

**TEK AÇIKLIKLI YIĞMA KEMER KÖPRÜLERİN
(ORDU, SARPDERE KÖPRÜSÜ) GÖÇME
YÜKLERİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Suat Gökhan ÖZKAYA

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN
2013
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TEK AÇIKLIKLI YIĞMA KEMER KÖPRÜLERİN (ORDU,
SARPDERE KÖPRÜSÜ) GÖÇME YÜKLERİNİN SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Suat Gökhan ÖZKAYA

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ERZURUM
2013**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**TEK AÇIKLIKLI YIĞMA KEMER KÖPRÜLERİN (ORDU, SARPDERE
KÖPRÜSÜ) GÖÇME YÜKLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN danışmanlığında, Suat Gökhan ÖZKAYA tarafından hazırlanan bu çalışma 17.07.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Rüstem GÜL

İmza :

Üye : Prof. Dr. Ensar OĞUZ

İmza :

Üye : Doç. Dr. Cüneyt AYDIN

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TEK AÇIKLIKLI YIĞMA KEMER KÖPRÜLERİN (ORDU, SARPDERE KÖPRÜSÜ) GÖÇME YÜKLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Suat Gökhan ÖZKAYA

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Bu çalışmada, yığma kemer köprülerin göçme yüklerinin hesaplanmasında kullanılan mevcut yöntemler incelenmiş ve tek açıklıklı yığma kemer köprülerin belirli yükler altında göstermiş olduğu davranışlar statik analiz yöntemiyle incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan model, 3 boyutlu olarak ANSYS paket programı ile oluşturulmuş ve analiz sonuçları yine bu program kullanılarak elde edilmiştir. Oluşturulan model, Ordu ilinde bulunan tarihi Sarpdere Köprüsünün birebir ölçüleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki mevcut çalışmalar ile uyum göstermiştir.

Ayrıca, köprü boyunca farklı yerlere uygulanan yüklerin sistem üzerindeki etkisi incelenmiş, tek açıklıklı yığma kemerlerin uygulanan yükler altındaki davranışları değerlendirilmiştir.

2013, 112 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yığma kemer köprüler, Göçme yükü, Sonlu elemanlar, Statik analiz

ABSTRACT

Master Thesis

THE ANALYSIS OF COLLAPSE LOADS OF SINGLE-SPANDED MASONRY ARCH BRIDGES (ORDU, SARPDERE KÖPRÜSÜ) BY THE METHOD OF FINITE ELEMENTS

Suat Gökhan ÖZKAYA

Atatürk University
Institute of Science
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

In this study, current method used to calculate collapse loads of masonry arch bridges have been investigated and analysis of behaviour of single-spanned masonry arch bridges under certain loads with static analysis method has been carried out.

The model used in the study has been three-dimensionally formed with ANSYS package programme and the result of analysis has been obtain using the same programme. The formed model has been relaised using the same dimensions of historic Sarpdere Bridge in Ordu. The results have been in accord with current studies in technical literature.

Also, the effects of applied loads along the bridge in diffirent places on the system have been investigated, the behaviour of single –spanned masonry arch bridges on the system has been evaluated.

2013, 112 pages

Keywords: Masonry arch bridge, Collapse loads, Finite elements, Static analysis

TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırladığım bu çalışmada, araştırmalarımı yönlendiren ve her türlü destek, teşvik ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince yaptığı yardımlardan dolayı, Sayın Yrd. Doç. Dr. İlker KAZAZ'a, teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım süresince, göstermiş oldukları büyük sabır ve özveriyle bana destek olan çok kıymetli aileme şükranlarımı sunarım.

Suat Gökhan ÖZKAYA

Temmuz 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel	1
1.2. Kültürel Varlıkların Korunması	4
1.3. Yapısal Sistemler İçin Yapım Teknikleri ve Yığma Malzemeler	6
1.3.1. Doğal taş.....	6
1.3.2. Harç	7
1.4. Yığma Formlarının Gelişimi	8
1.5. Kemerler	11
1.5.1. Taş kemer köprülerin karakteristik özellikleri	12
1.5.2. Kemerin yapısal formları.....	13
1.5.3. Kemer çeşitleri	14
2. KURAMSAL TEMELLER.....	21
2.1. Yığma Kemer Köprüler Üzerine Yapılan İlk Çalışmalar.....	21
2.2. Taş Kemer Köprü'nün Yapımı	26
2.3. Kemer Formunun İlk Örnekleri.....	27
2.3.1. Köprü ve su kemerlerinde kemerin kullanımı	28
2.3.2. Türkiye' deki köprü örnekleri	30
2.4. Kemer Köprülerdeki Kısıtlamalar	33
2.5. Kemer Köprülerin Avantajları.....	33
2.6. Kemerlerin Çalışma Prensipleri ve Yapım Özellikleri.....	34
2.7. Yapıları Etkileyen Yükler	34
2.8. Yığma Kemer Köprülerinde Uygulanan Analiz Yöntemleri	37
2.8.1. Elastik analiz yöntemleri	38

2.8.2. Plastik analiz yöntemleri	38
2.8.3. Analitik yöntemler.....	39
2.9. Tarihi Yapıların Yapısal Analizinde Karşılaşılan Sorunlar	41
2.9.1. Modelleme stratejileri.....	42
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	43
3.1. ANSYS Sonlu Elemanlar Programı	43
3.1.1. ANSYS sonlu elemanlar yazılımının tanıtılması	43
3.1.2. Solid65 elemanı.....	43
3.1.3. ANSYS programı ile sonlu eleman analizi	44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	57
5. SONUÇ.....	106
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	113

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

D	: Büyüklük Alanının Düğüm Noktalarındaki Vektör
E	: Elastisite Modülü
F	: Kilit Taşı İle Üzengi Hattı Arasındaki Uzaklık
F	: Uç Kuvvet Vektörü
F _c	: Çevre Şartları Faktörü
F _c	: Derz Faktörü
F _m	: Malzeme Faktörü
F _p	: Profil Faktörü
F _{sr}	: Açıklık Faktörü
K	: Sabitler Matrisi
kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
L	: Üzengi Noktaları Arasındaki Açıklık
M	: Eğilme Momenti
m	: Metre
m ²	: Metrekare
m ³	: Metreküp
N, N ₀ , N ₁	: Normal Kuvvet
P	: Dış Kuvvet Vektörü
q	: Şiddet
R	: Yük Vektörü
R	: Dengelenmemiş Yük Vektörü
s	: Sabit Mesnet İle Mafsal Noktası Arasındaki Kemer Uzunluğu
t	: Ton
V	: Kesme Kuvveti
X	: Yatay Uzaklık
Y	: Düşey Eksen
B	: Açı
δd	: Deplasman Vektörü
L'	: İki Kemer Ayağı Arasındaki Uzaklık

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Fairy Bridge Köprüsü	2
Şekil 1.2. Tushuk Tash (Shipton's Arch)	2
Şekil 1.3. Sarp dere köprüsü	5
Şekil 1.4. Eski yığma yapı örnekleri a) Kıbrıs'taki bir köyden, arı kovanı şeklindeki evler (M.Ö. 5650), b) Irak'taki bir köyden, dikdörtgen şeklindeki evler (M.Ö. 5500-6000)	9
Şekil 1.5. Mısır'ın başkenti Thabes'te duvarcılık örneği.....	10
Şekil 1.6. Kemer elemanları.....	12
Şekil 1.7. Kemer gelişim şeması.....	14
Şekil 2.1. Zincir eğrisi ve zincirin döndürülmesiyle elde edilen kemerler	25
Şekil 2.2. Taş köprü yapım aşaması.....	27
Şekil 2.3. Cendere Köprüsü	28
Şekil 2.4. Bozdoğan su kemeri	29
Şekil 2.5. Gard köprüsü	30
Şekil 2.6. Misis köprüsü	31
Şekil 2.7. Uzun köprü	32
Şekil 2.8. Akköprü	33
Şekil 2.9. Düşey yük	35
Şekil 2.10. Yatay yük.....	35
Şekil 2.11. Etkime biçimine göre tekil ve çizgisel yük.....	36
Şekil 2.12. Yayılı yük	36
Şekil 2.13. Modelleme teknikleri.....	42
Şekil 3.1. Solid65 elemanı	44
Şekil 3.2. Model oluşturma nesneleri	45
Şekil 3.3. Serbest elemanlara bölme	47
Şekil 3.4. Planlanmış elemanlara bölme	47
Şekil 3.5. Tipik kemer örneği	49
Şekil 3.6. Düzgün yayılı yükle yüklü üç mafsallı bir kemer	50
Şekil 3.7. Kemerin herhangi bir kesitindeki iç kuvvetler	50

Şekil 3.8. Newton Raphson metodunda çözümün ilerleyişi	54
Şekil 3.9. Değiştirilmiş Newton Raphson metodu.....	55
Şekil 4.1. Sarpdere köprüsü	57
Şekil 4.2. Sarpdere köprüsünün boyuna ve enine kesit görüşleri	58
Şekil 4.3. Sarpdere köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli	59
Şekil 4.4. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirme durumu	60
Şekil 4.5. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu.....	61
Şekil 4.6. Modelin yüklemmeden sonraki deformasyona uğramış durumu	61
Şekil 4.7. Modelde yüklemmeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	62
Şekil 4.8. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu.....	62
Şekil 4.9. Modelin yüklemmeden sonraki deformasyona uğramış durumu	63
Şekil 4.10. Modelde yüklemmeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	63
Şekil 4.11. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	64
Şekil 4.12. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirme durumu	64
Şekil 4.13. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	65
Şekil 4.14. Modelin yüklemmeden sonraki deformasyona uğramış durumu	65
Şekil 4.15. Modelde yüklemmeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	66
Şekil 4.16. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	66
Şekil 4.17. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirme durumu ...	67
Şekil 4.18. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	67
Şekil 4.19. Modelin yüklemmeden sonraki deformasyona uğramış durumu	68
Şekil 4.20. Modelde yüklemmeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	68
Şekil 4.21. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	69
Şekil 4.22. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirme durumu	69
Şekil 4.23. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	70
Şekil 4.24. Modelin yüklemmeden sonraki deformasyona uğramış durumu	70
Şekil 4.25. Modelde yüklemmeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	71
Şekil 4.26. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	71
Şekil 4.27. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirme durumu	72
Şekil 4.28. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	72
Şekil 4.29. Modelin yüklemmeden sonraki deformasyona uğramış durumu	73
Şekil 4.30. Modelde yüklemmeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	73

Şekil 4.31. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	74
Şekil 4.32. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu	74
Şekil 4.33. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	75
Şekil 4.34. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu	75
Şekil 4.35. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	76
Şekil 4.36. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	76
Şekil 4.37. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu	77
Şekil 4.38. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	77
Şekil 4.39. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu	78
Şekil 4.40. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	78
Şekil 4.41. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	79
Şekil 4.42. Çizgisel yük grafiği	79
Şekil 4.43. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	80
Şekil 4.44. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	80
Şekil 4.45. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu	81
Şekil 4.16. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	81
Şekil 4.47. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu	82
Şekil 4.48. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu	82
Şekil 4.49. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	83
Şekil 4.50. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	83
Şekil 4.51. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu	84
Şekil 4.52. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	84
Şekil 4.53. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	85
Şekil 4.54. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu	85
Şekil 4.55. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	86
Şekil 4.57. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	87
Şekil 4.58. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	87
Şekil 4.59. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu ...	88
Şekil 4.60. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	88
Şekil 5.61. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu	89
Şekil 4.62. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	89
Şekil 4.63. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	90

Şekil 4.64. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu	90
Şekil 4.65. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	91
Şekil 4.66. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	91
Şekil 4.67. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu	92
Şekil 4.68. Tekil yük grafiği	92
Şekil 4.69. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu	93
Şekil 4.70. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	93
Şekil 4.71. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu	94
Şekil 4.72. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	94
Şekil 4.73. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	95
Şekil 4.74. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu ...	95
Şekil 4.75. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu...	96
Şekil 4.76. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu	96
Şekil 4.77. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	97
Şekil 4.78. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	97
Şekil 4.79. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu	98
Şekil 4.80. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu..	98
Şekil 4.81. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu	99
Şekil 4.82. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	99
Şekil 4.83. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	100
Şekil 4.84. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu ..	100
Şekil 4.85. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu .	101
Şekil 4.86. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu	101
Şekil 4.87. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	102
Şekil 4.88. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	102
Şekil 4.89. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu .	103
Şekil 4.90. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu .	103
Şekil 4.91. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu	104
Şekil 4.92. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu	104
Şekil 4.93. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu	105
Şekil 4.94. Yayılı yük grafiği.....	105

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Görünüşlerine göre kemer çeşitleri.....	15
Çizelge 1.2. Geometrilerine göre kemerler.....	18
Çizelge 1.3. Eğrisel formlu kemerler	19
Çizelge 4.1. Teorik analizlerde dikkate alınan malzeme özellikleri.....	59

1. GİRİŞ

1.1. Genel

Ülkemizde geçmişten günümüze kadar ulaşan farklı dönemlere ait, açıklıkları ve şekilleri farklı birçok taş kemer köprü mevcuttur. Bu köprüler, sosyal ve ekonomik amaçların yanı sıra stratejik amaçlar için de yapılmıştır. Eski zamanlarda kullanılan emniyetli tasarım metotları sayesinde, bu köprülerin çoğunun çökme riski olmadan günümüz trafik yüklerini taşıyabilecekleri kabul edilir.

Tarihi köprülerin çoğu büyük depremlere maruz kalmış olsalar bile günümüze kadar ayakta kalmayı başarmışlardır. Bu köprülerin ayakta yıkılmadan kalmalarının arkasında iki neden vardır. Birincisi duvar yapımında kullanılan malzemenin çok dayanıklı olması, ikincisi ise kaliteli işçiliktir.

Eski ustaların herhangi bir mühendislik bilgisi olmadan bu kadar muazzam eserler yapmaları hayranlık uyandırıyor. Akıllara ilk gelen bu eserleri yapmadan önce ellerinde benzer ürünlerin nasıl yapıldıkları veya yapılacakları hakkında bilgi olup olmadığıdır. Belki de eski ustalar eserleri oluştururken ilham kaynaklarını doğadan almışlardır. Çünkü açıklıkları geçmek için tasarlamış oldukları yığma köprülerin benzer bir biçimi doğada zaten var olan şekillerdir (Lourenço 1996; Özer 2006).



Şekil 1.1. Fairy Bridge Köprüsü (Anonymous 2013a)



Şekil 1.2. Tushuk Tash (Shipton's Arch) (Anonymous 2013e)

Çin'de bulunan doğal şekiller adeta kemer köprü görünümündedirler. Yukarıdaki örnekler ve daha bunlar gibi birçok örnek; eski ustalara köprülerin hem uzunluk hemde estetik açıdan farklı formları hususunda ilham kaynağı olmuş olabilir.

Uzun sürede inşa edilen köprülerin bazıları günümüze kadar yıkılmadan ulaşmıştır. Ancak bu hiç yıkılmayacakları anlamına gelmez. Kemerlerin yapısal yükleri taşıyıp taşıyamayacakları kontrol edilmelidir. Çünkü araçların ağırlıkları giderek artmakta ve bu nedenle de köprülerin güçlendirilme gereksinimleri doğmaktadır. Eski yığma köprülerin gerçekten güçlendirme gereksinimlerinin olup olmadığını belirlemek için, biz mühendislerin ilk görevi çökmeye neden olacak kritik yükleri belirlemektir.

Yapı elemanları ve yapı sistemlerinin çeşitli yüklemeler altındaki davranışlarının incelenmesi için deneysel çalışmaların gerekliliği tartışılmazdır. Deneysel çalışmalara ait bilgisayar modellerinin oluşturulması ve model analizinden elde edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırılması yoluyla yapılan deneylerin tahkik edilmesi karşımıza çıkmaktadır. Modelleme kimi zaman bir tasarımın uygulamaya konulmasından önce yapılan bir çalışma olarak ele alınır. Örneğin, uçak üreten bir firmanın tasarladığı uçak modellerinin bilgisayar ortamında çeşitli statik ve dinamik yükler altında davranışını analiz etmesi ve en uygun tasarımı üretime geçirmesi olabilir.

Deneysel çalışmalara başlamadan önce, deney düzeneğinin bir bilgisayar modelinin oluşturulması avantajlıdır. Mesela, deney düzeneğine ve deney numunelerine ait ölçü ve parametrelerin belirlenmesi, test edilecek deney numunesi sayısının belirlenmesi, deney sırasında verilerin elde edileceği kritik noktaların belirlenmesi gibi hususlar, sonlu eleman modellemeleri ve bu modellerin çözümlenmeleri ile mümkün olabilir. Bu tür modeller sayesinde, test edilecek deney numunesi sayısının en aza indirgenmesi ve buna bağlı olarak malzeme, iş gücü ve zaman yönünden oldukça önemli derecede ekonomik avantajlar sağlanabilir.

Sonlu elemanlar metodu uygulamaları için kişisel bilgisayar programları hazırlanabildiği gibi mevcut paket programlar da kullanılmaktadır. Sonlu eleman modellemeleri için ANSYS, SAP (Structural Analysis Program), ABAQUS gibi paket programlar mevcuttur. Bu tür paket programlar çok sayıda mühendis ve bilgisayar programcısının uzun yıllar süren ortak çalışmaları sonucu hazırlanmıştır. Karmaşık problemlerin sonlu eleman modellemeleri için kişisel analiz programları yazmak

oldukça zordur. Ayrıca kişisel programın hazırlanmasında ki maddi boyut düşünüldüğünde mevcut paket programların kullanılması daha avantajlı olmaktadır (Dede 2006).

Bu çalışma da ANSYS paket programı kullanılmıştır. ANSYS programında modelleme sırasında ihtiyaç duyulabilecek çok sayıda hazır eleman modülleri mevcuttur. Bu modüller yardımıyla tek açıklıklı kemer örneği ANSYS programı kullanılarak modellenmiştir. Ve sonrasında farklı büyüklüklerde ve farklı yerlere uygulanan yüklerle modelin yapısal davranışları incelenmiştir.

1.2. Kültürel Varlıkların Korunması

Tarihi eserler oluşturuldukları malzemeleri, işlevleri, yapı sistemleri, inşa edildikleri zemin cinsleri ve benzeri birçok bakımdan çok geniş bir çerçevede değerlendirilmelidirler. Geçmişten günümüze kadar ulaşan çoğu tarihi yapının restorasyona ihtiyacı vardır. Örnek olarak çalışma kapsamındaki Sarp Dere Köprüsü 18. Yüzyılda Çelenk Zade Hacı Mehmet Ağa tarafından yaptırılmış ve günümüze kadar ulaşmıştır. Yakın zamanda restorasyon çalışmaları başlamıştır (Anonim 2013b).



Şekil 1.3. Sarp dere köprüsü (Anonim 2013b)

Tarihi eserlerin korunması ve onarımı denildiğinde her türlü doğal afetler ve dışarıdan gelen zararlar dikkate alınmalıdır. Örneğin depremler yapının yıkılma veya hasar görme riskini artırırken, kötü işçilikte yapıya zarar verebilecek durumlar arasındadır.

Günümüze kadar ulaşmış tarihi yapıların incelenip, geçmişi ve son durumu göz önünde bulundurularak uygun güçlendirme yöntemleriyle sağlamlaştırılmaları gerekmektedir. Aksi takdirde yanlış onarım ve güçlendirme yapıya zarar verebilir.

Geçmiş ile günümüz arasında bir köprü görevi gören tarihi yapılar eski ustalarımızın tecrübelerini aktarmada araç olmuşlardır. Bu yüzden tarihi yapılar ne kadar doğru yorumlanırsa, yeni tasarımlara da o kadar yol gösterici olacaklardır. Ne yazık ki, Türkiye’deki tarihi yapıların çoğu iyi durumda değildir. Birçok yapının taşıyıcı elamanlarında önemli çatlaklar bulunmaktadır. Kültürel bir miras olan tarihi yapının

onarım çalışmalarından önce yapı hakkındaki tüm bilgilerin edinilmesi gerekmektedir. Bu tür yapıların yük taşıma mekanizmasını bilmek, yapıda kullanılan malzemelerin özelliklerini öğrenmek ve sonrasında yapılacak işlere karar vermek gerekmektedir. Ayrıca restorasyon çalışmalarına başlamadan önce yapının ölçüleri gerçeğine uygun şekilde bilgisayar ortamında tasarlanabilir. Sonrasında ise üzerine gerçeğe yakın yükler yüklenerek analizler yapılabilir. Böylece onarım ve güçlendirme için daha az riskle karar vermiş olunur (Şen 2006).

1.3. Yapısal Sistemler İçin Yapım Teknikleri ve Yığma Malzemeler

Günümüzde kullanılan yığma malzemeler çok çeşitlidir. Bunlara taş, tuğla, harç örnek verilebilir. Unutulmamalıdır ki kullanılan değişik özelliklere sahip karmaşık yapı malzemeleri doğada bulunan ham maddelerin işlenmesi ile elde edilir. Örneğin eski insanlar korunma ve barınma için kolay elde edilebilir gevşek taş parçaları ve aşınmış kaya parçaları kullanmışlardır. Mağaralarda yaşayan insanlar, yaşadıkları yerleri kemerli kaya parçalarıyla, taş ve kavisli kaplamalarla kaplamışlardır. Buradan da anlaşılacağı gibi insanlar yaptığı işlerde doğayı taklit etmişlerdir (Özer 2006).

1.3.1. Doğal taş

Doğada bulunan ya da taş ocaklarından çıkarılan, homojen yapılı, atmosfer etkilerine dayanıklı olan doğal taş, akıcı kıvamdaki magma tabakasının zamanla soğuması ve sertleşmesi sonucunda oluşan bir malzemedir. Basınç kuvvetine karşı dayanıklı, çekme kuvvetine karşı zayıf bir malzeme olan taş, bu özelliklerinden dolayı kusursuz bir yığma yapı elemanı malzemesidir. Doğada da bolca bulunmasından dolayı basınca çalışan kemer, kubbe ve tonozlu yapılarda sıklıkla kullanılmıştır. Taştan yapılmış yapı elemanlarının dayanımını genellikle taş ve harç birleşiminin ortak davranışı belirler. Taşın sağlam ve doğa koşullarına karşı en dayanıklı malzeme olmasına rağmen taşla çalışılması zordur ve daha çok işçilik gerektirir (Güngör 1967)

Eski uluslar taşı yapıların taşıyıcı sistemlerinde kullanmışlardır. Örneğin Hitit, Asur ve Mısırlılar granit, kireç taşı ve kum taşı başlıca tapınaklarının taşıyıcı sistemlerinde kullanmışlar ve yüzeyini mermerle kaplamışlardır (Kuban 1998; Ünay 2002).

1.3.2. Harç

Harç; taş, tuğla gibi yığma yapı malzemesinin birim elemanlarını bir arada tutarak birleşik bir yapı elemanı oluşturur. Bağlayıcı malzeme, kum ve su içeren harç, bağlayıcı malzemenin cinsine göre adlandırılır. Bağlayıcı malzeme olarak genellikle kireç kaymağı, sönmüş kireç, ya da Portland çimentosu kullanılır. Alçı harcı, kireç harcı, puzzolan harcı, çimento harcı, Horasan harcı ve karışık (kireç- çimento karışımı) harç gibi çeşitleri vardır. Kerpiç ve tuğlanın yapı malzemesi olarak kullanıldığı bölgelerde bağlayıcı olarak kullanılan ‘çamur’, ilk kullanılan harçtır. Çamurun ardından, kireç harcı kullanılmaya başlanmıştır. Kireç, kum ve su karışımından oluşan kireç harcının ilk olarak Mısırlılar tarafından kullanıldığı tahmin edilmekle birlikte Romalılar tarafından kullanıldığı bilinmektedir. Romalılar, taş ve tuğla duvarları kireç harcıyla birleştirmiş, kubbe ve tonoz yapımında ise beton gibi dökülerek yapılan ‘puzzolan’ harcı kullanmışlardır. Puzzolan harcının ana malzemesi, volkanik kökenli bir kül olan puzzolan ve kireçtir. İçerisine çeşitli büyüklüklerde kırılmış ya da öğütülmüş tuğla parçaları, tuğla tozu, odun kömürünün de eklenmesiyle kullanılacak yere göre harç çeşitleri geliştirmişlerdir. Kireç harçları hidrolik ve hidrolik olmayanlar olarak iki grupta tanımlanmaktadır. Hidrolik olmayanlar, kireç ile agregaların karışımıyla elde edilmektedir. Bu harçlar; kirecin, havanın karbondioksiti ile kalsiyum karbonata dönüşmesi sonucu sertleşmektedir. Hidrolik harçlar ise hidrolik kireç kullanılarak veya saf kireç ile puzzolanların karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Hidrolik kireç kullanılarak elde edilen harçlar, kirecin kalsiyum karbonata dönüşmesi ve içinde bulundurduğu kalsiyum alüminat silikatların su ile kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminat hidratların oluşturması sonucu sertleşmektedir. Puzzolan kullanılarak elde edilen hidrolik harçlarda ise kireç, puzzolanlar ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat, kalsiyum alüminat hidrat vb. ürünleri oluşturur. Hidrolik harçların

mukavemetleri, oluşan bu ürünlerden dolayı hidrolik olmayanlardan daha büyüktür (Topçu vd 2005; Mahrebel 2006).

Selçuklu ve Osmanlı dönemi yapılarında ise kireç ve kum karışımına öğütölmüş tuğla katılması ile yapılan ‘Horasan’ denilen harç kullanılmıştır. Yapı elemanının basınç, kayma ve çekme dayanımlarını büyük ölçüde etkileyen harcın basınç dayanımı, bağlayıcı malzemenin ve su miktarının oranına göre değişir (Kuban 1998; Akman 2003).

1.4. Yığma Formlarının Gelişimi

Duvarcılıkta kullanılan ilk malzeme muhtemelen taştı. Taş veya tuğla blokların birbiri üzerine konulup harç ile bağlanmasıyla oluşturulan duvarcılık tekniğı, sadeliğı ve sağlamlığı ile kendini ıspatlamıştır (Özer 2006). Duvarcılık, araç ve gereçlerin kullanılabilirliklerinin ve özelliklerinin gelişimine paralel özellik göstermiştir. Örneğın eski yakın doğuda, evlerin gelişimi kulübelerle başlamıştır. Sonraları opsidal ev tipine geçilmiştir. En sonunda evler dikdörtgen şekilde yapılmıştır. Eski yakın doğunun tarih öncesi taş mimari örneklerinden bazıları;



(a)



(b)

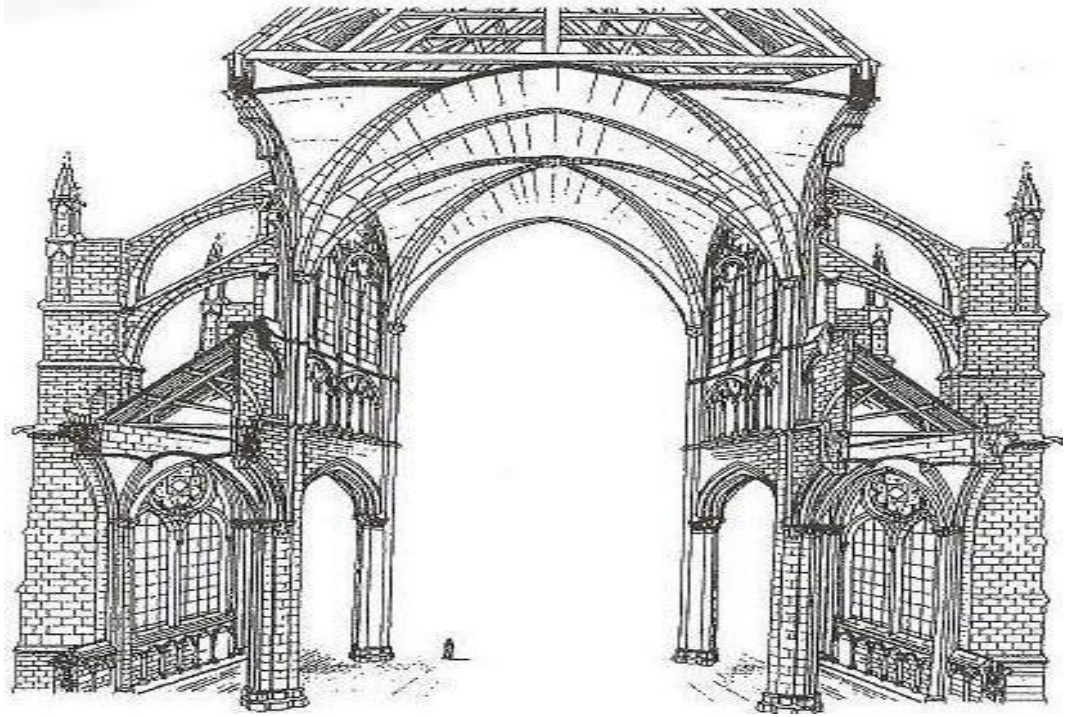
Şekil 1.4. Eski yığma yapı örnekleri a) Kıbrıs'taki bir köyden, arı kovanı şeklindeki evler (M.Ö. 5650), b) Irak'taki bir köyden, dikdörtgen şeklindeki evler (M.Ö. 5500-6000)(Lourenço 1996)

Taş kullanımına ek olarak kerpiç tuğlalar, duvar malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Eski çağ ve İlk çağda güneşte kurutulmuş tuğlalar kullanılmıştır. Gerek kesilmeyi gerektiren taşların oluşu gerekse kerestenin az oluşu gibi nedenler tuğlanın

gelişimine ön ayak olmuştur. Tuğlanın inşaat malzemesi olarak kullanılmasının nedenlerini şöyle sıralayabiliriz;

- Taştan daha hafif oluşu,
- Kalıba kolay dökülmesi,
- Tuğlanın daha iyi yerleştirilmesi,
- Yangına karşı daha dayanıklı oluşudur.

Mısırda (M.Ö. 5000) hükümdarlar zamanından, Roma tarihine kadar (M.S. 50), duvarcılıkta ana malzeme olarak daha çok Nil’de bulunan kurutulmuş çamurdan tuğlalar kullanılmıştır (Lorenço 1996).



Şekil 1.5. Mısır’ın başkenti Thabes’te duvarcılık örneği (Lorenço 1996)

1.5. Kemerler

Taş ya da tuğla parçalarının yan yana yay şeklinde dizilmesiyle yalnız basınca çalışarak üzerine gelen yükleri yanlardaki iki mesnede ileten kemerler, açıklıkları geçmek için kullanılmıştır. Birbirine dayanarak açıklığı örten iki taş parçası, en ilkel kemer olarak bilinmektedir. Ters ‘v’ şeklinde birbirine dayanarak oluşturulmuş ilkel kemer örneklerine ilk olarak Mısır’da rastlanmıştır (M.Ö. 2700-2250). Fakat taş örneklerinden önce, Mısır ve Mezopotamya’da küçük kerpiç ve tuğla parçalarıyla kemerler oluşturulmuştur (Güngör 1967).

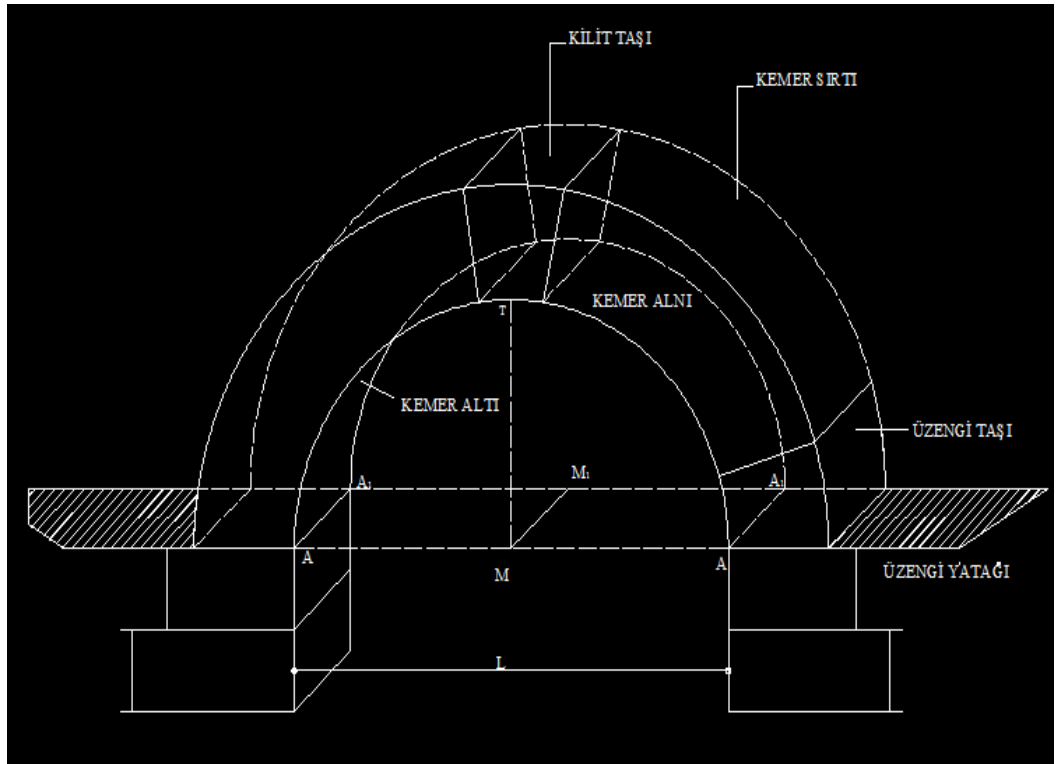
İki taş bloğun birbirine dayanması şeklindeki kemerler, kapı boşluğu gibi küçük açıklıkların geçilmesinde kullanılmıştır. Sonraları blokların birbiri üzerinde açıklığı kapatacak yönde kaydırılması ile bindirme kemerler elde edilmiştir. Bir kirişin alt yüzeyinde çekme gerilmesi oluşurken, konsol kirişte tam tersine üst yüzeyde çekme oluşur. Ancak, bindirme kemerde konsol yapan her taş, diğerinin üzerinden çok az çıkma yaptığı için çekme gerilmesi son derece düşüktür.

Bindirme kemerlerin başlangıcı Mısır ve Mezopotamya’ya dayanır. M. Ö. 2500’de inşa edilmiş olan küçük açıklık geçen düz kemerlere Mısır’da rastlanır. Anadolu’daki en eski kemer ise M.Ö. 13-14. yüzyılda yapıldığı bilinen, Hititlerin başkenti Boğazköy’ün girişindeki ‘Kral Kapısı’dır. Parabol biçiminde yapılan bu kemer eğriliği verilmiş taşların üst üste yerleştirilip tepe noktasında birleşmesinden oluşmuştur. Yunanlılar, Mısır ve Mezopotamya’dan öğrendikleri kemer yerine taşıyıcı eleman olarak düz atkı kullanmışlardır. Roma dönemine kadar kemerler, küçük açıklıkların geçilmesinde kullanılmış ve çok fazla geliştirilememiştir. Romalılar ise geniş açıklıkları geçmek için kemeri, örtü elemanı olarak tonoz ve kubbeyi en gelişmiş şekliyle kullanmışlardır. Öyle ki, Roma’da uygulanan yapım teknikleri, tarih sayfalarında yerini almıştır (Lourenço 1996; Croci 1998; Ktrezschmer 2000).

1.5.1. Taş kemer köprülerin karakteristik özellikleri

Kemer biçim olarak, kemere gelen bütün kuvvetlerin kemerin üzengilerinde, kemerin mesnetlerine iletilmesini sağlamak için tasarlanmıştır. Kemer üzerine gelen yük, kemer elemanları tarafından basınç şeklinde birbirlerine aktarılarak kemerin kapladığı açıklığın iki yakasına aktarılır. Mesnetlere aktarılan yüklerin doğrultusu düşey değildir. Bu şekilde mesnet, bu eğik yükle kendi ağırlığının bileşkesini karşılayacak boyutta ve biçimde yapılmaktadır (Bayülke 1992; Çamlıbel 2000).

Bir kemerde, kemer örgü taşı olarak üzengi, kilit taşı ve kemer taşı olmak üzere üç eleman bulunmaktadır. Üzengi taşı kemerin başlama taşı olarak bilinir. Kilit taşı kemerin düşey ekseninde bulunan kendisi ve diğer üzengi taşları arasında kilit görevi gören elemana denir. Yükler kilit taşının üzerine yönlenir ve formdan dolayı kemer taşlarına aktarılır. Kemer taşları ise üzengi taşları ile kilit taşları arasında kemeri oluşturmak için kullanılan taşlara denir.



Şekil 1.6. Kemer elemanları

Kemer elemanları şekilde gösterilmiştir. Diğer köprülerle ilgili teknik terimler ise kısaca şöyledir;

Kemer açıklığı : Kemerin oturduğu iki ayak ve duvar arasındaki açıklığa denir.

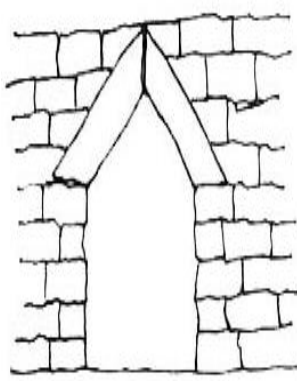
Kemer gözü : Kemerin ve ayaklarının arasındaki boşluğa verilen denir.

Kemer kilidi : Kemerin iç tarafında kemer taşlarının meydana getirdiği içbükey yüzeydir (Bayülke 1992; Heyman 1999; Çamlıbel 2000; Mahrebel 2006).

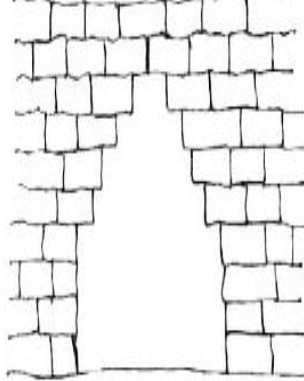
1.5.2. Kemerin yapısal formları

Kapı- pencere gibi küçük açıklıklarda kesme taş, moloz taş ve tuğladan kemerler yapılmıştır. Su kemeri gibi büyük açıklıklarda ise kesme taştan örülmüş yarım daire biçiminde kemerler kullanılmıştır.

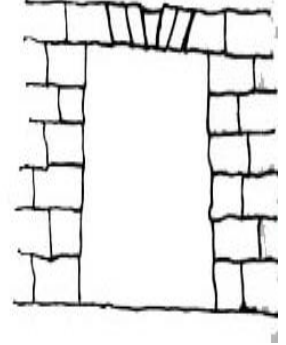
Bugünkü kemer formuna gelinceye kadar çeşitli şekillerde kemer formları yapılmıştır. Bunlara örnek olarak ters v şeklinde kemer, düz kemer, bindirme kemer, Hitit kemeri, beşik kemer, sivri kemer verilebilir (Özer 2006).



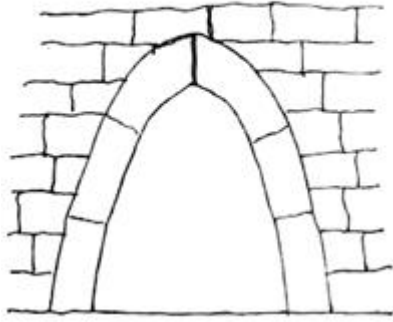
Ters v şeklinde kemer



Bindirme kemer



Düz kemer



Hitit kimeri



Beşik kemer



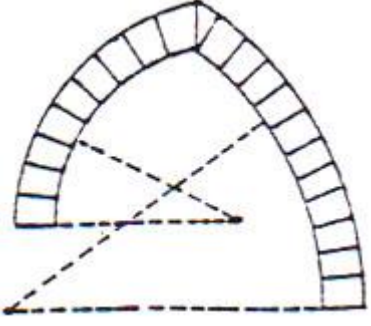
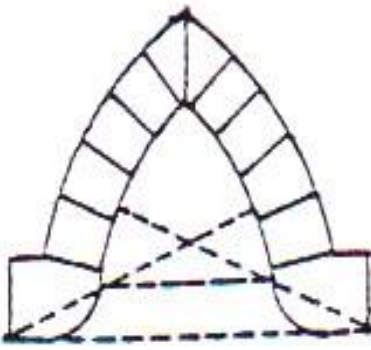
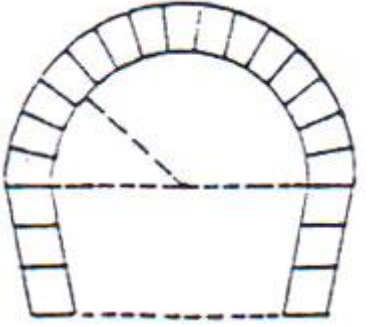
Sivri kemer

Şekil 1.7. Kemer gelişim şeması (Özer 2006)

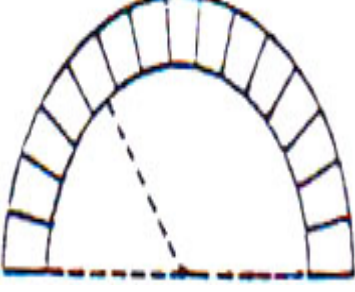
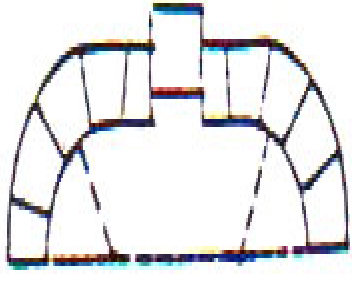
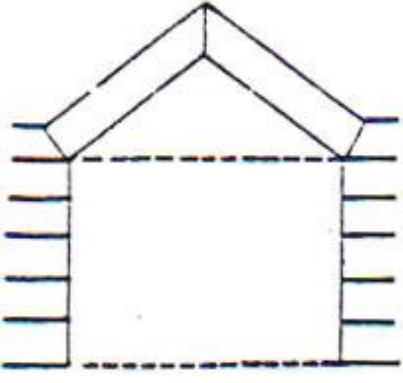
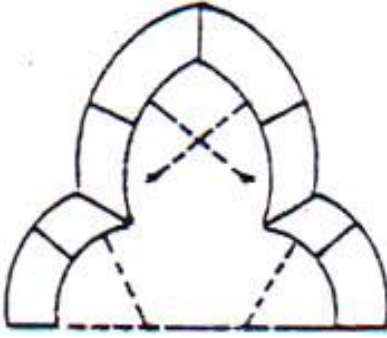
1.5.3. Kemer çeşitleri

Kemerler görüşlerine göre ve geometrik yapılarına göre iki gruba ayrılmaktadır. Görüşlerine göre kemerlerin bazıları şunlardır; Abanık kemer, Armudi kemer, Atnalı kemer, Beşik kemer, Bursa kimeri, Çatma kemer, Dilimli kemer, Kaş kimeri, Köşeli kemer, Mızrakucu kemer, Pençi kemer (Hasol 1998; Özer 2006).

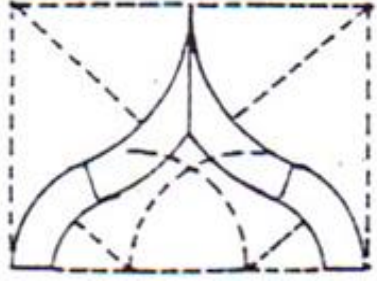
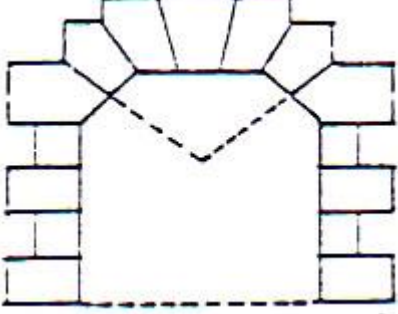
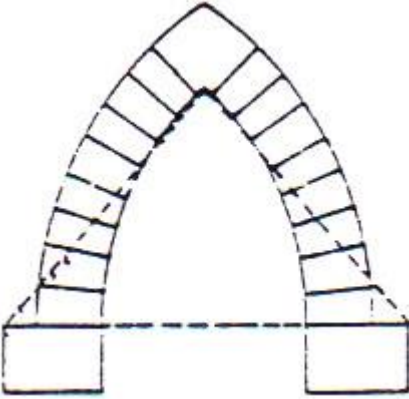
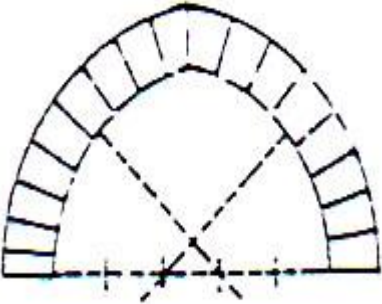
Çizelge 1.1. Görünüşlerine göre kemer çeşitleri (Anonim 2013c)

	Abanık kemer: Üzengi taşlarının farklı düzlemlerde olduğu kemer türüdür.
	Armudi kemer: Eğriselliği armudiye benzeyen kemer türüdür.
	Atlı kemer: Şekil olarak at nalına benzeyen kemer türüdür (Anonim, 2013c).

Çizelge 1.1 (devam)

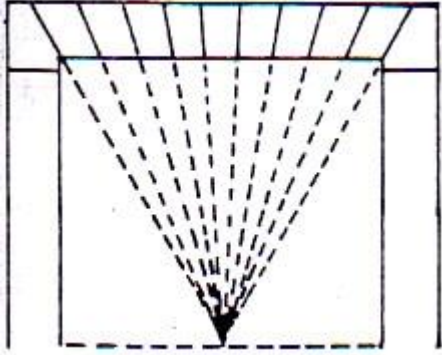
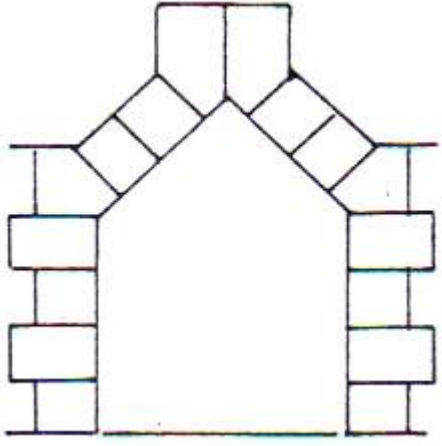
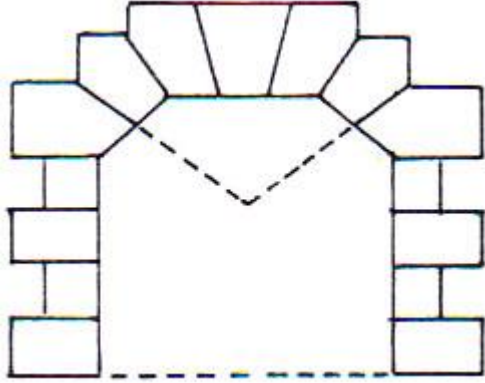
	Beşik kemer: Yarım daire biçiminde olan kemer türüdür.
	Bursa kemeri: Yan tarafları çeyrek dairelerden oluşup tepe tarafı ise düz taşlardan oluşan kemer türüdür.
	Çatma kemer: Ters 'v' şeklinde yapılan kemer türüdür.
	Dilimli kemer: Eğri eksenli boyunca ardışık birçok eğri parçanın birleştirilmesiyle oluşturulan kemer türüdür (Anonim, 2013c).

Çizelge 1.1 (devam)

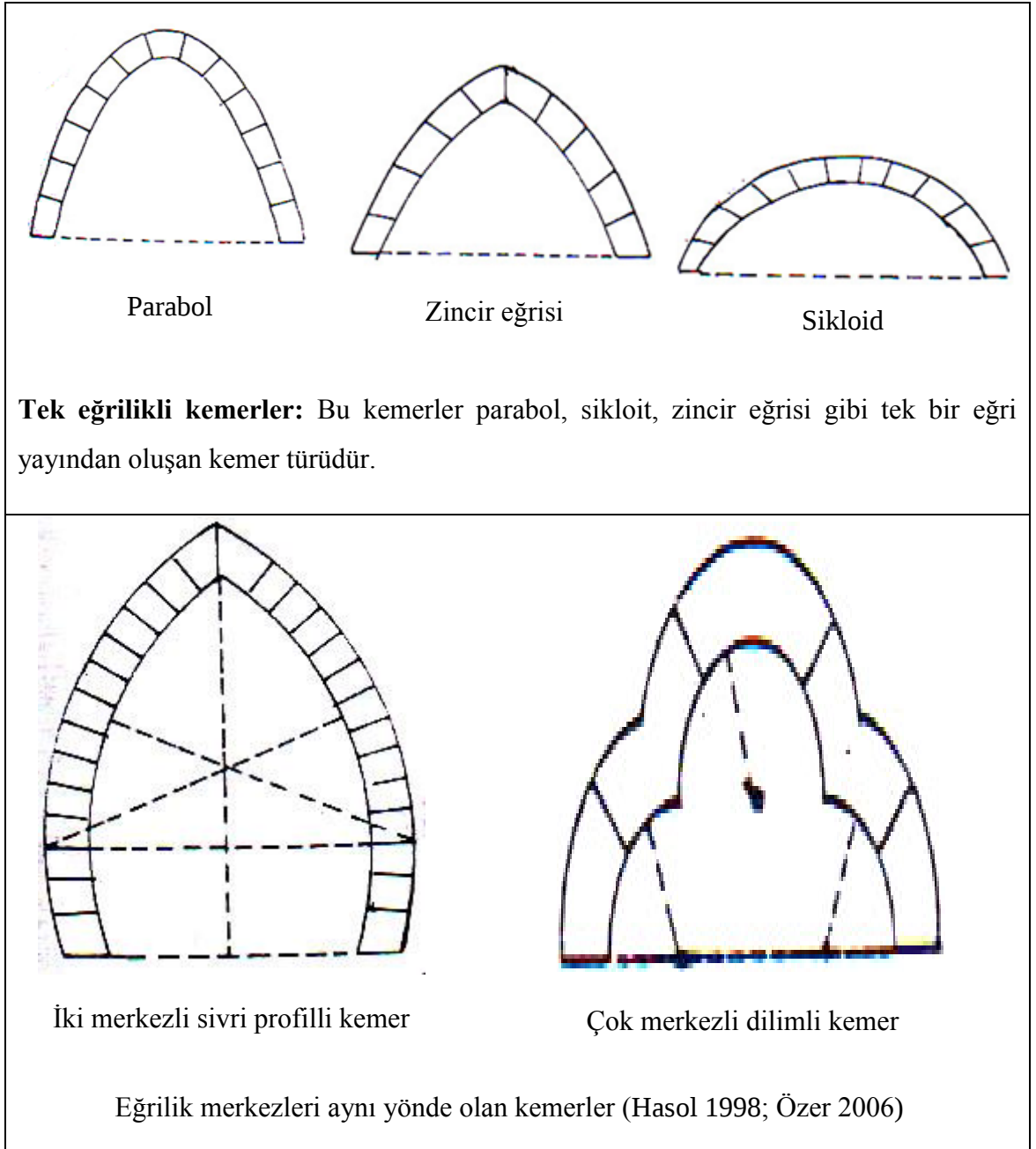
	Kaş kemer: Dört eğri parçasının bir araya gelmesiyle oluşan kemer türüdür. Eğri elemanların iki tanesinin merkezi kemer yayının içinde, diğer ikisinin ki de kemer yayının dışında kalır.
	Köşeli kemer: Kemer yayının eğrisel elemanları değil de onların yerine doğrusal elemanlar kullanılarak oluşturulan kemer türüdür.
	Mızrakucu kemer: Adeta mızrak ucuna benzetilerek yapılan iki tarafı şişkin, yukarıya doğru gittikçe sivrileşen kemer türüdür.
	Pençi kemer: Kemerin üzengi ekseninin beş eşit parçaya bölünüp yalnızca ortadaki iki parçanın merkez alınarak oluşturulduğu kemer türüdür.

Geometrilerine göre kemerler şunlardır; Doğrusal formlu kemerler, Eğrisel formlu kemerler, Karma kemerler (Hasol 1998; Özer 2006).

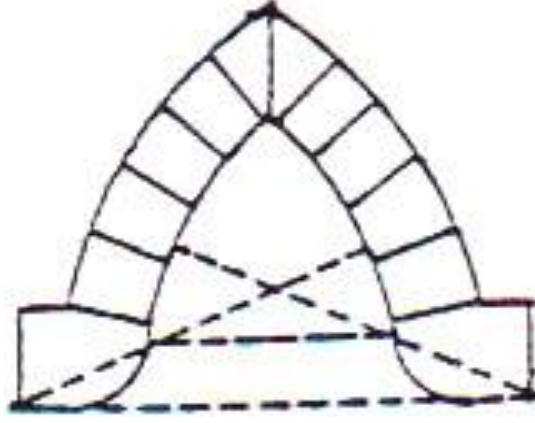
Çizelge 1.2. Geometrilerine göre kemerler (Anonim 2013c)

	Düz kemerler: Genellikle kapı-pencere boşluklarını geçmek için kullanılan kemer türüdür.
	Üçgen kemerler: Genellikle küçük açıklıkların kullanımında tercih edilen dar açılı kemer türüdür.
	Köşeli kemer: Düz ve üçgen kemerlerdeki özelliklerin birleşiminden meydana gelen kemer türüdür (Anonim, 2013c).

Çizelge 1.3. Eğrisel formlu kemerler (Anonim 2013c)



Çizelge 1.3 (devam)



Eğrilik merkezleri farklı yönde olan kemerler (Hasol 1998; Özer 2006)

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde, yığma kemer köprülerin yapısal davranışını anlamak için yapılan ilk çalışmalar ve günümüzde bu yapıların analizinde kullanılan yöntemler anlatılacaktır. Ayrıca, yığma kemer köprülerin mevcut analiz yöntemlerine yeni yaklaşımlar getirmek ve yeni yöntemler geliştirmek amacıyla yapılan çalışmalara yer verilecektir.

2.1. Yığma Kemer Köprüler Üzerine Yapılan İlk Çalışmalar

Erdik ve Durukal, ortalama 15 yüzyıldır yıkılmadan günümüze ulaşan Ayasofya Müzesini incelemişlerdir. Sap90 kullanılarak yapılan sonlu eleman modeli için 363 çerçeve elemanı, 720 kabuk elemanı, 2826 katı cisim elemanı kullanılmıştır. Tanımlanan 5000'e yakın düğüm noktası yaklaşık 17000 serbestlik dereceli bir sistem oluşturmuştur. Model yapıda gerçekleştirilen titreşim deneyleri sonuçlarına göre düzeltilmiştir. 1992 Karacabey depremi, Ayasofya'da bulunan ivmeölçer ile kayıt edilerek gerçek dinamik davranışın belirlenmesinde etkili olmuştur. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan analizler sayesinde müzenin yapısal özellikleri ve elemanları arasındaki etkileşim belirlenmiştir. Modelin dinamik analizinin titreşim deneyleri ve deprem kayıtları sonuçlarıyla uyum içinde olması, sayısal model çalışmalarının önemini bir kez daha göstermiştir (Erdik ve Durukal 1993).

Çakmak vd yapılışından itibaren sekiz yüz yıl süre ile dünyanın en büyük kubbeli mekânı olan Ayasofya müzesinin mevcut durumundaki deprem davranışını incelemişlerdir. Yapının sayısal modeli sonlu eleman yöntemiyle oluşturulmuştur. Disiplinler arası yaklaşım Ayasofya'nın dinamik davranışı ile ilgili çalışmalara uygulanarak, yapısal analiz, geoteknik ve malzemeye yönelik yapılan araştırmalarla birleştirilmiştir. Malzeme alanındaki çalışmalar yapıda kullanılan harcın karakteristikleri ve tuğla duvarın yoğunluk, rijitlik ve dayanımı hakkında fikir sahibi olunmasını sağlamıştır. Bu disiplinler arası çalışma Ayasofya'nın deprem davranışını

kontrol etmek ve güçlendirmede yapılması gerekenleri detaylandırmak için önemlidir (Çakmak vd 1994).

Boothby, dolgulu kemer köprülerin araç yükleri altındaki davranışlarını deneysel olarak ve sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmıştır. Beş farklı köprü için, kemer karnına yerleştirilen LVDT'ler (linear variable differential transformer) yardımıyla, farklı araç yükleri altında oluşan yer değiştirmeler ölçülmüştür. Sonra bu köprülerden dört tanesi ANSYS programıyla analiz edilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda kemerin yüklere tepkisinin doğrusallığının, kemerin kapasitesinin önemli bir ölçüsü olduğu, doğrusal olmayan tepkilerin harç ya da taşlardaki hasarlardan kaynaklandığı, kemer üstü duvarlarının ve kemer üst dolgusunun rijitleştirici etkisinin kemer davranışında çok etkili olduğu söylenmiştir. Program sonuçları gerçek yer değiştirme değerlerine oldukça yakın çıkmıştır (Boothby 1998).

Thavalingam *et al.* sonlu elemanlar, ayırık elemanlar ve süreksiz deformasyon analizi yöntemlerini karşılaştırmak amacıyla Edinburgh Üniversitesi'nde kemeri deneysel olarak analiz edilip incelenmişlerdir. DIANA FE, PFC ve DDA programları kullanılmıştır. Elde edilen göçme yükleri, deneysel göçme yükünün, sırasıyla %128, %112 ve %84'ü civarında hesaplanmıştır. Sonuç olarak her üç analiz metodunun sağlam ve gerçekçi göçme yükü değerleri verdiği belirtilmiştir. Ayrıca dolgu ve dolgu-kemer ilişkisinin modellenmesinin ve analize dâhil edilmesinin önemli olduğu söylenmiştir (Thavalingam *et al.* 2001).

Frunzio *et al.* İtalya'da Roma İmparatorluğu dönemine ait Pont St. Martin Köprüsünü üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişlerdir. Kemerin sadece ölü yükler etkisindeki analizi ANSYS programıyla yapılarak, kemerin güvenlik faktörü hesaplanmıştır. Analiz sonucunda elde edilen, yer değiştirme ve gerilme dağılımı verilerinin kemerlerin restorasyon çalışmaları için önemli olduğu ancak, doğru bir analiz için gerekli olan, malzemelerin mekanik özelliklerinin, tarihi yapılarda belirlenmesinin zorluğu vurgulanmıştır. Hesaplanan en büyük gerilme değeri, taş ve

dolgu malzemesinin dayanımlarından oldukça küçük çıkmıştır. Böylece kemerde malzeme dayanımına bağlı bir göçme olmayacağı kabul edilmiştir (Frunzio *et al.* 2001).

Timur, 1562-1565 yılları arasında inşa edilmiş ve çeşitli depremlere maruz kalmış Edirnekapi Mihrimah Sultan Cami'sini incelemiştir. Yapının serbest titreşim modlarını belirlemek amacı ile sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Hasar tespiti yapıldıktan sonra, 1999 Marmara Depremine ait iki ayrı ivme kaydı kullanılarak analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yapının kuzey cephesinin, güney cephesine oranla daha az yatay yer değiştirme yaptığı görülmüştür. Böylece bu cephenin daha rijit olduğu, güney cephesinin daha çok zorlandığı ve hasarın büyük kısmının burada oluştuğu görülmüştür (Timur 2001).

Güler vd M.S. 527 -536 yılları arasında inşa edilmiş ve İstanbul'da kullanılabilir durumdaki en eski yapılardan biri olan Küçük Ayasofya Cami'sini incelemişlerdir. Caminin onarımı ve güçlendirilme çalışmaları için yapılan bir çalışma olmuştur. Model SAP2000 sonlu elemanlar paket programı kullanılarak oluşturulmuştur. Yerçekimi ve deprem yüklerine maruz kalan binada oluşan hasarlar ile gerçekte yapıda var olan hasarlarla uyumluk göstermiştir. Bu çalışma caminin onarım ve güçlendirme çalışmaları için önceden nasıl bir yol izleneceği hususunda kolaylık sağlamıştır (Güler vd 2004).

Özcan, MS. 558 -562 yılları arasında Sakarya nehrinin eski yatağı üzerine inşa edilen Tarihi Sangarius (Sakarya) Köprüsünü incelemiştir. Bu çalışmada kullanılan malzeme parametreleri yapıya ait taş ve bağlayıcı numuneler üzerinde yapılan basınç testlerinden belirlenmiştir. Yapının dinamik analizlerinde sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Köprü gövdesinin üç boyutlu modeli SAP2000 programı ile oluşturulmuştur. Yapının Sonlu Eleman yöntemi kullanılarak serbest titreşim periyotları ve 1999 Marmara depremine cevabı incelenmiştir (Özcan 2004).

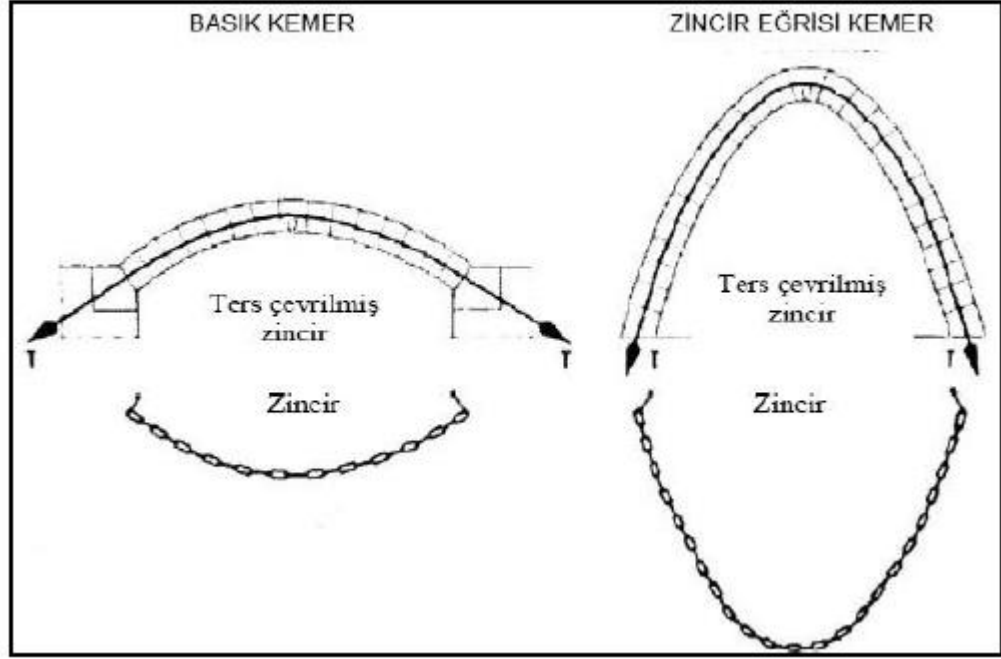
Teomete ve Aktaş, Urla Kamanlı Camii üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Yapısal analizleri sonlu eleman yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Yapının test ve gözlemler sonucu elde edilen geometrik ve malzeme verileri bu modelde kullanılmıştır. Yapının

sonlu eleman analizi, LUSAS programı ile yapılmıştır. Yapıya öz yük, sismik yükler ve olası oturma senaryoları için elastik lineer analizler uygulanmış ve yapıdaki sorunlu bölgeler irdelenmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan analizler sayesinde yapıdaki mevcut durum açıklanmaya çalışılmıştır (Teomete ve Aktaş 2004).

Rize’de bulunan tek açıklıklı tarihi iki kemer köprü, Gürer ve arkadaşları tarafından sonlu elemanlar yöntemiyle statik açıdan incelenmiş ve gerilme analizleri yapılmıştır. Bir boyutlu çözümleme yapan bir sonlu elemanlar programı olan Franc2d programı ile yapılan analizler neticesinde birtakım sonuçlar elde edilmiştir. Bunlardan birincisi kemer köprülerin kritik noktası olan kilit taşı bölgesine uygulanan tekil yüklerden dolayı, en yüksek gerilmelerin bu kısımlarda yoğunlaşmış olması diğeri ise meydana gelen gerilmelerin neredeyse her bölgede basınç gerilmeleri oluşudur (Gürer vd 2007).

Kanıt ve Işık, yaptıkları çalışmada değişik geometrilere sahip model tuğla kemerlerin deney sonuçları ile sayısal analiz sonuçlarını yığma yapıların sayısal analizlerindeki de göz önünde bulundurarak karşılaştırma yapmışlardır. Model olarak üç adet kemer köprü kullanılmıştır. Sayısal analizler için FLAC3D ve Udec programları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara oldukça yakın olduğu belirlenmiştir (Kanıt ve Işık 2007).

Dabanlı, geometrik olarak doğru kemer şeklini elde etmek üzere yaygın olarak zincir eğrisine başvurmuştur. İki ucundan tutularak serbest bırakılan zincir, kendi ağırlığı altında bütün kesitlerde çekme oluşacak şekilde bir geometri kazanır. Bu şeklin ters çevrilmiş halinde inşa edilecek olan kemerde hiç çekme gerilmesi görülmeyecektir. Böylece tamamen basınca çalışan bir kemer elde edilmiş olur ve Şekil 2.1’de görüldüğü ifade edilmiştir (Dabanlı 2008).



Şekil 2.1. Zincir eğrisi ve zincirin döndürülmesiyle elde edilen kemerler (Dabanlı 2008)

Bayraktar vd, Malatya-Elazığ karayolu üzerinde bulunan Kömürhan Köprüsünün analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması için, köprünün modelini SAP2000 programı ile modellemiş ve dinamik karakteristiklerini analitik olarak elde etmişlerdir (Bayraktar vd 2009).

Sayın vd, çalışmalarında Malatya ilinin Darende ilçe merkezindeki tarihi Uzunok köprüsünün doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik analizlerini yapmışlardır. Köprüyü üç boyutlu sonlu elemanlarla modellemiş, doğrusal ve doğrusal olmayan çözümlerden elde edilen sonuçları birbirleri ile karşılaştırarak köprünün sismik davranışını incelemişlerdir (Sayın vd 2011).

Korkmaz vd, yaptıkları çalışmada, taş kemer köprülerin deprem davranışlarının belirlenmesi amacıyla Rize-Ardeşen Çamlıhemşin karayolu üzerindeki, 19-20. yy Osmanlı dönemine ait Timisvat taş kemer köprüsünü SAP2000 programında katı eleman ile üç boyutlu modelleme yaparak ele almışlardır. Model üzerinde deprem ivme kayıtları ile zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım

alanında yapılan analizler sonucunda her bir deprem kaydına ait yer değiştirme ve gerilme değerleri bulunmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir (Korkmaz vd 2013).

Rafiee and Vinches, yaptıkları çalışmada Romalılar dönemine ait güney Fransa' daki Pont Julien taş kemer köprüsünün statik yükler altındaki mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Model 3 boyutlu olarak ele alınmıştır. Model 1219 adet katı elemandan oluşmuştur. Sayısal hesaplamalarda NSCD(Düzgün Olmayan Dinamik Etki) metodu kullanılmıştır. Bu metod Montpellier niversitesinin Mekanik ve İnaaat Mühendisliği Laboratuvarında geliştirilen LMCG90 koduna dayanır. Bu kod ayırıtırma veya sıkıştırma gibi taneli malzemelerin davranışlarında kullanılmıştır (Rafiee and Vinches 2013).

Yapılan analizlerde köprünün mevcut durumuyla maruz kalabileceği etkilere karşı tepkisi incelendiği gibi, temellerdeki onarımların yapılarak tamamlanması durumları ve dere yatağındaki zemin kotunun değişmesi durumlarındaki tepkileri de incelenmektedir. Yapısal modelde altlarında ahşap ızgaralar olan temeller bu ızgaralara oturtulmuştur. Gerçekleştirilen yapısal analizlerde köprü sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Sonlu Eleman Yöntemi; yapıların üç boyutlu doğrusal ve doğrusal olmayan, statik ve dinamik analizlerinin yapılabildiği sayısal bir yöntemdir. Sonuçlar sayısal ve grafik ortamda elde edilebilmektedir.

2.2. Taş Kemer Köprünün Yapımı

Kemer, düşey yükler altında sıkıştırılan blok şekillerinden oluşur. Kemer, kilit taşı yerleştirilinceye kadar kendi ağırlığını taşıyamayacağından dolayı başlangıçta ahşap bir kalıp üzerine inşa edilir.



Şekil 2.2. Taş köprü yapım aşaması (Anonymous 2013d)

Ahşap kalıbın kaldırılmasının hemen sonrasında kemerin aşağıya doğru çok hafif yer değiştirmesi gevşeme olarak adlandırılır ve böylece elemanların birbirine basmasından dolayı elemanlar arasındaki harç sıkışmış olur. Gevşeme kemerde ayrışma çatlaklarını önlemeye yardımcı olur. Kemer dayatılan yükleri karşılayacak güce ulaşmadan ahşap kalıp kaldırılmaz. Çünkü kalıbın erken kaldırılması kemer çökmesine neden olabilir (Özer 2006).

Eski ustaların başarıları hafife alınmamalıdır. Çünkü gerek araç gereç eksikliği, gerek malzemeyi elde etme zorlukları, gerekse ekonomik yetersizliklere rağmen eski ustalar muazzam yapılar yapmayı başarmışlardır (Lourenço 1996).

2.3. Kemer Formunun İlk Örnekleri

Kemer formunun ilk örnekleri M. Ö. 3000' li yıllarda Mezopotamya' da Sümerlere ait yeraltı mezarlarında görülmüştür. Mısırlılara ait olan bu örnekler, bu uygarlığında aynı dönemlerde kemer formunun yapısal potansiyeli hakkında bilgi sahibi olduklarının

göstergesidir. Ancak her ne kadar kemer formunu bulan Sümerler olsada bu işin başarılı çalışmalarını yapanlar Romalılar olmuştur. Türkiye’ deki Cendere Köprüsü, Karamağara Köprüsü Roma devrinden kalan yapıtlar arasındadır (Ural 2005).



Şekil 2.3. Cendere Köprüsü (Anonim 2013f)

2.3.1. Köprü ve su kemerlerinde kemerin kullanımı

En büyük köprü ustaları antik Romalılardır. Önemli gelişmelere imza atmışlardır. Doğal çimentoyu keşfedip birçok alanda kullanmışlardır. Su kenarlarında veya su seviyesinin altında kazı yapılabilmesi için uygulanan tahkim işine yada suyun inşaat sahasına girmesini önlemek amacıyla inşa edilen batardoları geliştirmişlerdir. Ayrıca yığma taş köprü uygulamalarını geliştirmişlerdir (Özer 2006).

Romalılar su kemerlerini derin ve dik vadilerden şehirlere su getirmek için kullanmışlardır (Swift 1951). Roma imparatorluğuna ait İstanbul’ daki Bozdoğan Su Kemerı günümüze kadar ulaşmış tarihi Roma yapılarındandır (Anonymous 2013m).



Şekil 2.4. Bozdoğan su kemeri (Anonymous 2013ı)

Romalılar eğimlerdeki su basınçlarını azaltmak için su kaynaklarını borularla bölmüşlerdir. Su, geleneksel Roma tuf kesme taşından inşa edilmiş kemerlerle taşınmıştır. Güney Fransa’ da Nimes yakınlarındaki Gard köprüsü, Romalılar tarafından yaptırılan başarılı su kemerlerinden biridir. Gard ırmağından Nimes şehrine su getirmek için yaptırılmıştır. Ortalama boyu 270 metre olan köprü üç sıra kemerden oluşmaktadır. Ve üzerindeki kanal yassı taş bloklarla kaplanmıştır (Anonymous 2013c).



Şekil 2.5. Gard köprüsü (Anonymous 2013c)

2.3.2. Türkiye’ deki köprü örnekleri

Roma ve Bizans dönemine ait köprüler:

Roma ve Bizans dönemine ait birçok köprü vardır. Misis Köprüsü, Ceyhan nehri üzerinde yer almaktadır. Anadolu'nun ilk Roma köprüsü olarak bilinmektedir. IV. Yüzyılda Roma imparatoru II. Flavius Julius Constantinus tarafından yaptırılmıştır. Köprü dokuz gözlü olarak inşa edilmiştir. Selçuklular, Bizanslılar ve Haçlılar arasındaki savaşlara şahitlik eden köprü, Ramazanoğlu Beyliği ve Osmanlı dönemlerinde şiddetli depremlerle tahrip olmuş ama farklı dönemlerdeki onarımlarla ayakta kalmayı başarmıştır. Köprü'nün toplam uzunluğu 132, 7 metre ve genişliği ise 6, 5 metredir. Dokuz açıklığı olan köprü'nün en büyük açıklığı 11,0 metredir (Anonim 2013e).

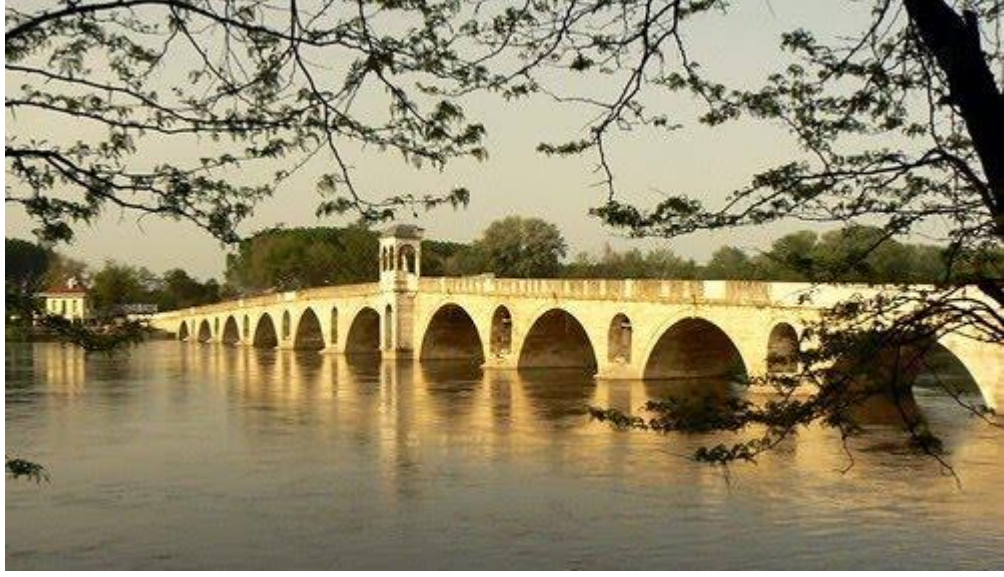


Şekil 2.6. Misis köprüsü (Anonim 2013e)

Ayrıca Roma ve Bizans dönemine ait Türkiye de bulunan köprülere Justinianus köprüsü, Güvercin Köprüsü, Asi nehri Köprüsü örnek olarak verilebilir (Ural vd 2007).

Osmanlı dönemine ait köprüler:

Osmanlı dönemine ait çok sayıda köprü vardır. Bunlara Kapağa Köprüsü, Kanuni Sultan Süleyman Köprüsü, Odabaşı Köprüsü, Sokullu Mehmed Paşa Köprüsü, Yalnızgöz Köprüsü örnek olarak verilebilir. II. Murat'ın Ergene Nehri üzerine 1426-1443 yılları arasında Mimar Müslihiddin'e yaptırdığı Uzun Köprü, 1,392 metre uzunluğunda ve yer yer 6.80- 6.90 metre genişliğindedir. Bu köprü 174 gözden oluşmaktadır (Anonim 2013g).



Şekil 2.7. Uzun köprü (Anonim 2013g)

Selçuklular dönemine ait köprüler:

Selçuklular dönemine ait de yığma köprüler bulunmaktadır. Bu döneme ait köprülere Tekgöz Köprüsü, Yeşilırmak Köprüsü, Çanlı Köprüsü, Kesik Köprü, Kızılırmak Köprüsü örnek olarak verilebilir (Çulpan 1975).

Selçuklu dönemine ait önemli köprülerden birisi de Çubuk Çayı üzerinde bulunan Ankarada' ki Akköprü'dür. Köprü yedi gözden oluşmaktadır. Kemerler sivri formludur. Köprü Anadolu Selçuklu sultanı Alaaddin Keykubad tarafından mimar Bedreddin'e yaptırılmıştır (Anonim 2013d).



Şekil 2.8. Akköprü (Anonim 2013d)

2.4. Kemer Köprülerdeki Kısıtlamalar

Kemer köprülerin başarılı geçmişine rağmen, günümüzde pek fazla inşa edilmemiştir. Bunun nedenlerini şöyle sıralayabiliriz;

- Başlangıçtaki maliyeti,
- Günümüz işçilerinin işçilik konusunda yetersiz kalışı
- Mühendislerin kendilerini güvende hissetmelerine bağlı olarak bilinen daha dayanıklı malzeme kullanma istekleridir (Rezaei 2010).

2.5. Kemer Köprülerin Avantajları

Kemer köprülerin avantajlarını şöyle sıralayabiliriz;

- Başlangıç maliyetlerinin yüksek olmasının yanın da uzun dönemde düşünüldüğünde, hem bakım masraflarının az oluşu hem de daha uzun ömürlü oluşu (Begimgil 1997),

- Görselliğe hitap etmesi,
- Yapımda kullanılacak malzemelerin kolay temin edilebilecek nitelikte olmasıdır.

2.6. Kemerlerin Çalışma Prensipleri ve Yapım Özellikleri

Kemer oluşturulurken taşların uygun biçimde kırılması ve uygun açılarının yakalanması durumunda kendiliğinden dayanak olarak çalışacaktır. Basınç kuvvetleri altında çalışan tarihi yapılarda basınç dayanımı özellikle önemlidir. Yığma çalışmaların basınç dayanımlarını etkileyen yığma birimlerin ve harcın su emme kapasiteleri, derz genişliği, birimler ve harç arasındaki bağ işçiliği gibi faktörler vardır (Hendry 1998). Kemerlerde kullanılan taş veya tuğlanın basınca karşı yeterli mukavemeti olsa da çekmeye karşı direnci yok denecek kadar azdır. Bundan dolayı çekmeye karşı mukavemetinin olmadığı kabul edilir. Taş ve tuğladan yapılan taşıyıcı sistemlerde çekme gerilmesinin olmaması gerekir. Bunun içinde taşıyıcı sistemlerin her bir kesitinde sadece eksenel basınç kuvvetinin etkimesi yada eksenel basınç kuvveti ile birlikte bir miktar eğilme momentinin etkimesi gerekmektedir. Kemer eksenini uygun şekilde düzenlenerek hiçbir kesitinde eğilme momentinin meydana gelmemesi veya normal kuvvetle birlikte etkiyecek eğilme momentinde çekme gerilmelerinin oluşmaması sağlanabilir (Ekiz 1995; Roth 2000; Usta vd 2001; Uluengin vd 2007).

2.7. Yapıları Etkileyen Yükler

Yapılar farklı türdeki yüklere maruz kalabilirler. Mühendislik açısından yapıya etkileyen yük, kavram olarak çok önemlidir. Çünkü yapıya etki eden yükler ve bu yüklerin yapıya olan etkilerin hesaplanması yapı inşası bakımından önemlidir. Bunun yanı sıra doğal yollarla oluşan ve yapıya doğrudan veya dolaylı olarak etki eden kuvvetler de vardır. Bunlar rüzgâr, deprem, kar yükleridir. Bunların içerisinde yapıya en çok etki eden deprem yüküdür. Deprem yükünün yapılardaki yıkıcı etkilerinden dolayı, deprem etkilerinin azaltılması için çeşitli araştırmalar yapılmıştır.

Yapı yüklerini farklı gruplara ayırabiliriz.

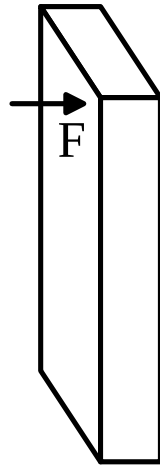
➤ Yönüne Göre Yükler

❖ Düşey Yükler: Yapıya yerçekiminin etkisiyle, yukarıdan aşağıya doğru yönelmiş kuvvetlerdir. (Ağırlık kuvvetleri)



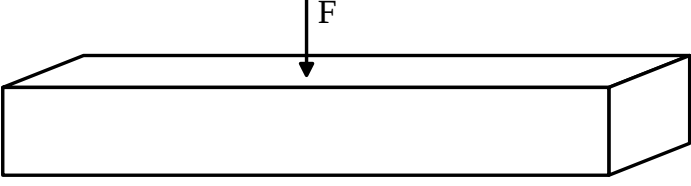
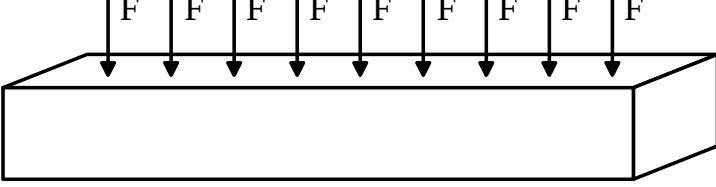
Şekil 2.9. Düşey yük

❖ Yatay Yükler: Yapılara yatay doğrultuda etkiyen kuvvetlerdir. Örnek olarak barajın arkasındaki su, rüzgâr ya da deprem yükleri verilebilir.

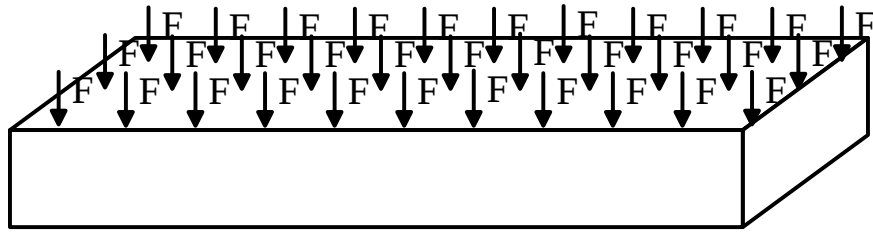


Şekil 2.10. Yatay yük

➤ Etkime Biçimine Göre Yükler

	Tekil Yükler: (Münferit yk) Yapıya tek noktadan aktarılan yüklerdir.
	Çizgisel Yükler: Yapıya bir çizgi boyunca yayılmış yüklerdir. Bir tuğla duvarın; üzerine oturduğu döşemeye aktardığı yükler örnek olarak verilebilir.

Şekil 2.11. Etkime biçimine göre tekil ve çizgisel yük



Şekil 2.12. Yayılı yük

❖ Yayılı Yükler: Bir salonda birikmiş kalabalık, döşemenin üzerine yığılmış kum, bir istinat duvarının arkasındaki toprak itkisi, kar yükü gibi alana yayılmış yüklerdir.

➤ Zamana Bağlı Yükler

❖ Statik Yükler: Şiddeti, yönü ve yeri anlık olarak değişmeyen, yapıya her zaman aynı biçimde etki eden yüklerdir. Statik yükleri iki temel kategoride inceleyebiliriz.

▪ l Yük (Zati yk): Yapı üzerinde her zaman var olan, hiçbir değişim göstermeyen yüklerdir. Örneğin kolon, kiriş, döşeme, duvar gibi yapı elemanlarının kendi ağırlıkları.

- İşletme Yüğü (Hareketli yük): Yapıya sonradan yüklenen, uzun bir zaman diliminde yavaş bir şekilde değişim gösteren yüklerdir. Ev içerisinde bulunan eşya ve yaşayan insanlar örnek olarak verilebilir.

- ❖ Dinamik Yükler: Yapıya anlık etkiyen ve çok kısa süreler içerisinde çok büyük değişimler gösteren kuvvetlerdir. Örnek olarak köprüden hızla geçen tır, fabrika içerisinde çalışmakta olan büyük titreşimli makine ve patlamalar verilebilir. Yüğün dinamik olması yapılar üzerinde çok karmaşık ve büyük etkilerin oluşmasına neden olur. Örneğın bir yapıya ani olarak yüklenen bir cisim kendi ağırlığının birkaç katı büyüklüğünde etkiler oluşturabilir.

- Rüzgâr yüğü: Rüzgâr etkisiyle oluşan ve yapının farklı elemanlarını emme veya basınç şeklinde etkileyen yatay kuvvettir. Rüzgâr şiddeti ve yönü, değişebilen iklimsel nedenlerle artıp azalan bir yüktür. Belirli periyotlarda düzenli rüzgâr esintilerine sahip bölgeler nadiren olsa da genel olarak düzensiz yükler sınıfına dâhildir.

- Deprem Yüğü: Deprem yüğü ya da deprem kuvveti, yapıya etki ettiğinde yapının formu, taşıyıcı sistemi, kütlesi, doluluk boşluk oranı gibi çeşitli etkenlere bağılı olarak yapıyı olumsuz yönde etkiler. Yapının karakteristik özelliklerinin deprem kuvvetine yıkıcı yönde tepki vermesi çoğu zaman felaketlerle sonuçlanmıştır. Ayrıca yapının deprem karşısında ne gibi davranışlar sergileyeceğini önceden tahmin etmemiz durumunda, alacağımız tedbirler yapıyı bu kuvvete karşı korumamızda bize yardımcı olacaktır. Bundan dolayı yapının her bir bölümünün ayrı ayrı deprem kuvvetleri karşısında nasıl çalıştığını incelememiz gerekmektedir (Hasol 1998).

2.8. Yığma Kemer Köprülerinde Uygulanan Analiz Yöntemleri

Tarihi yapıların korunması ve restorasyonu özel eğitim gerektiren bir iştir. Gelişen malzeme ve yapım teknikleri, geleneksel yapım tekniklerinin çok çabuk unutulmasına neden olmakta ve yapıların restorasyonunda modern yapım tekniklerinin kullanılmasını özendirmektedir. Taş veya tuğla yığma yapım tekniğı ile yapılmış yapılar için çeşitli analiz yöntemleri uygulanmaktadır. Belli başlı yapısal analiz teknikleri, elastik analiz,

plastik analiz ve analitik yöntemlerdir. Tarihi yapıların korunması ve onarımı için yapılacak analizlerde, ilk olarak elastik hesap yapılması daha uygundur. Doğrusal elastik analiz yapan bilgisayar programlarının kullanımı daha yaygın, sonuçlarının yorumlanması daha kolay ve bu programlarda hata yapma riski daha azdır. İlk analiz sonucunda belirlenen zayıf bölgeler, daha sonra bu bölgeler için hazırlanan, doğrusal olmayan malzeme özellikleri ve geometrik düzensizliklerin göz önüne alındığı ayrıntılı modeller ile tekrar analiz edilebilir. Özellikle çatlakların ilerlemesini gözlemek amacıyla, yığma yapı sistemini oluşturan taş veya tuğla gibi birim elemanlarını birbirine bağlayan harç, bazı özel bağlantı elemanlarıyla modellenenebilir.

2.8.1. Elastik analiz yöntemleri

Bu metotla ilk olarak Castigliano, ikinci olarak Pippand son olarak ta Hughes birçok çalışma yapmıştır. Buradaki en önemli metotlardan birisi MEXE/MOT yöntemidir. (Military Engineering Experimental Establishment) . Bu yöntem Hareketli yükü hızlı bir şekilde verir. Bu yük aşağıda belirtilen faktörlerle çarpılır (Orhan 2010).

- Açıklık faktörü(F_{sr})
- Profil faktörü(F_p)
- Malzeme faktörü(F_m)
- Derz faktörü(F_c)
- Çevre şartları faktörü(F_c)

2.8.2. Plastik analiz yöntemleri

Herhangi bir yığma kemer köprünün çökme yükünün hesaplanması öncülerinden olan Heyman tarafından incelenen analiz plastik analiz yöntemidir. Heyman' a göre;

- Bitişik kargir yapı elemanlarının arasında kayma kırılması oluşmaz.
- Kemerde çekme dayanımı yoktur.

- Kemerde basınç dayanımı vardır (Özer 2006).

2.8.3. Analitik yöntemler

Analitik yöntemlere doğrusal ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar örnek verilebilir.

Sonlu elemanlar yöntemi:

Yığma yapıların ayrıntılı yapısal analizlerinde genellikle sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılır. Yapısal analiz, yapının tamamı ya da belirli bir elemanın matematiksel modelinin hazırlanmasıyla başlar. Bu işleme yapının ayrıştırılması denir. Yapı, ayrıştırma sırasında, analizin amacına uygun bir şekilde ve çok sayıda sonlu elemanlara ayrılır. Yapıyı oluşturan taşıyıcı elemanlar, yapının geometrik boyutları, yapı üzerine etki eden yükler, mesnetlerin ve elemanların birleşim noktalarının hareket yetenekleri ve serbestlik derecesi göz önüne alınarak model içerisinde tanımlanır. Matematiksel modellemenin amacı, yapının tamamının, belli bir bölümünün ya da taşıyıcı elemanlarının çeşitli yükler veya fiziksel etkiler altında gerçek davranışının gözlenmesini sağlamaktır. Yapının gerçek davranışı genellikle çok karmaşıktır. Bu nedenle, yapıyı modellemek için birçok sadeleştirmenin yapılması zorunludur. Yalın ve basit bir model elde etmek için, yapı elemanlarını oluşturan malzemenin mekanik özelliklerinin de uygun şekilde tanımlanması gereklidir (Özer 2006).

En temel şekliyle Sonlu Elemanlar Yönteminde sistem temel olarak aşağıdaki matris formuna dönüştürülür.

$$[K] \cdot [D] = [R]$$

2.1

Burada [D] büyüklük alanının düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerleri temsil eden vektör (vektör matrisleri sütun şeklindedir), [R] bilinen yük vektörü ve [K] ise bilinen sabitler matrisidir. Daha basite indirgersek R sınır şartlarını (dışarıdan etkiyen yükler

vs) K sistemin yapısını temsil eder (katı, akışkan, gaz vs özellikleri), D ise aranan düğüm noktaları üstündeki değerlerdir (gerilme, kuvvet vs). Buradan anlaşılacağı üzere D matrisinin bulunabilmesi için sistemi temsil eden büyüklüklerin verilmesi gerekir (K matrisi) ayrıca dışarıdan etkiyen sınır şartlarının da bilinmesi gerekir (R matrisi) (Özer 2006).

Matematiksel modellemenin temel prensipleri şunlardır;

- En iyi sonucu veren model her zaman en basit olanıdır. Analizin amacının ve kapsamının dışına çıkan daha ayrıntılı ve karmaşık modeller hata riskini artırır.
- Matematiksel modeli oluşturan elemanların boyutları seçilirken, analiz için gerekli olan bütün taşıyıcı sistem etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, bir kemerin analizinde eğer burulma momentinden dolayı oluşan deformasyon hesaplanacaksa, modelde kemeri tanımlayan eleman, eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti değerlerini verecek şekilde boyutlandırılmalı ve kesit özellikleri bu değerlerin sonuçlarını verecek şekilde tanımlanmalıdır.
- Yapının tamamını tanımlayan büyük bir modelin bir bölümünü ayırarak yapılan model, o bölümün ya da elemanın ayrıntılı davranışını incelemek için yeterli değildir (Toker vd 2004).

Ayrıntılı davranış için sınır koşullarını ve bağlantı şekillerini doğru bir şekilde tanımlayan modeller gereklidir. Bir yapının matematiksel modelini oluşturmak için aşağıda belirtilen temel aşamaları izlemek gerekmektedir:

- Malzeme davranışı ile ilgili olarak yapılan kabuller, diferansiyel eleman olarak da bilinen, malzemenin çok küçük bir parçasının davranışına göre belirlenir. Diferansiyel eleman malzeme modelini oluşturur. Malzeme modelinde, malzemenin gerilme-birim deformasyon özellikleri göz önüne alınır.
- Yapının sınırları belirlenmiş bir bölümünü tanımlayan ve sonlu eleman olarak adlandırılan elemanların davranışını sergilemesi için diferansiyel elemanlar bütünleştirilir.

- Bir sonraki aşama, yapının tamamının davranışını yansıtmaları için sonlu elemanların bir araya getirilmesidir.
- Son aşamada ise, sınır koşulları, mesnetlerin ve düğüm noktalarının hareket yetenekleri ve model üzerine etki edecek olan yükler belirlenir.

Sonlu elemanlar analizinde öncelikle modeli oluşturan elemanların bireysel davranışı, sonra da matematiksel modelin tamamının davranışı önemlidir. Kusursuz bir model oluşturmak için malzeme davranışı ve elemanların bireysel davranışının çok iyi incelenmesi gereklidir (Ünay 2002).

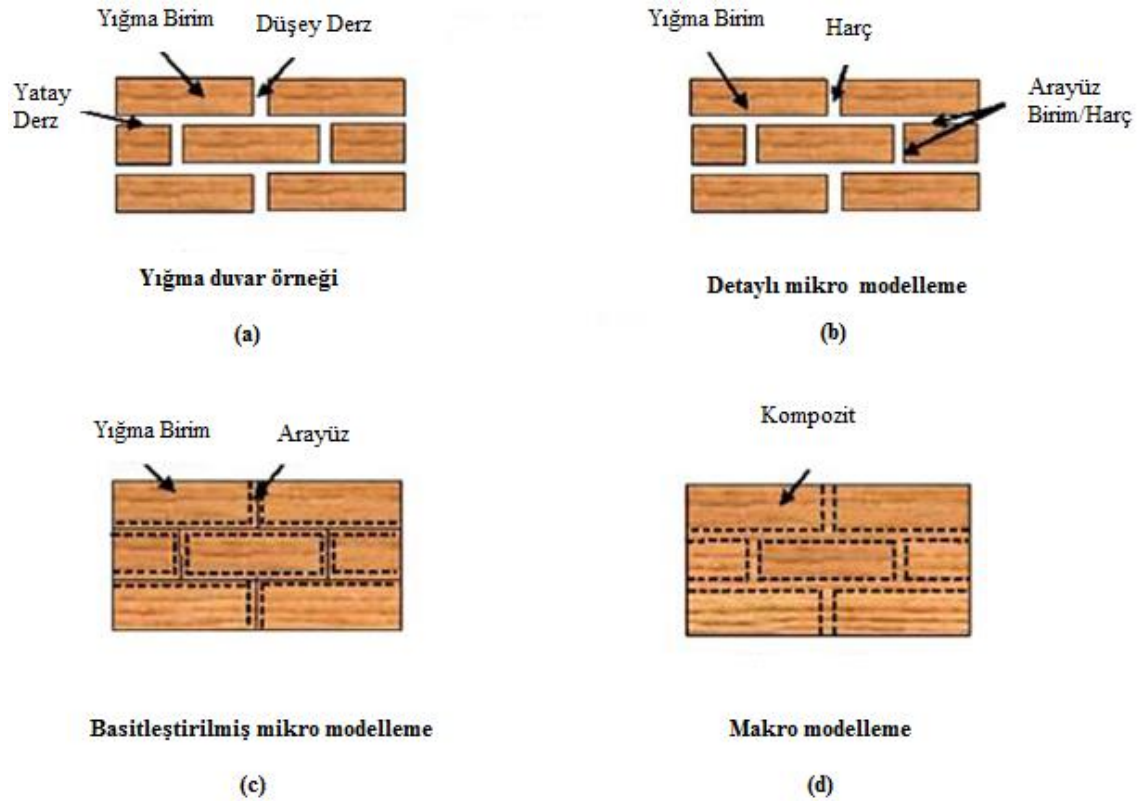
2.9. Tarihi Yapıların Yapısal Analizinde Karşılaşılan Sorunlar

Tarihi yapıların analizlerinde birçok sorunla karşılaşılabilir. Bunları şöyle sıralayabiliriz;

- Geometrik boyutlarla ilgili veri eksikliği,
- Oldukça büyük kesit boyutlarına sahip yapı elemanlarının dışarıdan görünmeyen iç bölümlerinin malzeme özellikleri,
- Yapı malzemelerinin özelliklerinin belirlenmesindeki güçlükler,
- Ayrıntılı laboratuvar analizlerinin yüksek maliyeti,
- Yapım tekniğinden ve doğal malzeme kullanımından kaynaklanan veri çeşitliliği,
- Yapım süresinin çok uzun olması nedeniyle aynı eleman kesiti içinde bile değişebilen malzeme özellikleri,
- Yapım sürecinin ve sırasının tam olarak bilinmemesi,
- Yapıdaki mevcut hasarın neden olduğu genel stabilitenin ve dayanım sürekliliğinin tam olarak saptanamaması,
- Çağdaş yapı malzemesi, yapısal analiz, tasarım ve yük şartnamelerinin uygulanamamasıdır (Crocı 1998).

2.9.1. Modelleme stratejileri

Tarihi yapıların modelleme ve analiz stratejileri Laurenço tarafından üçe ayrılmıştır. Bunlar makro modelleme, mikro modelleme ve basitleştirilmiş mikro modellemedir.



Şekil 2.13. Modelleme teknikleri (Jafarov 2012)

Modelleme tekniği olarak genelde makro ve mikro modelleme yaklaşımı tercih edilmektedir. Makro modellemede, yığma birim ve harcın özellikleri homojenleştirme işlemlerine tabi tutulmak şartıyla yığma, kompozit bir malzeme olarak düşünülmektedir. Mikro modellemede taş ve harç elemanları birbirinden bağımsız olarak düşünülmektedir (Ural 2009). Basitleştirilmiş mikro modelleme ise mikro modellemenin kullanılabilirliğini artırmak için tasarlanmış modelleme tekniklerinden biridir (Lourenço 1999).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. ANSYS Sonlu Elemanlar Programı

ANSYS sonlu elemanlar programıyla yapılan analizler diğer sonlu elemanlar programlarıyla yapılan analizlere benzer şekilde yapılmaktadır. Fakat her yazılımın kendine özgü eleman tipleri ve malzeme özellikleri vardır. Ancak unutulmamalıdır ki, ANSYS ve benzeri sonlu elemanlar programlarını kullanabilmek için eleman davranışı, malzeme davranışı, sonlu elemanlar metodu gibi konulara hakim olmak gerekmektedir.

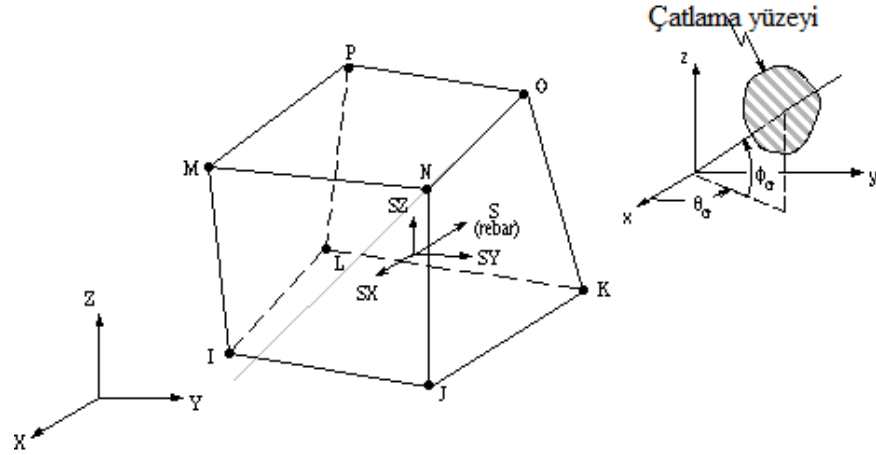
3.1.1. ANSYS sonlu elemanlar yazılımının tanıtılması

ANSYS genel amaçlı sonlu elemanlar paket programıdır. Ve içerisinde çok sayıda eleman tipi bulunur. Paket program içerisinde belirli bir soruna yönelik hazırlanmış bir model veya eleman olamayabilir. Bu yüzden bizler elemanların kombinasyonu veya en iyi eleman seçimini dikkatlice yapmalıyız.

Model çalışmaları sayesinde taş, beton gibi kırılğan malzemelerin modellenmesinde ANSYS programında (SOLID65) elemanı kullanılır. Yığma kemer model çalışmalarında bu eleman kullanılmıştır. Bu çalışmamda da benzer şekilde SOLID65 elemanı kullanılmıştır.

3.1.2. Solid65 elemanı

SOLID65, 8 düğümlü hacimsel eleman olarak ANSYS'te geliştirilmiştir. Bu elemanın her bir düğüm noktasında üç adet serbestlik derecesi vardır. Bu eleman, çekme gerilmelerinde çatlama, birbirine dik üç eksen de kırılma, plastik şekil değiştirme gibi özelliklere saahiptir. SOLID65 elemanının genel geometrisi ve düğüm noktalarının durumları şekilde görülmektedir.



Şekil 3.1. Solid65 elemanı (Anonymous 2013b)

3.1.3. ANSYS programı ile sonlu eleman analizi

Sonlu elemanlar modeli aslında fiziksel sistemin matematiksel bir modelini oluşturma demektir. Bu model; fiziksel sistemin geometrisini, modeli oluşturan eleman ve düğüm noktalarını, sistemde kullanılan malzemelere ait özellikleri, deplasman sınır şartlarını ve diğer özellikleri kapsar.

Modellemeye başlamadan önce; fiziksel sistemin geometrisinin tanımlanması, modellenmenin iki boyutlu mu yoksa üç boyutlu mu olacağına karar verilmesi, sınır şartları ve yüklerin önceden belirlenmesi, hangi tür analize ihtiyaç duyulduğunun önceden kararlaştırılması gerekir. Genel olarak sonlu elemanlar üç bölümde incelenmektedir.

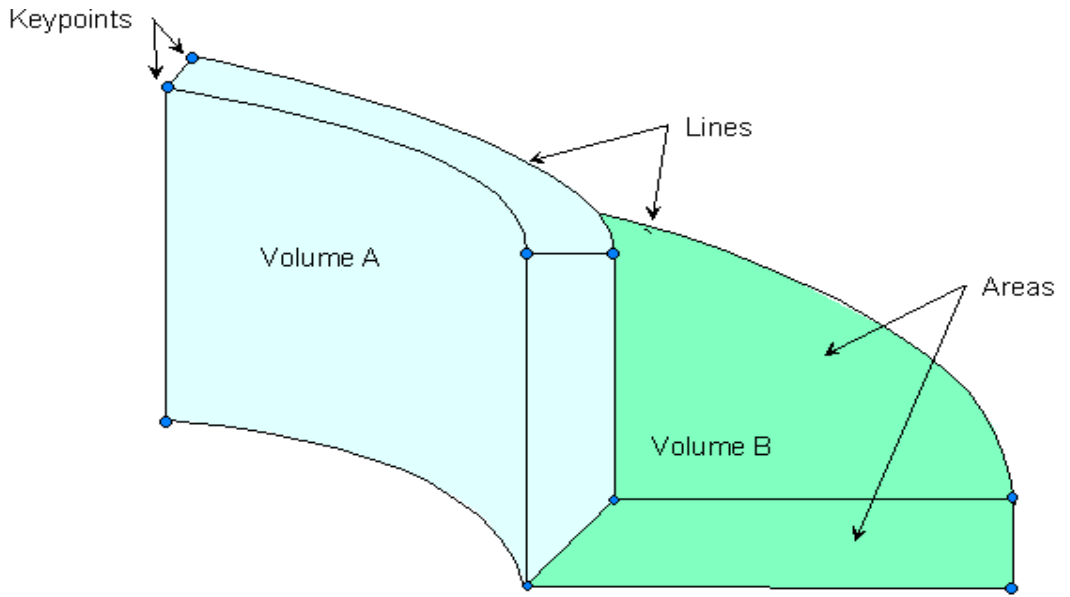
➤ Preprocessing: Problemin tanımlanması

- Keypoint/ Line/ Area/ Volume tanımlanması
- Eleman tipi ve malzeme/geometri özelliklerinin tanımlanması
- Gerekli çizgi/ alan/ hacimlerin sonlu elemanlara bölünmesi

➤ Solution: Yüklerin ve sınır şartlarının belirlenmesi ve çözümün gerçekleştirilmesi

- Postprocessing: Sonuçların görüntülenmesi
- Preprocessing Menüsi;

Preprocessing bölümünde yer alan ‘Line’ iki keypoint noktası ve bunları birbirine bağlayan doğrudan medyana gelir. ‘Area’ ise en az üç ‘Line’ dan oluşur. ‘Volume’ ise en az dört ‘Area’ dan oluşan kapalı bir hacimdir.



Şekil 3.2. Model oluşturma nesneleri (ANSYS 2003)

Bunlar ANSYS’te model oluşturma nesneleridir. Preprocessing menüsünde ikinci olarak eleman tiplerinin belirlenmesi ve malzeme/geometri özelliklerinin tanımlanması yer alır.

Modelde kullanılacak eleman tipleri önceden tayin edilmelidir. ANSYS kullanılacak her bir elemana farklı numara vermektedir. Bu elemanlar genellikle yapısal analiz, termal analiz, elektromanyetik analiz gibi analizleri gerçekleştirebilmek için tasarlanmıştır. Yapı analizlerinde kullanılan en yaygın eleman tipleri arasında solid, shell, beam, plane yer almaktadır. ANSYS’ te bu elemanların iki boyutlu, üç boyutlu, lineer, non-lineer gibi türleri mevcuttur. Elemanlar genel olarak nokta, çizgi, alan, hacim şekilleri için geçerlidir. Nokta, düğüm noktasıyla tanımlanan bir elemandır. Çizgi, bir doğru veya

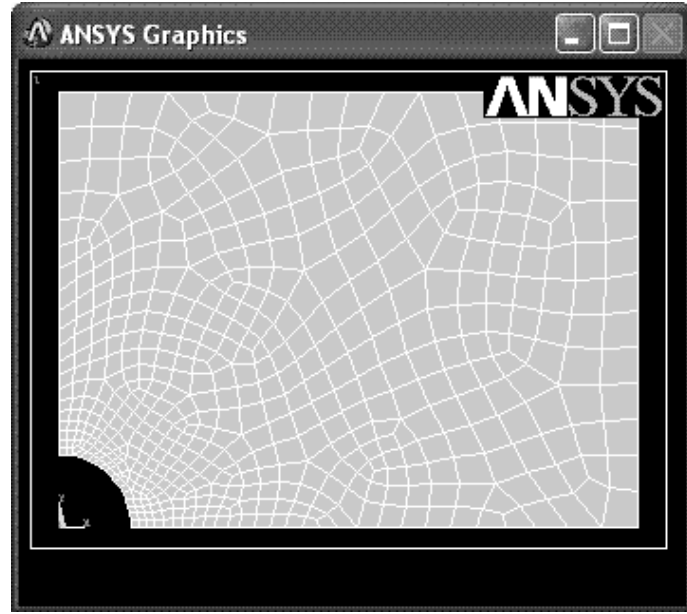
yay ile birlikte iki veya daha fazla düğüm noktasını birbirine bağlayan elemandır. Alan, dörtgen veya üçgen elemandır. Ayrıca shell(kabuk) elemanı da alan elemanıdır. Son olarak hacim ise üç boyutlu katı elemandır. Her elemana ait anahtar seçenekleri mevcuttur. Bunlara ‘key option’ denir. Her bir anahtar seçeneği için bir değer vermek mümkündür. Kullanılacak her malzeme türü için bir malzeme modelinin oluşturulması gerekmektedir. Ve her malzeme türüne geçerli olabilmesi için bir numara verilmelidir. Lineer- elastik bir malzeme için izotropik, ortotropik veya anizotropik seçeneklerinden biri seçilmelidir. Non-lineer bir malzeme için elastik, inelastik veya viskoelastik seçeneklerinden biri seçilmelidir. Ayrıca analiz yapmaya başlamadan önce malzemenin elastisite modülü, poisson oranı, yoğunluk, termal iletkenlik gibi özellikleri tanımlanmalıdır.

ANSYS programında Drucker-Prager malzeme modeli üç parametre ile tanımlanır. Bunlar, kohezyon değeri(sıfırdan büyük olmalı), iç sürtünme açısı ve genleşme açısıdır. Akmadan dolayı malzeme hacminde meydana gelen genleşmenin miktarı genleşme açısı ile kontrol edilebilir. Eğer genleşme açısı ile sürtünme açısı aynı ise akma kuralı “ilişkili akma kuralı / associated flow rule” tipindedir. Eğer genleşme açısı sıfır ise (veya sürtünme açısından küçükse), akma sırasında malzeme hacminde artış yoktur veya azdır ve akma kuralı “ilişkisiz akma kuralı / nonassociated flow rule” tipindedir (Calayır ve Karaton 2004).

Preprocessing menüsünde son olarak gerekli çizgi, alan, hacimlerin sonlu elemanlara bölünme işlemi yer almaktadır. Sonlu elemanlara bölme işlemine ‘mesh etme’ denir. Elemanlara bölme işlemi iki şekilde olmaktadır.

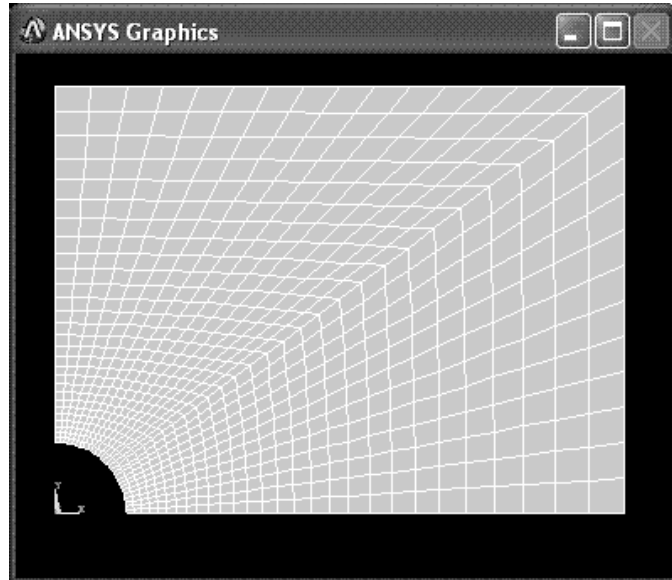
- ❖ Serbest elemanlara bölme
- ❖ Planlanmış elemanlara bölme

Serbest elemanlara bömodelin şekline bağlı olarak bölünme işleminde, bölme işlemi ANSYS tarafından elemanın şekline, modelin geometrisine bağlı olarak otomatik ayarlanır (Ansys 2003).



Şekil 3.3. Serbest elemanlara bölme

Planlanmış elemanlara bölme işlemi ise modelin şekline bağlı olarak bölünecek dörtgenlerde bir simetri yakalama çabasıdır.



Şekil 3.4. Planlanmış elemanlara bölme

➤ Solution Menüsü;

Burada yüklerin ve sınır şartlarının belirlenmesi ve çözümün gerçekleştirilmesi işlemleri yer alır. Eğer maddesel bir yük uygulanırsa ivmelenme başlar. Ve bu ivmelenme sürekli devam eder. Bir sınır şartı uygulanana kadar bu ivmelenme devam eder. ANSYS'te bir modelin mesnet şartlarını tanımlamak; ilgili düğüm noktalarına deplasman yüklemeyele sağlanabilir. İlgili düğüm noktasında hangi deplasman engellendiyse o deplasman sıfır olarak verilir. Bir sınır şartı bütün yönlerde (X, Y, Z) olabileceği gibi yalnızca belirli bir yönde de olabilir. Sınır şartı, simetri veya antisimetri şeklinde de olabilir.

Yüklemeler noktasal basınç şeklinde, gerilme analizlerinde yer değiştirme şeklinde, termal analizlerde sıcaklık şeklinde akışkan analizlerinde ise hız şeklinde olabilir. Yükler bir noktaya, bir çizgiye, bir kenara, bir yüzeye hatta toplam cisme uygulanabilir. Ancak yüklenecek yük malzeme özelliklerinde ve model geometrisinde kullanılan birimlere göre belirlenmelidir. Son olarakta oluşturulan model ve yüklemeler doğrultusunda çözüm başlatılır (Aydın 2010).

❖ Analiz

ANSYS programı ile doğrusal ve doğrusal olmayan yapı analizi yapılabilmektedir. Analiz tipi modelde kullanılan malzeme modeline ve eleman tipine bağlıdır. Doğrusal olmayan bir malzeme tanımının yapılması analizi nonlinear yapacaktır. Ayrıca değişken rijitli elemanları tanımlamak ta analizin nonlinear olmasına neden olacaktır. Doğrusal veya doğrusal olmayan olan Statik veya Dinamik analiz yapmak mümkündür. Zaman kontrolü, hem statik hem de dinamik analiz için tanımlanabilir. Doğrusal statik bir analizde zaman adımları gereksizdir. Doğrusal olmayan statik analizinde ise zaman adımları yükleme aralıklarını tanımlar. Doğrusal olmayan dinamik analizinde, dinamik denge denklemleri kullanılır ve böylece hız ve ivme gibi dinamik parametreler analizde hesaba katılmış olur.

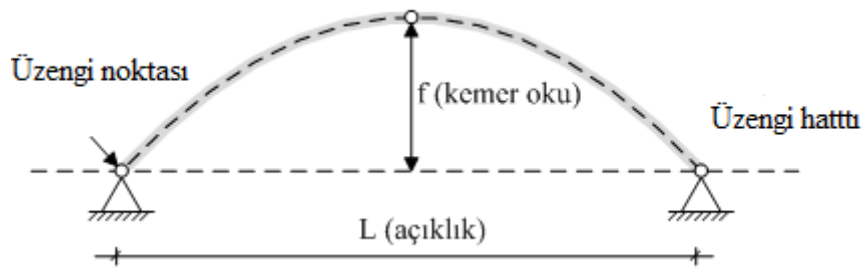
- Statik analiz

Geometrik nonlinearlığı uygulamak için Large Displacement Static, ihmal etmek için ise Small Displacement Static analizi kullanılır. Malzeme nonlinearlığı malzeme modeli oluşturulması sırasında tanımlanır.

Bir analizde birden fazla Yük Adımı (Load Step) bulunabilir. Her bir yük adımında, yükün başlangıç değerinden itibaren belirli artış adımları (Substep) ile yükleme yapılır (Lineer bir analizde 1 yük artış adımı yeterlidir). Artış adımları zamana bağlı olarak, zaman adımı veya artış adımı sayısı olarak verilebilir. Zamana bağlı artış adımı tanımlanması dinamik analiz yapılacağı anlamına gelmez. Bir statik analiz için, zaman adımı yük artış adımı olarak düşünülmektedir.

Üç mafsallı kemerlerin düzgün yayılı düşey yükler altındaki statik analizi

İki mesneti sabit mesnet olan ve üzerinde bir mafsal bulunan kemerlere üç mafsallı kemerler denir. Tipik kemer örneği aşağıda verildiği gibidir (Atımtay 1989; Çakıroğlu vd 1998).

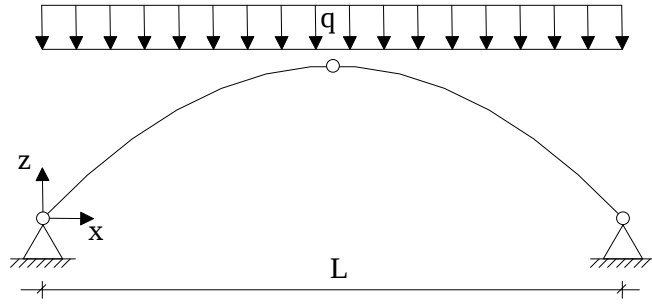


Şekil 3.5. Tipik kemer örneği

f: Kilit taşı ile üzengi hattı arasındaki uzaklık

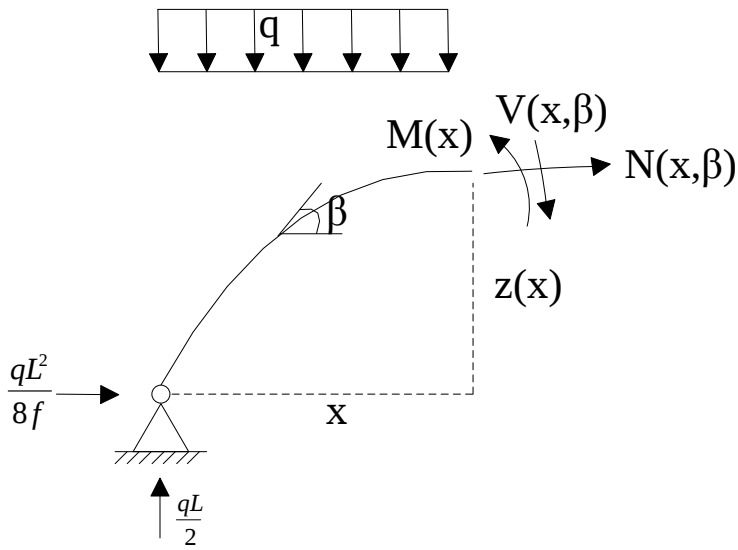
L: Üzengi noktaları arasındaki açıklık

Açıklığı L, basıklık oranı f/L olan ve q şiddetinde düzgün yayılı yükü yüklü üç mafsallı bir kemer Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Düzgün yayılı yüklerle yüklü üç mafsallı bir kemer

Kemerde normal kuvvet (N), kesme kuvveti (V) ve eğilme momenti (M) olarak oluşan iç kuvvetler (X ve β)'nin fonksiyonu olarak formül (2), (3), (4) 'te verilmiştir. β kemere herhangi bir noktadan çizilen teğetin yatay eksenle yapmış olduğu açı, X ise o noktanın sabit mesnete olan yatay uzaklığıdır.



Şekil 3.7. Kemerin herhangi bir kesitindeki iç kuvvetler

Kuvvetlerin teğet üzerindeki izdüşümlerinin toplamının sıfır olması gerektiği şartıyla yola çıkılarak formül 3.1 elde edilir.

$$N(x, \beta) = qx \sin \beta - \frac{qL}{2} \sin \beta - \frac{qL^2}{8f} \cos \beta \quad 3.1$$

Kuvvetlerin teğete dik eksen üzerindeki izdüşümlerinin dengesinden yararlanılarak kemerin herhangi bir kesitindeki kesme kuvvetini veren formül 3.2 elde edilir.

$$V(x, \beta) = -qx \cos \beta + \frac{qL}{2} \cos \beta - \frac{qL^2}{8f} \sin \beta \quad 3.2$$

Üç mafsallı kemerin herhangi bir kesitindeki eğilme momentini veren ifade ise X'in fonksiyonu olarak formül 3.3 ile oluşturulabilir.

$$M(x) = -\frac{qx^2}{2} - \frac{qL^2}{8f} z(x) + \frac{qL}{2} x \quad 3.3$$

Üç mafsallı kemerin eğri ekseninin $z(X) = [4f.X(L-X)]/L^2$ şeklinde ikinci dereceden bir parabol içermesi durumunda formül 3.3 ve 3.4'te gerekli düzenlemeler yapılarak kemerin herhangi bir kesitindeki kesme kuvveti ve eğilme momentinin sıfır olduğu görülebilir(Can 2002). Böylece bu tip kemerlerde yerdeğiştirmelerin hesaplanması sadece normal kuvvete bağlı olarak hesaplanabilir.

Gerçek yüklemenin olduğu sistemlerde kemerin sabit mesnetinden $x(0 \leq x \leq L/2)$ gibi bir uzaklıkta meydana gelen normal kuvvet $N_0(X, \beta)$, formül 3.4 deki gibi yazılabilir.

$$N_0(x, \beta) = qx \sin \beta - \frac{qL}{2} \sin \beta - \frac{qL^2}{8f} \cos \beta \quad 3.4$$

Kemerin mafsal noktasındaki düşey yerdeğiştirmeyi hesaplamak için sistemdeki gerçek dış yükler kaldırılıp o noktaya $P=1$ kN'luk bir tekil yük uygulanınca kemerin sabit

mesnetinden $x(0 \leq x \leq L/2)$ gibi bir uzaklıkta oluşan normal kuvvet $N_1(X, \beta)$ formül 3.6 gibi oluşturulabilir.

$$N_1(x, \beta) = -\frac{P}{2} \sin \beta - \frac{P}{2} \cos \beta \quad 3.5$$

Kemerin mafsal noktasının düşey yerdeğiştirmesi formül 3.6 kullanılarak elde edilebilir. Bu formülde s, sabit mesnet ile mafsal noktası arasındaki kemer uzunluğudur.

$$\delta \left(x = \frac{L}{2} \right) = \frac{1}{EA} \left\{ \int_0^s \left(qx \sin \beta - \frac{qL}{2} \sin \beta - \frac{qL^2}{8f} \cos \beta \right) \cdot \left(-\frac{P}{2} \sin \beta - \frac{P}{2} \cos \beta \right) ds \right\} \cdot 2 \quad 3.6$$

Formül 3.6'deki ifadeyi X değişkenine bağlı olarak kullanabilmek için 3.7 formülündeki dönüşüm uygulanmalıdır.

$$ds = \frac{dx}{\cos \beta} \quad 3.7$$

Formül 3.7'deki ifade formül 3.6'de yazılırsa ve gerekli düzenlemeler yapılacak olursa formül 3.8 elde edilir.

$$\delta \left(x = \frac{L}{2} \right) = \frac{1}{EA} \int_0^{\frac{L}{2}} \left(qx \tan \beta - \frac{qL}{2} \tan \beta - \frac{qL^2}{8f} \right) \cdot (-P \sin \beta - P \cos \beta) dx \quad 3.8$$

Formül 3.8'daki $\tan \beta$ formül 3.9'da olduğu gibi yazılabilir.

$$\tan \beta = \frac{\partial z(x)}{\partial x} = \frac{4f}{L^2} (L - 2x) \quad 3.9$$

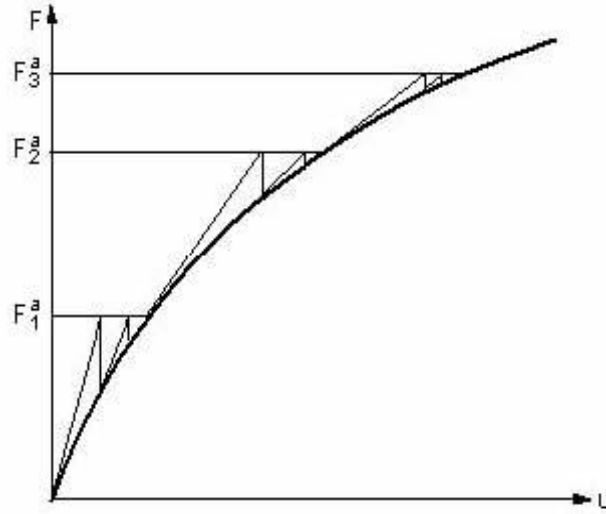
3.9’da yer alan ifade formül 3.9’da yerine konularak hesaplanırsa 3.10 formülü elde edilir.

$$\delta\left(x = \frac{L}{2}\right) = \frac{1}{EA} \int_0^{\frac{L}{2}} \left\{ qx \frac{4f}{L^2} (L - 2x) - \frac{qL}{2} \frac{4f}{L^2} (L - 2x) - \frac{qL^2}{8f} \right\} \cdot \frac{\left[-P \left[\frac{4f}{L^2} (L - 2x) + 1 \right] \right]}{\sqrt{1 + \left[\frac{4f}{L^2} (L - 2x) \right]^2}} dx \quad 3.10$$

Bu formül kullanılarak üç mafsallı kemerlerin orta noktasındaki düşey yerdeğiştirme değeri hesaplanabilir (Uçar ve Şakar 2011).

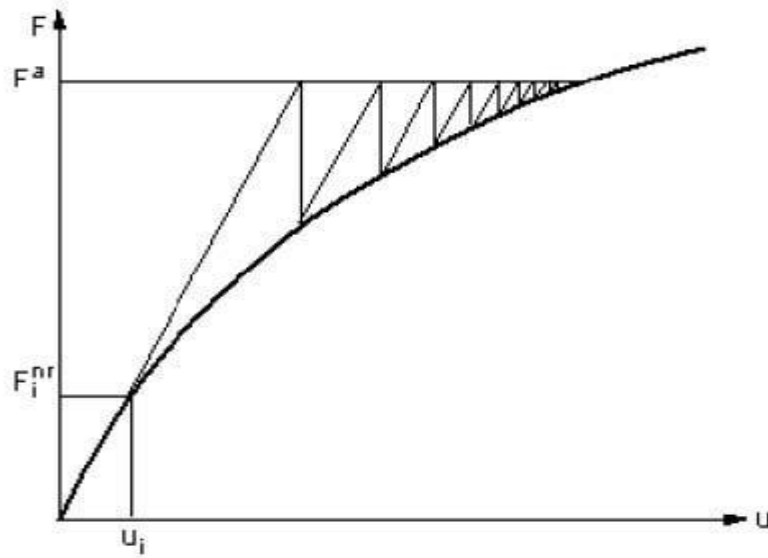
▪ Analiz Prosedürleri

ANSYS sonlu eleman programı, geometrisi veya malzeme gerilme-birim deformasyon ilişkisi doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde çeşitli iterasyon prosedürleri kullanır. Herhangi bir seçim yapılmadığı takdirde otomatik olarak Newton-Raphson yöntemini kullanır. ANSYS sonlu eleman programı, doğrusal olmayan analiz çözümleri için Newton-Raphson yöntemini kullanır. Newton-Raphson ya da değişken rijitlik prosedürü olarak da bilinen bu yöntem, dış yükler etkisinde deplasman yapan sistemin düğüm noktalarında oluşacak kuvvet farkını dikkate alır. İlk deplasmanlar yapının deforme olmamış konumunda hesaplanan rijitlik matrisinden bulunur. Daha sonraki her iterasyon adımında yapının deforme olmuş hali dikkate alınarak teğet rijitlik matrisi hesaplanır. Newton-Raphson prosedürü dengelenmemiş yük vektörünü (uygulanan dış kuvvet ile elemanlar üzerindeki gerilmeyi oluşturan kuvvet arasındaki farkı) kullanarak doğrusal çözüm yapar. Yakınsama olup olmamasına göre dengelenmemiş yük vektörü yeniden hesaplanır. Çözüm yakınsama sağlanıncaya kadar devam eder. Yakınsama sağlanamazsa daha küçük yük artışları kullanılır.



Şekil 3.8. Newton Raphson metodunda çözümün ilerleyişi

Her iterasyon için rijitlik matrislerinin yeniden oluşturulması hem zaman kaybına hem de verilerin fazlalığından dolayı saklama alanı gibi sorunları doğuracaktır. Bu sorunları azaltmak amacıyla Değiştirilmiş Newton Raphson Yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, her iterasyon için başlangıçta ki sistem rijitliği kullanılır. Böylece her yük artışı için bir kereye mahsus oluşturulan ve depolanan rijitlik matrisi sürekli değiştirilmemektedir. ANSYS programında Değiştirilmiş Newton Raphson yöntemi özellikle statik ve dinamik analizler için önerilmektedir. Çözüm süreci Newton Raphson yöntemine göre daha çok zaman kaybına neden olsa da kullanılan matris işlemi daha azdır. Nonlineer çözüm yöntemlerinden birisi de Başlangıç Rijitliği yöntemidir. Bu yöntem ile Değiştirilmiş Newton Raphson yöntemi birbirine benzemektedir.



Şekil 3.9. Değiştirilmiş Newton Raphson metodu

Newton Raphson yöntemleri

Yapıların nonlinear çözümünde ardışık yöntem olarak çeşitli Newton-Raphson (NR)yöntemlerinden, Newton-Raphson, Düzeltilmiş Newton-Raphson (MNR), Tam Newton-Raphson (FNR) veya Başlangıç Gerilme Yöntemlerinden (ISM) biri kullanılmaktadır. Denklem (3.1)'de nonlinear problemlerin ardışık formülasyonu verilmiştir. Denklem (3.2) denklem (3.1)' de yerine konulursa denklem (3.3) elde edilir.

$$[K_T] \cdot \{\delta d\} = \{P\} \cdot \{F\} \quad (3.11)$$

$$\{R\} = \{P\} - \{F\} \quad (3.12)$$

$$[K_T] \cdot \{\delta d\} = \{R\} \quad (3.13)$$

Burada;

$[K_T]$: Tanjant rijitlik matrisi $\{R\}$: Dengelenmemiş yük vektörüdür.

$\{\delta d\}$: Deplasman vektörü $\{P\}$: Dış kuvvet vektörü $\{F\}$: Uç kuvvet vektörü

Diğer taraftan, ardışık işlem tekniği tek nokta çözümü sağlar. Uygulamada ise, yapının yük-deplasman davranışı bir bütün izlemek istenir. Bunun için, artımsal ve ardışık çözüm prosedürlerinin bir arada kullanılması gerekir. Ardışık/Artımsal çözüm için denklem (3.4)' de görüldüğü gibi $\{P\}$ dış yük vektörünün orantısal değeri uygulanır.

$$[K_T].\{\delta d\} = \lambda\{P\} - \{F\} \quad (3.14)$$

Burada; λ yük parametresidir.

➤ Postprocessing Menüsü;

Postprocessing bölümü, sonuçların okunduğu ve yorumlandığı bölüm olarak bilinir. Sonuçlar Çizelge şeklinde, grafik şeklinde yada modelin deformasyona uğramış biçiminde olabilir (Nuhoğlu 2004; Çıngı 2005; Dede 2006).

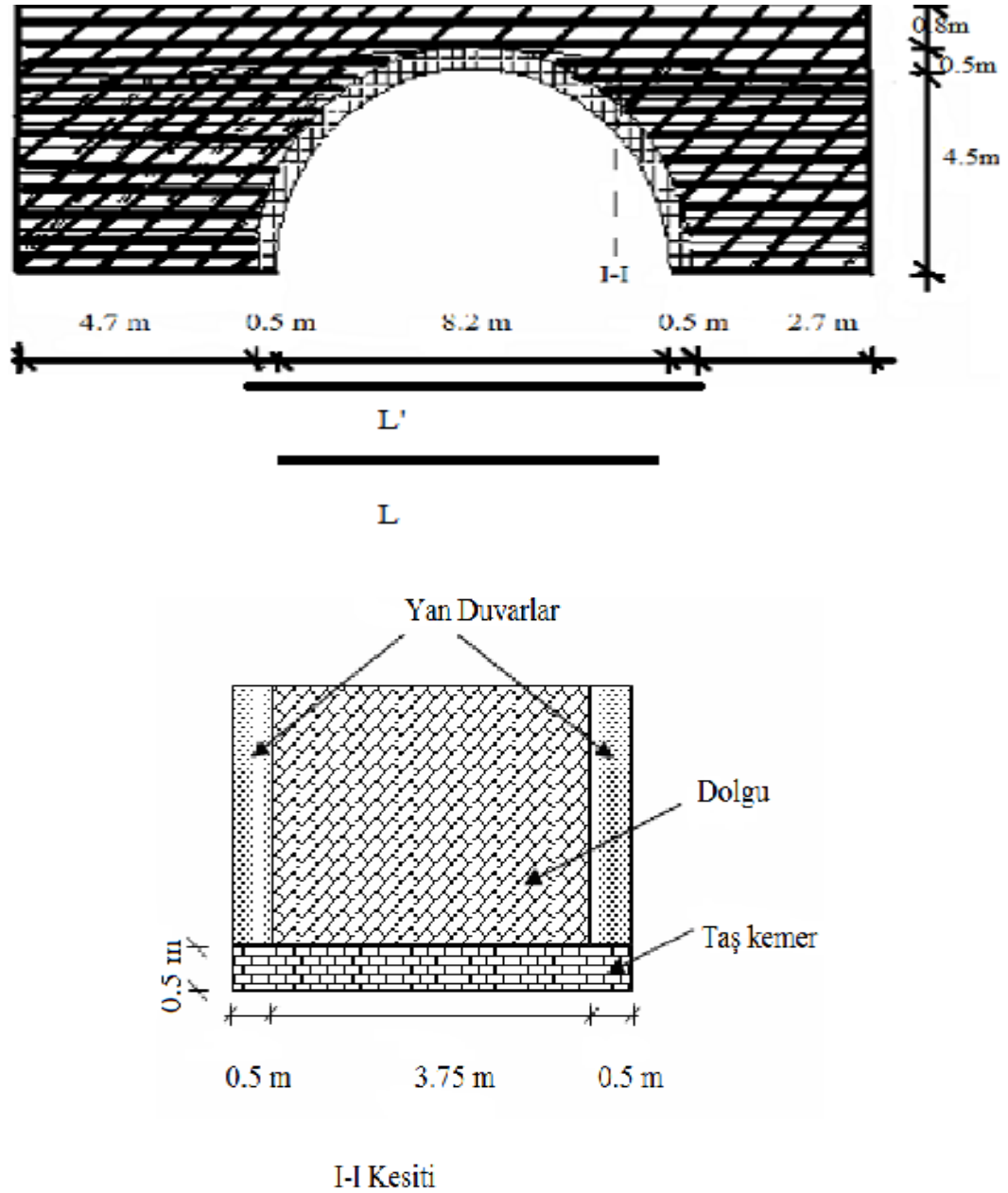
4. ARAşTIRMA BULGULARI ve TARTIşMA

Çalışma kapsamında, Ordu'nun Ulubey ilçesine bağlı şahinkaya ile Akoluk köyleri arasında bulunan Sarpdere Deresi üzerindeki tarihi köprünün belirli yükler altında göstermiş olduğu davranışlar incelenmiştir. Bölgenin geleneksel kemerli taş köprülerinden biri olan Sarpdere köprüsü yaklaşık 200 yıllık bir geçmişe sahiptir. Sabit yarıçaplı tek açıklıklı kemere sahip olan köprü yığma yapı olarak inşa edilmiştir. Köprü, taşıyıcı kemer kısım, yan duvarlar, dolgu malzemesinden oluşmaktadır.



şekil 4.1. Sarpdere köprüsü (Anonim 2013b)

Şekilde tarihi kemer köprünün boyuna ve enine kesit görünüşleri verilmektedir. Köprünün toplam boyu 15.6m olup, toplam kemer açıklığı ve yüksekliği sırasıyla 8.2m ve 5.8m'dir. Köprünün yan duvarları 0.5m kalınlığında taş duvarlardan oluşmaktadır.



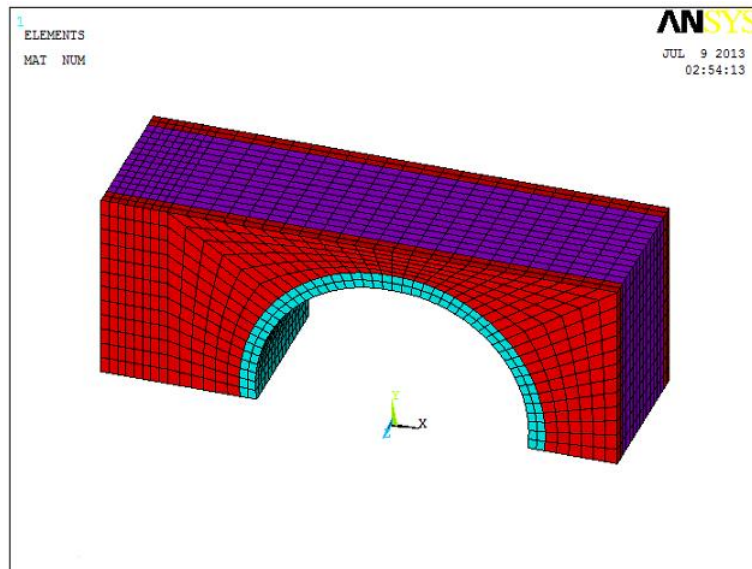
Şekil 4.2. Sarpdere köprüsünün boyuna ve enine kesit görünüşleri

Çizelge 4.1. Teorik analizlerde dikkate alınan malzeme özellikleri (Bayraktar vd 2007)

Malzeme	Elastisite Modülü(N/m ²)	Poisson Oranı	Kütle Yoğunluğu(kg/m ³)
Taş kemer	3.0E9	0.2	1600
Yan duvarlar	2.5E9	0.2	1400
Dolgu	1.5E9	0.25	1300

Tarihi köprüler gibi geçmişten günümüze uzanan yapıların teorik analizlerinde dikkate alınması gereken malzeme özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu tür yapıların malzeme özelliklerinin tespit edilmesindeki zorluklar nedeniyle, literatürde benzer çalışmalar incelenmiş ve dikkate alınan malzeme özellikleri belirlenmiştir (Frunzio *et al.* 2001). Bu çalışmada Sarpdere Köprüsü için Çizelge 4.1’de verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Köprünün sonlu eleman modelinde 7680 adet üç boyutlu katı eleman kullanılmıştır. Köprünün ANSYS sonlu eleman programı (ANSYS 12.1) kullanılarak oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 4.3’te verilmektedir.

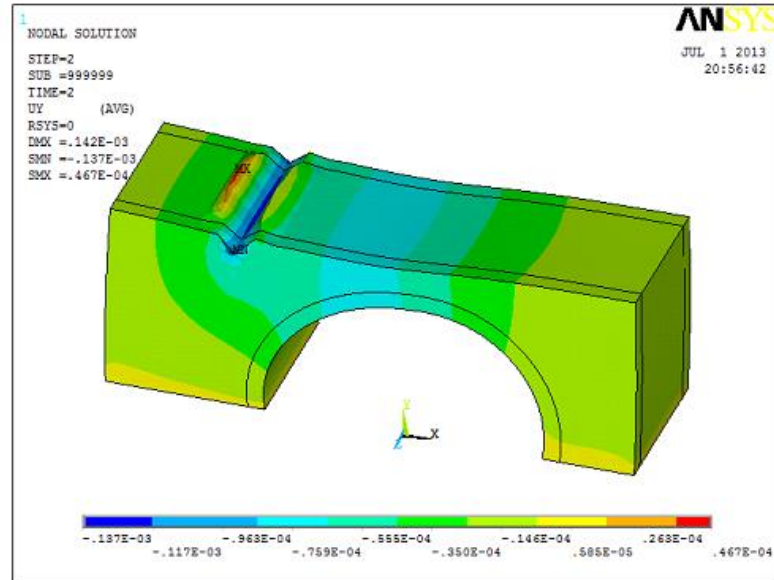
**Şekil 4.3.** Sarpdere köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli

Analizlerde tekil, çizgisel ve yayılı yükler kullanılmıştır. Modelin uygulanan yükler karşısında göstermiş olduğu davranış hareketleri incelenmiştir.

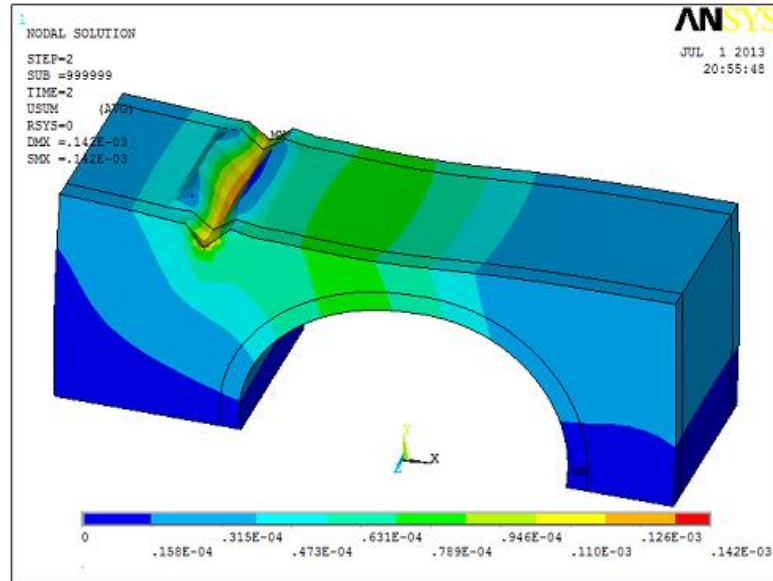
Yapılan ön analizler ve literatür çalışmaları ışığında aşağıdaki analizler yapılmıştır.

Çizgisel Yüklemler

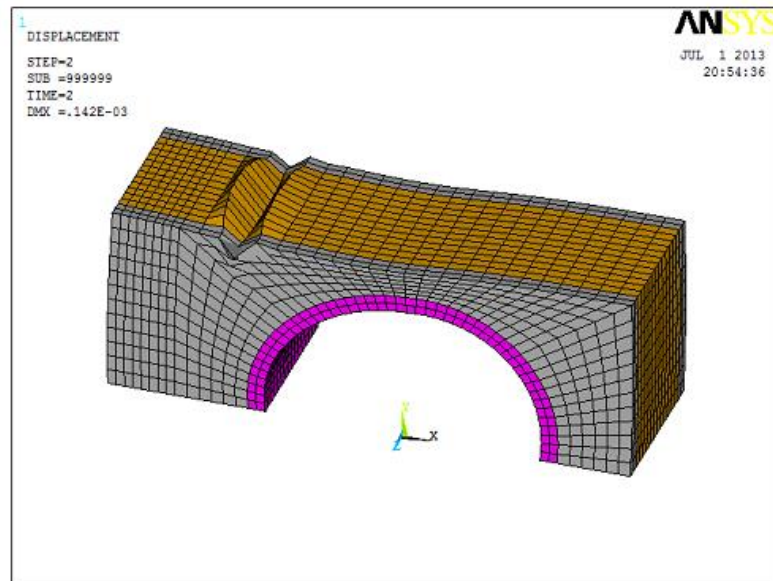
Analiz 1'in toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 48.97 t/m olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



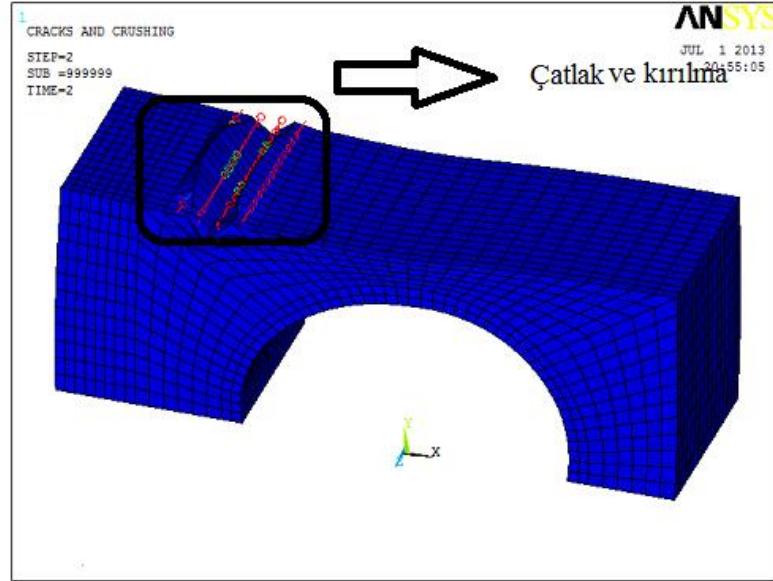
Şekil 4.4. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu



Şekil 4.5. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu

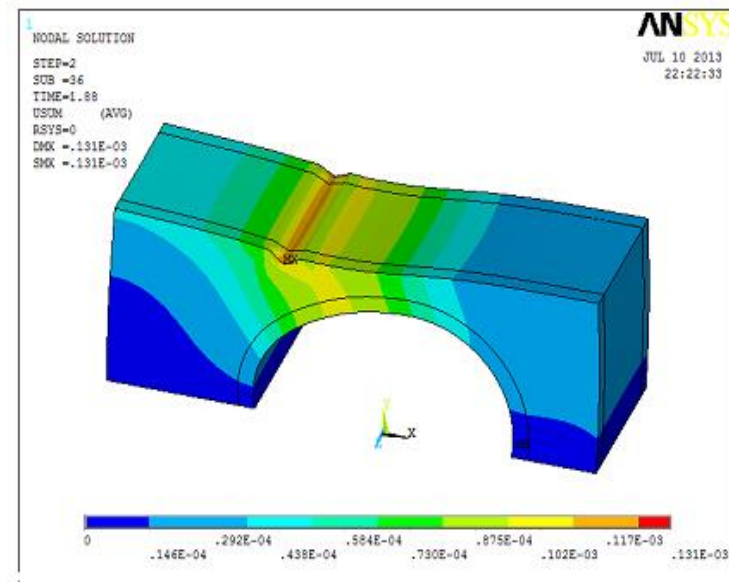


Şekil 4.6. Modelin yükleden sonraki deformasyona uğramış durumu

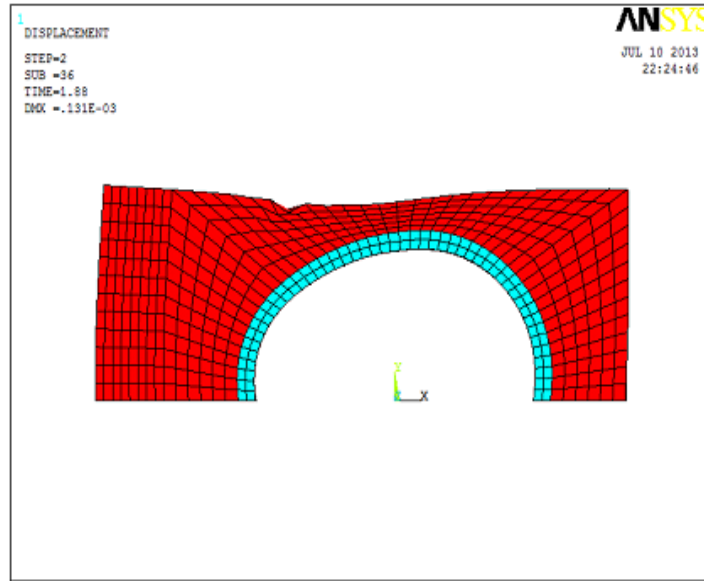


Şekil 4.7. Modelde yüklemenden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

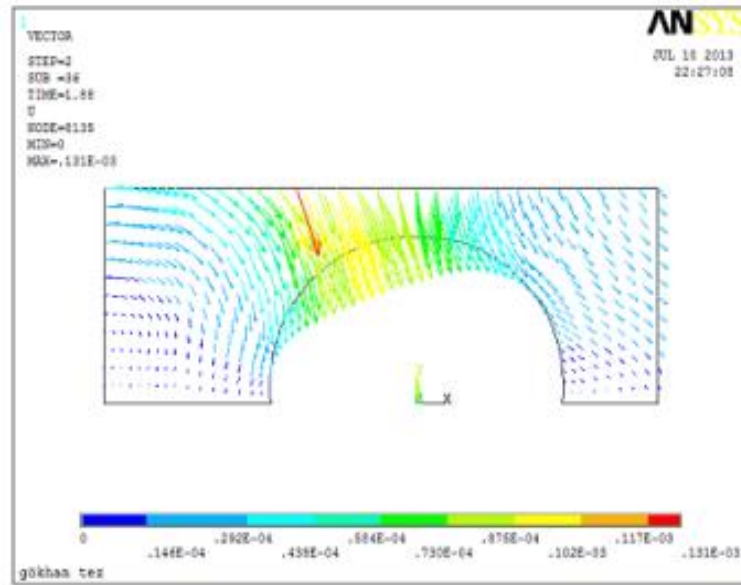
Analiz 2'nin toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 32.3 t/m olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



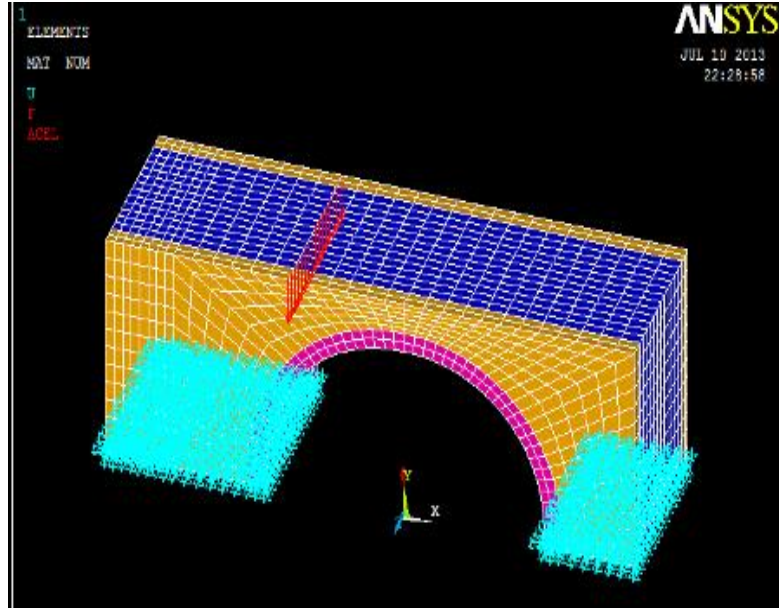
Şekil 4.8. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu



Şekil 4.9. Modelin yüklemeden sonraki deformasyona uğramış durumu

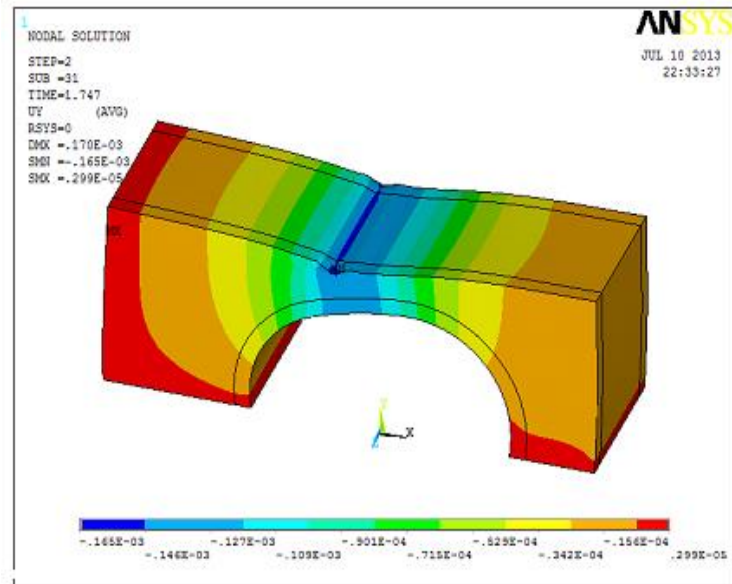


Şekil 4.10. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

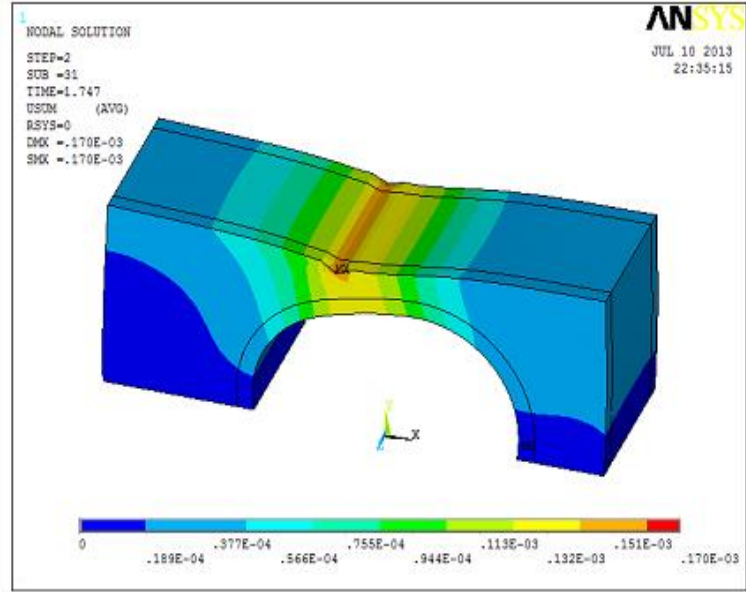


Şekil 4.11. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

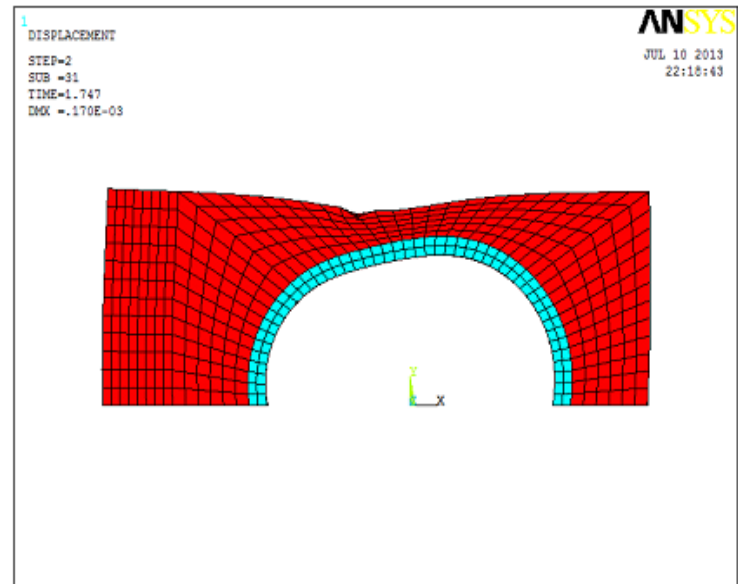
Analiz 3'ün toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 27.5 t/m olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



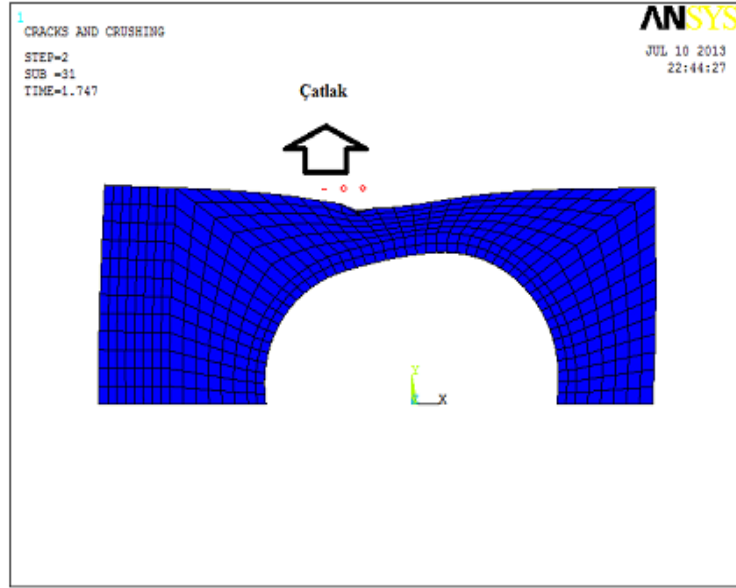
Şekil 4.12. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu



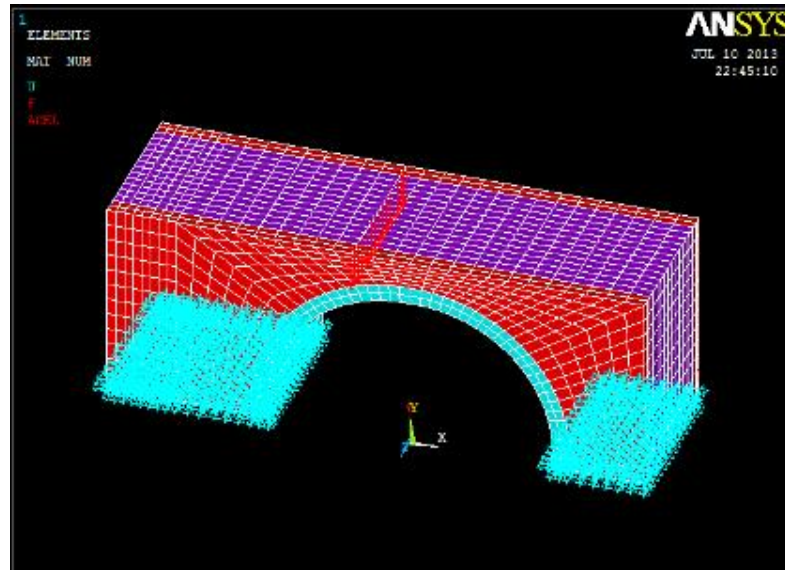
Şekil 4.13. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu



Şekil 4.14. Modelin yüklemenden sonraki deformasyona uğramış durumu

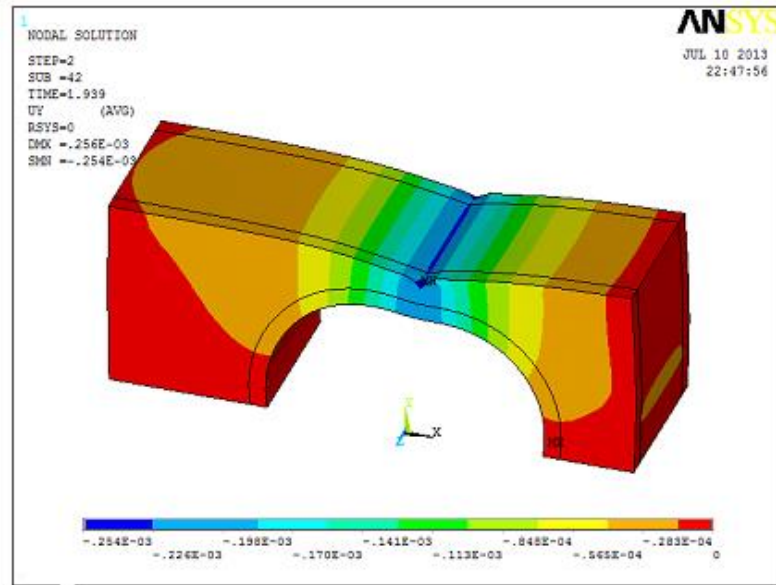


Şekil 4.15. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

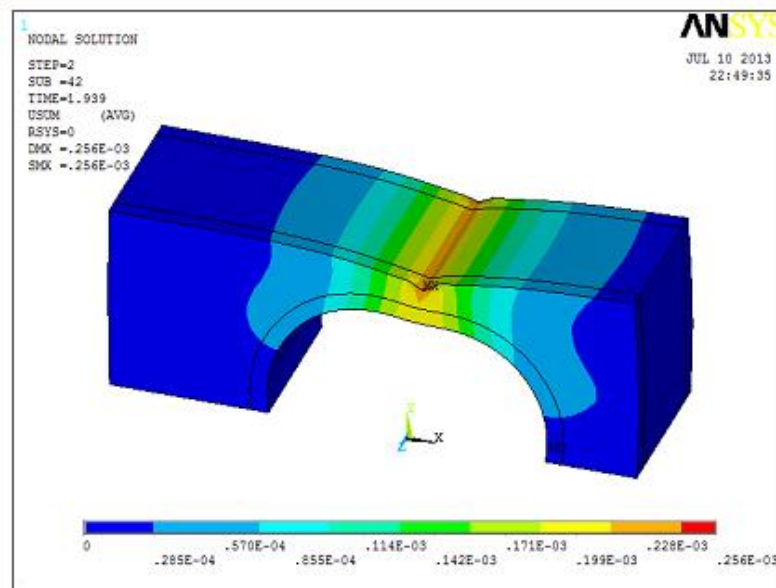


Şekil 4.16. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

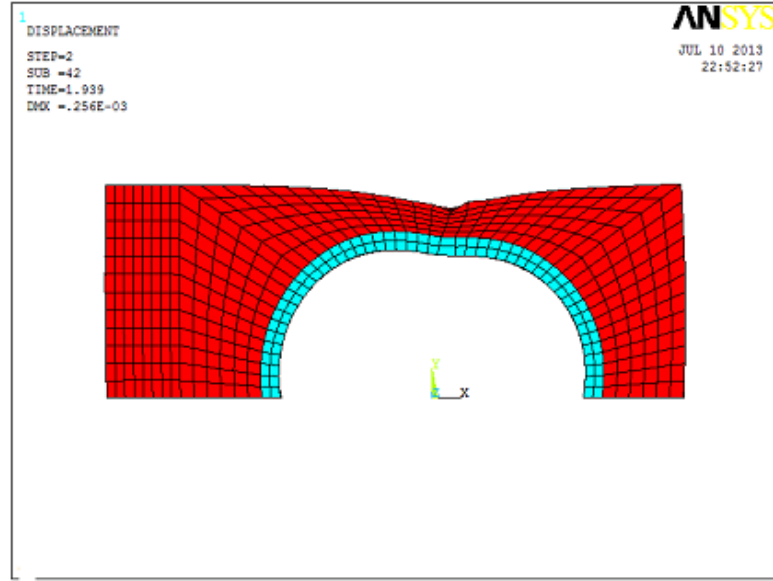
Analiz 4'ün toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 34.4 t/m olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



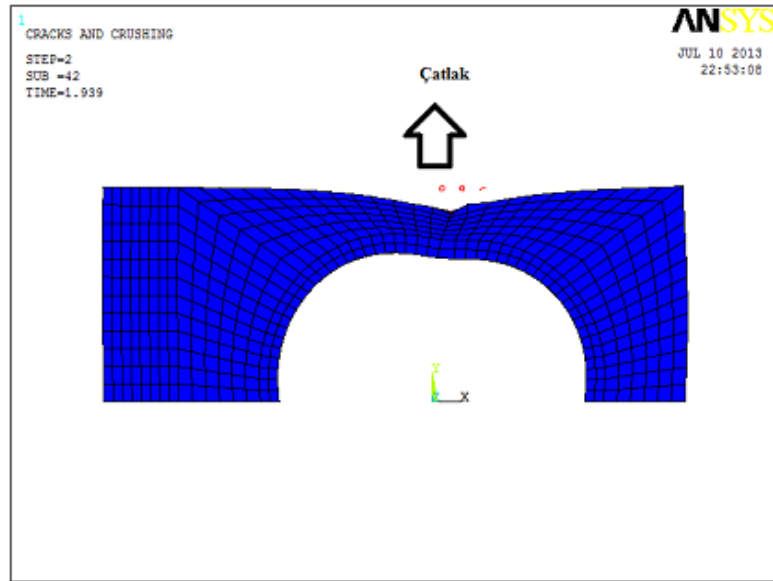
Şekil 4.17. Düzüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değıştirmesi durumu



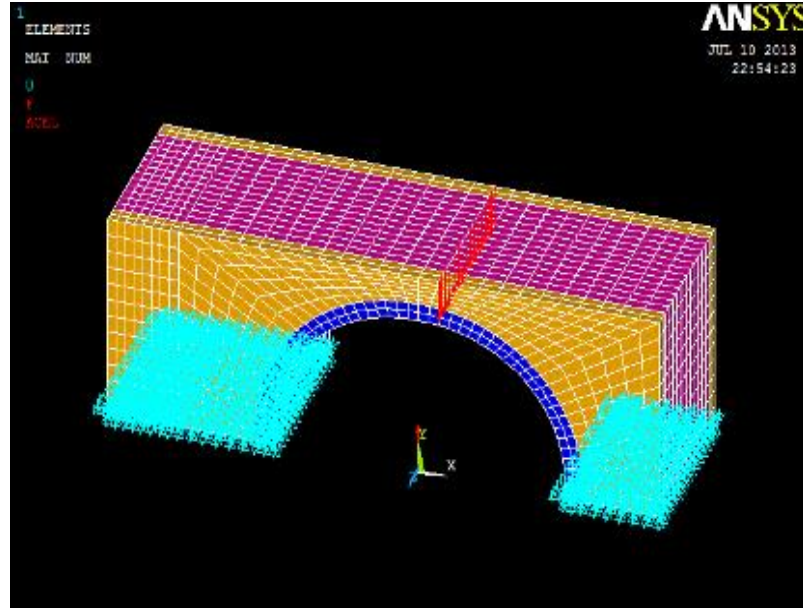
Şekil 4.18. Düzüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değıştirme durumu



Şekil 4.19. Modelin yüklemeden sonraki deformasyona uğramış durumu

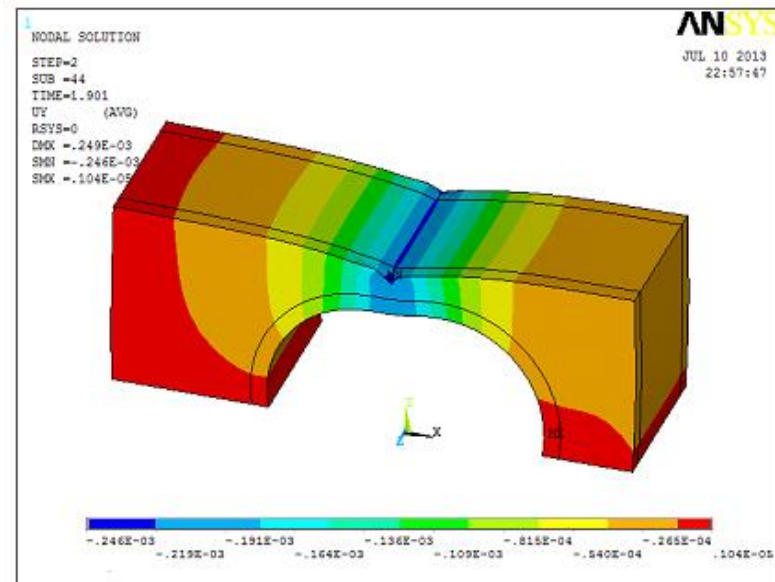


Şekil 4.20. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

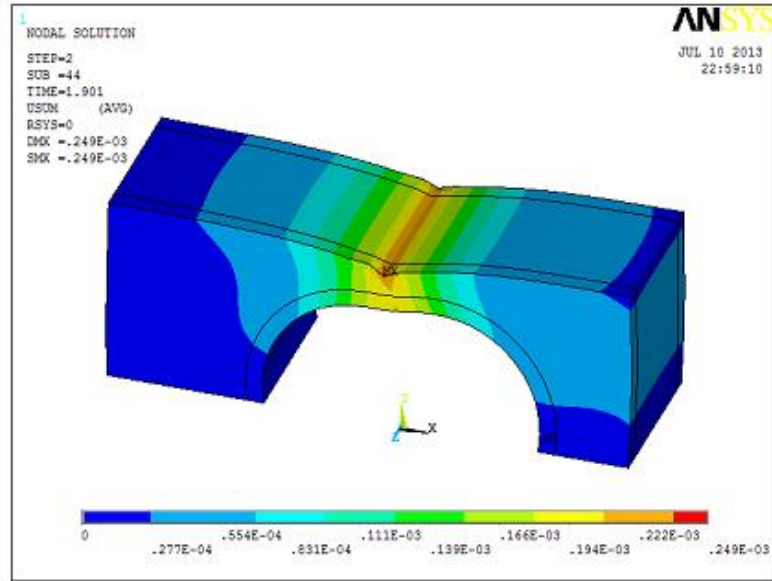


Şekil 4.21. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

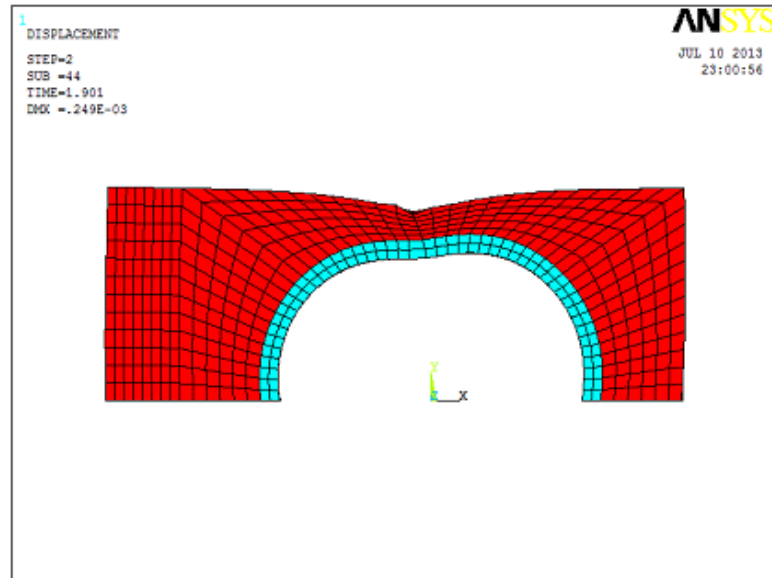
Analiz 5'in toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 33.1 t/m olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



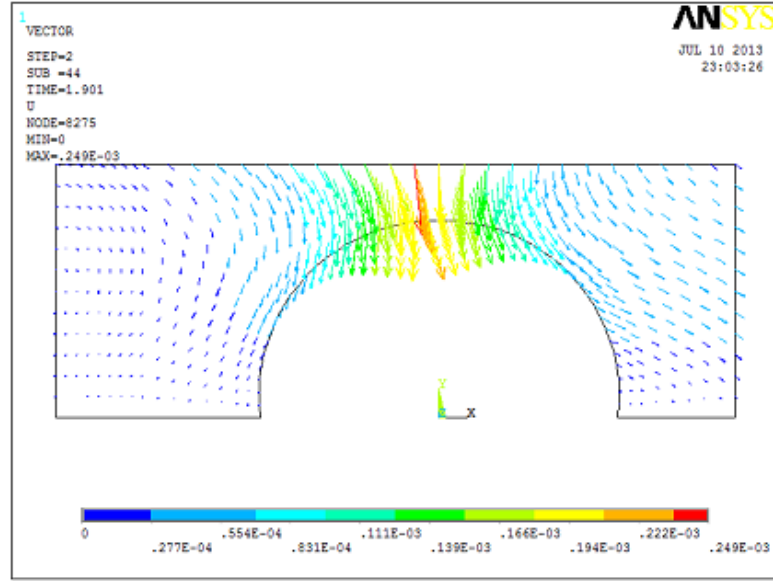
Şekil 4.22. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu



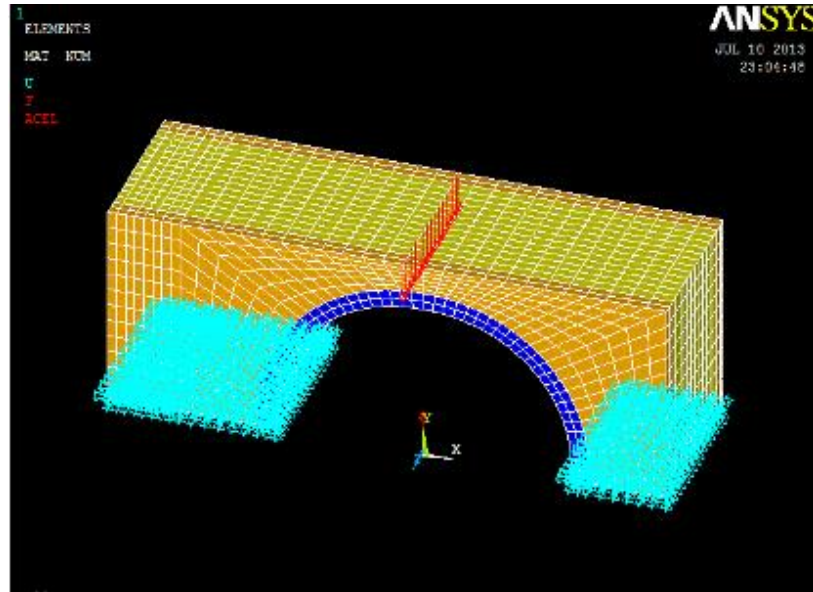
Şekil 4.23. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu



Şekil 4.24. Modelin yüklemenden sonraki deformasyona uğramış durumu

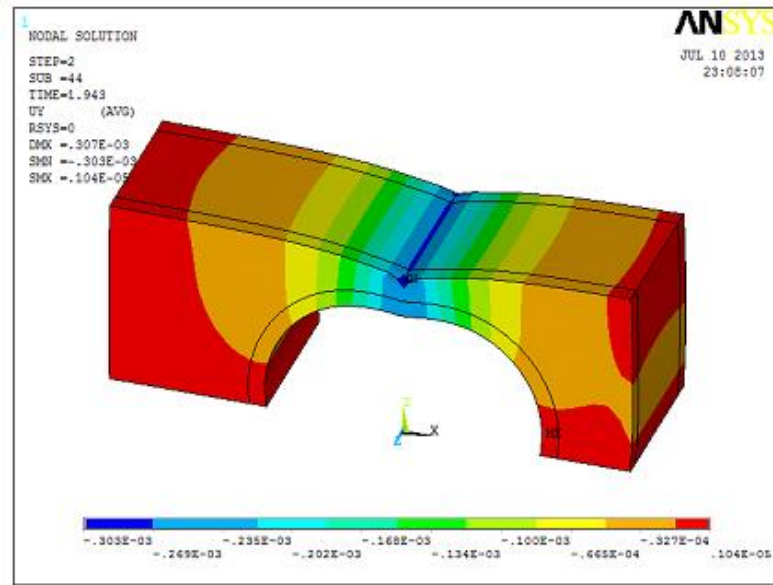


Şekil 4.25. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

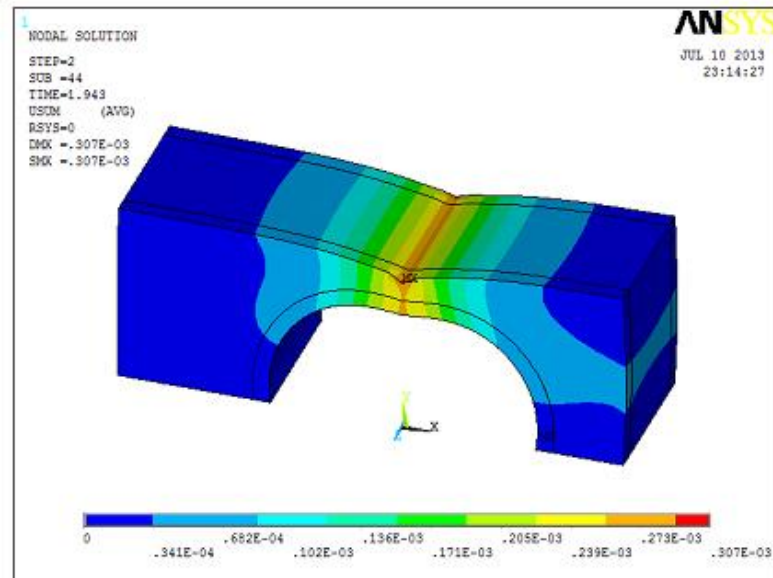


Şekil 4.26. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

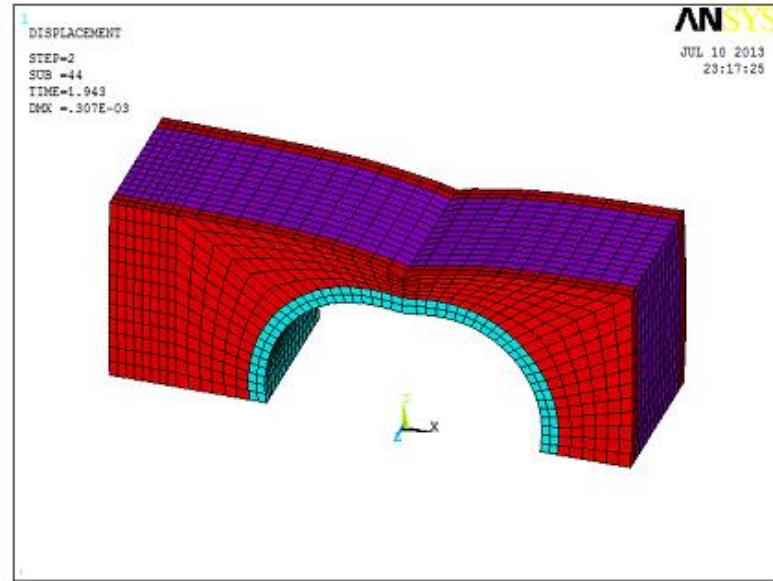
Analiz 6'nın toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 41.5 t/m olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



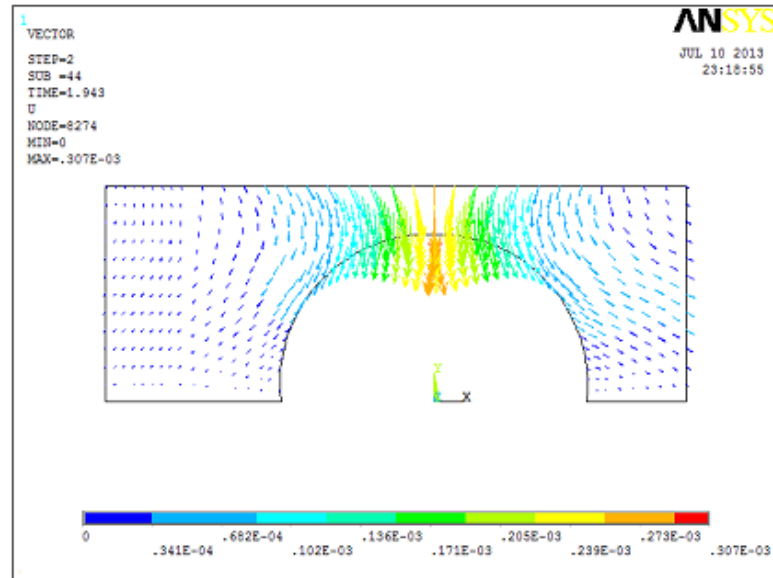
Şekil 4.27. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu



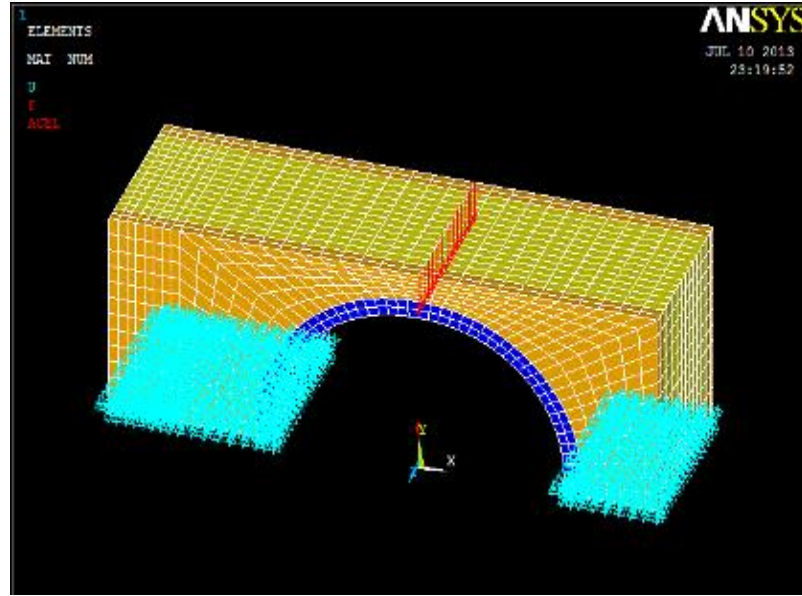
Şekil 4.28. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu



Şekil 4.29. Modelin yüklemekten sonraki deformasyona uğramış durumu

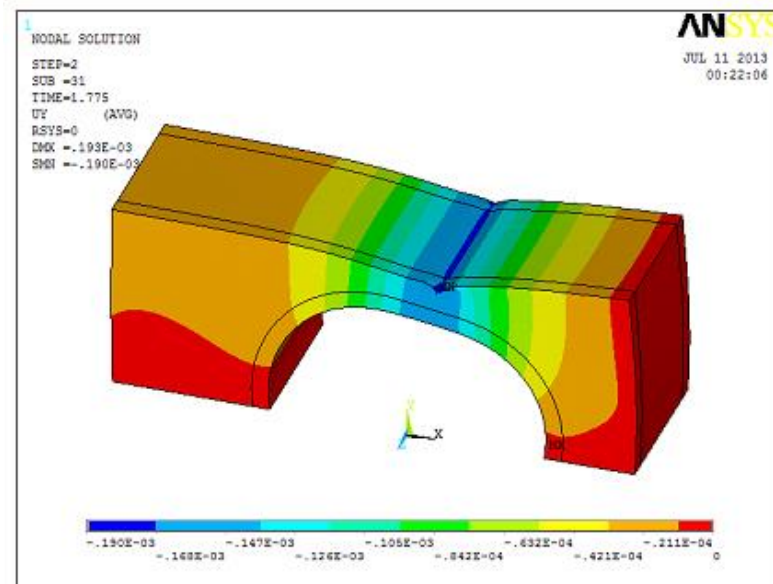


Şekil 4.30. Modelde yüklemekten dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

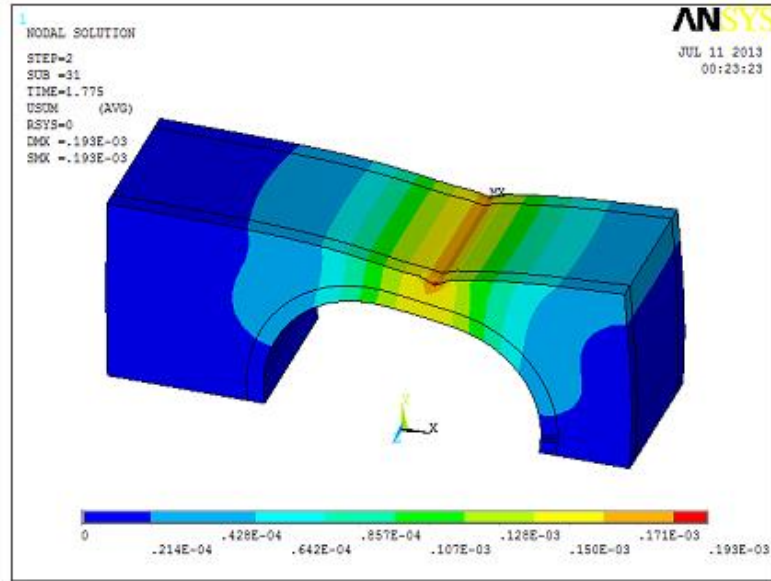


Şekil 4.31. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

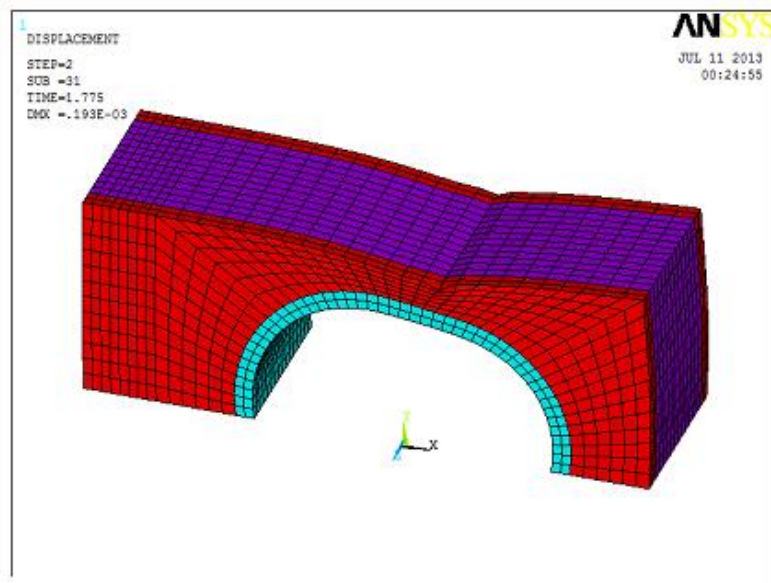
Analiz 7'nin toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 28.5 t/m olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



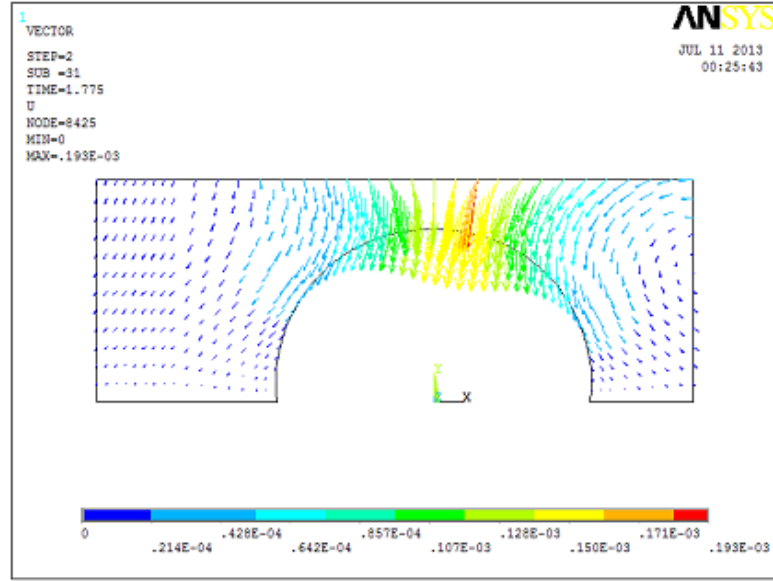
Şekil 4.32. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu



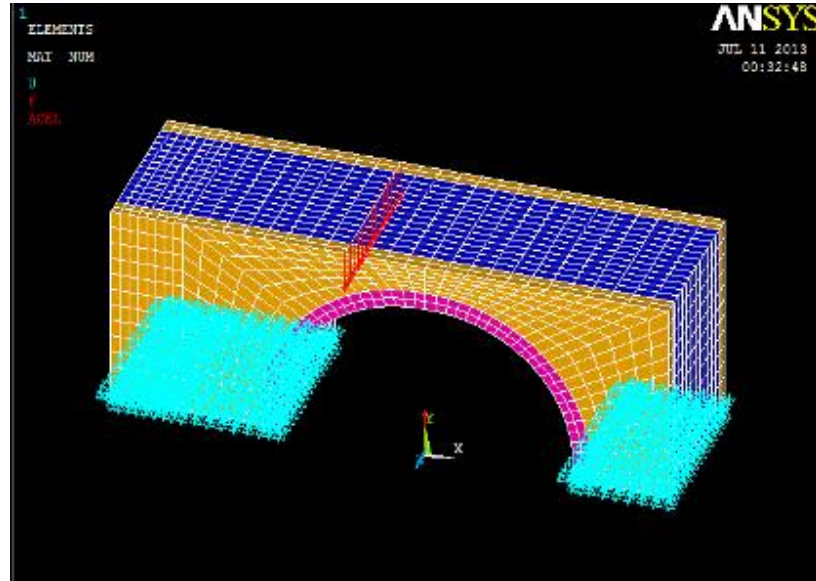
Şekil 4.33. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değıştirme durumu



Şekil 4.34. Modelin yüklemeden sonraki deformasyona uğramış durumu

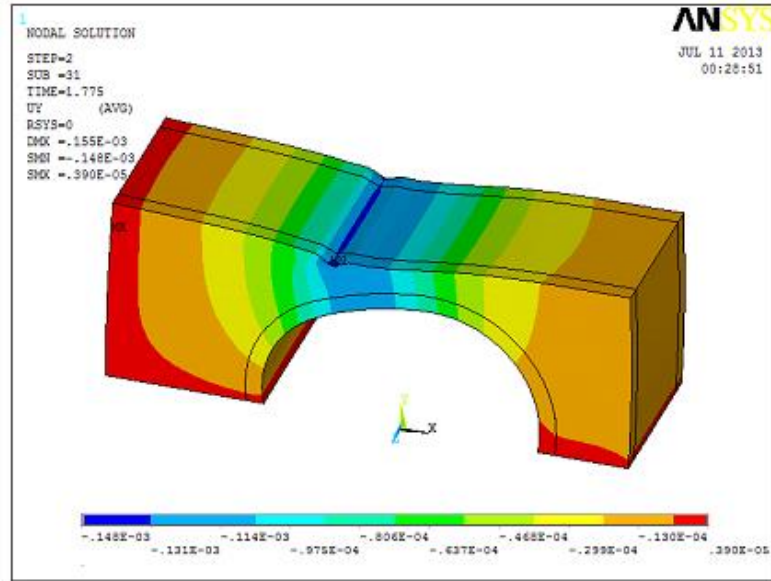


Şekil 4.35. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

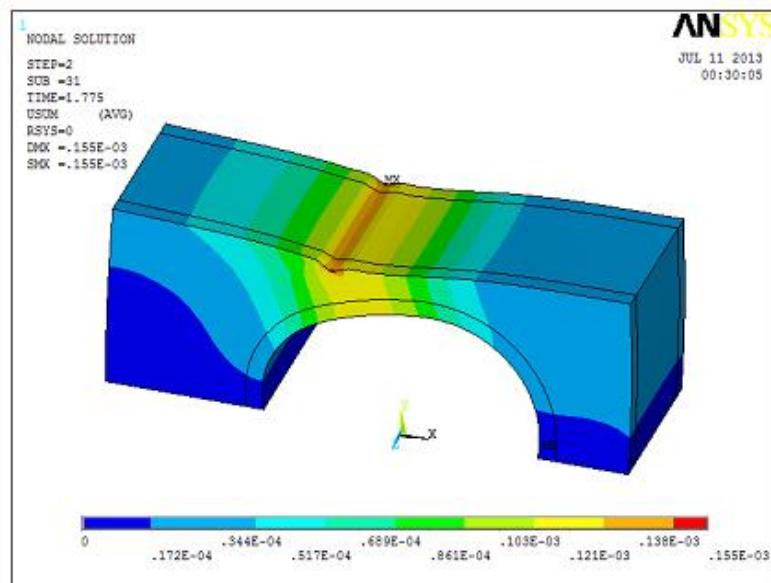


Şekil 4.36. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

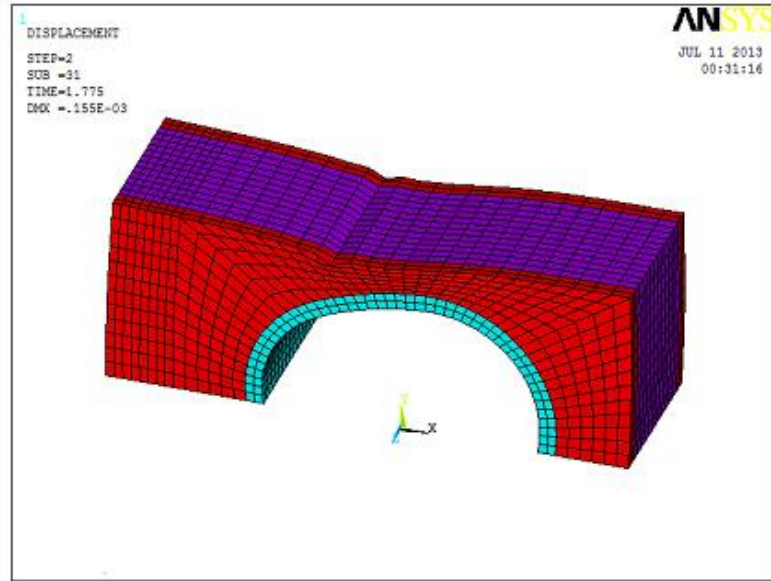
Analiz 8'in toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 28.5 t/m olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



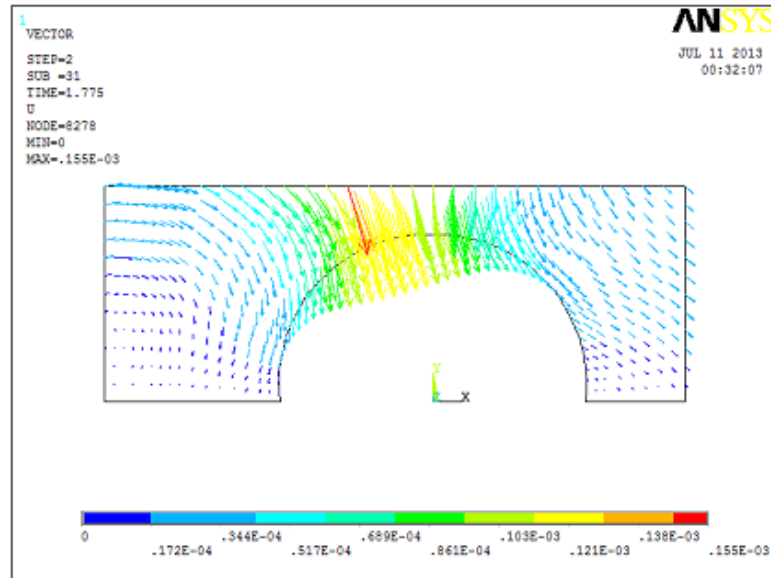
Şekil 4.37. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu



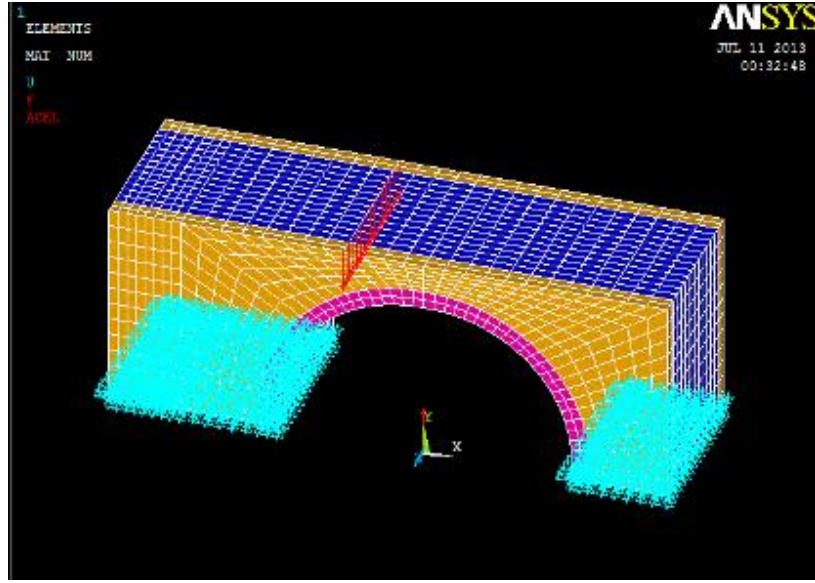
Şekil 4.38. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu



Şekil 4.39. Modelin yüklemenden sonraki deformasyona uğramış durumu

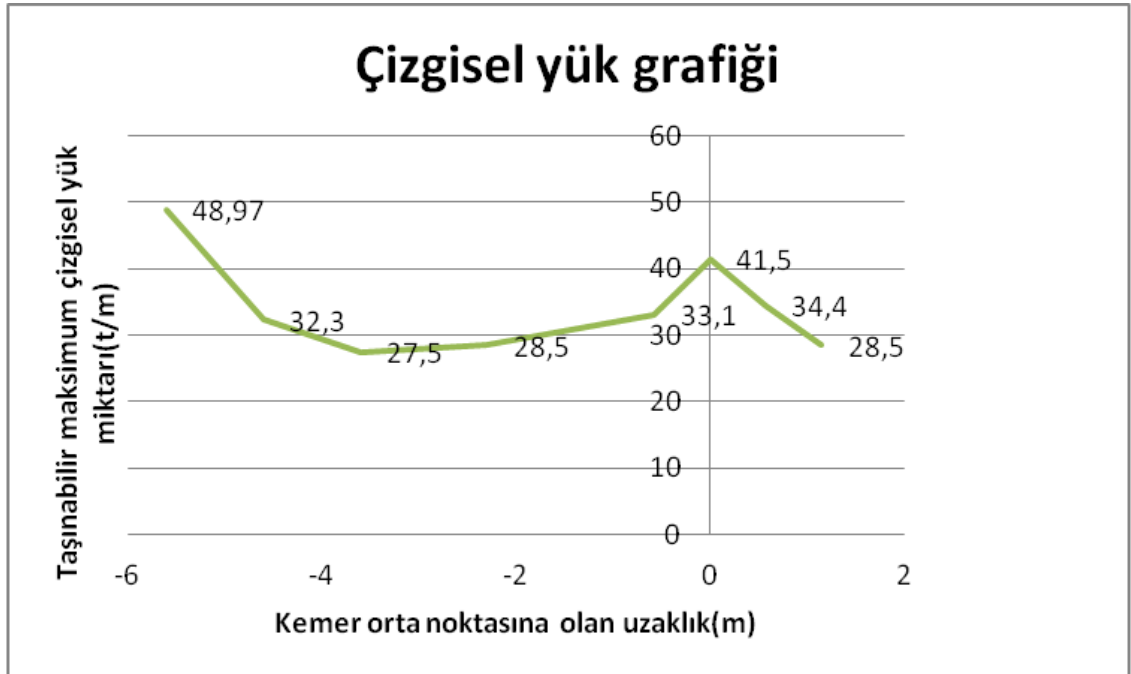


Şekil 4.40. Modelde yüklemenden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu



Şekil 4.41. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

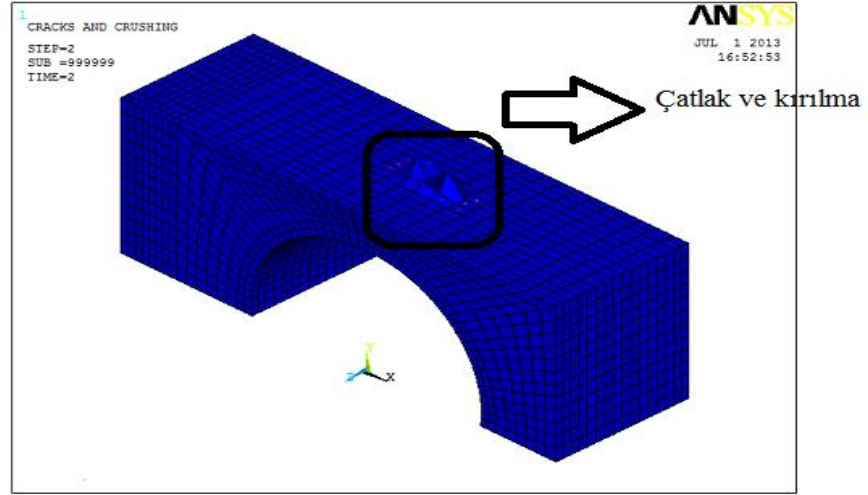
Yapılan çizgisel yük analizlerinin grafiksel olarak gösterimi aşağıda verildiği gibidir.



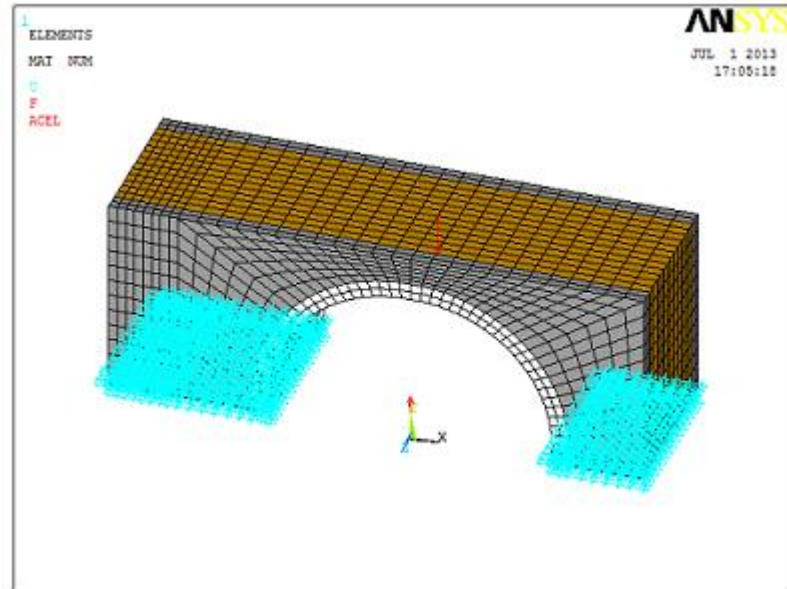
Şekil 4.42. Çizgisel yük grafiği

Tekil Yüklemler

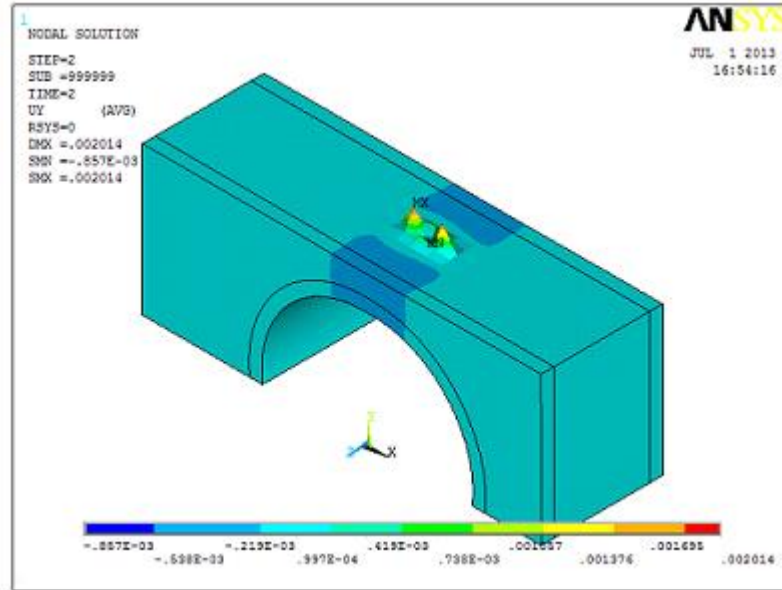
Analiz 9'un toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 31.98 t olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



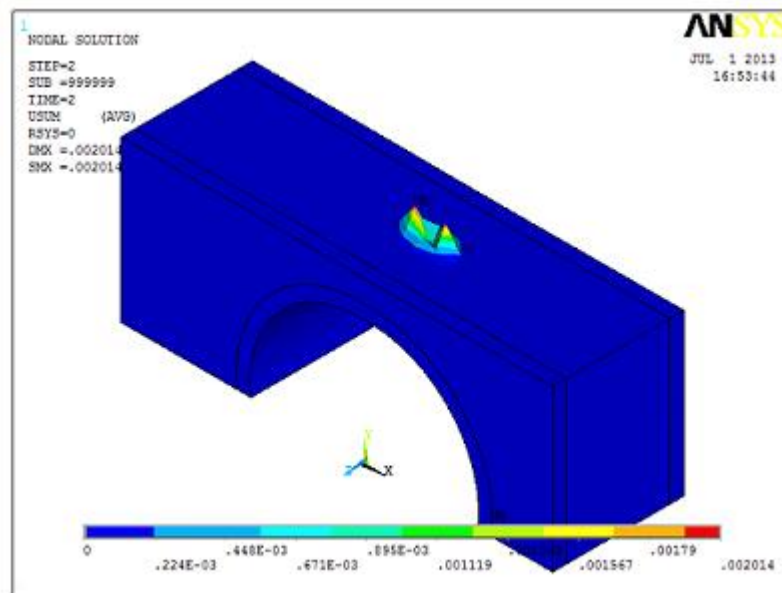
Şekil 4.43. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu



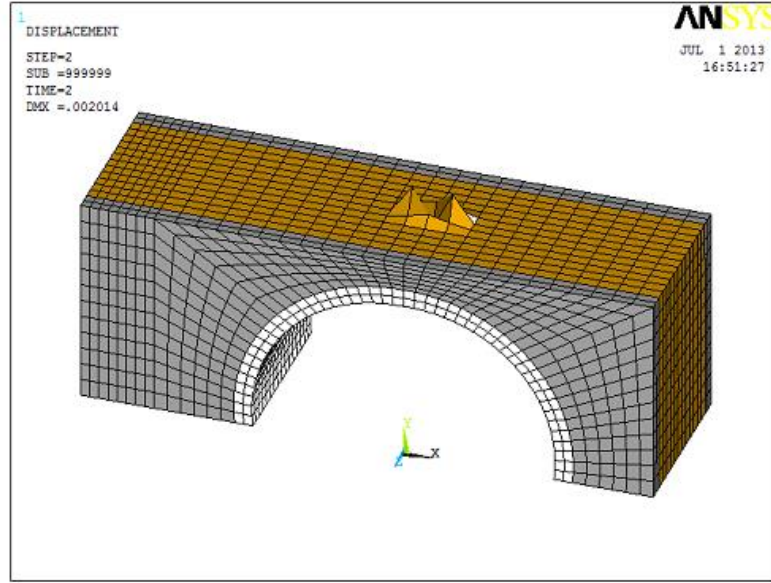
Şekil 4.44. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu



Şekil 4.45. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu

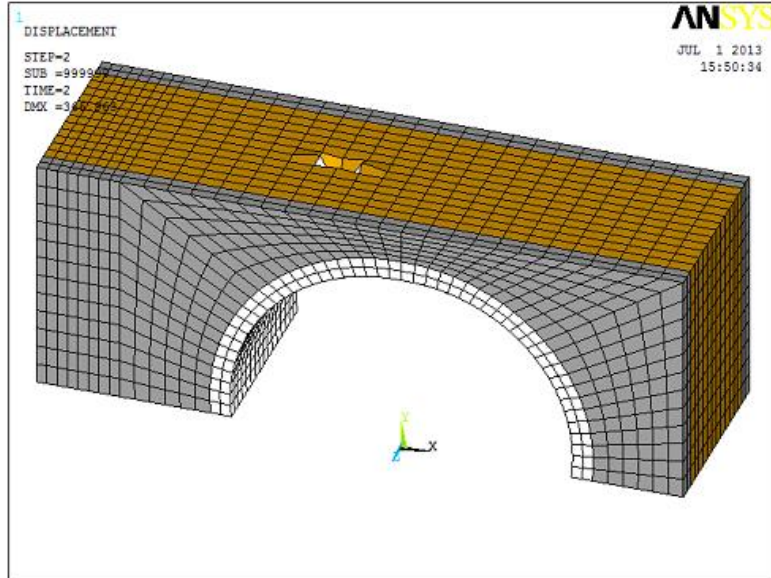


Şekil 4.16. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu

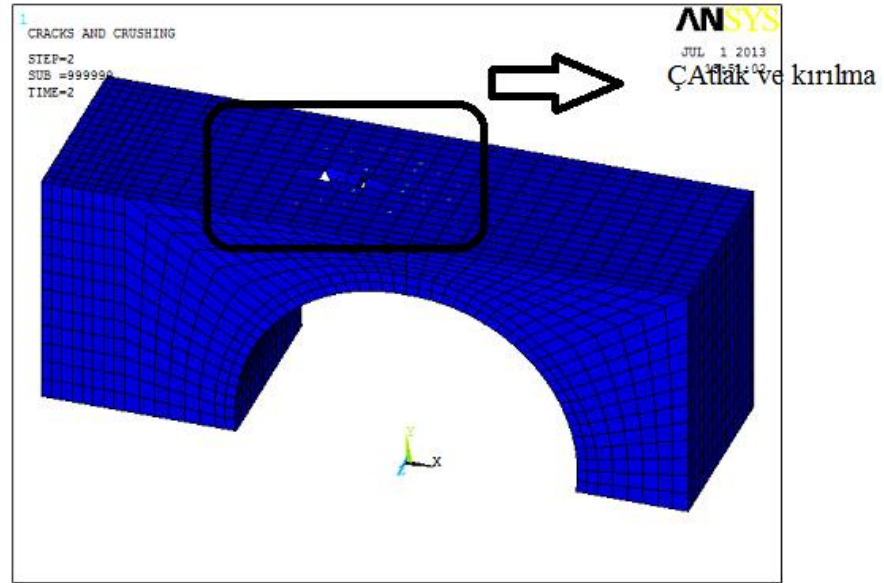


Şekil 4.47. Modelin yüklemeden sonraki deformasyona uğramış durumu

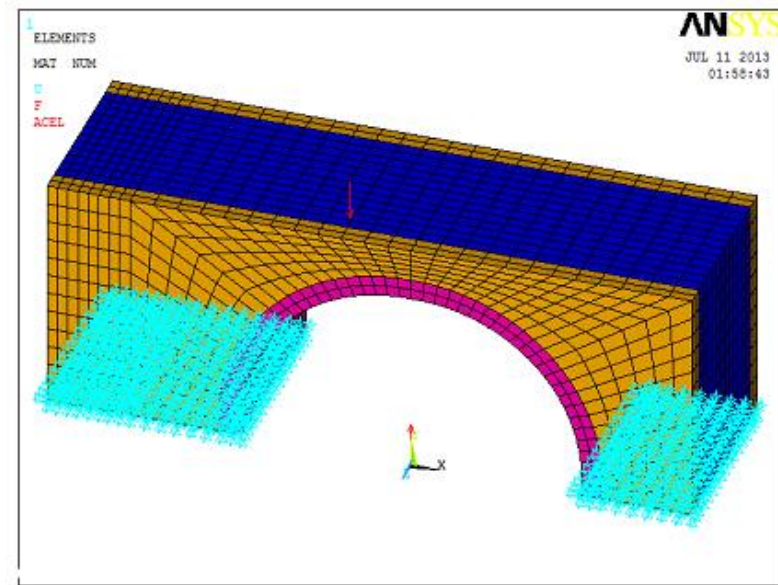
Analiz 10'un toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 21.7 t olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



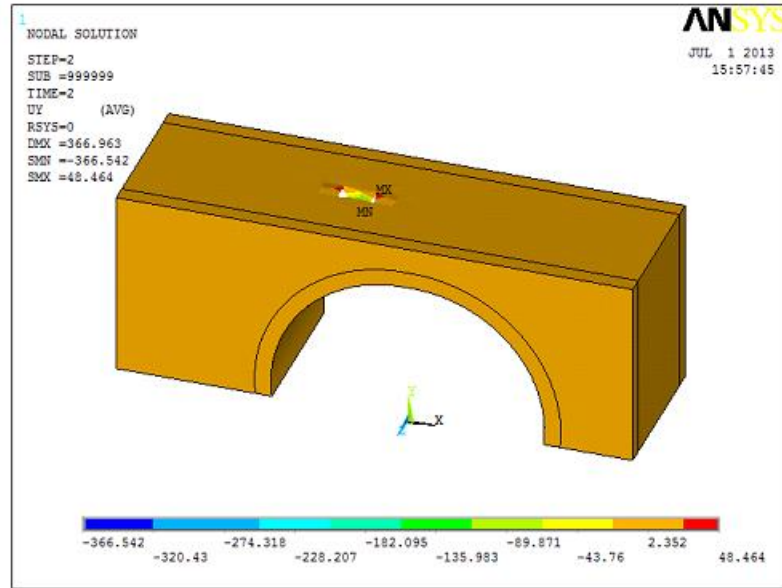
Şekil 4.48. Modelin yüklemeden sonraki deformasyona uğramış durumu



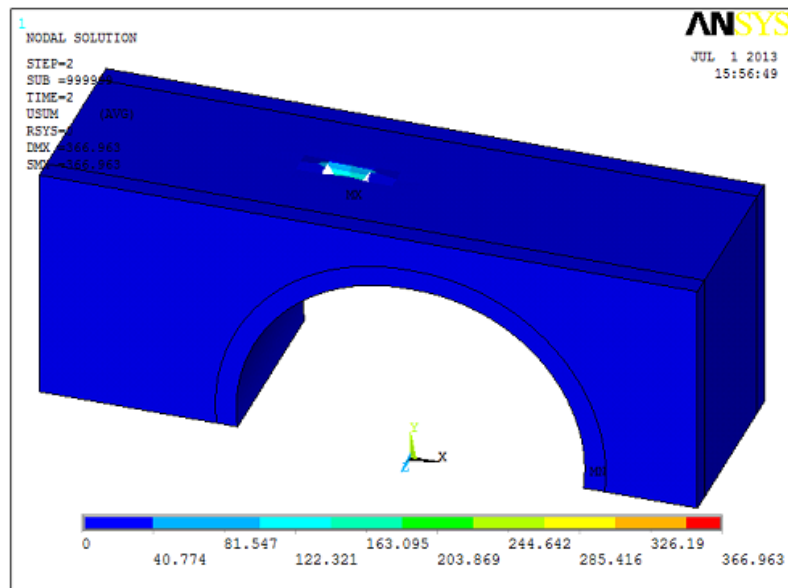
Şekil 4.49. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu



Şekil 4.50. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

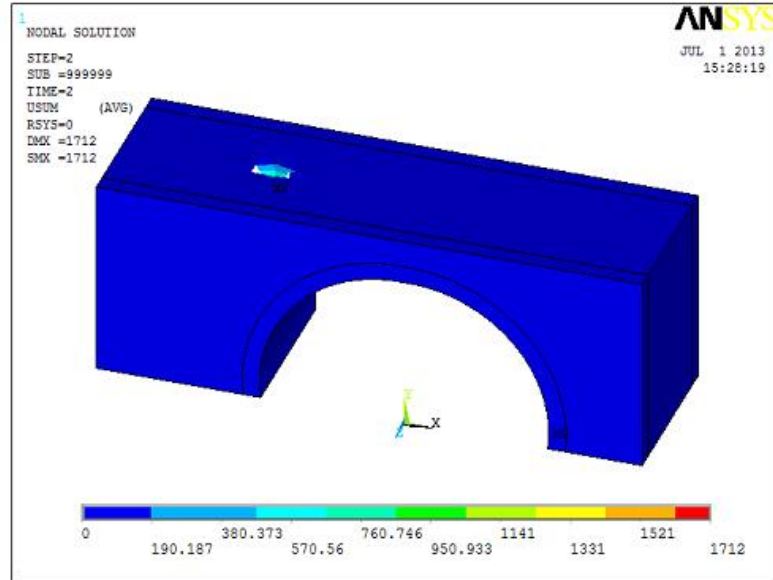


Şekil 4.51. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu

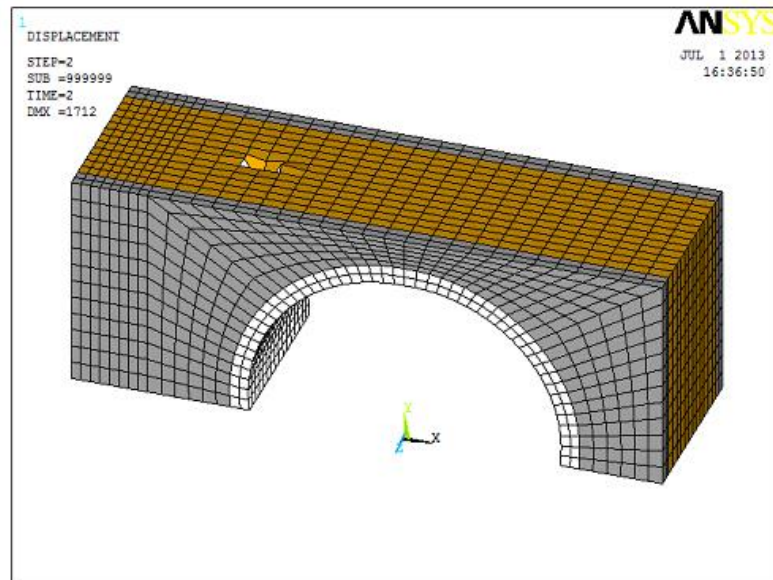


Şekil 4.52. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu

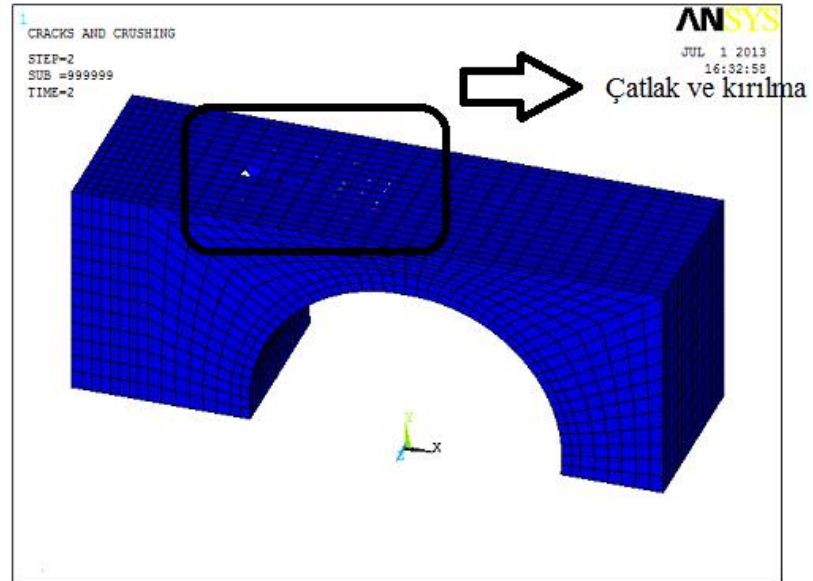
Analiz 11'in toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 41.2 t olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



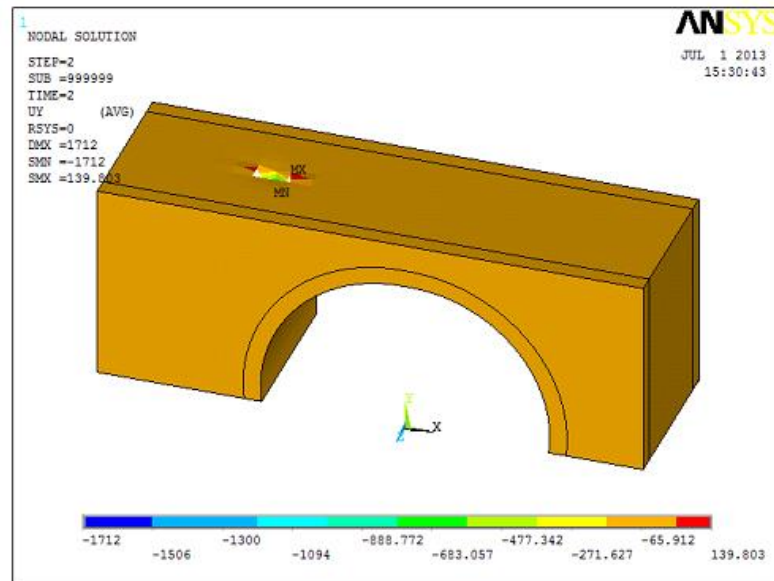
Şekil 4.53. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu



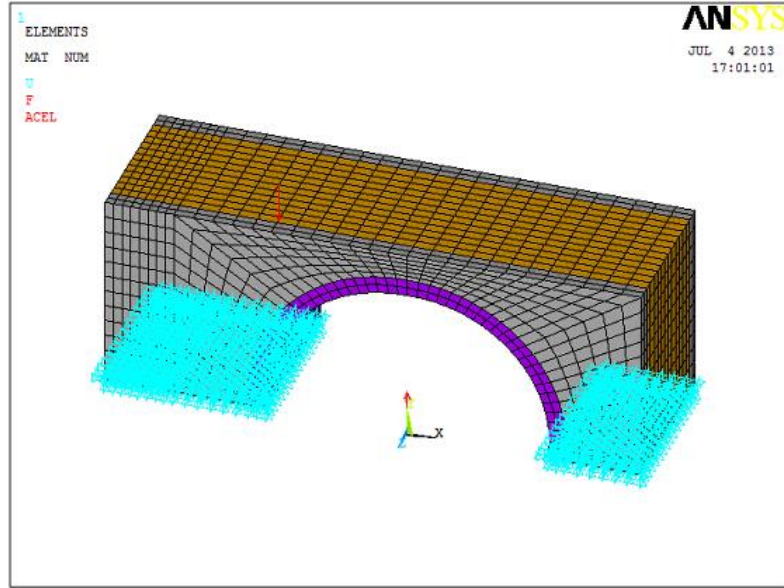
Şekil 4.54. Modelin yüklemeden sonraki deformasyona uğramış durumu



Şekil 4.55. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

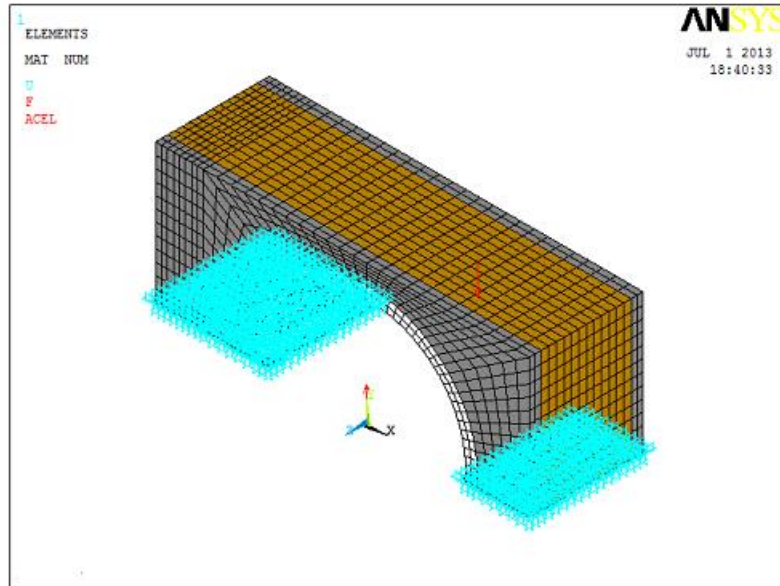


Şekil 4.56. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu

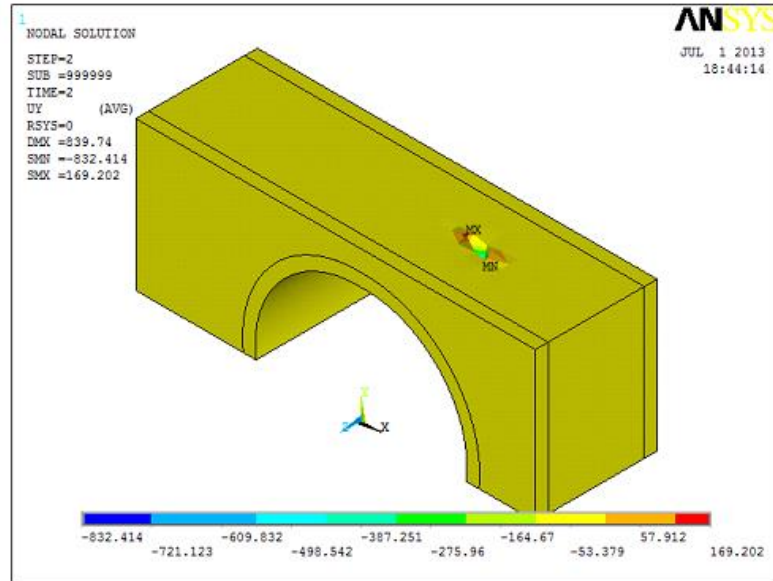


Şekil 4.57. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

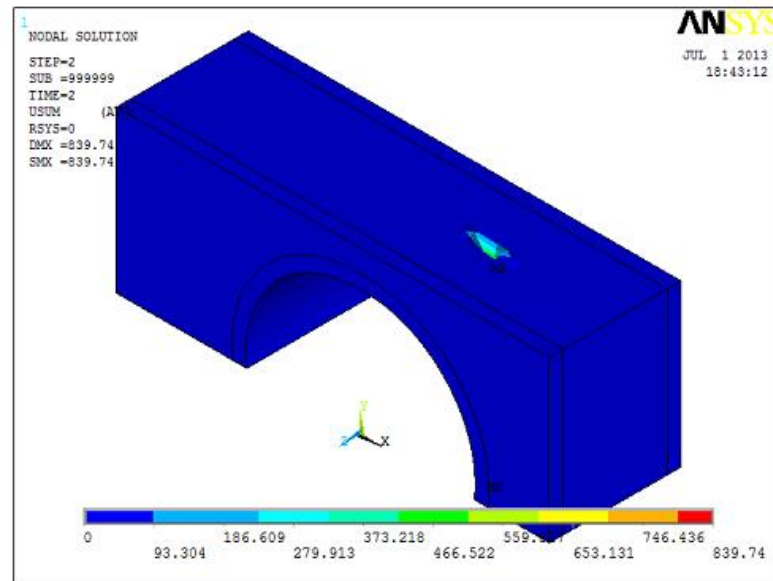
Analiz 12'nin toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 23.2 t olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



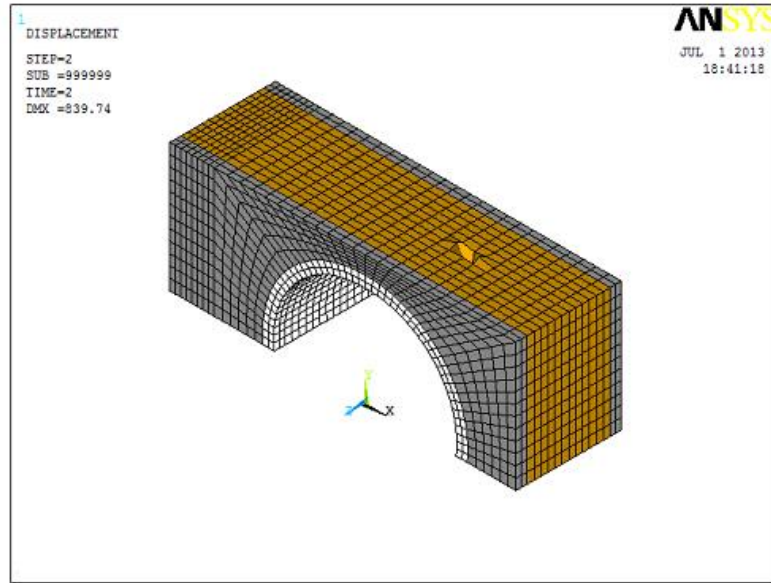
Şekil 4.58. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu



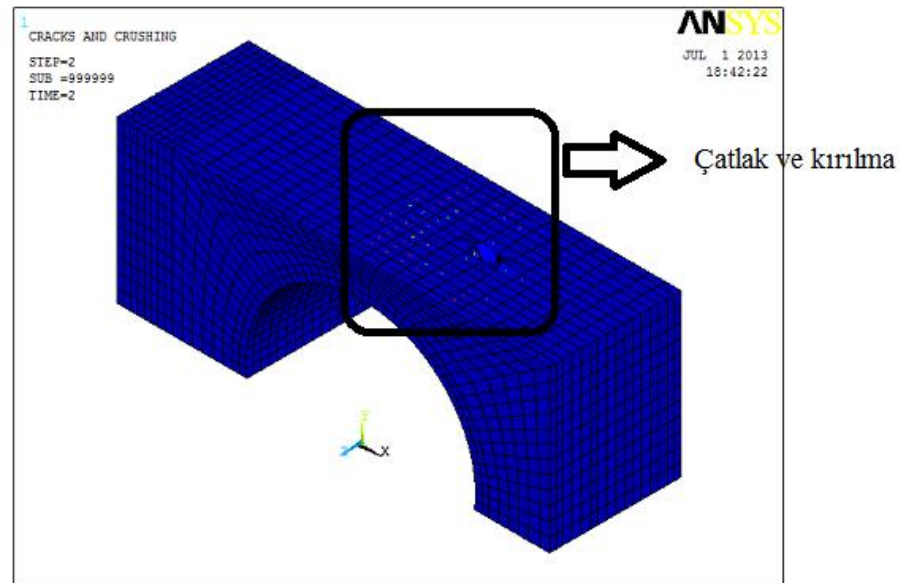
Şekil 4.59. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu



Şekil 4.60. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu

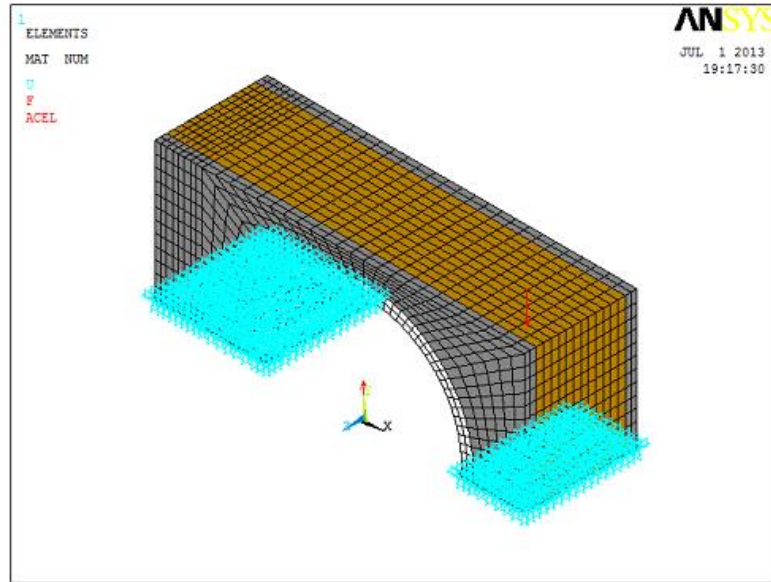


Şekil 5.61. Modelin yüklemeden sonraki deformasyona uğramış durumu

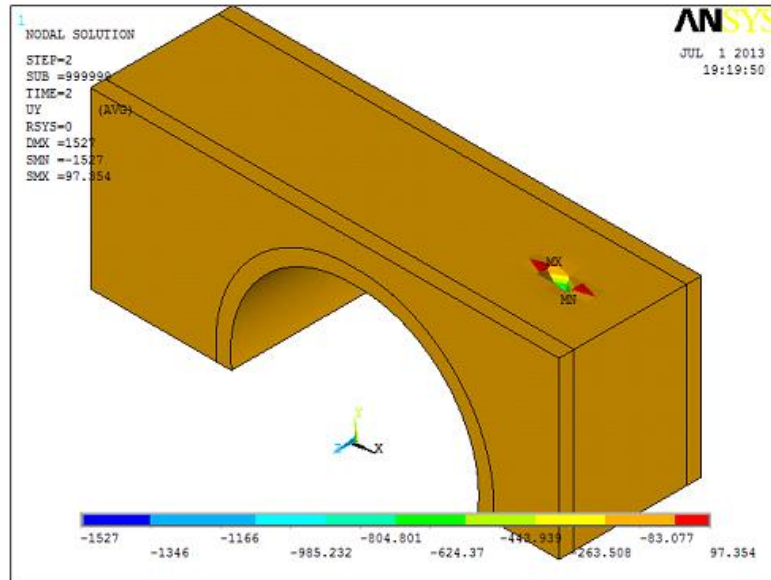


Şekil 4.62. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

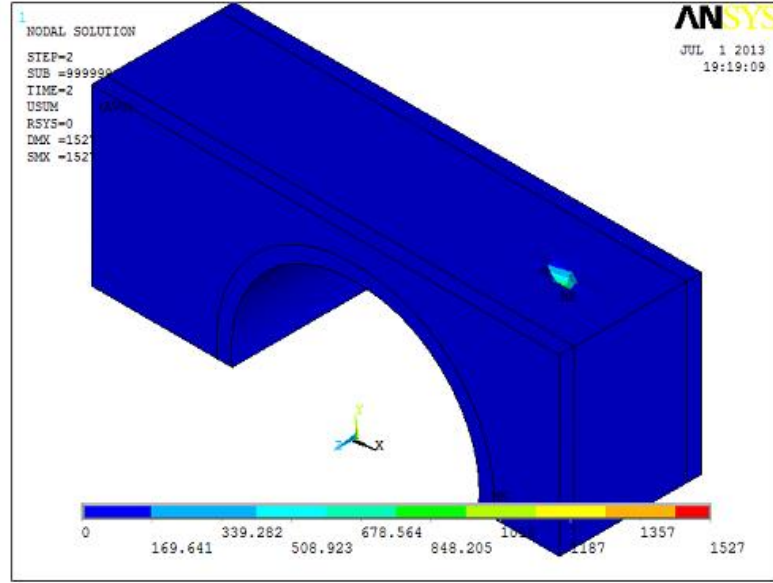
Analiz 13'ün toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 40.01 t olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



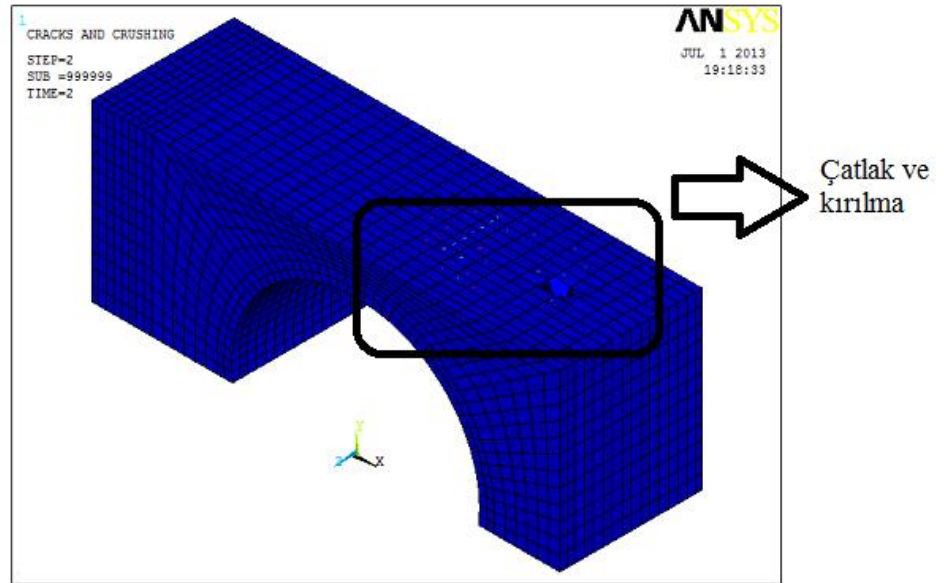
Şekil 4.63. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu



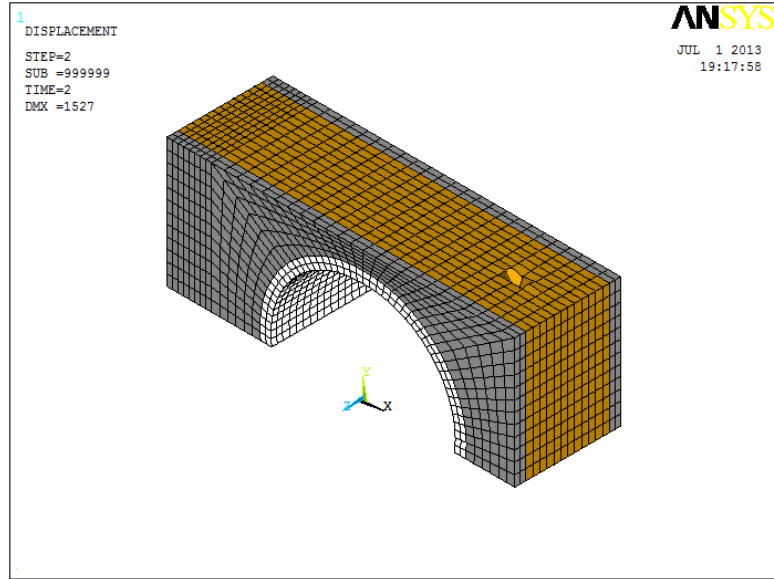
Şekil 4.64. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu



Şekil 4.65. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu

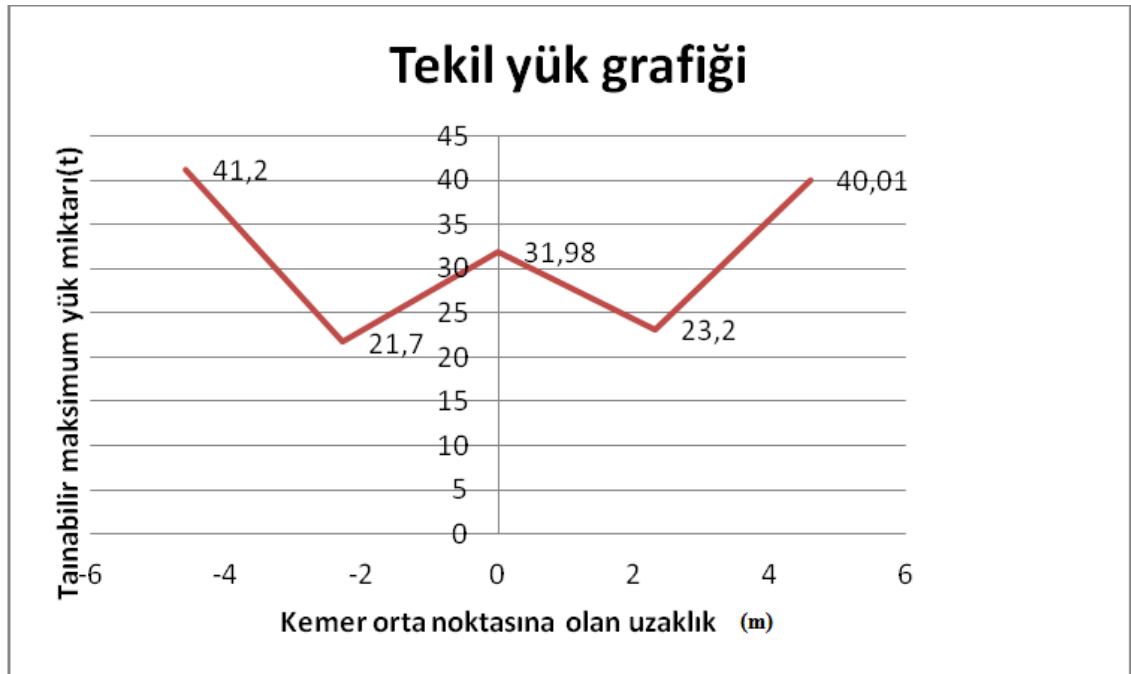


Şekil 4.66. Modelde yüklemenden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu



Şekil 4.67. Modelin yüklemeden sonraki deformasyona uğramış durumu

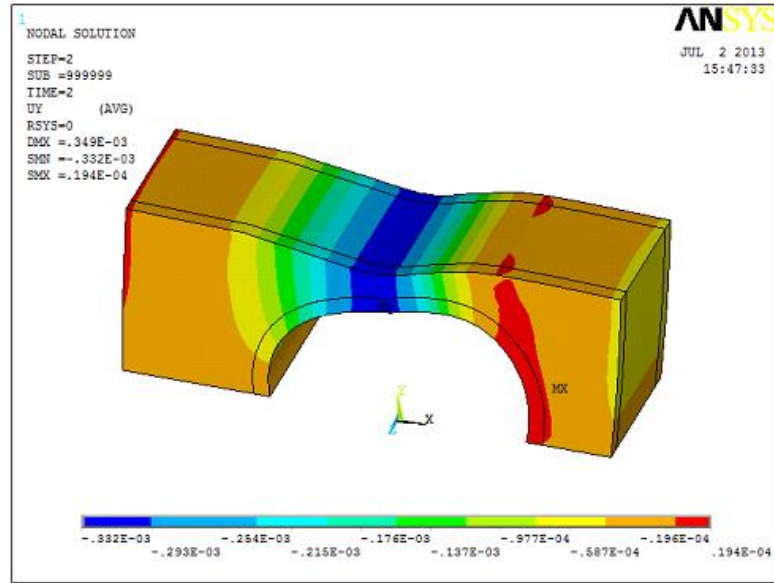
Yapılan tekil yük analizlerinin grafiksel olarak gösterimi aşağıda verildiği gibidir.



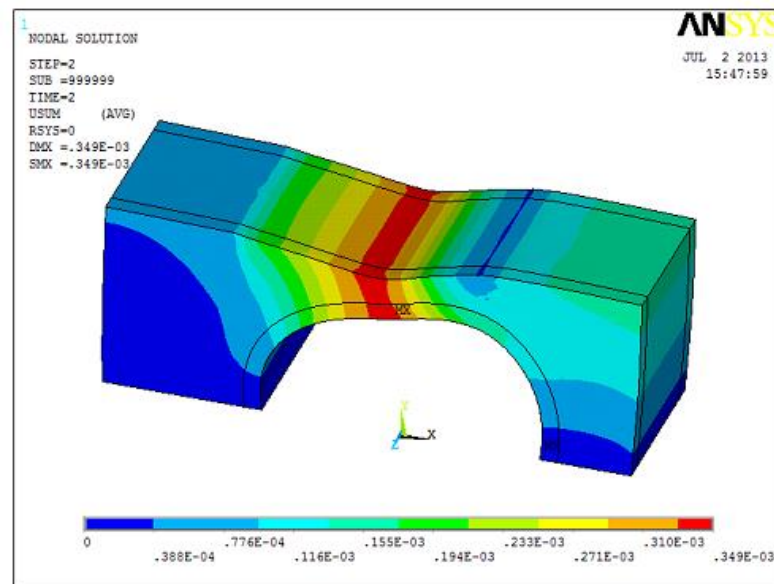
Şekil 4.68. Tekil yük grafiği

Yayılı Yüklemler

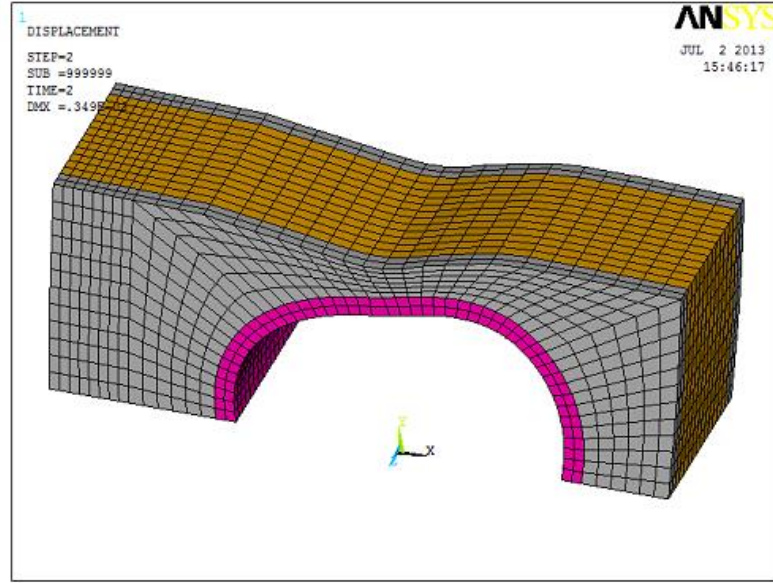
Analiz 14'ün toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 20.25 t/m^2 olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



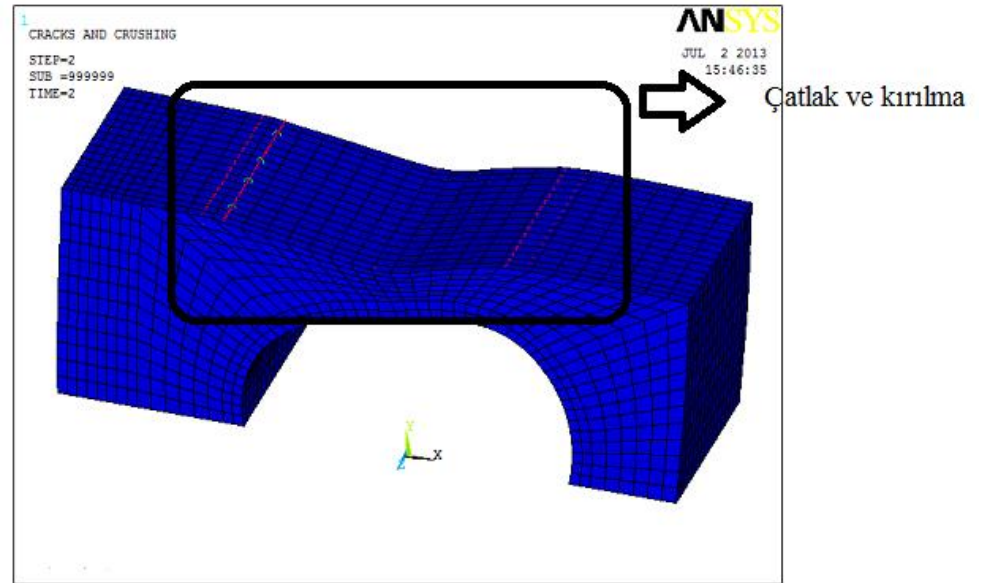
Şekil 4.69. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu



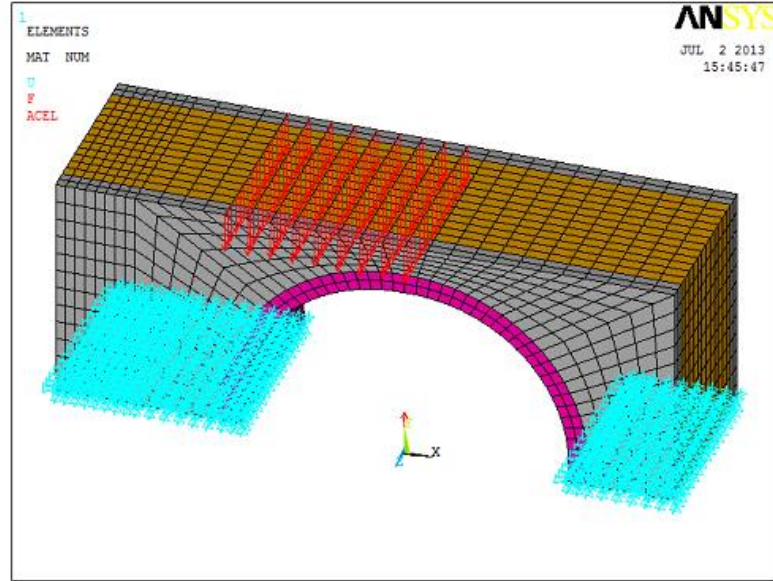
Şekil 4.70. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu



Şekil 4.71. Modelin yüklemeden sonraki deformasyona uğramış durumu

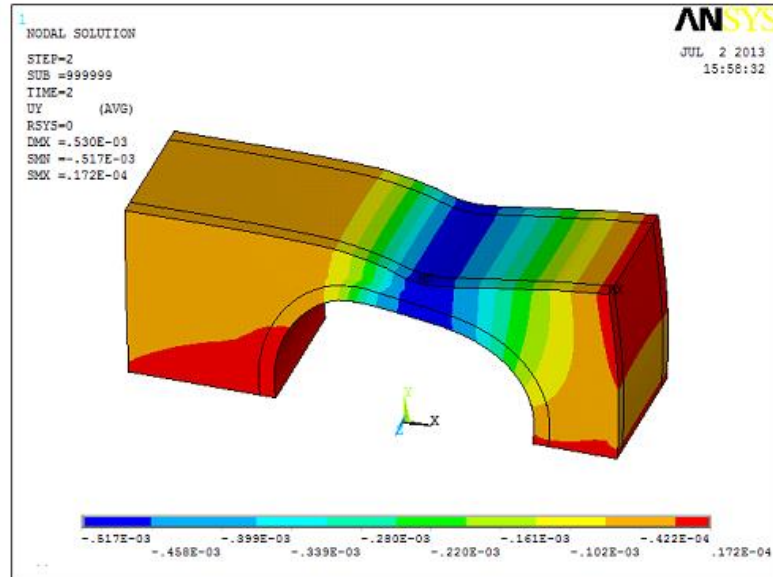


Şekil 4.72. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

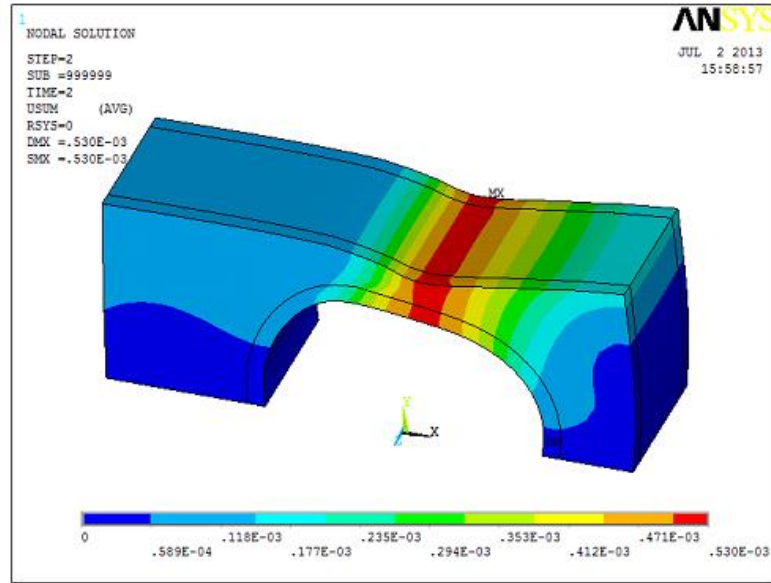


Şekil 4.73. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

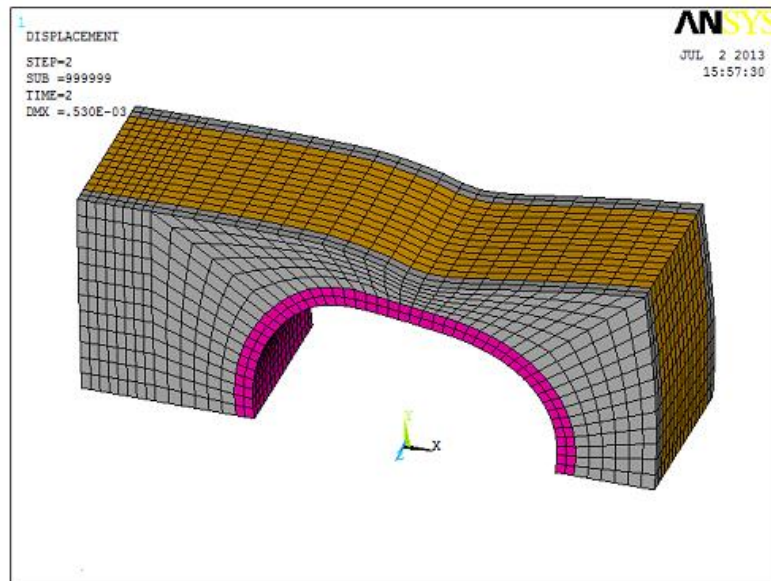
Analiz 15'in toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 36.94 t/m^2 olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



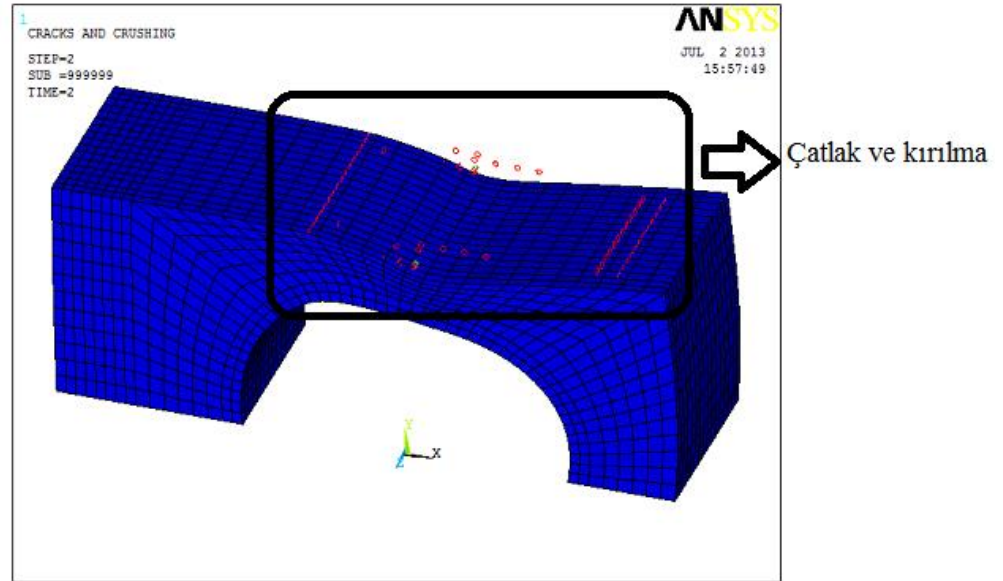
Şekil 4.74. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu



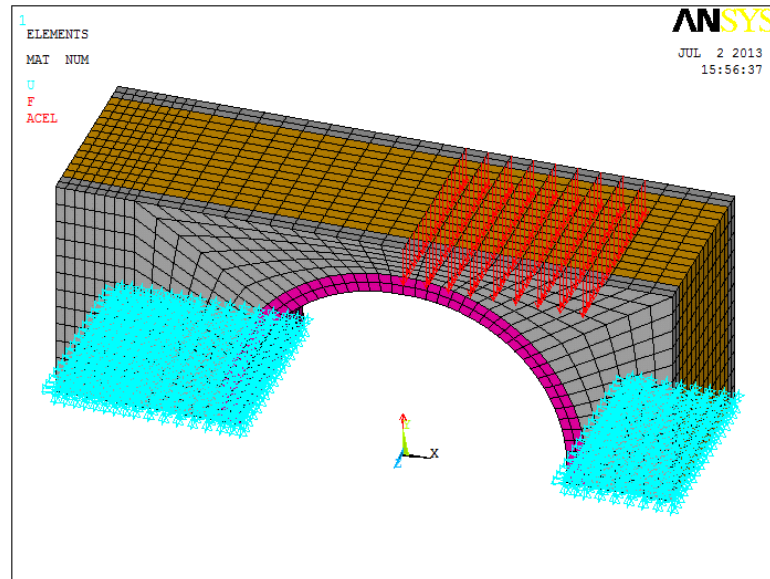
Şekil 4.75. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değıştirme durumu



Şekil 4.76. Modelin yüklemeden sonraki deformasyona uğramış durumu

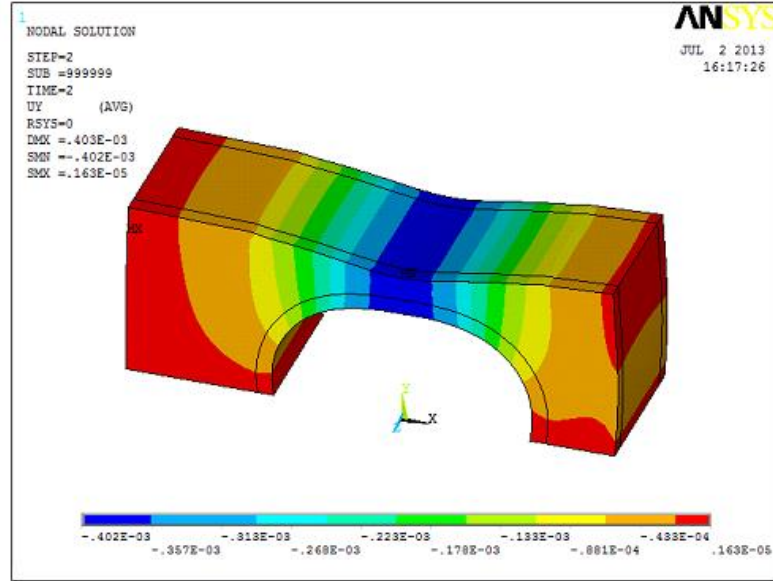


Şekil 4.77. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

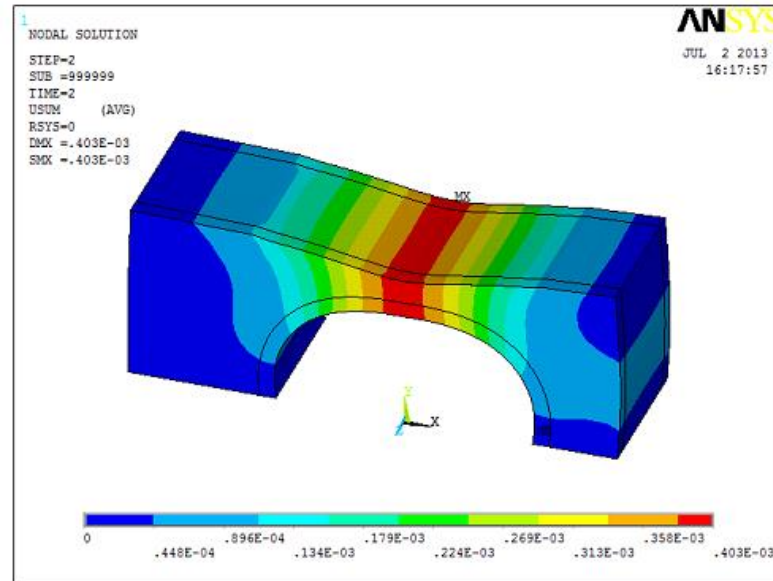


Şekil 4.78. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

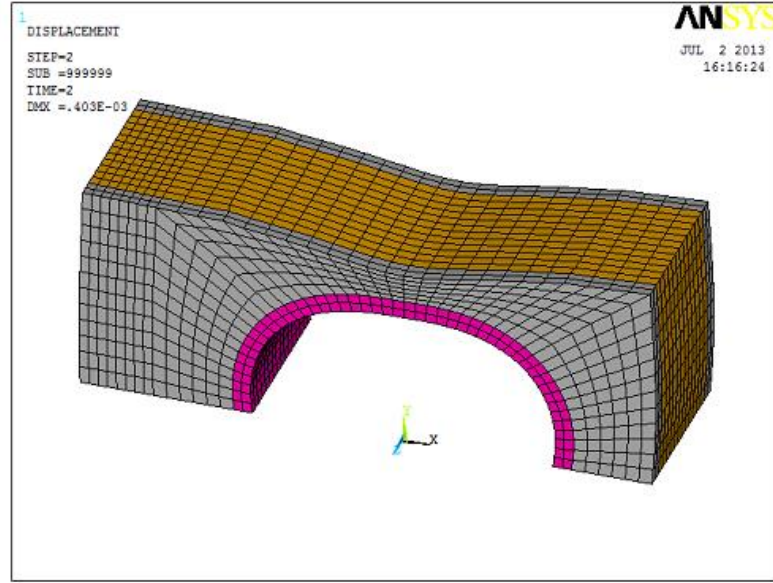
Analiz 16'nın toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 10.4 t/m^2 olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



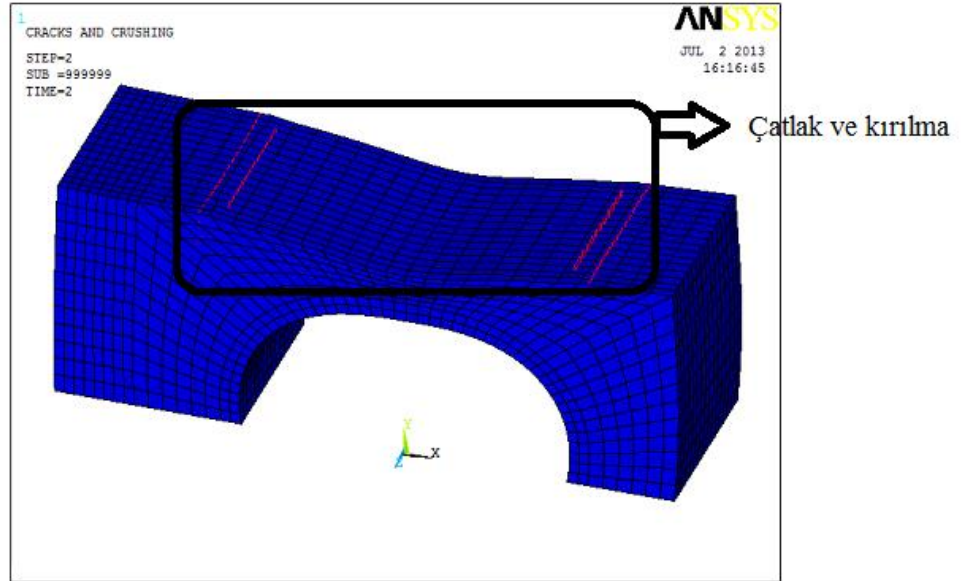
Şekil 4.79. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu



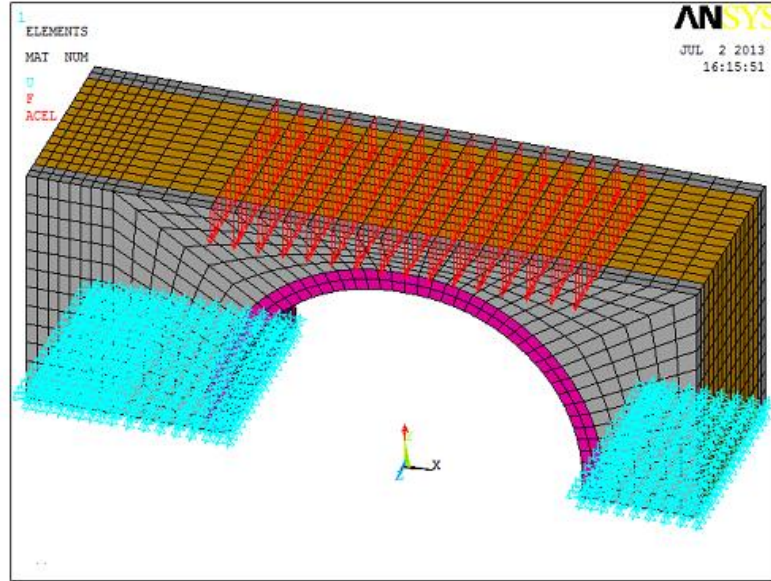
Şekil 4.80. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu



Şekil 4.81. Modelin yüklemeden sonraki deformasyona uğramış durumu

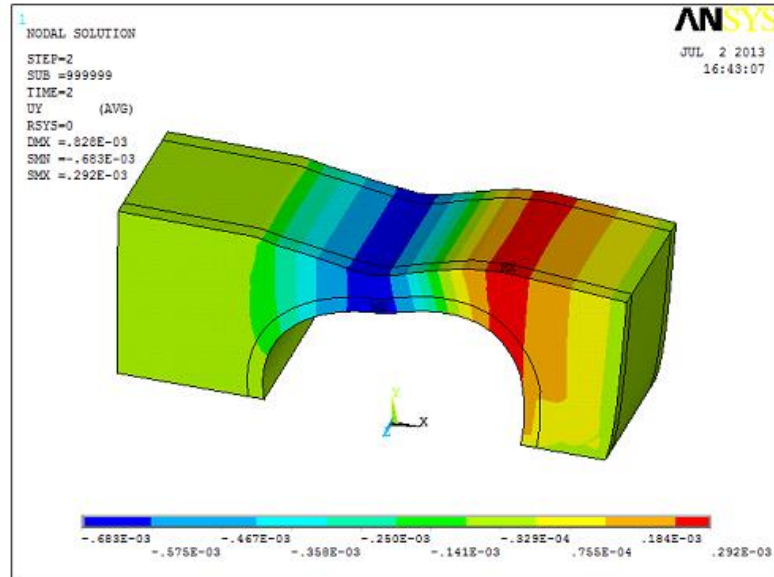


Şekil 4.82. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

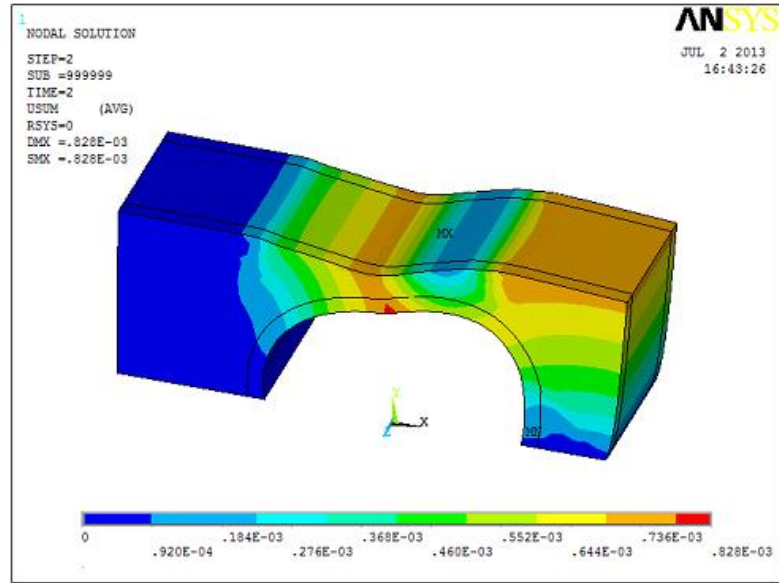


Şekil 4.83. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

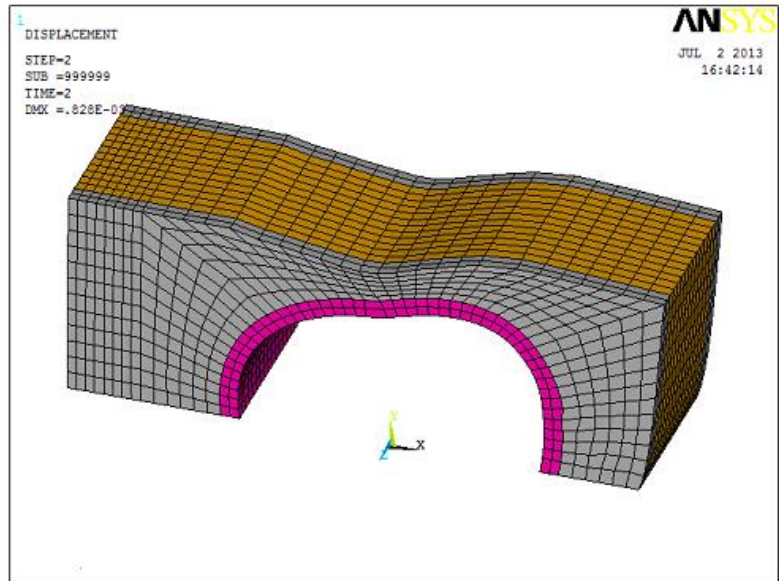
Analiz 17'nin toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 15.57 t/m^2 olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



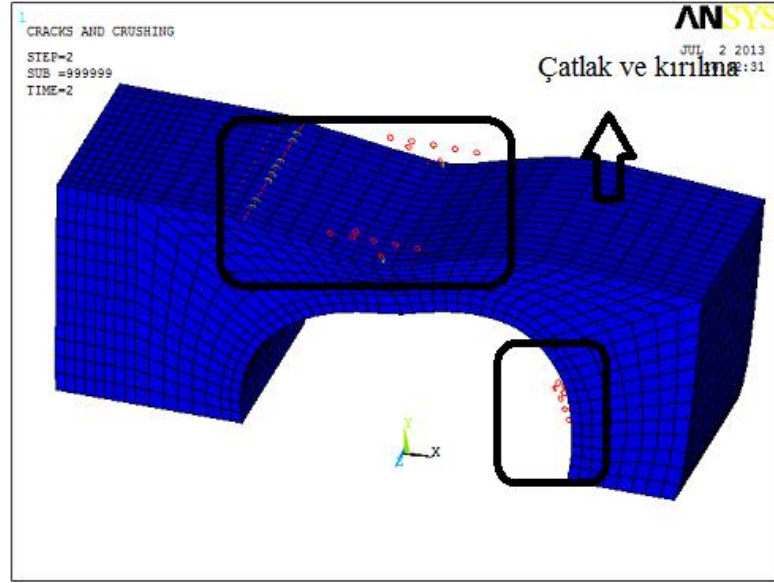
Şekil 4.84. Düğüm noktalarının çözümünde Y bileşeninin yer değiştirmesi durumu



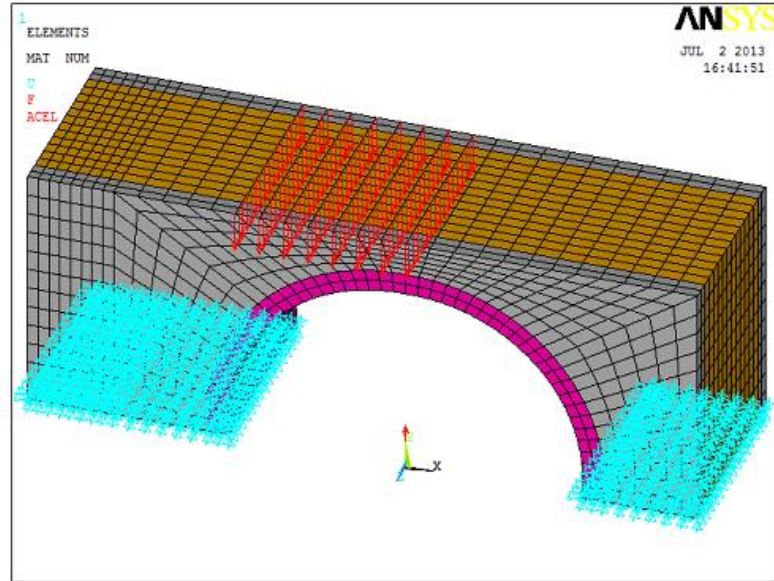
Şekil 4.85. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu



Şekil 4.86. Modelin yüklemenden sonraki deformasyona uğramış durumu

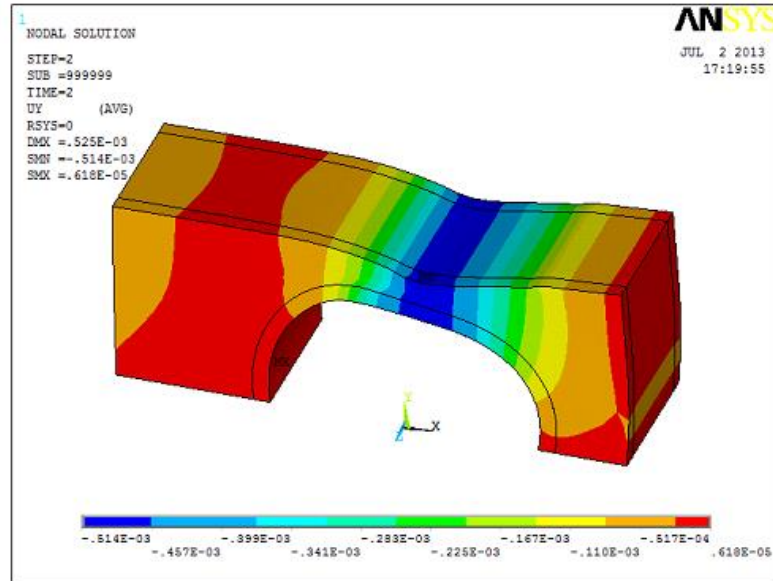


Şekil 4.87. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu

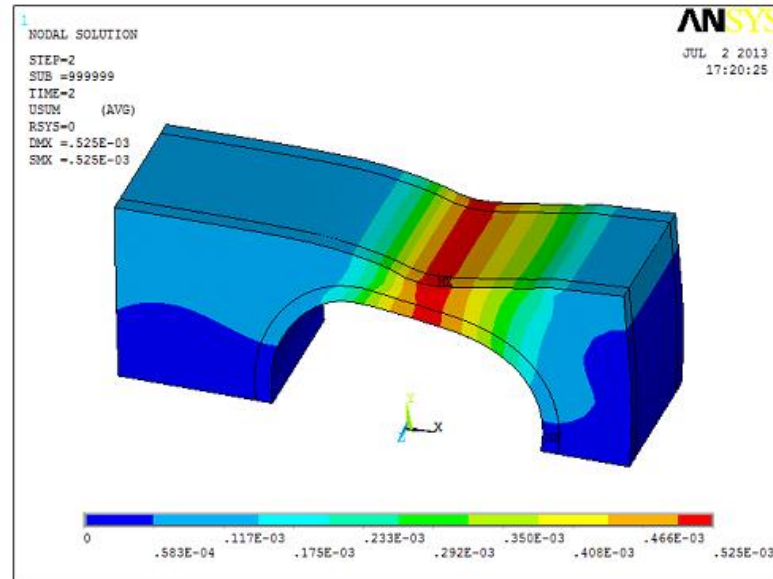


Şekil 4.88. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

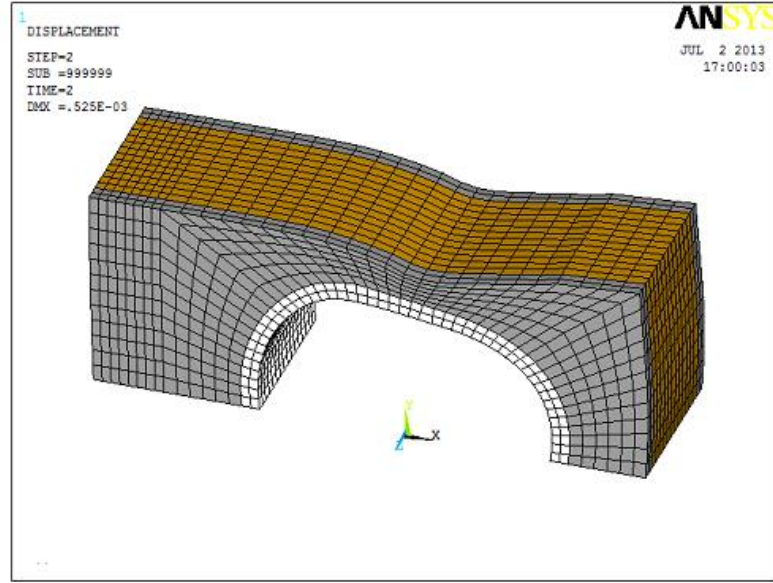
Analiz 18'nin toplam maksimum yük taşıma kapasitesi 22.2 t/m^2 olup analizden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



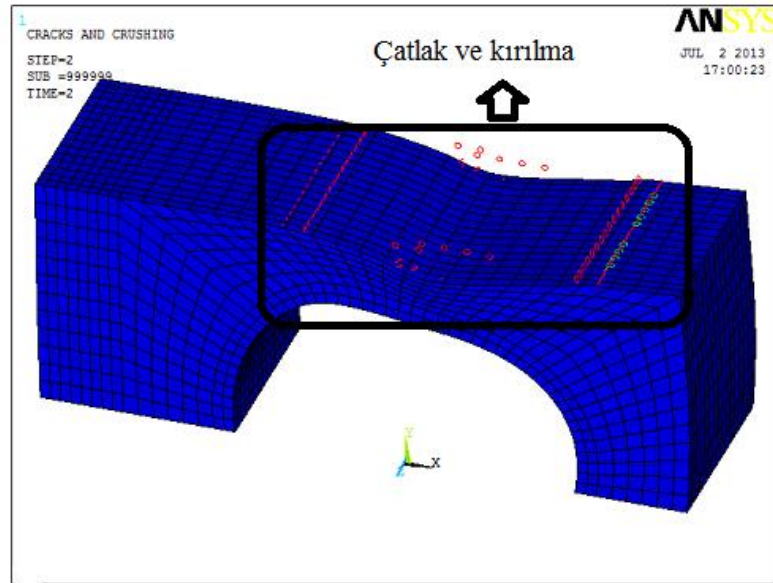
Şekil 4.89. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu



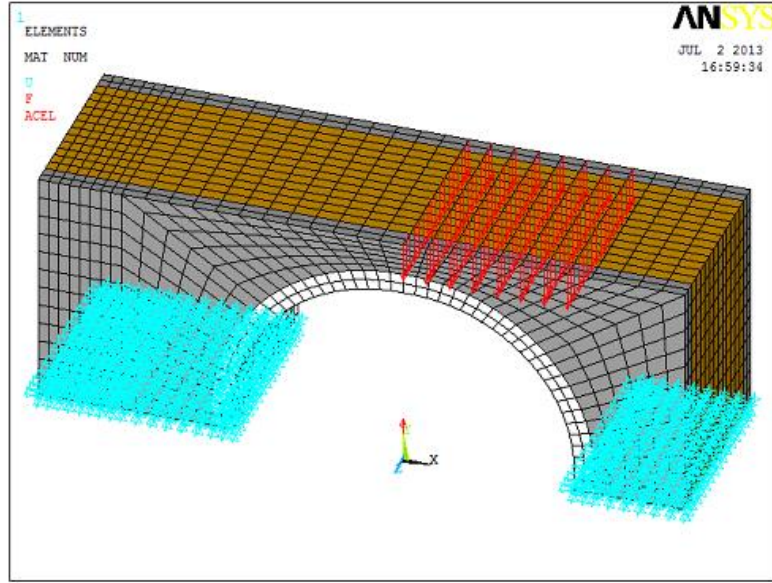
Şekil 4.90. Düğüm noktalarının çözümünde toplam vektörel yer değiştirme durumu



Şekil 4.91. Modelin yüklemeden sonraki deformasyona uğramış durumu

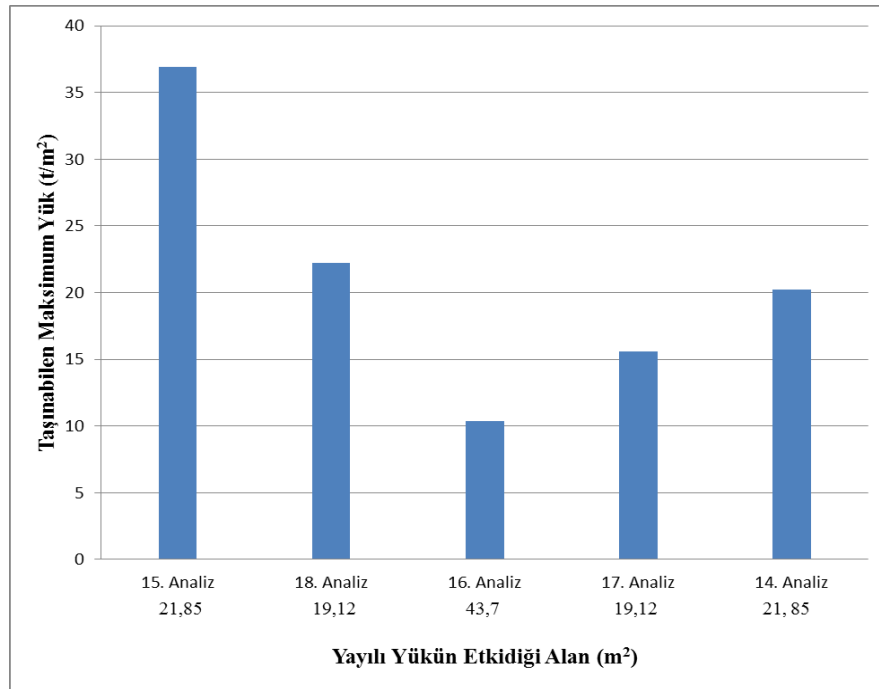


Şekil 4.92. Modelde yüklemeden dolayı oluşan çatlak ve kırılmaların durumu



Şekil 4.93. Modele yükleme ve mesnetleme yapılması durumu

Yapılan yayılı yük analizlerinin grafiksel olarak gösterimi aşağıda verildiği gibidir.



Şekil 4.94. Yayılı yük grafiği

5. SONUÇ

Taş yığma yapı tekniği ile inşa edilmiş tarihi yapıların korunması veya restorasyonu için yapısal davranışının belirlenmesi ve çeşitli yük etkileri altında oluşacak gerilme ve kuvvetlerin hesaplanması amacıyla yapısal analizlerinin doğru bir şekilde yapılması çok önemlidir. Çok karmaşık geometrik özelliklere ve malzeme çeşidine sahip bu tür yapıların matematiksel modelleri için özel yöntemler kullanılmalıdır. Betonarme, çelik ve ahşap yapılar için uygulanan modelleme teknikleri yığma yapılar için geçerli değildir. Bu tür yapıların gerçek davranışını anlayabilmek için doğrusal-elastik olmayan malzeme ve geometrik özelliklerini dikkate alan hesap yöntemleri gereklidir. Ancak, çok karmaşık ve özel bilgisayar programları gerektiren bu hesap yöntemleri için çok dikkatli bir şekilde hazırlanması gereken ayrıntılı matematiksel modellere gereksinim vardır. Yığma yapı tekniği ile inşa edilmiş tarihi yapıların taşıyıcı sistemlerinin davranışını incelemek için, anlaşılması kolay ve çok belirgin bir yük aktarma mekanizmasına sahip olan kemerli taş köprüler en uygun yapı türüdür.

Çalışma kapsamında kemerli yapıların genel durumları ve çeşitli yükler altında oluşabilecek çatlak ve kırılmalar için doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Bu analizlerde, doğrusal olmayan sonlu eleman modelleri ANSYS programı yardımıyla oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Modelde ANSYS programında bulunan Solid65 tipi betonarme elemanı kullanılmıştır. ANSYS analizinin kemer köprü'nün taşıyabileceği maksimum yüke yaklaşıldığında artık çözüme ulaşamadığı ve analizin durduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, maksimum yük noktasından sonraki kemer davranışının incelenmesi mümkün olmamıştır. ANSYS analizinde karşılaşılan benzer yakınsama problemlerine Miller *et al.* değinmişlerdir. Miller *et al.* test sonrası analizleri için ANSYS'ten başka bir program kullanmaya karar vermişlerdir (Miller *et al.* 2001).

Yapılan kemer köprü modeli analizleri dikkate alındığında, bir yığma yapı elemanının sonlu eleman modeli, ANSYS programında Solid65 sonlu elemanı kullanılarak oluşturulduğu zaman bir doğrusal olmayan statik itme (pushover) analizi ile ulaşılacak son nokta, maksimum yükleme noktası veya bu yüklemeden daha önceki

bir nokta olacaktır. Böylece, ANSYS ile yapılacak modellemelerin kendi başına bir deneysel modelin yerini tutması ve maksimum yükleme sonrasındaki davranışın incelenmesinde kullanılmasının mevcut çalışmalar ışığında mümkün olmadığı sonucuna ulaşılabilir. Ayrıca uygulanan farklı türdeki yüklemelerin sonuçlarına göre, kritik noktalar belirlenmiştir.

Kemerin orta noktasından sol tarafa doğru 5.6 metre uzaklıkta 17 düğüm noktasına uygulanan çizgisel yayılı yük 48.97t/m, kemerin orta noktasından 4.6 metre uzaklıkta 17 düğüm noktasına uygulanan çizgisel yayılı yük ise 32.3t/m olarak hesaplanmıştır. Burada çökme yükünde %34'lük bir azalma olmuştur. Kemerin orta noktasından sol tarafa doğru 3.6 metre uzaklıkta 17 düğüm noktasına uygulanan çizgisel yayılı yük 27.5t/m, kemerin orta noktasından sol tarafa doğru 2.3 metre uzaklıkta 17 düğüm noktasına uygulanan çizgisel yayılı yük ise 28.5t/m olarak hesaplanmıştır. Bu iki analiz arasında %15'lik bir artma olmuştur. Ve bu artış kemer orta noktasına kadar devam etmiştir. Burada kemer orta noktasına sol tarafa doğru 0.6 metre uzaklıkta 17 düğüm noktasına 33.1t/m ve kemer orta noktasında ise 41.5t/m değerinde çizgisel yayılı yük uygulanmıştır. Göçme yükünün ilk artmaya başlamasından kemer ortasına kadar olan yük artışına kadar yaklaşık olarak %51'lik artış meydana gelmiştir. Bu göçme yükündeki kemer uzunluğunun $L/4$ 'lük kısmında meydana gelmiştir. Sonrasın da yapılan analizlerde göçme yükünün değerinde tekrardan bir azalma meydana gelmiştir. Kemerin sol tarafına uygulanan yükler ile sağ tarafına uygulanan yükler arasında %4'lük bir fark oluşmuştur. Kemer orta noktasından 0.6 metre ve 1.15 metre uzaklıkta uygulanan çizgisel yayılı yükler ise sırasıyla 34.4t/m ve 28.5t/m olarak hesaplanmıştır. Burada çökme yükünde kemer ortasındaki yüke oranla yaklaşık olarak %33'lük bir azalma meydana gelmiştir.

Kemerin orta noktasından sol tarafa doğru 5.2 metre uzaklığa kadar 153 düğüm noktasına uygulanan düzgün yayılı yük $20.25t/m^2$ iken sol tarafta doğru 4.6 metre uzaklığa kadar 136 düğüm noktasına uygulanan düzgün yayılı yükün değeri $15.57t/m^2$ olarak hesaplanmıştır. Kemerin L' boyunun tamamına kadar olan kısmında 272 düğüm noktasına uygulanan göçme yükü $20.25t/m^2$ olarak hesaplanmıştır. $L/2$ ile L' 'nin

tamamında hesap edilen gelen göçme yükü arasında %43'lük bir fark oluşmuştur. Kemerin orta noktasından 5.2 metre uzaklığa kadar 153 düğüm noktasına uygulanan düzgün yayılı yük 36.94t/m^2 iken 4.6 metre uzaklığa kadar 136 düğüm noktasına uygulanan düzgün yayılı yükün değeri 22.2t/m^2 olarak hesaplanmıştır. $L/2$ ile L 'nin tamamında hesap edilen gelen göçme yükü arasında %10'luk bir fark oluşmuştur. Kemerin sol yarısında hesaplanan göçme yükü ile sağ yarısında hesaplanan göçme yükü değeri arasında da %10'luk bir farkın olduğu ortaya çıkmıştır.

Tekil yükler ise kemerin $L/4$ 'lük, $L/2$ 'lik ve orta kısmına uygulanmıştır. Kemerin orta noktasında hesap edilen göçme yükünün değeri 31.98t olarak hesaplanmıştır. Kemerin orta noktasına sol tarafa doğru 2.3 metre mesafede uygulanan tekil yükün değeri 21.7t olarak hesap edilmiştir. Sol tarafa doğru 4.6 metrede uygulanan tekil yük ise 41.2t olarak hesap edilmiştir. Yukarıdaki analizlerde olduğu gibi $L/2$ 'lik kısımda yükte azalmanın başladığı ve $L/4$ 'lük kısımdan kemer ortasına kadar yükün arttığı görülmektedir. $L/2$ 'lik ve $L/4$ 'lük kısımlardan elde edilen göçme yükleriyle kemer ortasından elde edilen yük arasında sırasıyla %29 ve %47 fark vardır. Kemerin sağ tarafında $L/2$ 'lik kısımda oluşan yükün değeri 40.01t, $L/4$ 'lük kısımda oluşan yükün değerinin ise 23.2t olarak hesap edilmiştir. $L/2$ 'lik ve $L/4$ 'lük kısımlardan elde edilen göçme yükleriyle kemer ortasından elde edilen yük arasında sırasıyla %25 ve %38 fark vardır. Burada da görülüyor ki kemerin sol ve sağ yarısında elde edilen göçme yükleri arasında yaklaşık olarak %5'lik bir fark vardır.

Yapılan tekil ve çizgisel yükler genel olarak incelendiğinde $L/2$ 'lik kısımda oluşan yüklerin kemer orta noktasına doğru azaldığı, $L/4$ 'lük kısmından sonra ise tekrardan artmaya başladığı görülmektedir. Son olarakta kemerin sağına ve soluna eşit uzaklıkta uygulanan yüklerin dolgu ve yan duvarlardan dolayı az da olsa farklı olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Akman, S., 2003. Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 426.
- Anonim, 1992a. Temel Britannica, Ana Yayıncılık, Cilt 15.
- Anonim, 2013b. http://www.orduulubey.gov.tr/sayfa-menu-sarpdere_koprusu-detay-16,109,73,0-1.html (15.04.2013).
- Anonim, 2013c. <http://anibal.gyte.edu.tr> (20.06.2013).
- Anonim, 2013d. http://webdeyim.net/tr/e_kitap/ankara-buyuksehir-belediyesi/tarih-icinde-ankara/1/170 (15.04.2013).
- Anonim, 2013e. <http://www.edirnetarihi.com/edirnenin-tarihi-kopruleri.html> (10.01.2013).
- Anonim, 2013f. <http://www.turizmtrend.com/foto-galeri/adiyaman-cendere-koprusu/403/sayfa-7/> (12.02.2013).
- Anonim, 2013g. <http://wowturkey.com> (01.10.2013).
- Anonim, 2013h. <http://www.forums.clubelele.com/Cevaplar.aspx?BaslikID=42832> (10.03.2013).
- Anonim, 2013ı. <http://ibb.gov.tr/> (03.03.2013).
- Anonymous, 2013a. <http://www.naturalarches.org/big-FairyBridge.htm> (20.05.2013).
- Anonymous, 2013b. http://mostreal.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-65.htm#T4.65-2 (05.05.2013).
- Anonymous, 2013c. <http://www.travlang.com/blog/pont-du-gard-bridge-an-amazing-man-made-aqueduct/> (01.01.2013).
- Anonymous, 2013d. <http://www.past-inc.org/historic-bridges/image-masonryarchconstruction.html> (11.01.2013).
- Anonymous, 2013e. <http://www.naturalarches.org/> (08.02.2013).
- Anonymous, 2013f. <http://tr.wikipedia.org/wiki> (03.03.2013).
- Ansys Kullanım Kılavuzu, 2003.
- Atımtay, Ergin., 1989. Yapı Sistemleri Cilt 1, 210 s, Ankara.
- Aydın, A.C., 2010. Çobandede Köprüsü Analiz Raporu, Erzurum.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T., Sevim, B., 2007, Tarihi Köprülerin Deprem Davranışına Sonlu Eleman Model İyileştirilmesinin Etkisi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim, İstanbul.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T., Sevim, B., 2009. Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman model İyileştirilmesi, İMO Teknik Dergi, 4675-4700.
- Bayülke, N., 1992. Yığma Yapılar, T.C. İmar ve İskân Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü, Ankara.
- Begimgil, M., 1997. Donatısız kemer köprülerin tasarımı, Türkiye İnşaat Mühendisliği 14. Teknik Kongresi, İzmir.
- Boothby, T.E., 1998. Service load response of masonry arch bridges. Journal of Structural Engineering, 124 (1), 17-23.
- Calayır, Y., Karaton, M., 2004, Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanarak Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Teknik Dergi (İMO), 15, 3085-3103.
- Can, H., 2002. Çözümlü Örneklerle Yapı Statiği, Birsan Yayınevi, İstanbul, 2002.

- Croci, G., 1998. The Conservation and Structural Restoration of the Architectural Heritage. Computational Mechanics Publications, 272 p, Southampton, UK.
- Çakıroğlu, A., Çetmeli, E., 1998. Yapı Statiği, Cilt I, Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş., İstanbul.
- Çakmak, A. Ş., Moropoulou, A., Mullen, C. L., 1994. Interdisciplinary Study of Dynamic Behavior and Earthquake Response of Hagia Sophia, Department of Civil Engineering and Operations Research, Princeton University, Princeton, NJ 08540, USA National Technical University of Athens, Greece.
- Çamlıbel, N., 2000. Yapıların Taşıma Gücünün İyileştirilmesi, Birsen Yayın Evi, İstanbul.
- Çıngı, F., 2005. Çelik Kiriş Kolon Birleşimlerinin Sismik Tasarım Parametreleri İçin Bir Yazılım, Türkiye Mühendislik Haberleri, 435-2005/1.
- Çulpan, C., 1975. Türk Taş Köprüleri; Ortaçağdan Osmanlı Devri Sonuna Kadar, Türk Tarih Kurumu Basımevi, Ankara.
- Dabanlı, Ö., 2008. Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Dede, F.T., 2006. Tersinir-Tekrarlanır Yükleme Altındaki Betonarme Çerçevelerin Ansys Programı ile Nonliner Sonlu Elaman Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Ekiz İ., 1995. Yapı Statiği 1, Seç Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Erdik, M., Durukal, E., 1993. Ayasofya'nın Deprem Davranışı, 2. Ulusal Deprem mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Frunzio, G., Monaco, M., Gesualdo, A., 2001. 3D F.E.M. Analysis of a Roman Arch Bridge, Historical Constructions, Guimarães.
- Güler, K., Sağlamer, A., Celep, Z., Pakdamar, F., 2004. STRUCTURAL and EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS of THE LITTLE HAGIA SOFIA MOSQUE, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- Güngör, İ.H., 1967. Kâgir Yapı Cilt 1. Yazarın Kendi Teknik Yayını, 212 s, İstanbul.
- Gürer, C., Akbulut, H., Çetin, S., 2007. Tek açıklıklı kemer sistemli Rize köprülerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Antalya.
- Hasol, D., 1998. Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü, Yem Yayınları, İstanbul.
- Hendry, A.W., 1998. Structural Masonry, MacMillan Publisher.
- Heyman, J., 1999. The Stone Skeleton, Structural Engineering of Masonry Architecture. Cambridge University Press, 160 p, Cambridge, UK.
- Jafarov, O., Köksal, H.O., Doran, B., Karakoç, C., 2012. An Investigation on the Nonlinear Behavior Of Unreinforced Masonry Walls, Journal of Engineering and Natural Sciences, 30, p. 133-143.
- Kanıt, R. ve Işık, N.S., 2007. Tuğla Kemerlerin Deneysel Davranışı ve Bilgisayar Modeli Analizleri, G.Ü. Müh. Mim. Fak. Der., 22 (1), 13-20.
- Korkmaz, K.A., Zabin, P., Çarhaoglu, A.I., Nuhoğlu, A., 2013. Taş Kemer Köprülerin Deprem Davranışlarının Değerlendirilmesi: Timisvat Köprüsü Örneği, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 2 (1), 66-75.
- Kretschmer, F., 2000. Antik Roma'da Mimarlık ve Mühendislik, Arkeoloji ve Sanat Yayınları, İstanbul.
- Kuban, D., 1998. Mimarlık Kavramları, Yapı Endüstri Merkezi Yayınları. İstanbul.

- Lourenço, P.B., 1996. Computational Strategies for Masonry Structures. Ph.D. Thesis, Dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Lourenço, P.B., 1999. Historical Structures: models and Modelling, Proceeding of EPMESC VII: Computational Method in Engineering Science, p. 433-442.
- Mahrebel, H.A., 2006. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İ.T.Ü., İstanbul.
- Miller, C., Hofmayer, C., Wang, Y., Chokshi, N., Murphy, A., Kitada, Y., 2001, Prediction of NUPEC's Multi-Axis Loading Tests of Concrete Shear Walls, Conference Transactions, International Association for Structural Mechanics In Reactor Technology SMIRT 16, Washington DC, August.
- Nuhoğlu, A., 2004. Kablolü sistemlerin Geometrik Nonlineer Statik Hesabı, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 1, 17-38.
- Orhan, S.N., 2010. Tek Açıklıklı Dairesel Kâgir Kemer Köprülerin Göçme Yüklerinin Limit Analiz Yöntemleriyle Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk üniversitesi, Erzurum.
- Özcan, Z., 2004. Tarihi Sangarius (Sakarya) Köprüsü Üzerine Bir Çalışma, Sixth International Congress on Advances in Civil Engineering, Bogazici University, İstanbul.
- Özer, O., 2006. Assessment of Masonry Arch Bridges by Mechanism Method, MS Thesis, Boğaziçi University, İstanbul.
- Özer, S.S., 2006, Geleneksel Yığma Yapılarda Strüktürel Elemanların Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Rafiee, A., Vinches, M., 2013. Mechanical Behaviour of a Stone Masonry Bridge Assessed Using an Implicit Discrete Element Method, Engineering Structures, 48, 739-749.
- Rezaei, R.S., 2010. Beton Kemerlerin Modellenmesi, Yüksek Lisan Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Roth L.M., 2000. Mimarlığın Öyküsü, Kabalcı Yayınevi, İstanbul.
- Sayın, E., Karaton, M., Yön, B., Calayır, Y., 2011. Tarihi Uzunok Köprüsünün Yapı Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, ODTÜ, 11-14 Ekim, Ankara.
- Swift, E.H., 1951. Roman Sources of Chiristian Art. Columbia University Press, New York.
- Şen, B., 2006. Modeling and Anlysis of the Historical Masonry Structures, M.S. Thesis, Boğaziçi University, İstanbul.
- Teomete, E., Aktaş, E., 2004. Structural Assessment of a Historical Masonry Structure: Urla Kamanlı Mosque, Sixth International Congress on Advances in Civil Engineering, Bogazici University, İstanbul.
- Thavalingam, A., Bicanic, N., Robinson, J.I., Ponniah, D.A., 2001. *Computers and Structures* vol. 79 issue 19 July, p. 1821-1830.
- Timur, T., 2001. Edirnekapi Mihrimah Sultan Camii Taşıyıcı Sistem Davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ İnş. Müh. Bölümü, İstanbul.
- Toker, S., Ünay, A.İ., 2004. Mathematical modelling and finite element analysis of masonry arch bridges. G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 17 (2), 129-139.

- Topçu, İ.B., Canbaz, M., Karanfil, H., 2005. Horasan Harç ve Betonunun Özellikleri, Yapı Mekanik Semineri-2005, Orta Doğu Teknik Üniversitesi-Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Uçar, T., Şakar, G., 2011. Kemerlerin Statik Analizi için Basitleştirilmiş Bir Yaklaşım, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24.
- Uluengin F., Uluengin B., Uluengin M.B., 2007. Osmanlı Anıt Mimarisinde Klasik Yapı Detayları, YEM Yayınları, İstanbul.
- Ural, A., 2005. Tarihi kemer köprülerin sonlu elemanlar metoduyla analizi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli.
- Ural, A., 2009. Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, KTÜ, Trabzon.
- Ural, A., Oruç, Ş., Doğangün, A., Tuluk, Ö.İ., 2007. Turkish historical arch bridges and their deteriorations and failures, Engineering Failure Analysis, 15 (2008), 43-53.
- Usta, G.K., Usta, A., Tuluk, Ö.İ., 2001. Anadolu Türk Mimarlığı için Görsel Sözlük, Sonbahar Matbaacılık, Trabzon.
- Ünay, A.i., 2002. Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ Mimarlık Fakültesi Basım İşbirliği, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum’da tamamladı. Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2009-2010 öğretim yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

2010 yılından bu yana Ardahan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.