

BETONARME KÖPRÜ MODELLENMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Faraz SAFAEİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2010

ANKARA

TEZ BİLDİRİMİ

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

Faraz SAFAEI

BETONARME KÖPRÜ MODELLENMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA
(Yüksek Lisans Tezi)

Faraz SAFAEİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2010

ÖZET

Bu çalışmada 22.50, 32.50 ve 37.50 metre açıklıklı I tip prekast kirişli betonarme köprüsünün, AASHTO 2002 şartnamesine uygun olarak bilgisayar destekli analiz ve ön tasarımı yapılmıştır. Analiz ve tasarım sürecinde köprü ayak temelleri, üst yapıya etkilerinin ihmal edilebilmesi için ankastre mesnet kabul edilmiştir. Tüm modellerde, ayak ve kiriş arasında aynı tip elastomer mesnet kullanılıp, bu elemanların deprem yükü etkisi altında düşey, yatay, burulma ve dönme rijitlikleri hesaplanmıştır. En kritik yükleme durumunu bulmak için farklı kombinasyonlar kullanılıp en olumsuz yükleme kombinasyonu seçilmiştir.

Üç model için kenar ayak ve orta ayak modelleri yapıldıktan sonra farklı açıklıklardan gelen yüklerin kenar ayak ve orta ayak üzerinde olan etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Her üç model için sismik analiz yapılarak yatay ve düşey deformasyonlar vb. değerler hesaplanıp, kıyaslamalar yapılmıştır.

Bilim Kodu : 911.1.144
Anahtar Kelimeler : betonarme köprü, modelleme, sismik analiz, orta ayak, kenar ayak
Sayfa Adedi : 84
Tez Yöneticisi : Yrd.Doç.Dr.Meral BEGİMGİL

MODELLING STUDY ON REINFORCED CONCRETE BRIDGES

(M.Sc. Thesis)

Faraz SAFAEI

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

May 2010

ABSTRACT

In this study, computer-assisted analysis and preliminary design of 22.50, 32.50 and 37.50 m span reinforced concrete bridge with precast I-beams, according to AASHTO 2002 specifications are performed. During the analysis and design process, in order to neglect the effects of foundations to the upper structure, bridge pier bases are assumed as fixed supports. In all models, same type of elastomeric supports are used between the piers and the beams, and vertical, horizontal, torsion and rotational rigidity of these elements are calculated under the influence of earthquake loading. In order to find the most critical loading condition, the different combinations used and load combination with the most adverse effect is chosen.

After preparing models of end and middle piers for three bridge models, effects of loads from different spans on these models are examined in detail. For all three models, performing seismic analysis, the horizontal and vertical deformations etc. are calculated and compared.

Science Code : 911.1.144

Key Words : Concrete Bridge, Modelling, Seismic Analysis, Bridge Pier

Page Number : 84

Adviser : Yrd.Doç.Dr.Meral BEĞİMGİL

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, disiplinli çalışmanın önemini bana gösteren değerli danışmanım Sayın Yard. Doç. Dr. Meral BEĞİMGİL'e, çalışmamın her noktasındaki yardımları için teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Her zaman yanımda olan sevgili eşime ve bu zamana kadar emekleri olan aileme çok teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince bana yardımlarını eksik etmeyen SELİM ITEZ MUHENDİSLİK ve çalışma boyuca her zaman yardımcım olan değerli arkadaşım Mehmet DALKILIÇ'a teşekkür etmek isterim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. SONLU ELEMENLAR METODU.....	6
2.1. Sonlu Elemanlarla Modelleme.....	7
2.1.1. Eleman seçimi.....	9
2.1.2. 3D giriş elemanı.....	10
2.1.3. Çifte lineer dörtgen eleman.....	10
2.1.4. Kabuk elemanlar.....	11
2.1.5. Dört nodlu ve dört kenarlı elastik kabuk eleman.....	12
2.2. Yüklere.....	13
2.3. Sınır Koşulları.....	13
2.4. Ayırıklaştırma ve Dikkat Edilmesi Gerekli Hususlar.....	15
2.5. Statik Analiz.....	17
2.5.1. Rijitlik matrisinin oluşumu.....	17

2.6. Modelleme.....	18
3. ANALİZ VE TASARIM.....	20
3.1. Tasarım Parametreleri.....	20
3.1.1. Malzeme.....	20
3.2. Köprü Üst Yapısı.....	22
3.3. Köprü Modellerin Minimum Mesnet Uzunluk Tahkiki.....	22
3.4. Yük Analizi.....	24
3.4.1. Zati yükler.....	24
3.4.2. Hareketli yükler.....	25
3.4.3. Kamyon yükü hesabı.....	27
3.4.4. Şerit yükü hesabı.....	28
3.4.5. Yaya yükü.....	29
3.4.6. Fren kuvvetleri.....	29
3.4.7. Rötire, sünme, sıcaklık değişikliklerinden meydana gelen kuvvetler..	29
3.4.8. Köprü boş ve dolu halinde rüzgar yükleri.....	30
3.5. AASHTO Ya Göre Deprem Yükleri Hesaplama Akışı.....	32
3.5.1. İvme katsayısı.....	32
3.5.2. Önem sınıflandırması.....	33
3.5.3. Deprem performansı kategorisi.....	33
3.5.4. Zemin etkisi.....	34
3.5.5. Yerel zemin katsayısı.....	34
3.5.6. Elastik deprem davranış katsayısı.....	35
3.5.7. Deprem yükü azaltma katsayıları.....	37
3.6. Hesap Esasları.....	38
3.6.1. Çözüm yönteminin seçilmesi.....	38

3.6.2. Çok modlu spektrum çözüm yöntemi.....	39
3.7. Deprem Yük Hesabi.....	40
3.7.1 Spektrum eğrisi.....	40
3.8. Elastomer Mesnetler.....	42
3.8.1 Elastomer mesnet özellikleri.....	43
3.9. Yükleme Kombinasyonları.....	45
3.9.1. Orta ayak yükleme kombinasyonları.....	46
3.9.2. Kenar ayak yükleme kombinasyonları.....	47
4. MODELLEMELER.....	49
4.1. Model 1.....	49
4.1.1. Model 1 yükleme görünümleri.....	51
4.2. Model 2	58
4.2.1. Model 2 yükleme görünümleri.....	58
4.3. Model 3.....	65
4.3.1. Model 3 yükleme görünümleri.....	66
4.4. Sismik Deformasyonu.....	73
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	78
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	84

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir sonlu eleman modelinde nod noktaları ve elemanlar.....	7
Şekil 2.2. Eleman geometrisinde müsaade edilebilir defonmasyonlar.....	8
Şekil 2.3. Bir silindirik yüzey etrafındaki tipik eleman dağılımı.....	9
Şekil 2.4. Bir delikli geometride delik etrafındaki tipik eleman dağılımı.....	9
Şekil 2.5. Dört nodlu çifte lineer dörtgen eleman.....	11
Şekil 2.6. Dört nodlu ve dört kenarlı elastik eleman	12
Şekil 2.7. İki ucu basit mesnetli kiriş.....	14
Şekil 3.1. Orta ayak başlık kiriş kesit ve boyutlar.....	21
Şekil 3.2. Kenar ayak kesit ve boyutlar.....	21
Şekil 3.3. 28 adet I kiriş ve boyutlar.....	21
Şekil 3.4. Köprü üst yapı elemanlar yerleşim görüntüleri.....	22
Şekil 3.5. Köprü boy kesiti.....	23
Şekil 3.6. Standart HS kamyon yükü yerleşim.....	27
Şekil 3.7. Şerit yükü	28
Şekil 3.8. DBYBHY ve AASHTO spektrumları ($A=0.4/Z$ emin Profili I).....	36
Şekil 3.9. DBYBHY ve AASHTO spektrumları ($A=0.4/Z$ emin Profili III).....	36
Şekil 3.10. Deprem spectrum grafiği.....	41
Şekil 3.11. ($T_m - a$) Grafiği.....	41
Şekil 3.12. Modellerde kullanılan elastomer mesnet.....	42
Şekil 3.13. Modellerde kenarayak styapı ile altyapı arasındaki bağlantı.....	43
Şekil 3.14. Modellerde orta ayak styapı ile altyapı arasındaki bağlantı.....	43

Şekil 4.1. Model Sap2000’de açıklık ve yükseklik gösterisi.....	49
Şekil 4.2. Model 1 perspektif görünümü.....	50
Şekil 4.3. Model 1 eleman numaraları görüntüsü.....	50
Şekil 4.4 Model 1 kenar ayak hareketli yük yükleme.....	51
Şekil 4.5. Model 1 orta ayak hareketli yük yükleme.....	51
Şekil 4.6. Model 1 kenar ayak ölü yük görüntüsü.....	52
Şekil 4.7. Model 1 orta ayak ölü yük görüntüsü.....	52
Şekil 4.8. Model 1 kenar ayak deprem yükü X- yönünde.....	53
Şekil 4.9. Model 1 orta ayak deprem yükü X- yönünde.....	53
Şekil 4.10. Model 1 kenar ayak deprem yükü Y- yönünde.....	54
Şekil 4.11. Model 1 orta ayak deprem yükü Y- yönünde.....	54
Şekil 4.12. Model 1 kenar ayak fren yükü.....	55
Şekil 4.13. Model 1 orta ayak fren yükü.....	55
Şekil 4.14. Model 1 kenar ayak RST yükü.....	56
Şekil 4.15. Model 1 orta ayak RST yükü.....	56
Şekil 4.16. Model 1,2 ve 3, modelin eleman numaraları görüntüsü.....	57
Şekil 4.17. Model 1 kenar ayak maksimum yük (envelop).....	57
Şekil 4.18. Model 2 perspektif görünümü.....	58
Şekil 4.19. Model 2 kenar ayak hareketli yük yükleme.....	58
Şekil 4.20. Model 2 orta ayak hareketli yük yükleme.....	59
Şekil 4.21. Model 2 kenar ayak ölü yük görüntüsü.....	59
Şekil 4.22. Model 2 orta ayak ölü yük örüntüsü.....	60
Şekil 4.23. Model 2 kenar ayak deprem yükü X- yönünde.....	60
Şekil 4.24. Model 2 orta ayak deprem yükü X- yönünde.....	61

Şekil 4.25. Model 2 kenar ayak deprem yükü Y- yönünde.....	61
Şekil 4.26. Model 2 orta ayak deprem yükü Y- yönünde.....	62
Şekil 4.27. Model 2 kenar ayak fren yükü.....	62
Şekil 4.28. Model 2 orta ayak fren yükü.....	63
Şekil 4.29. Model 2 kenar ayak RST yükü.....	63
Şekil 4.30. Model 2 orta ayak RST yükü.....	64
Şekil 4.31. Model 2 kenar ayak maksimum yük (envelop).....	64
Şekil 4.32. Model 2 orta ayak normal kuvvet (envelop).....	65
Şekil 4.33. Model 3 perspektif görünümü.....	65
Şekil 4.34. Model 3 kenar ayak hareketli yük yükleme.....	66
Şekil 4.35. Model 3 orta ayak hareketli yük yükleme.....	66
Şekil 4.36. Model 3 kenar ayak ölü yük görüntü.....	67
Şekil 4.37. Model 3 orta ayak ölü yük görüntü.....	67
Şekil 4.38. Model 3 kenar ayak deprem yükü X- yönünde.....	68
Şekil 4.39. Model 3 orta ayak deprem yükü X- yönünde.....	68
Şekil 4.40. Model 3 kenar ayak deprem yükü Y- yönünde.....	69
Şekil 4.41. Model 3 orta ayak deprem yükü Y- yönünde.....	69
Şekil 4.42. Model 3 kenar ayak fren yükü.....	70
Şekil 4.43. Model 3 orta ayak fren yükü.....	70
Şekil 4.44. Model 3 kenar ayak RST yükü.....	71
Şekil 4.45. Model 3 orta ayak RST yükü.....	71
Şekil 4.46. Model 3 kenar ayak maksimum yük (envelop).....	72
Şekil 4.47. Model 3 kenar ayak maksimum gerilme.....	72
Şekil 4.48. Model 1 de farklı modların, modele etkisi.....	74

Şekil 4.49. Model 1 Z- yönü deprem etkisi, moment diagram.....	75
Şekil 4.50. Model 1 Y- yönünde elastomer deprem deformasyon.....	75
Şekil 4.51. Model 2 X-yönü deprem etkisi, aksenal kuvvet diagram.....	76
Şekil 4.52. Model 2 mod 23 (period 0.01348) meydana gelen deformasyon....	76
Şekil 4.53. Model 3 mod 20 (period 0.03558) meydana gelen deformasyon....	77
Şekil 4.54. Model 3, kombinasyon 7 den dolayı moment diagram.....	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Bir elastomer mesnetin yüzey alanı
A(a)	İvme kat sayısı
A, B, C, D	Deprem performans kategorileri
a	Elastomer mesnet genişliği
b	Elastomer mesnet boyu
C_{sm}	Elastik deprem davranış katsayısı
D	Sönüm katsayısı
D	Bilinmeyen nodlardaki alan büyüklük
DPK	Deprem performansı kategorisi
E	Elastisite modülüne
E_c	Sıkışma elastisite modülü
f_{ck}	Beton Basınç Mukavemeti
F_y	RST değişiklerinden meydana gelen yük
f_{yk}	Karakteristik akma mukavemeti
G	Kayma modülü
G	Elastomer kayma modülü
g	Yerçekimi ivmesi
h	Elastomer mesnet yüksekliği
H	Ayak yüksekliği
H	İki dingilli bir kamyonndan intikal eden ağırlık
h_{rt}	Elastomer mesnet kalınlığı
I	Bina önem katsayısı
I₁₁	Burulma sabiti

I_{22}	Efektif mesnet atalet momenti
I_{33}	Efektif mesnet atalet momenti
J	Burulma sabiti
k	Elastomer mesnet sertlik sabiti
K	Bilinen sabitler matrisidir
K_1	Elastomerin düşey rijitlikği
K_2, K_3	Elastomerin yatay rijitlikği
K_{R1}	Elastomerin burulma rijitlikği
K_{R2}, K_{R3}	Elastomerin dönme rijitlikği
L	Kirişlerin ortalama mesnet açıklığı
L	Üst yapıdaki iki genişleme arasındaki mesafeyi
m	Kütle
$\ddot{O}S$	Zemin önem sınıfı
P	Tekil kuvvet
q	Yayılı yük
R	Bilinen yük vektörü
R	Deprem yükü azaltma katsayısı
S	Derece cinsinden mesnet açısı
S	Yarım treyler yükü
S	Zemin kat sayısı
$S_{dış}$	Şekil faktörü
$S_{iç}$	Şekil faktörü
S_o	Ortalama şekil faktörü
$t_{dış}$	Dış elastomer tabakası kalınlığı (tek tabaka)
$t_{iç}$	İç elastomer tabakası kalınlığı (tek tabaka)
T_m	Titreşim moduna
t_r	Elastomer tabakaların toplam kalınlığı
u	x yönünde eleman deplasman bağlantısı
v	Poisson oranı
v	y yönünde eleman deplasman bağlantısı

V_{h1}	Tek kirişe gelen kamyon veya şerit yükü
V_{hb}	Fren yükü
W	Ağırlık
Z	Zemin profili
α_T	Betonun ısı genleşme katsayısı
γ	Yoğunluk
γ_b	Beton birim ağırlığı
γ_d	Dolgu birim ağırlığı
γ_k	Kaplama ve asfaltın birim ağırlığı
ΔL	Uzama miktarı
ΔT	Sıcaklık değişimi
ρ	Kütle yoğunluğu
ΣF_w	Rüzgar yükü
ΣV_{h1}	Mesnete gelen toplam kamyon ve ya şerit yükü
ϕ	Titreşim katsayısı

Kısaltmalar**Açıklama****AASHTO**

Amerikan devlet otoyolları ve resmi taşımacılık birliği

ASTM

Amerikan demir ve çelik enistitüsü

TCK

Türkiye Cumhuriyeti Karayolları

DBYBHY

Deprem bölgelerinde yapılacak binalar Hakkında Yönetmelik

Z

Zemin sınıfı

SAP

Structural Analysis Program

CQC

Tam Karesel Birleştirme

SPC

Sismik kategori

ABD

Amerikan birleşik devletler

SMSM

Tek modlu spektrum çözüm yöntemi

MMSM

Çok modlu spektrum çözüm yöntemi

MXPSD

Tasarım için kullanılan bilgisayar programı

PROCAT

Analiz için kullanılan bilgisayar programı

RST

Rütne, sünme, sıcaklık

1.GİRİŞ

Tarihin en eski dönemlerinden bu yana insanoğlu, doğada besin maddeleri başta olmak üzere çeşitli kaynakları aramak, toplamak ve avlanmak üzere hareket etmek zorundaydı. Yürüyüş yollarında yer alan vadilerin, eğer tabanında su akıntısı da varsa ilke biçimde düzenlenmiş köprü görevi gören kolaylıklarla geçilmesi gerekebiliyordu.

Başlangıçta basit gibi görülen bu yapılar mesafe artması ve araya destek elemanların da kullanılması ile zamanla daha karmaşık hale gelmiştir. Ayrıca kullanılan malzemeler geçilen mesafeler ve yapım teknikleri zamanla değişip gelişerek çeşitli köprü türlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Köprülerin sınıflandırılması

Malzemeye göre : Çelik köprü, Betonarme köprü, Ahşap köprü, Taş/Tuğla köprü

Kullanıma göre : Yaya yolu, Kara yolu ve Demiryolu köprüler

Açıklığa göre : Kısa (15 metre den fazla), Orta (50 metre den fazla) ,Uzun (50 ile 150 metre) ve Çok uzun (150 metre den fazla) açıklık köprüler

Yapısal olarak : Plak , Kirişli, Kafes, Eğik askılı, Asma ve kemer köprüler

Bu çalışmada kirişli köprü seçildiği için aşağıda bu tür köprülerin özellikleri sunulmuştur.

Dünyada çok yaygın olarak inşa edilen kirişli köprüler genellikle kısa ve orta açıklıklarda kullanılır. Basit mesnetli bir kirişte, en büyük eğilme momenti ortada bulunur ve uçlara doğru azalarak sıfıra iner. Ne var ki bu ince ve zarıf bir tasarım için uygun değildir. 15 ile 50 metre (orta açıklık) arasında olan açıklıklarda en yaygın olan köprüler I kirişli betonarme köprüler ve öngerme kutu ve I tipi kirişli betonarme köprülerdir. Sanayi tesis yapıları gibi büyük açıklıkları olan klasik binalarda, öngerilmeli betonarme prefabrike yapı elemanları kullanılmaktadır. Büyük çoğunlukla, önceden germe yöntemiyle imal edilen bu kirişlerin kaldırılıp, yerine

konmasında önemli ve nazık vinç operasyonları gerekmektedir. Köprülerde açıklıkların prekast kirişler ile geçilmesi Türkiye’de yaygın bir şekilde kullanılan bir sistemdir. Bu sistemde her açıklıkta prekast kirişler elastomer mesnetler üzerine serbestçe oturur ve kirişlerin üstündeki döşeme yerinde dökülerek araçlar ve yayalar için düz kullanma yüzeyi oluşturulur.

Bu çalışmada bir prekast kirişli betonarme köprünün farklı açıklıklara göre, AASHTO 2002 şartnamesine uygun, SAP2000 programını kullanarak analiz ve ön tasarımı yapılmıştır. Analiz ve tasarım sürecinde temellerin üst yapıya etkisini ihmal edilmiş ve modellerde temeller ankastre mesnet tanımlanmıştır. Özellikle 3 modelde de aynı tip elastomer mesnet kullanılıp, “Sismik Tasarım” doğrultusunda “Çok Modlu (24 mod) Spektral Analiz Yöntemi” ve SAP2000 analiz programı kullanılarak belirlenmiştir. Spektral ivme periyot eğrisi modele göre çizilip, deprem yükü etkisi altında düşey, yatay, burulma ve dönme rijitlikleri hesaplandıktan sonra farklı modların etkisi modellerde uygulanmıştır.

Dünyada ve ülkemizde konu ile ilgili bir çok çalışma ve araştırmalar tesbit edilmiştir, örnek olarak bu çalışmalardan bir kaç aşağıda özetlenmiştir.

M. Begimgil (1995) çalışmasında yığma kemer köprülerin diğer köprülerle kıyaslandığında birçok üstün özelliğe sahip olduğunu tesbit etmiş. Özellikle zaman içindeki sağlamlığı oldukça iyi olduklarını göstermiş. Kemer köprülerin avantajları ve dezavantajlarını incelemiş ve kemerin davranışı, tasarım prensipleri, malzemenin özellikleri, çeşitli analiz yöntemlerinden kısaca bahsetmiş ve basık kemerlerin çözümündeki farklı yöntemin nedeni açıklamıştır.

Wagdy G. Wassef ve ark. (2003) Öngerilmeli beton kirişli köprünün, kapsamlı bir tasarımını oluşturmuşlardır. Üstyapıda iki basit açıklıktan oluşan sürekli hareketli yüklere maruz ve Altyapı ise tek parçadan ve çok kolonlu bir yapıyı farz almışlar. Köprü Tasarımında AASHTO şartnamesini özellikleri kullanmışlardır. Çalışmaları süresinde köprünün tüm elemanları için tasarım adımlarını özetleyerek ayrıntılı akış Şemaları çizmişler. Rapor, beton döşeme, öngerilmeli I-kirişler, elastomer mesnet,

parça duvar kenar ayak hesaplarını içeren bir örnektir.

Can Akoğul ve ark. (2008) yüksek lisans tezi çalışmasında Türkiye'deki betonarme köprü ve viyadüklerin AASHTO'ya göre depreme dayanıklı tasarımına ilişkin koşullar incelenmiştir. Özellikle depreme dayanıklı köprü tasarım aşamalarındaki belirsizlikler açıklanmaya çalışmış, AASHTO koşullarının uygulanmasında karşılaşılan sorunlara çözümler geliştirilmiştir. Çalışma, tasarım aşamasında elastomer mesnetlerin modellenme biçiminin deprem davranışına olan etkisine odaklanmıştır. Çalışmada elastomer mesnetlerin gerçek bir köprü örneği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elastomersiz, elastomerli ve basit olmak üzere üç ayrı model çözülmüştür.

M. İbrahim A. ve ark. (2009) çalışmasında öngerme betonarme kirişli köprünün simetrik statik yüklemeye maruz ANSYS proglamıyla sonlu elemanlar metoduyla modelleme yapıp sonuçları deneysel sonuçlarla kıyaslamıştır. Çalışmasının sunucunda deneysel testler ve sayısal analizler arasında iyi bir uyum gözükmektedir.

El-Ragaby A. ve ark. (2006) çalışmasında kuzey Amerika'da inşa edilmiş üç farklı köprü için sonlu elemanlar analizini yapıp test ettikten sonra sonuçlarını sunmuştur. Bu köprü beton tabliyelerinde döşeme için takviye olarak farklı yöntemler kullanılmıştır. İki köprü, Kanadada ve, üçüncü, ABD de bulunmaktadır. Üç köprüde de I kiriş tipi kullanılmıştır. Ana kirişler çelik veya öngerilmeli betondan yapılmıştır. Ayrıca, üç köprüdede takviyeli fiber polimerler kullanılmıştır. deneme için kamyon yükünü kullanarak yük testlerini sonlu elemanlar modeli ile hesaplamıştır. Karşılaştırmalar sonucunda üç köprü de takviyeli fiber polimer kullanması tabliyenin nihayi taşıma davranışlarının artmasına sebep olmuştur.

Bhkari N. (2005) tez çalışmasında betonarme köprülerin serbest titreşime maruz dinamik analizi yapmıştır. İki mevcut köprü döşemesini ANSYS 6.0 programını kullanarak sonlu elemanlar modellemesini yaptıktan sonra köprüler için titreşim

parametrelerini incelemiştir. köprülerin üç boyutlu sonlu elemanlar tasarım modelleri geliştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Turgut Öztürk ve ark., çalışmalarında üç adet tipik omega ve I kesitinin incelendiği köprü kirişlerinin hangi açıklıkta en efektif kullanılacağını araştırmışlar. Tip omega kesitler için O1 kirişi 14m-28m, O2 kirişi 20m-34m ve O3 kirişi 28m-34m arasında ikişer metrelik artımlarla ele almışlardır. Kirişlerin gerilme durumları ve taşıma kapasitelerini incelemişler. Farklı sünme ve farklı rötreden doğan gerilmeleri de dikkate almışlar. Kirişlerin öngerme donatısı miktarlarına göre toplam gerilme kayıplarının ve moment taşıma kapasitelerinin nasıl değiştiği diyagram şeklinde elde etmişler. Çalışmalarının sonunda, O1 kirişinin 18m-24m, O2 kirişinin 24m-32m ve O3 kirişinin 28m-34m arasında efektif olarak kullanılabileceği görülmüştür. I kesitler için de ayrıntılı incelemeler yapıp, sonuçları sunmuşlar.

Anthony J. Wolanski, B.S. (2004) tez çalışması, betonarme ve öngerilmeli beton kiriş üzerine sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz ve tasarım yapmıştır. Kirişlerin eleman analizi ve onların yük sehimlerini incelemek, bir betonarme kiriş modeli üzerinde yapıp ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Yük deformasyonu sonuçları el hesaplanmaları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç da sonlu elemanlar modelleme hesabı va el hesabı analizini birbirine çok yakın bulmuştur.

Verne A. Geidl (1990) tez çalışmasında, Öngerilmeli Beton Kirişlerin Gelişmiş Tasarım ve Analizini yapmış. Çalışmasında iki farklı program kullanmıştır. Tasarım için MXPSD program ve analiz için de PROCAT programı kullanarak çalışmasını sürdürüp dökümanları sunmuştur.

Barr P. ve ark (2001) , çalışmalarında üç açıklıklı beş kirişden oluşan bir öngerilmeli beton kiriş köprü üzerine hareketli yük dağılım faktörleri altında eğilme değerlendirmesini incelemişlerdir. Bir köprünün güvenilirliğini değerlendirmek için, statik bir hareketli yük testi sırasında sonlu elemanlar metodu kullanarak modelleme yapmışlar . AASHTO ya göre el hesabı ve sonlu elemanlar yöntemini SAP2000 programı kullanarak, her kirişin yük altında davranışını karşılaştırmışlar. sonra

hareketli yük faktörlerini beş ayrı model olarak farklı şekillerde köprüye ekleyerek bunların arasında karşılaştırmalar yapmışlar.

2. SONLU ELEMENLAR METODU

Sonlu elemanlar metodu matematikçilerden ziyade daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Metod ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Tüm bu uygulamalarda bir büyüklük alanının hesaplanması istenmektedir. Gerilme analizinde bu değer deplasman alanı veya gerilme alanı; ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akışı; akışkan problemlerinde ise akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonudur. Hesaplanan büyüklük alanının almış olduğu en büyük değer veya en büyük gradyen pratikte özel bir öneme haizdir. Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan bir çok elemana bölünür. Elemanlar “nod” adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler (Şekil 2.1). Bu şekilde cebrik bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler nodlardaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir.

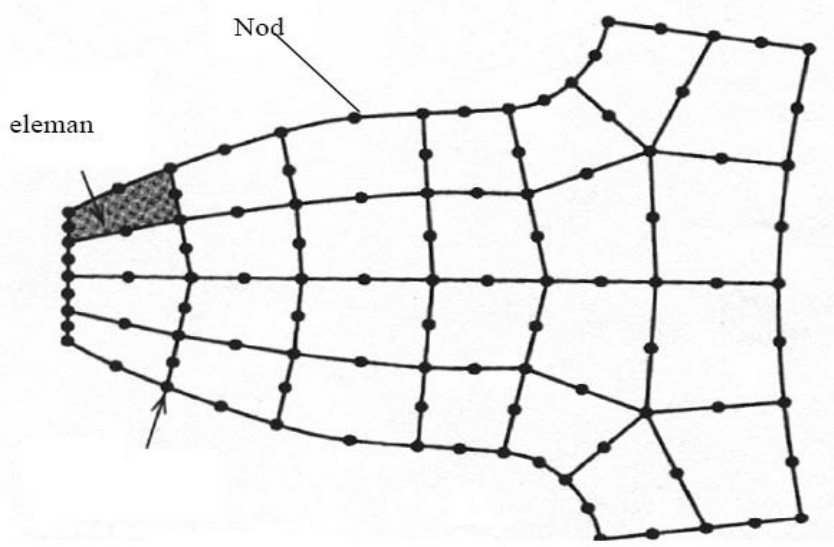
Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır. Sonlu elemanlar metodunda temel fikir sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile temsil etmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin deplasmanın) değeri o elemanın nodlarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler nodlardaki değerlerdir.

Bir varyasyonel prensip (örneğin; enerjinin minimum olması prensibi) kullanılarak büyüklük alanının nodlardaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi

$$[K] \cdot [D] = [R] \quad (2.1)$$

şeklinde. Burada $[D]$ büyüklük alanının nodlardaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, $[R]$ bilinen yük vektörü ve $[K]$ ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme

analizinde $[K]$ rijitlik matrisi olarak bilinmektedir.

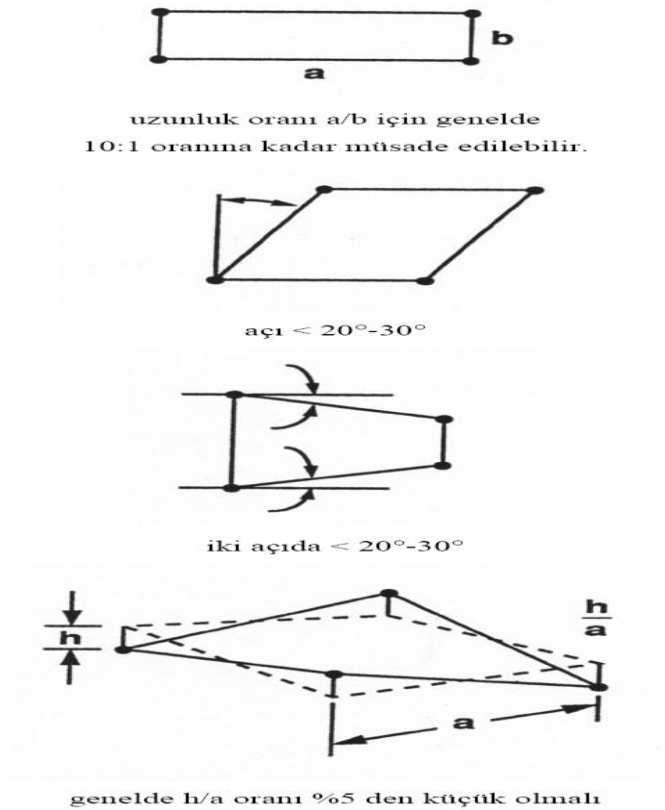


Şekil 2.1 Bir sonlu eleman modelinde nod noktaları ve elemanlar

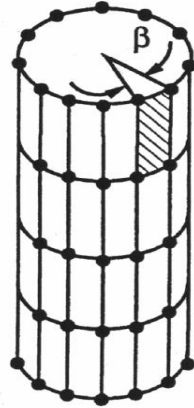
2.1. Sonlu Elemanlarla Modelleme

Modelleme bir fiziksel yapı veya sürecin analitik veya sayısal olarak yeniden inşa edilmesidir. Sonlu elemanlar metodunda modelleme basitçe nod ve elemanlardan oluşan bir ağ yapısı hazırlamak değildir. Problemi gerekli şekilde modelliyelemek için gerekli sayı ve tipteki elemana karar vermek ancak problemin fiziğinin iyi şekilde anlaşılmasıyla mümkündür. Kötü şekil verilmiş elemanlar ile hesaplanması istenilen büyüklüğün hesaplama alanı içindeki değişimini yansıtamıyacak kadar büyük boyutlu elemanlar modellemede istenmez. Şekil 2.2 de elemanlarda genelde mücade edilebilecek geometrik biçim bozukluklarının seviyesi gösterilmektedir. Diğer yandan zaman ve bilgisayar olanaklarını boş yere harcamamıza neden olacak, gereksiz kadar çok sayıda elemanlardan oluşan bir modellemede istenmemektedir. Hesaplanması istenilen büyüklüğü ve hesaplama alanı içindeki değişimini yeterli doğrulukta verecek kadar sıklıkta bir eleman dağılımına ihtiyaç vardır. Örneğin Şekil 2.3’de silindirik yüzeylerin modellenmesi için 4 nodlu veya 8 nodlu dört kenarlı elemanlar kullanılması durumunda tipik bir eleman dağılımı gösterilmiştir. Diğer yandan Şekil 2.4’ de bir delik etrafında olması gereken tipik eleman dağılımı

görülmektedir. Hesaplanan değerlerin kabul edilebilir olup olmadıklarının kontrol edilmesi ayrı bir öneme sahiptir. Dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda kısaca belirtilecektir. Sınır koşullarının doğru olarak anlaşılıp, modellenmesi son derece önemlidir. Sınır koşullarının yorumlanması sıkça hata yapılan noktalardan birisini oluşturmaktadır. Özellikle simetrik yapılarda modelin sadece bir kısmının hesaplamalarda kullanılması yeterli olabilmektedir (örneğin yarısı veya dörtte biri gibi). Böyle durumlarda yüklemenin simetrik olup, olmamasına göre hesap alanının sınırındaki nodlarda sınır koşullarının doğru yorumlanması son derece önemlidir. Aşağıdaki örnekte anti-simetrik yükleme altında statik davranışı incelenen bir levhanın, geometrik simetri özelliği kullanılarak hesaplamalar için levhanın sadece yarısı kullanılmaktadır. Bu da gerek zaman ve gerekse hesaplamalar açısından büyük tasarruf sağlamaktadır. Böyle bir problem için sonlu elemanlar metodunda, sınır koşullarının nodlarda nasıl tarifedileceği aşağıdaki örnek problemde gösterilecektir.



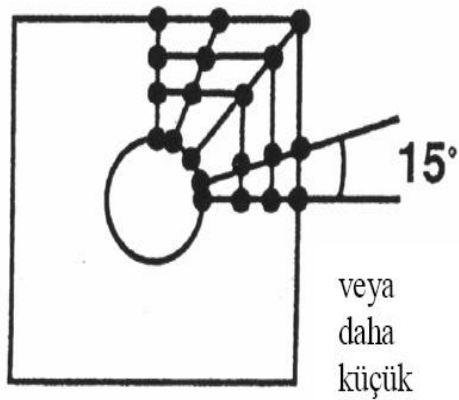
Şekil 2.2 Eleman geometrisinde müsaade edilebilir defonmasyonlar.



$\beta < 15^\circ$ 4 nodlu dört kenarlı elemanlar için

$\beta < 30^\circ$ 8 nodlu dörtgen elemanlar

Şekil 2.3 Bir silindirik yüzey etrafındaki tipik eleman dağılımı.



Şekil 2.4 Bir delikli geometride delik etrafındaki tipik eleman dağılımı.

2.1.1. Eleman seçimi

Sonlu elemanlar ile modelleme aşamasında, "eleman tipi (çubuk, kabuk, v.s), eleman şekli (dörtgen, üçgen) ve eleman sayısı ne olmalı? ara nodlu elemanlara ihtiyaç varmı? Gibi bir takım soruların cevaplanması gerekmektedir. Bu soruların cevabı ancak analiz edilen yapının ve seçilen eleman tiplerinin davranışı hakkında bilgi sahibi olunduktan sonra cevaplanabilir. Örneğin, gerilme analizinde yapının bir bölgesindeki gerilme durumunu en iyi yansıtan eleman tipi o bölge için seçilmelidir. Aşağıda bazı eleman tipleri ve bunların kullanılabileceği mühendislik problem tipleri hakkında bilgi verilmektedir [swden, 1990].

2.1.2. 3D Kiriş elemanı

3D Kiriş elemanı genel amaçlı bir sonlu eleman tipi olup, 3 boyutlu işlem yapabilme kapasitesine sahiptir. Bu eleman tipi aynı zamanda uzay kiriş elemanı olarak da adlandırılmaktadır. Eleman uzayda iki adet nod ile tarif edilmektedir. Üçüncü bir nod ise serbestlik derecesine haiz olmayan ve eleman koordinat sistemini tarif etmek amacıyla kullanılmaktadır. Elemanın iki ucunu tesbit eden iki adet nod için 12 adet serbestlik derecesi mevcuttur. Her bir nod 3 adet öteleme ve 3 adet dönme serbestliğine sahiptir. Eleman herhangi doğrultuda gelen kuvvet ve herhangi bir eksen etrafında dönme zorlamasına direnç gösterecek kapasiteye sahiptir. Elemanı tarif etmek için nodların koordinatına, elastisite modülüne (E), kayma modülüne (G), kesit alanına, kesit atalet momenti değerlerine, burulma sabitine (J) ve kiriş eksenine dik doğrultudaki deformasyon faktörlerine ihtiyaç vardır.

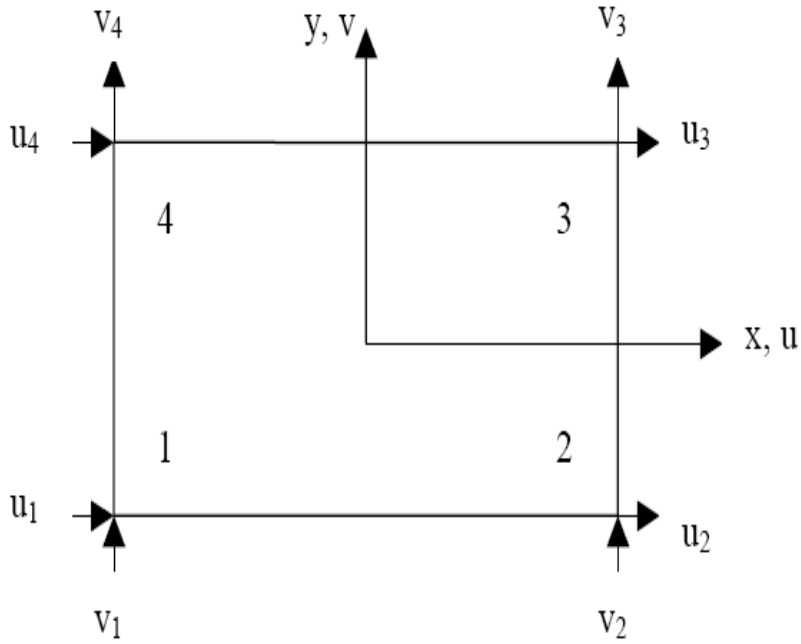
2.1.3. Çifte lineer dörtgen eleman

2 Boyutlu problemler için diğer bir tip eleman, çifte lineer dörtgen elemanlardır. Eleman köşelerinde dört adet nod yer almaktadır ve eleman sekiz nodal serbestlik derecesine sahiptir. Diğer yandan 8 nodlu eleman tipi için ise kenarların orta noktalarında dört adet nod vardır. Dört nodlu eleman için deplasman alanı aşağıdaki bağıntılarda verilmiştir.

$$u = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 xy \quad (2.2)$$

$$v = a_5 + a_6 x + a_7 y + a_8 xy \quad (2.3)$$

Burda elemanın çifte lineer diye isimlendirilmesi u ve v deplasman bağıntılarının iki lineer polinomun çarpımından oluşmasından dolayıdır.



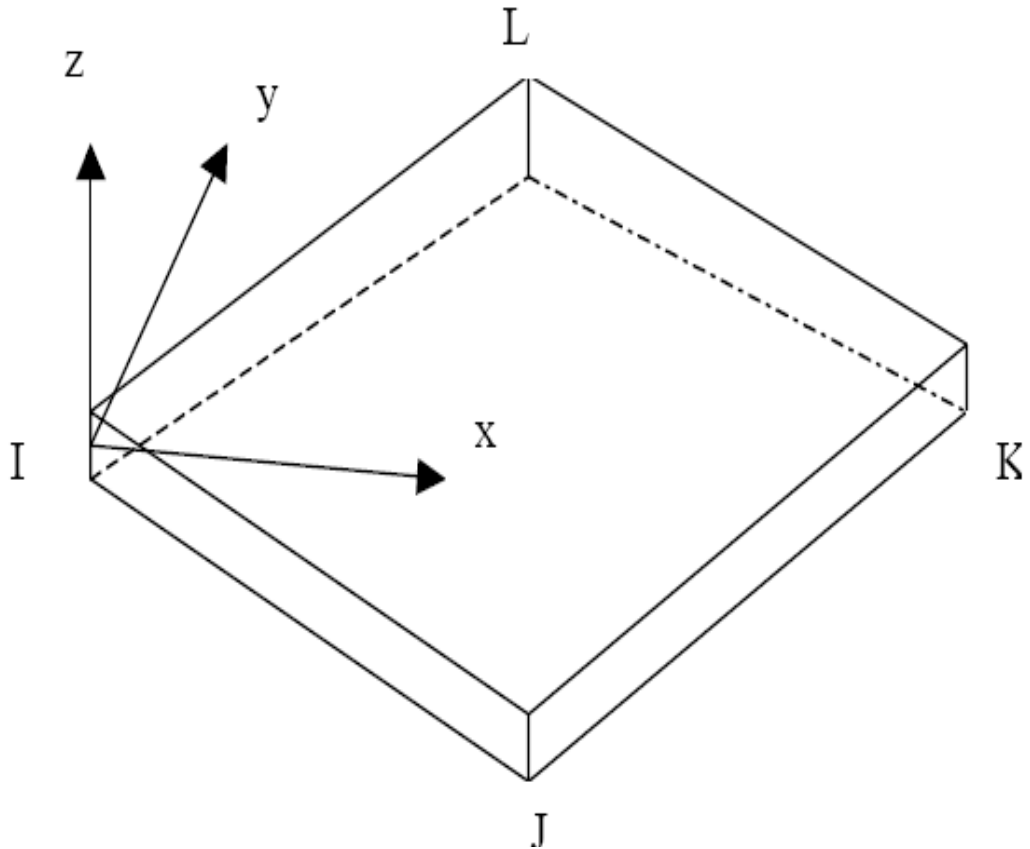
Şekil 2.5 Dört Nodlu Çifte Lineer Dörtgen Eleman

2.1.4. Kabuk elemanlar

Bir genel kabuk elemanı membran ve eğilme etkisini aynı anda temsil edebilmelidir. Örneğin dört nodlu basit bir dörtgen eleman tarif edilebilir. Elemanı tarif eden tüm nodlar aynı düzlem üzerinde olmayabilir. Bu da elemanda çarpılmaya neden olur. Elemanın çarpılması performansını olumsuz yönde etkiler. Ticari paket programlarda küçük miktarlarda çarpılmaya müsaade edilmektedir. Bu dört nodlu elemanın en büyük avantajı formülasyonunun basit olmasıdır. Genellikle az sayıda daha karışık bir eleman tipi kullanılması yerine, daha fazla sayıda basit bir eleman tipi kullanılması tavsiye edilmektedir. Dört kabuk elemanın en büyük dezavantajı düzgün eğrisel yüzeylerin düzlem elemanlarla veya az miktarda çarpılmış şekle sahip olan elemanla temsil edilmesidir. Kabuk teorisine dayanarak elde edilen eğrisel yüzeyli elemanlar düzlemsel elemanların yaratmış olduğu problemleri ortadan kaldırmaktadır. Fakat diğer yandan beraberinde başka zorlukları getirmektedir. Eğrisel elemanı tarif etmek için çok daha fazla geometrik bilgiye ihtiyacımız olmaktadır. Elemanın formülasyonu ise düzlemsel elemanlara nazaran çok daha zordur.

2.1.5. Dört nodlu ve dört kenarlı elastik kabuk eleman

Çoğu ticari programda yer alan bu eleman tipi eğilme ve membrane yüklerini taşıyabilme özelliğine sahiptir. Eleman düzlemi içinde ve düzlemine dik doğrultudaki yüklemelere müsaade eder. Her nod, üç tanesi x , y , z - doğrultusunda öteleme ve üç tanesinde bu eksenler etrafında dönme serbestiği olmak üzere altı adet serbestlik derecesine sahiptir (Şekil 2.6). Eleman dört nod ile tarif edilmekte ve değişken kalınlığa müsaade edilebilmektedir. Değişken kalınlıklı elemanlar için kalınlık eleman içerisinde düzgün olarak değişmelidir. Bu eleman tipi plakların olduğu kadar düzgün eğrisel yüzeylerin modellenmesinde de kullanılmaktadır. Eğrisel yüzeylerde iyi bir yaklaşım elde edebilmek için fazla sayıda bu elemandan kullanılmalıdır. Formülasyonunun basit olması nedeniyle diğer tip elemanlara göre daha avantajlıdır.



Şekil 2.6 Dört nodlu ve dört kenarlı elastik eleman (x, y eksenleri eleman düzlemi içindedir)

2.2. Yükler

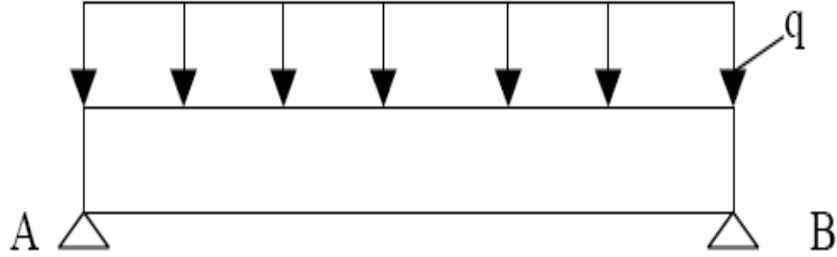
Tekil yükler mutlaka nod noktalarına uygulanmalıdır. Bu nedenle ağ yapısı tekil yüklerin nodal noktalara uygulanmasını sağlıyacak şekilde yapılandırılmalıdır. Klasik lineer teoriye göre bir noktaya tekil yük uygulandığı zaman, o noktada;

- kiriş için sonlu bir deplasman ve gerilme değeri oluşur,
- levha için sonlu deplasman, sonsuz gerilme değeri oluşur,
- iki veya üç boyutlu geometrik cisim için ise sonsuz deplasman ve gerilme değeri oluşur.

Diğer yandan bir tekil yük malzemede o bölgede akmaya neden olacaktır. Lineer teori ise akmayı modellemez. Sonuç olarak tekil yükler küçük alanlar üzerine dağıtılmış yüksek yoğunluklu yayıl yükler olarak modellenebilir. Eğer tekil yük bir nod noktasına uygulanırsa sonsuz deplasman ve gerilme değerleri hesaplanmaz. Bir tekil moment sadece öteleme serbestlik derecesine sahip bir noda uygulanamaz. Bu durumda tekil momentler eşlenik kuvvetler olarak temsil edilirler. Diğer yandan yayılı yükler nod noktalarına tekil yükler olarak uygulanırlar. [Ergin ve ark., 2000]

2.3. Sınır Koşulları

Sınır koşulları yapıların mekaniğinde mesnet şartları olarakda isimlendirilmektedir. Sonlu eleman modellemelerinde sınır koşulları (mesnet şartları) sık sık yanlış veya eksik olarak tanımlanmaktadır. Modellemede sınır koşullarına gerekli zen daima gösterilmelidir. Her ne kadar yapılan hata küçük gibi grlseye, sonuçlar üzerindeki etkisi oldukça büyük olacaktır. Örneğin şekil 2.7 da görülen ve iki ucu basit mesnetlenmiş kirişin sonlu elemanlar modelinde, elemanlar tarafsız ekseninden geçen çizgi üzerinde yer alırlar. Kiriş parçasının uçlarının yatay doğrultudaki hareketi sınırlandığı için, kiriş bu doğrultuda zorlanmaya maruz kalacaktır. Bu nedenle kirişin sonlu eleman modelinin uçları düşey bağlantılarla A ve B noktalarına bağlanır.



Şekil 2.7 İki ucu basit mesnetli kiriş.

Sonlu elemanlar modelinde aktif olmayan serbestlik dereceleri çözüm işleminden önce sınırlandırılmalıdır. Bu sınırlandırılması gereken serbestlik derecesi modelin sınırdaki veya başka bir bölgesinde olabilir. Örneğin düzlem elemanlar nodlarında düzlem içinde iki doğrultudaki ötelemeye karşı direnç gösterirler. Fakat genel amaçlı bir sonlu elemanlar programı her bir noda üçü öteleme ve diğer üçüde dönme olmak üzere altı serbestlik derecesi atıyacaktır. Rijidlik matrisinde tekillikleri önlemek amacıyla düzlem elemanlar için her noddaki üç dönme serbestliği ve eleman düzlemine dik doğrultudaki öteleme serbestliği kısıtlanmalıdır. Çünkü seçilen eleman tipi bu serbestlik dereceleri için direnç gösteremeyeceğinden, rijidlik matrisinde tekillikler oluşacak, bu da denklemlerin çözümünü zorlaştıracak veya imkansız hale getirecektir. Doğru bir modelleme için düzlem elemanların her bir nodu için üç serbestlik derecesi atanır. Sınır koşulları için ise yine sınırdaki yer alan nodlar için bu serbestlik derecelerinden bazılarının kısıtlanması gerekebilir. Bazı durumlarda gerçek problem için sınır koşulları net olarak anlaşılır olmayabilir. Böyle durumlar için çözümün üst ve alt sınırlarını iki ayrı analizle saptamak fiziksel olarak daha anlamlı olabilir. Örneğin iki ucundan mesnetlenmiş üniform yüklü bir kirişin uçları dönmeye belli olmayan bir dereceye kadar kısıtlanmış olabilir. Böyle bir durum için kirişin uçları bir çözüm için basit mesnetli olarak kabul edilir, diğer bir analiz içinse tamamiyle tesbit edilmiş olarak kabul edilerek problem çözülür. İki analizden elde edilen değerler aslında gerçek problem için alt ve üst sınırları göstermektedir [Ergin ve ark., 2000].

2.4. Ayrıklaştırma Ve Dikkat Edilmesi Gerekli Hususlar

Bir problemin sonlu elemanlar metoduyla çözümü için kaç adet eleman gereklidir? Böyle bir soruya cevap aramak için aynı problemi iki farklı modelle ayrı ayrı analiz edelim. İkinci analizde daha fazla sayıda eleman ile daha sık bir ağ kullandığımızı farz edelim. İkinci sonlu eleman modeli daha küçük bir ayrıklaştırma hatası verecektir. Ayrıca gerçek fiziksel objenin geometrisi daha iyi modellenmiş olacaktır. Eğer iki analiz neticesinde bulduğumuz sonuçlar arasında önemli bir fark yoksa, sonuçların yakınsamış olduğunu kabul edebiliriz. Yazılımlarda genelde bir takım hatalar bulunabilir. Sonlu eleman paket programları oldukça büyük yazılımlar olup, devamlı düzeltmeler yapılmaktadır. Elde edilen hatalı sonuçlar için programı suçlamak kolay bir yol olmasına rağmen, hatalı sonuçlara genelde yanlış modellemeler neden olmaktadır. Doğru modelleme yapabilmek için ayrıklaştırma esnasında bir takım hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu hususlar aşağıda sıralanmaya çalışılmıştır.

- Sonlu elemanlar grid ağının mümkün olduğu kadar üniform olmasına dikkat edilmelidir. Fakat yüklemede ve yapının davranışında hızlı değişimlerin görüldüğü bölgelerde daha sık bir ağ yapısı için üniformluğun bozulmasına müsaade edilebilir.
- Dört kenarlı elemanların üçgen elemanlara göre bir çok avantajı olması nedeniyle, dört kenarlı elemanlar daima üçgen elemanlara tercih edilmelidir. Fakat geometrinin ve/veya yüklemenin üçgen eleman gerektirdiği durumlarda bu kural bozulabilir.
- Deplasman analizi için gerilme analizinde kullanıldığı kadar sık ağ yapısına gerek yoktur.
- Geometride veya malzemedeki non-lineerliliği hesaba katan analizler için lineer analizlere kıyasla daha sık bir ağ yapısına ihtiyaç vardır.
- Titreşim modlarının hesabı doğal frekansların hesabına kıyasla daha sık ağ yapısı gerektirmektedir.

- Nodların numaralandırılması mümkün olduğu kadar büyük deplasman bölgelerinden küçük deplasman bölgelerine doğru yapılmalıdır. Fakat genelde sonlu eleman paket programlarında sonuçlar numaralandırmadan etkilenmezler.
- Eğrisel yüzeylerin düzlemsel elemanlar ile tarif edilmesi durumunda yüzey normali etrafındaki dönme serbestliği kaldırılmalıdır. Aksi takdirde kötü koşullu bir matrisle uğraşılması gerekecektir.
- Elemanların kenar uzunluk oranları (aspect ratio) eleman tipleri arasında değişiklik gösterebilir, uzunluk oranı deplasman hesapları için 10'un altında, gerilme hesapları için ise 5'in altında kalmalıdır.
- Yüksek mertebeden elemanlar için ara nodların dağılımı mümkün olduğu kadar üniform olmalıdır.
- Sonlu eleman hesaplarının ilk kontrolü için yüklerin, kuvvetlerin ve reaksiyonların dengesinin kontrol edilmesi tavsiye edilmektedir.
- Eğer analiz edilen yapı ve yükleme simetrik ise, hesaplamalarda bu avantaj kullanılmalıdır. Yani analiz için yapının yarısı veya dörtte biri modelleme için kullanılabilir. Fakat burkulma ve özdeğer problemlerinde dikkatli olunması gerekir, çünkü anti-simetrik modlar bu problemler için önemli olabilir.
- Yüksek frekanslı tepkisel değerlerin önemli olmadığı dinamik analizler için, statik analizde kullanılanlara benzer bir ağ yapısı yeterli olacaktır.
- Transient dinamik analizlerde eleman boyu, zaman adımı, integrasyon metodu ve pulse süresi uyumlu olmalıdır.
- Yüksek uzunluk oranlı dörtgen elemanlar, büyük açılı üçgen eleman gibi elemanlardan mümkün olduğu kadar sakınılması gerekmektedir.
- Yakınsaklık analizinde orjinal mesh kullanılarak ağ sıkılaştırılmalıdır. Eğer farklı bir mesh kullanılırsa yakınsaklık analizine tekrar başlamak gerekecektir.
- Yüksek ve düşük mertebeden elemanların birbirine bağlanması gerilmelerde düzensizliklere neden olacaktır.
- Eleman boyutlarında hızlı değişiklikler mümkün olduğu kadar minimize edilmelidir.
- Anizotropik malzemeler için Poisson oranı açıkça tanımlanmalıdır. Ayrıca ν , E ve G değerlerinin teorik limitlerinin aşılmaması kontrol edilmelidir.

- Kompleks yapıların sonlu elemanlar metoduyla analizinde, tüm yapı göreceli olarak kaba bir ağ yapısıyla analiz edilir. Bu analiz sonuçları yapı içinde detaylı bilgi sahibi olmak istediğimiz bölge için sınır koşulu olarak kullanılarak, bu bölge daha sıkı bir ağ yapısı ile analiz edilebilir. [Ergin ve ark., 2000]

2.5. Statik Analiz

Statik analizde zaman bağımsız bir değişken olarak göz önüne alınmaz. Deformasyonların sabit ve yavaşça değiştiği kabul edilir. Bazı problemlerde titreşim frekansı çok düşük olabilmektedir (en düşük doğal frekansın 1/3'ünden daha küçük). Bu durumlarda problem “quasi-statik” olarak düşünülebilir. Yani atalet kuvvetleri hesaplanarak, bunlar sanki birer statik yükmüş gibi yapıya uygulanarak, yapı statik olarak analiz edilebilir.

Bir statik analiz için aşağıdaki adımların yerine getirilmesi gerekmektedir:

1. Sonlu elemanlar modelini hazırla.

- yapıyı sonlu elemanlara bölerek ayırklaştır.
- yapının nasıl yüklendiğini tanımla
- yapının nasıl desteklendiğini tanımla

2. Hesaplamaları gerçekleştir. Program sırasıyla aşağıdaki adımları gerçekleştirir.

- Rijitlik matrisi $[K]$ her bir eleman için hesaplanır.
 - Elemanlar birbirleriyle birleştirilerek, tüm sistem için global rijitlik $[K]$ elde edilir.
 - Yükler global yük vektöründe, $[R]$, yerleştirilir.
 - Global denklem takımını $[K] \cdot [D] = [R]$, bilinmeyen $[D]$ değerleri için çözülür.
- Yapı problemlerinde $[D]$ matrisi nodal deplasman değerlerini temsil etmektedir.

2.5.1. Rijitlik matrisinin oluşumu

Genel olarak rijitlik matrisi $[K]$ bir eleman için aşağıdaki şekilde temsil edilebilir.

$$[K] = \int [B]^T [E][B] dV \quad (2.4)$$

Burada $[B]$ şekil değiştirme-deplasman matrisi, $[E]$ sabitler matrisi olup, malzeme özelliklerini göstermektedir. dV ise elemanter hacim elemanıdır. Rijitlik matrisleri eleman tipine bağlı olarak, eleman deplasman alanını tarif eden şekil (shape functions) fonksiyonları kullanılarak her tip eleman için ayrı ayrı hesaplanabilirler.

Eleman rijitlik matrisiyle, sistem global rijitlik matrisleri simetriktir. Bu durum yapıya etkiyen kuvvetler ile deformasyonlar arasında lineer ilişki olduğu sürece geçerlidir. Rijitlik matrislerinde diyagonal terimler daima pozitifdir. Diğer yandan bir yapı hiç mesnetlenmemiş veya uygun şekilde mesnetlenmemişse, rijidlik matrisinde tekillikler oluşur. Bu durumda program $[K] \cdot [D] = [R]$ denklemini nodal serbestlik dereceleri için çözecektir.

Matristeki tekillikleri önleyebilmek amacıyla tüm rijid cisim hareket serbestlikleri uygun şekilde engellenmelidir. Bu rijid hareket serbestlikleri yapı içerisinde deformasyon ve dolayısıyla gerilme yaratmayan hareket şekilleridir. Her bir nod noktasına genel amaçlı bir sonlu eleman programı altı serbestlik derecesi atıyacaktır. Bunlar üç adet öteleme ve üç adette dönme serbestliğidir. Eğer bu global serbestlik derecelerinden biri bile bu noda bağlı olan elemanların biri için bile şekil değiştirme oluşturmuyorsa, rijitlik matrisinde tekillik oluşacaktır. Bu tür serbestlik dereceleri çözümden önce kısıtlanmalıdır.

2.6. Modelleme

Dinamik yapı analiz, statik analize göre daha fazla çalışma gerektiren bir analiz türüdür. Yükleme zamanının bir fonksiyonudur. Dinamik analizde çeşitli metodlar aynı amaca ulaşılabilceği gibi, aynı model için değişik amaçlar için analizler gerçekleştirilebilir. Dinamik analizin diğer bir zorluğuda sonuçların kontrolü için gerekli adımlardan biri olan yapının davranışını mevcut şartlar altında kestirmektir (statik analiz için bu çok daha kolay şekilde yapılabilir).

Diğer yandan yapı statik ve dinamik yükler altında oldukça farklı tepkiler verebilir. Analizden önce dinamik analizin gerekli olup olmadığına karar vermek gerekmektedir. Eğer yapı frekansa bağlı bir kuvvetin altında zorlanıyorsa, zorlayıcı frekans yapının en düşük doğal frekansı ile karşılaştırılır ve doğal frekans zorlayıcı frekansın $1/3$ 'ünden daha düşük ise dinamik analize gerek yoktur, problem statik analiz ile çözümlenebilir. Genellikle böyle durumlarda dinamik yüke verilen tepki değeri, dinamik yükün genliğine sahip statik yükleme altında elde edilecek değerin %10 daha fazladır.

Eğer bir dinamik analiz yapılmasına karar verildiyse bazı sorulara cevap verilmesi gerekecektir. Bunlar şöyledir; Analizin hedefi nedir , Hangi basitleştirmeleri yapmak mümkündür, Malzeme ve geometrik non-lineerlikler hesaba alınmalıdır?, Hangi frekans değerleri yüklemde göz önüne alınmalıdır, Hangi frekanslardaki tepkiler yapı için önemlidir?, Hangi hesaplama yöntemleri problem için uygundur.

Dinamik analizlerde ilk adım olarak genelde doğal frekans değerleri ve bu frekanslara ait şekil değiştirme modları hesaplanmaktadır. Bu değerler yapının her hangi bir zorlayıcı kuvvet altındaki davranışını tesbit ederler. Bu modları inceliyerek zorlayıcı kuvvetlerin yapıya hangi modlarda daha çok enerji verebileceğini ve yapının hangi noktasındaki tepkiye hangi modun daha büyük katkı yapacağını görebiliriz [Ergin ve ark., 2000].

3. ANALİZ VE TASARIM

Bu çalışmada üç adet model yapılmıştır. Üç model farklı açıklık ve I tip standart prekast kirişten oluşmaktadır. İlk aşamada ise tasarım parametreleri açıklanıp ardından yükler hesaplanmıştır. Hazırlanan modellerde tanımlanan yükler altında, genel amaçlı bir yapısal analiz programı olan SAP2000 programında analiz edilmiştir. Bu modelleri etki edecek yükler AASHTO'ya uygun olarak alınmıştır.

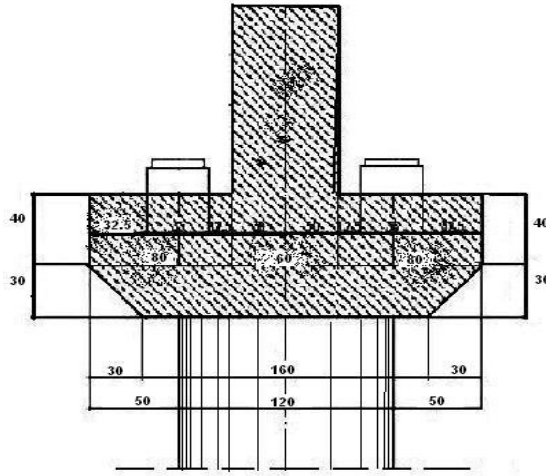
3.1. Tasarım Parametreleri

3.1.1. Malzeme

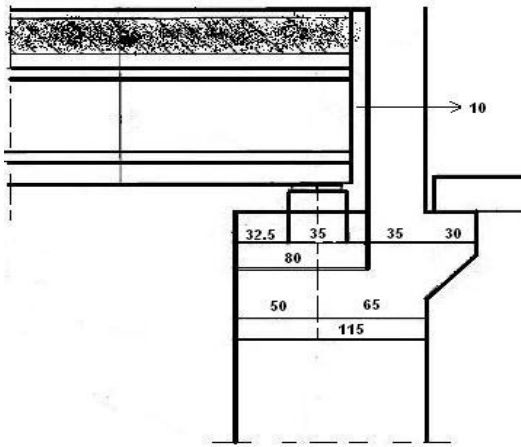
Çizelge 3.1. Beton özellikleri

Beton Kullanım Yeri	Beton Basınç Mukavemeti
Döşeme için kullanılan beton	C30 ($f_{ck} = 30$ Mpa)
Prekast kirişler için kullanılan beton	C40 ($f_{ck} = 40$ Mpa)
Kolonlar, için kullanılan beton	C30 ($f_{ck} = 30$ Mpa)
Başlık kirişleri için kullanılan beton	C30 ($f_{ck} = 30$ Mpa)
Perdeler için kullanılan beton	C30 ($f_{ck} = 30$ Mpa)

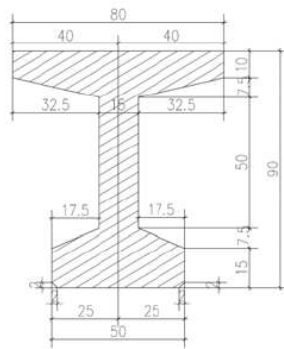
Aksi belirtilmedikçe bütün yapı kısımlarında kullanılan betonarme donatısı S420 prekast kirişte kullanılan öngerilme donatısı 270-K (270000 psi = 18777 kg/cm²) düşük gevşemeli tiptir.



Şekil 3.1. Orta ayak başlık kiriş kesit ve standart boyutlar



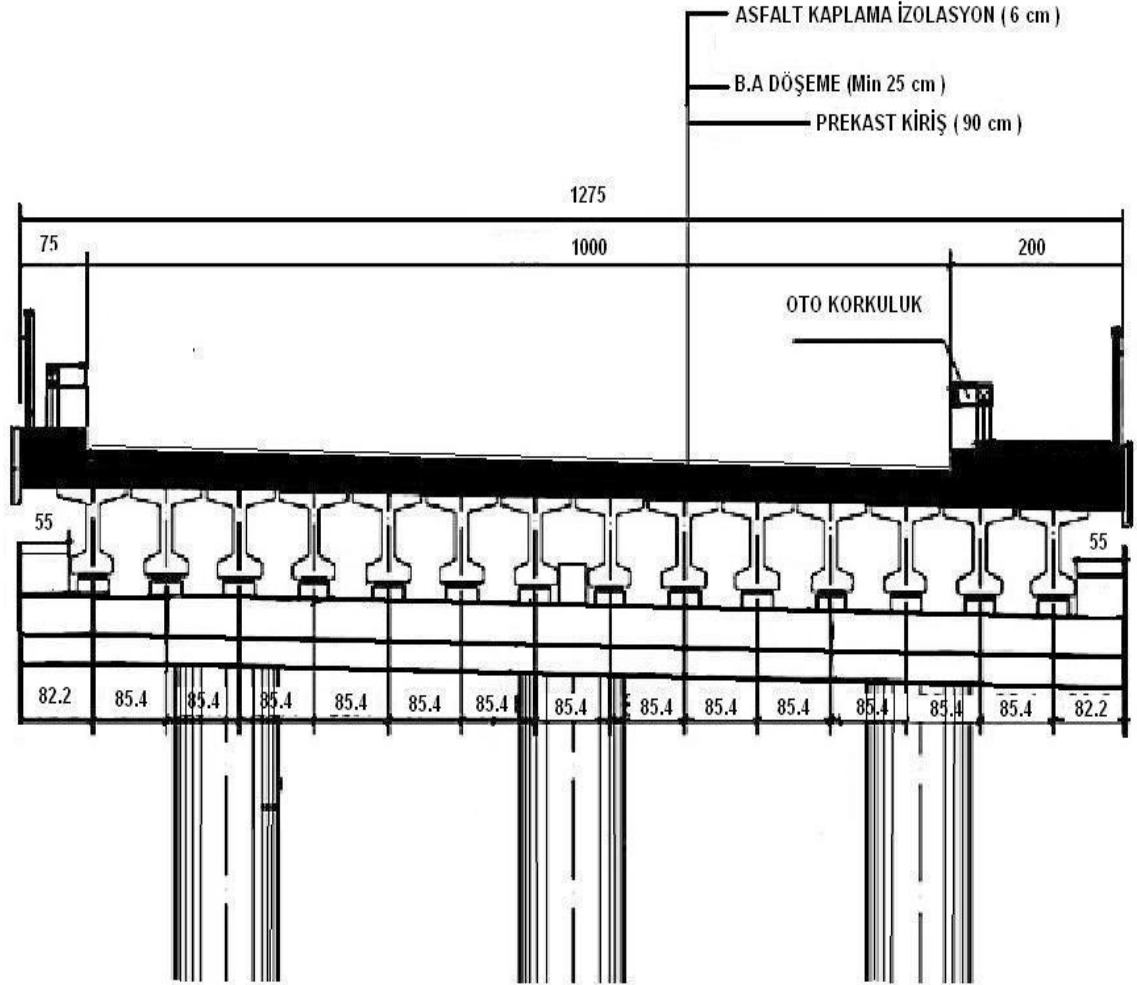
Şekil 3.2. Kenar ayak kesit ve standart boyutlar



Şekil 3.3. 28 adet I tip standart prekast kiriş ve boyutlar

3.2. Köprü Üst Yapısı

Köprü üstyapısı 90 cm yüksekliğinde 28 adet prekast I kirişlerinden oluşmaktadır. Döşeme 25 cm kalınlığında olup üzerinde 6 cm asfalt kaplama bulunmaktadır.

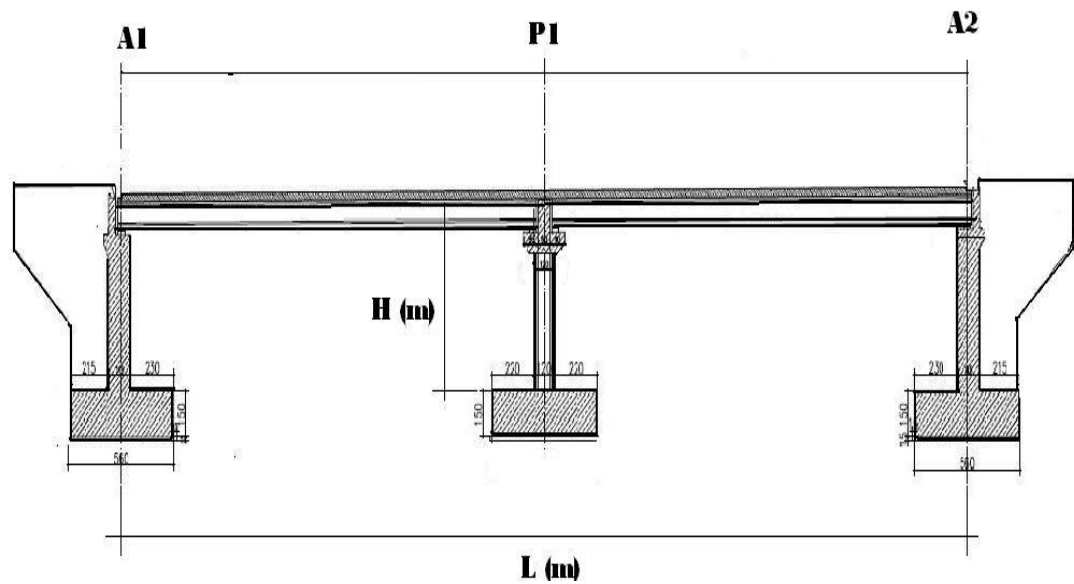


Şekil 3.4. Köprü üst yapı elemanları yerleşim görüntüleri

3.3. Köprü Modellerin Minimum Mesnet Uzunluk Tahkiki

AASHTO ya göre C sınıfı köprülerde minimum mesnet bölgesi uzunluğu için aşağıdaki ifade verilmiştir [AASHTO 2002].

$$N_{min} = (305 + 2.5L + 10H)(1 + 0.000125S^2) \quad (mm) \quad (3.1)$$



Şekil 3.5. Köprü boy kesiti

$$L_1 = 45.40 \text{ m}$$

$$L_2 = 65.40 \text{ m}$$

$$L_3 = 75.40 \text{ m}$$

(Yukarıda gelen $L_1, L_2, L_3, A1-A2$ akslarındaki genleşme derzleri arası mesafedir)

H=5.39 m (P1 ayağı yüksekliği)

 $S=0^\circ$

Yukarıdaki değerler köprü üzerinde en büyük mesnet oturma uzunluğunu verecek duruma karşı gelmektedir. Bu değerler kullanılarak mesnet uzunluğu;

$$N = 700 \text{ mm} > N_{1 \text{ min}} = 472.4 \text{ mm}$$

$$N = 700 \text{ mm} > N_{2\min} = 522.4 \text{ mm}$$

$$N = 700 \text{ mm} > N_{3\text{min}} = 547.4 \text{ mm}$$

Olup şartnameye uygundur.

3.4. Yük Analizi

3.4.1. Zati yükler

Öz ağırlıkların hesabında birim hacim ağırlıkları aşağıdaki tabloya göre dikkate alınmıştır. [Tahouni, 2004]

Çizelge 3.3. Birim hacim ağırlığı

Betonarme yapı kısımlarında	$\gamma_b = 25.0 \text{ kN / m}^3$
Kaplama ve asfalt ağırlıklarında	$\gamma_k = 23.0 \text{ kN / m}^3$
Dolgu ağırlıklarında	$\gamma_d = 19.5 \text{ kN / m}^3$

Zati Ağırlıklar Hesabı

Kiriş zati ağırlığı :

$$0.2896 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 \times 14 = 101.360 \text{ kN/m}$$

Döşeme zati ağırlığı :

$$12.75 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 = 79.688 \text{ kN/m}$$

Asfalt kaplama ağırlığı :

$$10.00 \text{ m} \times 0.06 \text{ m} \times 23 \text{ kN/m}^3 = 13.800 \text{ kN/m}$$

Bordür ağırlığı :

$$2.75 \text{ m} \times 0.30 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 = 20.625 \text{ kN/m}$$

Prekast eleman ağırlığı :

$$0.80\text{m} \times 0.10\text{m} \times 25 \text{ kN/m}^3 \times 2 = 4.000 \text{ kN/m}$$

Korkuluk ağırlığı :

$$4 \times 1.5 \text{ kN/m} = 6.000 \text{ kN/m}$$

$$\text{Toplam} = 225.473 \text{ kN/m}$$

Çizelge 3.4. Çeşitli modellerde zati ağırlık (kN)

Model 1 Bir açıklığın ağırlığı	225.473 kN/m $\times$ 22.30	5028.048
Model 2 Bir açıklığın ağırlığı	225.473 kN/m $\times$ 32.30	7282.778
Model 3 Bir açıklığın ağırlığı	225.473 kN/m $\times$ 37.30	8410.142

3.4.2. Hareketli yükler

Hareketli yük sınıfı olarak ülkemizde yaygın olmak üzere, H₃₀-S₂₄ (**H** iki dingilli bir kamyon ve iki dingilinden intikal eden ağırlık W= 30 ton , **S** ise ona bağlı bir yarım treyler ve tek dingilinden intikal eden W= 24 ton ağırlığını göstermektedir) kamyon yükü kullanılmıştır. Ve bu yüke müadil şerit yükü dikkate alınmıştır. Hareketli yüklerden alt yapıya gelen maksimum yükler bulunmuş ve bu etkiler diğer yüklerle süperpoze edilmiştir. Şerit sayısı azaltma katsayısı tabloya göre alınmıştır. Taşıt yolu 2 şerit olduğu için yük azaltma katsayısı 1.00 alınmaktadır [AASHTO, 2002].

Çizelge 3.5. Azaltma Katsayısı

ŞERİT SAYISI	AZALTMA KATSAYISI
Bir veya iki şerit için	1.00
Üç şerit için	0.90
Dört veya daha fazla şerit için	0.75

Titreşim katsayısı olarak nominal trafik yükleri için karayolları yol köprüleri teknik şartname’de belirtilen katsayı alınmıştır. L metre cinsinden kirişlerin ortalama mesnet açıklığı olmak üzere, titreşim katsayısını aşağıdaki formüle koyarak, hesaplanır. böylece L yi metre cinsinden bulduktan sonra kamyon ve şerit yükü elde edilir. [AASHTO, 2002]

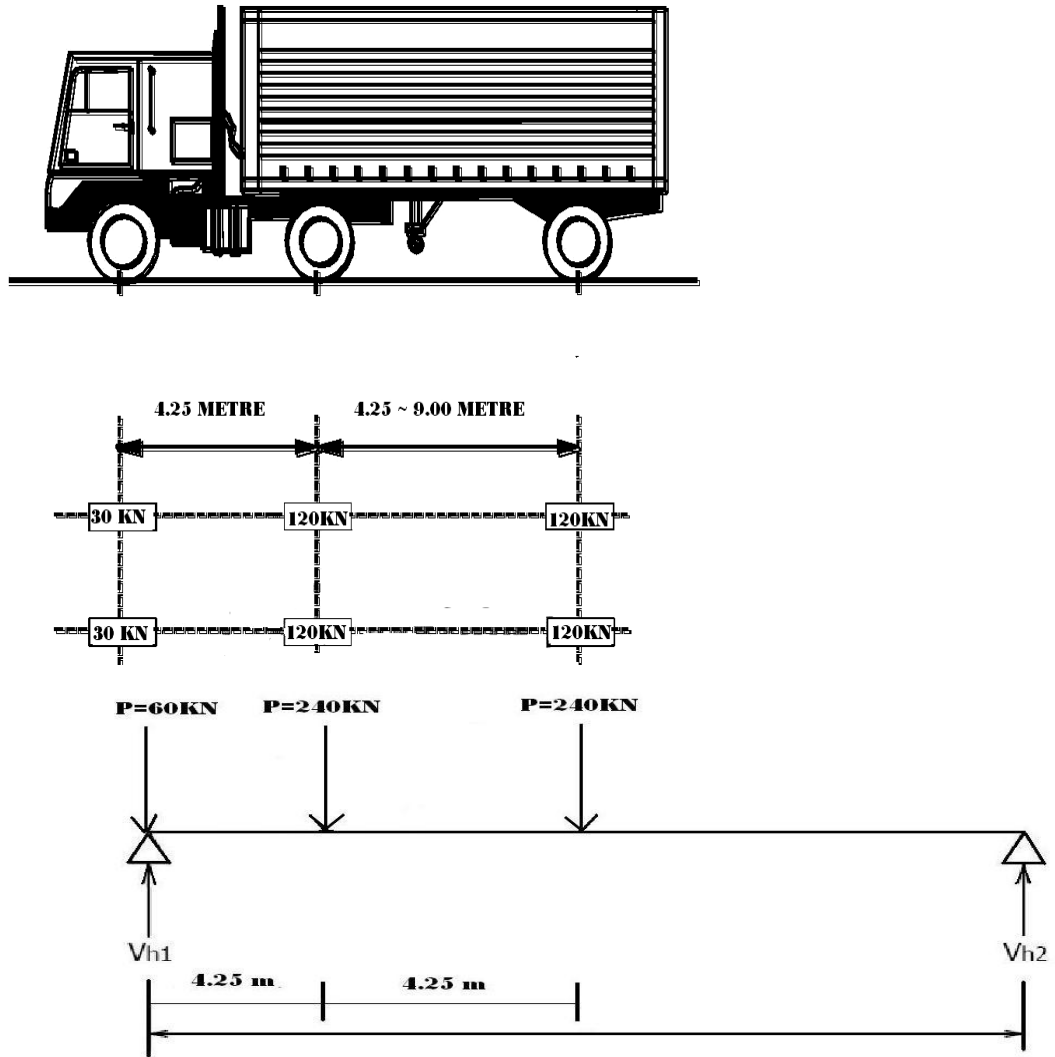
$$\phi = 1 + \frac{15}{L+37} < 1.30 \quad (3.2)$$

Çizelge 3.6. Çeşitli açıklıklarda titreşim katsayısı değeri

AKS ARALIKLARI	ORTALAMA MESNET AÇIKLIĞI (m)	TİTREŞİM KATSAYISI (φ)
Model 1	21.900	1.255
Model 2	31.900	1.217
Model 3	36.900	1.202

3.4.3. Kamyon yükü hesabı

Karayolları Köprülerinin tasarımında, ülkemizde yaygın olarak H30-S24 kamyon yükü kullanılmıştır. Kamyon ve şerit yükleri için mesnet reaksiyonları ilerde gelen formüllerle hesaplanmıştır. [AASHTO, 2002]



Şekil 3.6. Standart HS Kamyon yükü yerleşim

$$P = 2 \text{ şerit} \times 240 \text{ kN} \times \phi \times 1.00 = 480 \times \phi \text{ kN}$$

$$\Sigma V_{h1} = [P \times L + P \times (L - 4.25) + P \times (L - 8.5) / 4] / L \text{ kN}$$

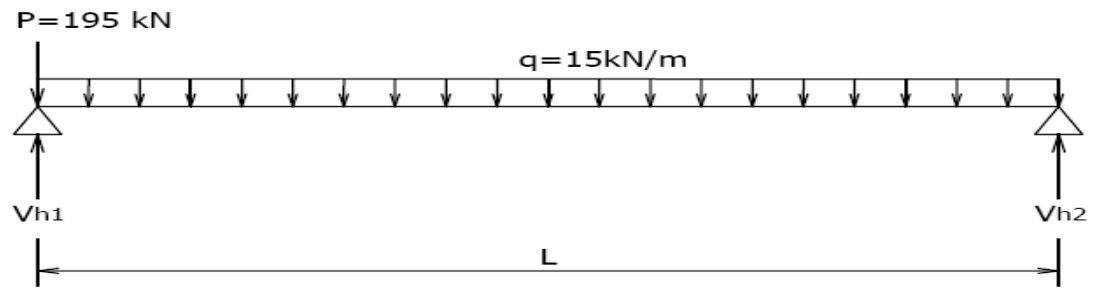
$$V_{h1} = \Sigma V_{h1} / (\text{mesnet sayısı}) \text{ kN} / \text{mesnet}$$

3.4.4. Şerit yükü hesabı

Her bir şerit yükü, trafik şeridinin birim boyu başına üniform yayılı bir q yükü ile bir tek münferit P yükünden (sürekli açıklıklar için iki münferit yükten) ibaret olup bunlar azami etki doğuracak şekilde yerleştirilir. Gerek münferit yük gerekse üniform yayılı yükün, şeridin 3 metre genişliğince üniform olarak yayıldığı kabul edilir. [AASHTO, 2002]

Çizelge 3.7. Şerit yük hesabında yük sınıfı

YÜK SINIFI		$H_{30}-S_{24}$	$H_{20}-S_{16}$	$H_{15}-S_{12}$	H_{10}
YÜK AĞIRLIK		30.00	20.00	15.00	10.00
P (ton)	Eğilme etkisi için	13.5	9.0	6.8	9.0
	kesme etkisi için	19.5	13.5	9.8	13.0
q (t /m)		1.5	1.0	0.8	0.5



Şekil 3.7. Şerit yükü

$$\Sigma P = 2 \times 195 \times \varphi \times 1.00 = 390.0 \times \varphi \text{ kN}$$

$$\Sigma q = 2 \times 15.0 \times \varphi \times 1.00 = 30.0 \times \varphi \text{ kN/m}$$

$$\Sigma V_{h1} = [\Sigma P \times L + \Sigma q \times L^2 / 2] / L \text{ kN}$$

$$V_{h1} = \Sigma V_{h1} / (\text{mesnet sayısı}) \text{ kN / mesnet}$$

3.4.5. Yaya yükü

Yaya yükü olarak 3.0 kN/m^2 alınmıştır. [AASHTO, 2002]

$$\Sigma P = A (\text{m}^2) \times 3.0 (\text{kN/m}^2)$$

$$P = \Sigma P (\text{kN}) / (2 \times \text{mesnet sayısı})$$

3.4.6. Fren kuvvetleri

Hareketli yükün 1/20 sinin yatay olarak yol yüzeyinden 1.80 m yükseklikte etki ettiği kabul edilir. [AASHTO, 2002]

3.4.7. Rötire, sünme, sıcaklık değişikliklerinden meydana gelen kuvvetler

Sıcaklık değişiminden oluşan etkilerin hesabında Köprüler Teknik Şartnamesi gereği sıcaklık değişimi -30°C ile $+50^\circ\text{C}$ arasında alınmıştır ($\Delta T = \pm 40^\circ\text{C}$). Rötire ve sünme uzama katsayısı 0.0002 alınmıştır [AASHTO, 2002].

Betonun ısı genleşme katsayısı $\alpha T = 1.08 \text{E-}5/^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır [AASHTO 2002].

- Sıcaklık değişimi:

$$\Delta L = \alpha T \times L \times \Delta T = (1.08 \text{E-}5/^\circ\text{C}) \times L \times 40^\circ\text{C} = 4.32 \text{E-}4 \times L$$

- Rötire + Sünme :

$$\Delta L = 0.0002 \times L$$

Elastomer ebatları ve Elastomer kayma modülü

$$300_{\text{mm}} \times 400_{\text{mm}} \times 41_{\text{mm}} (\text{Net kauçuk kalınlığı } h_{rt} = 29_{\text{mm}})$$

$G = 1000 \text{ kN/m}^2$ farz edip

Aşağıdaki formula koyarak F_y hesaplanır [AASHTO 2002].

$$F_y = \frac{G \times A}{hrt} \times \Delta L \quad (3.3)$$

$$\Sigma F_y = 0.3_m \times 0.4_m \times 1000 \text{ kN/m}^2 \times 0.000632 \times L / 0.029_m = 2.62 \times L$$

$$F_y = \Sigma F_y \text{ (kN)} / (2 \times \text{mesnet sayısı})$$

3.4.8. Köprü boş ve dolu halinde rüzgar yükleri

Rüzgara maruz köprü üstyapı yüksekliği 1.85 m, Rüzgara maruz köprü üstyapı yüksekliği 1.85m dir ve Boş Köprü için Rüzgar Yüğü 2.4 kN/m^2 alınacaktır [AASHTO 2002].

$$\Sigma F_W = 2.26_m \times L_m \times 2.4 \text{ kN/m}^2 = 5.424 \times L \text{ (kN)} / \text{açıklık}$$

$$F_W = \Sigma F_W \text{ (kN)} / (2 \times \text{mesnet sayısı})$$

Köprü için: 1.7 kN/m^2 alınmaktadır ve Araç için 1.46 kN/m alınacaktır [AASHTO 2002].

$$\Sigma F_{WL1} = 2.26_m \times L_m \times 1.7 \text{ kN/m}^2 = 3.842 \times L \text{ (kN)} / \text{açıklık}$$

$$\Sigma F_{WL2} = 1.46 \text{ kN/m} \times L_m = 1.46 \times L \text{ kN} / \text{açıklık}$$

$$\Sigma F_{WL} = \Sigma F_{WL1} + \Sigma F_{WL2} = 5.302 \times L \text{ kN} / \text{açıklık}$$

$$F_{WL} = \Sigma F_{WL} \text{ (kN)} / (2 \times \text{mesnet sayısı})$$

Çizelge 3.8. Hareketli yükler hesap özeti

HAREKETLİ YÜKLER									FREN YÜKÜ
Aks Aralıkları	Mesnet açıklığı (m)	Titreşim katsayısı (ϕ)	Mesnet sayısı	ΣV_{h1} (kN)		V_{h1} (kN)		V_{h1} (kN)	V_{hb} (kN)
				$H_{30}-S_{24}$	Şerit	$H_{30}-S_{24}$	Şerit	Hesap	Hesap
Model 1	21.90	1.255	14	1180.044	901.718	84.289	64.408	84.289	4.214
Model 2	31.90	1.217	14	1192.346	1057	85.187	75.5	85.187	4.259
Model 3	36.90	1.202	14	1198.48	1134.09	85.605	81.006	85.605	4.280

Çizelge 3.9. Rötre, Sünme Ve Sıcaklık değişim yükler hesap özeti

RÖTRE, SÜNME VE SICAKLIK DEĞİŞİM YÜKLER									
aks aralığı	Kiriş boyu (m)	Sıcaklık değişimi (m)	Rötre sünme (m)	Toplam Δl (m)	Elastomer boyu (m)	Elastomer eni (m)	Net kauçuk yüksekliği (m)	ΣF_y (kN)	F_y KN/mesnt
Model 1	22.3	0.00963	0.00446	0.01409	0.4000	0.30000	0.02900	58.303	29.152
Model 2	32.3	0.01395	0.00646	0.02041	0.4000	0.30000	0.02900	84.626	42.313
Model 3	37.3	0.01611	0.00746	0.02357	0.40000	0.30000	0.02900	97.726	48.863

Çizelge 3.10. Rüzgar Yükleri Hesap Özeti

RÜZGAR YÜKÜ							
AKS ARALIĞI	KİRİŞ BOYU (m)	MESNET SAYISI	RÜZGARA MARUZ ÜSTYAPI YÜKSEKLİĞİ (m)	KÖPRÜ BOŞ (W)		KÖPRÜ DOLU (WL)	
				ΣP (kN)	P (kN/mesnet)	ΣP (kN)	P (kN/mesnet)
Model 1	22.30	28	2.26	120.955	4.320	118.235	4.223
Model 2	32.30	28	2.26	175.195	6.256	171.25	6.116
Model 3	37.30	28	2.26	202.315	7.225	197.7	7.060

3.5. AASHTO ya Göre Deprem Yükleri Hesaplama Akişi

3.5.1. İvme katsayısı

Şartnamenin uygulanmasında kullanılacak ivme katsayısı (A), risk haritalarından belirlenmektedir, AASHTO’da ivme katsayılarıyla tanımlanan deprem yükünün 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı yüzde 10’dur (75 yıllık sürede aşılma olasılığı %15’e yakındır). Bu değer yaklaşık 475 yıllık dönüş periyoduna eşittir. Aşağıda sözü geçen durumlarda, “yere özel” ivme katsayılarının uzmanlarca belirlenmesi gerekir:

- Aktif fay hattına yakın olan yerler
- Bölgede düşük olasılıklı depremlerin beklenmesi (<%10)
- Köprünün önemine göre uzun süre kullanılması (>50 yıl)

Örnek olarak, 250 yıllık kullanma ömrüne sahip önemli bir köprünün tasarım depreminin bu süre içinde aşılma olasılığı %10 olarak tanımlanıyorsa, dönüş periyodu 2400 yıla denk gelmektedir. ABD’deki bazı eyaletler kendi risk haritalarını geliştirmiştir. Bu eyaletlerin birçoğu 475 yıllık dönüş periyodunu kullanmaktadır. Türkiye’de ise DBYBHY (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında

Yönetmelik), bina önem katsayısı $I=1$ olan yapılar için tasarım depreminin 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %10 olarak tanımlanmaktadır. Tasarım depreminde can güvenliğinin sağlanması amacı ile kalıcı yapısal hasarın oluşması sınırlandırılmalıdır. [AASHTO, 2002].

3.5.2. Önem sınıflandırması

0.29'dan büyük ivme katsayılarına sahip köprülerde, Deprem Performansı Kategorisinin belirlenmesi için önem Sınıflandırılması (ÖS) yapılması gerekir. [AASHTO 2002]

1. Birincil Köprüler - ÖS = I
2. İkincil Köprüler - ÖS = II

3.5.3. Deprem performansı kategorisi

Her köprü, ivme katsayısı (A) ve önem sınıfına (ÖS) göre dört deprem performans kategorisinden (DPK) birine atanır, Hesap ve tasarımlar Çizelge 3.11 ya göre yapılır, [AASHTO, 2002]

Çizelge 3.11. Deprem Performans Kategorileri (DPK)

İvme Katsayısı	Köprü Sınıflandırması	
	Birincil	İkincil
$A \leq 0.09$	A	A
$0.09 \leq A \leq 0.19$	B	B
$0.19 \leq A \leq 0.29$	C	C
$0.29 \leq A$	D	D

3.5.4. Zemin etkisi

Yerel zemin koşullarının köprü üzerindeki etkisi, zemin profil tiplerine bağlı olarak Yerel Zemin Katsayısı (S) ile göz önüne alınıp ve oradan dört zemin profil tipi tanımlanmaktadır:

- Tip I, aşağıdaki ikisinden biridir:
 - Kaya (760m/sn'den daha büyük bir kayma dalgası hızı ile karakterize edilmektedir)
 - Kalınlığı 60m'yi geçmeyen ve kaya üzerinde bulunan kum, çakıl ya da sert kil tabakaları içeren sert zeminler
- Tip II, sert kil ya da derin kohezyonsuz zeminlerdir. Zemin kalınlığı 60m'den fazladır ve kaya üzerinde kum, çakıl ya da sert kil tabakaları bulunmaktadır.
- Tip III, yumuşak-orta sertlikte kil ve kumdur.
- Tip IV, kalınlıkları 12m'yi aşan yumuşak kil ya da silttir.

Bu tipler, yaklaşık olarak yönetmeliğimizdeki Z_1 , Z_2 , Z_3 ve Z_4 zemin profiline karşı gelmektedir. Yere özel elastik deprem katsayısının uzmanlarca belirlendiği durumlarda bölge katsayısı kullanılmasına gerek kalmamaktadır. [AASHTO, 2002]

3.5.5. Yerel zemin katsayısı

Yerel Zemin Katsayısı (S) zemin koşullarının, elastik davranış katsayısı ve spectrum üzerindeki etkisini yaklaşık olarak hesaba katmak için belirlenmiştir. [AASHTO, 2002]

Çizelge 3.12. Yerel Zemin Katsayısı (S)

Zemin Profil Tipi	Bölge Katsayısı S
<i>I</i>	1.0
<i>II</i>	1.2
<i>III</i>	1.5
<i>IV</i>	2.0

3.5.6. Elastik deprem davranış katsayısı

Elastik deprem davranış katsayısı, elastik hesapta kullanılan yatay deprem kuvvetini tanımlamaktadır. Deprem yönetmeliğimizdeki spektral ivme katsayısına $A(T)$ yaklaşık olarak karşı gelmektedir. Uzmanlarca hazırlanan %5 sönüm oranlı, yere özel davranış spektrumu bu koşulların yerini alabilir.

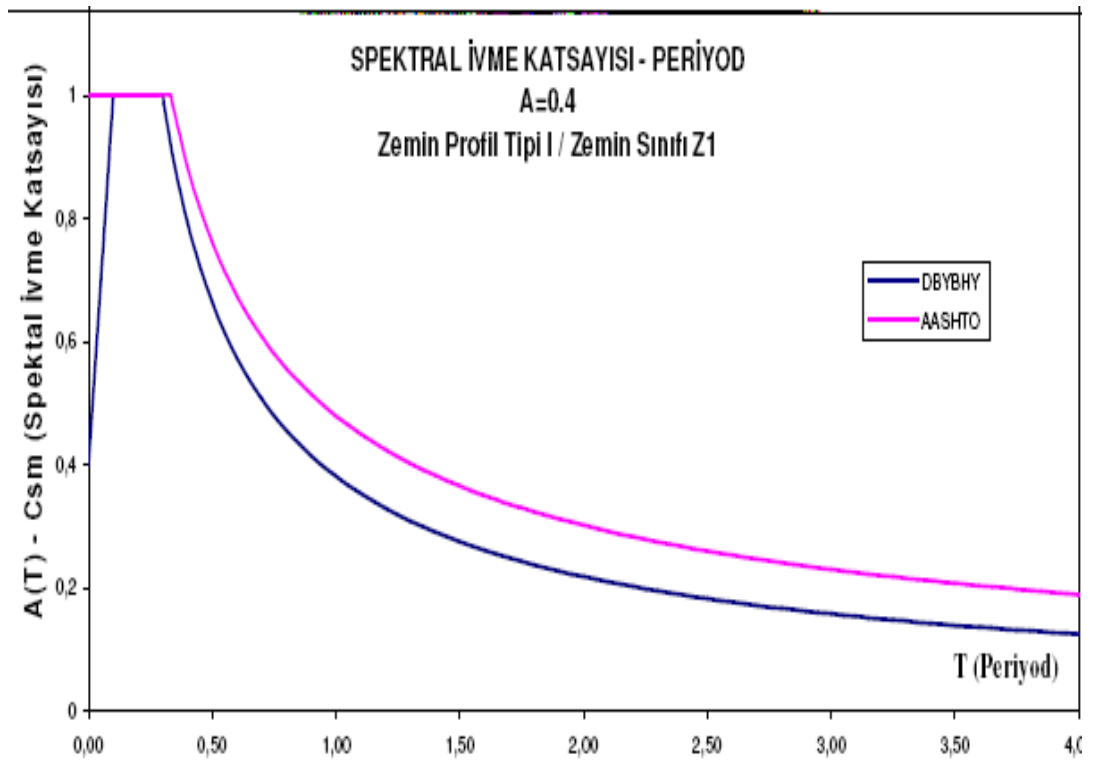
Bu spektrumun depremselliği ve zemin koşullarını göz önüne alması gerekmektedir. %2 sönümlü spektrumlarda deprem katsayıları 1.25 ile arttırabilir. Düşey deprem yükü, spektrumun kordinatları 0.67 ile çarpılması sonucu yeterli yakınlıkta hesaplanabilmektedir. [AASHTO, 2002]

Tek mod analizi için elastik sismik tepki katsayısı

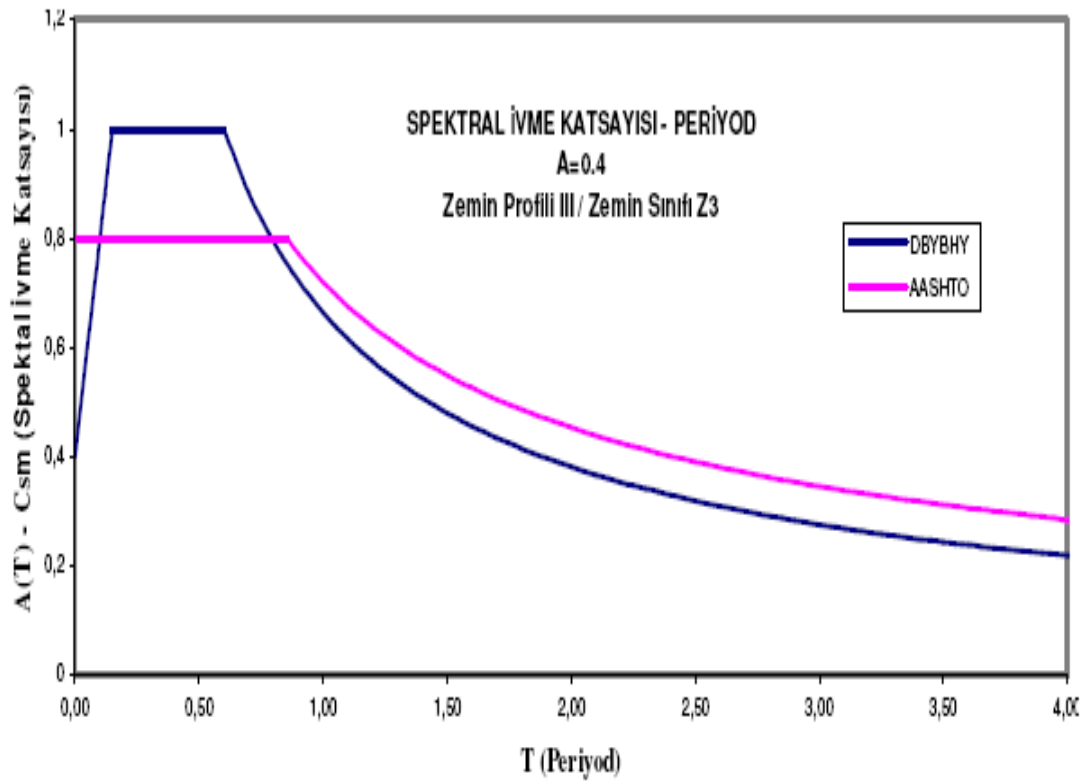
Elastik deprem davranış katsayısı C_{sm} , tasarım kuvvetlerinin belirlenmesi için aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır.

$$C_{sm} = \frac{1.2 AS}{T_m^{2/3}} \quad (3.4)$$

Burada, A risk haritasından okunan ivme Katsayısı, S boyutsuz yerel zemin katsayısı (Çizelge 3.12) ve T_m köprünün m'inci titreşim moduna ilişkin periyoddur C_{sm} değerinin $2.5A$ 'yı geçmemesi gerekmektedir. Zemin profil tipinin III ya da IV ve $A \geq 0.30$ olduğu yerlerde C_{sm} $2.0A$ 'den fazla olamaz. [AASHTO, 2002]



Şekil.3.8. DBYBHY ve AASHTO Spektrumları ($A=0.4$ /Zemin Profili I)



Şekil.3.9. DBYBHY ve AASHTO Spektrumları ($A=0.4$ /Zemin Profili III)

3.5.7. Deprem yükü azaltma katsayıları

Deprem performans kategorisi B, C ya da D olan köprülerin eleman ve bağlantıları için tasarım kuvvetleri, elastik deprem kuvvetlerinin uygun bir deprem yükü azaltma katsayısına (R) bölünmesiyle elde edilmektedir. Bu azaltma katsayıları çizelge 3.15’de verilmiştir. Bu katsayılar, deprem yönetmeliğindeki taşıyıcı sistem davranış katsayısının karşılığıdır. [AASHTO, 2002]

Çizelge 3.13. Deprem yükü azaltma katsayıları

Altyapı ¹	R	Bağlantı ³	R
Perde Ayak ²	2	Üstyapı ile Kenarayak arasında	0.8
Betonarme Kazık Grubu		Üstyapıda genleşme derzi	0.8
a.Yalnız düşey kazıklar	3		
b.Eğik kazık varsa	2		
Tek kolon	3	Kolon, orta ayak veya kazık grubu ile başlık kirişi ya da üstyapı arasında	1
Çelik ya da Kompozit Kazık Grubu		Kolon ya da ayak ile temel arasında ⁴	1
a.Yalnız düşey kazıklar	5		
b.Eğik kazık varsa	3		
Kolon grubu ayak	5		

1. R katsayısı altyapının iki dik aksı için kullanılmalıdır.
2. Perde ayak, zayıf doğrultuda kolon gibi düşünülerek tek kolona ilişkin R katsayısı ile hesaplanabilir. Gerekli etriye şartlarının sağlanması gerekmektedir.
3. Kesme ve eksenel yükü aktarmaya yarayan mekanik gereçlerdir (örneğin mesnetler ve deprem takozu). Katsayılar sadece bağlantı aracı yardımıyla hareketi engellenmiş doğrultuda oluşan kuvvete uygulanmalıdır.
4. Bağlantılar kolonda oluşan plastik mafsala ilişkin en büyük kuvvetlere göre hesaplanabilir Eksenel kuvvete ilişkin bulunan nominal moment kapasitesi, dayanımdaki artış göz önüne alınarak 1.30 ile arttırılmalıdır.

3.6. Hesap Esasları

Köprülerin deprem yükü altındaki hesabında dört farklı çözüm yöntemi verilmektedir:

1. Düzgün yayılı yük yöntemi
2. Tek modlu spektrum çözüm yöntemi (SMSM)
3. Çok modlu spektrum çözüm yöntemi (MMSM)
4. Zaman tanım alanında çözüm yöntemi

Her yöntemde ayakların, kolonların ve kenarayak mesnetlerinin aynı zamanda aynı yer hareketine maruz kaldığı kabul edilmiştir. Hesaplar sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerlerinde, deprem yükü azaltma katsayıları kullanılmayacak ve DPK dan B, C, D için hesaplanacak minimum mesnet genişlikleriyle karşılaştırılacaktır. Bu çalışmada Çok modlu (24 mod) spektrum çözüm yöntemi kullandığı için sadece bu yöntemin açıklaması sunulmuştur. [Barker R. M. 1997]

3.6.1. Çözüm yönteminin seçilmesi

Tek açıklıklı köprülerde ivme katsayısına bağlı olmaksızın ve DPK A'daki tüm köprülerde dinamik hesaba gerek olmadığı belirtilmiştir. Düzenli ya da düzensiz olması fark etmeksizin iki ya da daha fazla açıklığa sahip diğer tüm köprülerde, tek modlu spektrum çözüm yöntemi ya da çok modlu spektrum çözüm yönteminden biri uygulanabilir. Tek modlu spektrum çözüm yöntemi, SPC B, C ve D'deki düzenli köprüler için minimum hesap olarak tayin edilmiştir. Bununla birlikte Çok modlu spektrum hesabı, aynı kategorilerde düzensiz köprüler için minimumdur, Çizelge 3.14 verilen minimum hesaplar yerine daha ayrıntılı sonuç veren zaman tanım alanında çözüm yapılabilir. Düzensiz köprü, iki kenarayak arasında kütlede, rijitlikte ve/ya da geometride ani ve olağandışı bir değişiklik olan köprüye verilmiş tanımdır. Düzenli köprü ise düzensiz köprü tanımı dışındaki köprülerdir. [Barker R. M. 1997]

Çizelge 3.14. Minimum gerekli hesap

Deprem Performans Kategorisi	2-6 açıklıklı düzenli köprüler	2 ya da daha çok açıklı düzensiz köprüler
A	Gerekmez	Gerekmez
B, C, D	Düzgün Yayılı ya SMSM ve ya da MMSM	MMSM

3.6.2. Çok modlu spektrum çözüm yöntemi

Çok modlu spektrum hesabı tüm düzensiz köprülerde yapılmalıdır. Geometrisi düzgün olmayan köprülerde, modları basitleştirmek mümkün olmadığı gibi, toplam etkiyi elde etmek için birden fazla titreşim modunun hesaba katılması gerekmektedir. Enine ve boyuna titreşim modlarının etkileşimini göz önüne alabilecek üç boyutlu çerçeve çözümüne dayalı bir bilgisayar programı kullanılmalıdır.

Köprü taşıyıcı sistemi, yapının tüm rijitlikleri ve atalet etkileri göz önüne alınarak üç boyutlu olarak modellenmelidir. Her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesi olmalıdır. Yapı kütlesi en az üç öteleme yönünde tanımlanmalıdır. Yapıya ilişkin tüm elemanların kütlesi hesaba katılmalıdır. Genellikle hareketli yüklerin atalet etkileri hesaba alınmamaktadır. Ancak yoğun trafiğin olduğu büyük şehirlerde hareketli yükün zati yüklere oranı yüksek olmaktadır. Bu durumlarda hareketli yük dahil edilebilir. Üstyapı çubuk elemanları, birleşim ve mesnet noktaları dışında en az dörtte bir noktalarında tanımlı düğüm noktaları ile modellenmelidir. Derzler ve deprem takozları uygun rijitlikteki birkaç elemanla temsil edilebilir. Orta kolon ve ayaklar da çubuk eleman olarak modellenmelidir. Kısa ve rijit ayaklarda orta düğüm noktaları gerekmektedir. Uzun ve esnek ayakların üçte bir noktalarında düğüm noktaları tanımlanmalıdır. Modelde kolonların üstyapıya göre dışmerkezliliği oluşturulmalıdır. Temel zemini koşulları istenirse ayak altlarında ve kenarayaklarda eşdeğer doğrusal yaylarla tanımlanabilir. Periyodlar ve mod şekilleri, mesnetli taşıyıcı sistemin kütle ve elastik rijitliği kullanılarak bulunmaktadır. En az açıklık katsayısının 3 katı ve en çok 25 mod göz önüne alınarak çözüm yapılmalıdır. Eleman iç kuvvetleri ve yerdeğiştirmeleri, mod etkilerinin tam karesel birleştirme Kuralıyla (CQC) birleştirilmesiyle bulunmaktadır. [AASHTO, 2002]

3.7. Deprem Yük Hesabı

Köprünün yapıldığı bölgenin zemin sınıfı TİP III (AASHTO 3.5). yer ivme katsayısı $A = 0.2g$ (3.Derece Deprem Bölgesi) olarak belirlenmiştir. Tekil kolonların deprem yükü azaltma katsayıları AASHTO’da $R=1$ olarak verilmiştir, (Çizelge 3.15) Deprem yüklemeleri için kurulan modelde bütün elemanlar gerçek kesit özellikleri kullanılarak modellenmiştir. Bu elemanları birbirine bağlamak için rijit elemanlar kullanılmıştır. Prekast kiriş altı Elastomer mesnetler ise LINK elemanları kullanılarak modellenmiştir. [AASHTO, 2002]

3.7.1 Spektrum eğrisi

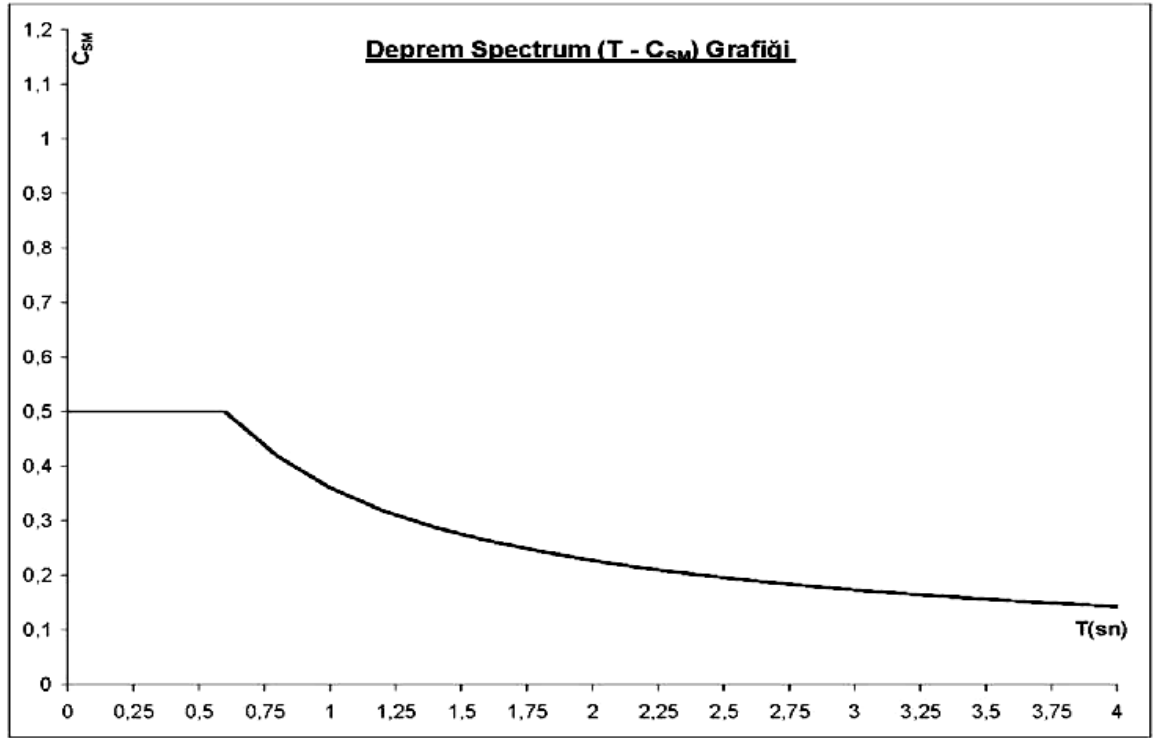
Spektrum eğrisi, AASHTO şartnamesinde belirtildiği gibi oluşturulmuştur, ivme katsayısı ve zemin etkisi spektrumda göz önüne alınarak deprem davranış katsayısı formül 3.4 ile hesaplanmıştır ve formül 3.5 şartını sağladıktan sonra formül 3.6 yı göz önüne alarak köprüye ait ($T_m - a$) ve deprem spectrum grafiği ($T_m - C_{sm}$) çizilmiştir. [AASHTO, 2002]

Çizelge 3.15. Zemin profil tip III için spektrum eğrisinde kullanılan değerler

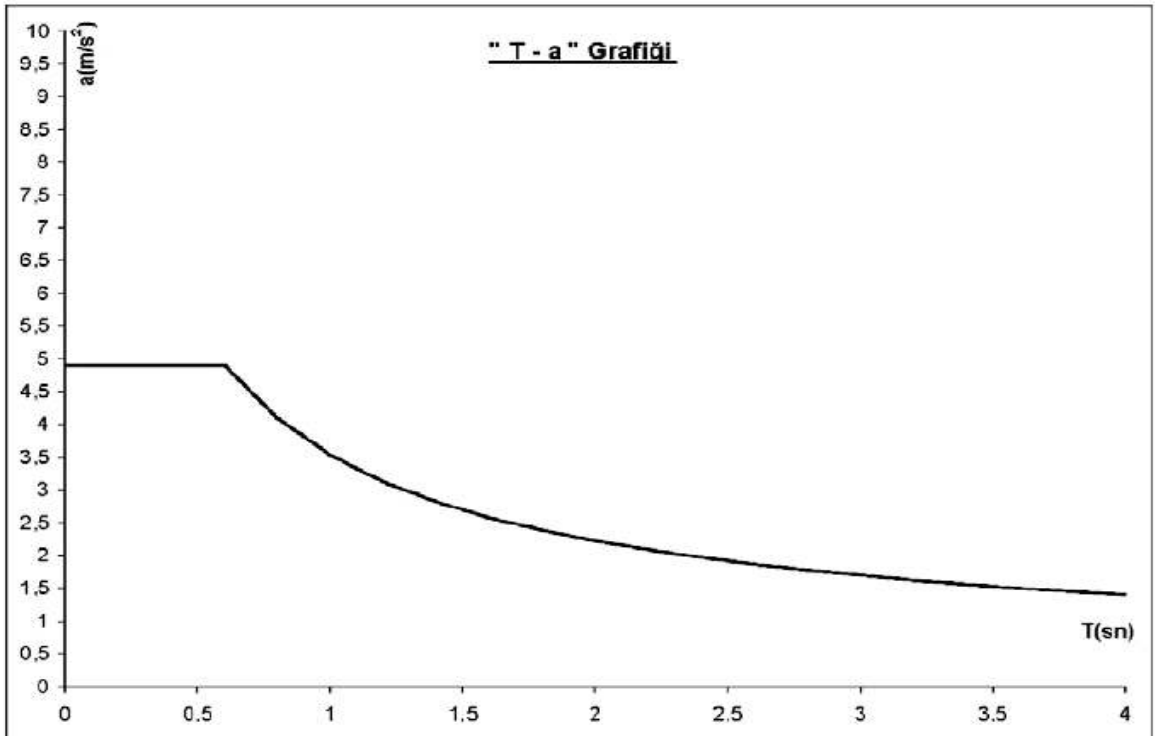
Bölge katsayısı	S	1.5
İvme Katsayısı	A	0.20
Sismic kategori	SPC	A
Titreşim modunun periyodu	T_m	S_n
Yerçekim ivme	g	9.81
Sönüm katsayısı	D	%5
Azaltma katsayısı	R	1
İvme	a	m/s^2

$$C_{sm} \geq 2.5 A \quad (3.5)$$

$$a = g \cdot C_{sm} \quad (3.6)$$



Şekil. 3.10. Deprem spektrum grafiği

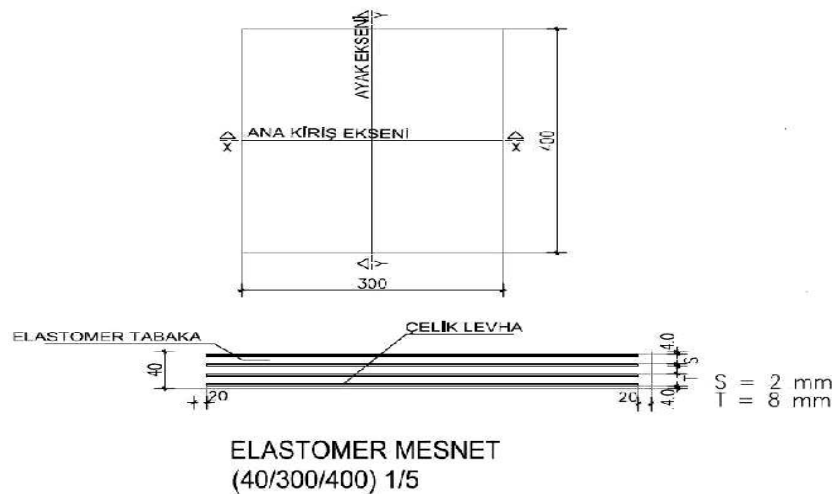


Şekil3.11. ($T_m - a$) grafiği

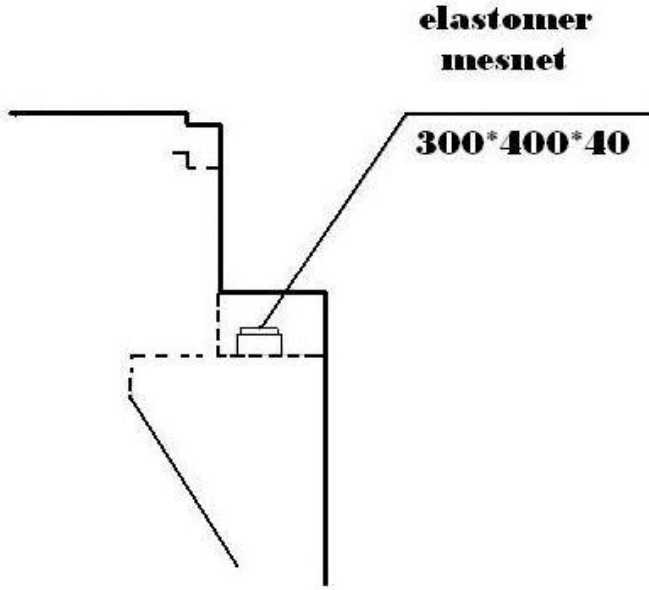
3.8. Elastomer Mesnetler

Elastomer mesnetler, köprü tasarımında üstyapı ve köprü ayakları arasındaki bağlantıyı sağlayıp moment aktaracak biçimde ya da basit mesnetli olabilir. Türkiye’de çoğunlukla prekast kirisli betonarme köprülerin üstyapıları elastomer mesnetli olarak tasarlanmaktadır. Elastomer köprü mesnetleri, kısmen ya da tamamen elastomerden üretilmiş, köprü ile ona mesnetlik yapan yapı arasında yüklerin iletilmesi ve yerdeğiştirmelerin sınırlandırılması kontrol edilmesi amacıyla yapı da kullanılır. Elastomer mesnetli köprülerin en büyük üstünlüğü, üstyapının deprem durumunda kolonlardan aktarılan momentlere maruz kalmamasıdır. Elastomer mesnet en basit ve ekonomik mesnet tiplerinden biridir. Çelik plakalarla güçlendirilmiş elastomerler, öngerilmeli kirisli köprü sistemlerinde ekonomi ve kolay üretim üstünlükleriyle tercih edilmektedirler. [Polat, 1998]

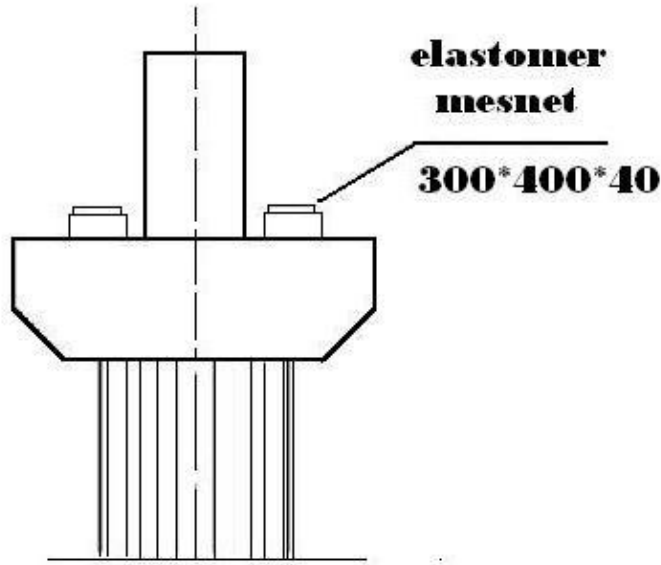
Güçlendirilmiş mesnetler çelik plakaların tabakalı olarak elastomer katmanları arasına yapıştırılmasıyla üretilmektedir, Şekil 3.5 Vulkanizasyon adı verilen bu işlem özel kurutma dolaplarında yüksek ısı ve basınç altında yapılmaktadır. Birleşen elastomerlerin maddesi doğal kauçuk (polyisoprene) ya da neopren (polychloroprene) adı verilen sentetik kauçuktur. İç plakalara ek olarak, mesnetlerin altına ve üstüne çelik yük plakaları eklenebilir. [Polat, 1998]



Şekil 3.12. Modellerde kullanılan elastomer mesnet



Şekil 3.13.Modellerde kenar ayak üst yapı ile altyapı arasındaki bağlantı



Şekil 3.14.Modellerde orta ayak üst yapı ile altyapı arasındaki bağlantı

3.8.1 Elastomer mesnet özellikleri

Köprüde kullanılan elastomerin tipi Şekil 3.12, 3.13 ve 3.14'de ve özellikleri tablo 3.16'de verilmiştir.

Çizelge 3.16.Elastomer mesnet özellikleri

Toplam elastomer mesnet sayısı	n	1
Elastomer mesnet genişliği	a	0.400 m
Elastomer mesnet boyu	b	0.300 m
Elastomer mesnet yüksekliği	h	0.040 m
Elastomer tabakaların toplam kalınlığı	t_r	0.032 m
Dış elastomer tabakası sayısı	adet	2
İç elastomer tabakası sayısı	adet	3
Dış elastomer tabakası kalınlığı (tek tabaka)	t_{dış}	0.00400 m
İç elastomer tabakası kalınlığı (tek tabaka)	t_{iç}	0.00800 m
Şekil faktörü {S_{dış} = a . b / (2 . t_{dış} . (a+b))}	S_{dış}	21.429
Şekil faktörü {S_{iç} = a . b / (2 . t_{iç} . (a+b))}	S_{iç}	10.714
Ortalama şekil faktörü	S_o	16.071
Elastomer mesnet sertlik sabiti	k	0.6
Kayma modülü	G	1000 kN/m ²
Sıkışma elastisite modülü { E_c = 6 . G . S_o² }	E_c	1076234.694 kN/m ²
Bir elastomer mesnetin yüzey alanı	A	0.120 m ² /adet
Efektif mesnet atalet momenti (i₂₂)	I₂₂	0.0009000 m ⁴ /adet
Efektif mesnet atalet momenti (i₃₃)	I₃₃	0.0016000 m ⁴ /adet
Burulma sabiti(i₁₁)	I₁₁	0.0019434 m ⁴ /adet
Yoğunluk	γ	30.000 kN/m ³
Ağırlık	W	0.115 kN
Yerçekimi ivmesi	g	9.807 m /sec ²
Kütle	m	0/011747 kNsec ² /m
Poisson oranı	ν	0.450
Kütle yoğunluğu (ρ=γ/g)	ρ	3.059039 kNsec ² /m ⁴

Köprü tasarımında elastomer mesnetin etkisi projenin başlangıcından sonuna kadar dikkatle incelenmelidir. Üretici firmanın elastomer mesnet üstünde uyguladığı test sonuçlarının kullanılması önemlidir. Başka bir deyişle elastomerin deprem davranışındaki etkisinin testlerle kanıtlanması gerekmektedir. Programda link elemanı olarak modellenen elastomerin düşey (K_1), yatay (K_2, K_3), burulma (K_{R1}) ve dönme (K_{R2}, K_{R3}) rijitlikleri Çizelge 3.18 'de verilen özellik ve efektif kayma modülünü kullanarak denklem 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 'de hesaplanmıştır:

$$K_1 = EA / t_r \quad \dots\dots\dots 4035794.005 \text{ kN/m} \quad (3.7)$$

$$K_2 = GA / t_r \quad \dots\dots\dots 3750.000 \text{ kN/m} \quad (3.8)$$

$$K_3 = GA / t_r \quad \dots\dots\dots 3750.000 \text{ kN/m} \quad (3.9)$$

$$K_{R1} = G I_{11} / t_r \quad \dots\dots\dots 60.732 \text{ kN/m} \quad (3.10)$$

$$K_{R2} = E_c I_{22} / t_r \quad \dots\dots\dots 30268.455 \text{ kN/m} \quad (3.11)$$

$$K_{R3} = E_c I_{33} / t_r \quad \dots\dots\dots 53810.587 \text{ kN/m} \quad (3.12)$$

Elastomerin doğrusal olmayan davranışından dolayı yukarıda hesaplanan değerler efektif rijitliktir. SAP2000'de link elemanı 6 yöndeki serbestliği tek eleman ile tanımlanmaktadır. Elastomer, köprü boyuna doğrultusundaki ve düşeydeki yerdeğiştirmeye karşı 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 ve 3.12'de verilen değerler doğrultusunda mesnetlik yapacaktır, Şekil 3.5 Köprü, enine doğrultuda ise deprem takozları ile mesnetlidir. Bu etkiler link modelinde göz önüne alınacaktır.

3.9. Yükleme Kombinasyonları

Yükleme kombinasyonları aşağıda açıklanan yükler ve etkiler gözetilerek, bölüm 3.9.1 de verilen katsayıları kullanılarak yapılmıştır. [Tahouni, 2004]

Çizelge 3.17. Yüklerin adı

DL	Ölü yükler
LL	Hareketli yük
LF	Fren yükü
E	Toprak yükleri
RST	Rötre + Sünme + Sıcaklık
W	Rüzgar yükü (köprü boş)
WL	Rüzgar yükü (köprü dolu)
EQ_x	Köprü boyuna yönde deprem
EQ_y	Köprü enine yönde deprem

3.9.1. Orta ayak yükleme kombinasyonları

Çizelge 3.18. Kullanım yüküne göre orta ayak yükleme kombinasyonları

COMB 1	$1.0 \text{ DL} + 1.0 \text{ LL} + 1.0 \text{ E}$
COMB 2	$1.0 \text{ DL} + 1.0 \text{ E} + 1.0 \text{ W}$
COMB 3	$1.0 \text{ DL} + 1.0 \text{ LL} + 1.0 \text{ E} + 0.3 \text{ W} + 1.0 \text{ WL} + 1.0 \text{ LF}$
COMB 4	$1.0 \text{ DL} + 1.0 \text{ LL} + 1.0 \text{ E} + 1.0 \text{ RST}$
COMB 5	$1.0 \text{ DL} + 1.0 \text{ E} + 1.0 \text{ W} + 1.0 \text{ RST}$
COMB 6	$1.0 \text{ DL} + 1.0 \text{ LL} + 1.0 \text{ E} + 0.3 \text{ W} + 1.0 \text{ WL} + 1.0 \text{ LF} + 1.0 \text{ RST}$
COMB 7	$1.0 \text{ DL} + 1.0 \text{ E} + 1.0 \text{ EQ}_x + 0.3 \text{ EQ}_y$
COMB 8	$1.0 \text{ DL} + 1.0 \text{ E} + 0.3 \text{ EQ}_x + 1.0 \text{ EQ}_y$

Çizelge 3.19. Faktörlü yüke göre orta ayak yükleme kombinasyonları

COMB 9	1.3 (1.0 DL + 1.67 LL + 1.0 E)
COMB 10	1.3 (1.0 DL + 1.0 E + 1.0 W)
COMB 11	1.3 (1.0 DL + 1.0 LL + 1.0 E + 0.3 W + 1.0 WL + 1.0 LF)
COMB 12	1.3 (1.0 DL + 1.0 LL + 1.0 E + 1.0 RST)
COMB 13	1.25 (1.0 DL + 1.0 E + 1.0 W + 1.0 RST)
COMB 14	1.25 (1.0 DL + 1.0 LL + 1.0 E +0.3 W + 1.0 WL + 1.0 LF + 1.0 RST)

3.9.2. Kenar Ayak Yükleme Kombinasyonları

Çizelge 3.20. Kullanım yüküne göre kenar ayak yükleme kombinasyonları

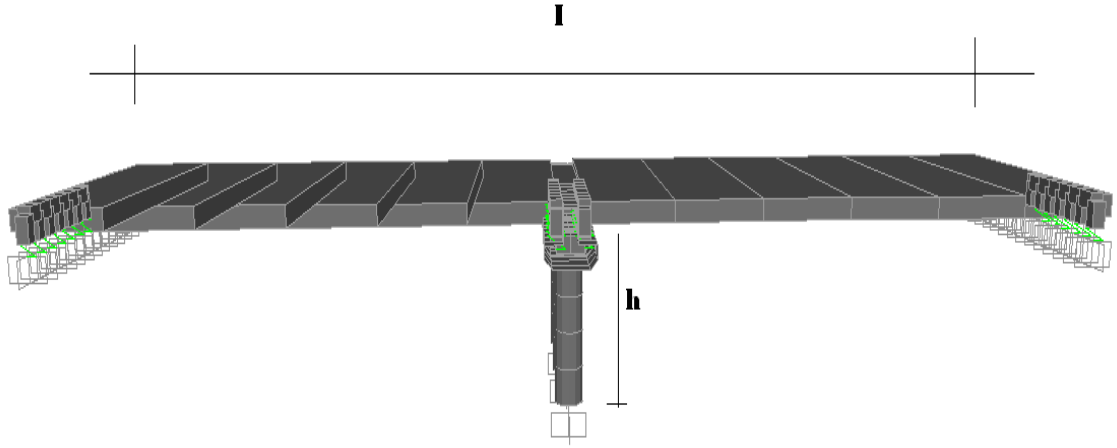
COMB 1	1.0 DL + 1.0 LL + 1.0 E
COMB 2	1.0 DL + 1.0 E + 1.0 W
COMB 3	1.0 DL + 1.0 LL + 1.3 E + 0.3 W + 1.0 WL + 1.0 LF
COMB 4	1.0 DL + 1.0 LL + 1.3 E + 1.0 RST
COMB 5	1.0 DL + 1.0 E + 1.0 W + 1.0 RST
COMB 6	1.0 DL + 1.0 LL + 1.3 E +0.3 W + 1.0 WL + 1.0 LF + 1.0 RST
COMB 7	1.0 DL + 1.0 E + 1.0 EQ _X + 0.3 EQ _Y
COMB 8	1.0 DL + 1.0 E + 0.3 EQ _X + 1.0 EQ _Y

Çizelge 3.21. Faktörlü yüke göre kenar ayak yükleme kombinasyonları

COMB 9	1.3 (1.0 DL + 1.67 LL + 1.3 E)
COMB 10	1.3 (1.0 DL + 1.3 E + 1.0 W)
COMB 11	1.3 (1.0 DL + 1.0 LL + 1.3 E + 0.3 W + 1.0 WL + 1.0 LF)
COMB 12	1.3 (1.0 DL + 1.0 LL + 1.3 E + 1.0 RST)
COMB 13	1.25 (1.0 DL + 1.3 E + 1.0 W + 1.0 RST)
COMB 14	1.25 (1.0 DL + 1.0 LL + 1.3 E +0.3 W + 1.0 WL + 1.0 LF + 1.0RST)

4. MODELLEMELER

Bu bölüm de üç farklı açıklıklı betonarme köprü modellerin SAP 2000 çıktıları sunulmuştur. Şekil 4.1 de yapının açıklık ve yüksekliği gösterilmektedir. Çizelge 4.1,de ise modellerin detaylı bilgileri bulunmaktadır. Tüm modellerde tabliyeler aynı seçilmektedir.



Şekil 4.1. Model Sap2000’de açıklık ve yükseklik gösterisi

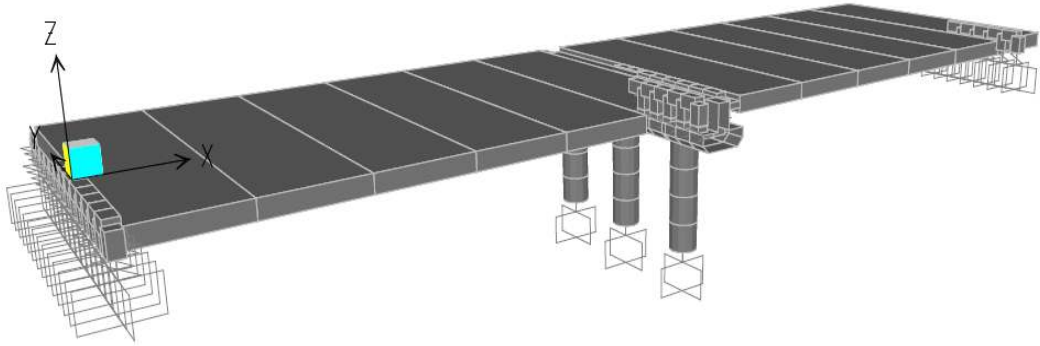
Çizelge 4.1. model tanımları

Model Adı	Uzunluk (I) [m]	Yükseklik (h) [m]
Model 1	45.50	5.39
Model 2	65.50	5.39

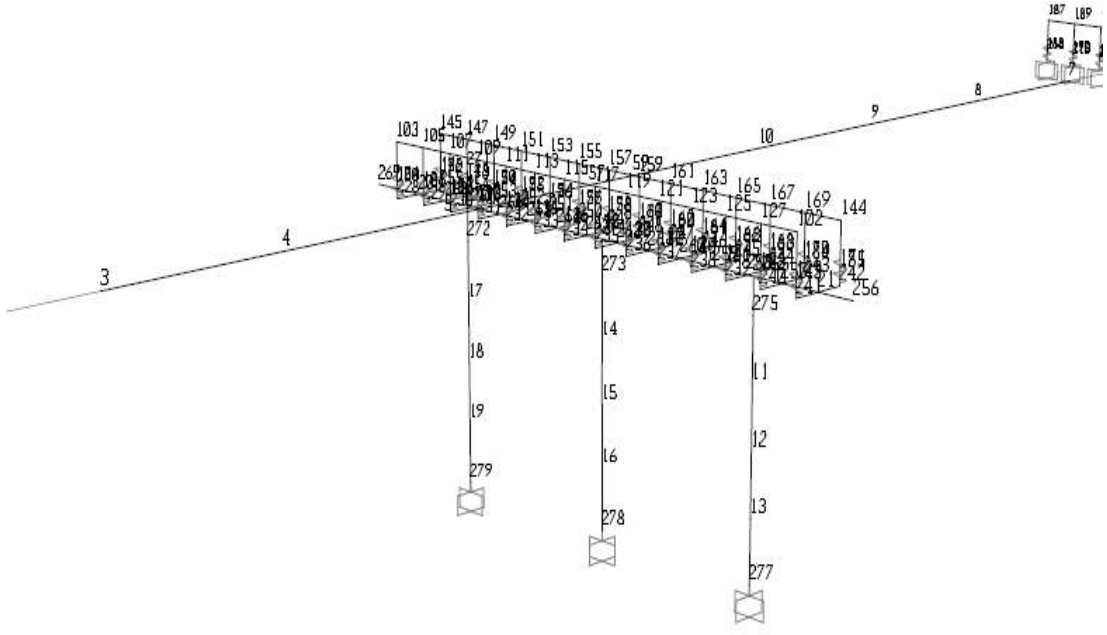
Model 3	75.50	5.39
----------------	-------	------

4.1. Model 1

Model 1, 45.50 metre açıklığında ve 5.39 metre yüksekliğindedir.

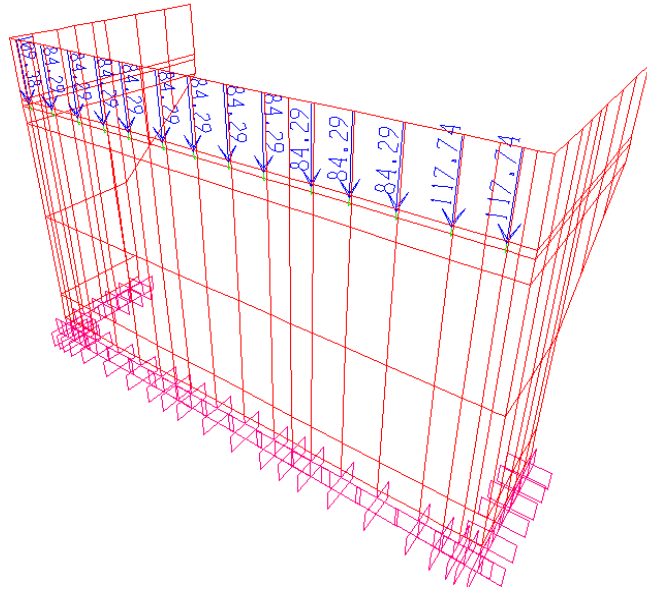


Şekil 4.2. Model 1 perspektif görünümü

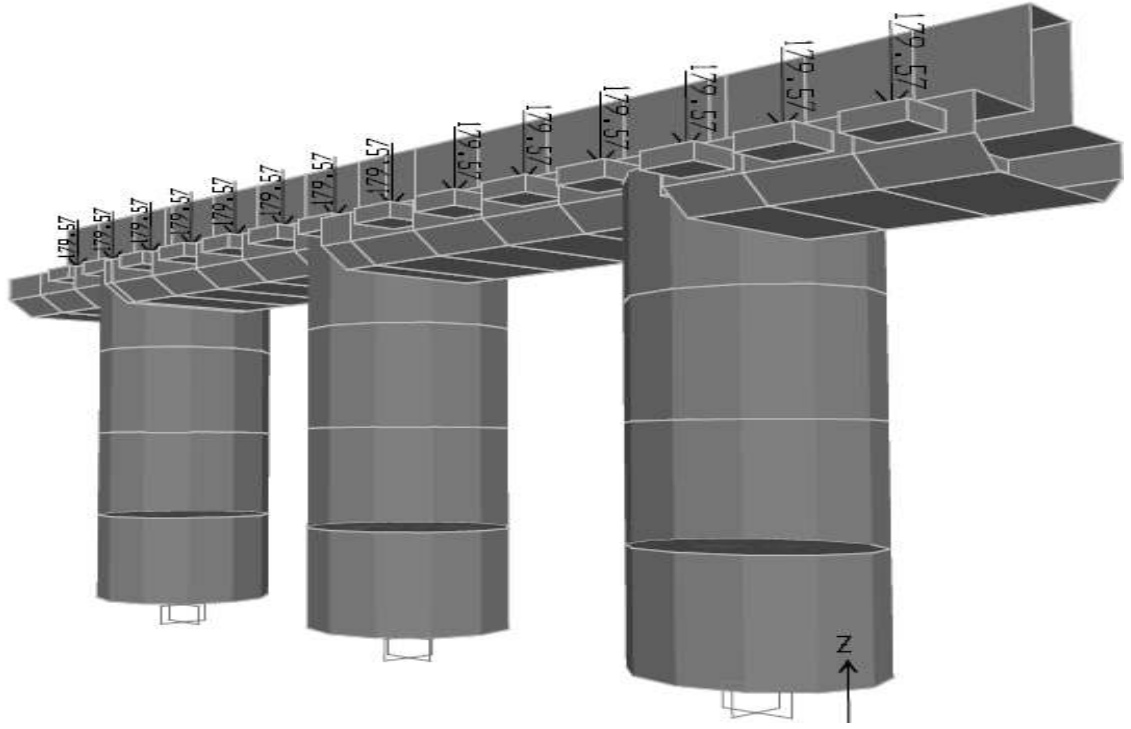


Şekil 4.3. Model 1 eleman numaraları görüntüsü

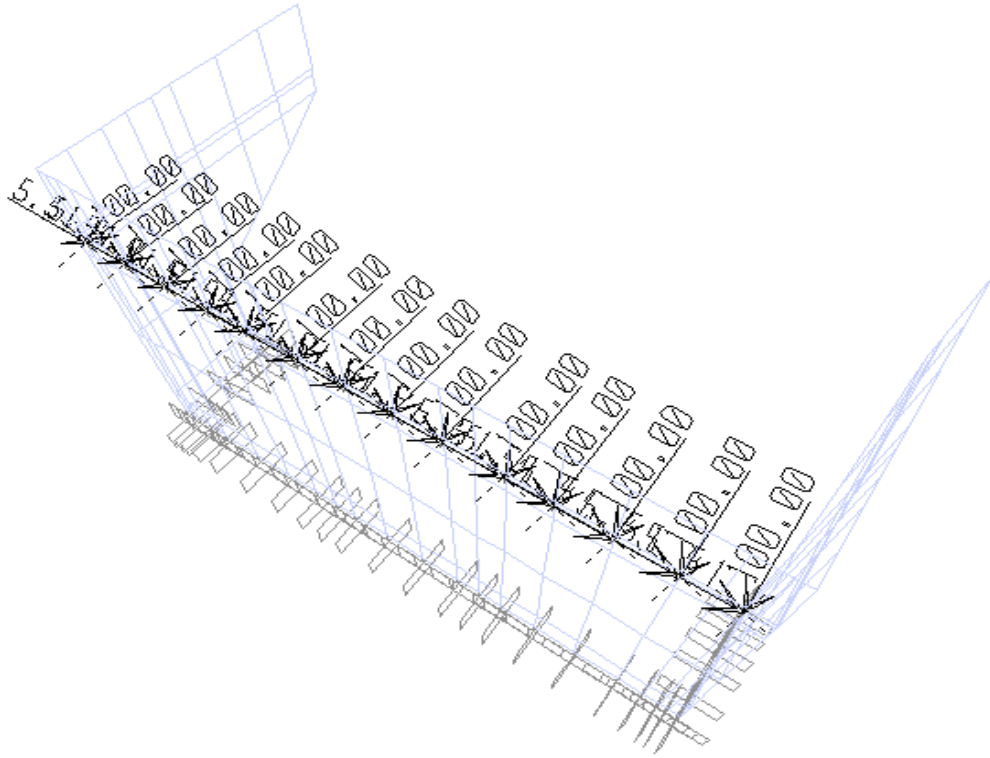
4.1.1. Model 1 yükleme görünüşleri



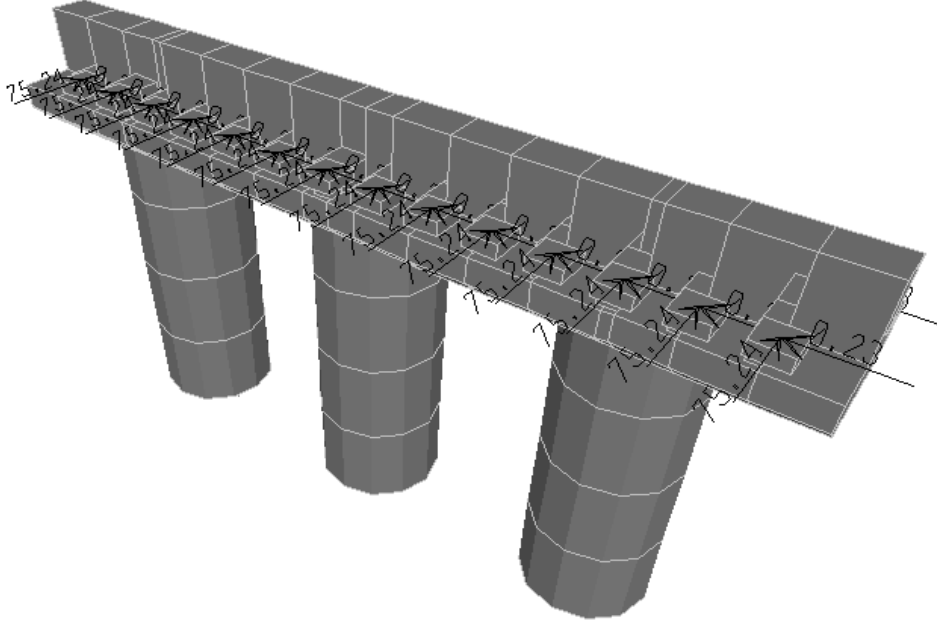
Şekil 4.4 Model 1 kenar ayak hareketli yük yükleme



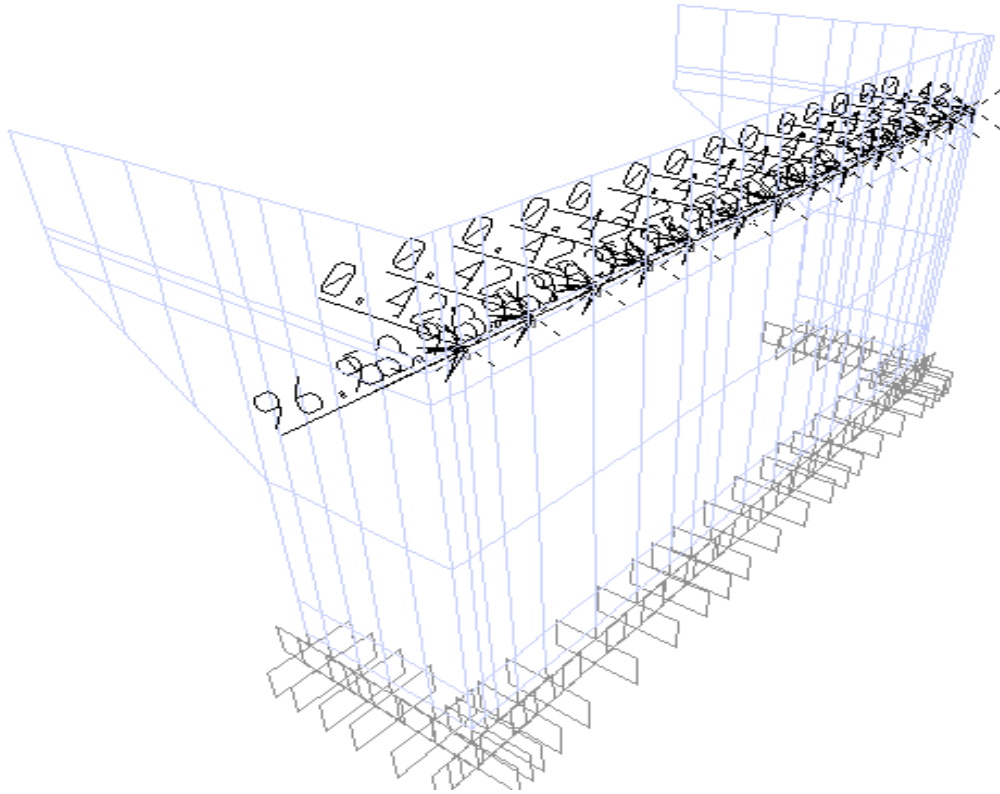
Şekil 4.7. Model 1 orta ayak ölü yük görüntüsü

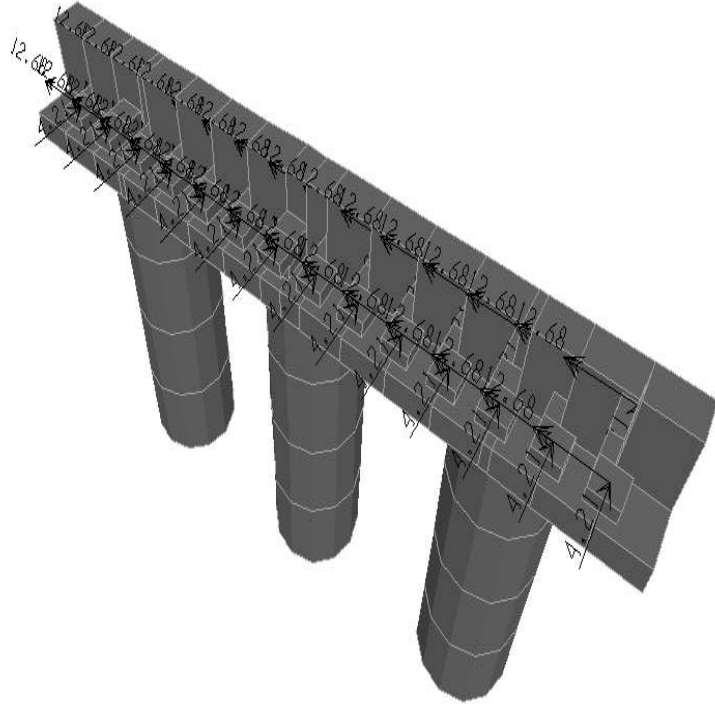


Şekil 4.8. Model 1 kenar ayak deprem yükü X- yönünde

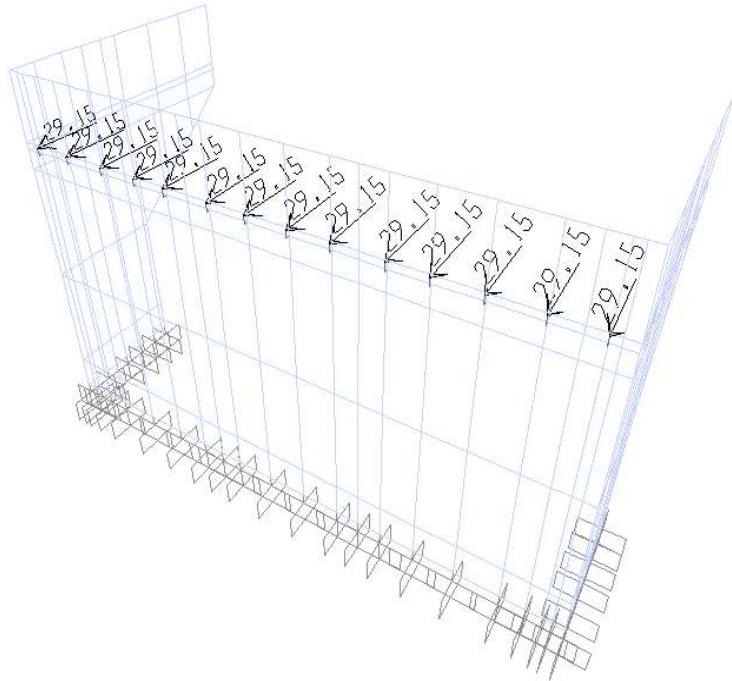


Şekil 4.9. Model 1 orta ayak deprem yükü X- yönünde



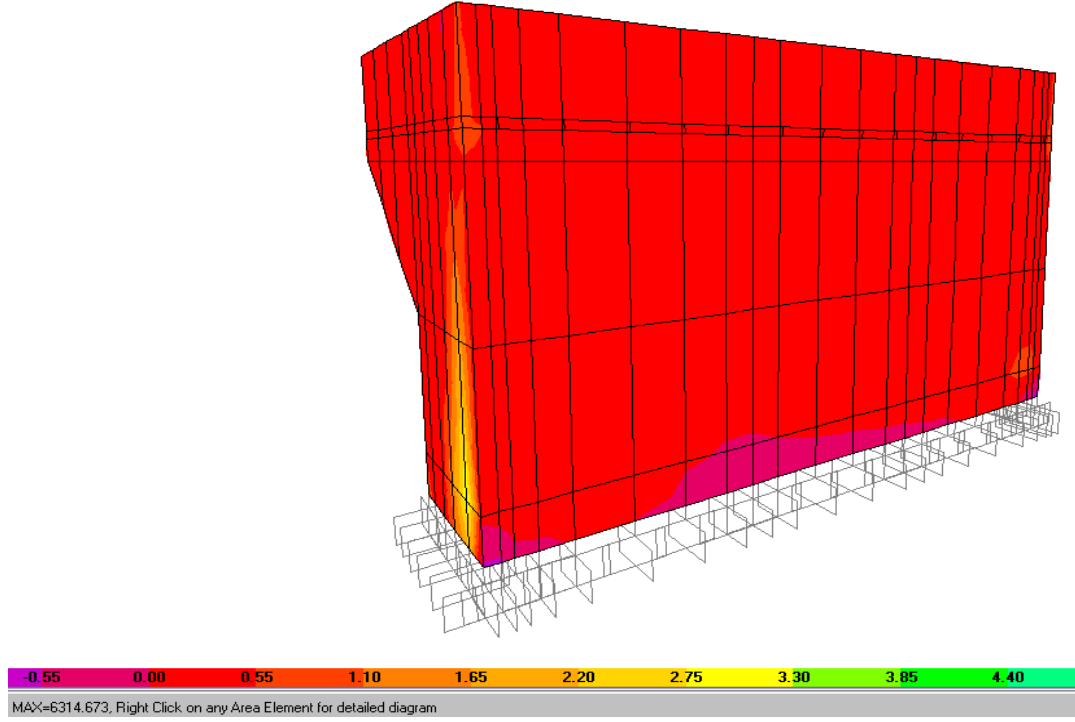


Şekil 4.13. Model 1 orta ayak fren yükü



Şekil 4.14. . Model 1 kenar ayak RST yükü

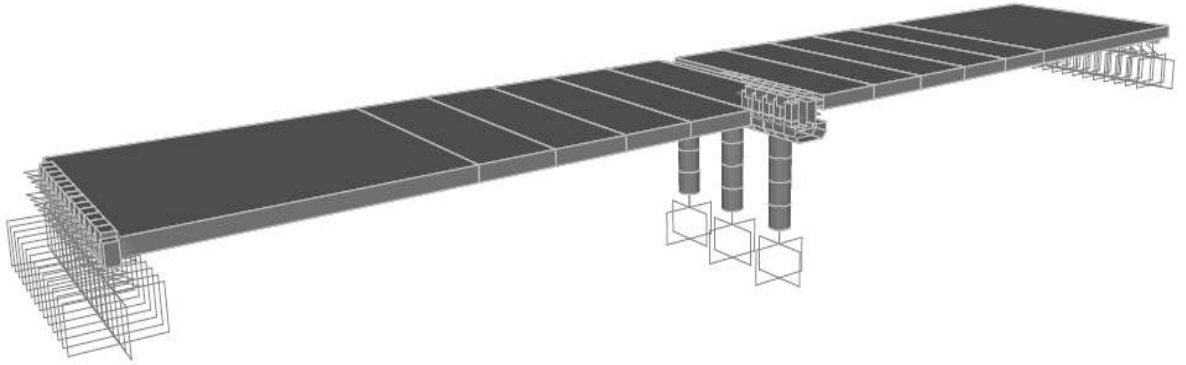
Şekil 4.16. Model 1,2 ve 3, modelin eleman numaraları görüntüsü



Şekil 4.17. Model 1 kenar ayak maksimum yük (envelop)

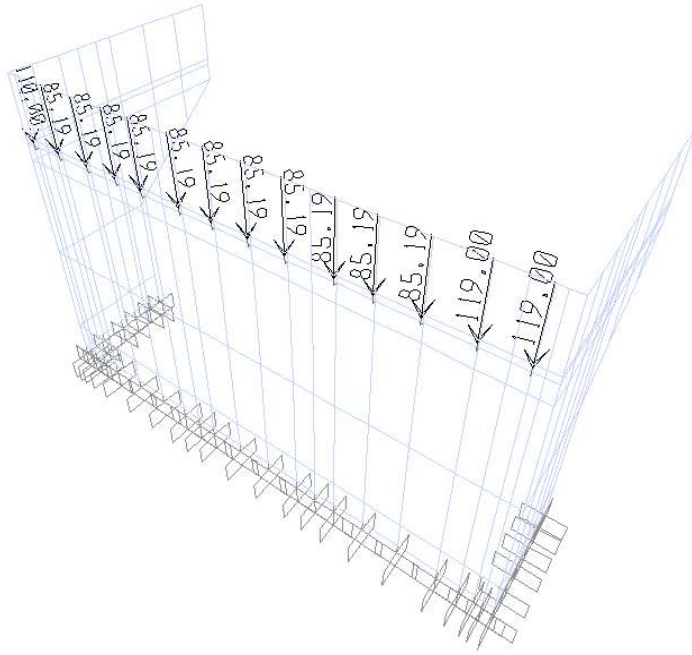
4.2. Model 2

Model 2, 65.50 metre açıklığında, 5.39 metre yüksekliğindedir.

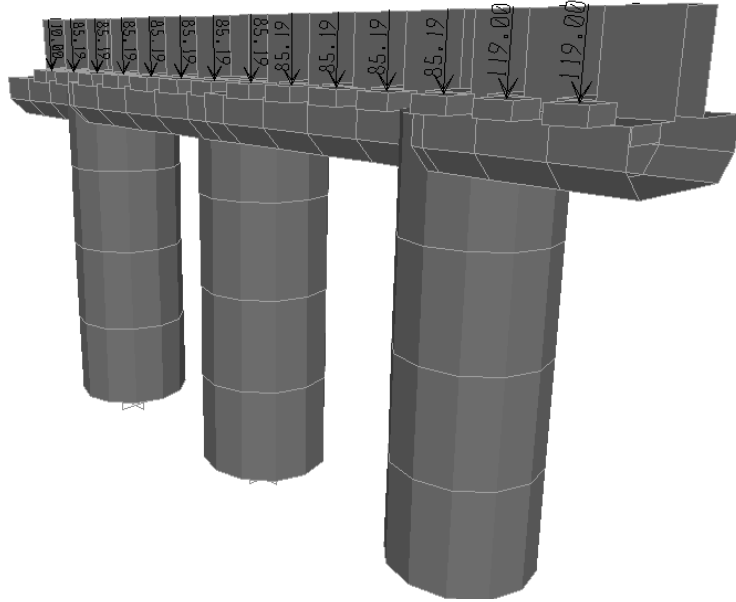


Şekil 4.18. Model 2 perspektif görünümü

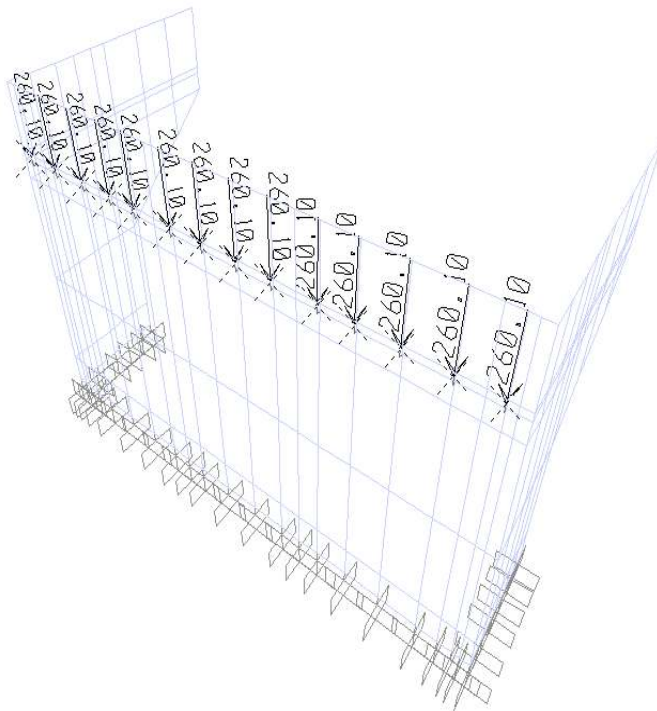
4.2.1. Model 2 yükleme görünüşleri



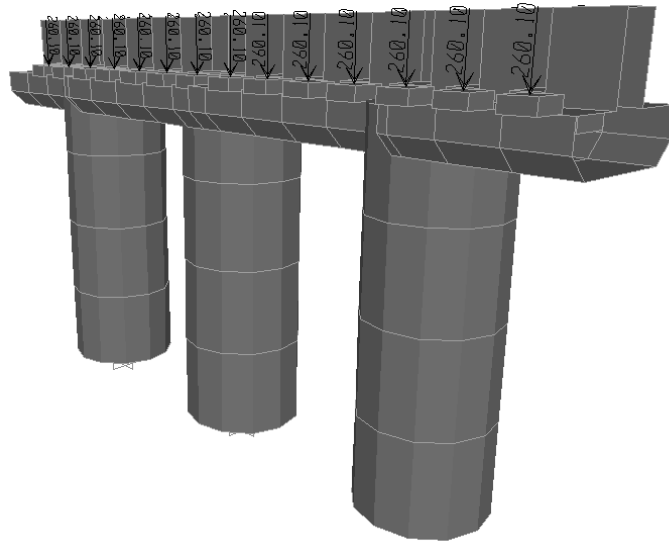
Şekil 4.19 Model 2 kenar ayak hareketli yük yüklemesi



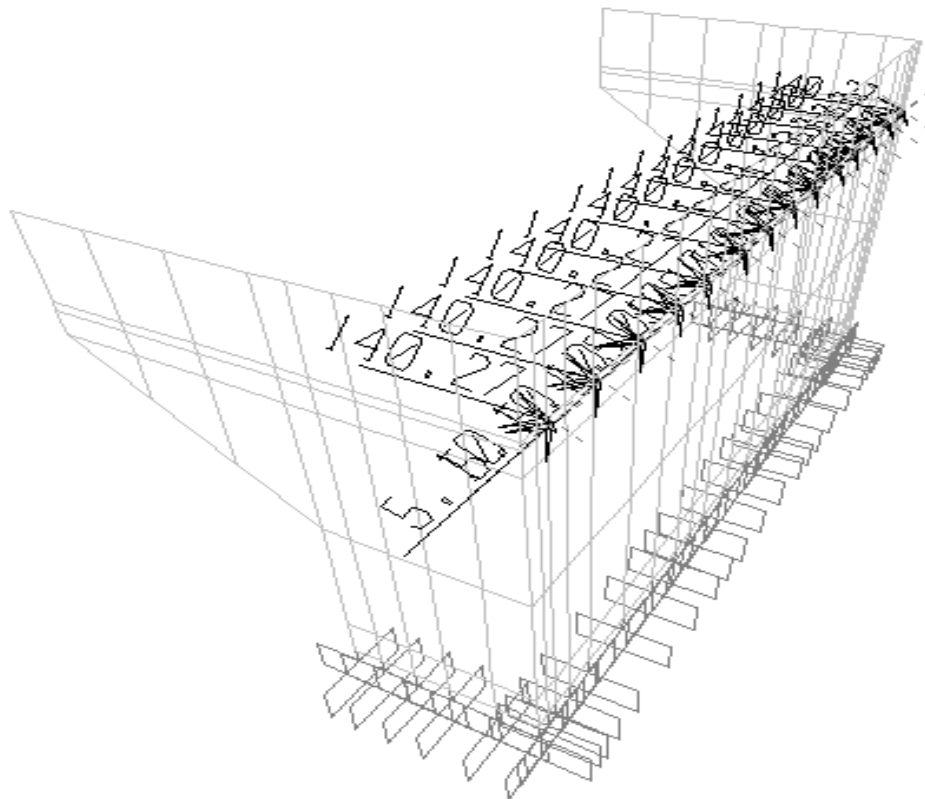
Şekil 4.20 Model 2 orta ayak hareketli yük yükleme



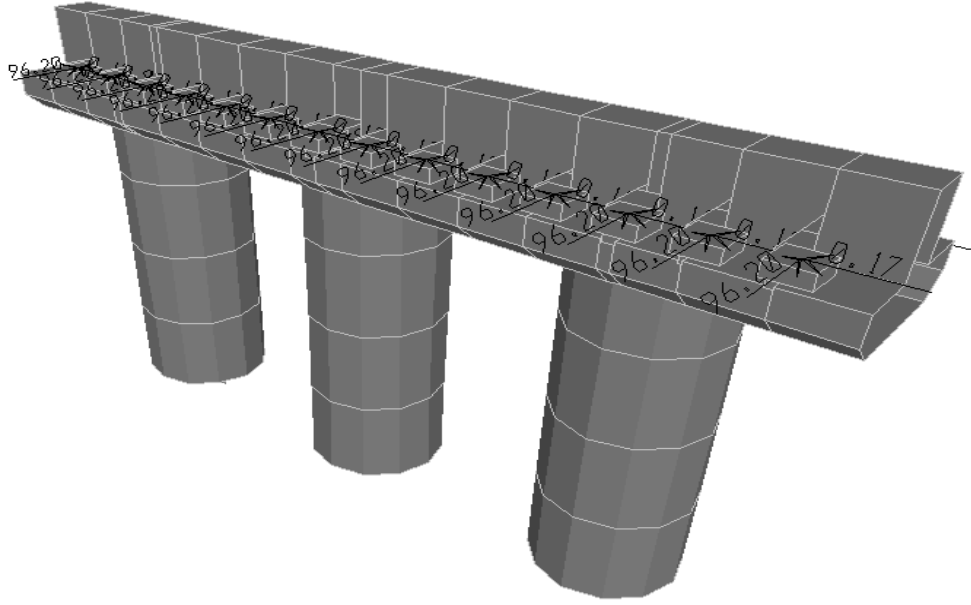
Şekil 4.21. Model 2 kenar ayak ölü yük görüntüsü



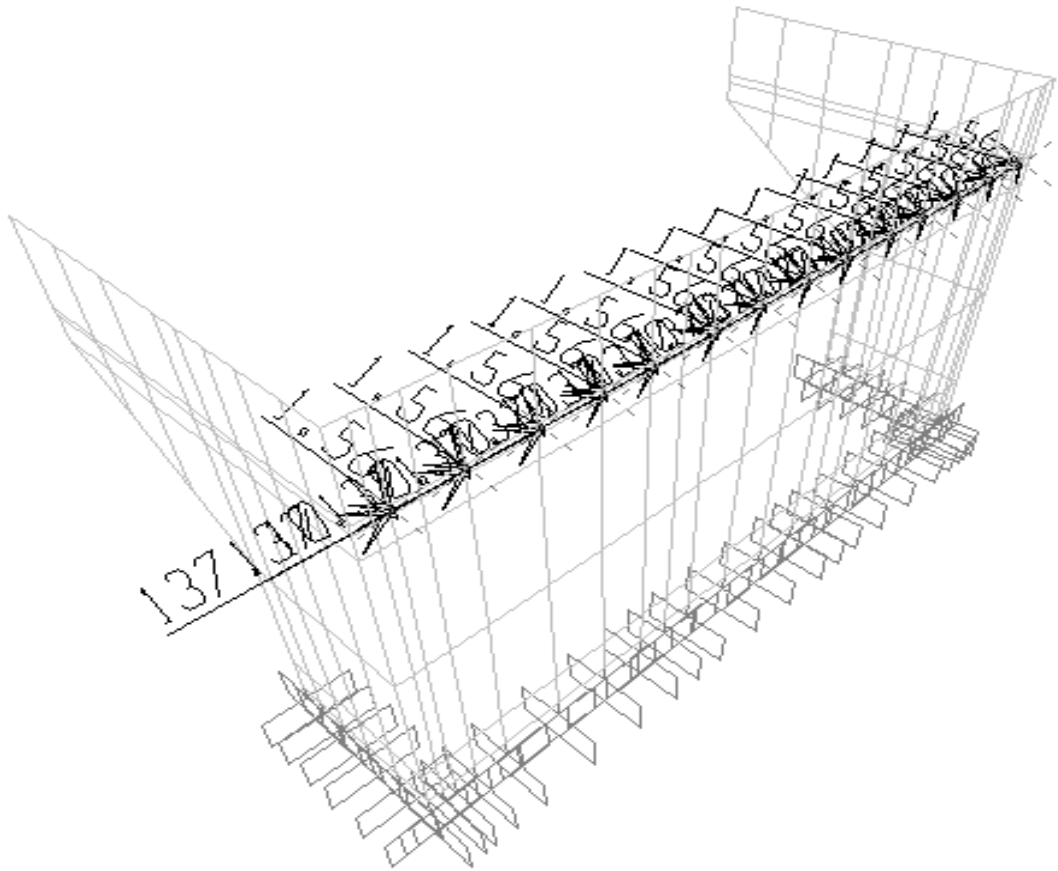
Şekil 4.22. Model 2 orta ayak ölü yük görüntüsü



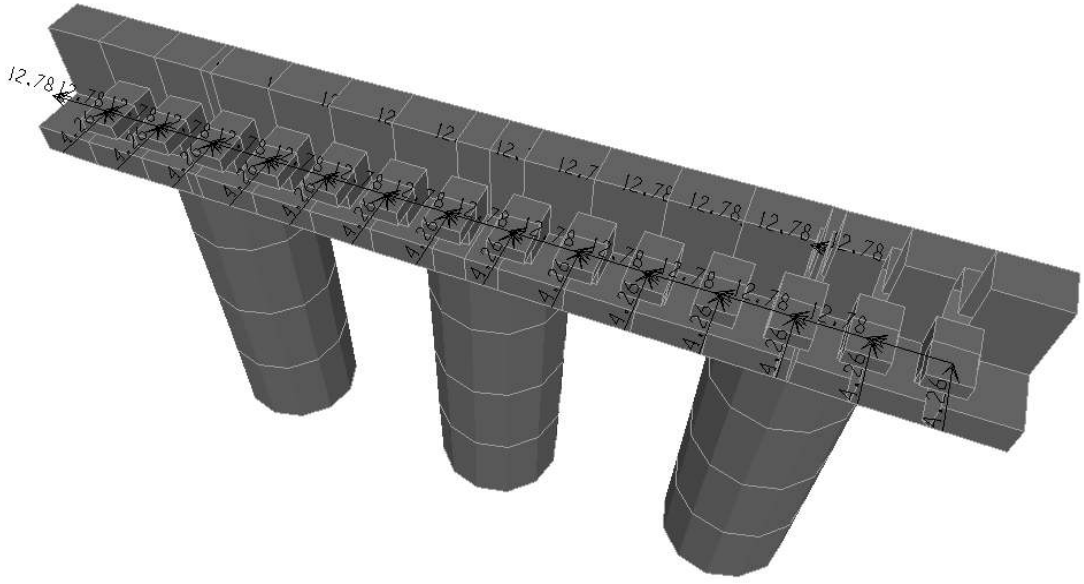
Şekil 4.23. Model 2 kenar ayak deprem yükü X- yönünde



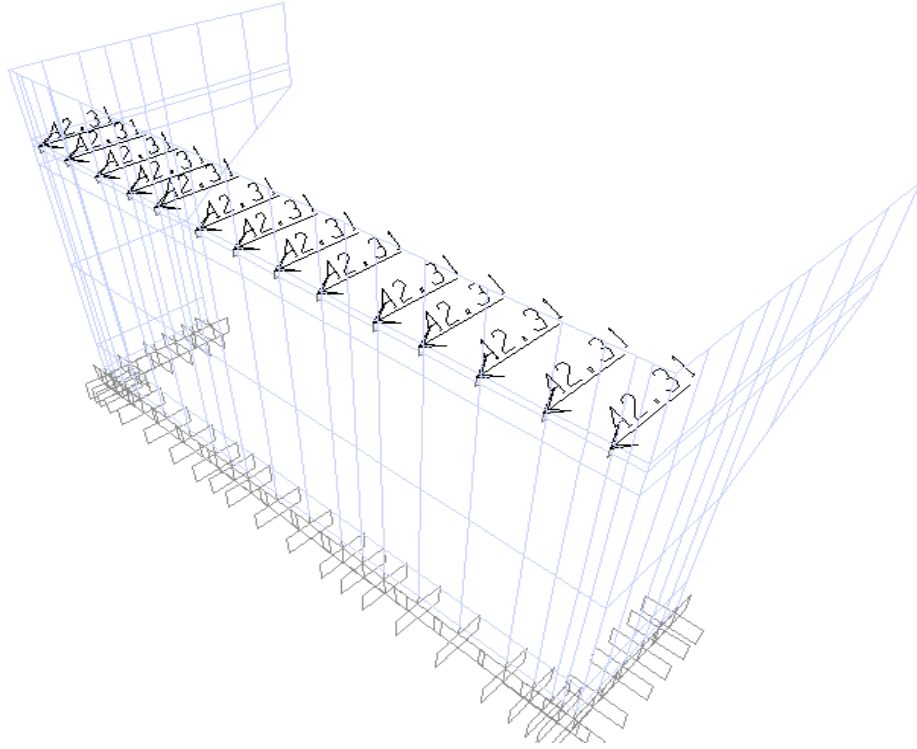
Şekil 4.24. Model 2 orta ayak deprem yükü X- yönünde



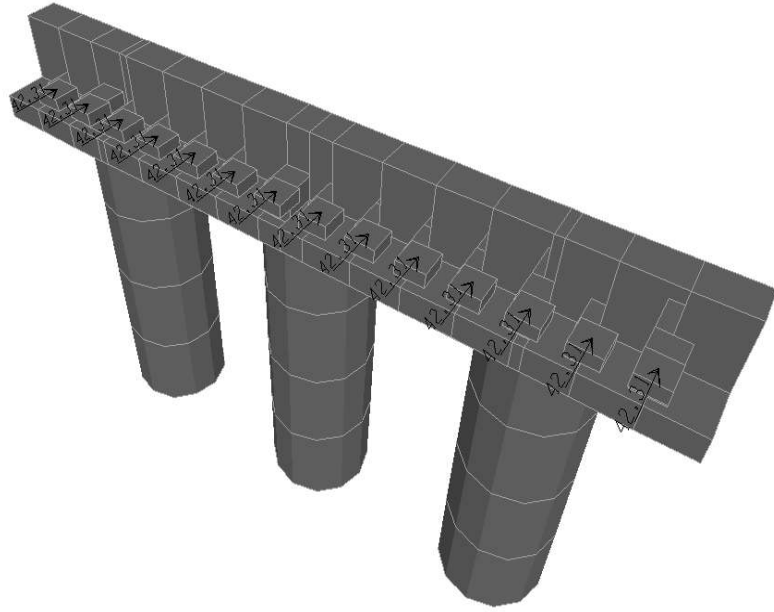
Şekil 4.25. Model 2 kenar ayak deprem yükü Y- yönünde



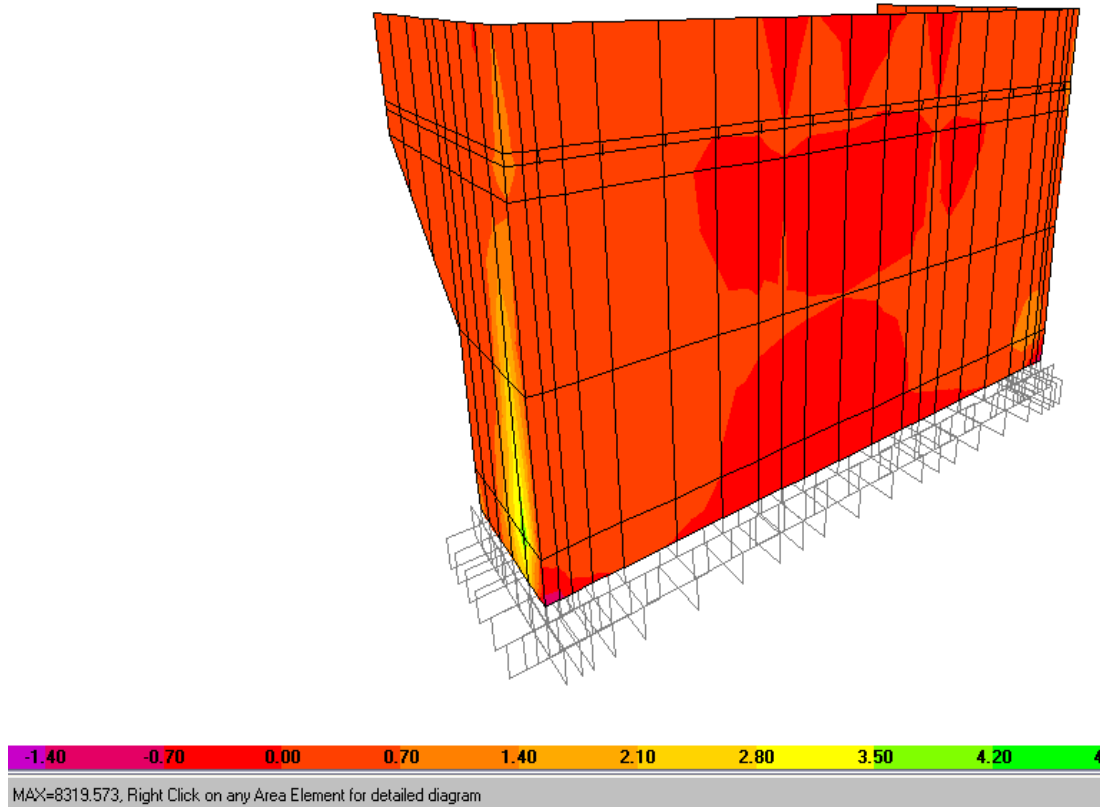
Şekil 4.28. Model 2 orta ayak fren yükü



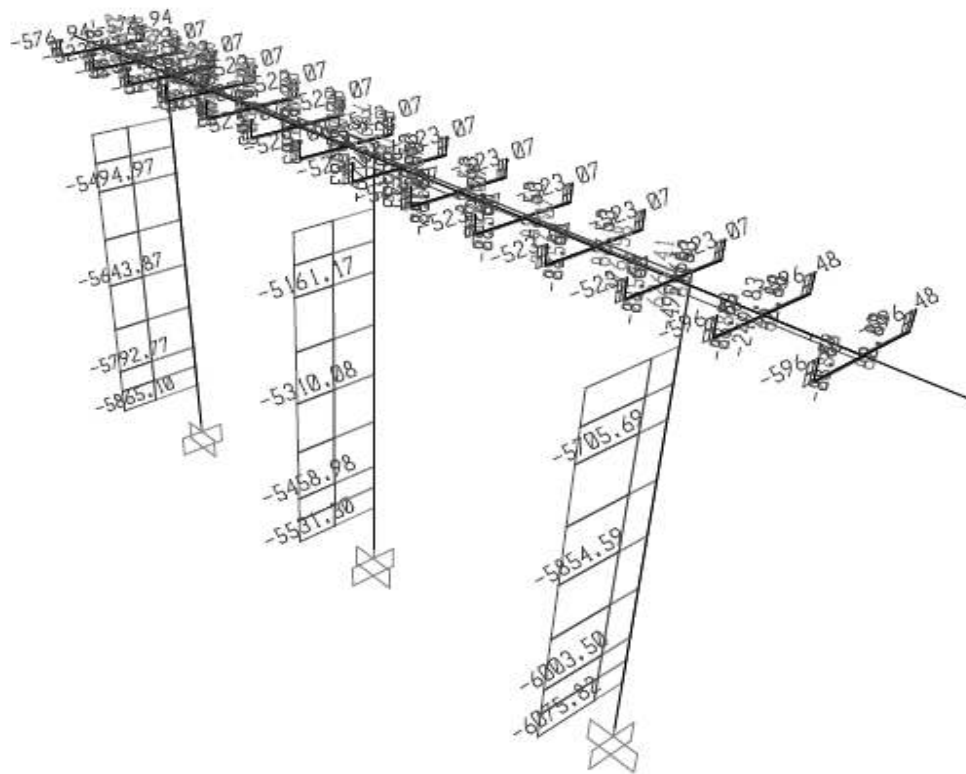
Şekil 4.29. Model 2 kenar ayak RST yük



Şekil 4.30. Model 2 orta ayak RST yükü



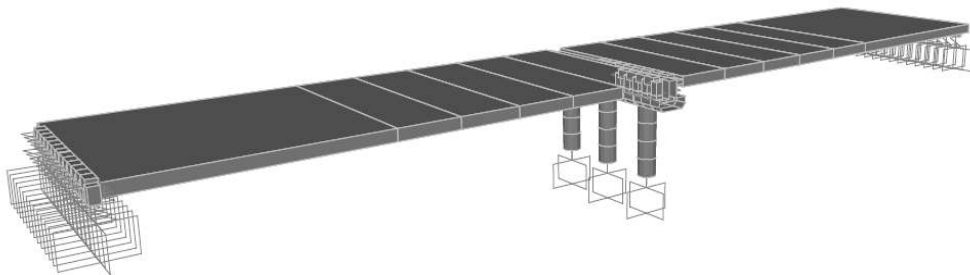
Şekil 4.31. Model 2 kenar ayak maksimum yük (envelop)



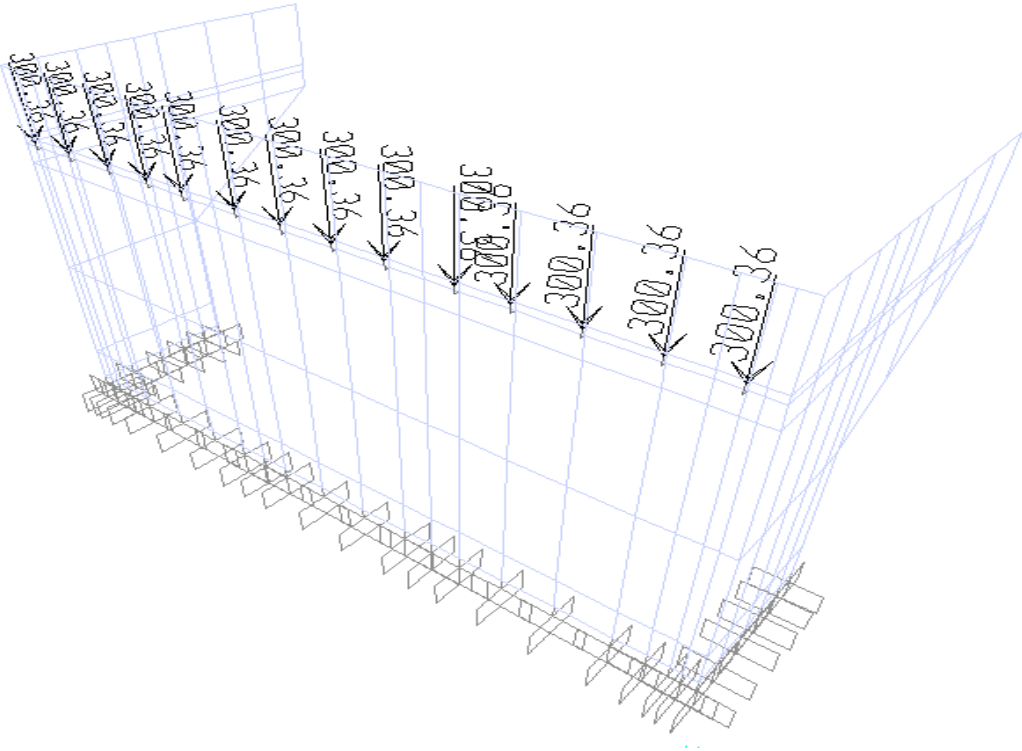
Şekil 4.32. Model 2 orta ayak normal kuvvet (envelop)

4.3. Model 3

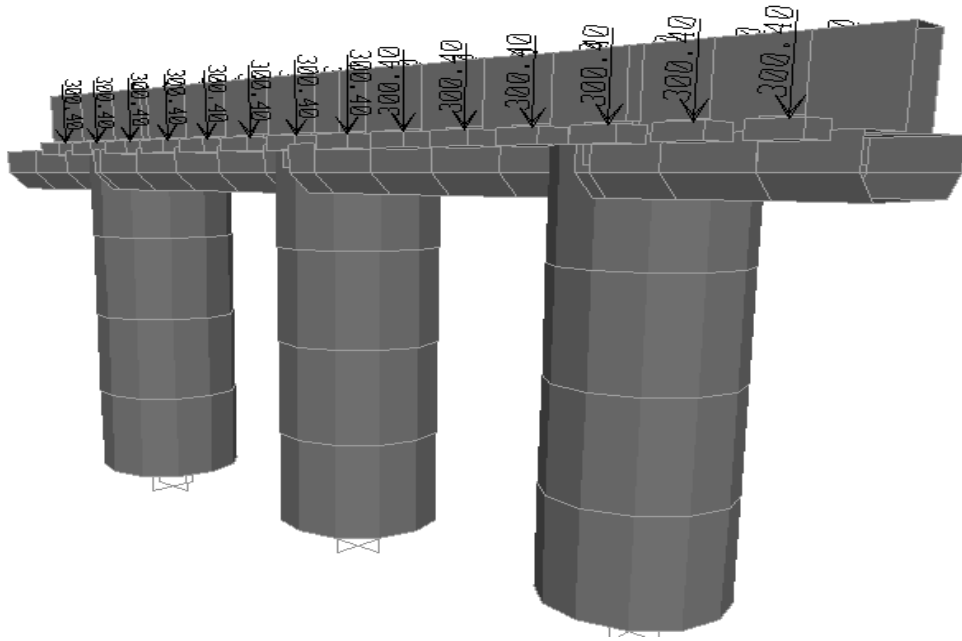
Model 3, 75.50 metre açıklığında, 5.39 metre yüksekliğindedir.



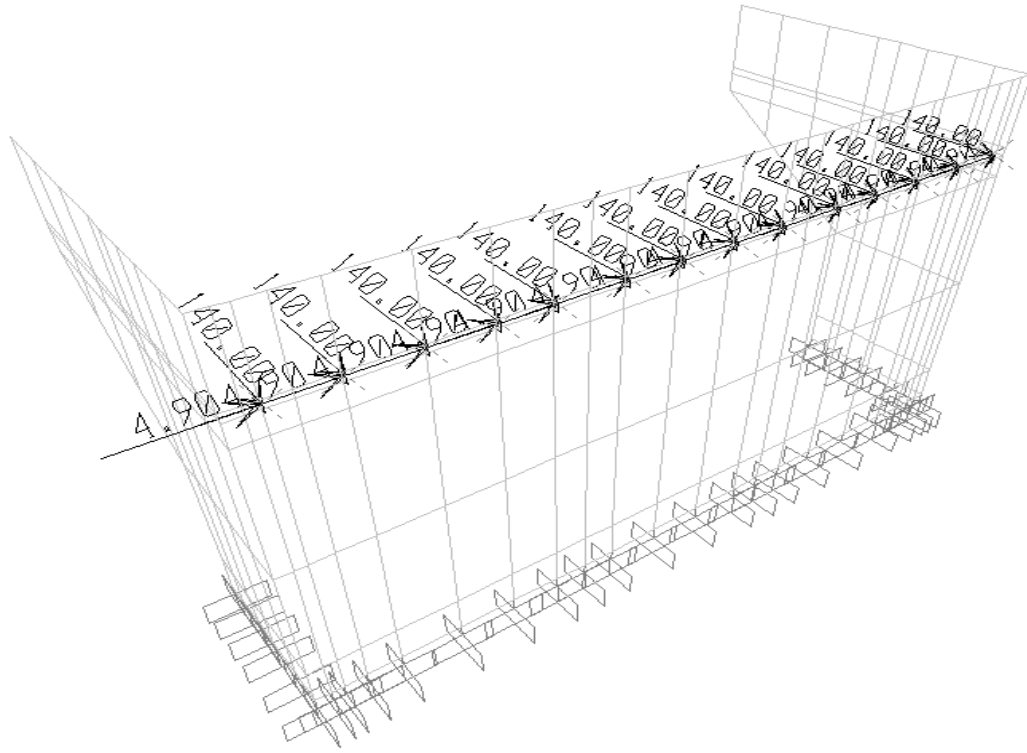
Şekil 4.33. Model 3 perspektif görünümü



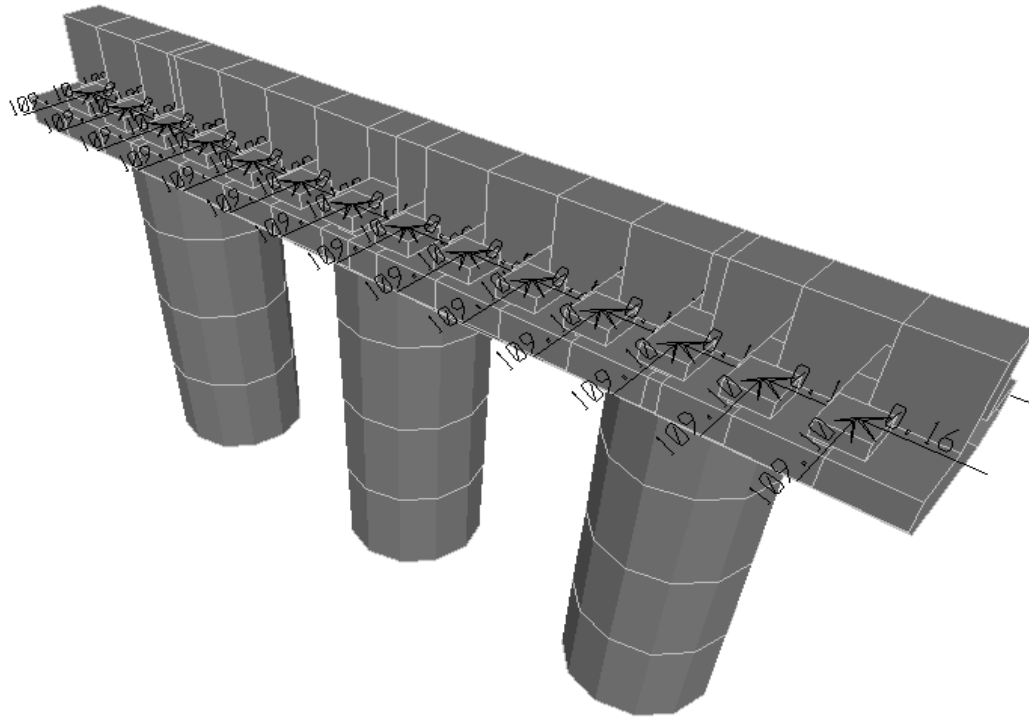
Şekil 4.36. Model 3 kenar ayak ölü yük görüntü



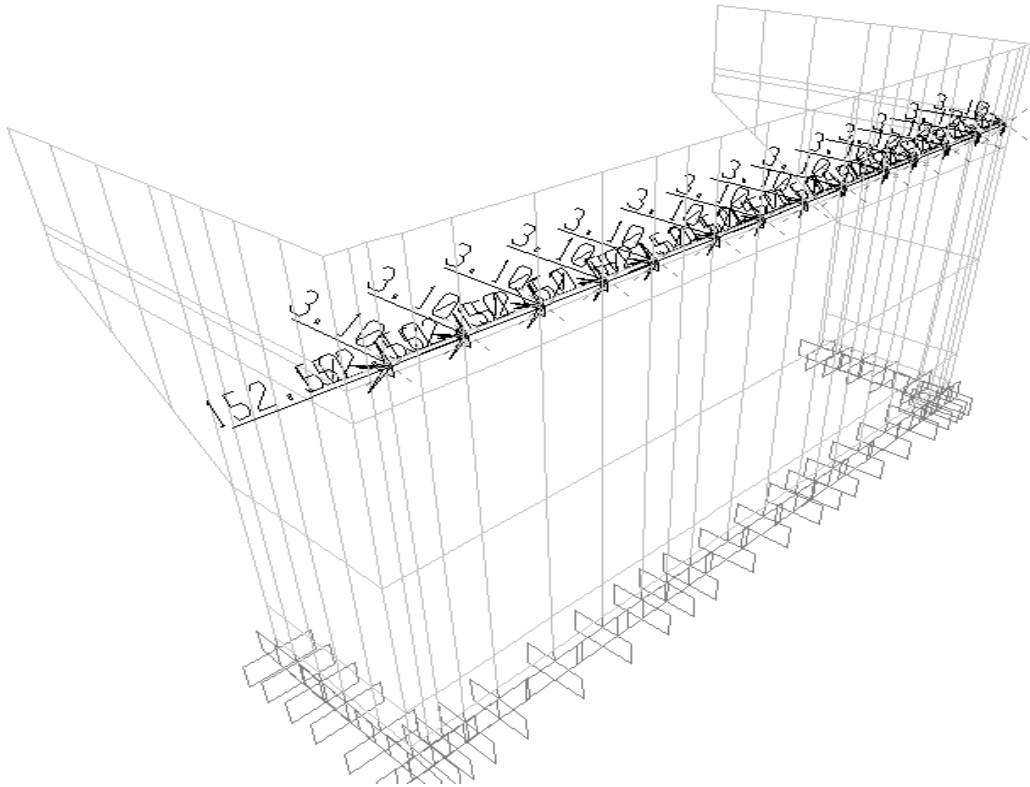
Şekil 4.37. Model 3 orta ayak ölü yük görüntü



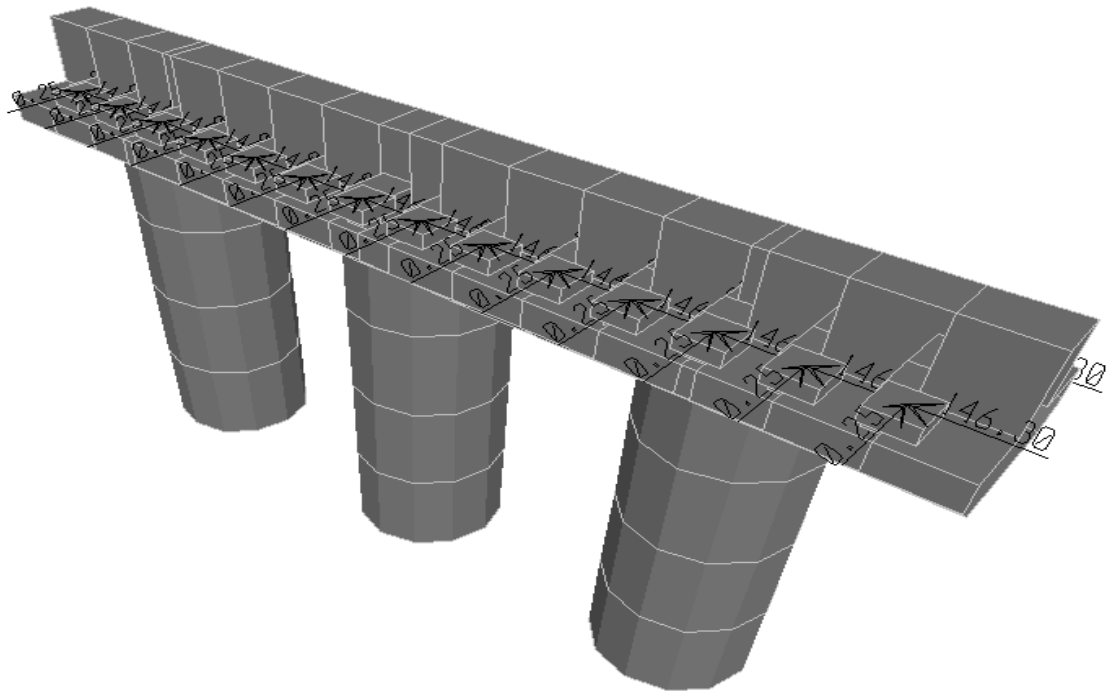
Şekil 4.38. Model 3 kenar ayak deprem yükü X- yönünde



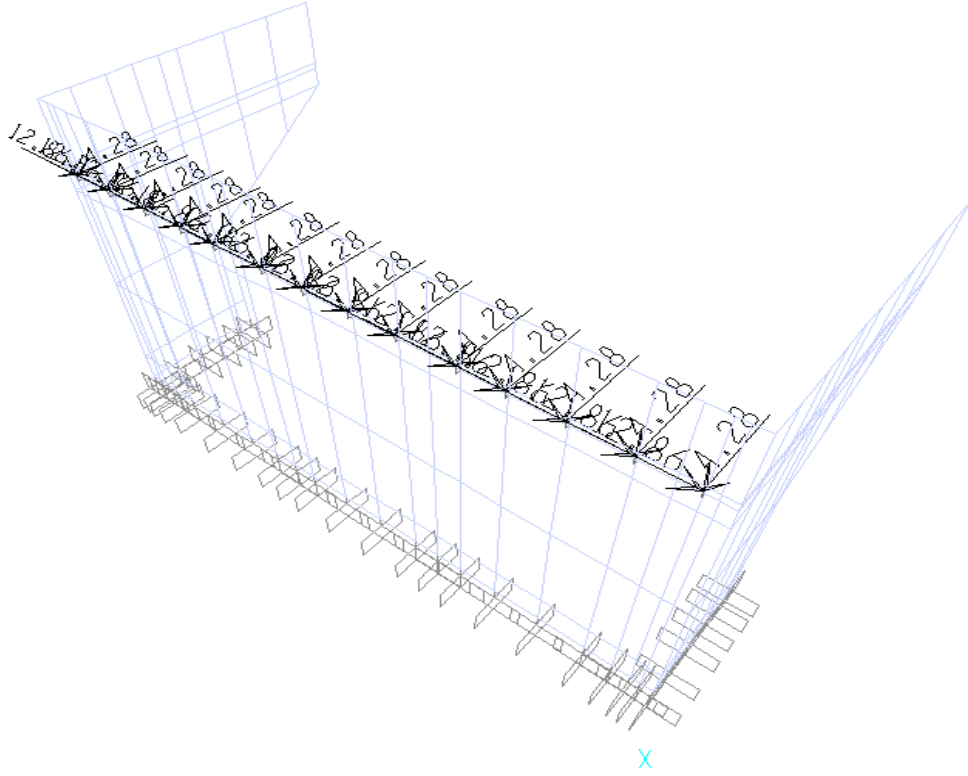
Şekil 4.39. Model 3 orta ayak deprem yükü X- yönünde



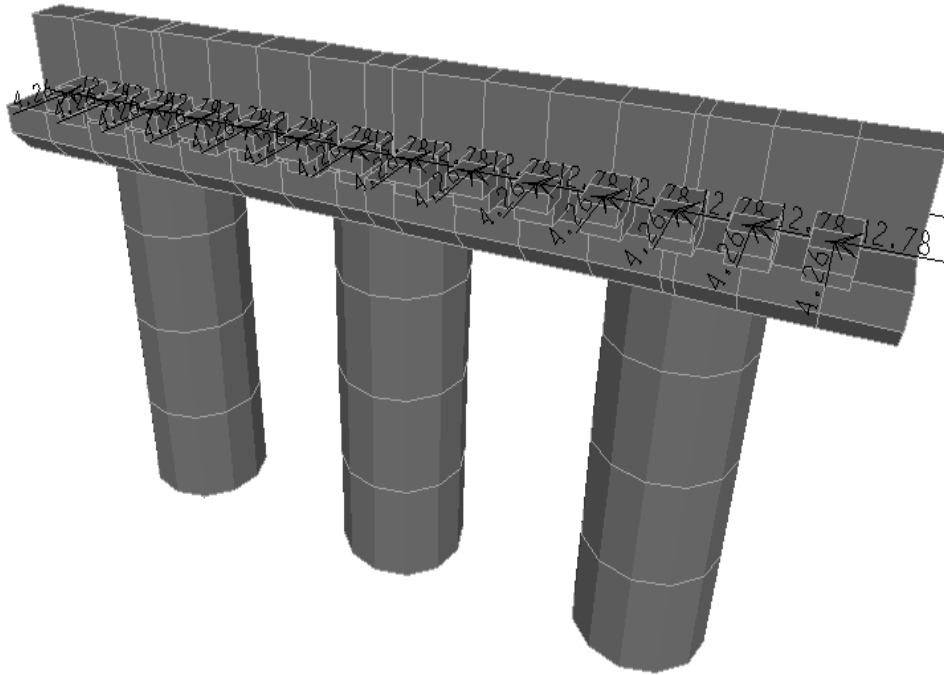
Şekil 4.40. Model 3 kenar ayak deprem yükü Y- yönünde



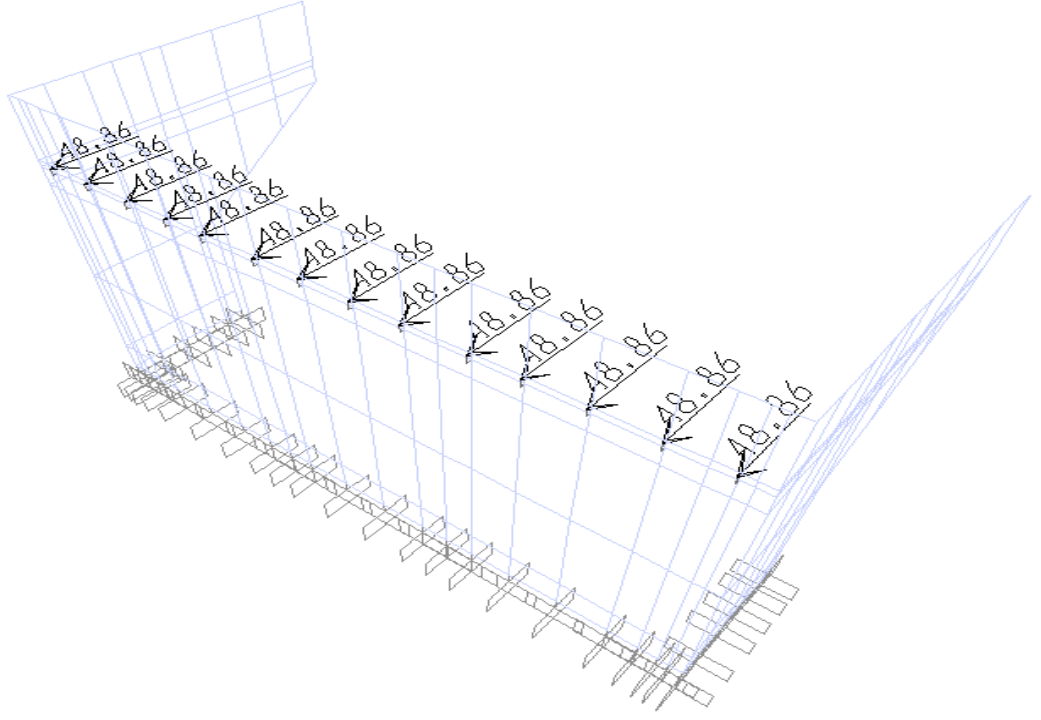
Şekil 4.41. Model 3 orta ayak deprem yükü Y- yönünde



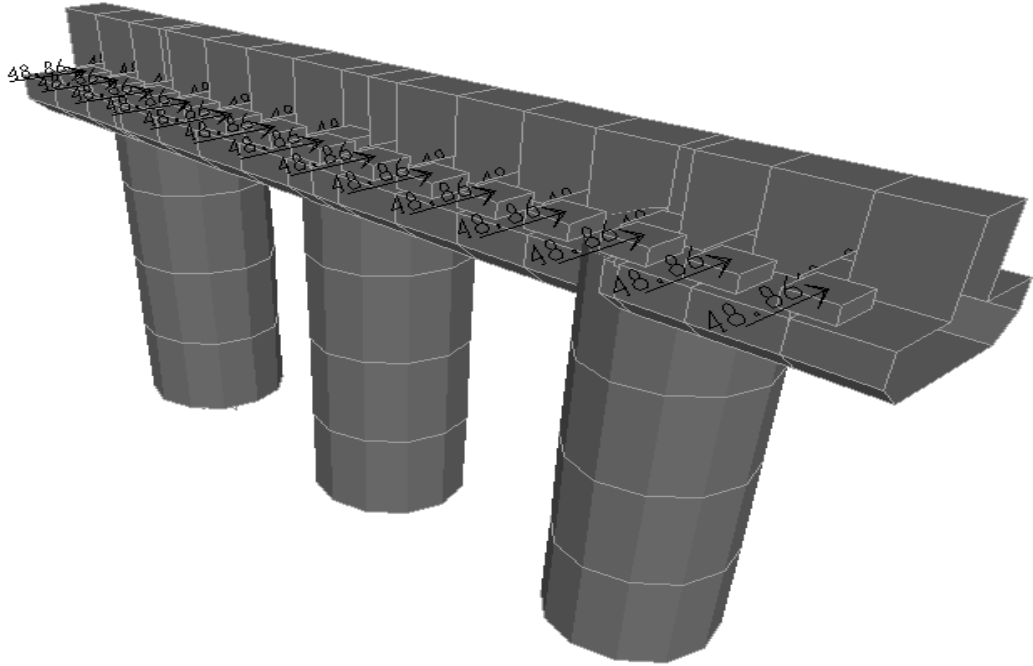
Şekil 4.42. Model 3 kenar ayak fren yükü



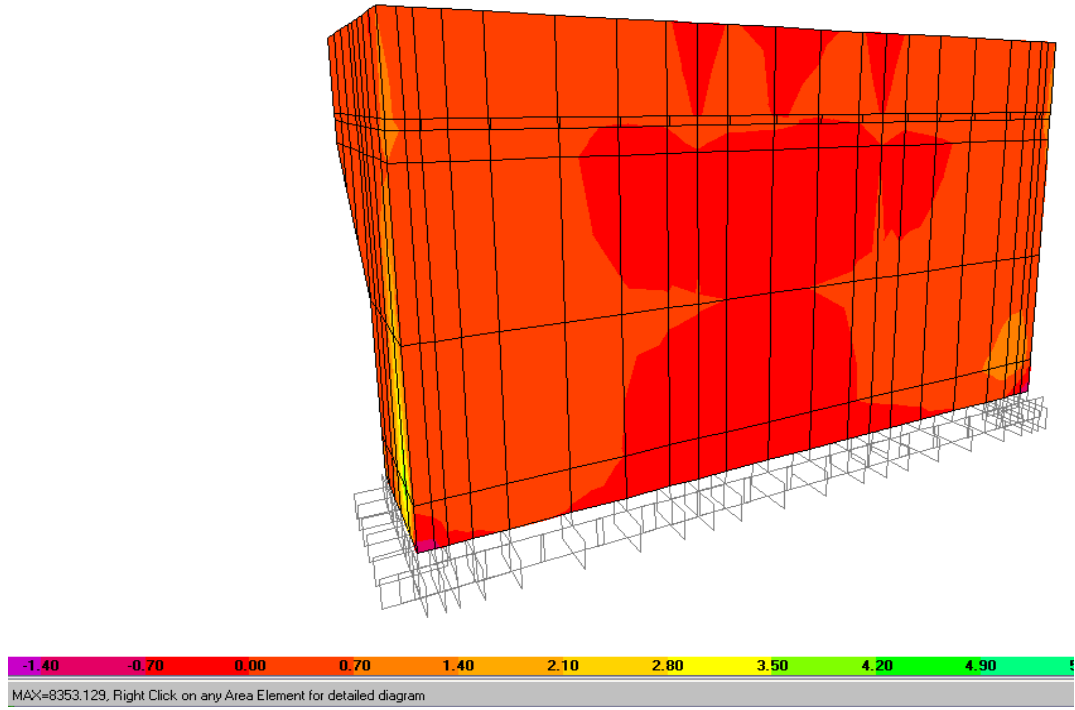
Şekil 4.43. Model 3 orta ayak fren yükü



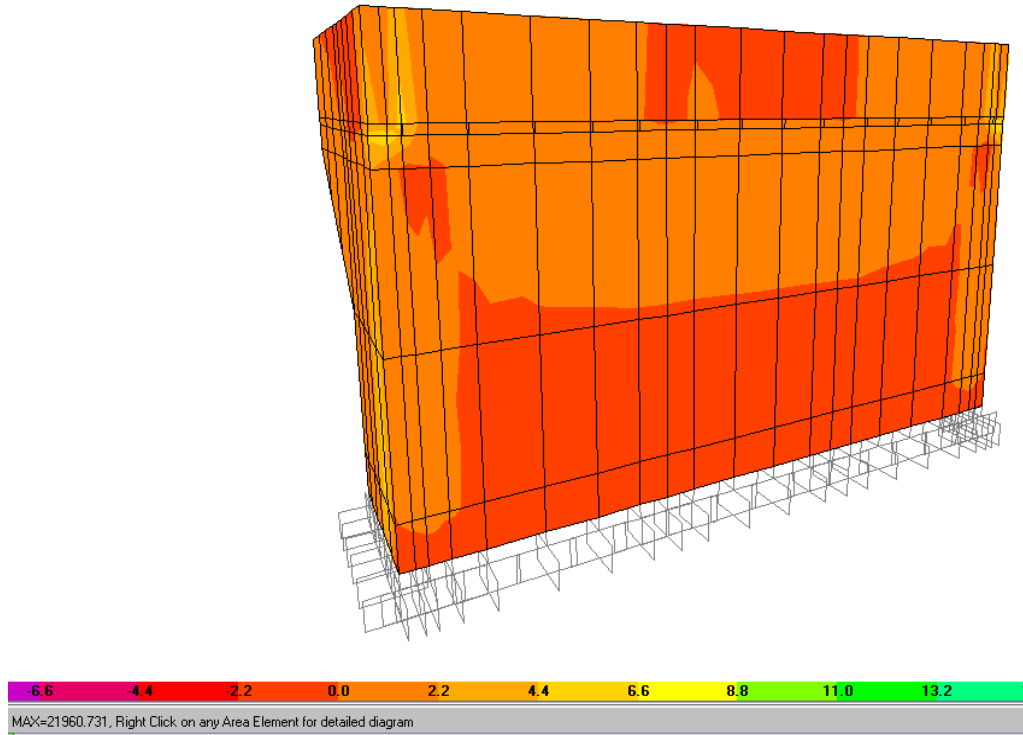
Şekil 4.44. Model 3 kenar ayak RST yükü



Şekil 4.45. Model 3 orta ayak RST yükü



Şekil 4.46. Model 3 kenar ayak maksimum yük (envelop)

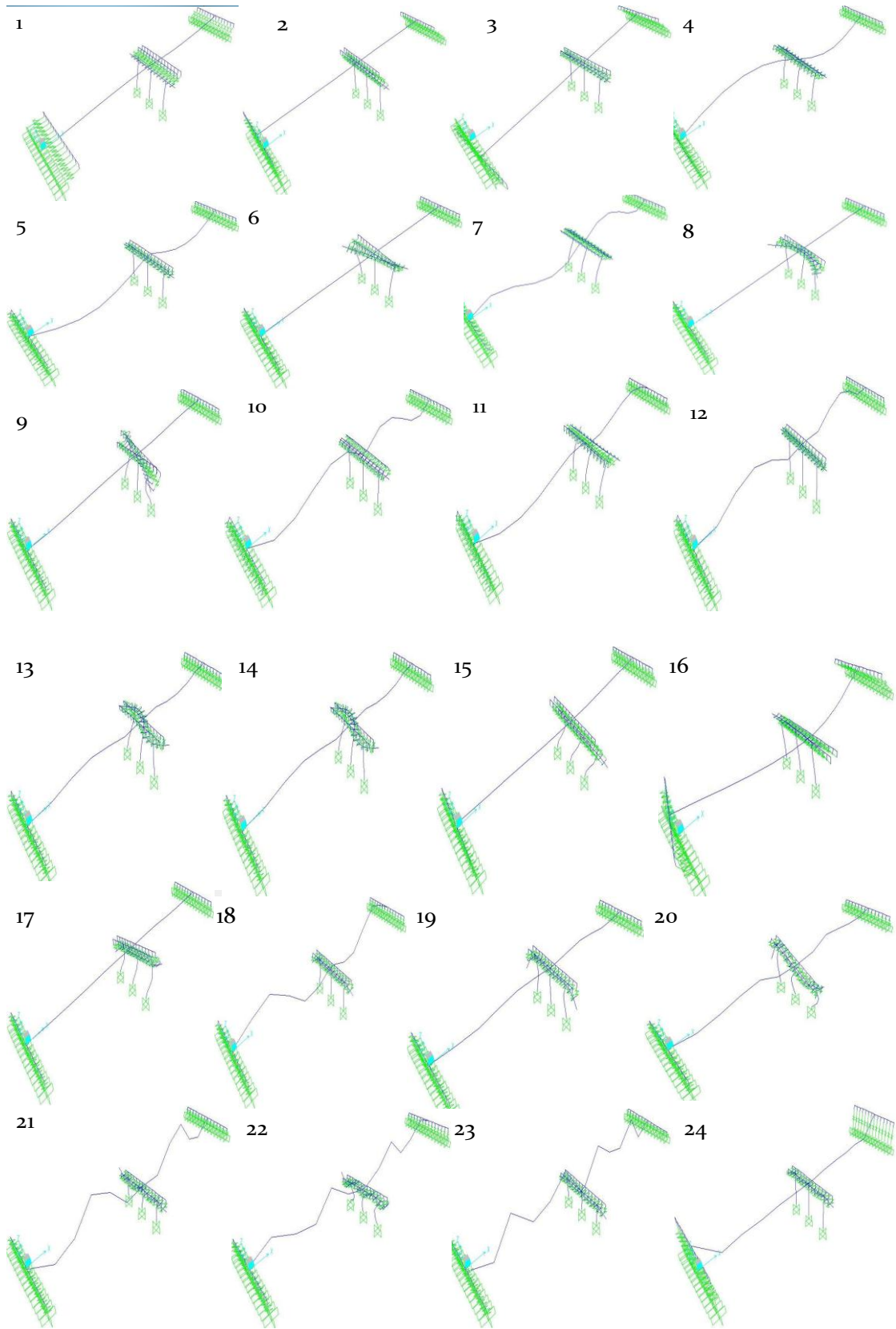


Şekil 4.47. Model 3 kenar ayak maksimum gerilme

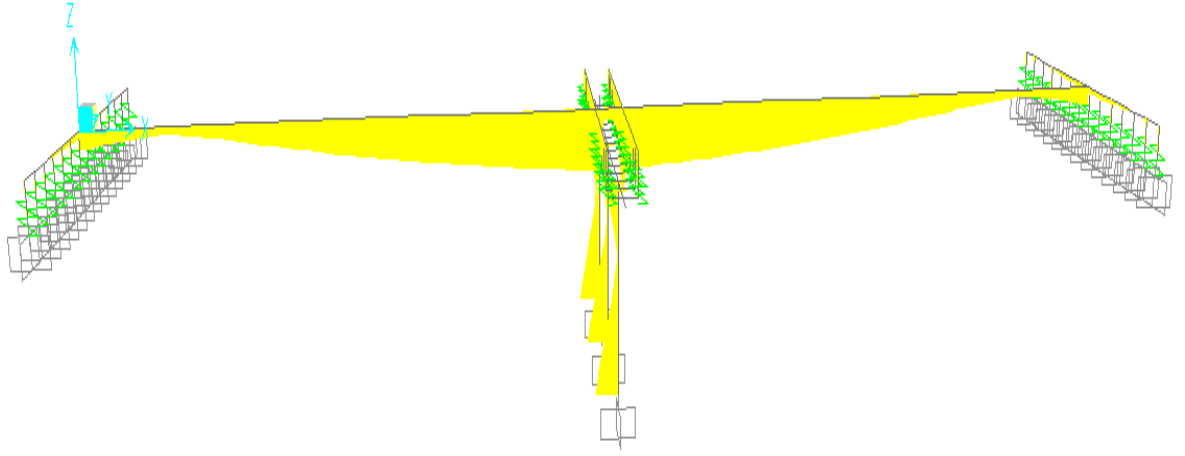
4.4. Sismik Deformasyonu

Çizelge 4.2. Model 1, 24 mod için periyot ve frekans değerleri

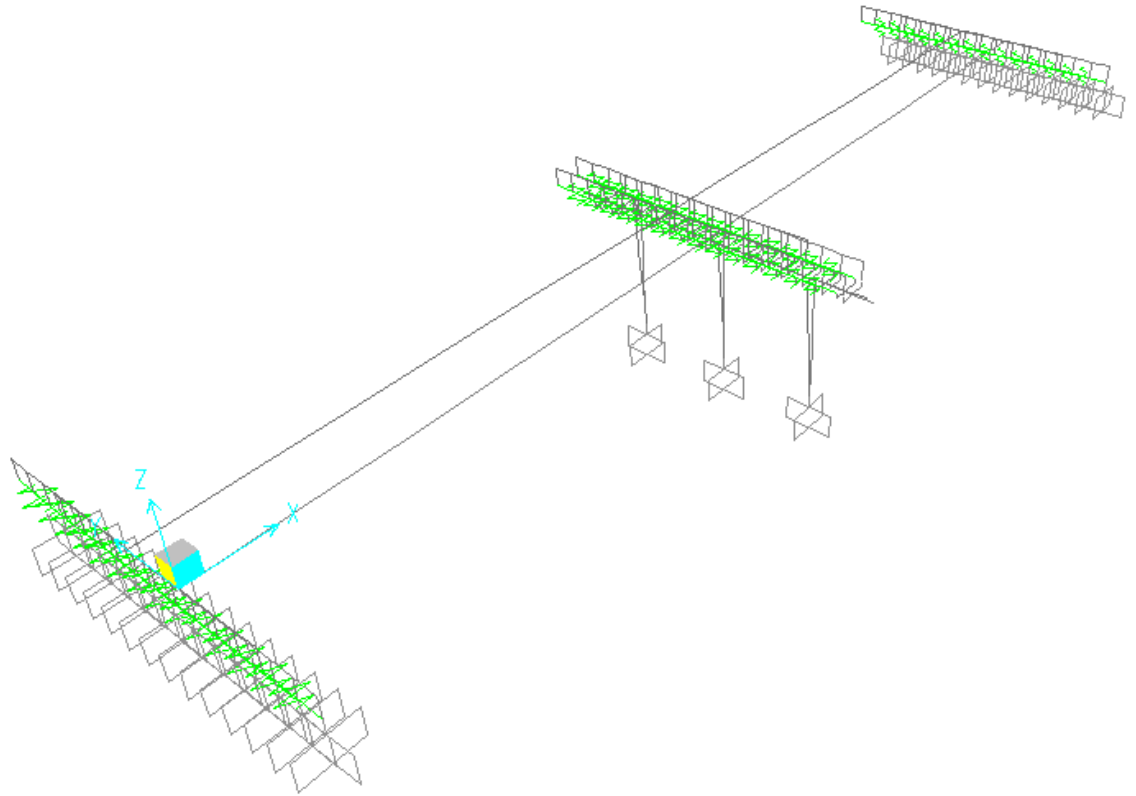
Mode numaraları	Periyot [Sec]	Frekans
Mode 1	0.466377	2.1442
Mode 2	0.451999	2.2124
Mode 3	0.369171	2.7088
Mode 4	0.28335	3.5292
Mode 5	0.23489	4.2573
Mode 6	0.233949	4.2744
Mode 7	0.148184	6.7484
Mode 8	0.129977	7.6937
Mode 9	0.122785	8.1443
Mode 10	0.105569	9.4725
Mode 11	0.096515	10.361
Mode 12	0.067178	14.886
Mode 13	0.066961	14.934
Mode 14	0.063338	15.788
Mode 15	0.059949	16.681
Mode 16	0.056316	17.757
Mode 17	0.042501	23.529
Mode 18	0.03925	25.478
Mode 19	0.035168	28.435
Mode 20	0.025832	38.711
Mode 21	0.024759	40.389
Mode 22	0.017805	56.165
Mode 23	0.013467	74.254
Mode 24	0.00508	196.84



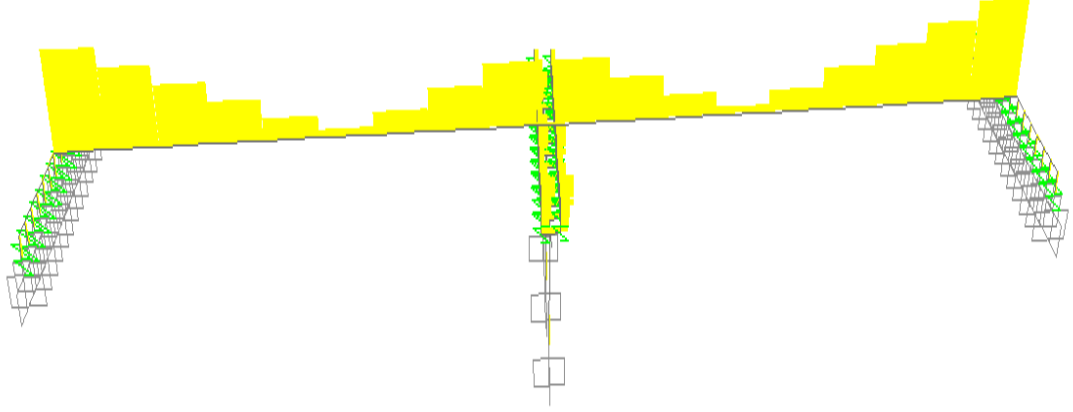
Şekil 4.48. Model 1 de farklı modların, modele etkisi



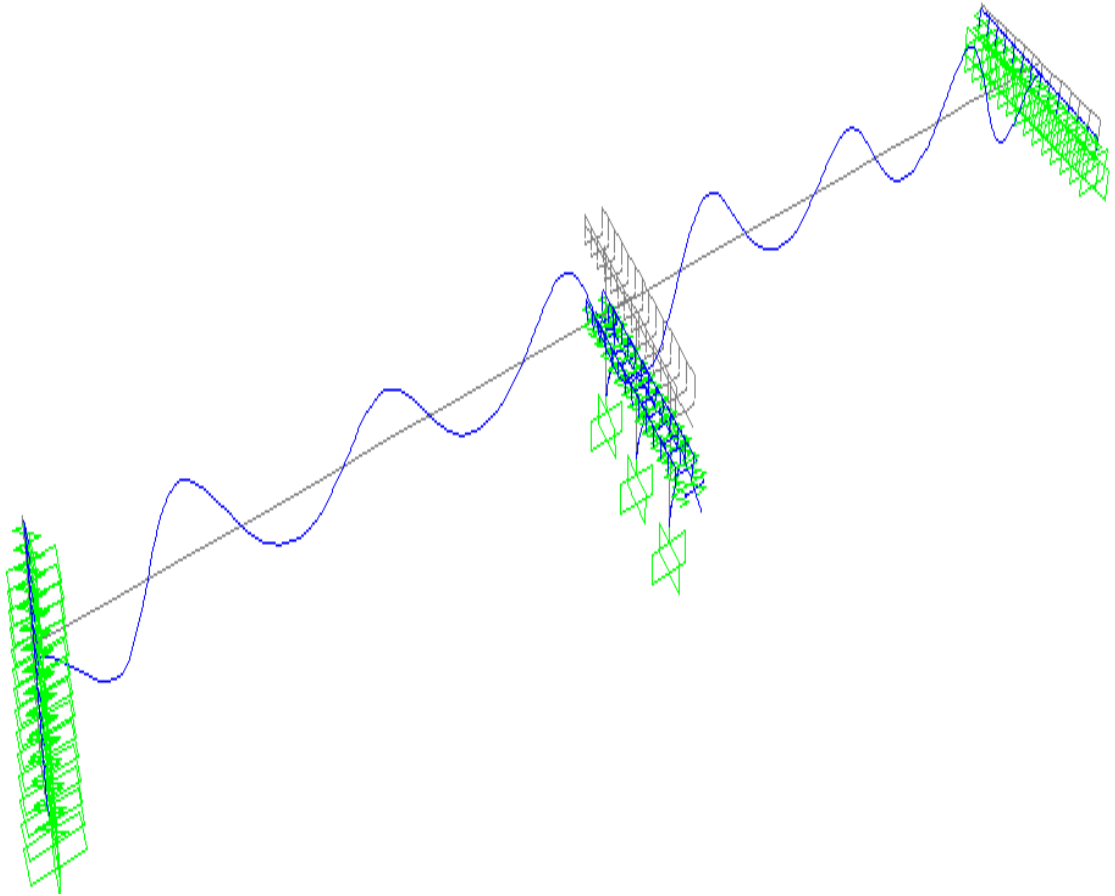
Şekil 4.49. model 1 Z- yönü deprem etkisi, moment diagram



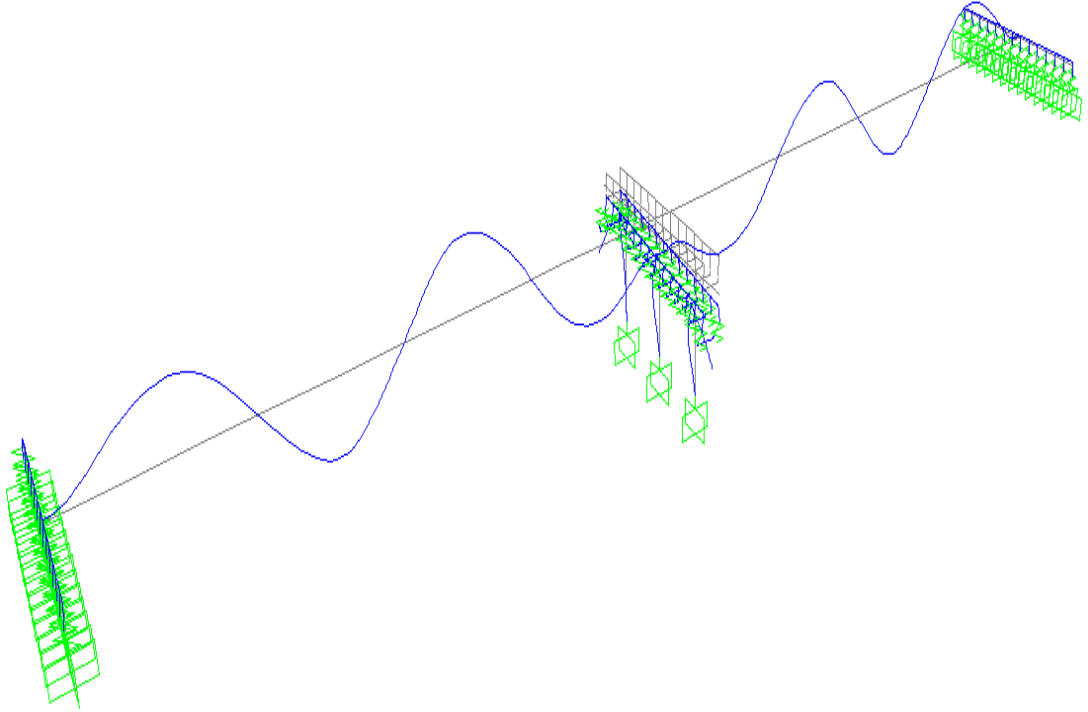
Şekil 4.50. model 1 Y- yönünde elastomer deprem deformasyon



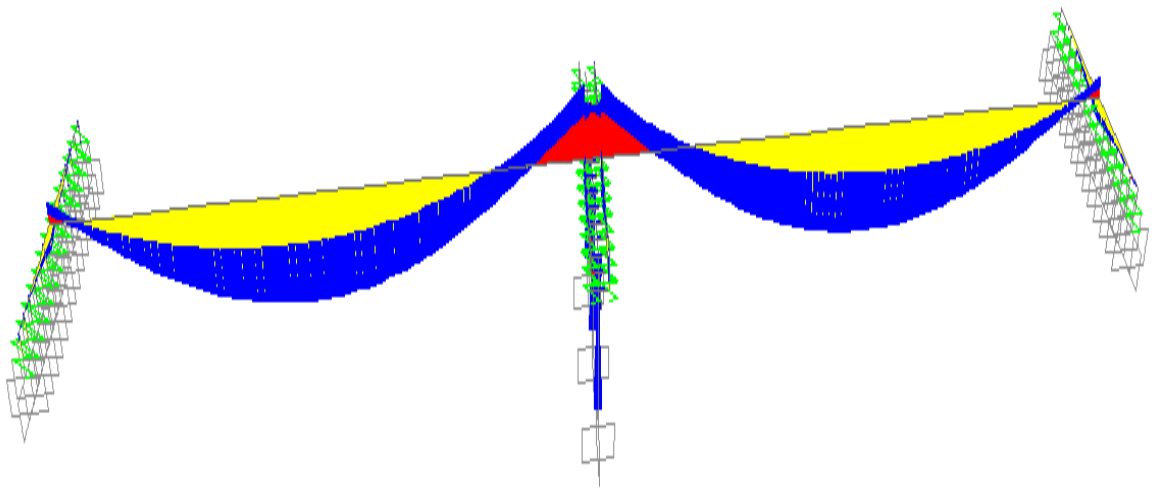
Şekil 4.51. model 2 model 1 X- yönü deprem etkisi, eksenel kuvvet diagram



Şekil 4.52. model 2 mod 23 (period 0.01348) dan meydana gelen deформasyon



Şekil 4.53. model 3 mod 20 (period 0.03558) dan meydana gelen deformasyon



Şekil 4.54. model 3 kombinasyon 7 den dolayı moment diagram

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada üç tip 45.5, 65.5 ve 75.5 metre, toplam uzunluklu betonarme köprünün, AASHTO 2002 şartnamesine uygun olarak bilgisayar destekli analiz ve ön tasarımı yapılmıştır. Analiz ve tasarım sürecinde temellerin üst yapıya etkisini ihmal edilmiş ve modellerde temeller ankastre mesnet tanımlanmıştır. Elastomer mesnetin düşey, yatay, burulma ve dönme rijitlikleri hesaplandıktan sonra 3 modelde de aynı tip elastomer mesnet kullanılmış ve bu durumda modelleri X ve Y yönü deprem yüküne maruz koyduktan sonra deprem yüklerinden dolayı x ve y yönünde oluşan kuvvetler sunulup, karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çalışmada ölü yükler, canlı yükler, rütre, sünme ve sıcaklık yükü, fren yükü, köprünün dolu ve boş halinde rüzgar yükü ve deprem yükü göz önüne alınmıştır. Mevcut yükler çeşitli kombinasyonlar halinde etki ettirilmiş ve en olumsuz şartlar için tasarım yapılmıştır.

Üç model için kenar ayak ve orta ayak modeli yapıldıktan sonra farklı açıklıklardan gelen yüklerin kenar ayak ve orta ayak üzerine etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Her üç model için sismik analizi yapıp deformasyonları X ve Y yönünde hesaplanmıştır. Farklı açıklıklar için sistemdeki etkiler irdelenerek açıklığa bağlı olarak bazı yorumlar yapılmıştır.

Kullanılan tasarım esasları, standartlar ve bilgisayar destekli analiz için de SAP2000 V12 seçilmesiyle köprünün analiz ve tasarımı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Üç modelde Maksimum deprem yükü orta ayak üzerine, kombinasyon 8 ve 17 no lu elemanda oluşmuştur, model 1 ve model 2 arasındaki artış %25 ve model 1 ile model 3 arasındaki artış %64 civarında olmasını gösterir, ve bu sonuç momentlerin anlamlı bir oranda yükselmesini, açıklıkların artışına beraber göstermektedir.

Maksimum yük ve moment her üç modelin orta ayağının 33 no lu eleman da meydana gelmiştir (Şekil 4.16).

Deprem yükünden oluşan maksimum moment orta ayaklarda, kombinasyon 7 den ve model 2 ve model 3 de 9 no lu eleman da oluşmuştur hal bu ki bu değer model 1 de 11 no lu eleman da meydana gelmiştir (Şekil 4.3). ve bu değer model 1 ve 3 arasında 2 katına yakın ve model 1 ve 2 arasında %128 artış göstermektedir.

Çizelge 5.1.Orta ve kenar ayakların X ve Y yönünden gelen deprem yükü değerler

	Kenar ayak X yönü deprem yükü	Kenar ayak Y yönü deprem yükü	Orta ayak X yönü deprem yükü	Orta ayak Y yönü deprem yükü
Model 1	$x - y$ yönü kuvvet	$x - y$ yönü kuvvet	$x - y$ yönü kuvvet	$x - y$ yönü kuvvet
	101 – 5.5	0.41 – 96.5	75.2 – 0.23	0.42 – 85.5
Model 2	$x - y$ yönü kuvvet	$x - y$ yönü kuvvet	$x - y$ yönü kuvvet	$x - y$ yönü kuvvet
	140 – 5.1	1.56 – 137.1	96.1 – 0.177	0.31 – 125.4
Model 3	$x - y$ yönü kuvvet	$x - y$ yönü kuvvet	$x - y$ yönü kuvvet	$x - y$ yönü kuvvet
	140 – 4.9	3.1 – 152.5	109 – 0.16	0.2 – 146.3

Çizelge 5.1 e göre Model 2 ve model 3 arasındaki kenar ayak X yönünde deprem yükünü etkisinde x yönündeki kuvvetler de hemen hemen hiç bir değişik olmasına rağmen model 1 ile model 2 ve 3 arasındaki artış %38 dir. Ayrıca model 1 ile model 2 ve 3 arasındaki Y yönü deprem etkisi altındaki y, yönü kuvvet artışı sırasıyla %41 ve %58 olmaktadır.

Model 2 ve model 3 arasındaki orta ayak X yönü deprem yükünü etkisinde x yönündeki kuvvetler %27 artış vardır ayrıca model 1 ile model 3 arasındaki artış %45 dir ve ayrıca model 1 ile model 3 arasındaki Y yönü deprem yükü etkisi altında y yönündeki kuvvet artışı %71 olmaktadır.

3 modelde de deprem yükü hem kenar hem de orta ayaklarda X yönü deprem yükü etkisinde y yönündeki kuvvetler ve Y yönü deprem yükü etkisinde x yönündeki kuvvetlerin, açıklık artmasıyla birlikte azalmaya başlıyorlar.

Maksimum deformasyon model1 için y yönünde ve K_2 kuvveti etkisinden dolayı 0.027 m ve Maksimum deformasyon model2 için x yönünde K_2 kuvveti etkisinden dolayı 0.037 m ayrıca model3 için y yönünde ve K_3 kuvveti etkisinden dolayı 0.041 m olmaktadır.

Üç modelde, kenar ayaklar da oluşan maksimum yük, moment, kesme kuvvet ve gerilme Çizelge 5.2 de verilmiştir.

Çizelge 5.2. kenar ayaklarda oluşan en büyük yük, moment, gerilme ve kesme kuvvet

	Max F_(KN)	Max M_(KN-m)	Max V_(KN)	Max S_(KN/m²)
Model 1	6314	3420	2849	16578
Model 2	8319	4599	3664	21623
Model 3	8353	4647	3677	21960

Çizelge 5.2 de gördüğümüz gibi maksimum yük, moment, kesme kuvvet ve gerilme değerleri üç modelde de açıklıklığın artışı ile artmaktadır, fakat model 2 ve model 3 arasındaki artış çok az olduğuna rağmen model 1 ile model 2 ve 3 arasındaki artış hemen hemen %30 ve %35 arasında değiştiğini göstermektedir.

Çizelge 5.3. 24 mod dan dolayı LINK elemanlar da oluşan max. deformasyon

	Maksimum deformasyon X [m]	Maksimum deformasyon Y [m]	Maksimum deformasyon Z [m]
Model 1	<i>43 no. LINK eleman</i>	<i>29 no. LINK eleman</i>	<i>15 no. LINK eleman</i>
	0.10754	0.05491	0.06554
Model 2	<i>1 no. LINK eleman</i>	<i>25 no. LINK eleman</i>	<i>15 no. LINK eleman</i>
	0.06741	0.0553	0.1706
Model 3	<i>28 no. LINK eleman</i>	<i>15 no. LINK eleman</i>	<i>29 no. LINK eleman</i>
	0.01778	0.0523	0.10638

Çizelge 5.3 e göre üç modelde de 15 no. lu link elemanda farklı yönlerde deformasyon meydana gelmiştir, ayrıca model 1 de maksimum deformasyon X yönünde model 2 de maksimum deformasyon Z yönünde ve model 3 de maksimum deformasyon X yönünde oluşmuştur. model 3 de 28 no. lu elemanda, x yönünde en büyük deformasyon gözükmemektedir.

KAYNAKLAR

1. AASHTO Standard, "Guide Manual for Condition Evaluation and Load and, Resistance Factor Rating of Highway Bridges", *AASHTO publications*, 1-9 (2002).
2. Begimgil, M., "Behavior of Restrained 1.25 m. Span Model Masonry Arch Bridge ", Proceedings of *the First International Conference on Arch Bridges*, ARCH 95, Bolton, UK, 3-6, Arch Bridges, Thomas Telford, London, 1995, pp. 321-325. (1995)
3. Melbourne, C., Begimgil, M., Gilbert, M., "The Load Test to Collapse of 5 m Span Brickwork Arch Bridge with tied Spandrel Walls", *Proceedings of the First International Conference on Arch Bridges*, ARCH 95, Bolton, UK, 3-6, Arch Bridges, Thomas Telford, London, pp. 509-517. (1995)
4. Begimgil, M. "Yan Duvarı Tutulmuş, Model Tuğla Duvar Kemer Köprü Yükleme Testi", *Türkiye İnşaat Mühendisliği XV. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 24-26, sayfa 193-207. (1999)
5. Polat,Ü. "Karbon-Kükürt Oranının Elastomer Köprü Mesnet Aparent Davranışı Üzerine Etkisi" Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniv., *Fen Bilimleri Enst.*, ANKARA, 86. (1998)
6. Sowden, A. M., "The maintenace of brick and stone masonry structures", *E. & F. N. Spon*, England, (1990).
7. Tahouni, Sh., "Bridge Design 6nd ed." *Tehran Üniversite*, Tehran, (2004).
8. Akoğul, C., "Prekast kirişli betonarme köprülerin aashto'ya göre depreme dayanıklı tasarımı" Yüksek lisans, *Fen Bilimleri Enst, İTÜ*, (2007).
9. Wagdy G., "Comprehensive Design Example For Prestressed Concrete (Psc) Girder Superstructure Bridge With Commentary", *Modjeski and Masters, Inc., The Federal Highway Administration.*, Virginia 61-02-T-63032 (2003)
10. M. Ibrahim A., Mubarak H., "Finite Element Modeling Of Continuous Reinforced Concrete Beam With External Pre-Stressed", *European Journal of Scientific Research* ISSN 1450-216X, 3 (1): 177-186 (2009)
11. El-Ragaby A., El-Salakawy E., Benmokrane B., "Finite Element Modeling of Concrete Bridge Deck Slabs Reinforced with FRP Bars", *Universite de Sherbrooke*, Canada., (2006)
12. Bhkari N., "Modal Analysis Of Concrete Bridge Decks Subjected To Free Vibration", *Universiti Teknologi Malaysia., Faculty of Civil Engineering.*, 91, Malaysia (2005)

13. Öztürk T., öztürk Z., “Öngerilmeli Kompozit Köprü Kirişlerinin Etkin Kullanım Açıklıklarının Belirlenmesi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi*. (2003)
14. Anthony J. Wolanski, B., “Flexural Behavior Of Reinforced And Prestressed Concrete Beams Using Finite Element Analysis” Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School, *Marquette University, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science*, (2004)
15. Barr P., Eberhard M., Stanton J., “Live-Load Distribution Factors In Prestressed Concrete Girder Bridges”, *Journal of Bridge Engineering*, 6(5), Washington (2001)
16. Barker R. M., “Design Of Highway Bridges” *John Wiley & Sons, INC.* New York, 1192, 978-0471304340 (1997)