TARİHİ YIĞMA TAŞ KÖPRÜLERİN DİNAMİK ANALİZİ "ERZURUM AŞKALE İLÇESİNDE SULTAN HAMİT KÖPRÜLERİ''

ÇAĞRI ONUR ÖZTÜRK

HAZİRAN 2022

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YIĞMA TAŞ KÖPRÜLERİN DİNAMİK ANALİZİ "ERZURUM AŞKALE İLÇESİNDE SULTAN HAMİT KÖPRÜLERİ"

ÇAĞRI ONUR ÖZTÜRK

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
YAPI MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

HAZİRAN 2022

DİYARBAKIR

TARİHİ YIĞMA TAŞ KÖPRÜLERİN DİNAMİK ANALİZİ "ERZURUM AŞKALE İLÇESİNDE SULTAN HAMİT KÖPRÜLERİ''

Çağrı Onur ÖZTÜRK tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Yapı Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Dr. Öğr. Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN
Danışman, **İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi** _____

Doç. Dr. Erkut SAYIN
İkinci Danışman**, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi** _____

Sınav Jürisi:

Prof. Dr. Halil GÖRGÜN (*)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN (**)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi _____

Doç. Dr. Muhammet KARATON
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi _____

ONAY

Savunma Tarihi: 15 / 06 / 2022

(*) Sınav Jürisi kısmının birinci satırına Jüri Başkanının bilgilerini yazınız.
(**) Sınav Jürisi kısmının ikinci satırına Tez Danışmanının bilgilerini yazınız.

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılayıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Çağrı Onur ÖZTÜRK

İmza: …….……

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her türlü desteğini benden esirgemeyen, bana zaman ayırmayı ihmal etmeyen, tez konumun fikri aşamasından tez sonuna kadar tüm teknik bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan tez danışmanım değerli Dr. Öğretim Üyesi Senem Yılmaz Çetin'e ve sahip olduğu tüm bilgi ve deneyimleriyle beni ihmal etmeden teknik bilgileriyle köprüler konusunda gelişimime katkıda bulunan, köprü modelleme ve analizler konusunda yardımlarını esirgemeyen değerli Doç. Dr. Erkut Sayın'a teşekkür ederim. Jüri üyelerime de bu tezin daha nitelikli bir hale gelmesi için yaptıkları eleştiri ve önerileri için teşekkür ederim.

Çalışma kapsamında, bünyesinde çalıştığım Karayolları Genel Müdürlüğüne ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu süreçte her zaman yanımda olan desteklerini hiç esirgemeyen özellikle annem başta olmak üzere tüm aile bireylerime ve değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR v
İÇİNDEKİLER vi
ŞEKİLLER LİSTESİ viii
TABLOLAR LİSTESİ xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ xivi
ÖZET xvi
ABSTRACT xvii
1 GİRİŞ 1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı 1
1.2 Önceki Çalışmalar 2
2 TARİHİ YIĞMA KÖPRÜLER 8
2.1 Tarihi Yığma Köprülerin Çeşitleri 8
2.2 Tarihi Yığma Köprülerin Taşıyıcı Sistem Elemanları 9
2.3 Tarihi Yığma Köprülerde Kullanılan Malzemeler 13
2.3.1 Doğal taş 13
2.3.2 Tuğla 14
2.3.3 Ahşap 14
2.3.4 Harçlar 14
2.3.5 Kerpiç 16
2.3.6 Sıva 16
3 TARİHİ YIĞMA TAŞ KÖPRÜLERDE MODELLEME VE ANALİZ YÖNTEMLERİ 17
3.1 Detaylı Mikro Modelleme 17
3.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme Yöntemi 18
3.3 Makro Modelleme Yöntemi 18
3.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi 18
3.5 Analiz Yöntemleri 19
3.5.1 Doğrusal (lineer) analiz 19
3.5.2 Doğrusal olmayan (non-lineer) analiz 20
3.5.3 Plastik analiz 20
4 MATERYAL VE METOT 22
4.1 Sultan Hamit I Köprüsü'nün Konumu ve Yapısal Özellikleri 22

4.2 Sultan Hamit II Köprüsü'nün Konumu ve Yapısal Özellikleri 23
4.3 Sultan Hamit III Köprüsü'nün Konumu ve Yapısal Özellikleri 25
4.4 SAP2000 Sonlu Elemanlar Modeli 26
4.5 Statik Analiz 27
4.6 Modal Analiz 28
4.7 Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi 29
4.8 Sultan Hamit Köprüleri'nin Sonlu Elemanlar Modeli 29
4.8.1 Sultan Hamit Köprüsü I 30
4.8.2 Sultan Hamit Köprüsü II 30
4.8.3 Sultan Hamit Köprüsü III 31
5 ARAŞTIRMA BULGULARI 32
5.1 Sultan Hamit I-II-II Köprüleri'nin Statik Analizi 32
5.1.1 Sultan Hamit Köprüsü I 32
5.1.2 Sultan Hamit Köprüsü II 33
5.1.3 Sultan Hamit Köprüsü III 35
5.2 Sultan Hamit I-II-II Köprülerinin Modal Analizi 36
5.2.1 Sultan Hamit Köprüsü I 36
5.2.2 Sultan Hamit Köprüsü II 38
5.2.3 Sultan Hamit Köprüsü III 40
5.3 Sultan Hamit I-II-II Köprüleri'nin Dinamik Analizi 42
5.3.1 Sultan Hamit I Köprüsü'nün dinamik analizi 43
5.3.1.1 1992 Erzincan depremine göre dinamik analiz sonuçları 44
5.3.1.2 2020 Elazığ depremine göre dinamik analiz sonuçları 49
5.3.2 Sultan Hamit II Köprüsü'nün dinamik analizi 54
5.3.2.1 1992 Erzincan depremine göre dinamik analiz sonuçları 54
5.3.2.2 2020 Elazığ depremine göre dinamik analiz sonuçları 59
5.3.3 Sultan Hamit III Köprüsü'nün dinamik analizi 65
5.3.3.1 1992 Erzincan depremine göre dinamik analiz sonuçları 65
5.3.3.2 2020 Elazığ depremine göre dinamik analiz sonuçları 71
6 SONUÇLAR 77
KAYNAKLAR 79
ÖZGEÇMİŞ 85

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Bir yığma kemer köprünün bölümleri 11
Şekil 2.2 Tarihi yığma köprü elemanları..... 13
Şekil 3.1 Yığma yapılar için modelleme yöntemleri……..…….....17
Şekil 3.2 Analiz tiplerinin karşılaştırılması..... 20
Şekil 4.1 Erzurum ili Aşkale ilçesi Sultan Hamit I Köprüsü'nün uydu görüntüsü..... 22
Şekil 4.2 Sultan Hamit I Köprüsü 23
Şekil 4.3 Erzurum ili Aşkale ilçesi Sultan Hamit II Köprüsü'nün uydu görüntüsü. .. 24
Şekil 4.4 Sultan Hamit II Köprüsü..... 24
Şekil 4.5 Erzurum ili Aşkale ilçesi Sultan Hamit III Köprüsü'nün uydu görüntüsü.. 25
Şekil 4.6 Sultan Hamit III Köprüsü 26
Şekil 4.7 Sultan Hamit Köprüsü-I SAP2000 modeli 30
Şekil 4.8 Sultan Hamit Köprüsü-II SAP2000 modeli 31
Şekil 4.9 Sultan Hamit Köprüsü-III SAP2000 modeli..... 31
Şekil 5.1 Sultan Hamit I Köprüsü maksimum deformasyon görüntüsü……..32
Şekil 5.2 a) Sultan Hamit I Köprüsü üzerinde oluşan maksimum çekme gerilmeleri, b) Sultan Hamit I Köprüsü üzerinde oluşan maksimum basınç gerilmeleri……33
Şekil 5.3 Sultan Hamit II Köprüsü maksimum deformasyon görüntüsü…..……...34
Şekil 5.4 a) Sultan Hamit II Köprüsü üzerinde oluşan maksimum çekme gerilmeleri, b) Sultan Hamit II Köprüsü üzerinde oluşan maksimum basınç gerilmeleri……34
Şekil 5.5 Sultan Hamit III Köprüsü maksimum deformasyon görüntüsü……...……35
Şekil 5.6 a) Sultan Hamit III Köprüsü Üzerinde Oluşan maksimum çekme gerilmeleri, b) Sultan Hamit III Köprüsü üzerinde oluşan maksimum basınç gerilmeleri…….36
Şekil 5.7 Sultan Hamit I Köprüsü'nün ilk 3 modun frekans değerleri ve mod şekilleri……38
Şekil 5.8 Sultan Hamit II Köprüsü'nün ilk 3 modun frekans değerleri ve mod şekilleri……40
Şekil 5.9 Sultan Hamit III Köprüsü'nün ilk 3 modun frekans değerleri ve mod şekilleri……42
Şekil 5.10 Düzlem kabuk elemanda global koordinatlar ve gerilmeleler …….....43
Şekil 5.11 Erzincan depremi 1087 nolu düğüm noktasının y eksenindeki yer değiştirme grafiği…….....44

Şekil 5.12 1992 Erzincan depremi için Σ_{xx} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……45
Şekil 5.13 1992 Erzincan depremi için Σ_{yy} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……45
Şekil 5.14 1992 Erzincan depremi için Σ_{zz} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……46
Şekil 5.15 1992 Erzincan depremi için T_{xy} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……46
Şekil 5.16 1992 Erzincan depremi için T_{xz} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……46
Şekil 5.17 1992 Erzincan depremi için T_{yz} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……47
Şekil 5.18 1992 Erzincan depremi için Σ_{xx} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……47
Şekil 5.19 1992 Erzincan depremi için Σ_{yy} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……47
Şekil 5.20 1992 Erzincan depremi için Σ_{zz} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……48
Şekil 5.21 1992 Erzincan depremi için T_{xy} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……48
Şekil 5.22 1992 Erzincan depremi için T_{xz} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)…… ……48
Şekil 5.23 1992 Erzincan depremi için T_{yz} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……49
Şekil 5.24 Elazığ depremi 1087 nolu düğüm noktasının y eksenindeki yer değiştirme grafiği……..49
Şekil 5.25 2020 Elazığ depremi için Σ_{xx} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……50
Şekil 5.26 2020 Elazığ depremi için Σ_{yy} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……50
Şekil 5.27 2020 Elazığ depremi için Σ_{zz} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……50

Şekil 5.28 1992 Elazığ depremi için T_{xy} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……51
Şekil 5.29 2020 Elazığ depremi için T_{xz} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……51
Şekil 5.30 2020 Elazığ depremi için T_{yz} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……51
Şekil 5.31 2020 Elazığ depremi için Σ_{xx} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……52
Şekil 5.32 2020 Elazığ depremi için Σ_{yy} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……52
Şekil 5.33 2020 Elazığ depremi için Σ_{zz} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……52
Şekil 5.34 2020 Elazığ depremi için T_{xy} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……53
Şekil 5.35 2020 Elazığ depremi için T_{xz} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……53
Şekil 5.36 2020 Elazığ depremi için T_{yz} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……53
Şekil 5.37 1992 Erzincan depremi 1025 nolu düğüm noktasının y eksenindeki yer değiştirme grafiği……....55
Şekil 5.38 1992 Erzincan depremi için Σ_{xx} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……55
Şekil 5.39 1992 Erzincan depremi için Σ_{yy} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……56
Şekil 5.40 1992 Erzincan depremi için Σ_{zz} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……56
Şekil 5.41 1992 Erzincan depremi için T_{xy} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……56
Şekil 5.42 1992 Erzincan depremi için T_{xz} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……57
Şekil 5.43 1992 Erzincan depremi için T_{yz} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……....57

Şekil 5.44 1992 Erzincan depremi için Σ_{xx} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……58
Şekil 5.45 1992 Erzincan depremi için Σ_{yy} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……58
Şekil 5.46 1992 Erzincan depremi için Σ_{zz} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……58
Şekil 5.47 1992 Erzincan depremi için T_{xy} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……59
Şekil 5.48 1992 Erzincan depremi için T_{xz} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……...59
Şekil 5.49 1992 Erzincan depremi için T_{yz} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……59
Şekil 5.50 2020 Elazığ depremi 1025 nolu düğüm noktasının y eksenindeki yer değiştirme grafiği……...60
Şekil 5.51 2020 Elazığ depremi için Σ_{xx} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……60
Şekil 5.52 2020 Elazığ depremi için Σ_{yy} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)…….. ……...61
Şekil 5.53 2020 Elazığ depremi için Σ_{zz} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……61
Şekil 5.54 2020 Elazığ depremi için T_{xy} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……61
Şekil 5.55 2020 Elazığ depremi için T_{xz} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……62
Şekil 5.56 2020 Elazığ depremi için T_{yz} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……62
Şekil 5.57 2020 Elazığ depremi için Σ_{xx} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……63
Şekil 5.58 2020 Elazığ depremi için Σ_{yy} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……63
Şekil 5.59 2020 Elazığ depremi için Σ_{zz} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……...63

Şekil 5.60 2020 Elazığ depremi için T_{xy} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……64
Şekil 5.61 2020 Elazığ depremi için T_{xz} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……64
Şekil 5.62 2020 Elazığ depremi için T_{yz} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……64
Şekil 5.63 1992 Erzincan depremi 3258 nolu düğüm noktasının y eksenindeki yer değiştirme grafiği……..……..66
Şekil 5.64 1992 Erzincan depremi için Σ_{xx} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……66
Şekil 5.65 1992 Erzincan depremi için Σ_{yy} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……67
Şekil 5.66 1992 Erzincan depremi için Σ_{zz} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……67
Şekil 5.67 1992 Erzincan depremi için T_{xy} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……67
Şekil 5.68 1992 Erzincan depremi için T_{xz} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……....68
Şekil 5.69 1992 Erzincan depremi için T_{yz} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……....68
Şekil 5.70 1992 Erzincan depremi için Σ_{xx} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……....69
Şekil 5.71 1992 Erzincan depremi için Σ_{yy} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……69
Şekil 5.72 1992 Erzincan depremi için Σ_{zz} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……....69
Şekil 5.73 1992 Erzincan depremi için T_{xy} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……....70
Şekil 5.74 1992 Erzincan depremi için T_{xz} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……70
Şekil 5.75 1992 Erzincan depremi için T_{yz} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……70

Şekil 5.76 2020 Elazığ depremi 3258 nolu düğüm noktasının y eksenindeki yer değiştirme grafiği……71
Şekil 5.77 2020 Elazığ depremi için Σ_{xx} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……72
Şekil 5.78 2020 Elazığ depremi için Σ_{yy} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……....72
Şekil 5.79 2020 Elazığ depremi için Σ_{zz} normal gerilmeleri, envelope max. (kPa)……72
Şekil 5.80 2020 Elazığ depremi için T_{xy} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……73
Şekil 5.81 2020 Elazığ depremi için T_{xz} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……73
Şekil 5.82 2020 Elazığ depremi için T_{yz} kayma gerilmeleri, envelope max. (kPa)……73
Şekil 5.83 2020 Elazığ depremi için Σ_{xx} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……74
Şekil 5.84 2020 Elazığ depremi için Σ_{yy} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……74
Şekil 5.85 2020 Elazığ depremi için Σ_{zz} normal gerilmeleri, envelope min. (kPa)……75
Şekil 5.86 2020 Elazığ depremi için T_{xy} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……75
Şekil 5.87 2020 Elazığ depremi için T_{xz} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……75
Şekil 5.88 2020 Elazığ depremi için T_{yz} kayma gerilmeleri, envelope min. (kPa)……76

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Taşların ortalama mekanik özellikleri…….14
Tablo 3.1 Analiz tiplerinin karşılaştırılması ……...21
Tablo 4.1 Sultan Hamit köprüleri için kullanılan malzeme özellikleri…….30
Tablo 5.1 Sultan Hamit I köprüsü kütle katılım oranları……..37
Tablo 5.2 Sultan Hamit II köprüsü kütle katılım oranları…….39
Tablo 5.3 Sultan Hamit III köprüsü kütle katılım oranları……....40
Tablo 5.4 Sultan Hamit I köprüsü deprem analizleri……44
Tablo 5.5 Sultan Hamit II köprüsü dinamik analizi…….....54
Tablo 5.6 Sultan Hamit III köprüsü dinamik analizi……65

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
b	Taş Malzeme
c	Homojenleştirilmiş Malzeme
D	Rijitlik Matrisi Ve Yük Vektörüne Bağlı Olan Deplasman Vektörü
Fb	Tuğla Ya Da Taşın Basınç Dayanımı
Fc	Homojenleştirilmiş Olan Yığma Malzemelerinin Basınç Dayanımı
Fm	Harç Malzemesinin Basınç Dayanımı
K	Sistemin Veya Elemanın Geometrik Özelliklerine Bağlı Olan Rijitlik Matrisi
m	Harç Malzemesi
R	Sistemin Ya Da Elemanın Yük Vektörü
v	Poisson Oranı
V	Hacimsel Oran
Y	Yoğunluk
C	Sönüm
K	Rijitlik Matrisleri
M	Kütle
a	Rölatif İvme
u	Yerdeğiştirme Vektörü
v	Hız Vektörü

Kısaltma	Açıklama

ÖZET

TARİHİ YIĞMA TAŞ KÖPRÜLERİN DİNAMİK ANALİZİ "ERZURUM AŞKALE İLÇESİNDE SULTAN HAMİT KÖPRÜLERİ''

Öztürk, Çağrı O.

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Senem Yılmaz Çetin

İkinci Danışman: Doç. Dr. Erkut Sayın

Haziran 2022, 103 sayfa

Tarihi köprüler diğer tarihi yapılar gibi ülkeler için kültür mirasının önemli parçalarıdır. Ülkemizde de çeşitli medeniyetlere ait çok sayıda tarihi köprü bulunmaktadır. Köprülerin esas görevi iki yer arasındaki açıklığı aşarak ulaşımı kolaylaştırmaktır. Köprüler insanoğlunun işlerini kolaylaştırma, daha hızlı hareket etme, bulunduğu coğrafyada hayatta kalabilmenin önemli bir parçasıdır. Tarihi köprüler geçmişle günümüz arasında yaşamış olan medeniyetlerin sosyolojik, ekonomik ve kültürel yapılarını anlamamıza da yardımcı olmaktadır. Tarihi köprüler gerek doğa olayları gerekse insani faktörlerden dolayı deformasyona uğramış ve bir kısmı yıkılmıştır. Ülkemizin büyük bir bölümünün deprem riski yüksek bir bölgede olduğu düşünülürse bu köprülerin depremler karşısında göstereceği davranışın bilinmesi son derece önemlidir. Bu nedenle yapıların nümerik ve deneysel çalışmalarla dinamik davranışları incelenmekte, geçmiş depremlerden elde edilen veya yapay deprem ivme kayıtları kullanılarak deprem analizleri yapılmaktadır. Bu doğrultuda yapıların zayıf yönlerinin güçlendirilmesi amaçlanmıştır.

Tarihi yığma köprüler tarihi yapıların bir bölümünü oluşturmaktadır. Yığma yapılarda birbirinden farklı özellikteki malzemelerin bir arada olması nedeniyle yapının nümerik analizi güçleşmektedir. Bu yüzden günümüze ulaşmış tarihi yığma köprülerin gelecek nesillere aktarılması amacıyla restorasyonlarının özenle yapılması ve korunması için deprem karşısında oluşabilecek davranışlarının gerçeğe yakın bir şekilde değerlendirilmesi gerekir.

Bu tez çalışmasında, Erzurum ili Aşkale ilçesinde bulunan tarihi Sultan Hamit I-II ve III köprüleri nümerik uygulama olarak dikkate alınmıştır. Bu köprüler SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiştir. İlk olarak köprülerin kendi ağırlığı altında statik analizleri yapılmıştır. Daha sonra köprülerin modal analizleri yapılarak dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Köprülerin dinamik karakteristikleri belirlendikten sonra sismik açıdan değerlendirilmelerinin yapılabilmesi için zaman tanım alanında dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizlerde 1992 Erzincan ve 2020 Elazığ depremlerinin ivme kayıtları kullanılmıştır. Dinamik analizler sonucunda köprülerde oluşan gerilme ve yer değiştirme değerleri sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Tarihi köprüler, Dinamik analiz, Sonlu elemanlar

ABSTRACT

DYNAMIC ANALYSIS OF HISTORICAL MASONRY ARCH BRIDGES "SULTAN HAMIT BRIDGES IN ERZURUM ASKALE DISTRICT"

Öztürk, Çağrı O.
Master of Science in Department of Civil Engineering
Supervisor: Asst. Prof. Senem Yılmaz Çetin
Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Erkut Sayın
June 2022, 103 pages

Historical bridges, like other historical structures, are important parts of cultural heritage for countries. There are many historical bridges belonging to various civilizations in our country. The main task of bridges is to facilitate transportation by crossing the gap between two places. Bridges are an important part of facilitating the work of human beings, moving faster and surviving in their geography. Historical bridges also help us to understand the sociological, economic and cultural structures of civilizations that have lived between the past and the present. Historical bridges have been deformed and some of them have been destroyed due to natural events and human factors. Because of a large part of our country is in a region with high earthquake risk, it is extremely important to know the behavior of these bridges response to earthquakes. For this reason, the dynamic behavior of the structures is examined with numerical and experimental studies, and earthquake analyzes are made using earthquake acceleration records obtained from past earthquakes or artificial earthquakes. In this direction, it is aimed to strengthen the weak aspects of the structures.
Historical masonry bridges consist of a part of the historical structures. Due to the combination of materials with different properties in masonry structures, the numerical analysis of the structure becomes difficult. For this reason, in order to carry out the restoration and protection of historical masonry bridges that have survived to the next generation, it is necessary to evaluate their behavior response to earthquakes.
In this thesis, the historical Sultan Hamit I-II and III bridges in the Aşkale district of Erzurum province were taken into consideration as a numerical application. These bridges were modeled in three dimensions using the SAP2000 finite element program. First, static analyzes of the bridges under their own weight were made. Then, the dynamic characteristics of the bridges were determined by making modal analyzes. After the dynamic characteristics of the bridges were determined, dynamic analyzes were carried out in the time history in order to evaluate them for earthquake response. Acceleration records of 1992 Erzincan and 2020 Elazıg earthquakes were used in dynamic analyses. As a result of dynamic analysis, the stress and displacement values of the bridges were presented.

Key Words: Historical bridges, Dynamic analysis, Finite elements

1. GİRİŞ

Dünya tarihine bakıldığında yığma yapıların oldukça yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Yığma yapılar tuğla, taş ve kerpiç gibi malzemelerden yapılmış duvarların taşıyıcı sistem olarak kullanıldığı yapılardır. Günümüzde kullanılan yapılar genel olarak betonarme olsalar da, kırsal kesimlerde yığma tipi yapılar halen yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Tarihi köprüler, inşalarından itibaren hem kültürel miras hem de karasal ulaşımın önemli bir parçası olmuşlardır. Yeryüzünün jeolojik yapısı nedeniyle birçok doğal afeti yaşayan tarihi köprülerin zarar görmemeleri adına koruyucu önlemlerin alınması zorunludur. Bu çalışma kapsamında incelenen köprüler yapısal ve yapısal olmayan çeşitli elemanlardan oluşmaktadır. Bunlar, yığma duvar sistemi ile inşa edilmiş olup kemerler, temeller, dolgu ve tempan duvarlardan meydana gelmektedirler (Hökelekli ve Yılmaz, 2019).

Eski dönemlerden günümüze kadar ulaşmayı başarmış olan medreseler, köprüler, camiler vb. türdeki yapılar incelendiğinde, neredeyse tamamının yığma tekniğiyle inşa edilen yapılar olduğu görülmektedir. Bu nedenle de yığma yapıların mekanik davranışının tüm yönleriyle bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda son dönemlerde tarihi yığma yapılar ile ilgili birçok çalışmaya imza atılmıştır.

Yığma yapılar, betonarme yapılar gibi homojen karışımlar ile oluşturulmuş taşıyıcı duvarlardan oluşmamaktadırlar. Söz konusu yapılarda taşıyıcı elemanlar düşey ve heterojen karışımlarla oluşturulmuş duvar yapılarından meydana gelmektedir. Bu nedenle incelenmelerinde kullanılacak analiz yöntemleri çelik ya da prefabrike yapılar gibi düşünülmemelidir. Ancak heterojen yapılarda bulunan taşıyıcı elemanların modellemesi oldukça güçtür. Ayrıca duvarlarda oluşacak olan çatlama şekilleri söz konusu heterojenlik nedeniyle etki altında kaldıkları güce göre değişkenlik gösterebilmektedir. Burada bahsedilen problemin çözüme kavuşturulabilmesi amacıyla çeşitli modelleme yöntemleri geliştirilmiştir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Tarihi yığma yapıların deprem davranışlarının belirlenmesi, bu yapıların korunması ve gelecek nesillere güvenle aktarılması adına büyük önem taşımaktadır. Tarihi köprülerimiz kültür mirasımızın önemli bir parçasıdır. Bu yapılar derin vadileri, bataklıkları ve büyük sulak alanları geçebilmek amacıyla inşa edilmişlerdir. Ülkemiz

yüzyıllarca birçok medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Bu sebeple ülkemizde eski uygarlıklardan kalmış ve günümüze ulaşan birçok tarihi köprü bulunmaktadir. Tarihi kemer köprülerin korunması ve restorasyonlarının daha doğru bir şekilde yapılabilmesi için bu köprülerin deprem karşısındaki tepkilerinin incelenmesi gerekir. Bunun için geçmiş depremlerden elde edilen deprem ivme kayıtları kullanılarak deprem analizleri yapılır. Bu tez kapsamında tek açıklığa sahip Erzurum ili Aşkale ilçesinde bulunan tarihi Sultan Hamit Köprüleri'nin deprem analizleri yapılarak köprülerin deprem karşısındaki davranışları incelenmiştir. Ayrıca yapılacak analizlerinden elde edilen gerilme dağılımları dikkate alınarak olası bir deprem karşısında köprünün hasar alma riski yüksek olan bölgeleri değerlendirilecektir. Literatür incelendiğinde tarihi yığma yapıların deprem davranışını belirlemek amacıyla yapılmış çalışmaların dünyada güncelliğini koruduğunu görmek mümkündür. Ülkemizde ise diğer yapılar ile kıyaslandığında tarihi yapılar konusunda halen büyük bir eksiklik bulunmaktadir. Yapılacak olan bu tez çalışması, geçmiş ve günümüz arasında kültürel bir köprü görevi gören ve kültürel mirasımız olan tarihi yığma köprülerimizi korumak ve gelecek nesillere aktarmak için yapılacak olan restorasyon ve onarım çalışmalarına yardımcı olacak niteliktedir. Çalışmadan elde edilecek sonuçlar ışığında tarihi köprüler üzerine farklı çalışma ve projelerin yapılması da hedeflenmektedir.

Yapılmış olan bu tez kapsamında daha önce yapılmış olan birçok araştırma farklı yönleriyle bir bütün olarak araştırılmıştır.

1.2 Önceki Çalışmalar

Literatür geçmişine bakıldığında, tarihi yığma yapıların anlaşılması için birçok araştırmacı tarafından sıklıkla incelendiği görülmektedir.

Riva vd., (1998), İtalya'nın Bologna şehrinde bulunan Asinelli Kulesi'ni ABAQUS programını kullanarak makro modelleme tekniği ile incelemiş, kulenin sismik davranışları hakkında bilgi vermiştir.

Fanning ve Boothby (2001) tarafından İrlanda'daki Griffith Köprüsü, yayılı çatlak modeli kullanılarak araştırılmış ve bu çalışma neticesinde köprünün taşıyıcı yapıları modellenmiştir. Drucker-Prager malzeme modeli ile oluşturulan köprü, dolguları ve dolguyla taşlar arasında varsayımsal olarak kabul edilen sürtünmeli teması gözeterek statik yükler altında köprünün davranışları incelenmiştir. Aynı zamanda söz konusu

modelin köprü ile uyumu araştırılmıştır. Yapılan modelin köprü davranışlarını yansıttığı belirlenmiştir.

Galasco (2004), tarihi yığma köprüler ile binaların 3 boyutlu modellemesini doğrusal olmayan makro modelleme yöntemi ile gerçekleştirmiş, söz konusu modelleme ile deneysel verileri karşılaştırmış, neticesinde güvenilir sonuçlar elde etmiştir. Ayrıca makro eleman modelinin geniş yığma yapılarda sınırlı serbestlik dereceli sistem ile doğrusal olmayan sismik analizlerin gerçekleştirilmesine imkan tanıdığını belirlemiş, söz konusu analizlerin bilgisayar teknolojisi kullanılarak yapıldığında çok daha kısa sürede verilere ulaşılabileceğinin altını çizmiştir.

Aoki vd., (2004), yaptıkları çalışmada Japonya'daki üç açıklıklı taş kemer Rakanji Köprüsü'nün dinamik analizini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Çevresel titreşim testi ile köprünün belirli yerlerine ivmeölçerler yerleştirilmiş ve titreşim kayıtları alınmıştır. Böylelikle yapının deneysel dinamik özellikleri (mod şekilleri, sönüm oranları ve frekans) belirlenmiştir. Çalışmalar sonucunda köprünün elde edilen deneysel ve teorik dinamik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Bayraktar vd., (2007), yaptıkları çalışmada Trabzon'un Akçaabat ilçesinde bulunan tarihi Şinik Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini incelerlerken Operasyonel Modal ve sonlu eleman yöntemlerini kullanmışlardır. Operasyonal Modal Analiz yönteminde titreştirici olarak yaya yürüyüşü ve taşıt yükü gibi çevresel etkilerden yararlanılmıştır. Dinamik analizlerde 1992 Erzincan depremi ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda deneysel ve analitik sonuçlar arasında karşılaştırmalar yapılmış, ölçümler sonucunda mod şekilleri açısından farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu farklılıkların giderilmesi için sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

Dabanlı (2008), Hırka-i Şerif Cami'ni modelleyerek dinamik ve statik analizlerini gerçekleştiren tarihi yığma yapılardan bahsetmiştir. Ayrıca söz konusu yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle yapısal açıdan ve güvenlik açısından değerlendirilebileceğini göstermiş, Hırka-i Şerif Cami'si için de güçlendirme önerilerinde bulunmuştur.

Karaton vd., (2009), Erzincan depreminden etkilenen Malabadi Köprüsü'nü incelemiş, yayılı çatlak modelini kullanarak köprü üzerinde analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca çalışmada köprü üzerinde lineer olmayan analizlerin etkinliği incelenmiştir.

Orhan (2010), kagir kemer köprü yapılarının yük taşıma kapasitelerini hesaplamak için kullanılan metotları incelemiş, tek açıklığa sahip kemerli yapıdaki köprülerin göçme rijitlerini blok yöntem kullanarak hesaplanmasını sağlayan bir algoritma geliştirmiştir.

Birinci (2010), Rize'de bulunan Osmanlı ve Şenyuva Köprüleri'ni incelerken sonlu elemanlar yöntemi ile operasyonel modal analiz yöntemlerini birlikte kullanmıştır. Yapılan bu çalışmaya göre teorik ve deneysel olarak köprü dinamiği karakteristikleri belirlenmiş ve köprülerdeki mevcut şartların en doğru şekilde yansıtıldığı sonlu eleman modeli, deneysel veriler ile desteklenmiştir.

Sayın vd., (2011), Malatya'da bulunan tarihi Uzunok Köprüsü'nü makro modelleme yöntemi ile incelemiş, 2003 yılında gerçekleşen Bingöl depreminin ivme kayıtlarını kullanarak doğrusal olan ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirmiştir. Çalışma neticesinde köprünün etkisi altında kaldığı depremin hasar dağılımları belirlenmiştir.

Castellazzi vd., (2012) yaptıkları çalışmada sonlu eleman modelini iyileştirerek 15 açıklıklı tren yolu köprüsüne uygulamışlardır. Bu çalışmaya göre köprünün mevcut yapısal durumu ve güçlendirme çalışmalarını değerlendirmişlerdir.

Korkmaz vd., (2013), Rize'deki Timisyat Köprüsü'nü üç boyutlu modelleyerek sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiş, taş kemer köprülerin sismik yükler altındaki davranışlarını belirlemeyi hedeflemişlerdir. Zaman tanım alanında dinamik analizlerin yapıldığı çalışmada sismik etki için 10 adet deprem ivmesini kullanılmışlardır. Çalışma neticesinde kullanılan her bir deprem kaydı için ayrı ayrı belirlenen gerilme ve yer değiştirme verileri elde edilmiş ve bu sonuçlar bir bütün olarak değerlendirilmiştir.

Ceylan (2013), Karayolları 13. Bölge Müdürlüğü sınırlarında bulunan tüm tarihi kemer köprüleri araştırarak köprülerde meydana gelen hasarların sebeplerini, etkilerini ve onarım-koruma yöntemlerini değerlendirmiştir.

Çakır ve Uysal (2014), yığma kemer yapılar üzerinde yapılan kompozit malzeme güçlendirmeleri incelemiş, bu malzemelerin sönüm ve frekans oranlarını sayısal analizler ve deneysel çalışmalar ile kıyaslayarak olumlu bir sonuç elde edilebileceğini belirlemişlerdir.

Çalık vd., (2014), Trabzon'da bulunan tarihi Küçük Fatih Camisi'ni incelemiş, tonoz çatısının hasar gören kısımlarına tadilat öncesi ve sonrası olmak üzere titreşim testleri

uygulamışlardır. Buna göre elde edilen verilerin değerlendirildiği çalışmada, sonlu eleman modelinin iyileştirilmesinde ve yapı davranışlarını anlamada ortam titreşim testlerinin faydaları irdelenmiştir.

Tetik (2015), Yığma yapıların oluşturulma mantığı ve yapısal özelliklerini yapmış olduğu tez çalışmasında incelemiş, yığma yapılar için oluşturulmuş analiz yöntemlerini ve modelleme tekniklerini inceleyerek açıklamıştır. Ayrıca hazırlamış olduğu çalışmada İstanbul'da bulunan Şeyh Süleyman Mescidi'nin üçboyutlu sonlu eleman modelini bilgisayar ortamında oluşturarak, söz konusu yapının dinamik analizlerini ve deprem dayanımını araştırmıştır.

Türker vd., (2015), yaptıkları çalışmada 1/10 ölçeğinde laboratuvar ortamında oluşturulan yığma taş kemer köprü modelinin dinamik davranışını deneysel ve analitik yöntemler kullanarak incelemişlerdir. Bu amaçla, SAP2000 programı kullanılarak köprünün sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Model üzerinde modal analiz yapılarak dinamik özellikler analitik olarak belirlenmiştir. Çevresel titreşim testi ile yapının deneysel dinamik özellikleri (mod şekilleri, sönüm oranları ve frekans) belirlenmiştir. Çalışma sonucunda deneysel ve analitik sonuçlar arasında karşılaştırmalar yapılmış, frekanslar açısından farklılıklar olduğu görülmüştür.

Özkaya vd., (2015), yaptıkları çalışmada tarihi Kireçli Köprüsü'nün sismik davranışını incelemişlerdir. Yapının sonlu eleman modelini oluşturarak model üzerinde doğrusal olmayan dinamik ve statik itme analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan bu analizlerde en büyük yer değiştirme köprüsün orta bölgesinde oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Onat ve Sayın (2015), yaptıkları çalışmada tarihi Tağar Köprüsü'nün dinamik davranışını incelemişlerdir. Bu amaçla, ANSYS sonlu eleman programını kullanarak köprünün üç boyutlu sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlardır. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli kullanılarak Tağar Köprüsü'nün doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizlerde 13 Mart 1992 Erzincan depreminin ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Köprü modellenirken makro modelleme tekniği kullanılmıştır.

Çoruhlu (2017), yapmış olduğu tez çalışmasında Doğu Karadeniz'de mevcut her bir köprüyü sonlu elemanlar yöntemi ile tek tek modellemiştir. Köprüler üzerinde çeşitli testler gerçekleştirmiş, ulaştığı veriler için formülasyon belirlemiş ve belirlediği

formüllerin köprülerdeki yer değiştirme, gerilme ve frekans değerlerinin tahmininde gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Güllü (2017), yaptığı çalışmada tarihi Cendere Köprüsü'nün sismik etki altındaki davranışını incelemiştir. Bu amaçla, SAP2000 programı kullanılarak köprünün sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Yapılan çalışma, köprünün çekme dayanımının kemer kısmında aşılabileceğini, rezonans görülebileceğini ve yüksek spektral büyütmelerin meydana gelebileceğini göstermiştir.

Uray (2018), Bursa'da bulunan İznik Yeşil Cami üzerinde çeşitli deneyler ve çalışmalar yapmış, bahsedilen yapının sonlu eleman modeli tekniği ve çeşitli analiz yöntemleri kullanarak hasarlı bölgeleri incelemiştir. Hazırlanan bu modelin Yeşil Cami'nin günümüzdeki yapısal özellikleri ile örtüştüğü belirlenmiştir.

Özdemir (2018), Yapmış olduğu çalışmada tarihi yapıları çeşitli yönleriyle ele almış, örnek yapı olarak Antik Kent Tiyatro binasını incelemiştir. Çalışma kapsamında yapının üçboyutlu modellemesi çıkartılmış ve sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Ayrıca yapılan dinamik çalışmalar neticesinde yapıdaki şekil değiştirmeler ve gerilmeler, sismik yük altında yapı davranışları ve mod şekilleri belirlenmiştir. Buna göre de yapının duvarlarındaki dış yüzeyin yetersiz derecede rijitliğe sahip olduğu ve deprem yüküne maruz kaldığında yıkılma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Çalışma kapsamında yapının duvarlarının güçlendirilmesi ve olası düzlem dışı hareketlerin önüne geçilebilmesi için güçlendirme tavsiyelerinde bulunulmuştur.

Calp (2018), SAP2000 programı kullanarak farklı yapısal özelliklere sahip üç adet minarenin çeşitli deprem yüklerini incelemiş, deprem kaydı olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli, 12 Kasım 1999 Düzce ve 23 Ekim 2011 Van depremlerini kullanmıştır. Analizlerin neticesinde minarelerde basınç ve çekme gerilimlerinin z ekseninde oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çekme kuvvetinin meydana geldiği noktalarda minarelerin doğal yapısına uygun güçlendirme tavsiyeleri verilmiştir.

Gönül ve Sakcalı (2019), Bursa'da bulunan tarihi Irgandı Köprüsü'nü incelemiş, yaptıkları çalışmada köprünün tarihinden başlayarak yapısal özelliklerine kadar birçok bilgiye değinmişlerdir. Ayrıca bahsedilen tarihi köprünün sonlu eleman tekniği ile modelini oluşturmuşlardır. Oluşturdukları model üzerinde ANSYS programı ile de çeşitli analizler yapmış, köprü üzerinde gerilme dağılımlarını ve oluşan yer değiştirmeleri incelemişlerdir. Son olarak da oluşturdukları sonlu eleman modeline

ölçeklendirdikleri 7 adet deprem simülasyonunu köprü üzerinde uygulayarak 20 farklı frekans değerini belirlemişler ve bu doğrultuda köprünün en fazla yer değiştirmeye maruz kalan kısmının akış doğrultusunda ve en çok asal gerilmelerin mesnet bölgelerinde oluştuğunu belirlemişlerdir.

Yazgan ve Ünay (2019)'un yayınlanmış olan çalışmalarında tarihi yapılar, hem yapısal hem de mimari açılardan değerlendirilmiştir. Söz konusu çalışmada Bursa'daki Sinan Paşa Külliyesi imaret kısmı üç boyutlu modelleme ile incelenerek analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde ise herhangi bir müdahaleye maruz kalmadıkça yapının oldukça güçlü olduğu ancak daha sonra gerçekleşebilecek düşük kuvvetteki bir sismik hareketi dahi kaldıramayağacı öngörülmüştür.

Öncü vd., (2019), ANSYS programını kullanarak tek açıklığa sahip tarihi Tuzluca Köprüsü'nü incelemiş, köprünün üç boyutlu modellemesini çıkartarak dinamik ve statik yüklere maruz kaldığında göstereceği davranışı ele almıştır. Çalışmanın neticesinde köprünün sınırlı hasar performans düzeyi yeterli görülmüştür.

Özmen (2019), çalışmasında köprünün üç boyutlu sonlu elemanlar modelini ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak hazırlamıştır. Tarihi yığma köprülerin deprem karşısındaki davranışını incelenerek, yakın ve uzak-fay hareketlerinin etkilerini gözlemlemek amacıyla lineer dinamik analizleri yapılmıştır.

Akın (2020), çalışmasında SAP2000 sonlu eleman paket programını kullanarak seçilen tarihi köprünün üç boyutlu sonlu eleman modellemesini çıkarmış, köprünün dinamik karakteristikleri olan periyot, frekans ve mod şekillerini belirlemiş ve sonra tarihi yığma köprünün çeşitli sönüm oranları için zaman tanım alanında dinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışmanın neticesinde oluşan yer değiştirme ve gerilme değerleri bulunmuş, farklı sönüm oranlarının tarihi yığma köprülerin deprem davranışlarına olan etkisi gözlemlenmiştir.

2. TARİHİ YIĞMA KÖPRÜLER

Yığma yapılar, imal edilen tuğlalardan ya da harç bağlantıları ile oluşturulmuş sistemlere verilen genel bir isimdir. Yığma yapılar esas olarak heterojen bir yapısal özellik göstermektedirler. Söz konusu yapıların meydana getirilişinde kullanılan bloklar, imal edilen tuğlalar, kesme taşlar ya da doğal taşlardan oluşturulabilmektedir. Ayrıca bağlantı elemanı olarak kil ile kireç ya da çimento esaslı harç (yapıştırıcı) kullanılmaktadır. Yığma yapılar davranış olarak kullanılan malzemelerin standart özelliklerinin dışında özelliklere sahiptir (Özkaya, 2019).

Yeryüzünde oldukça eski tarihlerden günümüze kadar ulaşmayı başarmış çok sayıda yığma köprü bulunmaktadır. Söz konusu köprüler üzerinde yapılan araştırmalar, farklı amaçlar için ve farklı tekniklerle inşa edilen bu köprülerin aynı zamanda değişik formlarda, şekil, boyut ve malzeme özellikleri açısından da değişkenlik gösterdiklerini belirlemiştir. Çalışma, tarihi yığma köprülerin türleri, ana sistem elemanları ve inşa malzemeleri hakkında bilgileri içermektedir.

2.1 Tarihi Yığma Köprülerin Çeşitleri

İnsanlık var olduğu çağlardan itibaren doğal yaşamda karşılarına çıkabilecek her türlü tehlikeye karşı barınabilme ihtiyacı hissetmiştir. Bu sebeple de öncelikle mağaraları ve altı oyuk halde bulunan kayaları barınak olarak kullanmıştır. İlerleyen çağlarda ise çevreden edindikleri ahşap ya da taş gibi birçok malzemeyi kullanarak kendilerine barınak inşa etmeye başlamışlardır. Zamanla tuğla ve kerpiç malzemelerini keşfeden insanlık çok daha sağlam yapılarda barınma ihtiyaçlarını karşılamışlardır. Barınma ihtiyacının temin edilmesiyle birlikte daha geniş yaşam alanları ihtiyacı duyan insanlık ahşap, tuğla ve taş gibi birden fazla malzemeyi birlikte kullanarak daha büyük yapılar inşa etmeye başlamıştır. İnsanların göç ve ticaret ihtiyaçları sebebiyle uzun yolları kısaltma gereksinimi duymuşlardır ve bu doğrultuda taş ya da ahşap malzemeler kullanarak bir çeşit geçitler kullansalar da zamanla köprü sistemleri inşa etmişlerdir (Nil, 2017).

İnşa edilecek olan köprünün türünü belirlemek oldukça önemlidir. Nehir yatağının derinliği ve alan genişliği köprü türünün seçimini etkileyen önemli bir husustur. Geniş su yatağına sahip nehirlerde alçak genişliğe sahip ve küçük gözlerden suyu geçirmek mantıklı olan seçimdir. Köprüde bulunan göz sayısının fazla olması ve köprü boyunun uzun olması nehrin yatak açıklığının geniş olmasından kaynaklanmaktadır. Yatak derinliğinin fazla olduğu nehirlerde ise köprü ayakları nehrin zemini yerine zeminin

yükseldiği noktalara konumlandırılarak üzerine kemer yerleştirilir. Bu sayede tüm bileşenleriyle bir bütün halinde bulunan büyük ve eğimli haldeki dik köprüler meydana getirilmiş olur (İlter, 1978).

Taş köprülerin sahip oldukları yapısal ve fiziksel farklılıklar çeşitli kaynaklarda değişik şekillerde sınıflandırılmışlardır. İlter (1978) taş köprüleri akarsu yatağının genişliğine ve derinliğine göre iki ayrı türe ayırmıştır. Bunlardan ilki yüksek ve geniş nehir yatağına inşa edilmiş ve ana kemerin her iki yanından sert bir yükseliş gösteren dik köprülerdir. İkincisi ise nehir yatağı genişliği ve yüksekliğine göre belirgin farklar göstermeyen, yapısal olarak düz ya da düze yakın ve iki ya da daha fazla göze sahip köprülerdir.

Altınsapan (2001) ve Çulpan (2002) ise köprülerin çeşitli özelliklerini göz önünde bulundurarak sekiz ayrı grup oluşturmuşlardır. Bunlar:

1. Sahip oldukları şekillere göre köprüler (dik köprüler, düz köprüler ve her iki kısmından yumuşak bir ivme ile başlayıp yatay düzlemde bulunan köprüler).
2. Merdiven gibi kademeli olarak döşenen köprüler.
3. Bulundukları alanın topografik yapısına uygun olarak inşa edilen kesik köprüler.
4. Tek açıklı ya da çok açıklı yani açıklık sayısına göre köprüler.
5. Planlarına göre köprüler.
6. Ayağında ya da üzerinde dükkan ya da ev gibi yapılaşmalar bulunan köprüler.
7. Yuvarlak ya da sivri oluşlarına göre köprüler.
8. Payanda yani selyaran şekillerine göre köprüleri

2.2 Tarihi Yığma Köprülerin Taşıyıcı Sistem Elemanları

Tarihi yığma köprülerin taşıyıcı sistem elemanları; ana taşıyıcı elemanlar ve yardımcı taşıyıcı elemanlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Germen vd., 2000). Ana taşıyıcı elemanlar: ayaklar, temeller, kemerler, kanat duvarlar ve tempan duvarlardan oluşmaktadır. Yardımcı taşıyıcı elemanlar ise; çörtenler, selyaranlar, hafifletme kemerleri, korkuluklar, kornişler, kitabeler ve pilonlardır.

- **Temel Sistemleri:** Temel sistemler; mevsimsel yükler, yapının kendi yükü ya da deprem yükü gibi birçok yükü geniş bir alana yayılarak iletilmesi amaçlanarak yapılmış olup, yapıların ayakta kalabilmeleri için hayati öneme sahiptirler. Sağlam zeminlere inşa edilen yapılarda genel olarak sığ temeller kullanılmakla beraber

yumuşak ya da dolgu zeminler için derin temeller kullanılmaktadır. Sığ temeller incelendiğinde ayrık temellerden oluştukları ve bu temellerin ayak ve sütunların altında bulundukları görülmüştür. Söz konusu temel sisteminin çeşitli boyutlarda bulunan ahşap malzemelerin bir ızgara yapısına mesnetlendiği belirlenmiştir. Bahsedilen ızgara sistemi, yapının maruz kaldığı yükleri temel alanı dâhilinde zemine iletmekle görevlidir. Derin temellerden oluşan temel sistemleri ise ahşap kazıkların zemine çakılması şeklinde oluşturulmuş sistemlerden meydana gelmektedir (Çamlıbel, 2000; Mahrebel, 2006).

- **Ayaklar:** Köprüde bulunan kemerlerin oturtulabilmesi için geniş kolonlar şeklinde oluşturulan ayakların işlevi konumlarına göre değişkenlik göstermektedir. Kemer sayısı fazla olan düz yapıdaki köprülerde orta ayakların önemi büyüktür. Aynı zamanda orta ayaklar sağlam zeminlere oturtulmuş köprülerde su taşkınları yaşanması durumunda suyun hareketini yönlendirmek amacını da taşımaktadırlar (İlter, 1978; Khan, 2010). Köprülerin kenar kısımlarında yer alan yan ayaklar ise, köprü bitimindeki duvarları desteklemek amacıyla inşa edilmiş yapılardır (Khan, 2010).
- **Duvarlar:** Duvar; kerpiç, tuğla ve taş gibi çeşitli malzemeler ile alanları bölme ya da yapıların taşıyıcı elemanı olarak kullanılabilen, farklı şekillere sahip ve zemine iletilecek olan yükleri düşey düzlemde aktarabilme özelliğine sahip yapısal elemandır. Duvarlar, taşıyıcı özelliklerine ve yapısal işlevlerine göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilmektedirler (İzgi, 2020).

Kullanılan malzemelere göre duvar çeşitleri:

✓ Taş duvarlar: İnce yonu, kaba yonu, moloz ve kesme taş duvarlar olarak sınıflandırılırlar.

- ❖ **İnce yonu taş duvarlar:** Genel olarak binaların cepheleri için oluşturulan duvar çeşididir. Estetik açıdan güzel bir görünüm sunan ince yonu duvarlar aynı zamanda işçilik ve maliyet açısından ekonomik değildir.
- ❖ **Kaba yonu taş duvarlar**: Yaklaşık 30 cm genişliğinde, 20 cm yüksekliğinde ve 25 cm derinliğe sahip taşların kullanıldığı kaba yonu duvarlar, istinat duvarı ve cephe duvarları gibi çeşitli amaçlarla inşa edilmektedirler.
- ❖ **Moloz taş duvarlar**: Taş ocaklarından çıkarılmalarından itibaren herhangi bir işleme tabi tutulmayan taşlar kullanılarak oluşturulmuş olan duvar çeşididir.

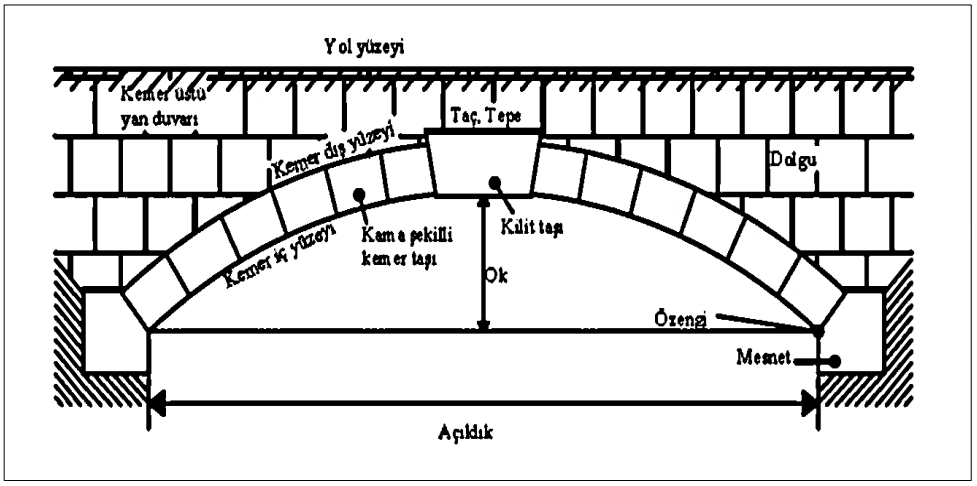
- ❖ **Kesme taş duvarlar:** 1.0 cm derz kalınlığını geçmeyen ve duvar kalınlığına eşit derinliğe sahip, metal bağlantı ya da birbirine geçmeli bağlantılardan oluşan duvar tipidir. Makineler ya da el aletleri yardımıyla kesilen taşlar kullanılarak inşa edilirler ve işçilik açısından pahalıdırlar (Nabi, 2016).

✓ Köprülerin taşıyıcı duvarı olarak da bilinen tempan duvarlar, kemer sırtı ile yol arasındaki kısımda bulunur (Tunç, 1978). Bu duvarlar memba ve mansap kısımlarını birbirini ayırmaktadır (Ceylan, 2013).

✓ Kanat duvarlar, akarsuda bulunan köprülerin ayaklarında oyulmaların oluşmasına engel olurken, aynı zamanda köprüyü arazi ile sınırlayan duvarlardır. Akarsuyun her iki kıyısına inşa edilen bu yapılar, taşkınların yaşanması durumunda suyun yatağını terk etmesini engellemekle görevlidirler (Mcafee, 1998; Ceylan, 2013).

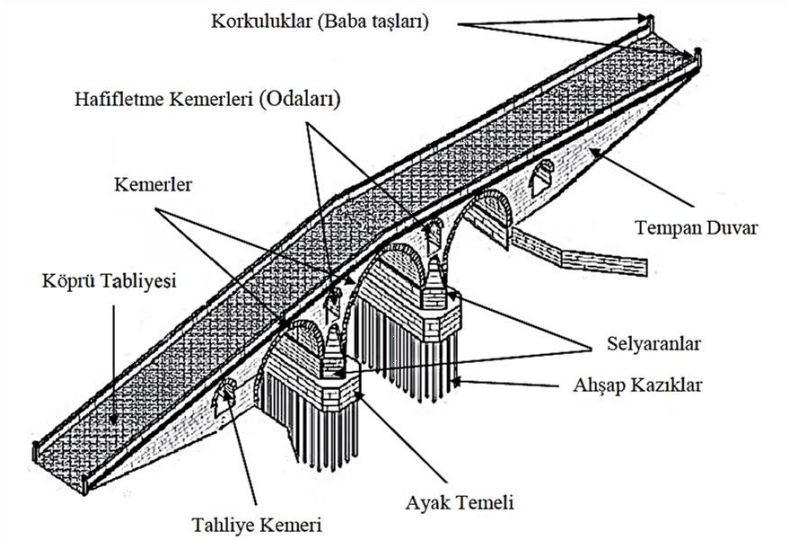
- **Kemerler:** Mimari yapılarda geniş açıklıkların aşılabilir olması için kemerler, kirişler ve lentolar inşa edilmektedir. Bu yapılar içindeki kemerler, duvar ya da iki ayak arasındaki açıklıkların üzerini eğrisel olarak örtebilmek amacıyla inşa edilmektedir. Kemerlerin sahip oldukları eğrisel yapı sayesinde üzerlerine binen yükler zemine güvenle aktarılmaktadır (Akın, 2020).

  Kemerler üç temel bileşenden oluşmaktadır; kilit taşları, özengi ve kemer. Kilit taşları kemerlerin zirve noktasında yer alarak üzengi ile arasında bulunan taşları kilitlemektedir. Özengi, kemerler ile ayak arasında bulunan başlangıç taşıdır. Kemer ile üzengi arasında kalan diğer taşlar ise kemer taşlarını meydana getirmektedir (Akın, 2020). Bir yığma kemer köprünün bölümleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Bir yığma kemer köprünün bölümleri (Akın, 2020)

- **Selyaranlar:** Selyaranlar memba tarafından gelen suyun çift taraflı olarak yönlendirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca geçen suyun köprü ayaklarına çarparak korozyonun engellenmesini da sağlamaktadırlar (Ceylan, 2013). Yuvarlak, üçgen, çokgen ya da merdiven gibi farklı şekillerde inşa edilebilmektedirler. Selyaranlar tarihi yığma köprülerin günümüze kadar ulaşmasını sağlayan en önemli elemanlardan bir tanesidir.
- **Tonozlar:** Kemerlerin yapısal olarak dikey doğrultuda ötelenmesi neticesinde meydana gelen yapılara tonoz denilir. Kabuk özellikte bulunan bu yapı elemanları aynı zamanda yükleri kemer yük taşıma prensibiyle doğrultulu olarak taşımaktadır (Ünay, 2002).
- **Çörtenler:** Tempan duvarların dışa doğru bir şekilde yani oluk formunda inşa edilmesiyle meydana gelen yapısal elemandır. Çörtenler genel olarak köprünün döşeme kısmını etkileyen kar ve yağmur birikintilerinin tahliyesinde işlev göstermektediler.
- **Korkuluklar (Baba Taşları):** Tabliye yapısının iki kenarında ve tempan duvar üzerine konumlandırılan korkuluklar, genel olarak köprü geçişleri sırasında güvenliğin temin edilebilmesi amaçlanarak konulan elemanlardır. Köprünün başında ve korkulukların başlangıçlarında bulunan dikey şekildeki taşlar ise korkuluk babası olarak adlandırılmaktadır (Tunç, 1978).
- **Pilonlar:** Kule şeklinde bulunan pilonlar, topuktan döşemeye kadar çıkan kısımda ya da orta ayak üzerinde bulunan kule şeklindeki yapılardır.
- **Kornişler:** Köprü boyunca ve her iki tarafından uzanan profil taşlarına korniş denilmektedir. Bu yapılar tempan duvarları ile korkulukların arasında yer almaktadır.
- **Hafifletme Kemerleri (Odaları):** Selyaranlardan birkaç taş yukarıda bulunan ve kemerlerin ayaklarının üzerinde bulunan boşluklara hafifletme kemerleri denilmektedir. Üst yapıdan ayaklara binen yükü azaltmak amacıyla inşa edilmektedirler (Akın, 2020).



Şekil 2.2 Tarihi yığma köprü elemanları (Akın, 2020)

2.3 Tarihi Yığma Köprülerde Kullanılan Malzemeler

2.3.1 Doğal taş

İlk çağlardan itibaren yapı inşasında kullanılan taş malzemesi, dayanıklı ve temini kolay bir malzeme olduğu için eski zamanlardan itibaren sıklıkla kullanılmıştır (Ünay, 2002). Basınç dayanımı açısından güçlü fakat çekme dayanımı açısından zayıf özellik gösteren taşlar, doğadan kolayca temin edilebilmektedir. Basınç dayanımı açısından kuvvetli olan taşlar, bu özellikleri nedeniyle yalnızca basınç dayanımına maruz kalan kubbe, tonoz ve kemer yapıların inşasında tercih edilmektedirler. Aynı şekilde kemerler tarafından yüklenen basıncı zemine ileten elemanlar da yine taşlardan oluşturulmuştur. Uzun kullanım sürelerine sahip olan taşlar tercih sebebi olmalarına karşın zaman zaman taş yapısında bozulmalar, aşınmalar ya da çatlak oluşumları görülebilmektedir (Ünay, 2002).

Daha önce de belirtildiği gibi taşlar çekme dayanımı açısından düşük bir kuvvete sahip olsalar da basınç dayanımları oldukça yüksektir. Bu durum esas olarak taşın türü, işçilik, kesim şekli ve kullanım alanı gibi birçok farklı etmenle direkt olarak ilintilidir. Doğal taşların ve tuğlanın genel mekanik özellikleri Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1 Taşların ortalama mekanik özellikleri (Yılmaz, 2006)

Taşın Cinsi	**Elastite Modülü KPa**	**Basınç Dayanımı KPa**	**Çekme Dayanımı KPa**
Kireç Taşı	$10x10^6$-$55x10^6$	18000-35000	2000-6000
Kum Taşı	$13x10^6$-$50x10^6$	5000-30000	2000-4000
Kuvars	$15x10^6$-$55x10^6$	10000-30000	3000-4000
Granit	$30x10^6$-$55x10^6$	30000-70000	4000-7000
Mermer	$25x10^6$-$70x10^6$	25000-65000	1000-15000

2.3.2 Tuğla

İlk çağlarda kerpiç malzemesinin güneş ışınlarına maruz bırakılarak kurutulması tekniği ile üretilen tuğlalar yığma yapı malzemelerinin bileşenlerinden biridir. Güneşte kurutma tekniği ile üretilen tuğlaların yağmur suyuna karşı dayanım kuvvetinin zayıflamasından dolayı bu teknikten vazgeçilerek 1000ºC'lere kadar sıcaklık kullanılarak pişirilmeye başlanmıştır. Bu sayede dayanımları artan tuğlalar ana malzeme olarak kilden üretilmektedirler (Türkçü, 2000). Tuğlaların dayanım kuvvetleri üzerinde pişirme süresi ve boşluk oranı etkilidir. Tıpkı taşlar gibi tuğlaların da çekme dayanımları düşük fakat basınç dayanımları yüksektir. İmalat açısından ihtiyaç duyulan ebatta kolayca üretilebilmeli tuğlaları daha avantajlı kılmaktadır.

2.3.3 Ahşap

Fiziksel olarak hafif bir malzeme olan ahşap aynı zamanda kolay işlenebilir, eğilmeye ve basınca karşı dayanıklı oldukları için büyük açıklıkların aşılabilmesinde önemli bir yere sahiptir. Yığma kagir yapılarda döşeme ve tavan sistemlerinde taşıyıcı sistem malzemesi olarak kullanılan ahşap malzemeler, eğilmeye ve çekmeye karşı dayanımları nedeniyle duvar yapılarda kullanılmışlardır (Özkaya, 2019).

2.3.4 Harçlar

Bağlayıcı bir malzeme ile suyun belirlenmiş miktarlarda karıştırılarak elde edilmesinden meydana gelen malzemelere harç adı verilmektedir. Harç kullanımı yapılarda bulunan elemanların bir bütün haline gelmesini sağladığı için büyük önem taşımaktadır (Ünay, 1997).

Yapılardaki taşıyıcı elemanların yüklerinin güvenli bir şekilde dağıtılmasına, hareket etmesine, esnemesine ve mevsimsel ya da jeolojik etkilerden yapının etkilenmemesini büyük ölçüde harçlar sağlamaktadır.

Harç malzemesinin mukavemeti ve kullanım şekli diğer yığma yapı birimleri ile kıyaslandığında çok daha farklı olmasına rağmen yığma yapılarının performansı

üzerinde direkt olarak etkilidir. Duvarların mukavemeti harcın bağlanma ve çekme dayanımına bağlı değişkenlik göstermektedir. Ayrıca duvar mukavemeti harcın malzemesine ve malzemelerin karışım yüzdesine de direkt olarak bağlıdır. Tarihi yığma yapılarda kullanılan harç malzemesi üzerinde dayanım testleri yapmak oldukça güçtür. Bu nedenle söz konusu yapılarda kullanılan harçlar içerdikleri bağlayıcı malzemenin niteliğine göre adlandırılmaktadırlar (Özen, 2006).

Horasan Harcı: Kiremit, tuğla vb. malzemelerin su ile karıştırılması şeklinde elde edilen harç türüdür. Hidrolik esaslı olan bu harçlara ülkemizce verilen isim horasan harcıdır. Söz konusu harç türü sahip olduğu hidrolik özellikler nedeniyle hamam, sarnıç, su kemeri ve su kuyusu inşalarında kullanılmıştır (Böke vd., 2004). Horasan harcında agrega olarak tuğlalar kullanılmıştır. Bu tuğlalar bazalt ya da kireç taşı gibi agregalardan daha düşük yoğunlukta ve çekme dayanımı açısından yüksek mukavemet göstermektedirler. Horasan harcına en güzel örnek Ayasofya'nın kubbesinde kullanılan harçlardır (Livingstoni 1993; Moropoulou vd., 2002).

Horasan harcının tarihi yapılarda birçok farklı karışım şeklinde kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bunlar:

1. Kum horasan harcı:

a) kum + dövülmüş kireç + horasan pirinci + yumurta akı + su olup, karma süresi uzundur.

2. Geleneksel horasan harcı:

a) 1 horasan + bir miktar dişli kum + 2 kireç + bir miktar meşe külü + su

b) 1 kireç kaymağı + ½ alçı + 1 yıkanmış kavrulmuş kum + su

c) Dinlendirilmiş kireç + horasan pirinci + yumurta akı + su

3. Lökün:

a) Dövme kireç + keten elyafı + zeytinyağı + su

b) Dövme kireç + üç ayda suda çürütülmüş pamuk + su

c) Dövme kireç + kızgın zeytinyağı + Koyunyünü elyafı + su

4. Horasan sıvası:

a) ½ perdah kumu + 2 horasan +½ beyaz çimento + ½ kireç şerbeti

b) Tuz + yumurta akı + alçı + kireç, olarak sınıflandırılmıştır (Mahrebel, 2006).

Kireç Harcı: Ana madde olarak kireçten elde edilen harç ve sıvalar tarih boyunca kullanılmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak kullanılan kireç ile agregalar belirli bir oranda karıştırılarak sıvı harç elde edilmektedir. Zaman zaman bu harcın içine

inorganik ya da organik malzemeler de katılarak harç malzemesi güçlendirilmiştir (Böke vd., 2004).

Kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) mineralleri kireç taşının hammaddesini oluşturmaktadır. Bu malzemeden karbondioksitin (CO_2) çıkarılması ile kalsiyum oksit (CaO) yani sönmemiş kireç elde edilmektedir. Oluşan bu yeni yapının ise havada asılı halde bulunan nem ya da su ile reaksiyona girmesi ile de kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) yani sönmüş kireç meydana gelmektedir (Boynton, 1980).

Kireç harçları şekil değişimine yatkın plastik özellik gösteren malzemelerdir. Bu nedenle de yapılarında herhangi bir çatlak meydana gelme oranı oldukça düşüktür. Burada dikkat edilmesi gerek nokta, yapıda çatlakların oluşup oluşmaması kirecin söndürülmüşlük oranıyla doğrudan ilintilidir. Kireç söndürülmesi gereken miktarda söndürülmediyse reaksiyona girmeye yapıda devam eder ve bu durum çatlak gibi deformasyonların oluşmasına sebep olmaktadır (Tetik, 2015).

2.3.5 Kerpiç

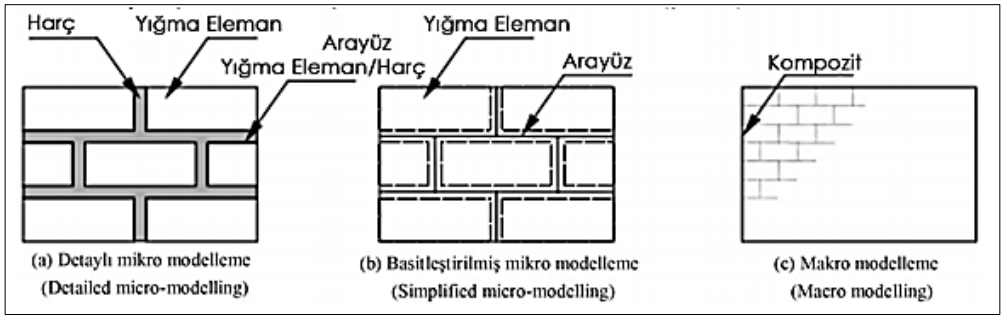
Kil malzemesinin güneş ışınlarına maruz bırakılarak kurutulması şeklinde elde edilen kerpiç malzemesi tarihin ilk zamanlarından bu yana kullanılmaktadır. Dayanım olarak yağmur gibi dış etmenlere fazla dayanıklılık gösteremeyen kerpiç malzemesini güçlendirmek için zaman zaman bazı katkı maddeleri kullanılmıştır. Bu maddeler; çam iğneleri ya da dalları gibi ağaç kaynaklı malzemeler, ot ya da saman gibi lifli malzemeler ya da kum veya çakıl gibi taş malzemelerdir (Özdemir, 2018).

2.3.6 Sıva

Mevsimsel ya da benzeri dış etmenlerden taşıyıcı sistem ekipmanlarını korumak için kullanılan sıva, sıvı ve ısı kaçaklarını engellemek için kullanılan bir çeşit dış cephe kaplamasıdır. Yapışkan özellikte bir yapıya sahip olan sıva malzemesinin uzun süre bozulmadan kullanılabilmesi için uygulanacağı yüzeyin yapısına uygun olarak hazırlanmalıdır (Akın, 2020).

3. TARİHİ YIĞMA TAŞ KÖPRÜLERDE MODELLEME VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Tarihi yığma yapıların modellemesi farklı boyutlarda gerçekleştirilebilemektedir. İlk olarak modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiş olan yığma yapılarda, yapısal olarak uğradıkları elastik şekil değiştirme etkisiyle güvenli bölgede kaldıkları sürece tek boyutun sorun yaratmadığı belirlenmiştir. Ancak plastik şekil değiştirme noktasından itibaren ise etkisi altında kaldıkları gerilim kuvveti ile duvarlada ve taşıyıcı yapılarda çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum neticesinde de tek boyutlu modellemenin kısmi olarak işe yaradığı ancak yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır (Rouf, 1984). Plastik şekil değiştirme noktasından itibaren iki boyutlu modellemelerin kullanılmasına yukarıda bahsedilen durumdan sonra başlanılmıştır. Fakat bu kez de köprü ve kemerlerdeki asimetrik şekillerin tam anlamıyla yansıtılamaması ve göçme mekanizmasının doğru bir şekilde analiz edilememesi durumunu beraberinde getirmiştir (Zhang, 2015). Tarihi yığma yapılarda son olarak hem daha gerçekçi sonuçlar verdiği için hem de asimetrik kemer ve köprülerin analizlerini gerçekleştirebilmek için üç boyutlu yaklaşım modellemeleri kullanılmaya başlanılmıştır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi yığma yapı modellemesinde üç farklı teknik kullanılmaktadır.



Şekil 3.1 Yığma yapılar için modelleme yöntemleri (Lourenço, 1996)

3.1 Detaylı Mikro Modelleme

Modelleme yöntemleri arasında bulunan detaylı mikro modelleme, uzun bir çözüm süresini de beraberinde getirdiği için büyük yapılar yerine daha küçük yapılarda ya da üzerinde çalışılan yapıların bir kısmının çözümlemesinde kullanmak için çok daha uygundur. Söz konusu modelleme yönteminde, incelenen yapının bileşenlerinden biri olan derzler, rijitliği azaltan düzlemlerdir. Detaylı olarak çıkartılmış bir modelde, yığma bir köprünün hangi malzeme kullanılarak dolgu yapıldığı ya da derzin oluşturduğu harç gibi ayrı ayrı birçok etmenin yapıya olan etkisi dikkatli bir şekilde

incelenmektedir. Bu durumun en önemli sebebi; harç yığma elemanlarına kıyasla derz dolgusunun mukavemet açısından daha az mukavemet dayanımına sahip olmasıdır. Bu nedenle mikro modelleme incelenen yapının bir bölümü ya da yapısal elemanlarının detaylı çözümlemesine ihtiyaç duyulduğunda kullanılmaktadır (Lourenço, 2000).

3.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme Yöntemi

Mikro modelleme yöntemi daha basitleştirilmiş şekilde kullanılmak istenildiğinde yapıda bulunan harç tabakası dikkate alınmamaktadır. Harç tabaka kısmı sahip olduğu kalınlığın ½ oranında yığma elemanlarının boyutları arttırılır ve boyutları arttırılan elemanların yüzeyleri çizgiler yardımıyla belirginleştirilir. Belirlenmiş olan ara yüzey çizgileri, yapıda meydana gelmiş ya da gelebilecek olan çatlakların oluşacağı yerler olarak kabul edilmektedir. Söz konusu modelleme yöntemi Poisson oranını çözümleme sürecine dâhil etmediği için doğruluk oranı düşük bir yöntemdir (Kaya, 2010).

3.3 Makro Modelleme Yöntemi

Makro modelleme yöntemini ele aldığımızda ise bloklar, tuğla ya da taşlar gibi harç malzemeleri arasında belli bir ayrım gözetilmeksizin tüm yapısal etmenlerin bir kompozit eleman olarak kabul edilmesi ve söz konusu etmenlerin ortak özelliklerini daha iyi yansıtabilmesi sebebiyle daha doğru sonuçlara ulaştıran bir modelleme şeklidir. Makro modelleme yöntemi çözümleme süreci olarak mikro modelleme yöntemine göre çok daha kısadır ve bu nedenle de sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Söz konusu yöntem, harç ve yığma elemanları arasında bulunan etkileşimi ihmal etmektedir ve tümünün kompozit olarak değerlendirmektedir. Bu nedenle de birbiri arasında kıyaslama yaparak birinin diğerinden daha uygun olduğu söylenemez. Fakat literatürdeki kaynaklar incelendiğinde makro modelleme tekniğinin büyük tarihi yapıların incelenmesinde sıklıkla kullanıldığı görülmektedir (Pela vd., 2013; Zampieri vd., 2015).

3.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Tarihi yığma yapılar için ayrıntılı olarak çıkarılan yapısal analizler, genel olarak sonlu elemanlar analiz yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Söz konusu analiz yönteminde öncelik olarak model için kullanılacak elemanların tek tek davranışları ve daha sonra da matematiksel modelin bütün olarak bu davranışları ne derece yansıttığı büyük önem

taşımaktadır. Bu yöntemde başarılı olabilmek için malzemelerin ayrı ayrı davranışlarının kusursuz belirlenebilmesi çok önemlidir.

Yapının bir kısmının ya da tamamının matematiksel olarak modellenmesi ile yapısal analiz süreci başlamaktadır. Bu işlem yapının ayrıştırılması olarak adlandırılmaktadır. Yapılacak olan analizin amaçları doğrultusunda incelenecek olan yapı sonlu elemanlar olarak belirlenir. Modelleme için yapının geometrik olarak ölçüleri, strüktürel etmenleri, mesnetler ve diğer elemanların düğüm noktaları ile yapıya etki eden yükler serbestlik derecesi de dâhil edilerek ayrı ayrı modellemeye dâhil edilmektedir (Özmen ve Sayın, 2020). Bahsedilen modelleme yönteminde analize dâhil edilecek olan elemanların dışında kullanılan analizin türü, model geometrisi, belirlenen sınırların koşulları, yapıda kullanılan malzemelerin sahip olduğu özellikler ve etki eden yüklerle birlikte eleman sayısının doğru belirlenmesi ve eleman tipinin doğru seçilmesi de modellemenin başarısıyla direkt olarak ilintilidir. Aşağıda verilmiş olan Denklem 3.1, sonlu elemanlar yönteminin statik analizleri için kullanılmaktadır.

$$[K].[D]=[R] \quad (3.1)$$

Burada kullanılan semboller;

K: Sitemin veya elemanın geometrik özelliklerine bağlı olan rijitlik matrisi

R: Sistemin ya da elemanın yük vektörü

D: Rijitlik matrisi ve yük vektörüne bağlı olan deplasman vektörünü ifade etmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile incelenen katı cisimler için iki çeşit ağ bulunmaktadır; dörtyüzlü (tetrahedral) ve altıyüzlü (hexahedral). Her iki elemanın da serbestlik derecesi aynı olduğu için bu çalışmada altıyüzlü eleman tipi tercih edilmiştir. Bunun sebebi; söz konusu eleman tipi dörtyüzlü eleman tipine kıyasla oldukça az eleman sayısına gerek duymaktadır ve daha doğru sonuçlar vermektedir.

Yapılmış olan çalışmada SAP2000 yazılımı kullanılmıştır.

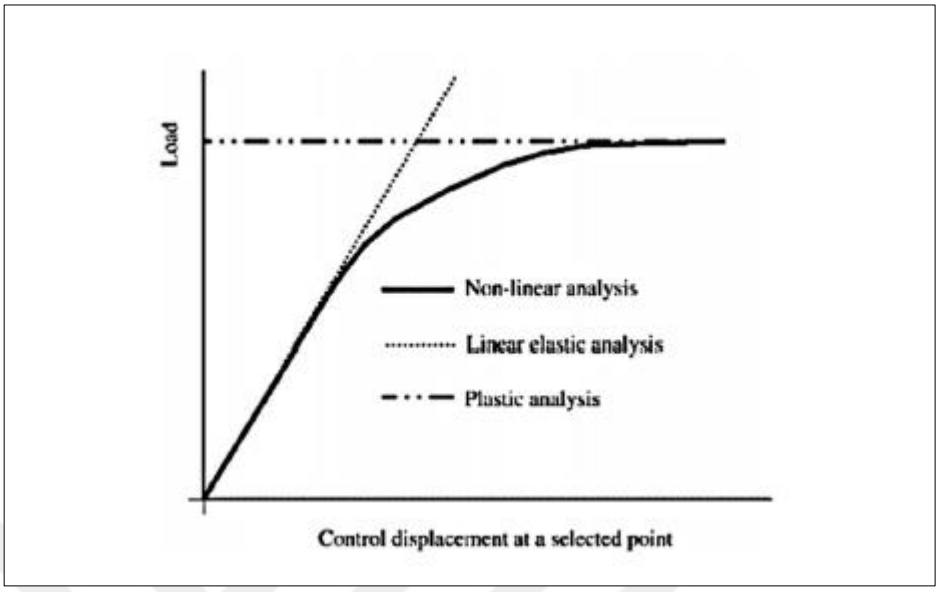
3.5 Analiz Yöntemleri

Tarihi yığma yapıların analizinde, Doğrusal Analiz, Doğrusal Olmayan Analiz ve Plastik Analiz olmak üzere 3 farklı analiz yöntemi kullanılmaktadır.

3.5.1 Doğrusal (lineer) analiz

Lineer analiz, lineer-elastik özellik gösterdiği varsayılan malzemede, yapının sınır durumlarının analiz edilmesidir. Yapılarda oluşan tedrici çatlak ve hasarlar incelenerek kullanılabilirlik sınırları da belirlenebilmektedir. Bu analizden olası hasar

bölgelerinin tespitinde de yararlanılmaktadır. Şekil 3.2'de analiz yöntemleri grafik olarak gösterilmiştir (Dabanlı, 2008).



Şekil 3.2 Analiz tiplerinin karşılaştırılması (Dabanlı, 2008)

3.5.2 Doğrusal olmayan (non-lineer) analiz

Yapının ilk anından limit duruma gelene kadar geçen zamanda yapıda meydana gelen bütün hasarlar ve tepkiler belirlenebilmektedir. Daha önceki yüklemelerin tesiri ve yapım sırası da bu analizde göz önünde bulundurulabilmektedir. Yapılarda doğrusal olmayan davranışı gösteren malzemenin elastik ötesi davranışı ve geometrisi nedeniyle, ikinci mertebe etkileri adıyla anılan, yüklemeyle geometride oluşan değişiklikleri de dikkate alan etkileri içeren iki mühim unsur bulunmaktadır. Bu analiz yöntemi limit yük analizleri ve kullanılabilirlik analizleri için uygundur.

3.5.3 Plastik analiz

Plastik analizde yapının plastik davranış gösterdiği kabul edilerek, plastik mafsal hipotezine dayanan yapısal davranış incelenmektedir. Çekme gerilmelerinin sıfır kabul edildiği durumda plastik analiz, tarihi yığma yapılar için yeterli bir yaklaşımdır. Yapıların limit yük analizinde yapılan doğrulama çalışmalarında bu analizden yararlanılır. Plastik analizde doğrusal olmayan analizin aksine önceki yüklemeler ihmal edilir, yüklerin yoğunlaşması göz önüne alınır ve yüklerin sabit artışta olduğu kabul edilir. Bu metottan alt sınır veya üst sınır teoremlerinden biri göz önüne alınarak yararlanılabilir. İtki çizgisi analizi statik bir alt sınır teoremi uygulaması olarak

bilinirken plastik mafsal analizi de kinematik bir üst sınır uygulaması olarak bilinmektedir (Dabanlı, 2008).

Yapılan tüm analiz teknikleri malzeme davranışı ve sonuçlar bakımından farklılık gösterebilmektedir. Çekme mukavemeti tarihi yapıların analizinde büyük önem taşır. Basit yapıların analizinde çekme mukavemeti sıfır alındığında non-lineer analiz ile limit yük analizi göçme mekanizmaları açısından yakın sonuçlar edilmektedir. Fakat karmaşık yapılarda bu durum daha farklıdır. Limit yük analizi yapılması zor bir işlem olmakla beraber yanlış sonuçlar doğurabilir. Yapılan analizlerde çekme mukavemetini sıfırdan farklı, düşük veya azalan şekilde dikkate almak analiz sonuçlarının güvenilirliğini artırmaktadır. Tablo 3.1'de analiz yöntemleri ile giriş ve sonuç verileri gösterilmiştir (Dabanlı, 2008).

Tablo 3.1 Analiz Tiplerinin Karşılaştırılması

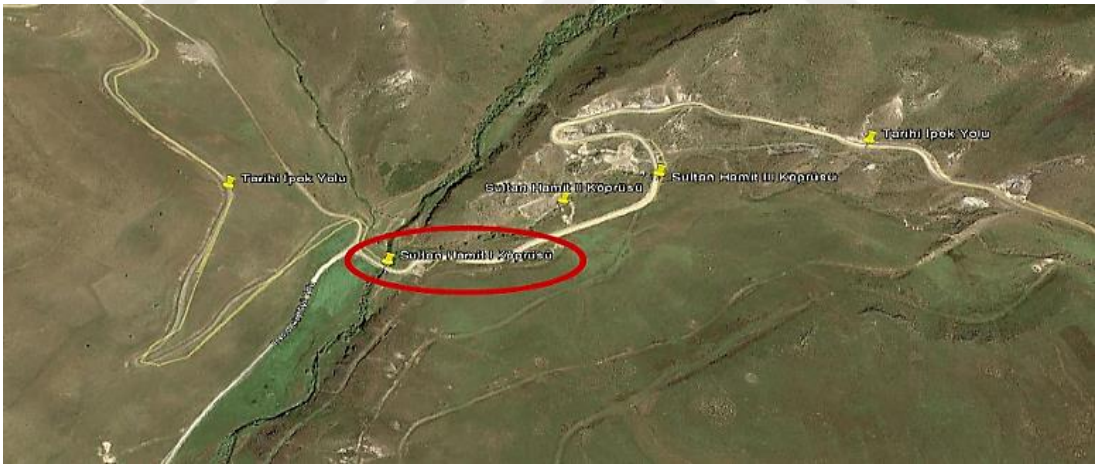
Analiz Tipi	**Doğrusal Analiz**	**Doğrusal Olmayan Analiz**	**Plastik Analiz**
Giriş verisi	Lineer–elastik malzeme özellikleri Güvenlik gerilmeleri	Malzemenin elastik ve mukavemet özellikleri Malzemenin elastik olmayan özellikleri	Malzeme mukavemeti
Sonuç verisi	Şekil değiştirme Gerilme Dağılımı	Şekil değiştirme Gerilme dağılımı ve göçme mekanizması	Göçme Mekanizması

4. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışması kapsamında, Osmanlı dönemine ait tarihi yığma Sultan Hamit köprüleri sayısal olarak incelenmiştir. Köprülerin üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 sonlu eleman programı yardımıyla makro modelleme yöntemi esas alınarak oluşturulmuştur. Bu bölümde Sultan Hamit Köprüleri hakkında bilgi verildikten sonra SAP2000 sonlu eleman paket programı tanıtılmış, köprünün sonlu eleman modeli oluşturularak, statik, modal ve zaman tanım alanında analiz yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

4.1 Sultan Hamit I Köprüsü'nün Konumu ve Yapısal Özellikleri

Sultan Hamit I Köprüsü, Erzurum iline bağlı Aşkale ilçesinin 20 km yakınında bulunmaktadır. Yine aynı bölgede bulunan Sultan Hamit II ve III Köprüleri de birbirlerine yakın mesafelerde yer almaktadır. Sultan Hamit I Köprüsü ayrıca İpek Yolu üzerinde bulunduğu için farklı bir öneme sahiptir. Köprünün bulunduğu su yatağı Hatuncuk Köy yolu üzerinde bulunan Kandera Deresi'ne aittir (KGM, 2013). Koprünün uydu görüntüsü Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Erzurum ili Aşkale ilçesi Sultan Hamit I Köprüsü'nün uydu görüntüsü

Köprüde tek açıklık bulunmaktadır ve jeolojik olarak bozkır düzlükleri ya da derin vadilerin bulunmadığı bir bölgeye inşa edilen köprü minimal bir ölçeğe ve geometriye sahiptir. Yaklaşık olarak 6.3 m genişliğe ve 16.5 m uzunluğa sahip olan Sultan Hamit I Köprüsü, nehrin talveg kotundan itibaren 3.0 m bir kemer açıklığına sahiptir. Açıklık genişliği ise 6.9 m olan köprünün kemer kalınlığı yaklaşık olarak 0.63 m dir. Kemer üzengi hattından itibaren yaklaşık 1.7 m ve kemerdeki en ince kesit yaklaşık 1 m'dir (KGM, 2013). Sultan Hamit I Köprüsü, Şekil 4.2'de verilmiştir.



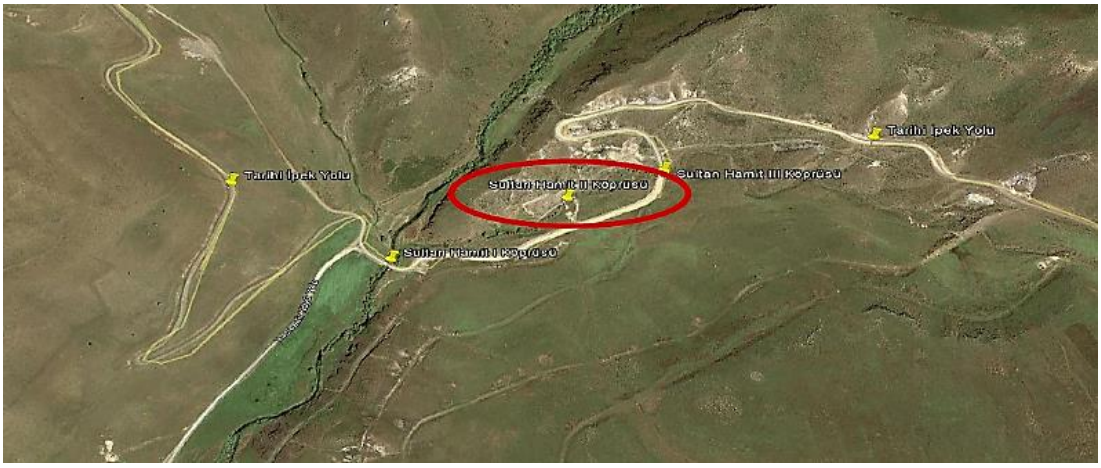
Şekil 4.2 Sultan Hamit I Köprüsü

Yapı malzemesi olarak ince yonu taş kullanılan Sultan Hamit I Köprüsü'nün tempan duvarlarının alt kısımlarında yer alan başlangıç ve bitiş bağlantıları civarında sıralanmış halde moloz taş örgüsü bulunmaktadır. Ancak üst kısımlara doğru çıkıldığında ince yonu taş örgü dokusu görülmektedir ve bu özelliğiyle oldukça dikkat çekmektedir. Köprüde kullanılan özgün yapısal elelmanların ise genel olarak bazalt kayaç olduğu söylenebilir (Akyol, 2013).

Sultan Hamit I Köprüsü, çeşitli onarım işlemlerinden geçirilerek özgün yapısından uzaklaşmış bir şekilde günümüzde kadar ulaşmayı başarmış ve işlevselliğini yitirmemiştir.

4.2 Sultan Hamit II Köprüsü'nün Konumu ve Yapısal Özellikleri

Sultan Hamit II Köprüsü, Erzurum ili Aşkale ilçesi yakınlarında ve Tarihi İpek Yolu'na oldukça yakın bir konumda bulunmaktadır (KGM, 2013). Köprünün uydu görüntüsü Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Erzurum ili Aşkale ilçesi Sultan Hamit II Köprüsünün uydu görüntüsü (KGM, 2013)

Nehir yatağında tek açıklık bulunmaktadır ve jeolojik olarak bozkır düzlükleri ya da derin vadilerin bulunmadığı bir bölgeye inşa edilen köprü minimal bir ölçeğe ve geometriye sahiptir. Yaklaşık olarak 18-20 m boyunda bulunan tarihi köprünün yalnızca 15-16 m civarındaki bir bölümü günümüze kadar ulaşabilmiştir. Tek kemerli bir açıklığa sahip olan köprü kemeri nehir talveg kotundan itibaren 5.2 m yüksekliğe sahiptir. Kemerin açıklık genişliği 3.2 m olmakla beraber üzengi hattından yüksekliği yaklaşık 1.55 m civarındadır. Sultan Hamit II Köprüsü, Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Sultan Hamit II Köprüsü

Tarihi köprünün tempan duvarları kabayonu taş ile dolgu kısmı ise moloz malzeme kullanılarak inşa edilmiştir.

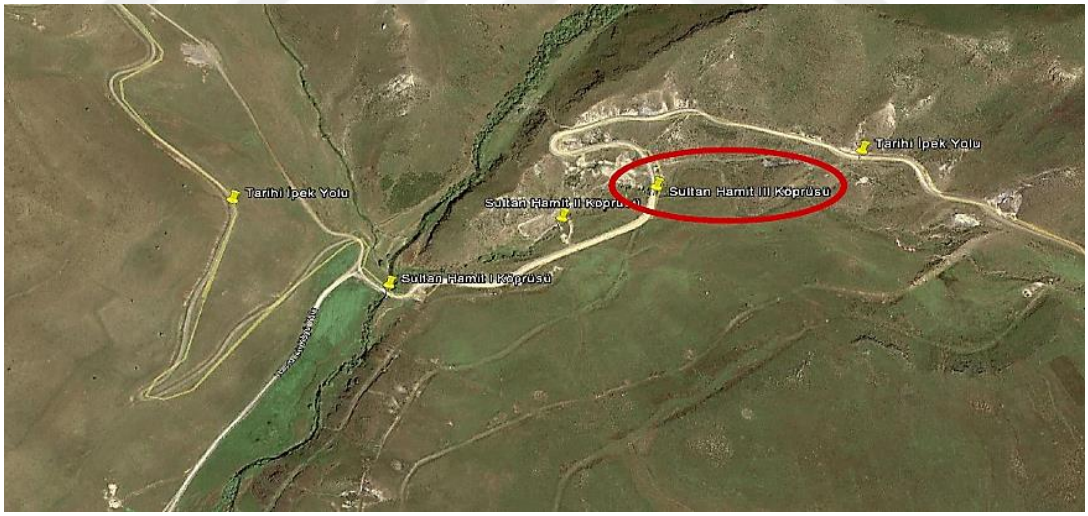
Sultan Hamit II Köprüsü'nün ayak yapısı incelendiğinde, her zamankinden farklı bir yöntem kullanıldığı ve tempan duvarı arasında kullanılan dolgunun molozdan çok daha komplike bir yapı olduğu belirlenmiştir. Söz konusu tarihi köprünün özgün formu incedir ve yapısal olarak kabayonu taş örgü kullanılarak yapıldığı için kemerin

arkasında bulunan noktalarda kademeli bir şekilde kotu gittikçe azalan bir tempan duvarı dikkat çekmektedir. Bu sebeple de kenarlarda bulunan ayakların arasındaki dolgu malzemeleri olması gerekenden daha az bir hacim kaplamaktadır. Tarihi yığma köprülerin inşası sırasında tempan duvarlar ile köprü arasında bulunan kısım genel olarak moloz dolgu ile doldurulmaktadır. Sultan Hamit II Köprüsü incelendiğinde ise köprünün giriş kısmından başlayarak kademeli bir şekilde kotu düşürülmüş taş örgüler görülmektedir. Söz konusu yapısal durum Sultan Hamit II Köprüsü'nün çok daha rijit hale getirmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde incelenen Sultan Hamit II Köprüsü, genel olarak yapı malzemesi olarak ince yonu taşından inşa edilmiştir. Yapı taşı olarak bazalt kullanılmıştır.

4.3 Sultan Hamit III Köprüsü'nün Konumu ve Yapısal Özellikleri

Sultan Hamit III Köprüsü, Sultan Hamit I ve II köprüleri ile aynı şehirde ve birbirlerine yakın konumlarda bulunmaktadırlar. Ayrıca bahsedilen diğer köprüler gibi Tarihi İpek Yolu'na da oldukça yakın bir konumda bulunmaktadır (KGM, 2013). Sultan Hamit III Köprüsünün Uydu Görüntüsü Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5 Erzurum ili Aşkale ilçesi Sultan Hamit III Köprüsü'nün uydu görüntüsü (KGM, 2013)

Nehir yatağında tek açıklık bulunmaktadır ve jeolojik olarak bozkır düzlükleri ya da derin vadilerin bulunmadığı bir bölgeye inşa edilen köprü minimal bir ölçeğe ve geometriye sahiptir. Yaklaşık olarak 7.2 m genişliğe ve 10.5 m uzunluğa sahip olan Sultan Hamit III Köprüsü, nehrin talveg kotundan itibaren 3.4 m bir kemer açıklığına sahiptir. Açıklık genişliği ise 3 m olan köprünün kemer kalınlığı yaklaşık olarak 0.4 m dir. Kemer üzengi hattından itibaren yaklaşık 1.5 m ve kemerdeki en ince kesit

yaklaşık 1 m'dir. Tarihi yapının kemer alın yüksekliği bütün kemerlerde 0.45 metre olarak ölçülmüştür. Kemerde bulunan kilit taşının en üst kısmında korniş hattı ve altında ise ince yonu taşları bulunaktadır. Köprünün inşa edildiği dere yatığından herhangi bir su akışı bulunmamaktadır ve moloz/çakıl ile doludur. Sultan Hamit III Köprüsü, Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Sultan Hamit III Köprüsü

Çalışmanın bu bölümünde incelenen Sultan Hamit III Köprüsü, genel olarak yapı malzemesi olarak ince yonu taşından inşa edilmiştir. Yapı taşı olarak bazalt kullanılmıştır.

4.4 SAP2000 Sonlu Elemanlar Modeli

SAP2000 sonlu eleman programı, inşaat alanında her türlü yapı sistemlerinde oluşturulan modellerin tasarım ve analizi için kullanılan bir mühendislik yazılımıdır. SAP sözcük anlamı olarak "Structural Analysis Program" kelimelerinin baş harflerinden oluşturulmuştur "Yapısal Analiz Programı" anlamına gelmektedir.

Program iki, üç boyutlu geometrilerin yanı sıra çok basit geometrik yapılardan çok karmaşık geometrik yapılara (baraj, bina, tarihi yapılar, silo, köprü vb.) kadar modelleme imkânı sunar. Ayrıca yapıların statik, dinamik, doğrusal ve doğrusal olmayan davranışları elde edilebilir. Program nesne tabanlı modelleme ortamı sunar. Ve bu sayede mühendislik süreçlerinin hızlanmasını sağlar.

SAP2000 programıyla sonlu eleman modeli oluşturulan herhangi bir mühendislik yapısının veya taşıyıcı sistem elemanının, yapısal davranışını belirlemek için gerçekleştirilen analizlerde izlenen başlıca işlem adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- İlk olarak yapısal davranışının belirlenmesi hedeflenen yapı veya taşıyıcı sistem elemanının çubuk, alan veya üç boyutlu elemanlar kullanılarak geometrik modeli oluşturulur.
- Kullanılan malzeme özellikleri tanıtılır. Programda bütün özellikleri önceden tanıtılmış beton ve çelik malzemeleri mevcuttur. Kullanıcı bu malzemeleri kullanabileceği gibi yeni malzeme türleri de tanımlayabilir. Ayrıca program kütüphanesinde çeşitli yönetmeliklere ait malzemeler de bulunmaktadır.
- Geometrik modeli oluşturulan sistemin kesit özellikleri tanımlanır. Programda farklı eleman ve malzeme türleri için birçok kesit tipi bulunmaktadır. Ayrıca, kesit boyutları belirli olmayan ama genel özellikleri (atalet momenti, alan vb.) bilinen kesitlerle, değişken kesit tipleri tanımlanabilmektedir.
- Tanımlanan kesit özellikleri oluşturulan yapı veya taşıyıcı sistem eleman modeline atanır.
- Oluşturulan sistem modelinin mesnet koşulları tanımlanır ve atanır. Mesnet sınır şartları olarak; ankastre, sabit ve hareketli mesnet seçeneklerinin yanında yay elemanlar da kullanılabilir. Program altı serbestlik derecesi sunar. Kullanıcı bu serbestlik derecelerini kullanarak farklı sınır şartları da tanımlayabilmektedir.
- Sisteme etki eden yük tipleri, yükleme durumları veya yük birleşimleri tanımlanır. Program sabit, hareketli, deprem, araç, kar, rüzgâr, sıcaklık vb. yük tipleri ve yükleme durumları tanımlanmasına imkân sağlar. Ayrıca yönetmeliklerde belirlenmiş yük katsayıları ile bu yükleme durumlarının çarpılmasıyla çeşitli yük birleşimleri de oluşturulabilmektedir.
- Tanımlanan tekil, düzgün ve yamuk şekildeki yayılı, hareketli ve zamana bağlı değişen yükler ile sıcaklık etkileri; ilgili alan, çubuk veya düğüm noktalarına atanır.
- Yapılan bütün bu işlem adımları tamamlandıktan sonra analiz yapılır. Analizlerden elde edilen sonuçlar SAP2000 ekranında görüntülenebilir. Sonuçlar programın araç menüleri yardımıyla daha detaylı incelenebilir (Altunışık vd., 2018).

4.5 Statik Analiz

Yapıya düşey olarak tesir eden hareketli ve ölü yüklerin etkisi altında gerçekleştirilen statik analiz, yapıda ortaya çıkan gerilme ve yer değiştirme durumlarını tespit etmek için kullanılır. Var olan veya oluşabilecek yapısal hasarları elde edilen analiz

sonuçlarıyla tespit etmek mümkündür. Statik analiz için SAP2000 sonlu elemanlar programında şekil ve yer değiştirme durumları için Denklem 4.1 kullanılır.

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (4.1)$$

Bu denklemde; [K] rijitlik matrisi, {u} yer değiştirme vektörü, {F} ise dış yük vektörü olarak gösterilir.

Yapıda genellikle düşey yüklerin altında sorun çıkması beklenmemesine rağmen bazen yapıda oluşan hasar, düşey yüklerin taşınmasında sorun teşkil edebilir. Böyle durumlar statik analizlerde göz önünde bulundurulmalıdır. Hasar alması olasılığı olan bölümler incelenerek tespit edilmelidir.

Doğrusal statik analiz prosedüründe, yapının her bir bölgesindeki yer değiştirme ve kuvvet gereksinimlerini tespit etmek amacıyla yapay yanal statik yük modeli kullanılmaktadır. Bu gereksinimlerle yapısal elemanlar arasında karşılaştırma yapılmaktadır (Gupta 1998).

Doğrusal olmayan statik analiz, itme analizi olarak da bilinmektedir. Yapıların sismik performansının değerlendirilmesi açısından bu prosedürler oldukça etkili yöntemlerdir. Bu yöntemde amaç, statik analiz yöntemiyle tasarım depremlerindeki kuvvet ve deformasyon taleplerini tahmin etmek ve bu talepleri mevcut kapasitelerle karşılaştırıp değerlendirerek yapı sisteminin performansını belirlemektir. İtme analizi, yapılarda kalıcı düşey yükler altında kademeli olarak artan yanal yüklerin etkisinde yapının özelliği ve davranış özelliklerini tespit etmek için kullanılmaktadır. Yanal yük kademeli olarak artırılmaktadır. Eşdeğer statik yanal yükler yaklaşık olarak deprem kuvvetini göstermektedir (Kesim, 2005).

4.6 Modal Analiz

Modal analiz, yapının serbest titreşim periyotlarının, mod şekilleri ve kütle katılım oranlarının tespiti için gerçekleştirilen çözümleme sistemidir. Sönümlerin ölçümü, hakim modların tespiti ve yapıda meydana gelen salınımların gözlemlenmesi için öz değer analizi veya Eigen-value analizi yapılmaktadır. Deprem anında bu modlar anlık olarak farklı özelliklerdeki hareketlerin farklı biçimde yapıyı etkilemesiyle oluşur ve bu da modların düzenli olmadığının göstergesidir (Çal, 2015). Yapının dinamik davranışının tespit edilmesine dayanan davranış spektrumu analizi, yapının davranışına, yapıya ait her bir serbest titreşim modunun katkısının olduğu, bu katkıların ayrı ayrı belirlenerek her bir moda ait katkı toplanarak, mod birleştirme esasına dayanır. Bu metotta yapı kütlesinin belli düzeyde olduğu kabul edilir, iki

öteleme bir dönme hareketiyle alakalı olarak yapı davranışı tespit edilir. Açıklama yetersizliği ve asıl taşıyıcı sistemin davranışını temsil etme eksiklikleri nedeniyle, gerçekçi bir kaynağa dayanıyor olsa bile dikkatli kullanılması gereken bir metottur. Bu sebeple modal analiz sonuçlarının genellikle lineer statik analizden alınan sonuçlarla karşılaştırılması gerekir (Dabanlı, 2008).

4.7 Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi

Depreme dayanıklı yapı tasarlanmasında sık kullanılmakta olan zaman tanım alanında hesap yönteminde yapay ya da gerçek bir deprem kaydıyla çalışılması gerekmektedir. Zaman tanım alanı metodunda yapıya uygulanan deprem etkisi altında çözümlere ulaşılır. Hareket denkleminin bilinmesi, sistemin davranışının tespit edilmesi açısından önemlidir. Sistemin hareket denklemi Denklem 4.2 ile elde edilir.

$$[M]\{a\} + [C]\{v\} + [K]\{u\} = \{F_g\} \quad (4.2)$$

Burada $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ifade eder. $\{a\}$, $\{v\}$ ve $\{u\}$ ise sistemin rölatif ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörleridir. $\{Fg\}$ ise deprem yer hareketi durumunda dış yük vektörünü belirtmektedir. Hareket denklemlerinin sayısal çözümü için HHT- α algoritmasının geliştirilmiş şekli kullanılarak gereken hareket denklemine aşağıdaki gibi ulaşılabilir-(Denklem 4.3).

$$[M]\{a\}_{i+1} + (1+\alpha)[C]\{v\}_{i+1} - \alpha[C]\{v\}_i + (1+\alpha)\{F^i\}_{i+1} - \alpha\{F^i\}_i$$

$$= (1+\alpha)\{F_g\}_{i+1} - \alpha\{F_g\}_i \quad (4.3)$$

Burada F^i ve F_g sırasıyla iç ve dış yük vektörünü ifade etmektedir. i ise zaman adımını ifade eder. Burada α nümerik sönümü kontrol eder. (Akın, 2020).

4.8 Sultan Hamit Köprüleri'nin Sonlu Elemanlar Modeli

Sultan Hamit köprüleri SAP2000 ortamında her düğüm noktasında üç serbestliği bulunan altı yüzlü sekiz düğüm noktalı katı (solid) eleman kullanılarak modellenmiştir. Köprülerde makro modelleme yöntemi esas alınmıştır.

Yapıların üç boyutlu modeli kemer, dolgu, döşeme ve yan duvarlar olmak üzere dört elemandan oluşturulmuştur. Bu çalışmada, köprülerin zeminle temas eden bölgeleri (köprünün yol ekseninde zeminle temas eden bölgeleri dâhil) ankastre mesnetli olarak modellenmiştir.

Modelleme aşamasında köprülerde kullanılan malzeme mekanik özellikleri Kanbur (2022) akademik çalışmasına konu olmuş, aynı il sınırları içerisinde bulunan tarihi

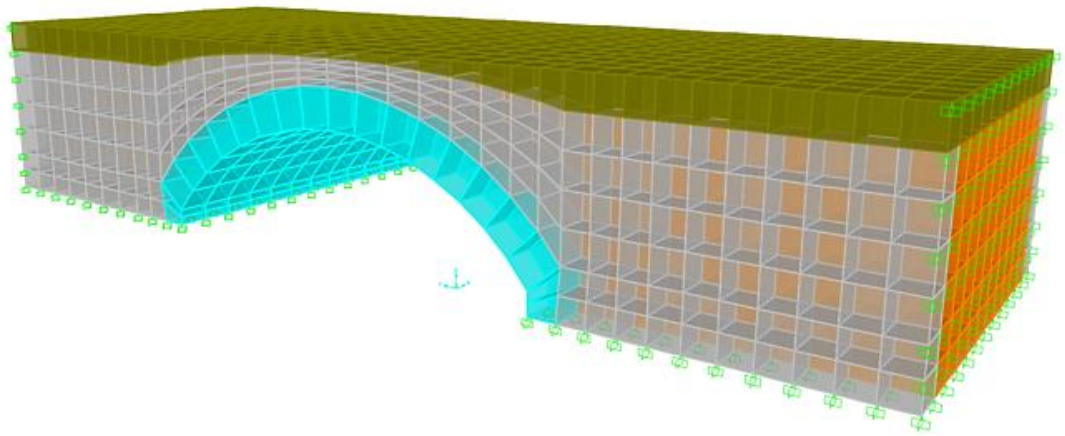
Pehlivanlı Köprüsü malzeme özellikleri kullanılmıştır. Modellemede kullanılan malzeme özellikleri Tablo 4.1'de sunulmaktadır.

Tablo 4.1 Sultan Hamit köprüleri için kullanılan malzeme özellikleri (Kanbur,2022)

Malzeme Özellikleri	**Elastik Modül (MPa)**	**Poisson Oranı**	**Kütle Yoğunluğu (kg/m^3)**
Kemer	2109	0,20	2350
Tempan Duvar	2209	0,20	2350
Dolgu	1800	0,15	1600
Döşeme	2209	0,20	2350

4.8.1 Sultan Hamit Köprüsü I

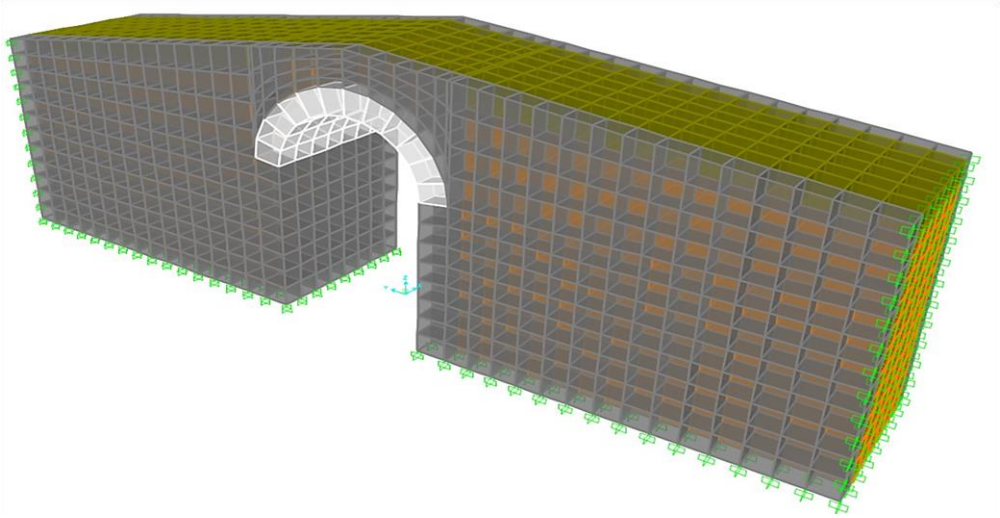
Sultan Hamit Köprüsü-I modeli 3627 düğüm noktası, 2796 katı eleman kullanılarak modellenmiştir. Köprü modeline ait genel bir görsel Şekil 4.7'de sunulmaktadır.



Şekil 4.7 Sultan Hamit Köprüsü-I SAP2000 modeli

4.8.2 Sultan Hamit Köprüsü II

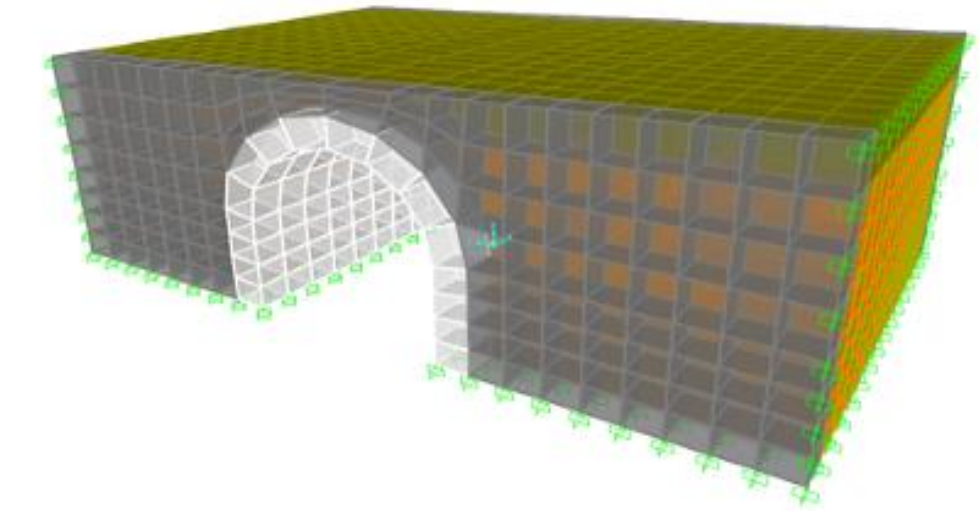
Sultan Hamit Köprüsü-II modeli 4383 düğüm noktası, 3392 katı eleman kullanılarak modellenmiştir. Köprü modeline ait genel bir görsel Şekil 4.8'de sunulmaktadır.



Şekil 4.8 Sultan Hamit Köprüsü-II SAP2000 modeli

4.8.3 Sultan Hamit Köprüsü III

Sultan Hamit Köprüsü-III modeli 3040 düğüm noktası, 2310 katı eleman kullanılarak modellenmiştir. Köprü modeline ait genel bir görsel Şekil 4.9'da sunulmaktadır.



Şekil 4.9 Sultan Hamit Köprüsü-II SAP2000 modeli

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

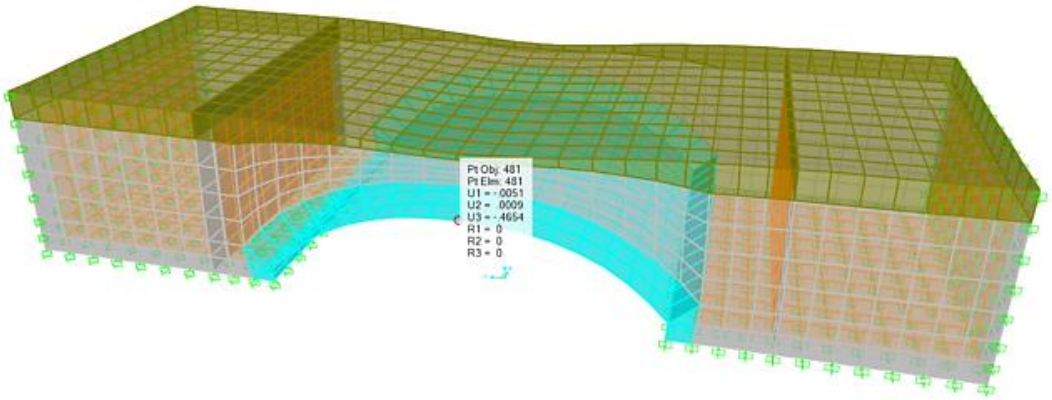
Tez çalışması kapsamında Sultan Hamit I-II-III köprüleri analitik olarak incelenmiştir. Köprülerin SAP2000 ortamında oluşturulan katı modeller üzerinde; kendi ağırlığı altındaki statik analiz, modal analiz, 2020 Elazığ ve 1992 Erzincan depremleri altında zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilerek araştırma bulguları sunulmuştur.

5.1 Sultan Hamit I-II-II Köprüleri'nin Statik Analizi

Sultan Hamit köprülerinin kendi ağırlıkları altında statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Köprülerin analizinde ölü ve hareketli yükler dâhil edilmemiştir. Sadece Tablo 4.1'de sunulan malzeme özelliklerine göre kendi ağırlığı altında analizler yapılmıştır. Sultan Hamit köprülerinin analizleri sonucunda meydan gelecek maksimum yer değiştirme, maksimum çekme ve basınç gerilmeleri bu bölümde irdelenmiştir.

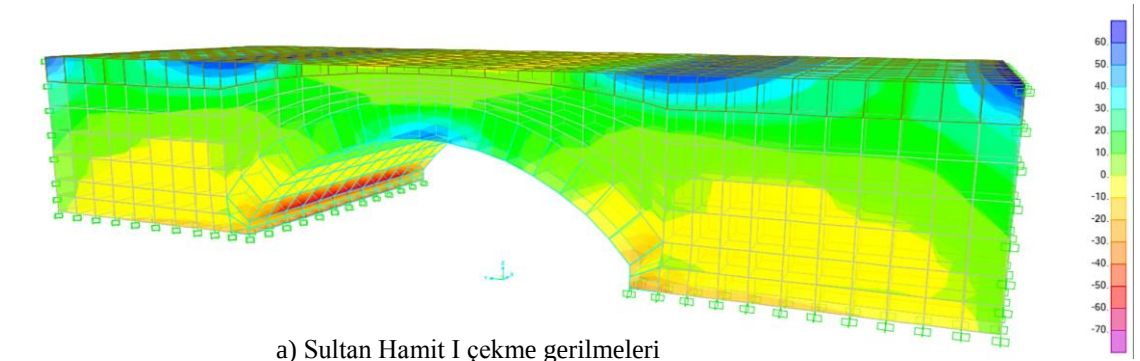
5.1.1 Sultan Hamit Köprüsü I

Sultan Hamit I Köprüsü SAP2000 ortamında modellenerek kendi ağırlığı altında statik analizleri yapılmıştır. Analizler yer değiştirmeler ve gerilmeler açısından değerlendirilmiştir. Statik analiz sonucunda köprü üzerinde oluşan maksimum yer değiştirme ait bir görüntü Şekil 5.1'de sunulmaktadır.

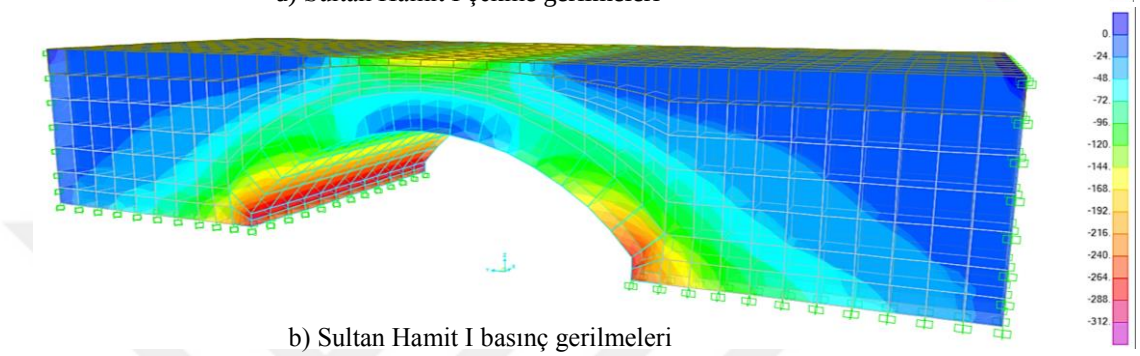


Şekil 5.1 Sultan Hamit I Köprüsü maksimum deformasyon görüntüsü

Sultan Hamit Köprüsü I kendi ağırlığı altında yapılan statik analiz neticesinde; köprü açıklığının ortasında, z ekseni yönünde, düşey yerdeğiştirme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Meydana gelen maksimum yer değiştirme 0.4654 mm olarak hesaplanmıştır.



a) Sultan Hamit I çekme gerilmeleri



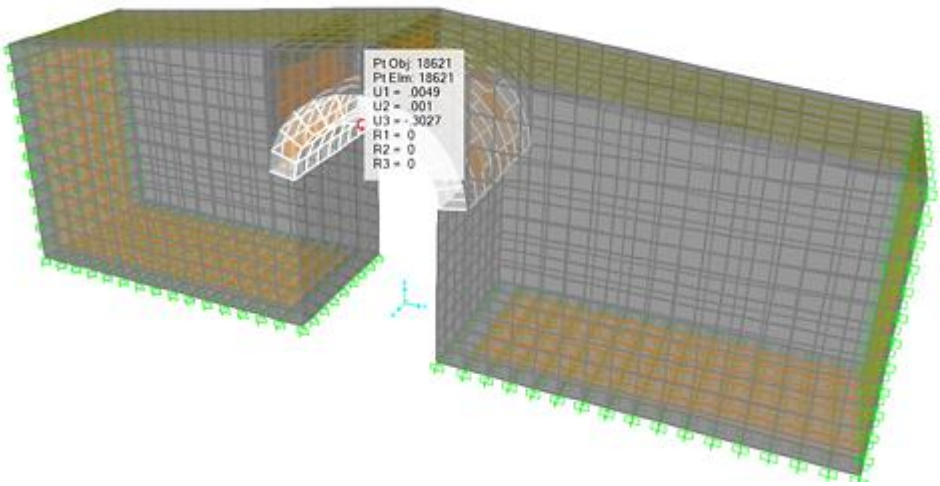
b) Sultan Hamit I basınç gerilmeleri

Şekil 5.2 a) Sultan Hamit I Köprüsü üzerinde oluşan maksimum çekme gerilmeleri, b) Sultan Hamit I Köprüsü üzerinde oluşan maksimum basınç gerilmeleri

Statik analiz sonucunda Sultan Hamit I Köprüsü üzerinde meydana gelen maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin oluşturuğu bölgelere ait görsel Şekil 5.2'de sunulmuştur. Köprü üzerinde oluşan maksimum çekme ve basınç gerilmeleri incelendiğinde; maksimum çekme gerilmesi köprü uç kısımlarında meydana geldiği ve değerinin 68.867 kPa olduğu hesaplanmıştır. Maksimum basınç gerilmesi ise ana taşıyıcı kemerin ayaklarında meydana geldiği ve değerinin 326.864 kPa olduğu gözlemlenmiştir.

5.1.2 Sultan Hamit Köprüsü II

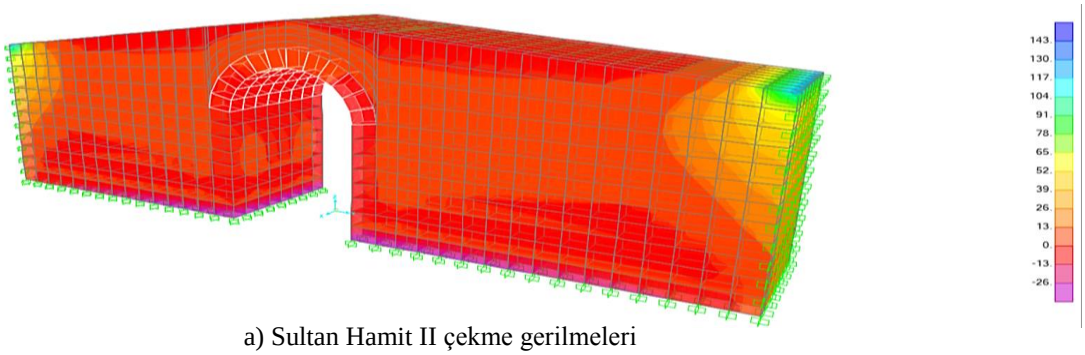
Sultan Hamit II Köprüsü SAP2000 ortamında modellenerek kendi ağırlığı altında statik analizleri yapılmıştır. Analizler yer değiştirmeler ve gerilmeler açısından değerlendirilmiştir. Statik analiz sonucunda köprü üzerinde oluşan maksimum yer değiştirme ait bir görüntü Şekil 5.3'te sunulmaktadır.



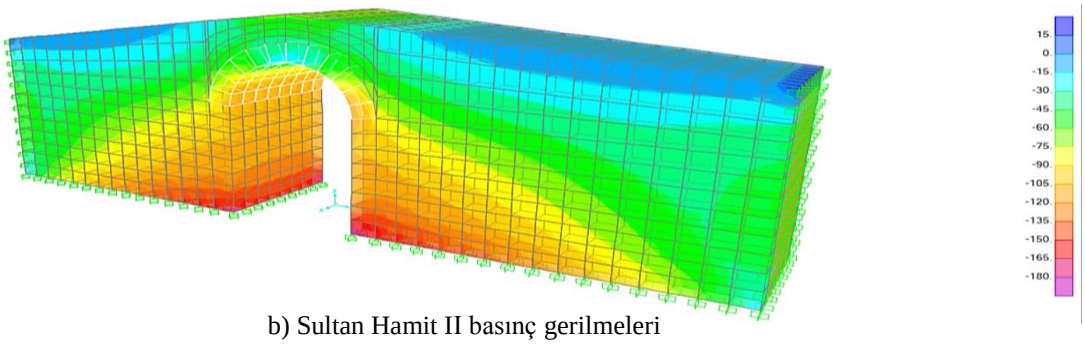
Şekil 5.3 Sultan Hamit II Köprüsü maksimum deformasyon görüntüsü

Sultan Hamit II Köprüsü kendi ağırlığı altında yapılan statik analiz neticesinde; köprü açıklığının ortasında, z ekseni yönünde, düşey yerdeğiştirme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Meydana gelen maksimum yer değiştirme 0.3027 mm olarak hesaplanmıştır.

Statik analiz sonucunda Sultan Hamit II Köprüsü üzerinde meydana gelen maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin oluşturuğu bölgelere ait görsel Şekil 5.4'te sunulmuştur.



a) Sultan Hamit II çekme gerilmeleri



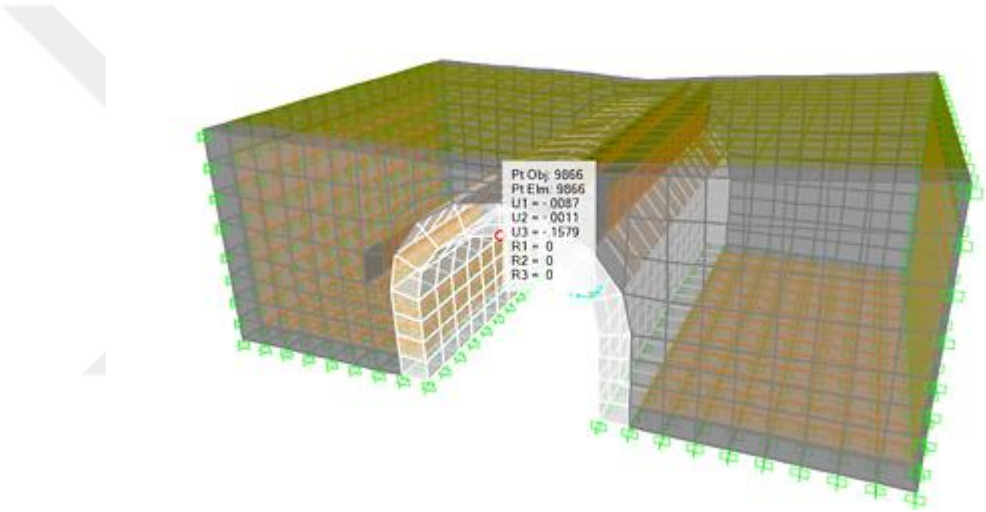
b) Sultan Hamit II basınç gerilmeleri

Şekil 5.4 a) Sultan Hamit II Köprüsü üzerinde oluşan maksimum çekme gerilmeleri, b) Sultan Hamit II Köprüsü üzerinde oluşan maksimum basınç gerilmeleri

Köprü üzerinde oluşan maksimum çekme ve basınç gerilmeleri incelendiğinde; maksimum çekme gerilmesi köprü uç kısımlarında meydana geldiği ve değerinin 133.395 kPa olduğu hesaplanmıştır. Maksimum basınç gerilmesi ise ana taşıyıcı kemerin ayaklarında meydana geldiği ve değerinin 182.358 kPa olduğu gözlemlenmiştir.

5.1.3 Sultan Hamit Köprüsü III

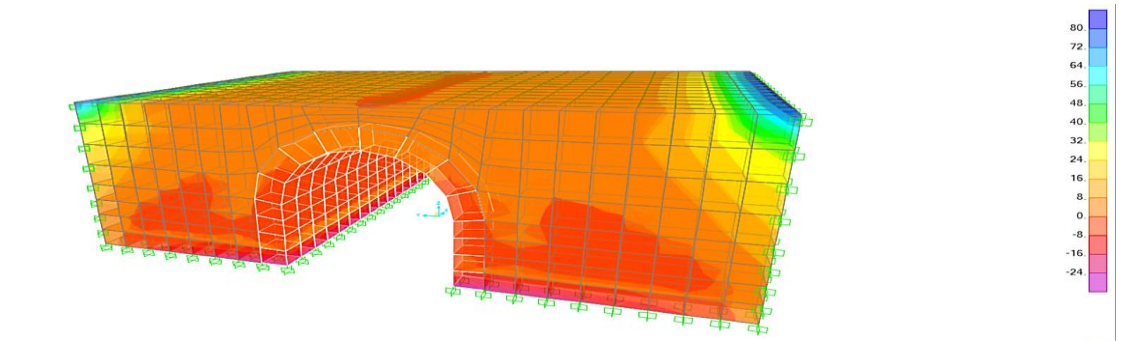
Sultan Hamit III Köprüsü SAP2000 ortamında modellenerek kendi ağırlığı altında statik analizleri yapılmıştır. Analizler yer değiştirmeler ve gerilmeler açısından değerlendirilmiştir. Statik analiz sonucunda köprü üzerinde oluşan maksimum yer değiştirme ait bir görüntü Şekil 5.5'te sunulmaktadır.



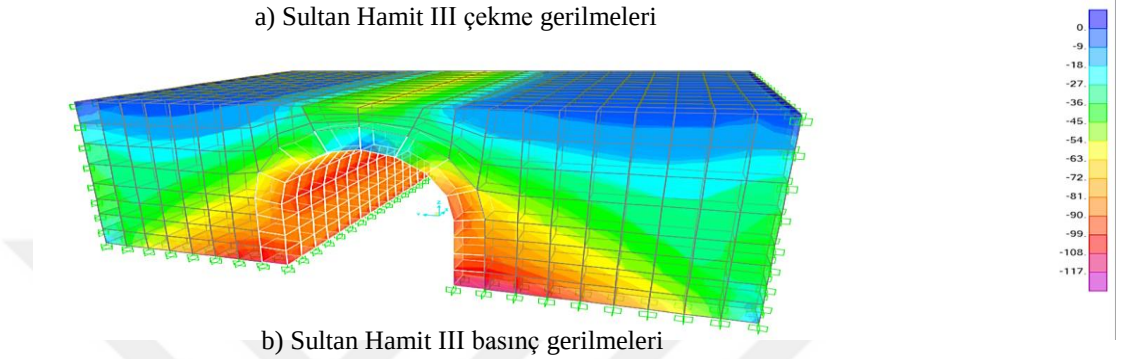
Şekil 5.5 Sultan Hamit III Köprüsü maksimum deformasyon görüntüsü

Sultan Hamit Köprüsü III kendi ağırlığı altında yapılan statik analiz neticesinde; köprü açıklığının ortasında, z ekseni yönünde, düşey yerdeğiştirme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Meydana gelen maksimum yer değiştirme 0.1579 mm olarak hesaplanmıştır.

Statik analiz sonucunda Sultan Hamit III Köprüsü üzerinde meydana gelen maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin oluşturuğu bölgelere ait görsel Şekil 5.6'da sunulmuştur.



a) Sultan Hamit III çekme gerilmeleri



b) Sultan Hamit III basınç gerilmeleri

Şekil 5.6 a) Sultan Hamit III Köprüsü üzerinde oluşan maksimum çekme gerilmeleri, b) Sultan Hamit III Köprüsü üzerinde oluşan maksimum basınç gerilmeleri

Köprü üzerinde oluşan maksimum çekme ve basınç gerilmeleri incelendiğinde; maksimum çekme gerilmesi köprü uç kısımlarında meydana geldiği ve değerinin 83.717 kPa olduğu hesaplanmıştır. Maksimum basınç gerilmesi ise ana taşıyıcı kemerin ayaklarında meydana geldiği ve değerinin 119.869 kPa olduğu gözlemlenmiştir.

5.2 Sultan Hamit I-II-II Köprüleri'nin Modal Analizi

Sultan Hamit Köprüleri üzerinde SAP2000 ortamında analitik olarak modal analizler gerçekleştirilip köprülerin dinamik karakteristiği tespit edilmiştir.

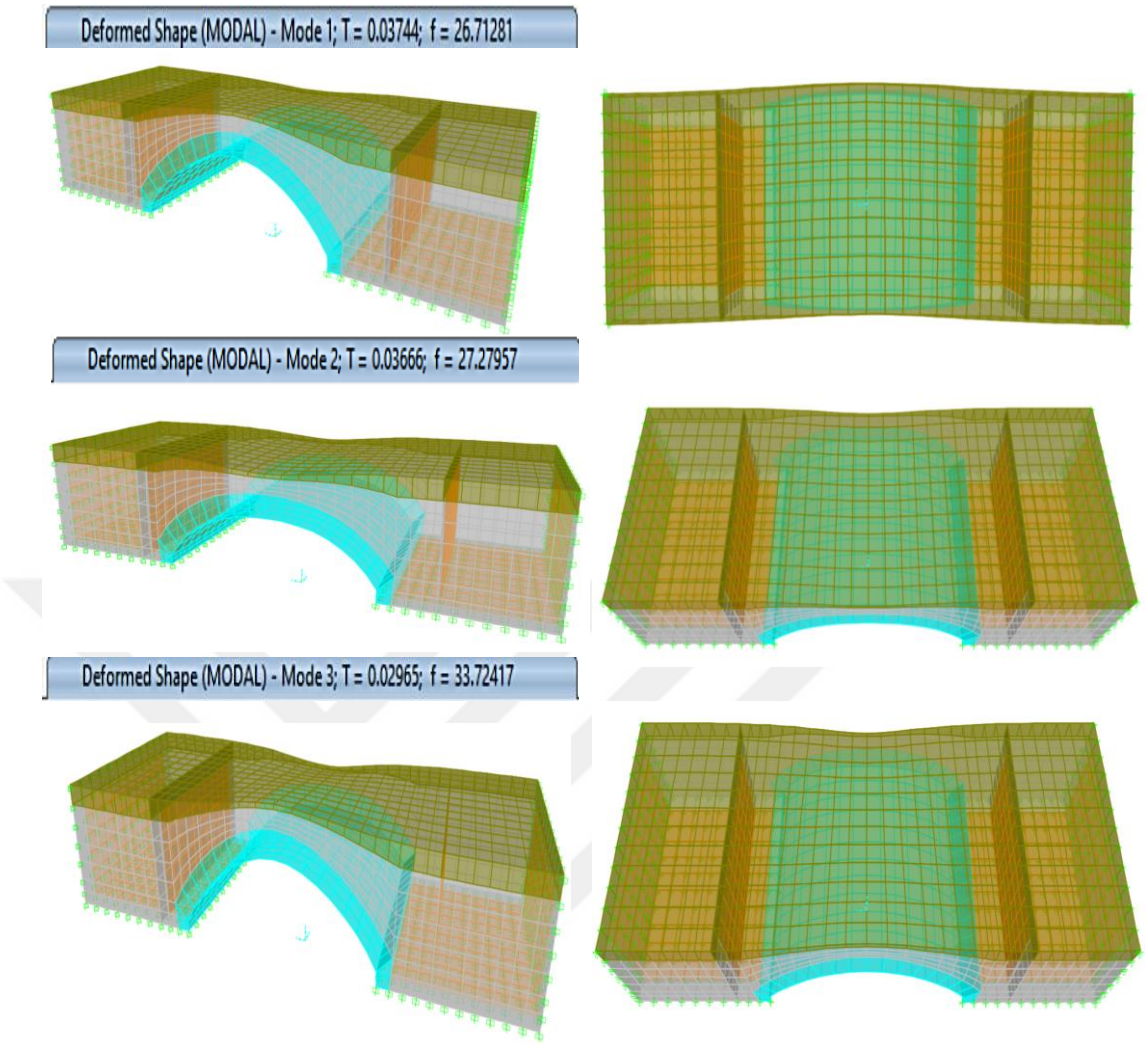
5.2.1 Sultan Hamit Köprüsü I

Sultan Hamit I Köprüsü dinamik karakteristiğinin belirlenmesi için SAP2000 ortamında oluşturulan üç boyutlu katı (solid) model üzerinde modal analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz neticesinde; yapının serbest titreşim periyotları, kütle katılım oranları ve mod şekilleri ilk 100 mod için hesaplanmıştır. Hesaplanan etkin kütle katılım oranlarının toplamı 100 mod için köprünün toplam kütlesinin %90'nından fazla olduğu tespit edilmiştir. Sultan Hamit I Köprüsü için ilk 15 mod Tablo 5.1'de sunulmuştur.

Tablo 5.1 Sultan Hamit I Köprüsü kütle katılım oranları

Mod	Periyod (s)	UX	UY	UZ	∑UX	∑UY	∑UZ
1	0.037435	**0.42292**	6.625E-10	0.00002528	0.42292	6.625E-10	0.00002528
2	0.036657	0.00004419	9.059E-09	**0.27381**	0.42297	9.721E-09	0.27384
3	0.029652	0.06942	8.892E-08	4.285E-07	0.49239	9.865E-08	0.27384
4	0.027092	5.236E-09	0.37814	0.000002738	0.49239	0.37814	0.27384
5	0.023893	0.00001559	1.643E-09	5.022E-09	0.49241	0.37814	0.27384
6	0.019594	2.249E-07	1.904E-07	0.00011	0.49241	0.37814	0.27395
7	0,019216	0.00012	2.71E-08	6.527E-09	0.49253	0.37814	0.27395
8	0.018447	0.000000198	0.28001	0.00005566	0.49253	0.65814	0.274
9	0.017725	0.18055	2.399E-07	9.452E-07	0.67307	0.65814	0.274
10	0.017131	0.000001778	0.000003039	0.09535	0.67307	0.65815	0.36935
11	0.014787	2.686E-09	0.00352	1.355E-07	0.67307	0.66167	0.36935
12	0.014686	0.00004498	0.000001942	2.752E-08	0.67312	0.66167	0.36935
13	0.037435	0.42292	6.625E-10	0.00002528	0.42292	6.625E-10	0.00002528
14	0.036657	0.00004419	9.059E-09	0.27381	0.42297	9.721E-09	0.27384
15	0.029652	0.06942	8.892E-08	4.285E-07	0.49239	9.865E-08	0.27384

Sultan Hamit I Köprüsü için modal analiz sonuçları neticesinde; Tablo 5.1'den görüldüğü üzere kütlesel olarak serbest titreşim hareketine katıldığı etkin modların, birinci ve ikinci modlar olduğu görülmektedir. Yapının x doğrultusundaki hareketini gösteren birinci modun kütle katılım oranı %42.29, z doğrultusundaki hareketini gösteren ikinci modun kütle katılım oranı ise %27.38 olarak hesaplanmıştır. Bu ilk iki modun periyod değerleri sırasıyla 0.037435 s ve 0.036657 s olarak hesaplanmıştır. Sultan Hamit I Köprüsünün ilk 3 modunun frekans değerleri ve mod şekilleri Şekil 5.7'de sunulmaktadır.



Şekil 5.7 Sultan Hamit I Köprüsü'nün ilk 3 modun frekans değerleri ve mod şekilleri

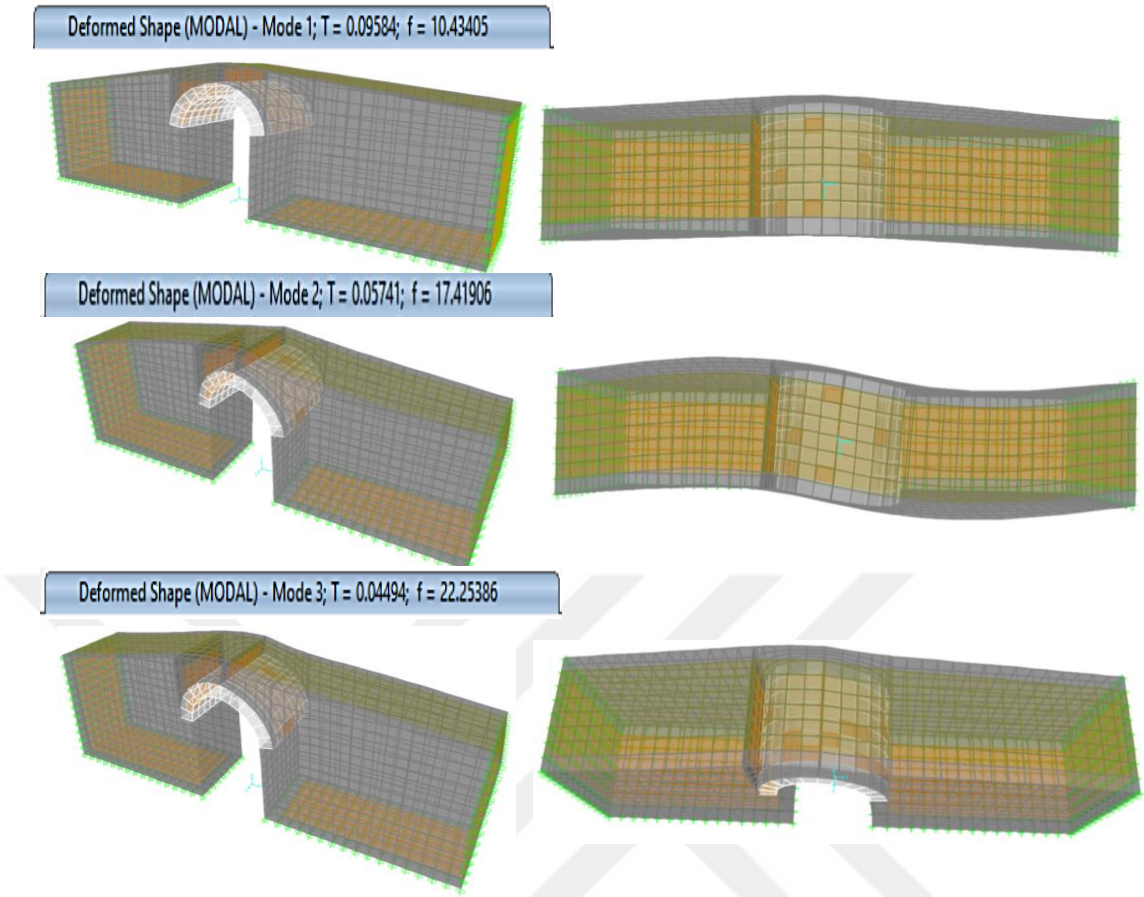
5.2.2 Sultan Hamit Köprüsü II

Sultan Hamit II Köprüsü dinamik karakteristiğinin belirlenmesi için SAP2000 ortamında oluşturulan üç boyutlu katı (solid) model üzerinde modal analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz neticesinde; yapının serbest titreşim periyotları, kütle katılım oranları ve mod şekilleri ilk 100 mod için hesaplanmıştır. Hesaplanan etkin kütle katılım oranlarının toplamı 100 mod için köprünün toplam kütlesinin %90'nından fazla olduğu tespit edilmiştir. Sultan Hamit II Köprüsü için ilk 15 mod Tablo 5.2'de sunulmuştur.

Tablo 5.2 Sultan Hamit II Köprüsü kütle katılım oranları

Mod	Periyod (s)	UX	UY	UZ	∑UX	∑UY	∑UZ
1	0.09584	**0.45798**	2.579E-18	4.44E-18	0.45798	2.579E-18	4.44E-18
2	0.057408	0.00006335	3.855E-17	4.272E-16	0.45804	4.113E-17	4.317E-16
3	0.044936	4.348E-16	**0.53414**	0.00001681	0.45804	0.53414	0.00001681
4	0.040143	1.251E-15	0.00002197	0.44216	0.45804	0.53416	0.44218
5	0.037641	0.15182	1.017E-15	5.87E-15	0.60986	0.53416	0.44218
6	0.033135	0.1003	2.374E-15	1.7E-15	0.71016	0.53416	0.44218
7	0.032328	6.735E-15	0.04949	0.0000827	0.71016	0.58366	0.44226
8	0.031859	2.959E-15	0.00017	0.03926	0.71016	0.58383	0.48152
9	0.031656	0.00001032	7.045E-16	1.578E-17	0.71017	0.58383	0.48152
10	0.027126	0.00011	4.998E-16	7.155E-14	0.71029	0.58383	0.48152
11	0.025346	2.094E-14	0.01059	0.25297	0.71029	0.59442	0.73449
12	0.024604	3.583E-14	0.12796	0.01886	0.71029	0.72238	0.75335
13	0.022311	0.09075	9.246E-15	8.752E-18	0.80103	0.72238	0.75335
14	0.021127	0.02338	4.271E-16	1.009E-13	0.82442	0.72238	0.75335
15	0.02061	0.00002823	2.145E-13	1.03E-17	0.82444	0.72238	0.75335

Sultan Hamit II Köprüsü için modal analiz sonuçları neticesinde; Tablo 5.2'den görüldüğü üzere kütlesel olarak serbest titreşim hareketine katıldığı etkin modların, birinci ve üçüncü modlar olduğu görülmektedir. Yapının x doğrultusundaki hareketini gösteren birinci modun kütle katılım oranı %45.80, y doğrultusundaki hareketini gösteren üçüncü modun kütle katılım oranı ise %53.41 olarak hesaplanmıştır. Bu birinci ve üçüncü modun periyod değerleri sırasıyla 0.095840 s ve 0.044936 s olarak hesaplanmıştır. Sultan Hamit II Köprüsünün ilk 3 modunun frekans değerleri ve mod şekilleri Şekil 5.8'de sunulmaktadır.



Şekil 5.8 Sultan Hamit II Köprüsü'nün ilk 3 modun frekans değerleri ve mod şekilleri

5.2.3 Sultan Hamit Köprüsü III

Sultan Hamit III Köprüsü dinamik karakteristiğinin belirlenmesi için SAP2000 ortamında oluşturulan üç boyutlu katı (solid) model üzerinde modal analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz neticesinde; yapının serbest titreşim periyotları, kütle katılım oranları ve mod şekilleri ilk 100 mod için hesaplanmıştır. Hesaplanan etkin kütle katılım oranlarının toplamı 100 mod için köprünün toplam kütlesinin %90'nından fazla olduğu tespit edilmiştir. Sultan Hamit III Köprüsü için ilk 15 mod Tablo 5.3'de sunulmuştur.

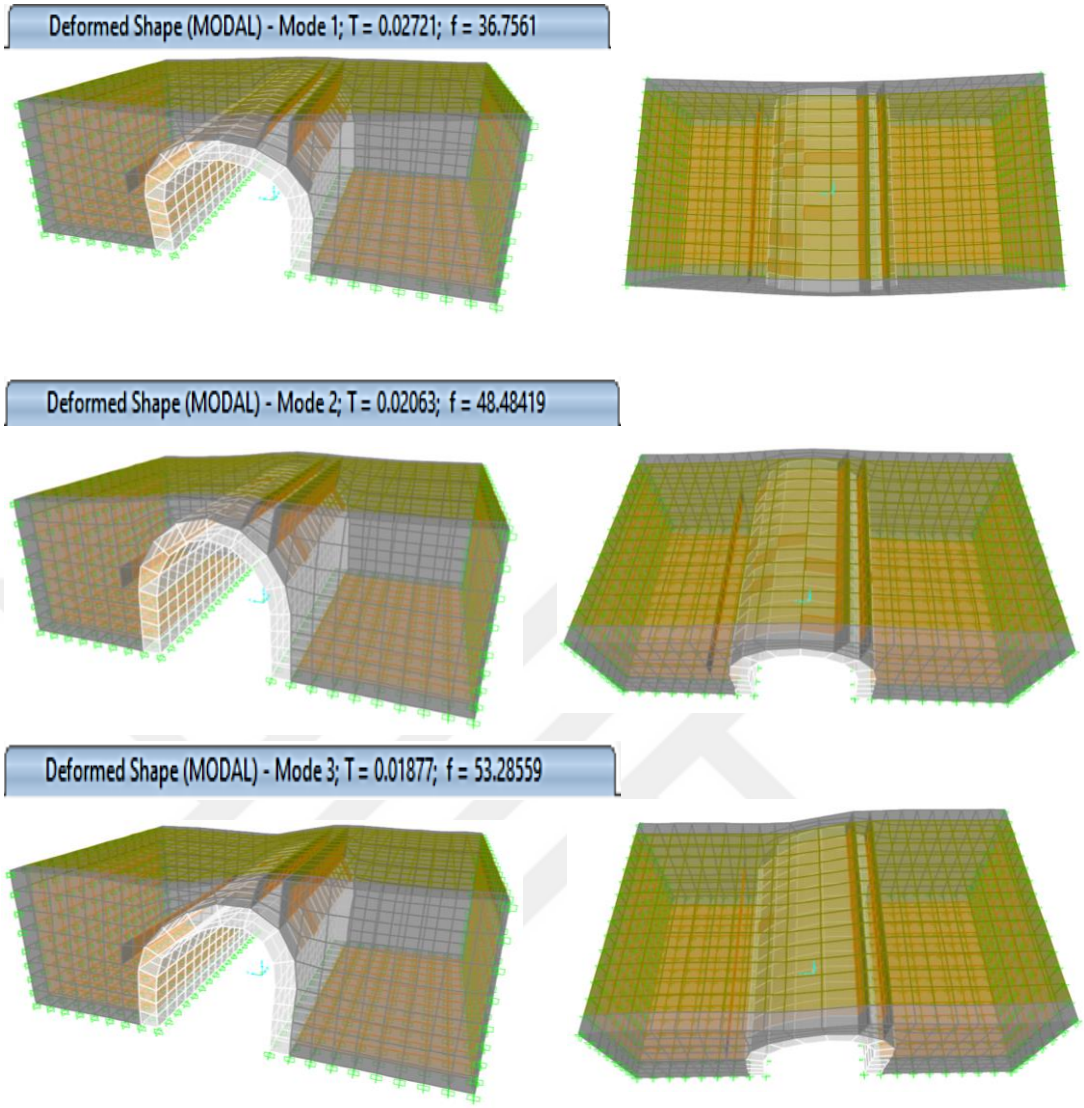
Tablo 5.3 Sultan Hamit III Köprüsü kütle katılım oranları

Mod	Periyod (s)	UX	UY	UZ	∑UX	∑UY	∑UZ
1	0.027206	**0.51926**	3.072E-16	4.265E-16	0.51926	3.072E-16	4.265E-16
2	0.020625	1.8E-15	0.000003264	**0.4028**	0.51926	0.000003264	0.4028
3	0.018767	8.413E-15	**0.49998**	0.00008453	0.51926	0.49998	0.40289
4	0.018624	0.00319	2.483E-15	8.025E-17	0.52245	0.49998	0.40289

Tablo 5.4 Sultan Hamit III Köprüsü kütle katılım oranları (devamı)

5	0.018271	0.07615	6.572E-15	9.594E-16	0.5986	0.49998	0.40289
6	0.015609	1.021E-14	0.00001935	0.00024	0.5986	0.5	0.40312
7	0.015501	0.00061	1.087E-14	5.286E-14	0.5992	0.5	0.40312
8	0.015058	4.626E-15	0.09626	0.00385	0.5992	0.59626	0.40698
9	0.013511	7.416E-14	0.02346	0.00179	0.5992	0.61972	0.40877
10	0.01342	1.669E-13	0.00377	0.00486	0.5992	0.62349	0.41363
11	0.013408	0.05622	1.325E-13	2.529E-13	0.65542	0.62349	0.41363
12	0.013255	0.00328	3.072E-13	2.826E-13	0.6587	0.62349	0.41363
13	0.013248	3.561E-15	0.00004093	0.17102	0.6587	0.62353	0.58465
14	0.011765	0.08522	2.53E-15	1.35E-12	0.74392	0.62353	0.58465
15	0.01175	2.106E-14	0.00149	0.06541	0.74392	0.62502	0.65006

Sultan Hamit III Köprüsü için modal analiz sonuçları neticesinde; Tablo. 5.3'ten görüldüğü üzere kütlesel olarak serbest titreşim hareketine katıldığı etkin modların, birinci ve ikinci modlar olduğu görülmektedir. Yapının x doğrultusundaki hareketini gösteren birinci modun kütle katılım oranı %51.93 y doğrultsundaki üçüncü modun kütle katılım oranı %49.99 z doğrultusundaki hareketini gösteren ikinci modun kütle katılım oranı ise %40.28 olarak hesaplanmıştır. Etkin olan birinci, ikinci ve üçüncü modun periyod değerleri sırasıyla 0.027206 s, 0.020625 s ve 0.018767 s olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.9'da sunulmaktadır.



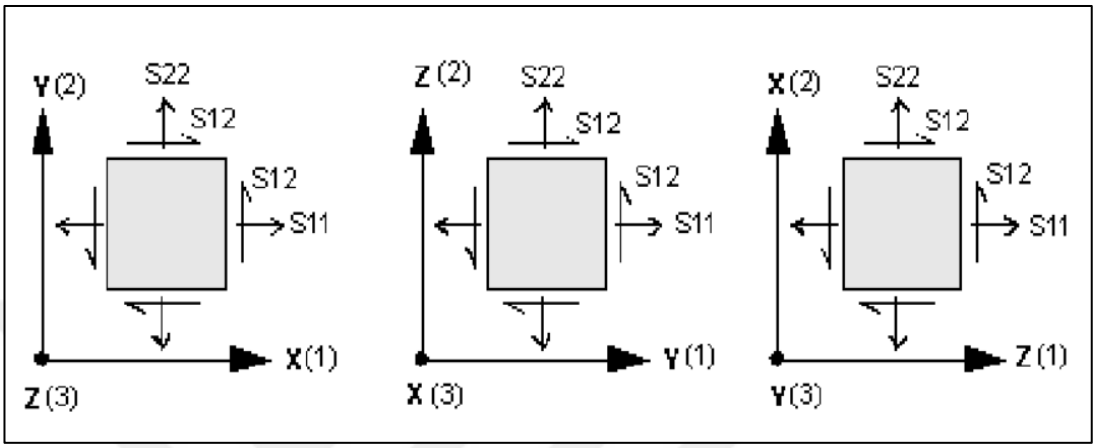
Şekil 5.9 Sultan Hamit III Köprüsü'nün ilk 3 modun frekans değerleri ve mod şekilleri

5.3 Sultan Hamit I-II-II Köprüleri'nin Dinamik Analizi

Sultan Hamit Köprüleri dinamik analizi için 1992 Erzincan ve 2020 Elazığ depremelerinin ivme kayıtları kullanılarak SAP2000 ortamında zaman tanım alanında çözümleme yapılmıştır. Dinamik analizlerde kullanılan ivme kayıtları köprü açıklığına dik olacak şekilde suyun akış doğrultusunda etki ettirilmiştir. Bu sebepten köprü konumu dikkate alınarak Sultan Hamit I, Sultan Hamit II ve Sultan Hamit III Köprülerinde doğu-batı ivme kaydı kullanılmıştır. Temel ortamı rijit olarak kabul edilmiştir. Dinamik analizlerde kullanılan tüm deprem ivmeleri köprünün bulunduğu konum dikkate alınarak ölçeklendirilmiştir. Analizlerde integrasyon zaman adımı 0.01 s olarak seçilmiştir. Dinamik analizler için HHT-α algoritması kullanılmıştır. Köprüdeki sönümün Rayleigh tipi bir sönüm olduğu kabul edilerek rijitlik ve kütle

orantılı sönüm katsayıları hasarsız durumdaki köprü için %5 sönüm oranı olacak şekilde bulunmuştur. Analizlerde tüm deprem ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Bunlar Elazığ için 110 sn, Erzincan 27.96 sn'dir.

Analizler yapılıp gerilmeler değerlendirilirken Şekil 5.10'da sunulan düzlem kabuk eleman global koordinatlar ve gerilme yönleri dikkate alınmıştır.



Şekil 5.10 Düzlem kabuk elemanda global koordinatlar ve gerilmeleler (Akaslan,2019)

Sultan Hamit Köprüleri'nin SAP2000 (2018) ortamında oluşturulan katı modellerinin Şekil 5.10'a göre gerilme yönleri dikkate alındığında, çalışmada kullanılan yön bilgileri aşağıda özetlenmiştir.

- S11: (y) yönünde gerilme
- S22: (z) yönünde gerilme
- S33: (x) yönünde gerilme
- S12: (y-z) düzleminde kayma gerilmesi
- S13: (y-x) düzleminde kayma gerilmesi
- S23: (z-x) düzleminde kayma gerilmesi

5.3.1 Sultan Hamit I Köprüsü'nün dinamik analizi

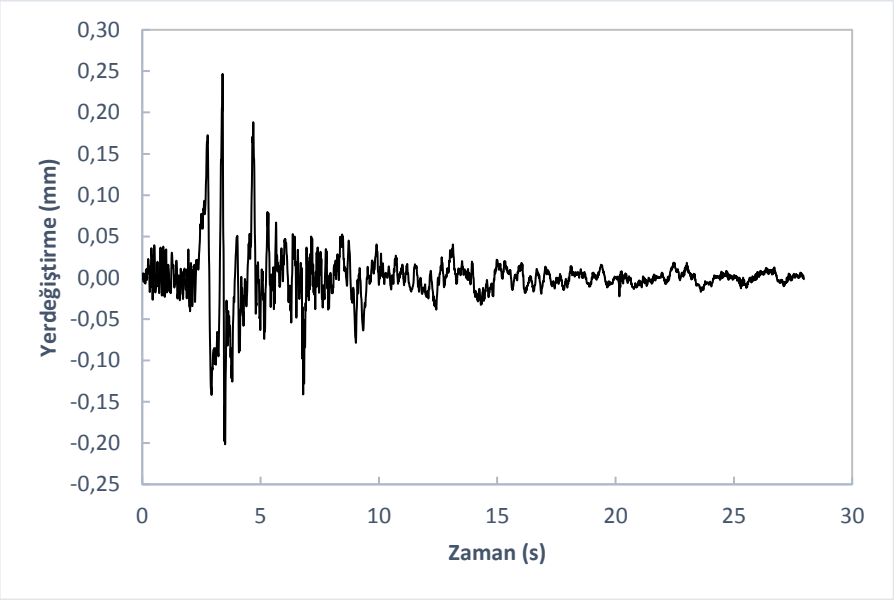
Sultan Hamit I Köprüsü SAP2000 ortamında kendi ağırlığı altında zaman tanım alanında 1992 Erzincan ve 2020 Elazığ depremi ivme kayıtları kullanılarak dinamik analizleri yapılmıştır. Analizler neticesinde zamana bağlı gerilmelerin en büyüğü olan envelop max, envelop min. dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda köprüde meydana gelen gerilme diyagramları ve yer değiştirmeler incelenmiştir. Yapılan deprem analizleri Tablo 5.4'te sunulmuştur.

Tablo 5.5 Sultan Hamit I Köprüsü deprem analizleri

Köprü	Gerilme(kPa)	1992 Erzincan				2020 Elazığ			
		Envelope Max.		Envelope Min.		Envelope Max.		Envelope Min.	
		Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Sultan Hamit I	σ_{yy}	26.681	77.55	128.011	30.838	22.849	77.608	20.098	84.642
	σ_{zz}	133.266	176.433	681.183	63.965	106.791	176.679	64.093	202.232
	σ_{xx}	28.278	318.717	536.303	156.072	21.745	319.125	10.845	428.998
	τ_{yz}	52.31	5.267	198.737	0.893	36.491	11.299	9.348	38.928
	τ_{yx}	143.464	2.309	179.539	1.464	109.626	6.063	19.972	93.524
	τ_{zx}	176.189	121.625	143.219	37.697	154.318	121.664	123.142	148.756

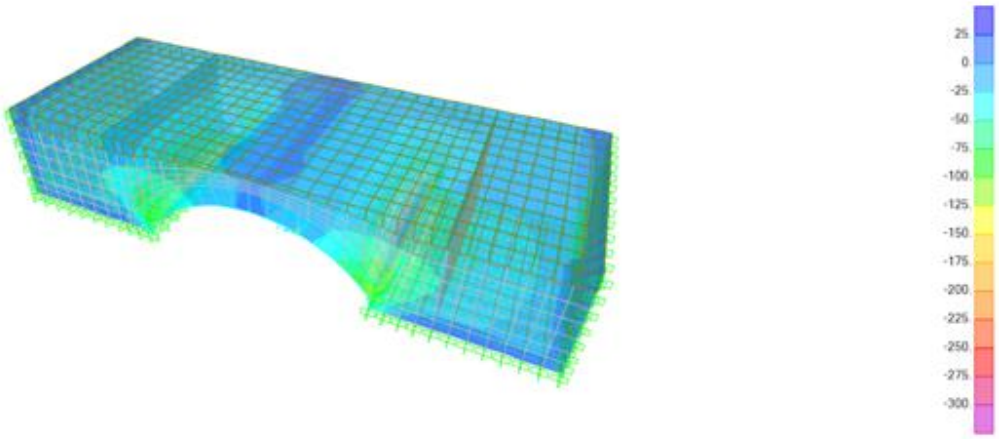
5.3.1.1 1992 Erzincan depremine göre dinamik analiz sonuçları

1992 Erzincan depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde tarihi yığma köprünün 1087 nolu düğüm noktası için nehir akış doğrultusunda (y ekseni) elde edilen yerdeğiştirme grafiği Şekil 5.11'de sunulmuştur. Y eksenindeki mutlak maksimum yerdeğiştirme değeri 0.2467 mm olarak elde edilmiştir.

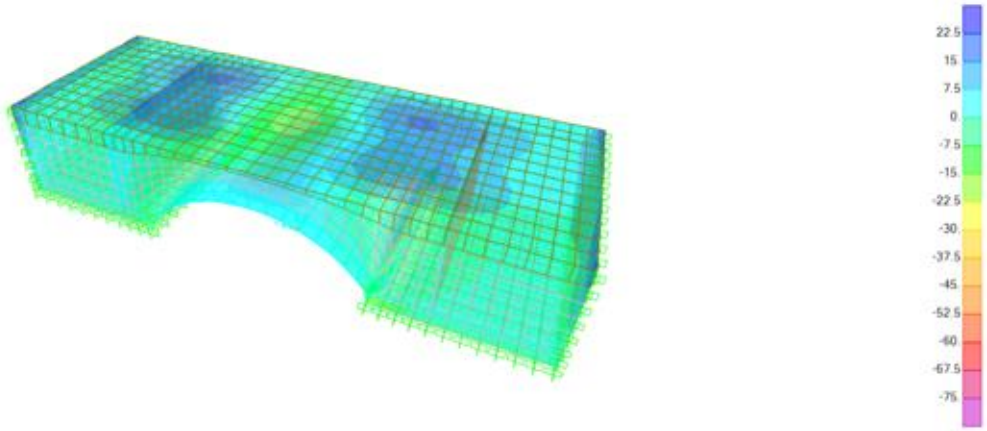


Şekil 5.11 Erzincan depremi 1087 nolu düğüm noktasının y eksenindeki yer değiştirme grafiği

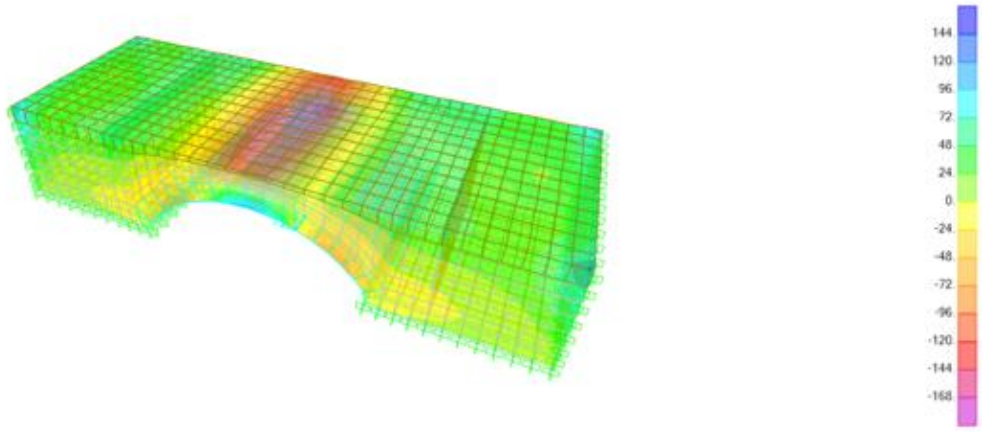
1992 Erzincan depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda envelope max. için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.12; 5.13; 5.14; 5.15; 5.16; 5.17'de sunulmuştur. Analizler neticesinde elde edilen maksimum basınç gerilmesi 318.717 kPa, maksimum kayma gerilmesi 176.189 kPa olarak hesaplanmıştır.



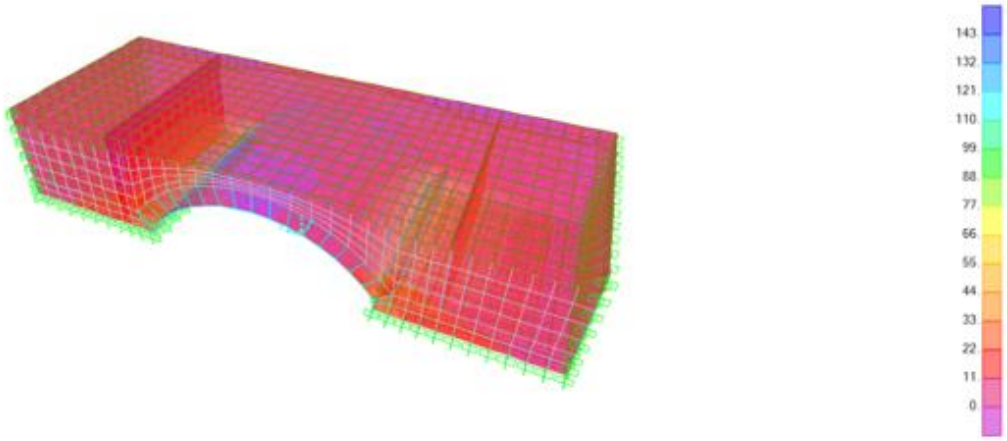
Şekil 5.12 1992 Erzincan depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



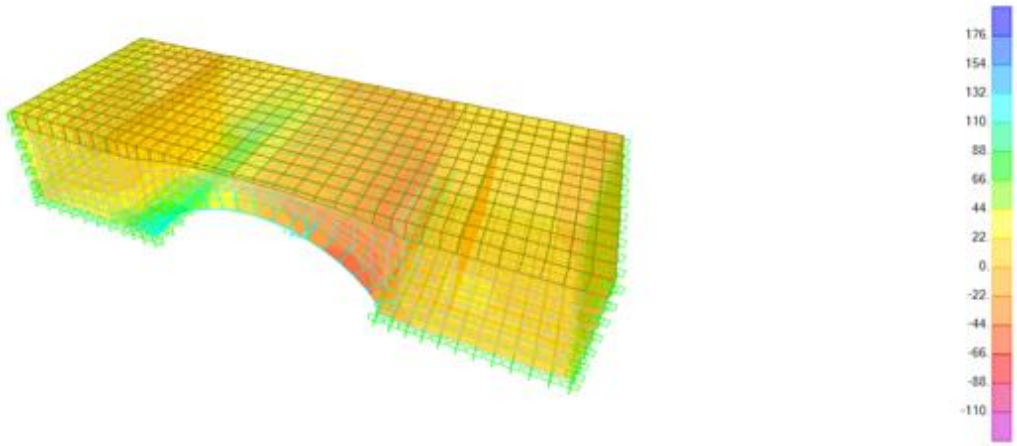
Şekil 5.13 1992 Erzincan depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



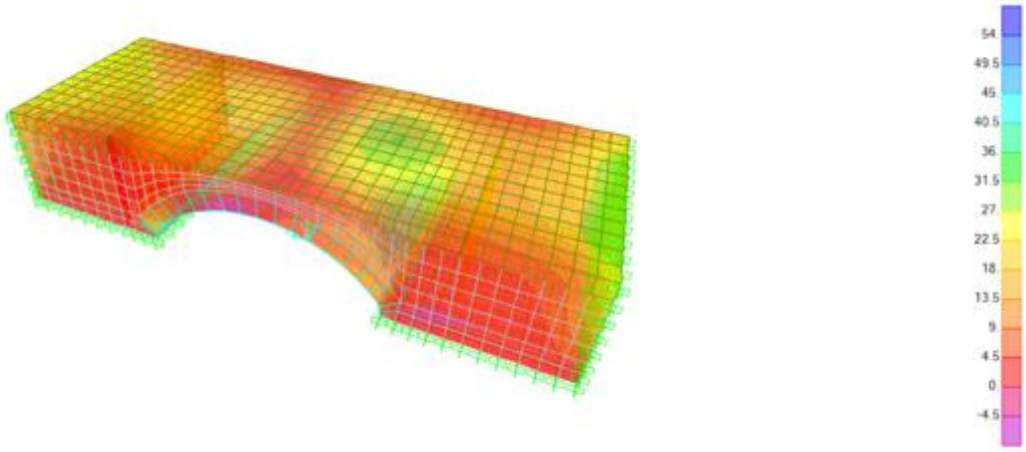
Şekil 5.14 1992 Erzincan depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



Şekil 5.15 1992 Erzincan depremi için τ_{xy} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

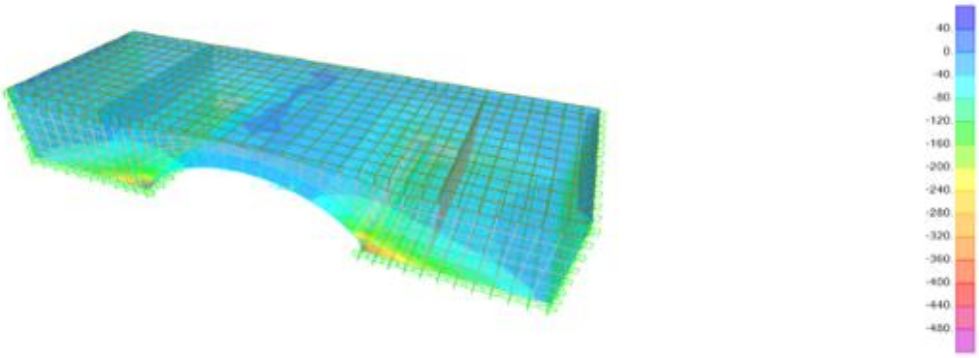


Şekil 5.16 1992 Erzincan depremi için τ_{xz} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

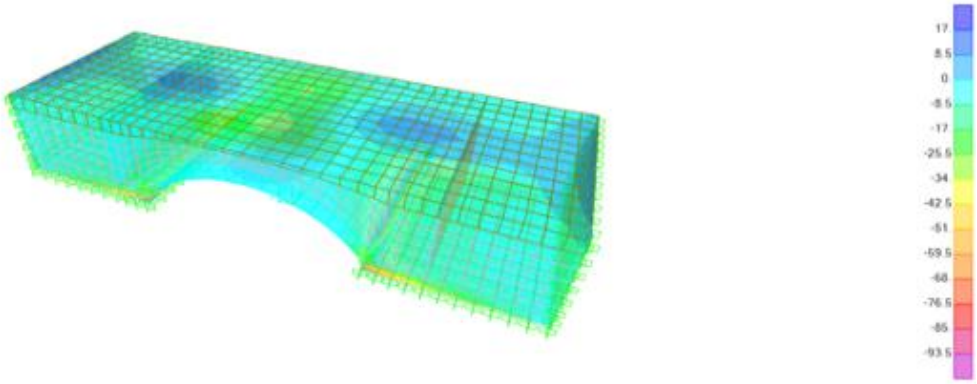


Şekil 5.17 1992 Erzincan depremi için τ_{yz} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

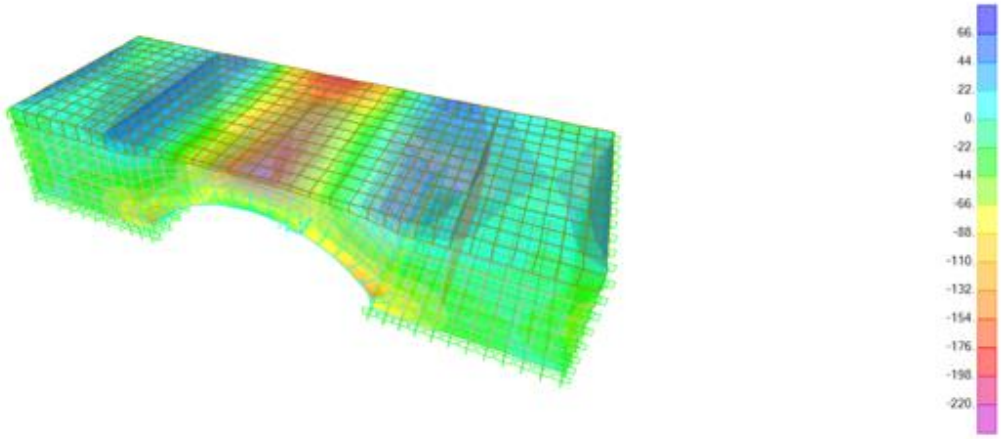
1992 Erzincan depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda envelope min. için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.18; 5.19; 5.20; 5.21; 5.22; 5.23'de sunulmuştur. Analizler neticesinde elde edilen maksimum basınç gerilmesi 497.366 kPa, maksimum kayma gerilmesi 167.92 kPa olarak hesaplanmıştır.



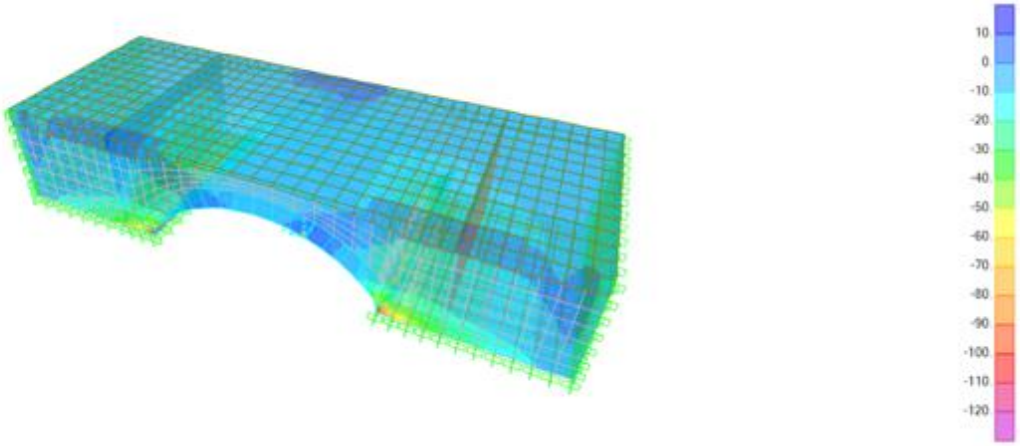
Şekil 5.18 1992 Erzincan depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



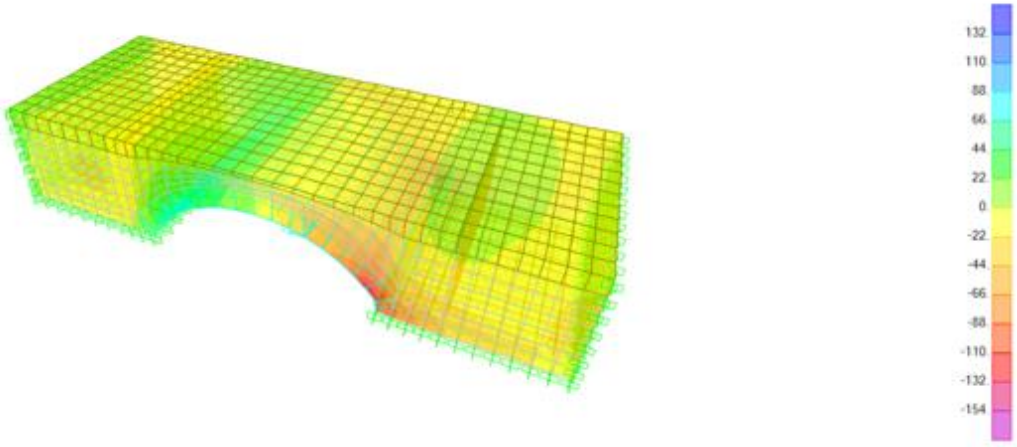
Şekil 5.19 1992 Erzincan depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



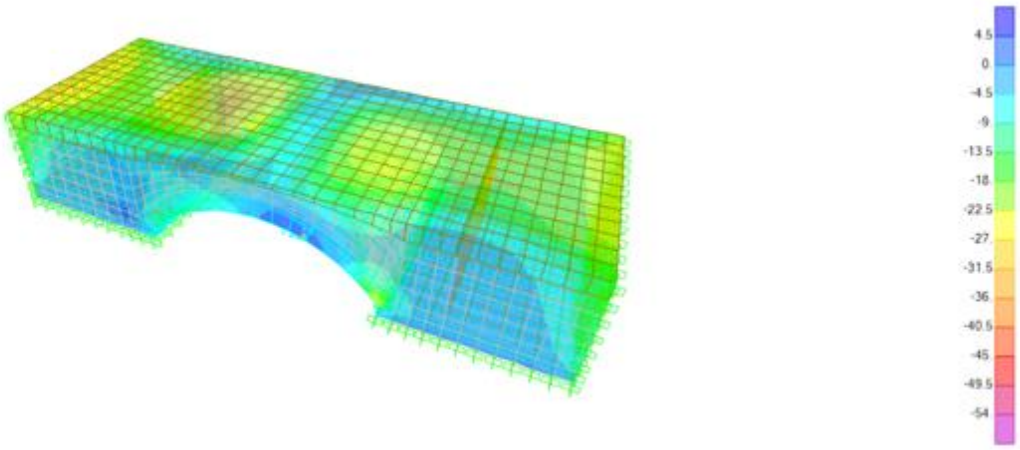
Şekil 5.20 1992 Erzincan depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.21 1992 Erzincan depremi için τ_{xy} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



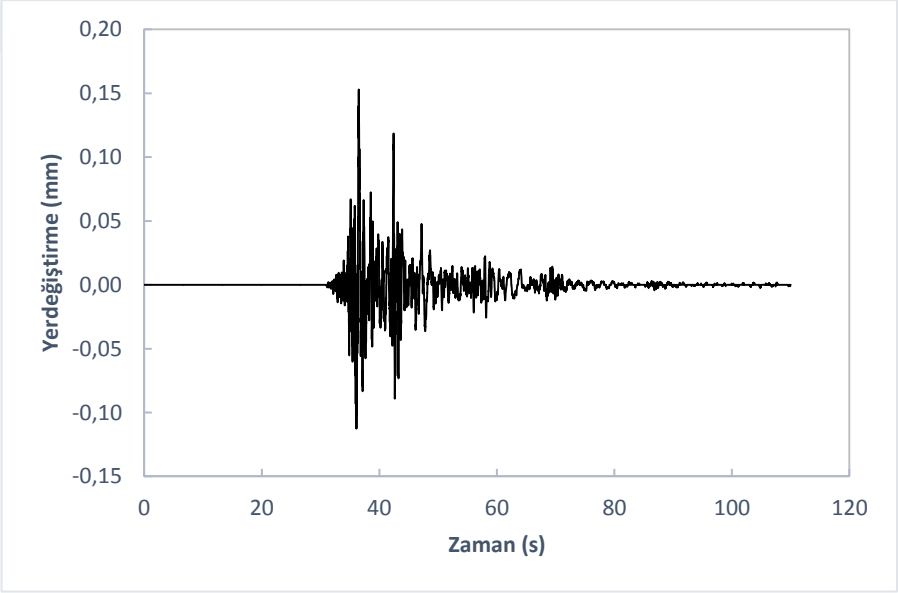
Şekil 5.22 1992 Erzincan depremi için τ_{xz} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.23 1992 Erzincan depremi için τ_{yz} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

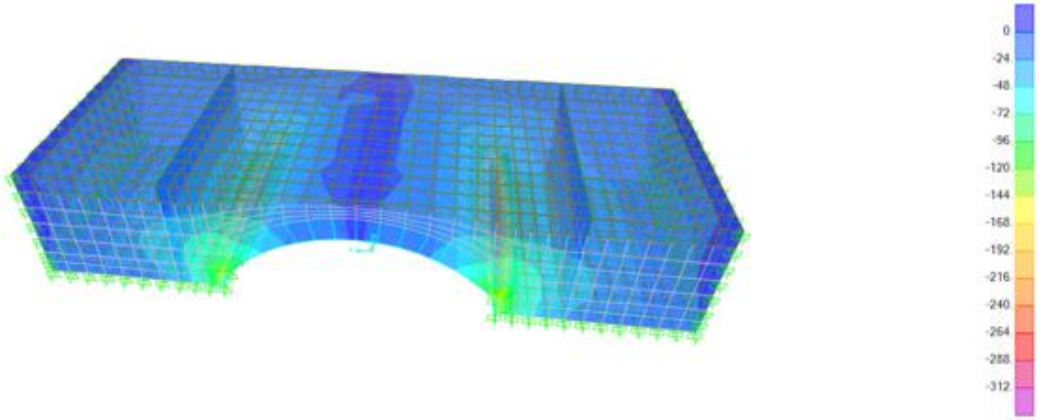
5.3.1.2 2020 Elazığ depremine döre dinamik analiz sonuçları

2020 Elazığ depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde tarihi yığma köprünün 1087 nolu düğüm noktası için nehir akış doğrultusunda (y ekseni) elde edilen yerdeğiştirme grafiği Şekil 5.24'de sunulmuştur. Y eksenindeki mutlak maksimum yerdeğiştirme değeri 0.153 mm olarak elde edilmiştir.

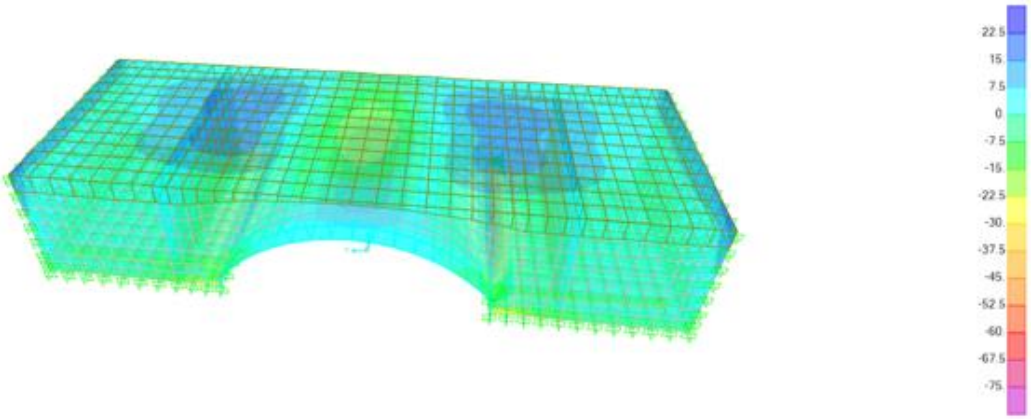


Şekil 5.24 Elazığ depremi 1087 nolu düğüm noktasının y eksenindeki yer değiştirme grafiği

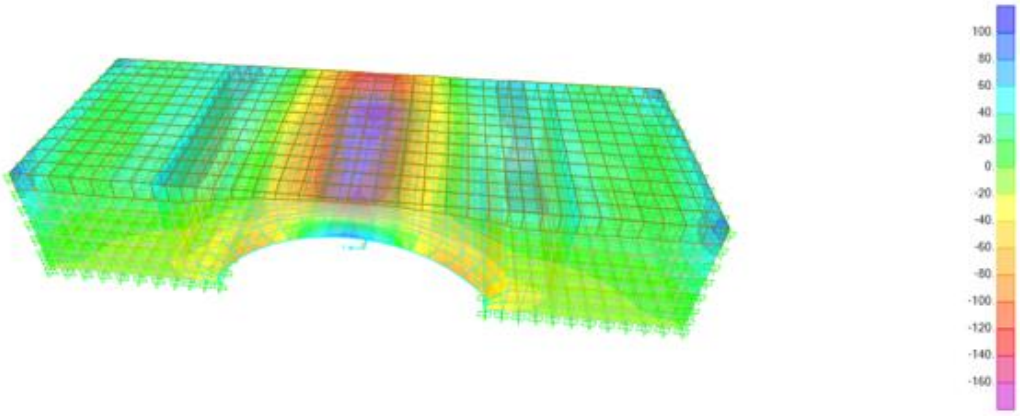
2020 Elazığ depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda envelope max. için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.25; 5.26; 5.27; 5. 28; 5.29; 5.30'da sunulmuştur. Analizler neticesinde elde edilen maksimum basınç gerilmesi 319.125 kPa, maksimum kayma gerilmesi 154.318 kPa olarak hesaplanmıştır.



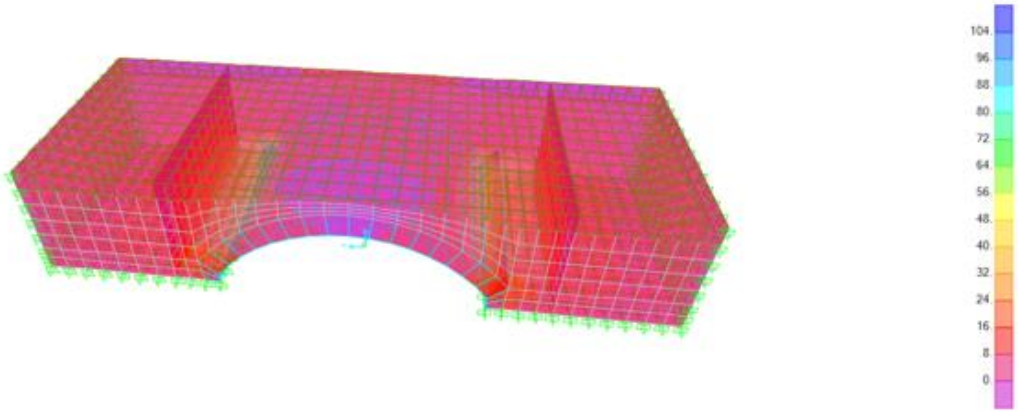
Şekil 5.25 2020 Elazığ depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



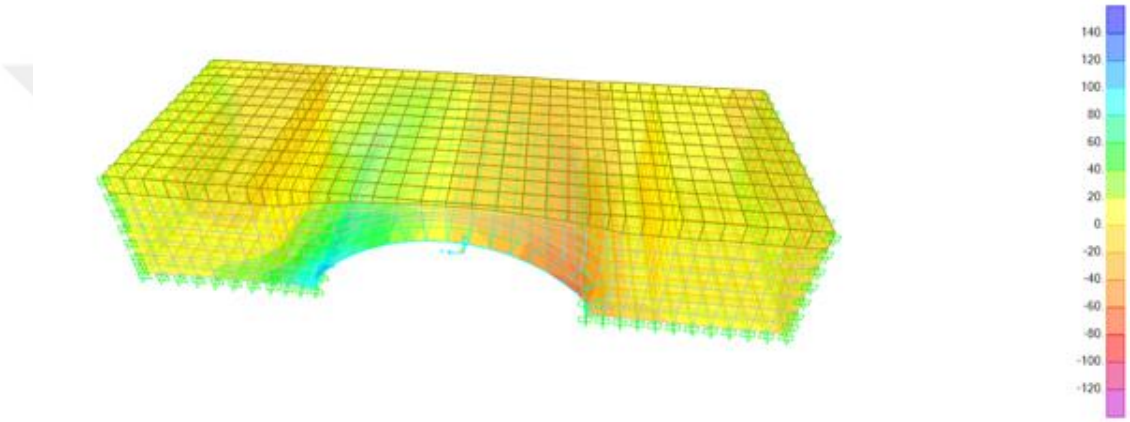
Şekil 5.26 2020 Elazığ depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



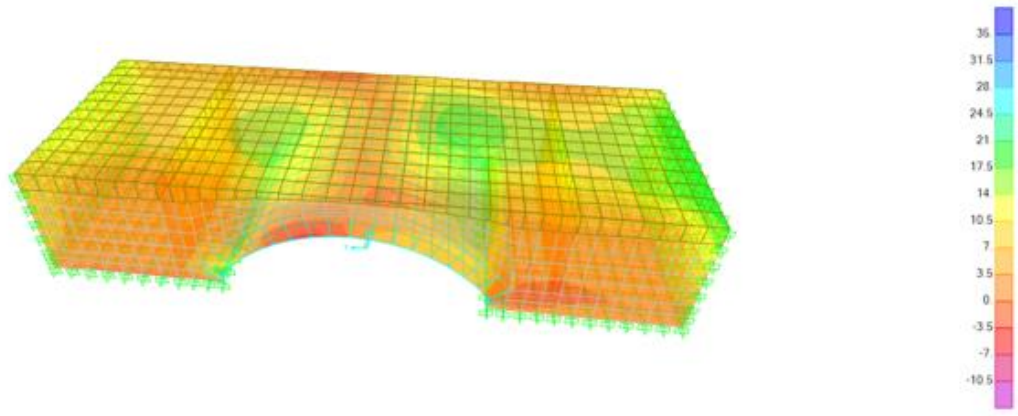
Şekil 5.27 2020 Elazığ depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



Şekil 5.28 1992 Elazığ depremi için τ_{xy} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



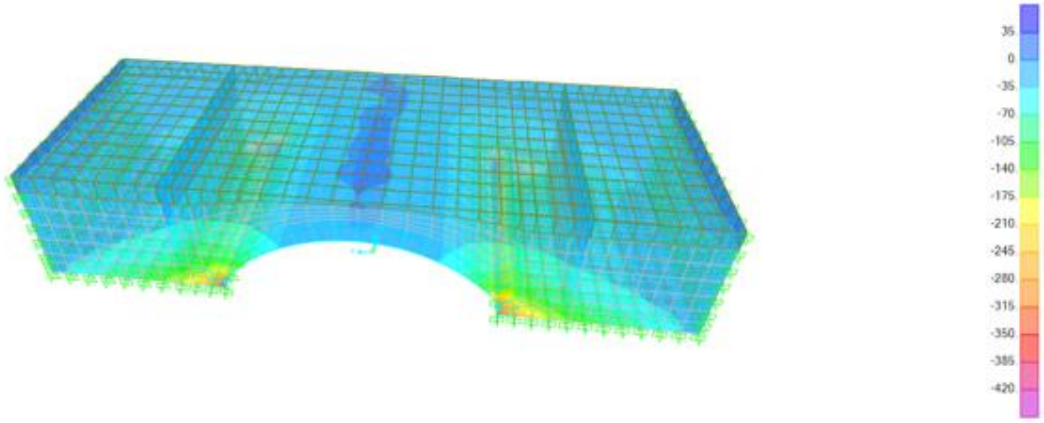
Şekil 5.29 2020 Elazığ depremi için τ_{xz} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



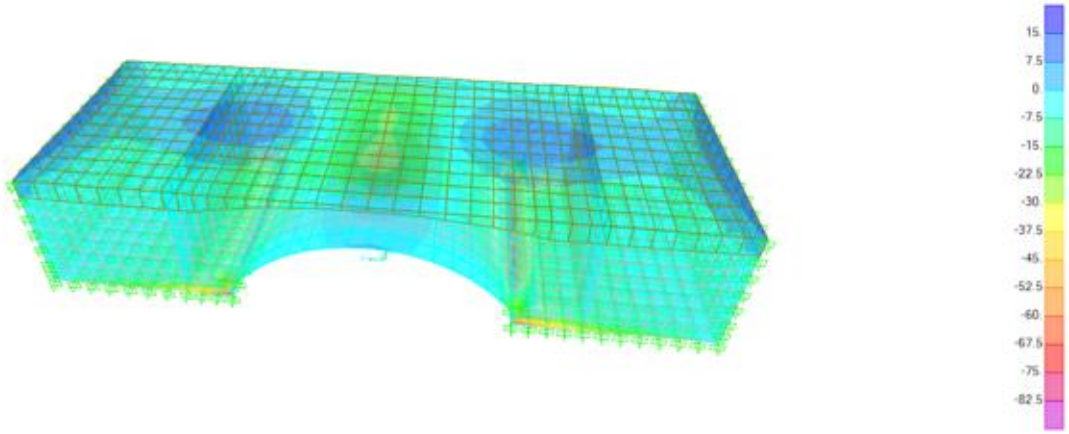
Şekil 5.30 2020 Elazığ depremi için τ_{yz} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

2020 Elazığ depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda envelope min. için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.31; 5.32; 5.33; 5.34; 5.35; 5.36'da sunulmuştur. Analizler neticesinde elde edilen maksimum basınç

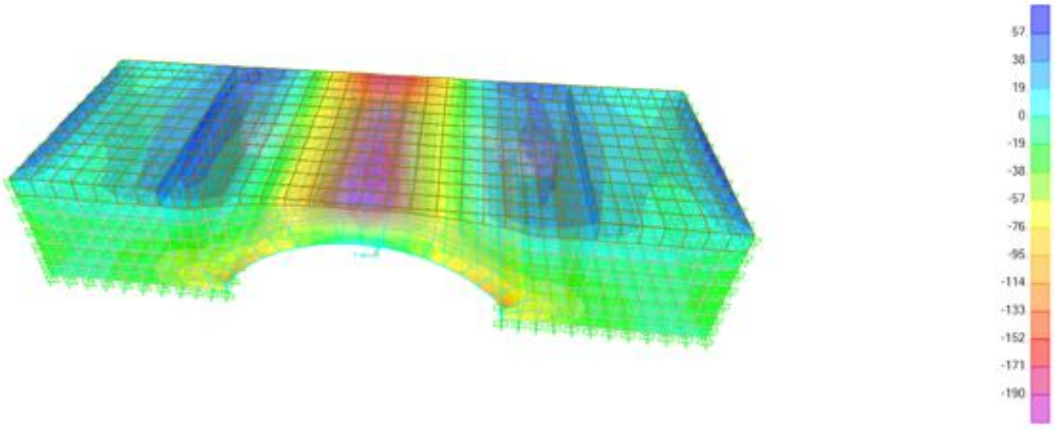
gerilmesi 428.998 kPa, maksimum kayma gerilmesi 148.756 kPa olarak hesaplanmıştır.



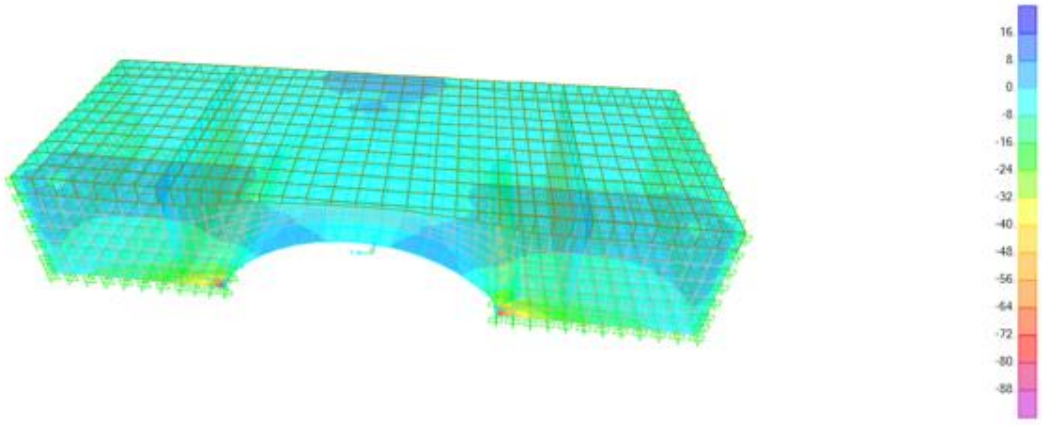
Şekil 5.31 2020 Elazığ depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



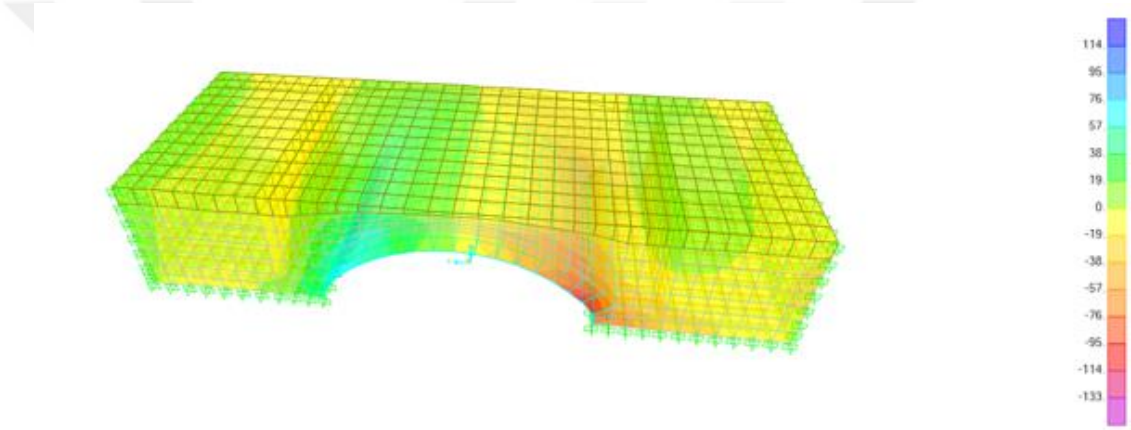
Şekil 5.32 2020 Elazığ depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



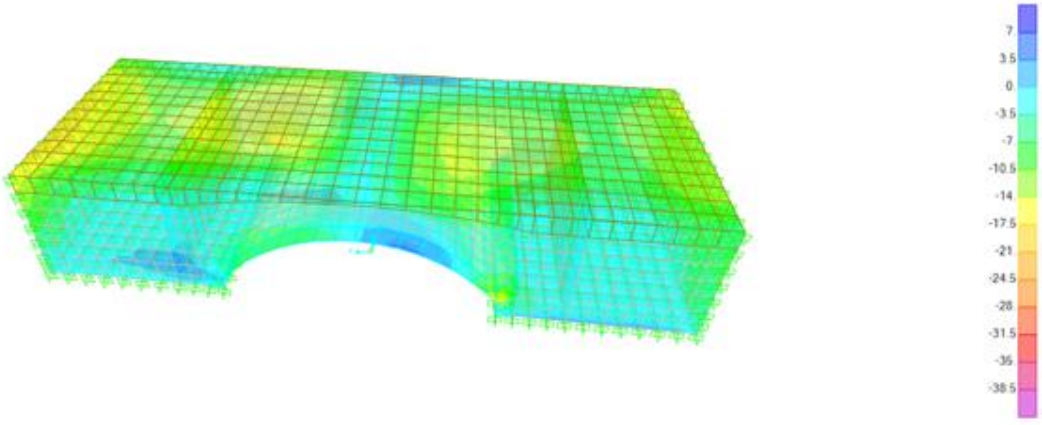
Şekil 5.33 2020 Elazığ depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.34 2020 Elazığ depremi için τ_{xy} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.35 2020 Elazığ depremi için τ_{xz} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.36 2020 Elazığ depremi için τ_{yz} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

5.3.2 Sultan Hamit II Köprüsü'nün dinamik analizi

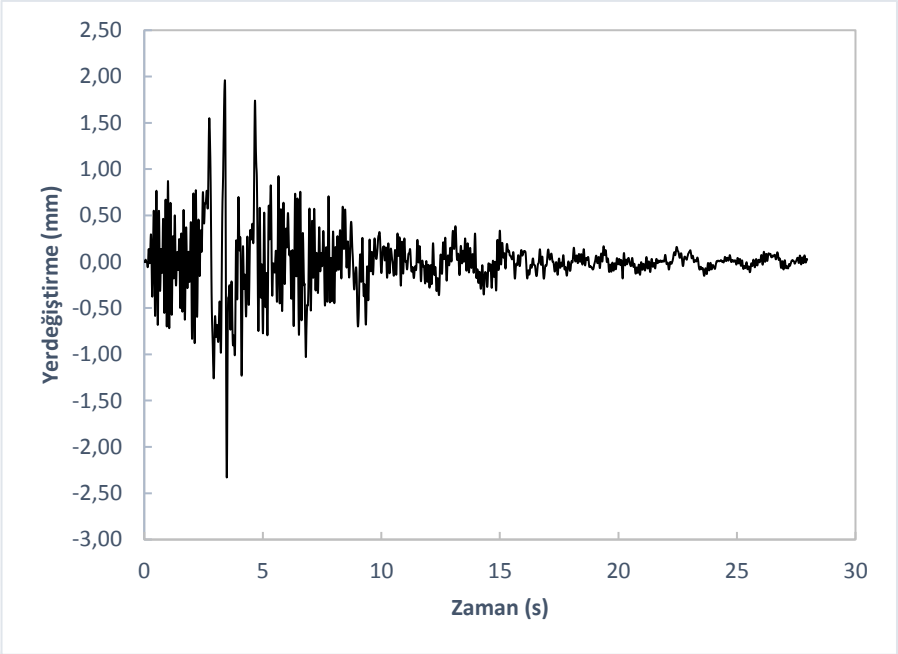
Sultan Hamit II Köprüsü SAP2000 ortamında kendi ağırlığı altında zaman tanım alanında 1992 Erzincan ve 2020 Elazığ depremi ivme kayıtları kullanılarak dinamik analizleri yapılmıştır. Analizler neticesinde zamana bağlı gerilmelerin en büyüğü olan envelop max, envelop min. dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda köprüde meydana gelen gerilme diyagramları ve yer değiştirmeler incelenmiştir. Yapılan dinamik analiz Tablo 5.5'te sunulmuştur.

Tablo 5.6 Sultanahmet II Köprüsü dinamik analizi

Köprü	Gerilme(kPa)	1992 Erzincan				2020 Elazığ			
		Envelope Max.		Envelope Min.		Envelope Max.		Envelope Min.	
		Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Sultan Hamit II	σ_{yy}	128.011	30.838	25.08	168.739	86.23	34.797	27.532	111.113
	σ_{zz}	681.183	63.965	127.713	516.609	449.576	64.138	128.405	283.435
	σ_{xx}	536.303	156.072	19.399	862.068	222.735	156.644	20.357	556.781
	τ_{yz}	198.737	0.893	0.904	199.099	121.575	1.105	1.098	119.528
	τ_{yx}	179.539	1.464	1.566	195.851	110.534	2.167	2.098	88.201
	τ_{zx}	143.219	37.697	38.113	146.562	97.467	37.77	38.188	99.2

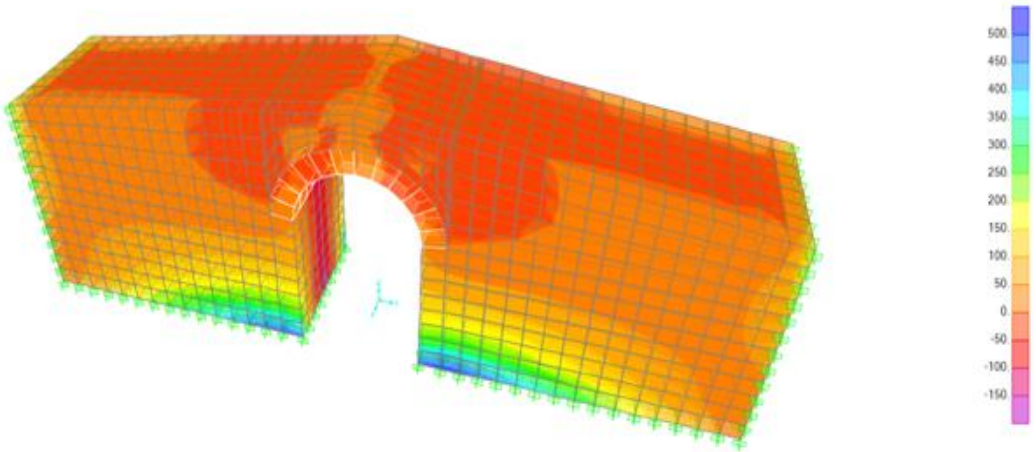
5.3.2.1 1992 Erzincan depremine göre dinamik analiz sonuçları

2020 Erzincan depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde tarihi yığma köprünün 1025 nolu düğüm noktası için nehir akış doğrultusunda (y ekseni) elde edilen yerdeğiştirme grafiği Şekil 5.37'de sunulmuştur. Y eksenindeki mutlak maksimum yerdeğiştirme değeri 2.33 mm olarak elde edilmiştir.

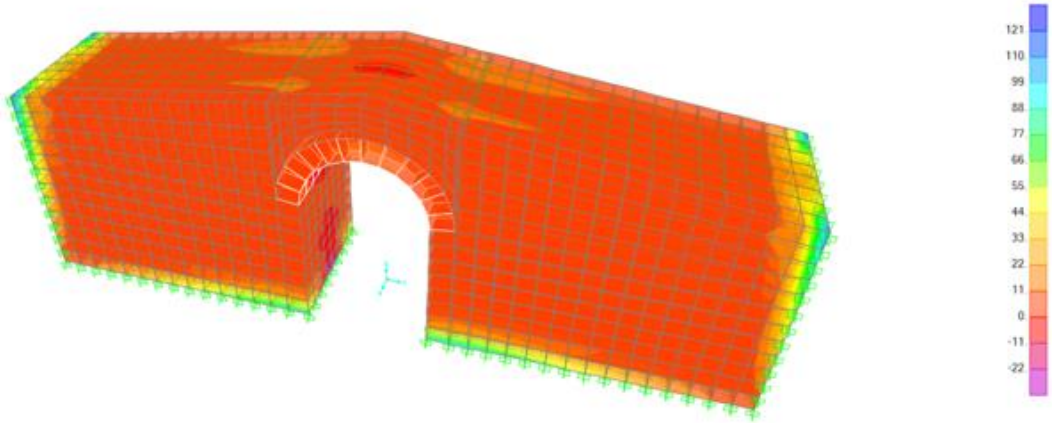


Şekil 5.37 1992 Erzincan depremi 1025 nolu düğüm noktasının y eksenindeki yer değiştirme grafiği

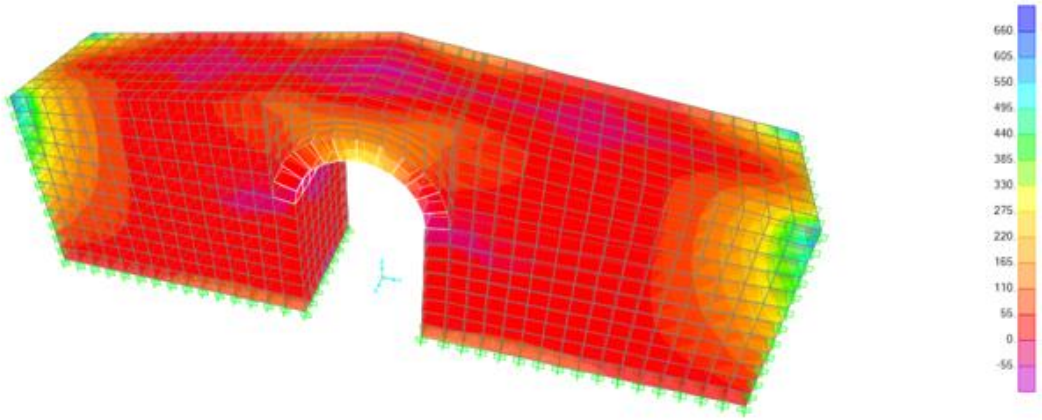
1992 Erzincan depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda envelope max. için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.38; 5.39; 5.40; 5.41; 5.42; 5.43'de sunulmuştur. Analizler neticesinde elde edilen maksimum çekme gerilmesi 681.183 kPa, maksimum kayma gerilmesi 198.737 kPa olarak hesaplanmıştır.



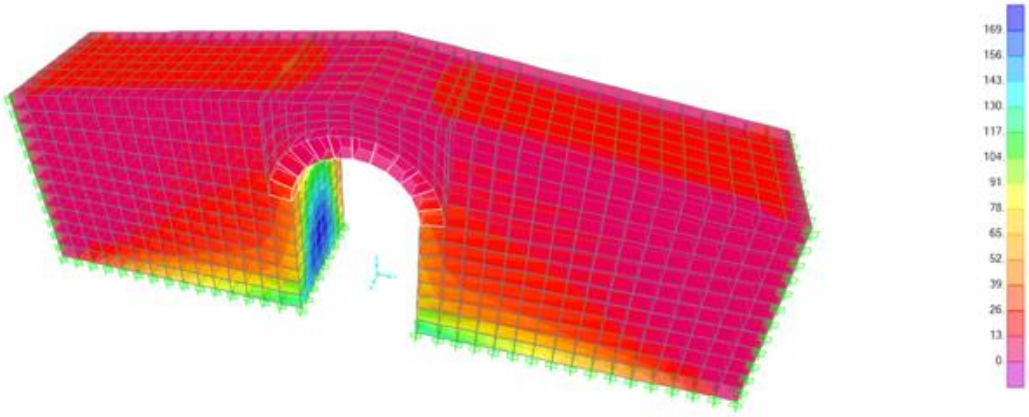
Şekil 5.38 1992 Erzincan depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



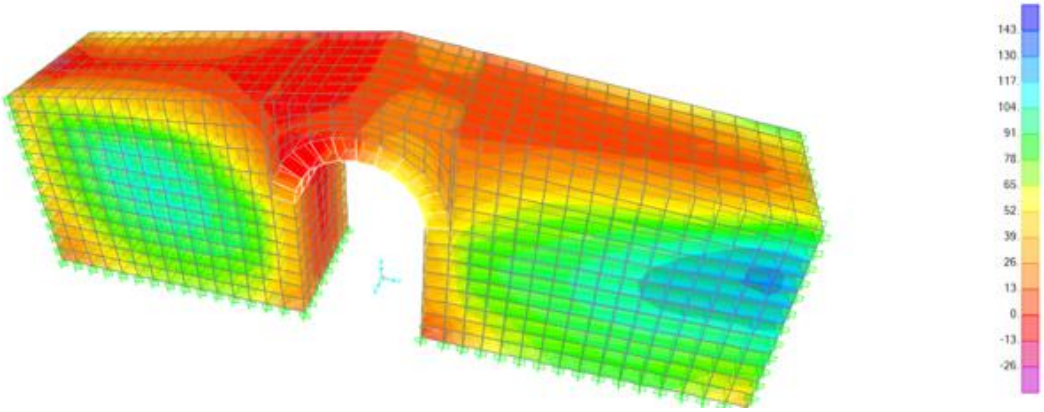
Şekil 5.39 1992 Erzincan depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



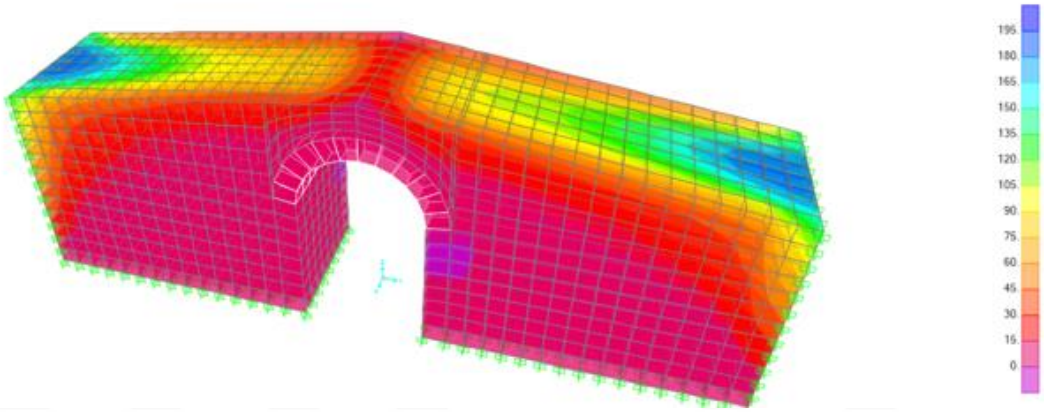
Şekil 5.40 1992 Erzincan depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



Şekil 5.41 1992 Erzincan depremi için τ_{xy} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

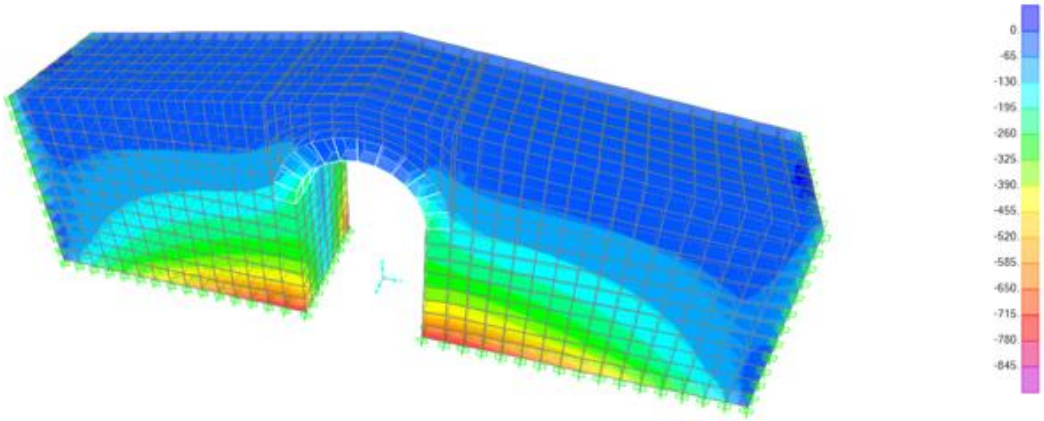


Şekil 5.42 1992 Erzincan depremi için τ_{xz} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

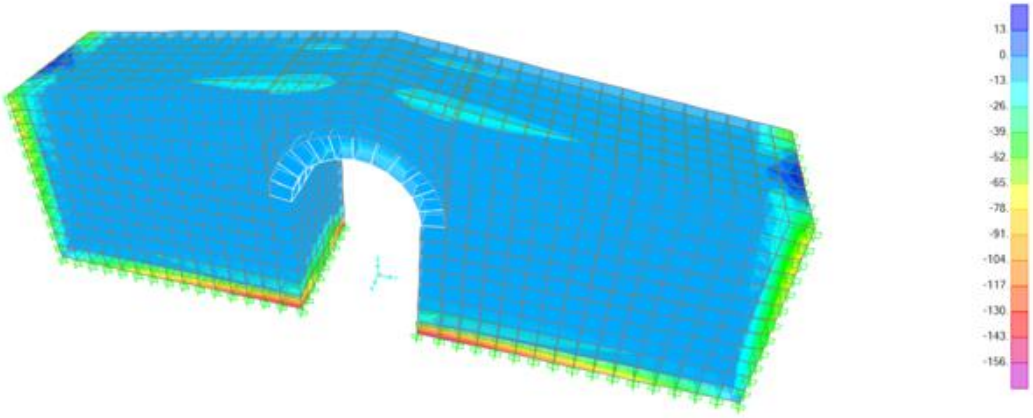


Şekil 5.43 1992 Erzincan depremi için τ_{yz} kayma gerilmeleri, Envelope max. (KPa)

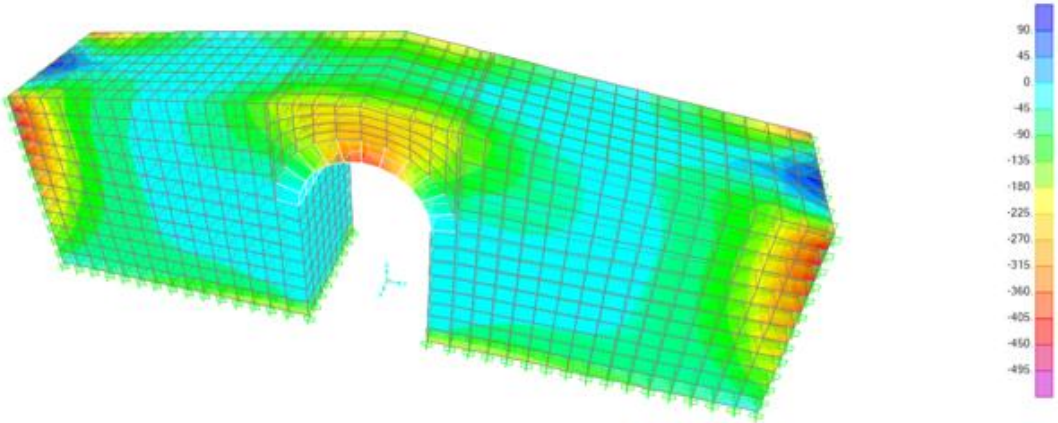
1992 Erzincan depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda envelope min. için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.44; 5.45; 5.46; 5.47; 5.48; 5.49' da sunulmuştur. Analizler neticesinde elde edilen maksimum basınç gerilmesi 862.068 kPa, maksimum kayma gerilmesi 199.099 kPa olarak hesaplanmıştır.



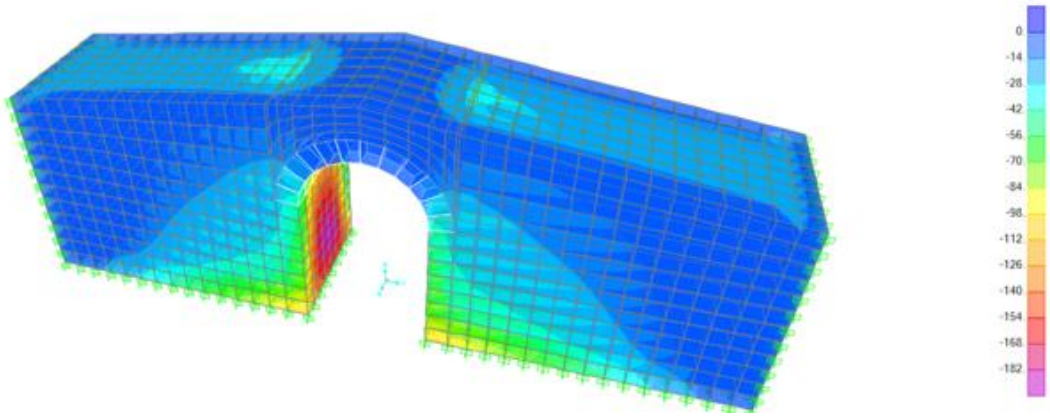
Şekil 5.44 1992 Erzincan depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



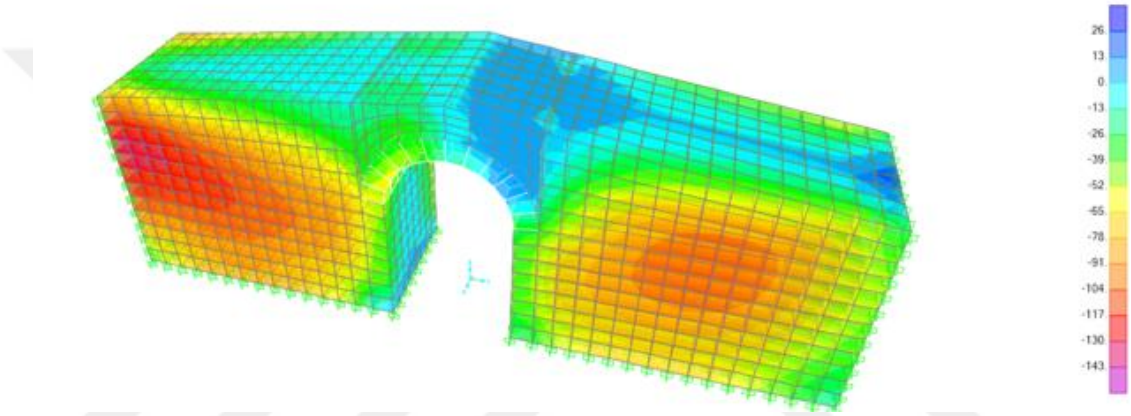
Şekil 5.45 1992 Erzincan depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



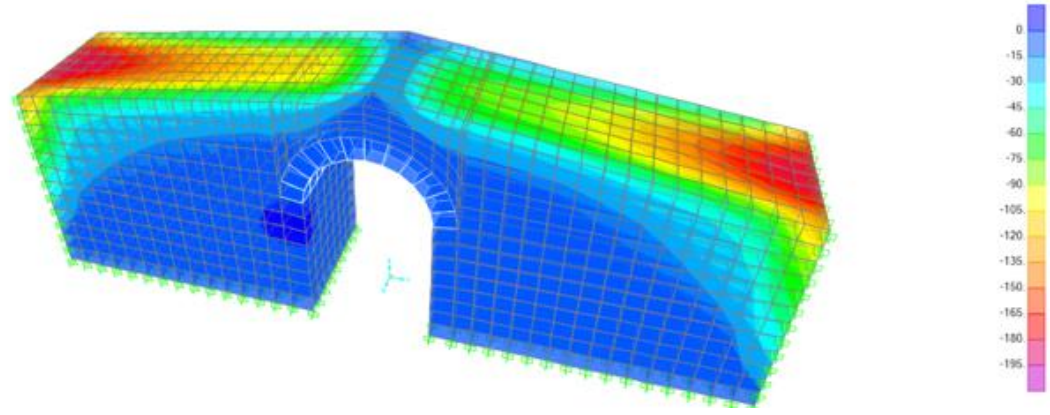
Şekil 5.46 1992 Erzincan depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.47 1992 Erzincan depremi için τ_{xy} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



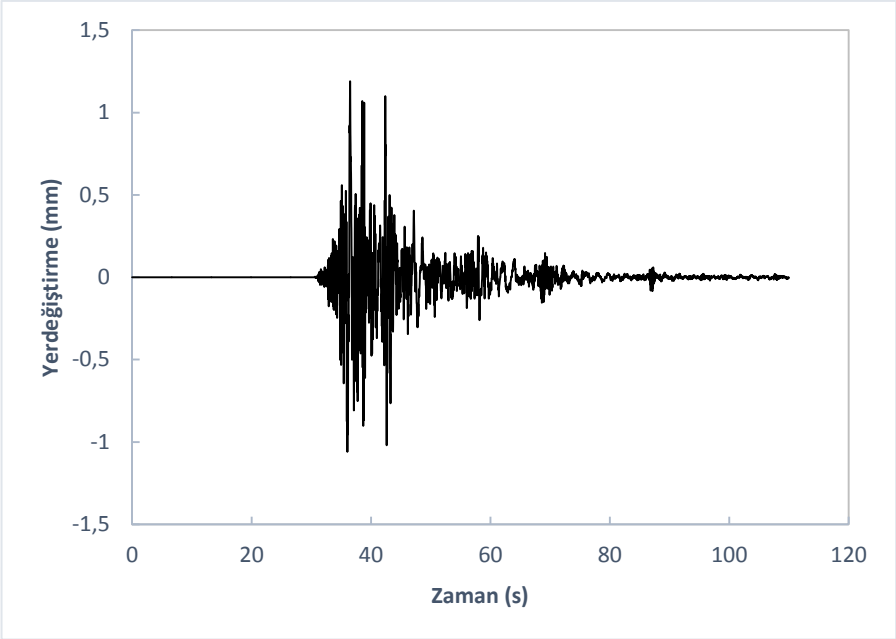
Şekil 5.48 1992 Erzincan depremi için τ_{xz} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.49 1992 Erzincan depremi için τ_{yz} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

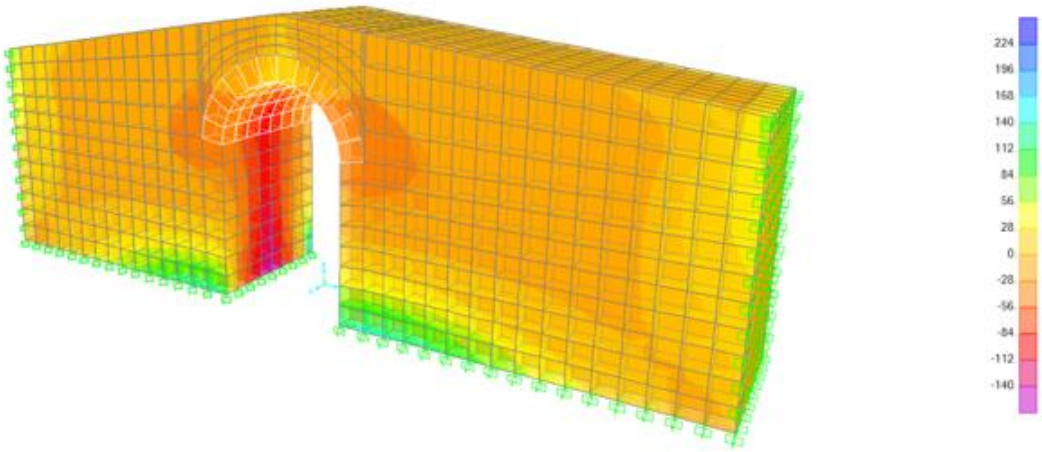
5.3.2.2 2020 Elazığ depremine göre dinamik analiz sonuçları

2020 Elazığ depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde tarihi yığma köprünün 1025 nolu düğüm noktası için nehir akış doğrultusunda (y ekseni) elde edilen yerdeğiştirme grafiği Şekil 5.50'de sunulmuştur. Y eksenindeki mutlak maksimum yerdeğiştirme değeri 1.19 mm olarak elde edilmiştir.

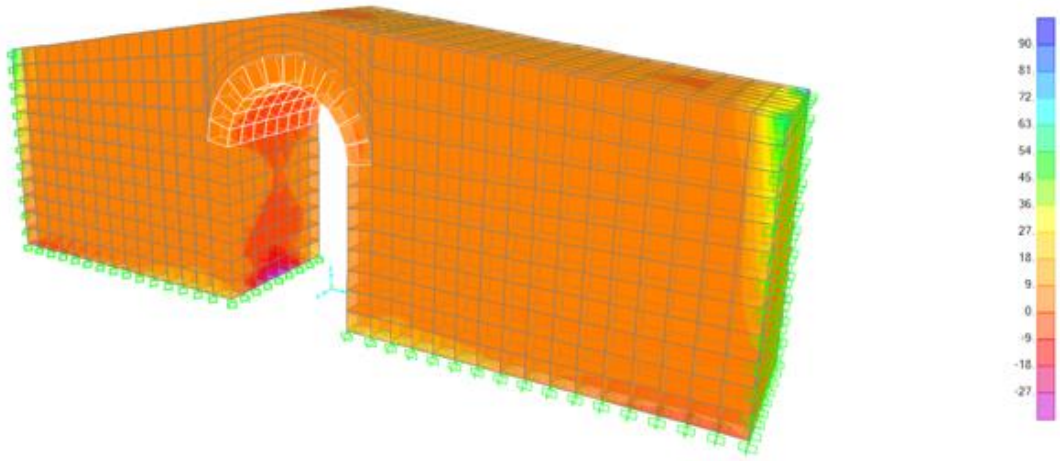


Şekil 5.50 2020 Elazığ depremi 1025 nolu düğüm noktasının y eksenindeki yer değiştirme grafiği

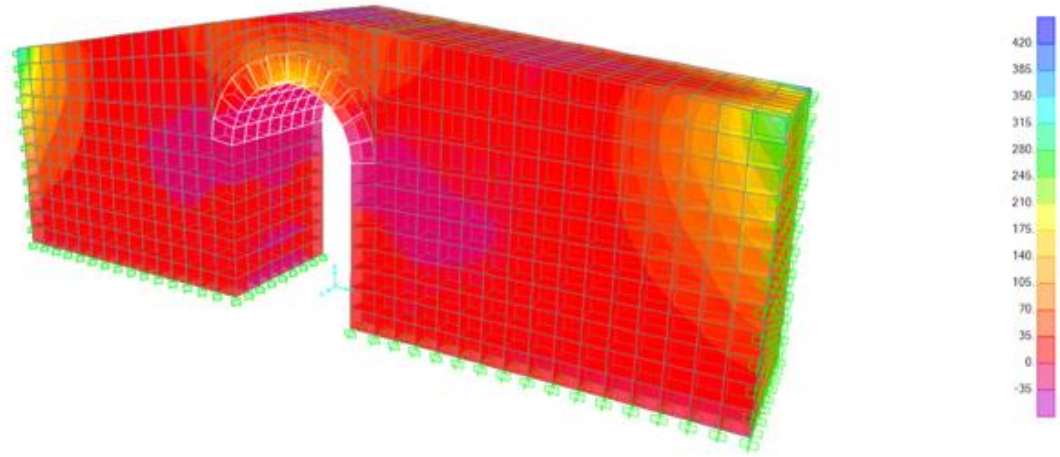
2020 Elazığ depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda envelope max. için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.51; 5.52; 5.53; 5.54; 5.55; 5.56'da sunulmuştur. Analizler neticesinde elde edilen maksimum çekme gerilmesi 449.576 kPa, maksimum kayma gerilmesi 121.575 kPa olarak hesaplanmıştır.



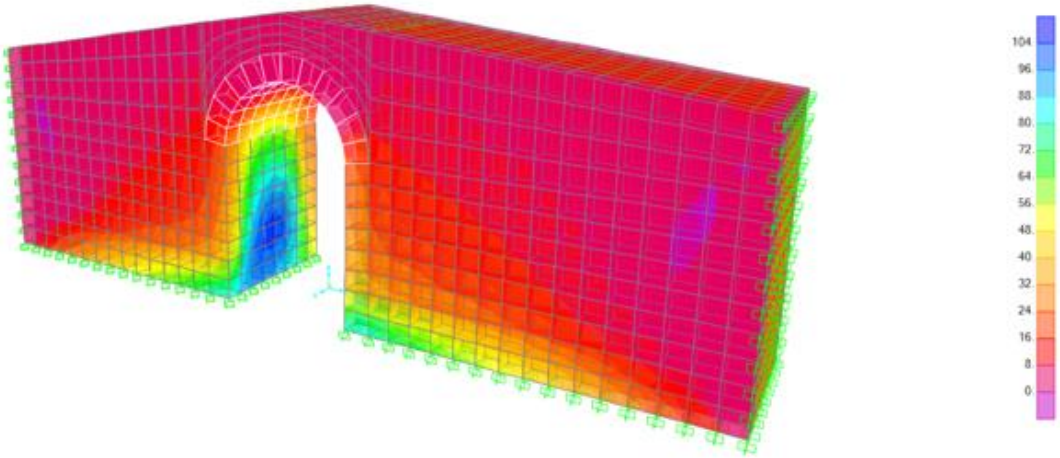
Şekil 5.51 2020 Elazığ depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



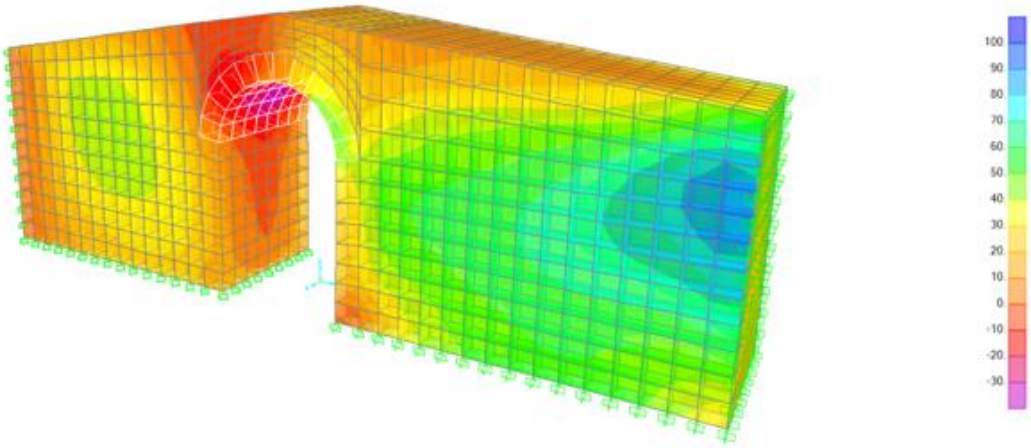
Şekil 5.52 2020 Elazığ depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



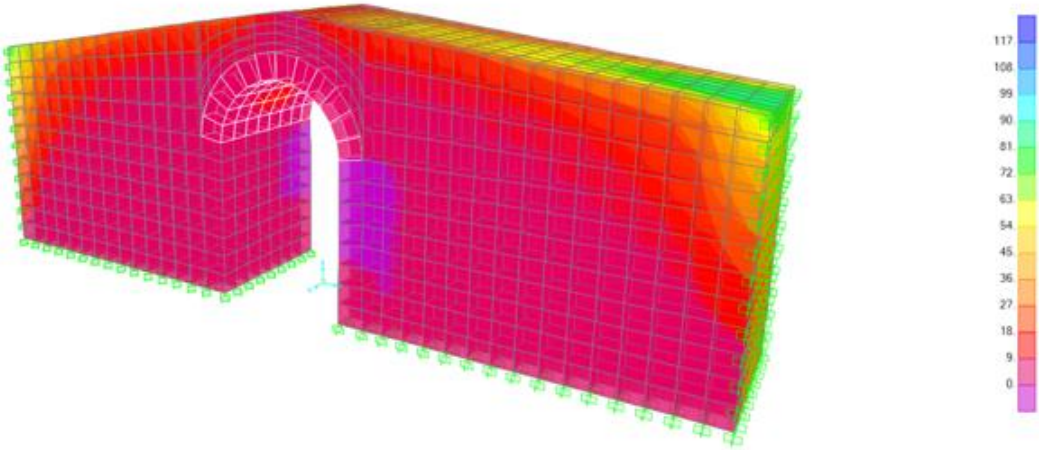
Şekil 5.53 2020 Elazığ depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



Şekil 5.54 2020 Elazığ depremi için τ_{xy} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

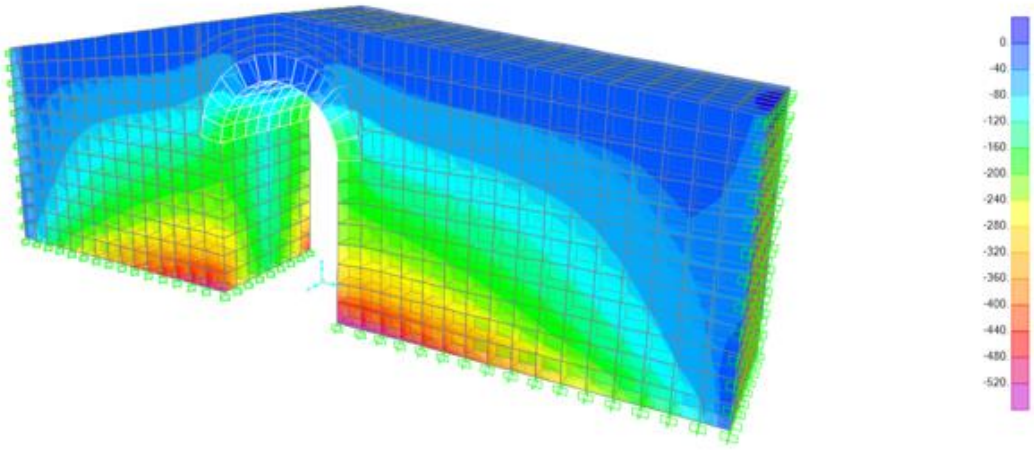


Şekil 5.55 2020 Elazığ depremi için τ_{xz} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

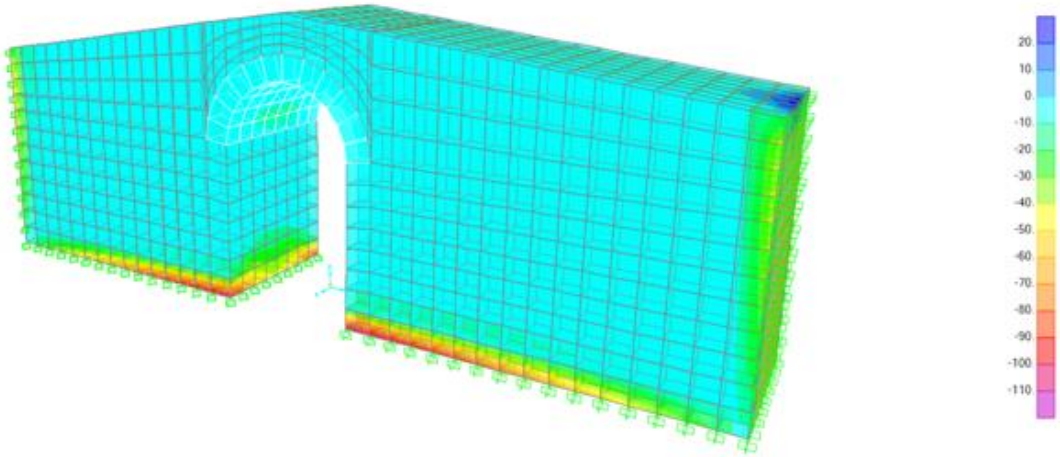


Şekil 5.56 2020 Elazığ depremi için τ_{yz} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

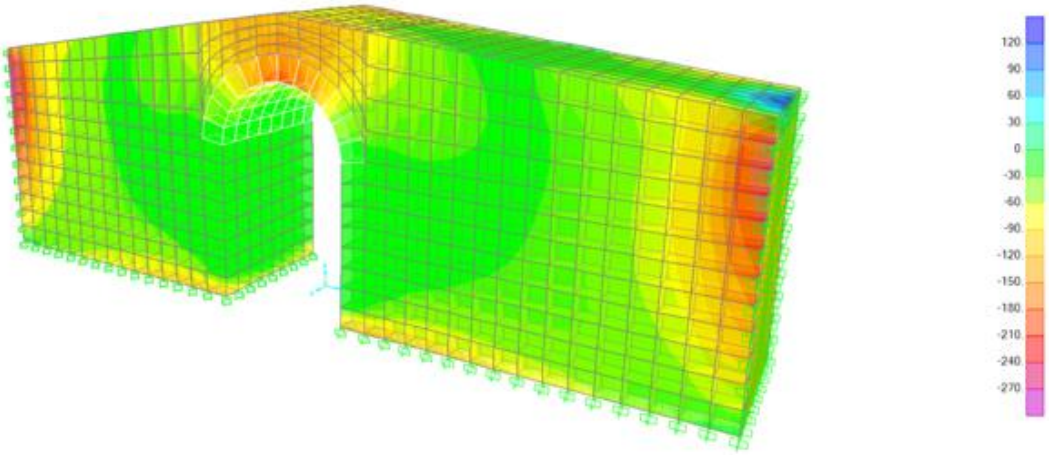
2020 Elazığ depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda envelope min. için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.57; 5.58; 5.59; 5.60; 5.61; 5.62'de sunulmuştur. Analizler neticesinde elde edilen maksimum basınç gerilmesi 556.781 kPa, maksimum kayma gerilmesi 119.528 kPa olarak hesaplanmıştır.



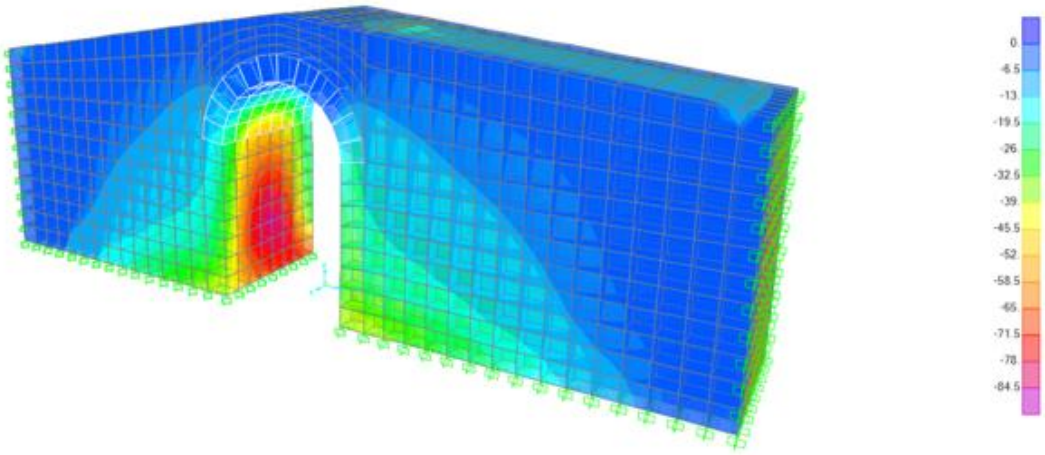
Şekil 5.57 2020 Elazığ depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



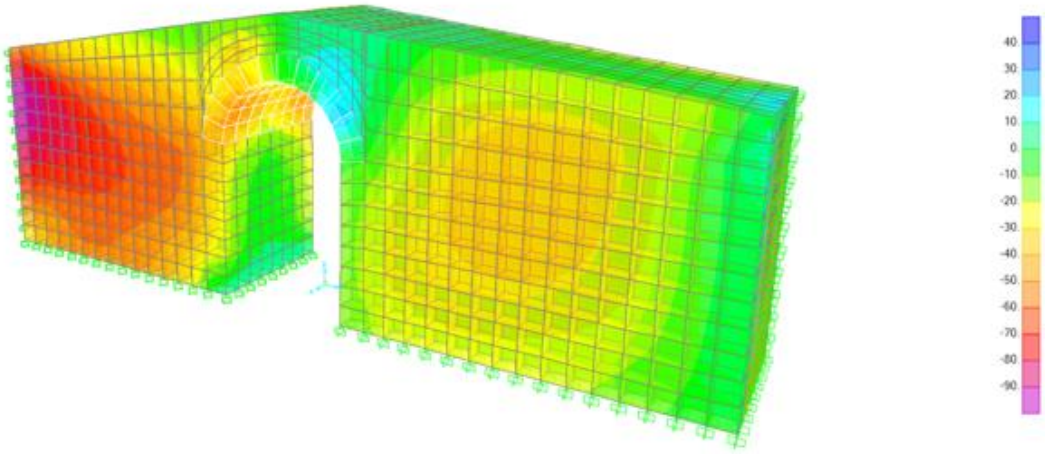
Şekil 5.58 2020 Elazığ depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



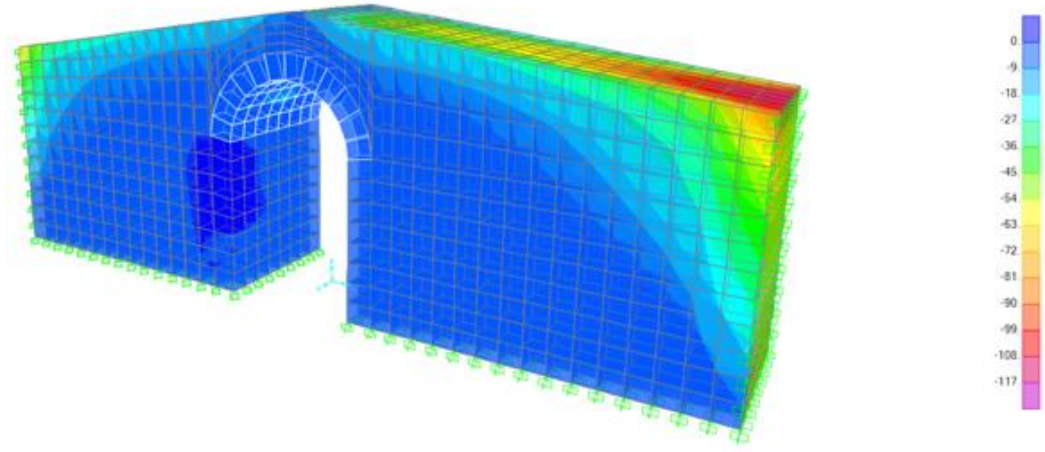
Şekil 5.59 2020 Elazığ depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.60 2020 Elazığ depremi için τ_{xy} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.61 2020 Elazığ depremi için τ_{xz} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.62 2020 Elazığ depremi için τ_{yz} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

5.3.3 Sultan Hamit III Köprüsü'nün dinamik analizi

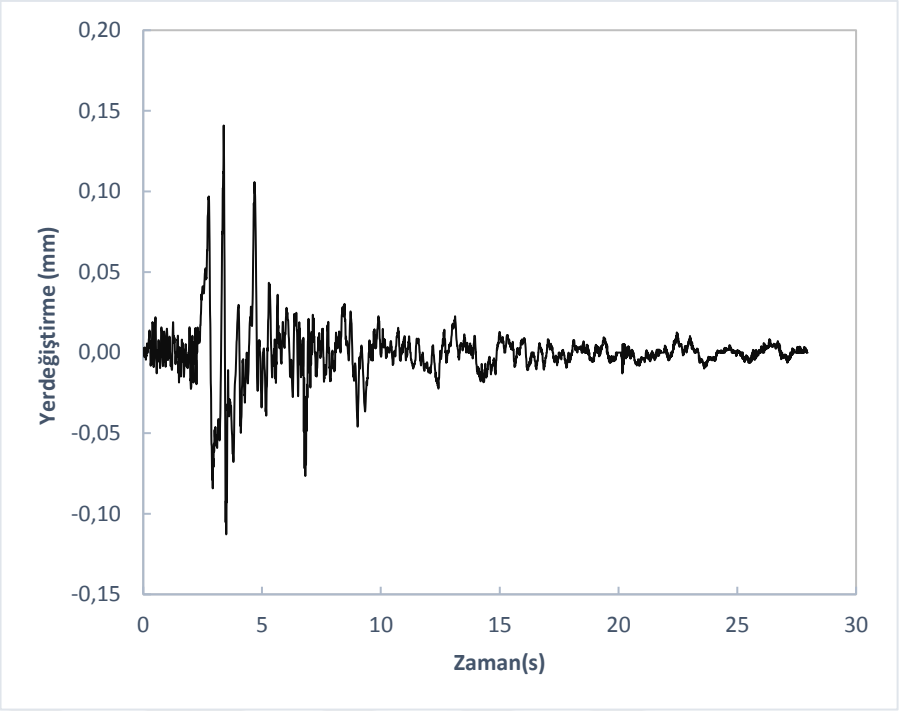
Sultan Hamit III Köprüsü SAP2000 ortamında kendi ağırlığı altında zaman tanım alanında 1992 Erzincan ve 2020 Elazığ depremi ivme kayıtları kullanılarak dinamik analizleri yapılmıştır. Analizler neticesinde zamana bağlı gerilmelerin en büyüğü olan envelop max, envelop min. dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda köprüde meydana gelen gerilme diyagramları ve yer değiştirmeler incelenmiştir. Yapılan dinamik analizler Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.7 Sultan Hamit III Köprüsü dinamik analizi

Köprü	Gerilme(kPa)	1992 Erzincan				2020 Elazığ			
		Envelope Max.		Envelope Min.		Envelope Max.		Envelope Min.	
		Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Sultan Hamit III	σ_{yy}	28.182	24.467	17.218	43.869	23.231	24.495	17.258	37.253
	σ_{zz}	143.439	60.717	74.675	88.532	113.804	60.989	74.906	74.882
	σ_{xx}	28.58	100.519	11.366	215.746	21.671	101.481	11.402	177.366
	τ_{yz}	35.935	2.948	2.837	38.071	21.979	3.356	3.158	23.359
	τ_{yx}	43.508	2.759	2.587	36.555	30.046	3.04	3.184	24.423
	τ_{zx}	42.091	33.968	34.442	41.256	38.768	34.245	34.715	38.016

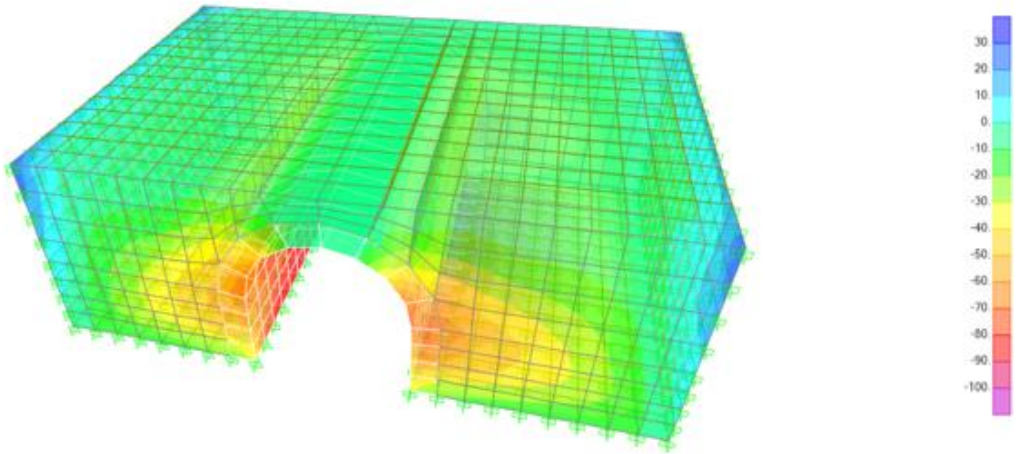
5.3.3.1 1992 Erzincan depremine göre dinamik analiz sonuçları

2020 Erzincan depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde tarihi yığma köprünün 3258 nolu düğüm noktası için nehir akış doğrultusunda (y ekseni) elde edilen yerdeğiştirme grafiği Şekil 5.63'de sunulmuştur. Y eksenindeki mutlak maksimum yerdeğiştirme değeri 0.1409 mm olarak elde edilmiştir.

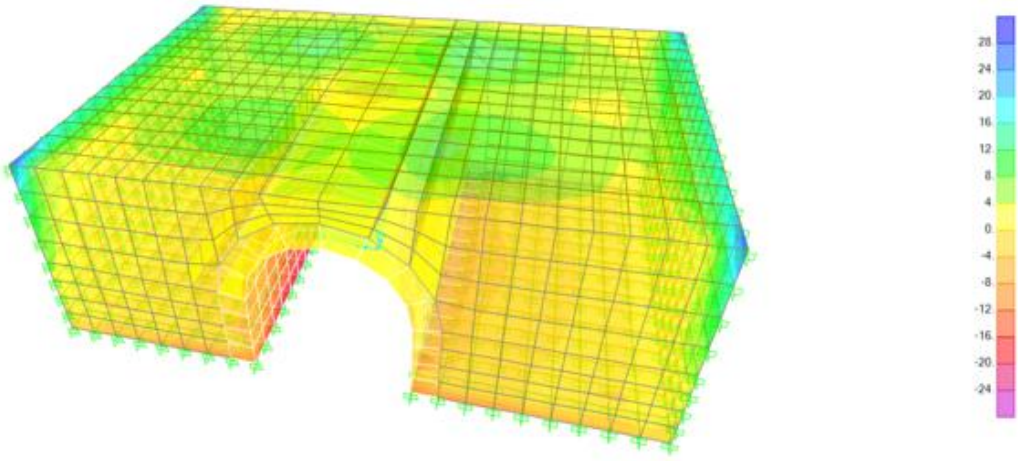


Şekil 5.63 1992 Erzincan depremi 3258 nolu düğüm noktasının y eksenindeki yer değiştirme grafiği

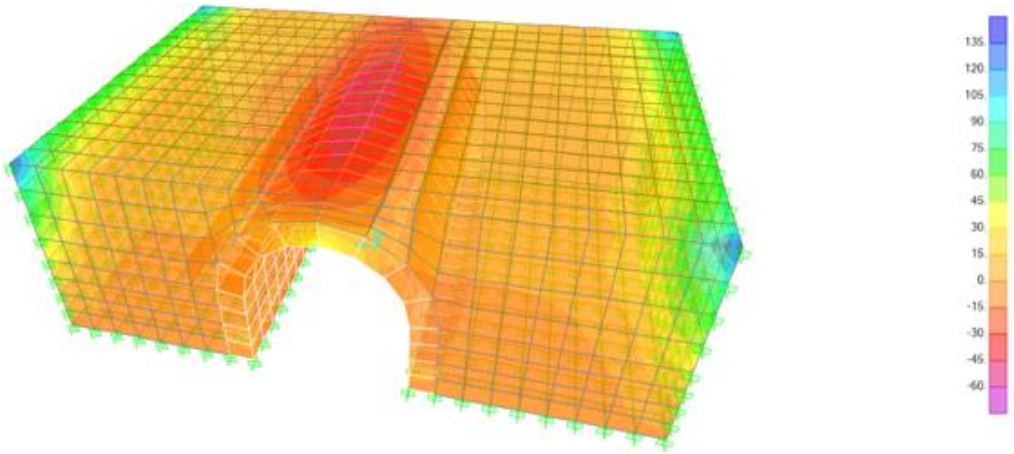
1992 Erzincan depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda envelope max. için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.64; 5.65; 5.66; 5.67; 5.68; 5.69'da sunulmuştur. Analizler neticesinde elde edilen maksimum çekme gerilmesi 143.439 kPa, maksimum kayma gerilmesi 43.508 kPa olarak hesaplanmıştır.



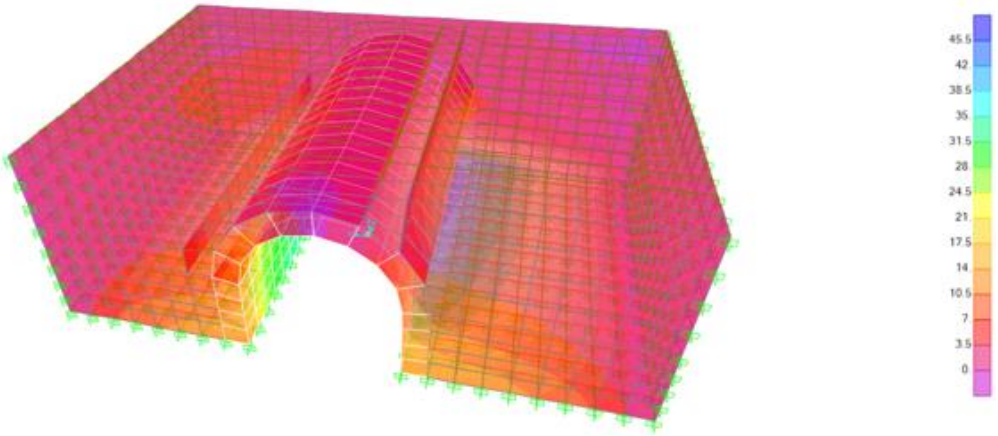
Şekil 5.64 1992 Erzincan depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



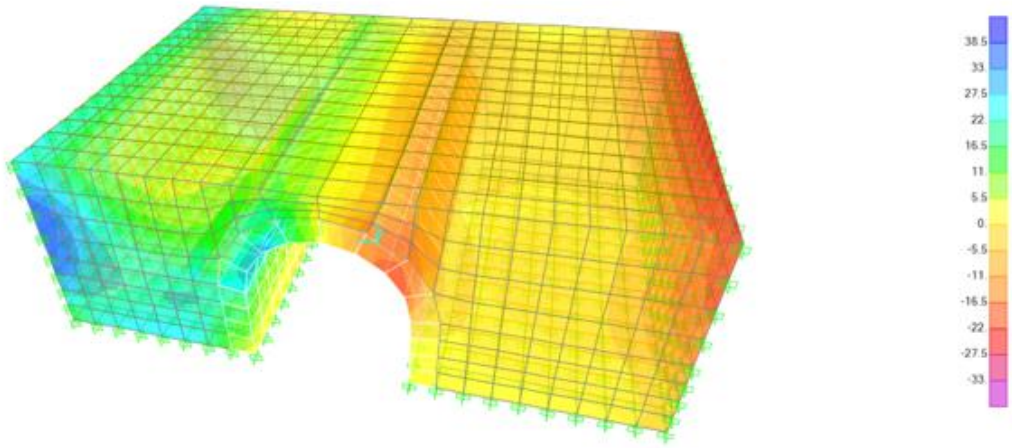
Şekil 5.65 1992 Erzincan depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



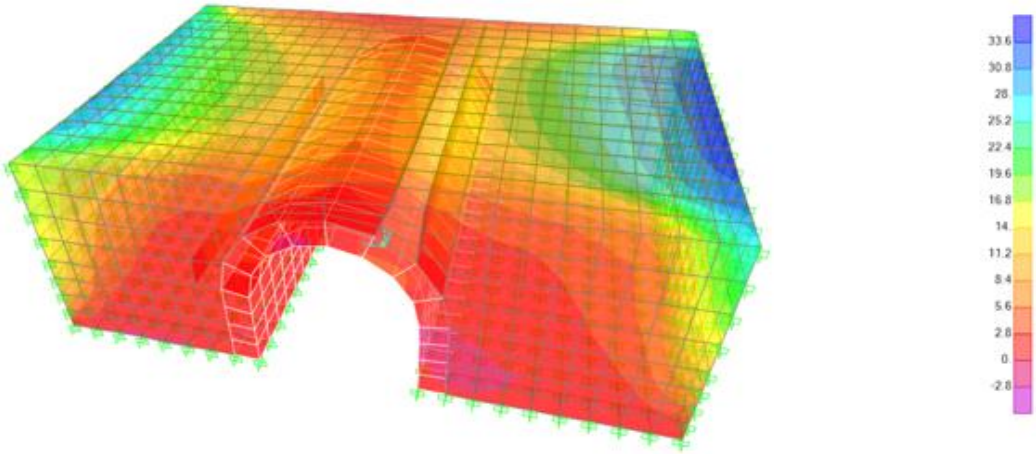
Şekil 5.66 1992 Erzincan depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



Şekil 5.67 1992 Erzincan depremi için τ_{xy} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

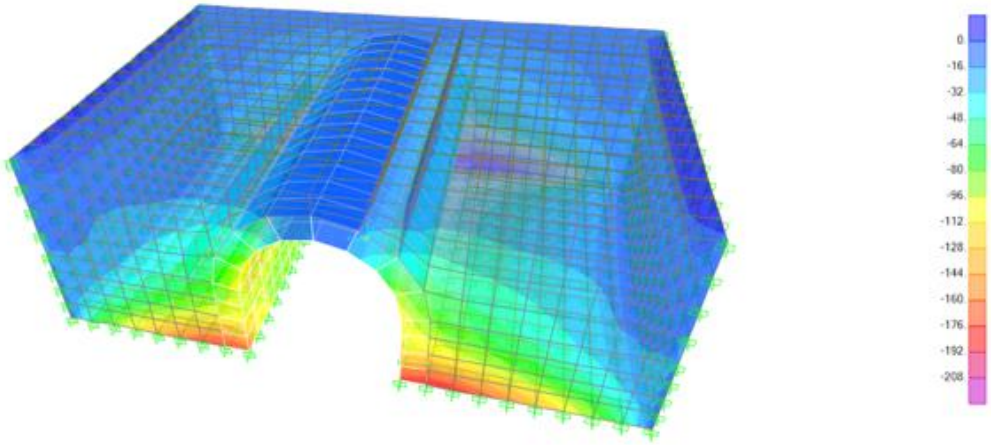


Şekil 5.68 1992 Erzincan depremi için τ_{xz} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

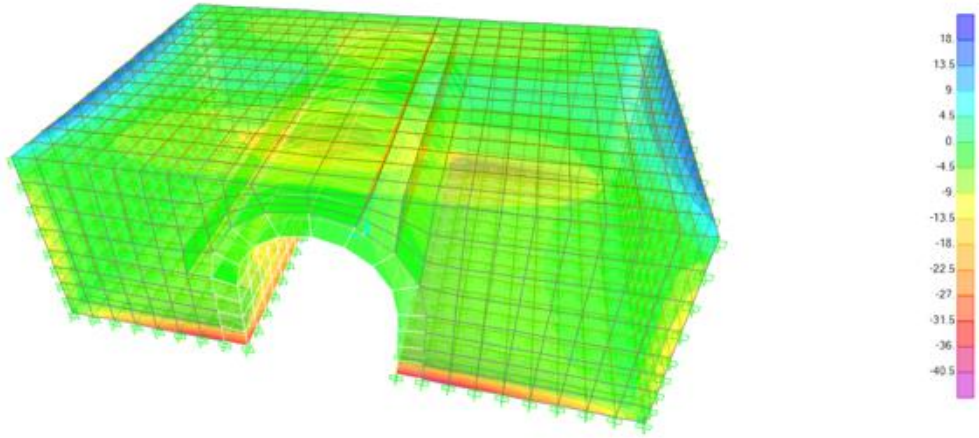


Şekil 5.69 1992 Erzincan depremi için τ_{yz} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

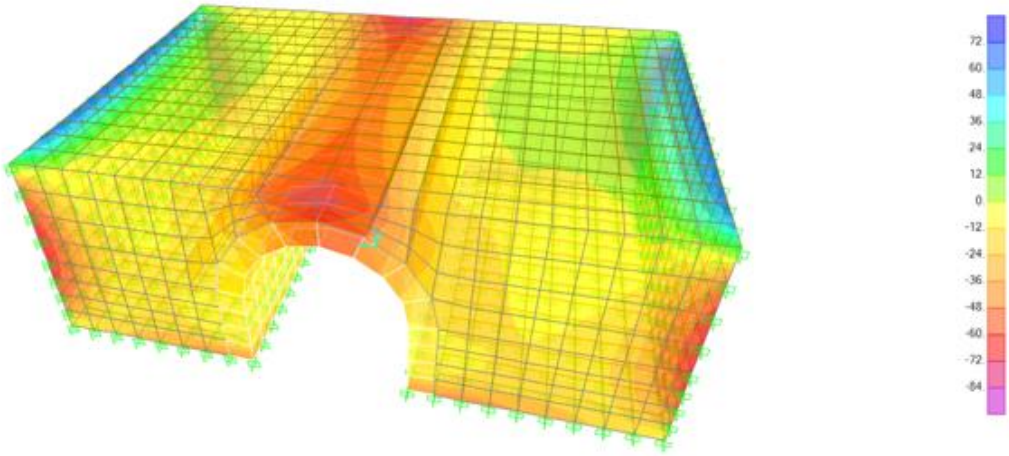
1992 Erzincan depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda envelope min. için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.70; 5.71; 5.72; 5.73; 5.74; 5.75'te sunulmuştur. Analizler neticesinde elde edilen maksimum basınç gerilmesi 215.746 kPa, maksimum kayma gerilmesi 41.256 kPa olarak hesaplanmıştır.



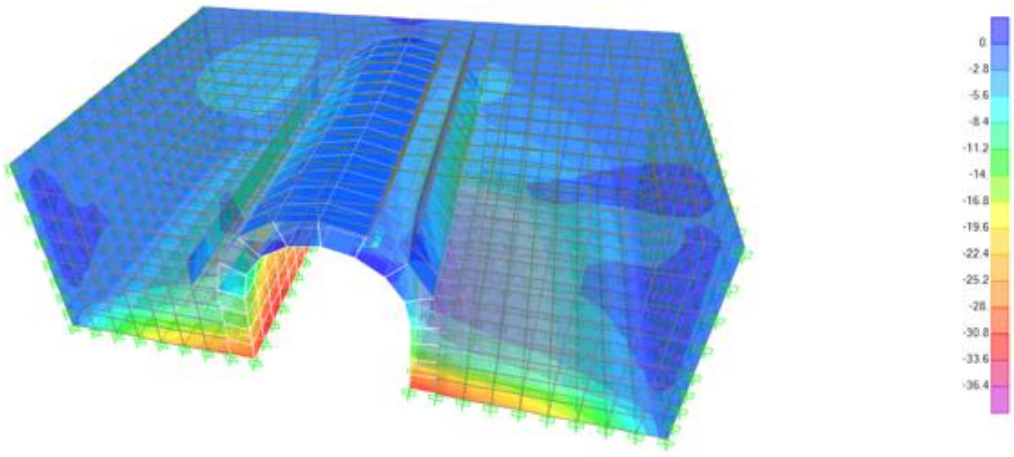
Şekil 5.70 1992 Erzincan depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



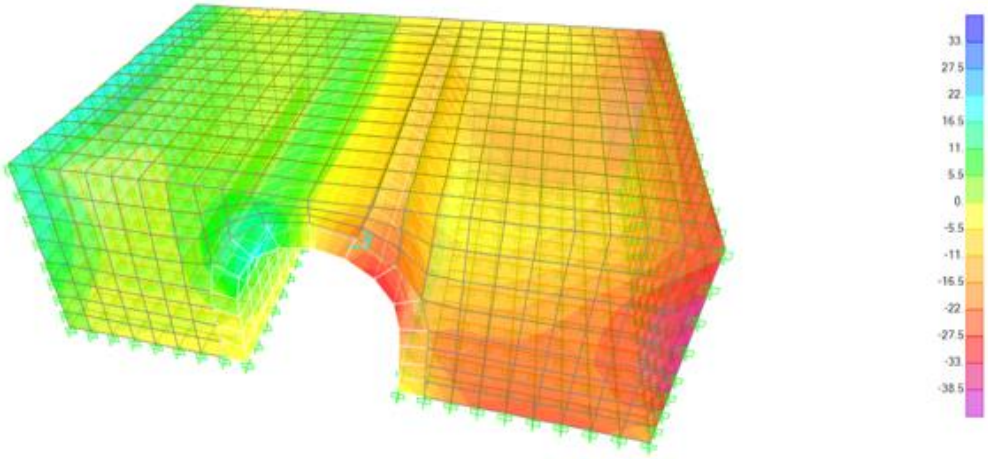
Şekil 5.71 1992 Erzincan depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



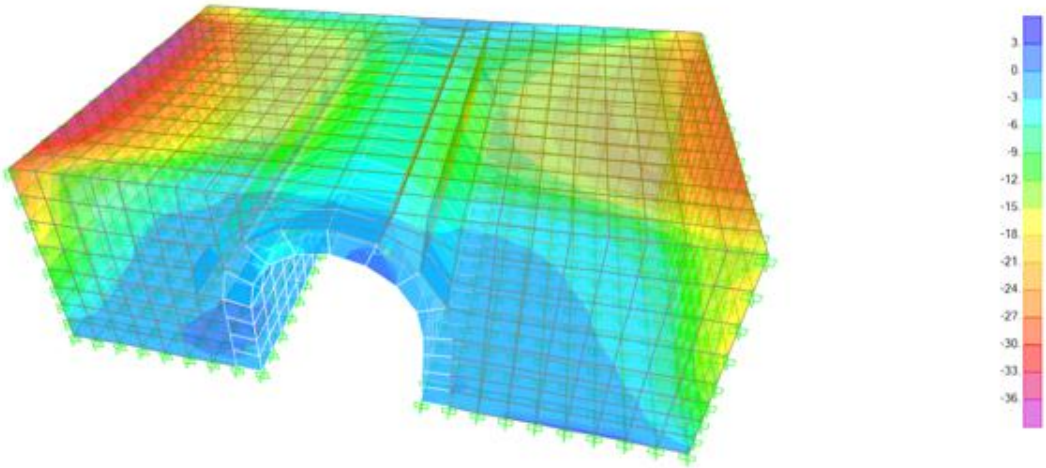
Şekil 5.72 1992 Erzincan depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.73 1992 Erzincan depremi için τ_{xy} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



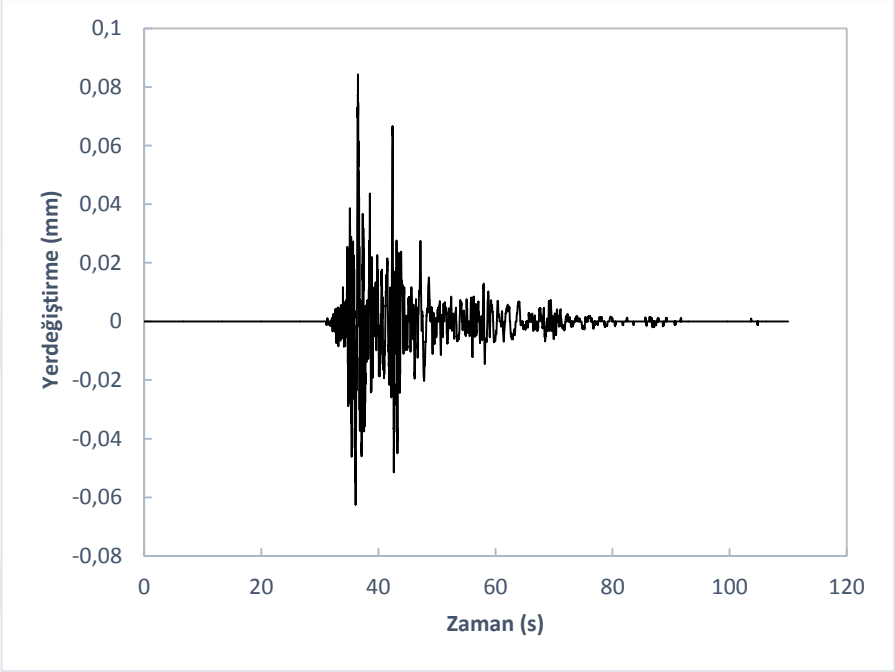
Şekil 5.74 1992 Erzincan depremi için τ_{xz} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.75 1992 Erzincan depremi için τ_{yz} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

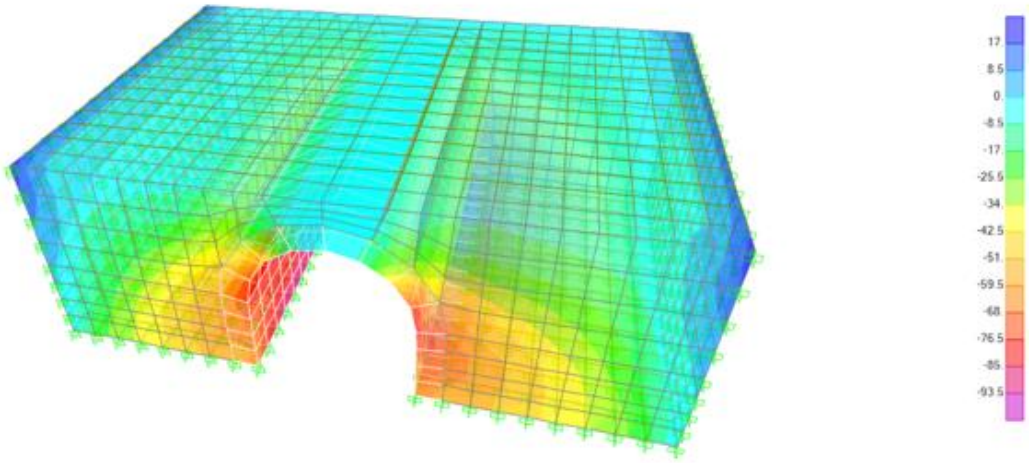
5.3.3.2 2020 Elazığ depremine göre dinamik analiz sonuçları

2020 Elazığ depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde tarihi yığma köprünün 3258 nolu düğüm noktası için nehir akış doğrultusunda (y ekseni) elde edilen yerdeğiştirme grafiği Şekil 5.76'da sunulmuştur. Y eksenindeki mutlak maksimum yerdeğiştirme değeri 0.08438 mm olarak elde edilmiştir.

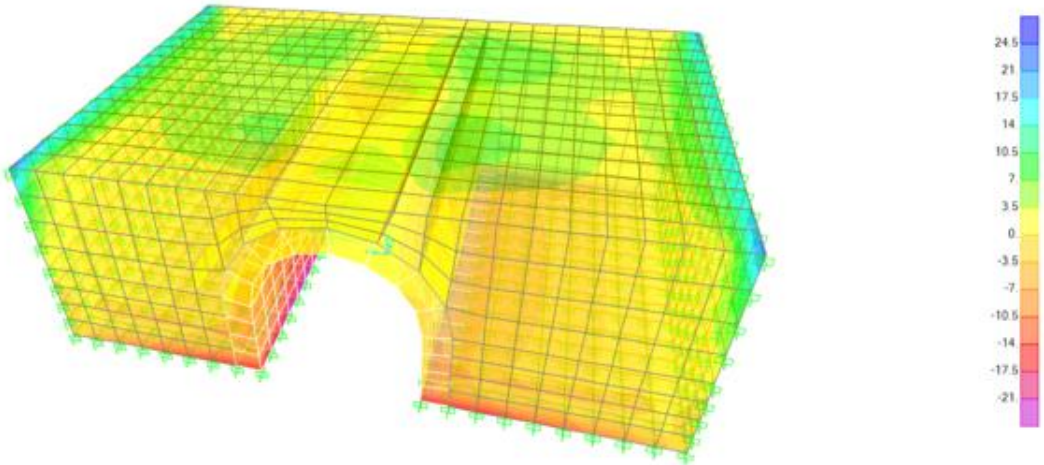


Şekil 5.76 2020 Elazığ depremi 3258 nolu düğüm noktasının y eksenindeki yer değiştirme grafiği

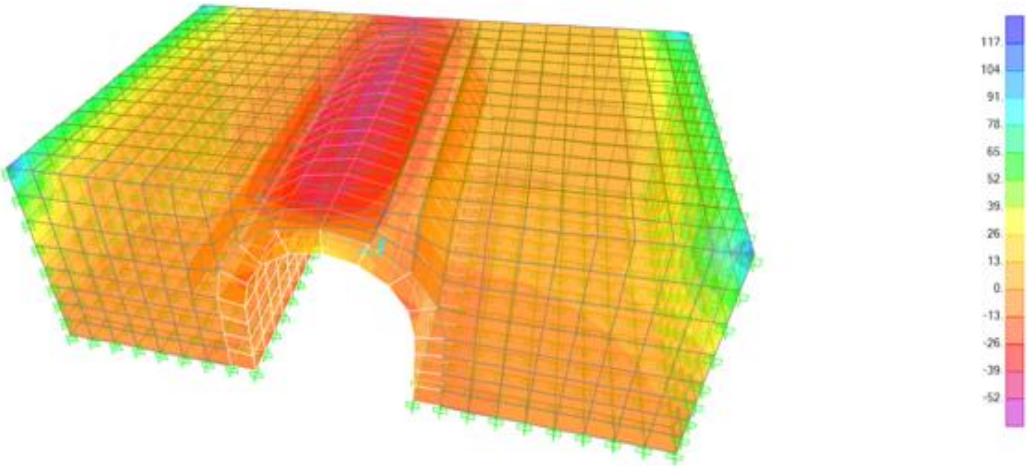
2020 Elazığ depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda envelope max. için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.77; 5.78; 5.79; 5.80; 5.81; 5.82'de sunulmuştur. Analizler neticesinde elde edilen maksimum çekme gerilmesi 113.804 kPa, maksimum kayma gerilmesi 38.768 kPa olarak hesaplanmıştır.



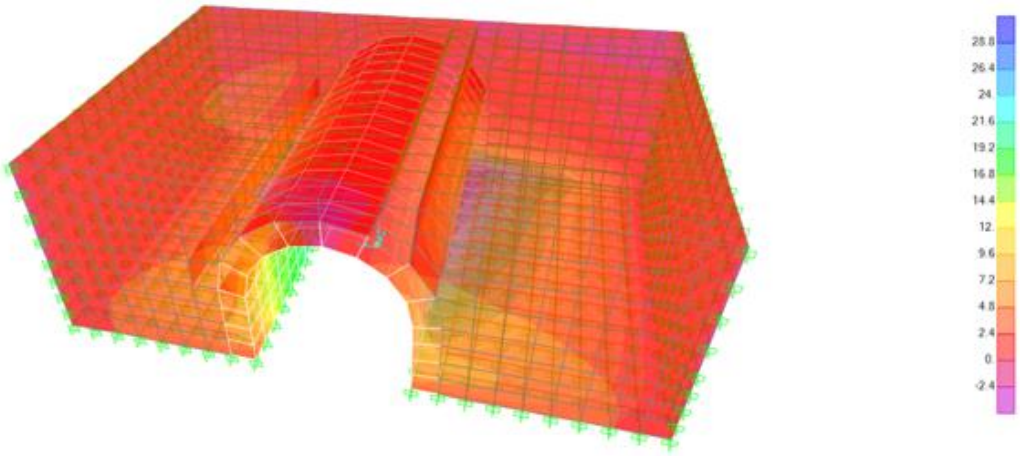
Şekil 5.77 2020 Elazığ depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



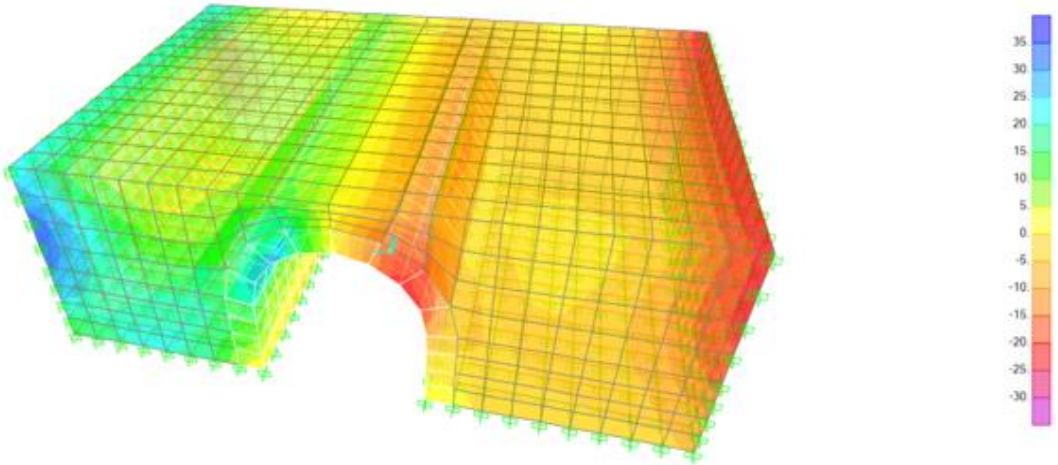
Şekil 5.78 2020 Elazığ depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



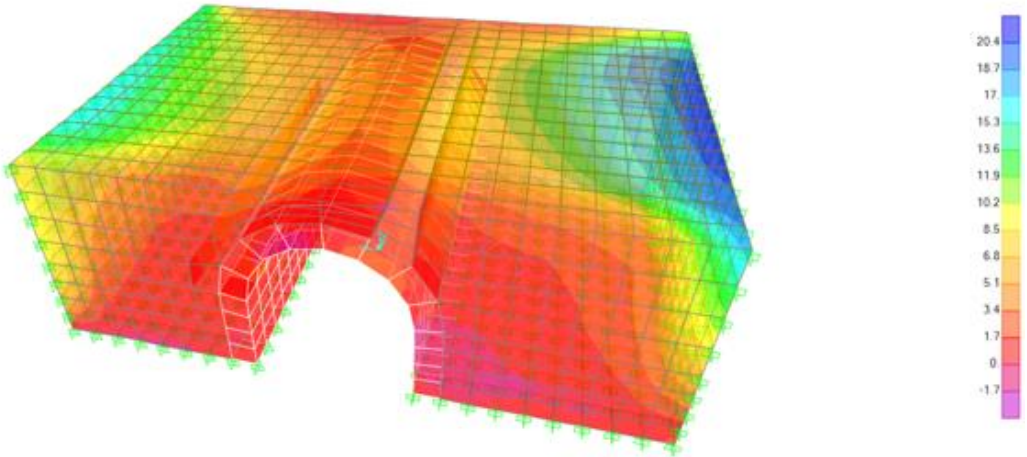
Şekil 5.79 2020 Elazığ depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



Şekil 5.80 2020 Elazığ depremi için τ_{xy} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

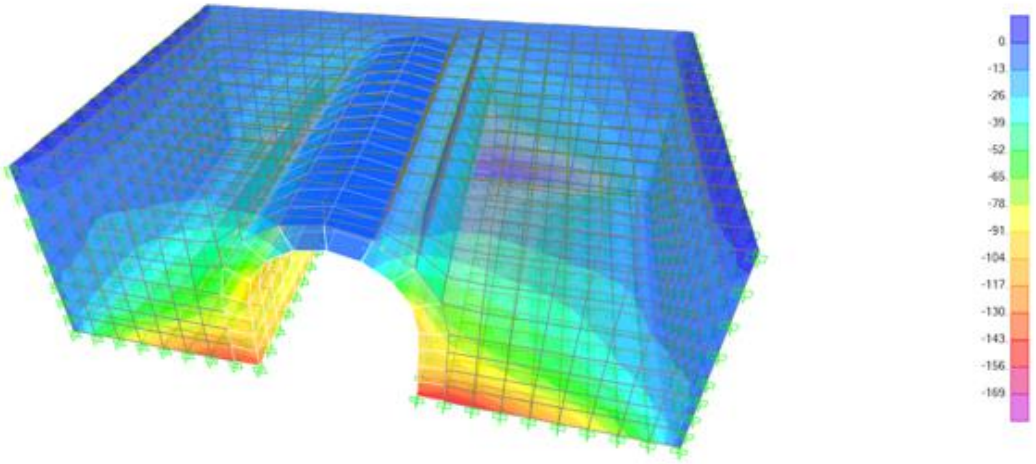


Şekil 5.81 2020 Elazığ depremi için τ_{xz} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

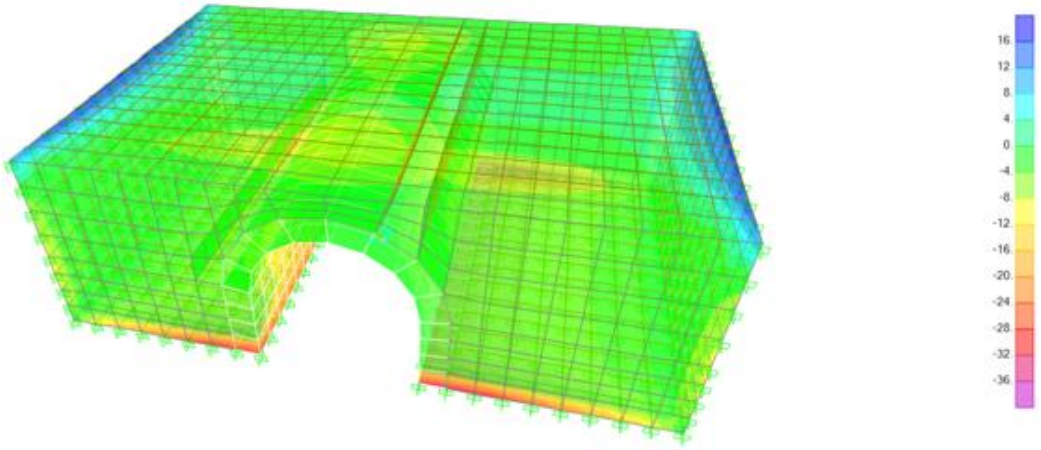


Şekil 5.82 2020 Elazığ depremi için τ_{yz} kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

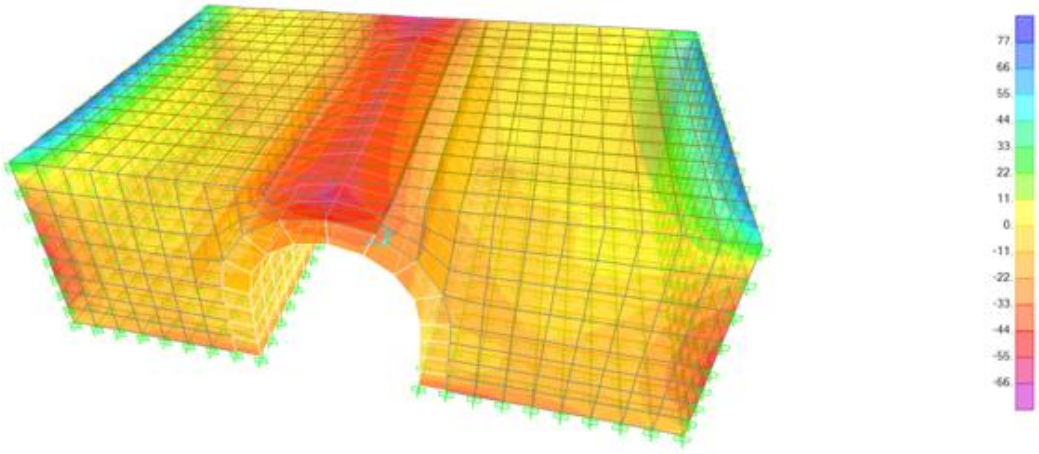
2020 Elazığ depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda envelope min. için elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.83; 5.84; 5.85; 5.86; 5.87; 5.88'de sunulmuştur. Analizler neticesinde elde edilen maksimum basınç gerilmesi 177.366 kPa, maksimum kayma gerilmesi 38.016 kPa olarak hesaplanmıştır.



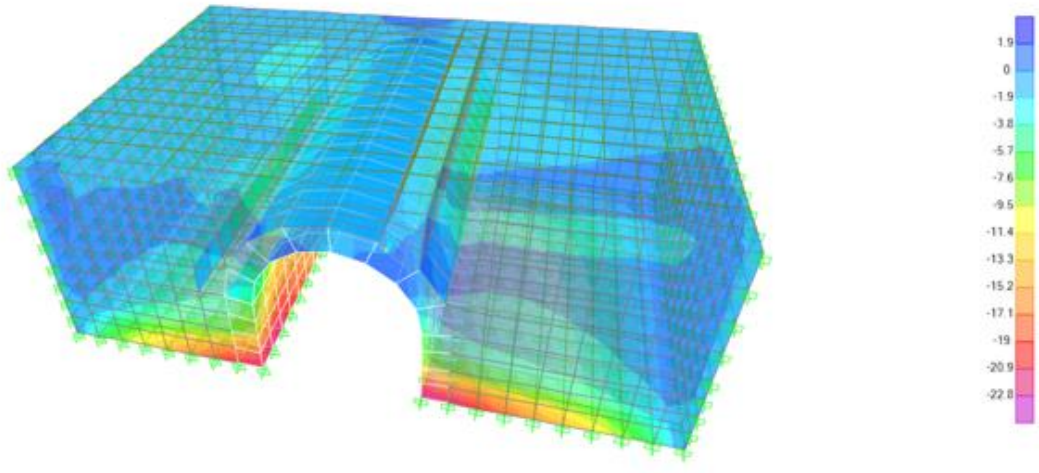
Şekil 5.83 2020 Elazığ depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



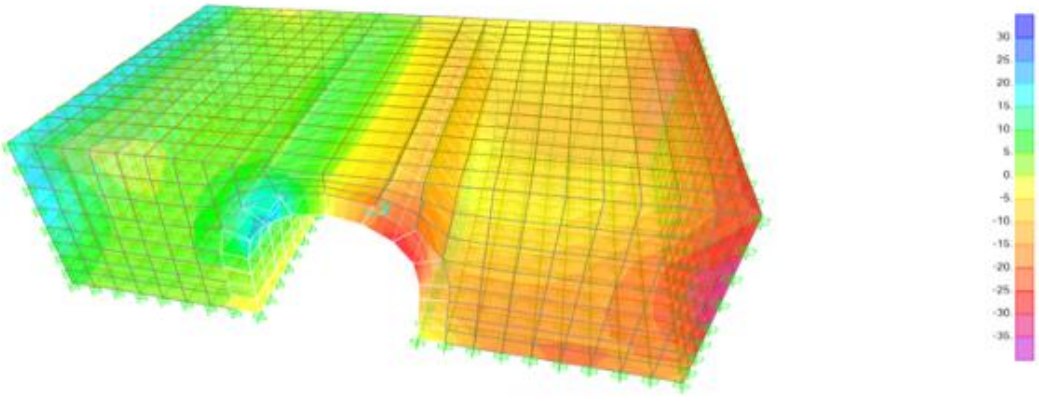
Şekil 5.84 2020 Elazığ depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



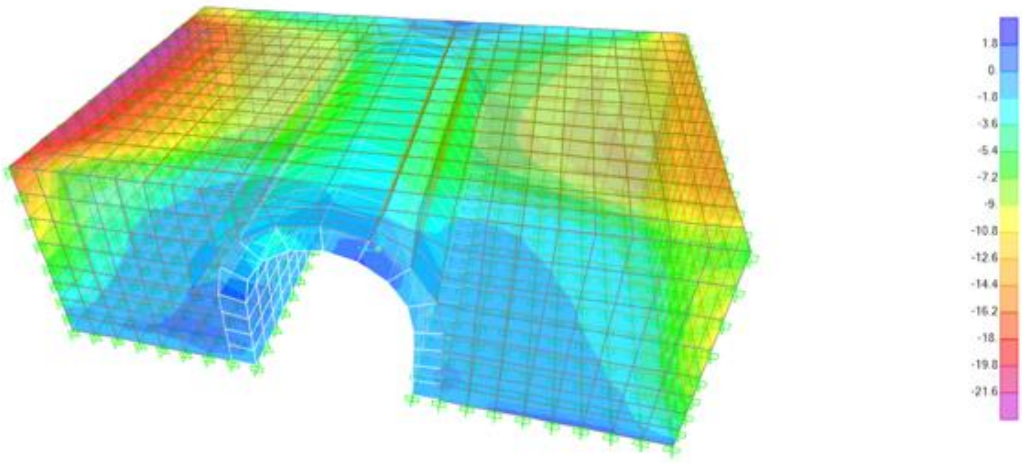
Şekil 5.85 2020 Elazığ depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.86 2020 Elazığ depremi için τ_{xy} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.87 2020 Elazığ depremi için τ_{xz} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 5.88 2020 Elazığ depremi için τ_{yz} kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında Erzurum ili sınırları içerisinde yer alan tarihi Sultan Hamit Köprüleri sayısal olarak farklı deprem ivme kayıtları altında değerlendirilmiştir. SAP2000 programında üç boyutlu olarak modellenen köprülerin kendi ağırlığı altında statik analizleri incelenmiş, doğal titreşim frekansları, periyot ve mod şekilleri ise modal analiz ile tespit edilmiştir. Köprülerdeki sönümün Rayleigh tipi bir sönüm olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca köprülerin dinamik analizleri, dinamik etki olarak 1992 Erzincan ve 2020 Elazığ depremleri ivme kayıtları kullanılarak elde edilmiştir. Analizlerde köprülerin kendi ağırlığı da dikkate alınmıştır. Analizler neticesinde;

- Tarihi Köprülerde meydana gelen yer değiştirme ve gerilme değerleri farklı deprem ivmeleri altında incelenmiştir.
- Statik analiz sonucunda köprülerin kendi ağırlığı altında elde edilen max. çekme ve basınç gerilmeleri incelendiğinde: Sultan Hamit I köprüsü için maksimum çekme gerilmesi köprü uç kısımlarında meydana geldiği ve değerinin 68.867 kPa olduğu, maksimum basınç gerilmesi ise ana taşıyıcı kemerin ayaklarında meydana geldiği ve değerinin 326.864 kPa olduğu hesaplanmıştır. Sultan Hamit II köprüsü için maksimum çekme gerilmesi köprü uç kısımlarında meydana geldiği ve değerinin 133.395 kPa olduğu, maksimum basınç gerilmesi ise ana taşıyıcı kemerin ayaklarında meydana geldiği ve değerinin 182.358 kPa olduğu hesaplanmıştır. Sultan Hamit III köprüsü için maksimum çekme gerilmesi köprü uç kısımlarında meydana geldiği ve değerinin 83.717 kPa olduğu, maksimum basınç gerilmesi ise ana taşıyıcı kemerin ayaklarında meydana geldiği ve değerinin 119.869 kPa olduğu gözlemlenmiştir.
- Köprülerin kendi ağırlığı ve deprem yükleri etkisi altında yapılan dinamik analizleri sonucunda belirtilen düğüm noktası için en yüksek yer değiştirmeler Sultan Hamit I, Sultan Hamit II ve Sultan Hamit III köprüleri için 1992 Erzincan depremi ivme kayıtlarında elde edilmiştir.
- Köprü kemer tabanlarında büyük basınç gerilmeleri meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- Dinamik analizler neticesinde köprü üzerinde oluşan gerilemeler Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü tarafından taş numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen verilere göre bulunmuş taş basınç dayanımından küçüktür.

- Analizler sonucu köprülerden elde edilen gerilme ve yerdeğiştirme değerleri köprülerin stabilitesini etkileyemecek ölçüdedir.

Bu ve benzeri çalışmalar yapılarak kültürel mirasımız olan tarihi yapıların gelecek nesillere güvenle aktarılabilmesi sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

Akın, K. (2020). *Tarihi Yığma Köprülerin Farklı Sönüm Oranları Altında Sismik Tepkisinin Değerlendirilmesi.* (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Alaboz, M. (2009). "Mimar Sinan Köprülerinin Güncel Durum Değerlendirmesi ve Kapuağası Köprüsü Restorasyon Projesi". (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Altınsapan, E. (2001). *Tek Kemer Gözlü Rize Köprüleri*. Anadolu Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Yayınları, Ankara.

Ankara Üniversitesi Teknokent Ankara Üniversitesi, Malzeme Araştırma ve Koruma Laboratuvarı (MAKLAB).

Aoki, A. vd., (2004). Theoretical and Experimental Dynamic Analysis of Rakanji Stone Arch Bridge, Oita, Japan. *7th International Conference on Motion and Vibration Control, August St. Louis, Proceedings, USA, 1-9Modal Analysis, International Earthquake Symposium,* (368-380). Yer: Kocaeli.

Aydın, T. ve Taylan, E. D. (2017). Darıderesi-II Göletinin Dinamik Davranışlarının ANSYS ile İncelenmesi. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 7(2): 10-17.

Bayraktar, A. vd., (2007). Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonal Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1,* Bildiriler Kitabı (429-440).Yer: Ankara.

Beconcini, M.L. vd., (2007). Dynamic Characterization of a Five Spans Historical Masonry Arch Bridge, *5th International Conference on Arch Bridges,* September , (399-407). Madeira, Portugal.

Birinci, F., (2010). *Taş Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Boynton, R.S. (1980). *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*, John Wiley & Sons, 592s, New York.

Böke, H. vd., (2004). Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvaların Özellikleri, *Yapı Dergisi*, 69, 90-95.

Calp, C. (2018). *Tarihi Minarelerin Dinamik Özellikleri Ve Deprem Performansları*, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Castellazzi, G. vd. (2012). Finite Element Modelling Tuned on Experimental Testing for the Structural Health Assessment of an Ancient Masonry Arch Bridge, *Mathematical Problems in Engineering*, doi:10.1155/2012/495019.

Ceylan, İ. (2013). *Karayolları 13. Bölge Sınırları İçinde Yer Alan Tarihi Köprülerin İncelenmesi.* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Chopra, A.K. and Goel, R.K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), 561 -582.

Çakır, F. ve Uysal, H. (2014). Experimental Modal Analysis of Brick Masonry Arches Strengthened Prepreg Composites, *Journal of Cultural Heritage*, doi:10.1016/j.culher.2014.06.003.

Çal, G. (2015). *Ortaköy Büyük Mecidiye Camii'nin Deprem Etkisi Altında Yapısal Davranışının Değerlendirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). T.C. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çalık, İ. vd. (2014). Structural Dynamic Identification of a Damaged and Restored Masonry Vault Using Ambient Vibrations, *Measurement*, 55, 462-472.

Çamlıbel, A. N. (2000). *Temellerin Takviyesi*, s. 180, Birsen Yayınevi.

Çoruhlu, B. (2017). *Doğu Karadeniz Bölgesindeki Tek Açıklıklı Kemer Köprüler İçin Doğal Frekans, Yer Değiştirme Ve Gerilme Formülleri*. (Yüksek Lisans Tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Çulpan, C. (2002). *Türk Taş Köprüleri; Ortaçağdan Osmanlı Devri Sonuna Kadar*, Türk Tarih Kurumu, Ankara.

Dabanlı, Ö. (2008). *Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Dabanlı, Ö. (2008). *Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ercan, E. ve Nuhoğlu, A. (2015). Üç Açıklıklı Tarihi Yığma Kemer Köprünün Yapısal Davranışının Belirlenmesi. *3.Köprüler Viyadükler Sempozyumu*, İnşaat Mühendisleri Odası, Bursa Şubesi.

Erkul, B. (2018). *Tarihi Yığma Yapıların Performans Analizi: Geleneksel Bayburt Evi Örneği.* (Yüksek Lisans Tezi). Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bayburt.

Ersoy, H.Y. (2001). "*Kompozit malzeme",* Literatür Yayınları.

Fanning, P.J., and Boothby, T.E., (2001). Three-Dimensional Modeling and Full-scale Testing of Stone Arch Bridges, *Computers and Structures*, 79(29), 2645–2662.

Galasco, A. vd., (2004). Non-linear seismic analysis of masonry structures. *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver,* (843), Canada.

Germen, M. vd., (2000). Türkiye'nin Köprüleri, *Koç Allianz Hayat Sigorta*, İstanbul.

Gönül, A. ve Sakcalı, G.B. (2019). Tarihi Irgandı Köprüsünün Deprem Performansı. *5. Deprem Mühendisliği Ve Sismoloji Uluslararası Konferansı*, Ankara.

Gupta, B. (1998). *Enhanced pushover procedure and inelastic demand estimation for performance-based seismic evaluation of buildings.* (Ph.D). Dissertation, Florida, University of Central Florida, Orlando.

Güllü H. (2017). Tarihi Yığma Yapılı Cendere Köprüsünün Deprem Etkisinin İncelenmesi, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 245-259.

Güner, Y. (2018). *Mevcut Tarihi Yığma Yapıların Performans Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 130.

Hocking, R.R. (1976). "The analysis and selection of variables in linear regression", Biometrics.

Hökelekli, E. ve Yılmaz B. (2019). Effect of Cohesive Contact of Backfill with Arch and Spandrel Walls of a Historical Masonry Arch Bridge on Seismic Response, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(3), pp. 926–937,

Hughes, T.G. ve Blackler, M.J. (1997). A Review of the UK Masonry Arch Assessment Methods, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 122(3), 305-15.

Işıkoğlu, O. M. (2013). *Erzurum İli Sultan Hamit I Köprüsü Yapısal Analiz Ve Değerlendirme Raporu*, Ankara.

İlter, F. (1978). *Osmanlılara Kadar Anadolu Türk Köprüleri*. Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara.

İlter, F., (1978). *Osmanlılara Kadar Anadolu Türk Köprüleri*, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara.

İzgi, R. (2020). *Tarihi Yapıların Yapısal Analizi: Diyarbakır Surları Örneği* (Yüksek Lisans Tezi). Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Kahraman, S. vd., (2012). "Predicting the compressive and tensile strength of rochs from indentation hardness", *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(5): 331-339.

Karaton, M. vd.,(2009). Malabadi Köprüsünün Lineer Olmayan Sismik Analizi. *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-2*, Diyarbakır.

Karaton, M. vd., (2017). "Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry bridge under different earthquake levels", *Engineering Failure Analysis*, 79: 408-421.

Kaya, Ç. (2010). *Yığma Duvarların Elastik-Plastik Hesabı*, (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kesim, B. (2005). *Statik İtme Analizi Yöntemiyle Mevcut Bir Betonarme Yapının İncelenmesi.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Khan, M.A. (2010). *Bridge and Highway Structure Rehabilitation and Repair*, Mc Graw Hill Press, Newyork.

Korkmaz K.A. vd., (2013). Taş Kemer Köprülerin Deprem Davranışlarının Değerlendirilmesi Timisvat Köprüsü Örneği, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi,* 2(1), 66-75.

Korkmaz, K.A. vd., (2013). Taş Kemer Köprülerin Deprem Davranışlarının Değerlendirilmesi: *Timisvat Köprüsü Örneği, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(1), 66-75.

Lindley, D.V. (1987). "Regression and correlation analysis", *New Palgrave: A Dictionary of Economics*, 4:120-23.

Livingstone, R.A. (1993). Materials analysis of the masonry of the Hagia Sophia Basilica, İstanbul. *Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings*, 11, 15-31.

Lourenço, P.B. (1996). "*Computational Strategies for Masonry Structures*". (PhD) Thesis, Delft University of Technology, Delft, Holland.

Lourenço, P.B. (2000). *Structural behavıor of civil engineering structures: Highlight in historical and masonry structures.* Universidade do Minho, Portugal.

Mahrebel H.A. (2006). *Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Teknikleri.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Mcafee, P. (1998). *Stone Building.* (85-90). The O'Brien Press Ltd., Dublin, Ireland.

Moropoulou, A. vd. (2002). Advanced Byzantine Cement Based Composites Resisting Earthquake Stresses : The Crushed Brick-Lime Mortars of Justinians's Hagia Sophia, *Construction and Building Materials,* 16, 543-552.

Nabi, M. (2016). Duvarlar ve Duvar Malzemeleri. Erişim Tarihi: 01.12.2021.[https://docplayer.biz.tr/16605494-Duvarlar-veduvar-malzemeleri.html].

Onat, O. ve Sayın,E. (2015). Tarihi Tagar Köprüsünün Doğrusal Olmayan Sismik Analizi. *5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu,* (301-312). Yer: Erzurum.

Orhan, S.N., (2010). *Tek Açıklıklı Dairesel Kâgir Kemer Köprülerin Göçme Yüklerinin Limit Analiz Yöntemleri ile Hesaplanması*. (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Öncü, M.E. vd., (2019). "Tarihi Tuzluca köprüsünün yapısal durumunun değerlendirilmesi". *4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu*, Ankara, Türkiye.

Özdemir, H. (2018). *Tarihi Yapıların Bilgisayar Destekli Analizi: Patara Antik Kent Tiyatrosu Sahne Yapısı Örneği.* (Yüksek Lisans Tezi). Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, 106.

Özer, S. (2006). Geleneksel Yığma Yapılarda Srüktürel Elemanların Analizi. (Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Özkaya, G. vd., (2015). Kemerli Yığma Köprünün Sismik Davranışının Sonlu Eleman Yöntemiyle İncelenmesi*, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu* (43-57). Yer: Erzurum.

Özkaya, S. G. (2019). *Yığma Köprülerin Deprem Davranışlarının Doğrusal Olmayan Statik Yöntemlerle Tahmini*. (Doktora Tezi). Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Özmen, A. ve Sayın, E. (2020).Tarihi Yığma Bir Köprünün Deprem Davranışının Değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2): 956-965.

Özmen, A., (2019). *Yakın ve Uzak Fay Hareketlerine Maruz Tarihi Yığma Bir Köprünün Sismik Performansının Değerlendirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Pela, L. vd., (2013). "Comparison of seismic assessment procedures for masonry arch bridges," *Construction and Building Materials.* 38, 381-394.

Riva, P. vd., (1998). Seismic Analysis of the Asinelli Tower and Earthquakes in Bologna, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(7-8), 525–550.

Rouf, M.A. (1984). *"Fundamental properties of brickwork with particular emphasis to brickwork arches"*. (PhD Thesis). University of Liverpool, Liverpool, England.

Sakcalı, G.B. vd., (2020). "Göçme yükü etkisindeki köprü kemerlerinin yapısal davranışı", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 929-939.

Sayın, E. vd., (2011).Tarihi Uzunok Köprüsünün Yapı Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi.

T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü12.Bölge Müdürlüğü Erzurum İli Sultan Hamit I Köprüsü Teknik Rapor, 2013.

Tanrıverdi M. ve Gürel M.A. (2019). "Geçmişten Günümüze Kemer Köprüler", *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi,* 4(3): 156-167. Erişim linki: http://dergipark.gov.tr/humder/archive.

Tetik, T. (2015). *Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansı Ve Güçlendirme Teknikleri*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, İstanbul, 139.

Tunç, G. (1978). *Taş Köprülerimiz*. Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara.

Türkçü, Ç. (2000). *Yapım (Malzemeler-İlkeler-Çözümler-Yöntemler*), Birsen Yayınevi, İstanbul.

Türker,T. vd., (2015). Ölçekli Yığma taş kemer köprü modelinin dinamik davranışının deneysel ve analitik olarak incelenmesi. *5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi Ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu.* Yer: Erzurum.

Uray, A. (2018). *Tarihi Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizinin İznik Yeşil Camii Örneğinde İncelenmesi.* (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Ünay, A.,İ. (1997). *A Method for the Evaluation of the Ultimate Safety of Historical Masonry Structures* (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Ünay, A.İ. (2002). *Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı* (s. 172). ODTÜ Yayınları, Ankara.

Yazgan, İ. O. ve Ünay, A. İ. (2019). Bursa, Yenişehir Sinan Paşa Külliyesi İmaretinin Sayısal Modellenmesi Ve Yapısal Analizi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 1193-1203.

Yılmaz, P. (2006). *Tarihi yapıların modellenmesi ve deprem güvenliklerinin belirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Zampieri, P. vd., (2015). "Simplified seismic assessment of multi-span masonry arch bridges," *Bull Earthquake Engineering*. 13(9), 2629-2646.

Zhang, Y. (2015). "*Advanced nonlinear analysis of masonry arch bridges*", (PhD) Thesis, Imperial College London, London, England.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad	Öztürk, Çağrı Onur
Web sayfası (Research Gate, Academia, vs.)	

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Dicle Üniversitesi	2022
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lise	Bismil Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
2012/2013	ENKA	İnşaat Mühendisi
2014/2015	ZEMTEK	İnşaat Mühendisi
2015/2016	Aygün Alüminyum	İnşaat Mühendisi
2019/2020	Samsun Su Kanalizasyon İdaresi(SASKİ)	Kontrol Müh.
2020/halen devam	Karayolları Genel Müdürlüğü(KGM)	Kontrol Müh.

Yabancı Dil

İngilizce

Özel İlgiler

Türkiye Futbol Federasyonu Hakemi

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Çağrı Onur ÖZTÜRK		
Öğrenci No	17806010		
Ana Bilim Dalı	İnşaat Mühendisliği		
Program Türü	Proje ☐	Yüksek Lisans ☒	Doktora ☐
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Dr. Öğr. Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN		
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Doç. Dr. Erkut SAYIN		
Tez Başlığı	Tarihi Yığma Taş Köprülerin Dinamik Analizi ‘‘Erzurum Aşkale İlçesinde Sultan Hamit Köprüleri’’		
RAPOR BİLGİLERİ			
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası		
Sayfa Sayısı	103		
Raporlama Tarihi	17/06/2022		
Benzerlik Oranı (%)	9		

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 103 sayfalık kısmına ilişkin,17/06/2022 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 9 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç

☒Kaynaklar hariç

☒Alıntılar dâhil

☐Diğer (Açıklayınız)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Benzerlik oranım üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir,
gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Çağrı Onur ÖZTÜRK
Tarih: 20.06.2022
İmza:

Danışman Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN İmza:

Tarih: 20.06.2022

Ana Bilim Dalı Başkanı Adı, Soyadı: Prof. Dr. Z. Fuat TOPRAK İmza:

Tarih: 20.06.2022