarıdır. Kutu kesitin üst ve alt döşeme kalınlıklar  $d_1$  ve  $d_2$ ,  $s_i$  açıklıklarında düzgün dağılı olsun. Parçaların kesit alanlarının eylemsizlik momentini gözönüne alınmayacak kadar küçük kabul edilsin. B3 beton modeline göre (Bazant, Z.P. ve Baweja, S, 1995) “ $t$ ” kuruma zamanında, alt ve üst döşeme kalınlıklarının büzülme birim şekil değiştirmeleri,

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\infty \tanh \sqrt{t/\tau_1} \quad (6.1)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_\infty \tanh \sqrt{t/\tau_2} \quad (6.2)$$

denklemlerde  $\varepsilon_\infty$  sabit ve  $\tau_1$  ve  $\tau_2$  ise kuruma sürelerinin yarısıdır. Difüzyon teorisine göre  $\tau_1$  ve  $\tau_2$ ,

$$\tau_1 = C d_1^2, \tau_2 = C d_2^2 \quad (6.3)$$

denklemlerde  $C$  sabittir. Büzülme konsol kiriş parçasının pozitif yönde eğrilmesine neden olur.

$$k = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/H_i \quad (6.4)$$

Denklemdaki  $H_i$  konsol kirişin yüksekliğidir. Diferansiyel büzölmeye göre, konsol kirişin sonunda  $i$ -inci parçasındaki yerdeğiştirmeye katkısı,

$$\Delta\delta_i = k_i s_i x_i \quad (6.5)$$

$s_i$ ,  $i$ -inci parçanın uzunluğu,  $x_i$  ise parçanın merkezinin konsol kirişin ucuna olan uzaklığıdır. Konsol kirişin uç kısmında oluşacak yerdeğiştirme, tüm parçaların katkısı ile oluşacak toplam yer değıştirmeye eşittir.

$$\delta = \sum_{i=1}^N k_i s_i x_i \quad (6.6)$$

Genel olarak düşünölürse  $d_1$  ve  $d_2$  kalınlıklarının bütün konsol kiriş boyunca düzgün dağıldığı varsayımıyla, konsol kirişin ucundaki yerdeğiştirme,

$$\delta = \frac{L^2 k}{2} = \left(\frac{L^2}{2H}\right) \varepsilon_\infty \left[ \tanh \sqrt{\frac{t}{c d_1^2}} - \tanh \sqrt{\frac{t}{c d_2^2}} \right] \quad (6.7)$$

olarak da ifade edilebilir. Konsol uç yerdeşistirmeleri izelge 6.2'in elde edilmesinde (6.6) eşitliği kullanılmıştır.

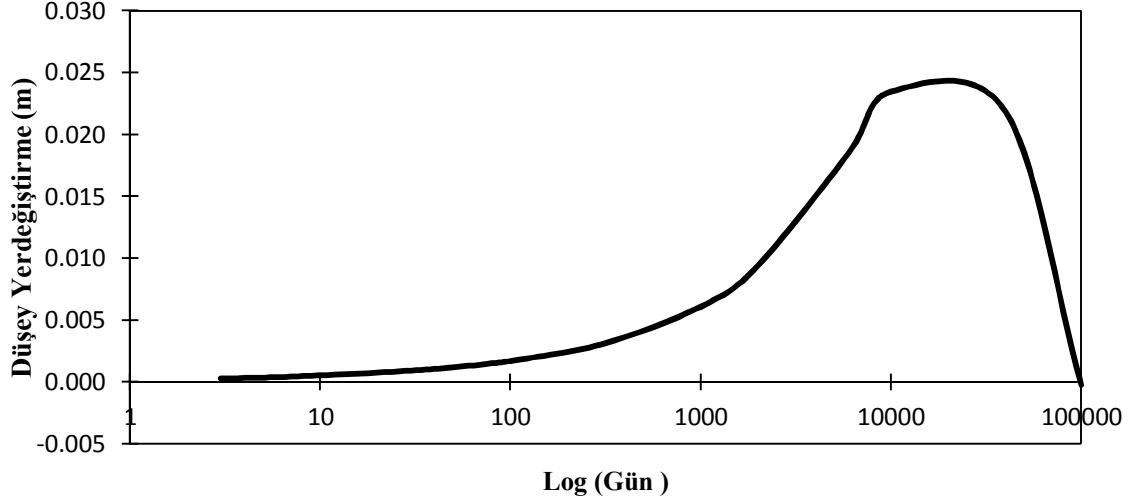
Büyük bir köprü için  $d_2^2/d_1^2$  oranı 30 dolayında olabilmektedir. Bu büzölme yerdeğistirme denklemleri, sünme yerdeğistirme teorisinden türetilmiştir (Kristek ve diğerleri 2006). Çizelge 6.2'de kutu kesitli öngerilmeli köprünün farklı döşeme kalınlıkları için 7, 30 ve 10000 günlük büzölme yerdeğistirmeleri verilmiştir.

Kömürhan köprüsünün konsol ucunun farklı kalınlıklarından dolayı oluşan büzölme yerdeğistirmesi  $C=30$  ve  $\varepsilon_\infty = 0,0013$  alınarak  $t=10000$  gün için 24 mm bulunmuştur.

Çizelge 6.2. Köprünün 7, 30 ve 10000 günlük büzülme yer değiştirmeleri ( $C=30$  ve  $\varepsilon_{\infty} = 0,0013$ )

Kesit	$s_i$	$L_i$	$x_i$	$H_i$	$d_1$	$d_2$	$t_1$	$t_2$	$t=7$ gün					$t=30$ gün					$t=10000$ gün				
									$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$K$	$\Delta\delta_i$	$\delta$ (m)	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$K$	$\Delta\delta_i$	$\delta$ (m)	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$K$	$\Delta\delta_i$	$\delta$ (m)
2	4,5	4,5	62,3	9,0	0,35	0,63	3,68	11,72	3,1E-05	1,8E-05	1,5E-06	4,3E-04	4,3E-04	6,5E-05	3,6E-05	3,2E-06	8,9E-04	8,9E-04	9,4E-04	6,1E-04	3,6E-05	1,0E-02	1,0E-02
4	5	9,5	57,5	8,1	0,35	0,58	3,68	10,09	3,1E-05	1,9E-05	1,5E-06	4,4E-04	8,7E-04	6,5E-05	3,9E-05	3,2E-06	9,1E-04	1,8E-03	9,4E-04	6,5E-04	3,6E-05	1,0E-02	2,0E-02
6	5	14,5	52,5	7,2	0,35	0,54	3,68	8,63	3,1E-05	2,0E-05	1,5E-06	4,0E-04	1,3E-03	6,5E-05	4,2E-05	3,1E-06	8,2E-04	2,6E-03	9,4E-04	6,9E-04	3,4E-05	8,9E-03	2,9E-02
8	5	19,5	47,5	6,4	0,35	0,49	3,68	7,19	3,1E-05	2,2E-05	1,4E-06	3,3E-04	1,6E-03	6,5E-05	4,6E-05	2,9E-06	6,8E-04	3,3E-03	9,4E-04	7,4E-04	3,0E-05	7,1E-03	3,6E-02
10	5	24,5	42,5	5,8	0,35	0,44	3,68	5,87	3,1E-05	2,5E-05	1,1E-06	2,4E-04	1,8E-03	6,5E-05	5,1E-05	2,3E-06	5,0E-04	3,8E-03	9,4E-04	8,0E-04	2,4E-05	5,0E-03	4,1E-02
12	5	29,5	37,5	5,2	0,35	0,40	3,68	4,69	3,1E-05	2,8E-05	7,0E-07	1,3E-04	2,0E-03	6,5E-05	5,7E-05	1,4E-06	2,7E-04	4,1E-03	9,4E-04	8,7E-04	1,4E-05	2,6E-03	4,4E-02
14	5	34,5	32,5	4,6	0,35	0,35	3,68	3,63	3,1E-05	3,1E-05	-3,9E-08	-6,3E-06	2,0E-03	6,5E-05	6,5E-05	-8,0E-08	-1,3E-05	4,1E-03	9,4E-04	9,4E-04	-7,0E-07	-1,1E-04	4,4E-02
16	5	39,5	27,5	4,2	0,35	0,30	3,68	2,71	3,1E-05	3,6E-05	-1,2E-06	-1,7E-04	1,8E-03	6,5E-05	7,5E-05	-2,6E-06	-3,5E-04	3,7E-03	9,4E-04	1,0E-03	-2,0E-05	-2,8E-03	4,1E-02
18	5	44,5	22,5	3,8	0,35	0,25	3,68	1,93	3,1E-05	4,3E-05	-3,1E-06	-3,5E-04	1,4E-03	6,5E-05	8,9E-05	-6,5E-06	-7,3E-04	3,0E-03	9,4E-04	1,1E-03	-4,4E-05	-5,0E-03	3,6E-02
20	5	49,5	17,5	3,5	0,35	0,23	3,68	1,59	3,1E-05	4,8E-05	-4,7E-06	-4,1E-04	1,0E-03	6,5E-05	9,8E-05	-9,7E-06	-8,5E-04	2,1E-03	9,4E-04	1,1E-03	-6,0E-05	-5,3E-03	3,1E-02
22	5	54,5	12,5	3,2	0,35	0,23	3,68	1,59	3,1E-05	4,8E-05	-5,0E-06	-3,1E-04	7,1E-04	6,5E-05	9,8E-05	-1,0E-05	-6,5E-04	1,5E-03	9,4E-04	1,1E-03	-6,4E-05	-4,0E-03	2,7E-02
24	5	59,5	7,5	3,1	0,35	0,23	3,68	1,59	3,1E-05	4,8E-05	-5,3E-06	-2,0E-04	5,1E-04	6,5E-05	9,8E-05	-1,1E-05	-4,1E-04	1,1E-03	9,4E-04	1,1E-03	-6,8E-05	-2,5E-03	2,4E-02
26	5	64,5	2,5	3,0	0,35	0,23	3,68	1,59	3,1E-05	4,8E-05	-5,4E-06	-6,8E-05	4,4E-04	6,5E-05	9,8E-05	-1,1E-05	-1,4E-04	9,2E-04	9,4E-04	1,1E-03	-7,0E-05	-8,7E-04	2,3E-02

Şekil 6.18’de konsol ucunda farklı başlık kalınlıklarının oluşturduğu büzülmeden kaynaklı düşey yerdeğiştirmeleri verilmiştir.



Şekil 6.18. Köprü konsol ucunun farklı başlık kalınlıklarından dolayı büzülme yerdeğiştirme - gün eğrisi

## 6.2. B3 Model ile Sünme ve Büzülmenin Hesaplanması

Beton zamana bağlı yerdeğiştirme yapan bir malzemedir. 28 gün sonra sudan çıkarılan bir numune kurumaya bırakıldığında kısalmaya başlar. Bu olaya büzülme ya da rötre denir. Kalıcı yük altındaki yerdeğiştirmeye ise sünme denir. Sünme ve büzülme zamana bağlı olarak artış hızı zamanla azalır.

Betondaki çimentonun hidratasyonu için gerekli olan su ortalama olarak çimento ağırlığının %25’i kadardır, ancak işlenebilir bir beton elde etmek için katılan su miktarı daha fazladır. Bu nedenle beton kalıplara yerleştirildikten sonra gerekmeyen su miktarı buharlaşarak uzaklaşır. Beton su kaybettiķe hacimsel küçülme yani büzülme gerçekteşir. Büzülme buharlaşmaya ve buharlaşma hızına bağlıdır. Nemsiz bir ortamda büzülen beton, nemli bir ortama veya suya konduğunda şişerek eski boyuna ulaşabilir. Nemin düşük olduğu kuru ortamlarda büyük açıklıklı kirişlerde oluşabilecek büzülme eğilimi ortadaki mafsal nedeni ile engellenmiştir. Ancak köprü kirişinin alt ve üst başlıklarının farklı kalınlıklarda olması, konsol ucunun başlangıçta

ince olan üst başlık nedeni ile üste, sonra alt başlığın büzülmesi ile aşağı doğru yerdeğiştirme yapmasına neden olur. Bu yerdeğiştirmeler, kirişte çok yüksek çekme gerilmeleri oluşturacağından, kirişte önemli çatlamalar meydana getirir. Yeterli donatının bulunmadığı durumlarda, bu çekme gerilmeleri nedeni ile kiriş dayanımını yitirerek çökebilir.

Sünme, betonda büzölmeye ek olarak kalıcı yük altında oluşan Şekil değişikliği olarak tanımlanabilir. Betondaki sünme olayı metallerden farklı olarak, düşük gerilmeler altında ve normal sıcaklık ortamında da meydana gelebilmektedir. Beton taze iken yüklenen numunedeki sünme yerdeğiştirmesi eski bir betona oranla daha fazla olur. Karışımdaki su/çimento oranı arttıka sünme yerdeğiştirmesi artar. Ortamın nemi arttıka sünme yerdeğiştirmesi azalır. Sünmenin hızı zamanla azalmasına rağmen yerdeğiştirme artışı yıllarca devam eder. Sünme nedeni ile betonun elastisite modölü önemli ölçüde azalır. Bu da elemanların eğilme rijitliğini azaltır. Bu nedenle yüksek düzeyde kalıcı yük altındaki kirişlerde yükün uygulanmasından bir iki yıl sonraki yerdeğiştirme yükün ilk uygulandığı andaki yerdeğiştirmenin 2 veya 3 katına çıkabilir. Yük altında belirli bir yerdeğiştirme göstermiş olan beton, yük kaldırıldıktan sonra, hiçbir zaman ilk boyutlarına dönememektedir. Sünme olayı nedeni ile bir miktar yerdeğiştirme kalıcı olarak yer almaktadır.

Sünme yerdeğiştirmesini etkileyen etmenler:

1. Betona uygulanan sabit gerilmenin büyüklüğü,
2. Betonun dayanımı ve beton dayanımını etkileyen etmenler:
  - su / çim. oranı
  - çimento tipi ve miktarı
  - katkı maddelerin türü ve miktarı
  - betonun yaşı
3. Sünme yerdeğiştirmesinin serbestçe yer almasını etkileyen etmenler:
  - agrega miktarı
  - agreganın elastik modölü

4.Çevreden kaynaklanan etmenler:

- Bağıl nem miktarı
- Ortam sıcaklığı

5. Beton elemanın boyutu, hacim/ yüzey oranı gibi geometrik özelliklerdir.

Kömürhan köprüsü gibi konumsal öneme sahip, dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen köprülerde sünme ve büzülme çok önemlidir. Yapının kullanım ömrünü doğrudan etkilemektedir. Sünme ve büzülme hesabı gerekli hassasiyette yapılamaz ise orta açıklıkta konsollar arası kot farkı, konsol ucunda sakıncalı düzeyde kalıcı yerdeğiştirme, konsolda dönme gibi istenmeyen durumlar gerçekleşebilir. Bazant, Z.P. ve Baweja, S. (1995) özellikle bu biçimde sünme ve büzülmeye karşı duyarlı olan yapılar için gerçekleştirdiği sünme, büzülmenin oluşumu ile uyumlu bir çok deneyden elde ettiği veriler ile B3 Modeli geliştirmişlerdir.

Betonun sünme ve büzülme özelliklerinin beton karışımından ve betonun dayanımından elde edilmesi oldukça zor bir problem olup tam olarak doğruyu veren bir kuram üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir. B3 model de varolan betonun dayanımı, içeriğinin bulunması, çimento ve betonun özelliklerinin aşağıda belirtilen aralıklar ile sınırlandırılmıştır.

$$0,35 \leq w/c \leq 0,85$$

$$2,5 \leq a/c \leq 13,5$$

$$160 \text{ kg/m}^3 \leq c \leq 720 \text{ kg/m}^3$$

$$17\text{MPa} \leq \bar{f}_c \leq 70\text{MPa}$$

Burada  $\bar{f}_c$  betonun 28 günlük silindirik basınç dayanımı,  $w/c$  su-çimento oranı,  $c$  betondaki çimento miktarı ve  $a/c$  de betondaki agrega-çimento oranını göstermektedir. Kömürhan köprüsünün B3 modele göre sünme büzülme analizinde  $w/c$  değeri 0,5,  $a/c$  değeri 4, çimento miktarı yaklaşık  $300 \text{ kg/m}^3$  ve  $\bar{f}_c$  değeri de 35 MPa alınmıştır.

B3 Modeline göre  $t'$  günde uygulanmaya başlanılan sabit gerilme altında toplam büzülme, sünme birim şekil değişikliği:

$$\varepsilon(t) = J(t, t')\sigma + \varepsilon_{sh}(t) + \alpha\Delta T(t) \quad (6.8)$$

(6.8) eşitliğinde  $t'$  günden itibaren uygulanan sabit gerilme değeri  $\sigma = 0,4\bar{f}_c$  (Kömürhan köprüsünde  $\bar{f}_c = 35$  MPa olduğundan  $\sigma$  değeri 14 MPa olmaktadır).  $t'$  kesite ard germe uygulanmaya başlandığı anda betonun gün cinsinden yaşıdır. Kömürhan köprüsünde 7 günde bir yeni kesit parçası inşa edildiğinden dolayı 13 parçadan oluşan köprünün konsolunun yaşı için ortalama olarak  $t' = (7+14+21+\dots+91)/13 = 49$  gün alınmıştır.

(6.8) eşitliğinde birim gerilme de zamana bağlı toplam sünme birim şekil değişikliği:

$$J(t, t') = q_1 + C_0(t, t') + C_d(t, t', t_0) \quad (6.9)$$

Burada,  $J(t, t')$  sünmeden dolayı oluşan birim uzamaya eşit uygunluk (compliance) fonksiyonu,  $C_0(t, t')$  temel sünme için uygunluk fonksiyonu,  $C_d(t, t', t_0)$  kurumadan ötürü oluşan ek sünme için uygunluk fonksiyonudur. Ayrıca  $t$ , zaman, gün olarak beton yaşı,  $t'$  gün olarak yükleme yapıldığındaki beton yaşı,  $t_0$  elemanın kurumaya başladığındaki gün olarak yaşı olup  $t' > t_0$  dir.

Belli zaman aralıklarında tanımlanmış birim gerilmeye zamana bağlı temel sünme birim şekil değişikliği:

$$\dot{C}_0(t, t') = \frac{n(q_2 t^{-m} + q_3)}{(t-t') + (t-t')^{1-n}} + \frac{q_4}{t}, \quad m=0,5, \quad n=0,1 \quad (6.10)$$

$\dot{C}_0(t, t') = \partial C_0(t, t') / \partial t$  bağıntısında  $m, n$  deneysel parametreler olup normal portland çimentolarının hepsi için aynı değerler alınabilir. (6.10) eşitliğinin  $t$  ye göre



integrasyonu sonucunda birim gerilmede toplam temel sünme bağıntısı (6.11) elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \int_{t'}^t \dot{C}_0(t, t') dt = & \\ q_2 \int_{t'}^t \frac{nt^{-m}}{(t-t') + (t-t')^{1-n}} dt & \\ + q_3 \int_{t'}^t \frac{n}{(t-t') + (t-t')^{1-n}} dt + \int_{t'}^t \frac{q_4}{t} dt & \end{aligned}$$

Burada ikinci ve dördüncü terimlerin integrali alınır ise,

$$\int_{t'}^t \dot{C}_0(t, t') dt = q_2 Q(t, t') + q_3 \int_{t'}^t \frac{n(t-t')^{n-1}}{(t-t')^n + 1} dt + q_4 \ln|t|_{t'}^t$$

Her iki tarafın sonuç integrali alınır ise,

$$C_0(t, t') = q_2 Q(t, t') + q_3 \ln[1 + (t-t')^n] + q_4 \ln\left(\frac{t}{t'}\right) \quad (6.11)$$

(6.11) bağıntısında belirtilen  $Q(t, t')$  değeri analitik olarak kesin bir şekilde elde edilemez. Bazant'a göre  $Q(t, t')$  iki şekilde hesaplanabilmektedir. Bunlarda birincisi daha kesin sonuç veren  $t$  ve  $t'$  değerlerine bağlı olarak hazırlanmış olan tablo değerleridir (Bazant, Z.P. ve Baweja, S. 1995). İkinci olarak yaklaşık sonuç veren (6.12) bağıntısı ile hesaplanabilir.

$$Q(t, t') = Q_f(t') \left[ 1 + \left( \frac{Q_f(t')}{Z(t, t')} \right)^{r(t')} \right]^{-1/r(t')} \quad (6.12)$$

Burada,

$$r(t')=1,7(t')^{0,12}+8 \quad (6.13)$$

$$Z(t,t')=(t')^{-m} \ln[1+(t-t')^n] \quad (6.14)$$

$$Q_f(t')=[0,086(t')^{2/9}+1,21(t')^{4/9}] \quad (6.15)$$

dir. Kömürhan köprüsünde  $t=10000$  gün için yukarıda belirtilen eşitlikler yardımı ile;  
 $r(t') = 1,7 \times 49^{0,12} + 8 = 10,71189$ ,  $Z(t,t') = 49^{0,5} \times \ln[1+(10000-49)^{0,1}] = 0,1794$ ,  
 $Q_f(t') = [0,086 \times (49)^{2/9} + 1,21 \times (49)^{4/9}] = 7,027349$  ve sonuç olarak  
 $Q(t,t') = 7,027349 \times [1+(7,027349/0,1794)^{10,71189}]^{-1/10,71189} = 0,1794$  olarak  
 hesaplanmaktadır.

(6.10) ve (6.11) bağıntısında kullanılmış olan  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  ve  $q_4$  değerleri Bazant, Z.P. ve Baweja, S. (1995) tarafından deneysel ve kuramsal olarak yaklaşık 100 deney sonucu ve 15000 verinin olasılıksal olarak analizinden elde edilmiş deneysel bağıntılardır.

$$q_1 = 0,6 \times 10^6 / (4734 \sqrt{f_c}), \quad 10^{-6} / \text{MPa} \quad (6.16)$$

$$q_2 = 185,4 c^{0,5} \overline{f_c}^{-0,9}, \quad 10^{-6} / \text{MPa} \quad (6.17)$$

$$q_3 = 0,29 (w/c)^4 q_2, \quad 10^{-6} / \text{MPa} \quad (6.18)$$

$$q_4 = 20,3 (a/c)^{-0,7}, \quad 10^{-6} / \text{MPa} \quad (6.19)$$

deneysel bağıntılardan yaklaşık olarak  $q_1 = 0,6 \times 10^6 / (4734 \sqrt{35}) = 21,42 \times 10^{-6}$ ,  
 $q_2 = 185,4 \times 300^{0,5} \times 35^{-0,9} = 130,64 \times 10^{-6}$ ,  $q_3 = 0,9 \times (150/300)^4 \times 130,64 = 2,37 \times 10^{-6}$ ,  
 $q_4 = 20,3 \times 4^{-0,7} = 7,69 \times 10^{-6}$  olarak hesaplanmıştır.

Bulunan değerler (6.11) bağıntısında yerine konularak  
 $C_0(t,t') = 130,6476 \times 0,1794 + 2,37 \times \ln[1+(10000-49)^{0,1}] + 7,69 \times \ln(10000/49)$   
 $= 67,32154 \times 10^{-6} / \text{MPa}$  olarak bulunmuştur.

B3 modele de kesitlerin kurumasından kaynaklı ortalama büzülme birim şekil değişikliği:

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = -\epsilon_{sh\infty} k_h S(t) \quad (6.20)$$

(6.20) bağıntısında  $S(t)$  büzülmenin zamana bağlı fonksiyonu:

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t-t_0}{\tau_{sh}}} \quad (6.21)$$

(6.20) bağıntısında  $h$  bağıl nemine bağlı final büzülme için nem düzeltme katsayısı  $k_h$ :

$$k_h = \begin{cases} 1 - h^3 & \leftrightarrow & h \leq 0,98 \\ -0,2 & \leftrightarrow & h = 1(\text{su içinde bekleyen}) \\ \text{lineer interpolasyon} & \leftrightarrow & 0,98 \leq h \leq 1 \end{cases}$$

Kömürhan köprüsünde ortalama olarak bağıl nem yüzde 60 olarak alınmış olup buna bağlı  $k_h=1-0,6^3=0,784$  olarak hesaplanmıştır.

(6.20) bağıntısında belirtilen yarı zamandaki büzülme katsayısı  $\tau_{sh}$ :

$$\tau_{sh} = k_t (k_s D)^2 \quad (6.22)$$

Burada  $D=2v/s$ ,  $v/s$  kesit parçasının hacminin hava ile temas eden yüzey alanına oranıdır. Kömürhan köprüsünün konsolunda ortalama kesit parçası hacmi  $v=A_{ort} \times L=10,96 \times L$ , ortalama kesit parçasının hava ile temas eden yüzey alanı  $s=\zeta_{ort} \times L=33,313 \times L$ ,  $D=2v/s=2A_{ort} \times L/\zeta_{ort} \times L=2 \times 10,96/33,313=0,658$  m olarak hesaplanmıştır.

(6.22) bağıntısındaki  $k_s$  kesit alanı şekil katsayısı aşağıda belirtilen durumlara göre seçilmektedir:

$$k_s = \begin{cases} 1,00 & \text{sonsuz plak} \\ 1,15 & \text{sonsuz silindir} \\ 1,25 & \text{sonsuz kare prizma} \\ 1,30 & \text{küre} \\ 1,55 & \text{küp} \end{cases}$$

Kömürhan köprüsü için  $k_s = 1,25$  ( sonsuz kare prizma) seçilmiştir.

(6.23) bağıntısında  $\tau_{sh}$  'in hesabında gerekli olan  $k_t$  değeri belirtilmektedir.

$$k_t = 8,5 t_0^{-0,08} \bar{f}_c^{-\frac{1}{4}}, \text{ gün/cm}^2 \quad (6.23)$$

Burada kullanılan  $t_0$  değeri kurumanın başladığı betonun yaşı olarak tanımlanmakta olup  $t_0 = t'$  olarak kabul edilmiştir. Kömürhan köprüsünde  $k_t$  değeri (6.23) bağıntısında  $t_0 = 49$  gün ve  $\bar{f}_c = 35$  MPa alınarak  $k_t = 8,5 \times 49^{-0,08} \times 35^{-(1/4)} = 2,559683$  gün/cm<sup>2</sup> bulunur. Bu değer (6.22) bağıntısında  $k_s$  değeri ile birlikte yerine konulduğunda  $\tau_{sh}$  değeri  $\tau_{sh} = 2,559683(1,25 \times 0,658)^2 = 1,731642$  olarak hesaplanmıştır.

(6.21) bağıntısında  $\tau_{sh}$  ve  $t_0$  değerleri yerine konularak  $S(t)$  değeri

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{10000-49}{1,731642}} = 1 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Buradan  $\epsilon_{sh}(t, t_0)$   $t$  gündeki büzülme birim şekil değişikliğinin bulunabilmesi için sonuç büzülme birim şekil değişikliğinin ( $\epsilon_{sh\infty}$ ) hesaplanması gerekmektedir.

$$\epsilon_{sh\infty} = \epsilon_{s\infty} \frac{E(607)}{E(t_0 + \tau_{sh})} \quad (6.24)$$

$E$ , betonun elastisite modülünün zamana bağlı değişimi ACI'a göre aşağıda verilen bağıntılar ile hesaplanmaktadır;

$$E(t) = E(28) \left( \frac{t}{4+0,85t} \right)^{1/2} \quad (6.25)$$

$$E(28) = 4734 \sqrt{f_c} \quad (6.26)$$

Kömürhan Köprüsü'nde  $E(607)$  değeri (6.25) bağıntısında  $t=607$  alınarak  $E(t) = 4734 \times \sqrt{35} \times \left( \frac{607}{4+0,85 \times 607} \right)^{1/2} = 30260,48$  MPa ve (6.25) bağıntısında  $t=t_0 + \tau_{sh}$  alınarak  $E(t_0 + \tau_{sh})$  değeri  $E(t) = 4734 \times \sqrt{35} \times \left( \frac{607}{4+0,85 \times (49+1,731642)} \right)^{1/2} = 29059,65$  MPa olarak hesap edilmiştir.

(6.24) eşitliğinde belirtilen  $\varepsilon_{s\infty}$  ;

$$\varepsilon_{s\infty} = \alpha_1 \alpha_2 (0,019 w^{2,1} \bar{f}_c^{-0,28} + 270) \quad (6.27)$$

Burada  $\alpha_1$  çimento katsayısı ve  $\alpha_2$  beton kür durumuna bağlı katsayı olmak üzere;

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{Tip 1 çimento, Normal portland çimentosu} \\ & \text{(Genel amaç için kullanılmakta)} \\ 0,85 & \text{Tip 2 çimento, Değiştirilmiş portland çimentosu} \\ & \text{(Tip 1'e göre daha az hidratasyon ısısına ve daha çok sülfat dayanıklılığına sahip)} \\ 1,1 & \text{Tip 3 çimento, İlk dayanımı yüksek portland çimentosu} \end{cases}$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0,75 & \text{buhar kürü durumu} \\ 1,2 & \text{kurumaya karşı korumalı yapılan kür durumu} \\ 1,0 & \text{\%100 nem durumunda} \end{cases}$$

Kömürhan Köprüsü için  $\alpha_1=1$  (tip 1 çimento) ve  $\alpha_2=1,2$  (normal kürlenmiş beton) alınmıştır. Bu değerler (6.27) bağıntısında yerine konulduğunda

$$\varepsilon_{s\infty} = 1 \times 1,2 \times (0,019 \times 150^{2,1} \times 35^{-0,28} + 270) = 636,8869 \times 10^{-6} \quad \text{ve} \quad \varepsilon_{sh\infty}$$

değeri de  $\varepsilon_{sh\infty} = 636,8869 \frac{30260,48}{29059,65} = 663,205 \times 10^{-6}$  olarak hesaplanmıştır.

Bu değerler (6.20) bağıntısında yerine konulduğunda kurumadan kaynaklı ortalama büzülme birim Şekil değişikliği:

$\epsilon_{sh}(t, t_0) = -663,205 \times 10^{-6} \times 0,784 \times 1 = -0,00052$  olarak  $t=10000$  gün iÇin bulunmuştur.

Betonun bölgesel olarak kurumasından kaynaklanan sünme birim Şekil değişikliği :

$$C_d(t, t', t_0) = q_5 [exp\{-8H(t)\} - exp\{-8H(t')\}]^{1/2}, \quad (6.28)$$

$q_5$ , kurumadan kaynaklı sünme katsayı,  $H$  kesit gözetmeksizin bağıl nemin ortama bağlı ortalama değeri olmak üzere,

$$q_5 = 7,57 \times 10^5 \times \bar{f}_c^{-1} |\epsilon_{sh\infty}|^{-0,6}, \quad 10^{-6}/\text{MPa} \quad (6.29)$$

$$H(t) = 1 - (1-h)S(t) \quad (6.30)$$

$$H(t') = 1 - (1-h)S(t') \quad (6.31)$$

$$S(t') = \tanh \sqrt{\frac{t'-t_0}{\tau_{sh}}} \quad (6.32)$$

EŐitlikleri kullanılarak  $C_d(t, t', t_0)$  değeri hesaplanabilir. (6.29) eşitliğinden

$q_5 = 7,57 \times 10^5 \times 35^{-1} (663,205 \times 10^{-6}) = 437,5702 \times 10^{-6}$  bulunur.

$H(t) = 1 - (1-0,6) \times 1 = 0,6$  ve  $t' = t_0$  olduğundan  $S(t') = 0$  ve  $H(t') = 1 - (1-0,6) \times 0 = 1$

Bu değerler (6.28) bağıntısında yerine konulursa  $C_d(t, t', t_0) = 437,5702 \times 10^{-6} \times [exp\{-8 \times 1\} - exp\{-8 \times 0,6\}]^{1/2} = 38,97 \times 10^{-6}/\text{MPa}$  olarak bulunur.

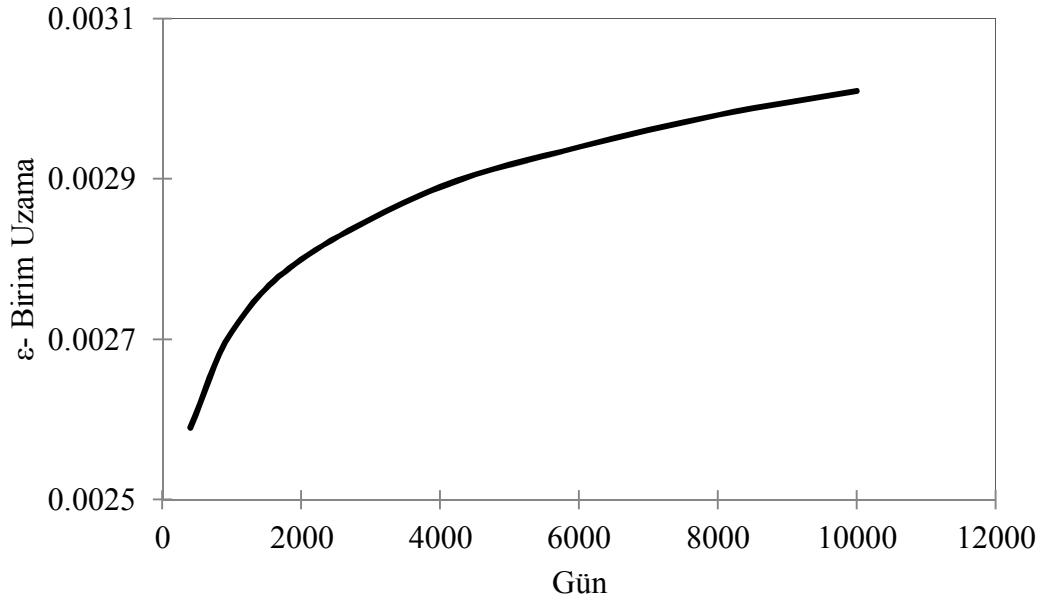
Bu değerler (6.9) bağıntısında yerine konulduğunda  $t=10000$  gün için,

$$J(t, t') = q_1 + C_0(t, t') + C_d(t, t', t_0) = (21,42 + 67,32 + 38,97) \times 10^{-6} = 128 \times 10^{-6}/\text{MPa}$$

(6.9) bağıntısında belirtilen sıcaklık farkının sünme ve bzlmeye etkisini gösteren  $\alpha\Delta T(t)$  değerini hesaplamak için;  $\alpha$ , betonun ısl genleşme katsayısı  $10^{-6}$  ve  $\Delta T(t)$  zamanla oluşan sıcaklık farkı 70 derece olmak üzere, sıcaklık farkından dolayı oluşan birim Şekil değiştirme  $10^{-6} \times 70 = 0,0007$  olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak bulunan değerler (6.8) bağıntısında yerine konulursa Kömürhan köprüsünün 10000 günlük büzülme ve snmeden kaynaklanan toplam birim Şekil değişikliği değeri  $\varepsilon(t) = J(t, t')\sigma + \varepsilon_{sh}(t) + \alpha\Delta T(t) = 128 \times 10^{-6} \times 14 + |-0,00052| + 0,0007 = 0,00301$  olarak hesaplanmaktadır.

Şekil 6.19 da  $t=400$  günden başlayarak  $t=10000$  güne kadar sünme, büzülmeden dolayı köprüde gerçekleşen birim uzama değişimi verilmektedir.



Şekil 6.19. Köprünün B3 Modele göre Sünme ve Büzülmeden dolayı yaptığı birim uzama - gün değişimi

### 6.3. Çeliğin Gevşemesi

Öngerme çelikleri yüksek dayanımlı çeliklerdir. Yüksek sıcaklık ve gerilme durumlarında zamanla uzayarak bir miktar gevşeme göstermektedirler. Öngerme çeliğinin gevşeme özellikleri ve gevşemede oluşan öngerme kayıpları çelik üreticileri tarafından verilmelidir. Çeliğin akma gerilmesinden düşük gerilmede gerilmesi durumunda zamanla oluşan kayıplar TS3233 de verilen aşağıdaki bağıntılar ile bulunur.

$$\frac{f_p}{f_{pi}} = 1 - \frac{\log_{10} t}{10} \left( \frac{f_{pi}}{f_y} - 0,55 \right) \leq 1 \quad (6.34)$$

$$\frac{\log_{10} t}{10} \left( \frac{f_{pi}}{f_y} - 0,55 \right) = 1 - \frac{f_p}{f_{pi}} \quad , \quad t \geq 1 \text{ saat} \quad (6.35)$$

$f_{pi}/f_y \leq 0,55$  ise kayıp yoktur. Burada  $f_p$  kablodaki gerilmeyi,  $f_{pi}$ ,  $f_y$  donatı başlangıç ve akma gerilmesini,  $t$  saat olarak germe anından sonraki zamanı göstermektedir.

Bir yılda  $f_{pi}=0,79f_y$  lik gerilme altında %9,5 kayıp, 50 yılda aynı gerilme altında %13,5 kayıp olacağı (Şener, 2006) belirtmiştir. TS 3233 de çekme gerilmesi çeliğin karakteristik kopma dayanımının %70 ya da daha fazla olması durumunda kayıp, öngerme kuvvetinin %8'i, %50 olması durumunda ise kayıp öngerme kuvvetinin %0,1 olacağını belirtmektedir. Ara değerlerde kaybın doğrusal olarak azaldığı kabul edilmektedir.

Kömürhan köprüsünde ilk öngerme kuvveti çeliğin akma gerilmesinin ( $f_y=1582$  MPa) %70'i olarak alınmıştır. Bu değer kopma dayanımının (1800 MPa) yaklaşık olarak ( $1582 \times 0,7 / 1800 = 0,615$ ) %62'sidir. TS 3233 de belirtilen %8 ile %0,1 değerleri arasında oran orantı ile kaybın  $(0,08-0,001) \times 12/20 = \%4,74$  olduğu açığa çıkmaktadır.



#### 6.4. Gerilme Kayıpları Sonucunda Yerdeğiştirme

Kömürhan köprüsünde B3 modele göre toplam sünme ve büzülmeden dolayı  $t=10000$  günde kabloda  $\Delta\sigma = \varepsilon \times E_s = 0,00301 \times 195 \times 10^3 = 586,95$  MPa gerilme kaybı oluşmuştur. Çeliğin gevşemesinden dolayı uygulanan ilk öngerme kuvvetinden %4,74 yani 52,14 MPa gerilme kaybı oluşmuştur.

Kablodaki toplam bulunan gerilme kaybı =  $586,95 + 52,14 = 639,09$  MPa dır.

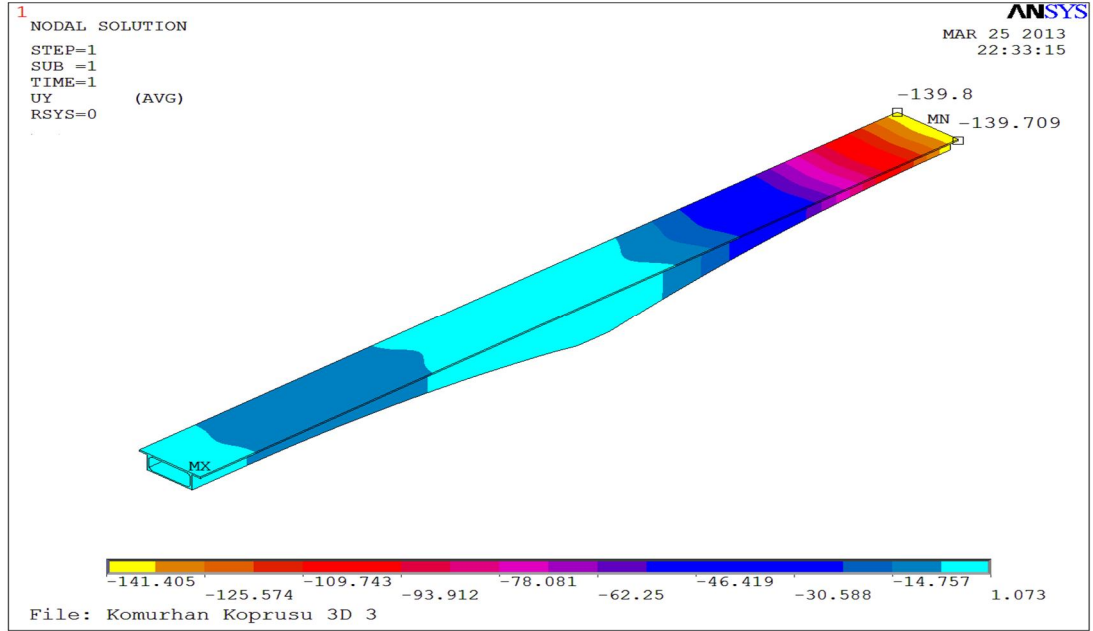
Gerilme kaybı ilk öngerme değerinden çıkarılırsa,

Yaklaşık etkin ardgerme =  $1100 - 639,09 = 460,91$  MPa dır.

$\varepsilon = \frac{460,91}{195000} \cong 0,0024$  değeri ANSYS de gerçek sabitler (real constant) olarak girilip analiz edilirse;

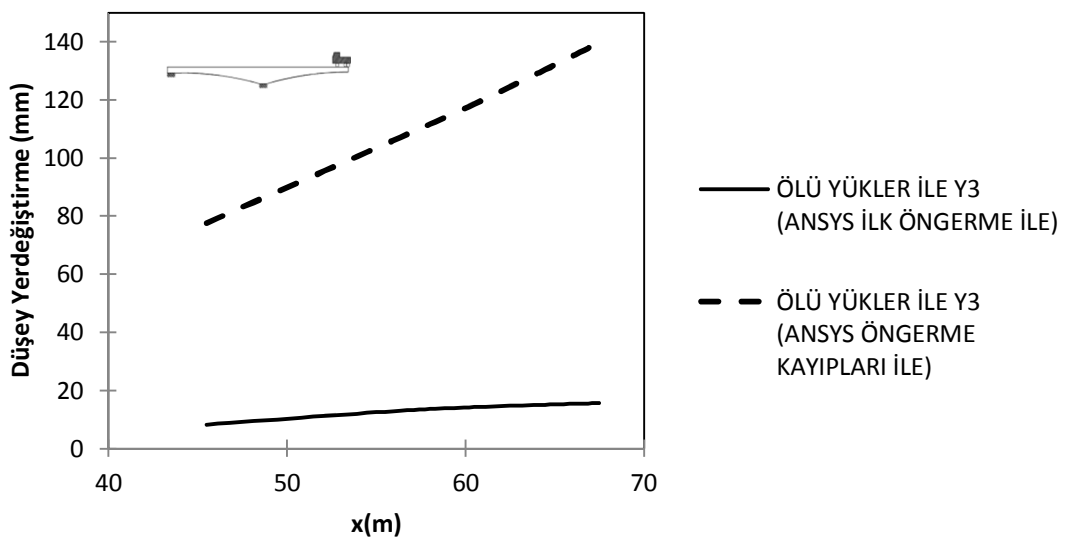
Kendi ağırlığı, kaplama ağırlığı ve konsol ucunda 1 adet 20 tonluk kamyon yüklemesi (Y3) ile birlikte köprü konsol ucu yerdeğiştirme değeri -139,8 mm olarak bulunmaktadır (Şekil 6.19). B3 model ile çeliğin gevşemesi sonucu oluşan gerilme kayıpları nedeni ile ölü yüklerle beraber Y3 yüklemesinde daha önce -15,6 mm (Şekil 6.7) çıkan konsol ucu yereğiştirmesi -139,8 mm'ye yükselmiştir. Aradaki -124,2mm' lik farkın nedeni gerilme kayıplarıdır. Şekil 6.21'de aradaki fark daha iyi anlaşılabilir. Şekil 6.21'de aradaki fark daha iyi anlaşılabilir.

Ölü yükler ile kayıplar altında Y3 yüklemesi sonucu bulunan 139,8 mm'den kayıplar dikkate alınmadan Y3 yüklemesi sonucu elde edilen 9 mm (Çizelge 6.1) çıkarılırsa olursa yaklaşık 131 mm elde edilir. Bu değere farklı döşeme kalınlığından kaynaklanan büzülme yerdeğiştirmesi değeri 24 mm eklenecek olursa 155 mm düşey yerdeğiştirme elde edilir. Saha ölçümlerinde ölü yükler altında köprü kenar mesnetine göre konsol ucu 12-13 cm (Domaniç, Y, 2008) yerdeğiştirmiştir.



Şekil 6.20. Köprünün Konsol ucunun B3 Model ve Çelik gevşemesi sonucu oluşan gerilme kayıpları ile ölü yüklerle ilaveten 1 adet konsol ucunda 200 kN kamyon yüklemesi (Y3) sonucu yerdeğişirmesi -139,8 mm

Köprünün ölü yükleri, Y3 yüklemesi ile öngerilme kayıplarının ANSYS’de modele girilmesi sonucunda elde edilen değerlerin öngerilme kayıpları olmadan ölü yüklerle Y3 yüklemesinden elde edilen değerler ile karşılaştırılması aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 6.21).



Şekil 6.21. Köprünün Konsol ucunun ölü yüklerle Y3 yüklemesi durumlarına göre düşey yerdeğiştirme -x(m) grafiği

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuç olarak yapılan hesaplarla Kömürhan Köprüsü'nde köprü kendi ağırlığı, ek ölü yükler, yaya yükü, H<sub>30</sub>-S<sub>24</sub> kamyon yüklemesi, saha incelemesinde kullanılan 250 kN ağırlığında kamyon yüklemesi ile B3 model yardımıyla  $t=10000$  gün içinde oluşan sünme, büzülme ve çeliğin gevşemesinden dolayı oluşan öngerme kayıpları dikkate alınarak köprüde oluşan zaman bağlı yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır.

Köprünün ANSYS sonlu eleman programı ile modellenmesiyle bulunan sonuçlar şunlardır:

- 1- Y3 kamyon yüklemesinde N16 noktası için ANSYS'de düşey yerdeğiştirme 10 mm, saha incelemesinde yapılan düşey yerdeğiştirme ölçümü ise 9 mm bulunmuştur.
- 2- Kömürhan köprüsünde B3 modele göre  $t=10000$  günlük sünme ve büzülmeden ötürü 586,95 MPa ve çeliğin gevşemesinden ötürü 52,14 MPa öngerilme kaybı bulunmuştur. Sünme, büzülme ve çeliğin gevşemesinde ötürü toplam öngerme kaybı 639,1 MPa bulunmuştur.
- 3- Kendi ağırlığı ile ek ölü yükler ve öngerilme kayıpları altında konsol ucunda 131 mm düşey yerdeğiştirme elde edilmiştir. Saha ölçümlerinde bu değer 12-13 cm arasında bulunmuştur.
- 4- Farklı döşeme kalınlıklarında büzülmeden dolayı oluşan konsol ucu düşey yerdeğiştirme değeri 10000 gün sonra 24 mm bulunmuştur.
- 5- Köprünün ana ayağında oluşan normal gerilmeler ve ana açıklık konsol ucundaki düşey yerdeğiştirmeler sadece ana açıklık trafik yüklemesi yapıldığında daha büyük bulunmuştur.

Bütün bu hesaplar sonucunda köprünün güçlendirmeye ihtiyacı olduğu, eğer kendi haline bırakılırsa zamanla orta açıklık konsollarında düşey yerdeğiştirmenin ve öngerme kayıplarının artacağı belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak da moment ve kesme kapasitelerinin azalmasıyla köprüde göçmeye varabilecek önemli hasarlar oluşacağı düşünülmektedir. Bunun en büyük nedeni öngerilme kayıplarıdır. Köprüyü güçlendirmek veya onarmak amacıyla yeniden ard germe kablolarının kullanılması sabit kesitte aşırı donatılı durum doğurabileceğini Palau (Mehmet, A., Benzer, 2011) köprüsü göstermiştir. Bu durumda onarım ve güçlendirme için detaylı bir proje yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

Mehmet, A., Benzer, “Koror-Babelthuap (Palau) Köprüsünün Sonlu Elemanlar Modeli İle Göçme Nedenleri Üzerine Bir Çalışma”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2011)

Altunışık, A.C., “Karayolları Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi”, Doktora Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, (2010)

Bayraktar, A., Altunışık, A., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A., and Taş, Y., “Vibration Characteristics of Kömürhan Highway Bridge Constructed with Balanced Cantilever Method.”, **J. Perform. Constr. Facil.**, 23(2): 90–99 (2009a).

Bayraktar, A., Altunışık A.C., Sevim, B., Türker, T., “Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirmesi.”, **İMO Teknik Dergi**, 4675-4700 (2009b).

Bazant, Z. P., “Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method”, **ACI Journal**, 69: 212-217 (1972).

Bazant, Z.P. and Baweja, S. “Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: ModelB3”, **Materials and Structures**, 28: 357–367 (1995).

Bazant, Z.P., Yu, Q., Li, G.H., “Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders”, Structural Engineering Report, 09-12/ITI, **Northwestern Uni**, Evanston, Ill, USA (2009).

Bazant, Z.P., Yu, Q., Li, G.H., Klein, G.J., Kristek, V., “Excessive Deflections of Record-Span Prestressed Box Girder”, **ACI Concrete International**, 32(6): 44-52 (2010).

Çağlar, Y., Şener, S., Belgin, Ç., Yıldırım, O., Baştürk, A., Arslan, A., “Kömürhan Köprüsünde Yerdeğiştirmeler”, **2.Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu**, Eskişehir, 83 (2011).

Domaniç, Y., Mühendislik LTD. ŞTİ., “Kömürhan Köprüsü Ön İnceleme Raporu”, **Karayolları Genel Müdürlüğü Köprüler Dairesi Başkanlığı Karayolları 8.Bölge Müdürlüğü** (2008).

Dywidag Prestressing Systems Using Bars, **Dywidag Systems International**

Ersoy, U., “Reinforced concrete”, **METU**, Ankara, 436 (2000).

Kristek, V., Bazant, Z.P., Zich, M., Kohoutkova, A., “Box Girder Bridge Deflections”, **ACI Concrete International**, 28(1): 55-63 (2006).

McDonald, B., Saraf, V., Ross, B., “A Spectacular Collapse: The Korrer-Babeldaob (Palau) Balanced Cantilever Prestressed, Post-Tensioned Bridge”, **Indian Concrete J.**, 77(3): 955-962 (2004).

Nakasonand, Y., Yoshimoto, S., Stolarski, T.A., “Engineering Analysis with ANSYS Software”, **Elsevier Butterworth-Heinemann** (2006).

Pilz, M., “The Collapse of the K-B Bridge in 1996”, *A MSc Dissertation at the Imperial College London*, Lacer (2), 43-52 (1997).

Şener, S., “Öngerilmeli Beton”, *Alp yayınevi*, Ankara (2006).

Tanyıldız, H., “Kömürhan Köprüsünün Nivelman Değişimlerinin İncelenmesi”, **2.Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu**, Antalya, 487-494 (2007).

Yol Köprüleri İçin Teknik Şartname, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara (1982).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KORKMAZ, Ümit  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 02.03.1987 Çankaya  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 505 714 76 68  
e-mail : [mitkorkmaz1987@hotmail.com](mailto:mitkorkmaz1987@hotmail.com)

### Eğitim

Eğitim Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Dokuz Eylül /İnşaat Müh.Bölümü	2009
Lise	Başkent Lisesi	2004

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-2013	APCB (Aydın Pelin-Can Binzet) Müşavir	İnş. Müh.
	Mühendislik	

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Futbol