

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ DEPREM MÜHENDİSLİĞİ VE AFET
YÖNETİMİ ENSTİTÜSÜ**

**BURSA ULUCAMI DOĞU MİNARESİNİN DAVRANIŞININ DOĞRUSAL VE
DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZLER İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe Zeynep ALAMEHMET

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

EYLÜL 2019

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ DEPREM MÜHENDİSLİĞİ VE AFET
YÖNETİMİ ENSTİTÜSÜ**

**BURSA ULUCAMI DOĞU MİNARESİNİN DAVRANIŞININ DOĞRUSAL VE
DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZLER İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ayşe Zeynep ALAMEHMET
(802141207)**

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Alper İLKİ

EYLÜL 2019

İTÜ, Deprem Mühendisliği Ve Afet Yönetimi Enstitüsü'nün 802141207 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ayşe Zeynep ALAMEHMET, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BURSA ULUCAMI DOĞU MİNARESİNİN DAVRANIŞININ DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZLER İLE İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Alper İLKİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Ömer Tuğrul TURAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Kutay ORAKÇAL
Boğaziçi Üniversitesi

Teslim Tarihi : **3 Mayıs 2019**
Savunma Tarihi : **13 Eylül 2019**





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bana kıymetli vakitini ayıran, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli danışman hocam Prof. Dr. Alper İLKİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez jürimde olmayı kabul ederek emeğini ve vaktini ayıran Dr. Öğr. Üyesi Ömer Tuğrul TURAN'a ve Doç. Dr. Kutay ORAKÇAL'a teşekkür ederim. Tezim süresince çalışma ortamını bizlere açarak, ekipman desteğini bizden esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ'a teşekkür ederim.

Her daim beni destekleyen ve yanımda olan sevgili annem ve babam başta olmak üzere ablam Kevser ALAMEHMET'e ve kardeşim Meryem ALAMEHMET'e , yüksek lisansım boyunca beni motive ederek desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Ebru TOY'a, Serap ATMACA'ya, Hakan ÖZEN'e ve Şükriye Ceyda ERGÜL'e teşekkür ederim.

Eylül 2019

Ayşe Zeynep ALAMEHMET

İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Minare'nin Gelişimi	1
1.2 Türk – Osmanlı Minaresi	3
1.2.1 Türk – Osmanlı minaresinin gelişimi.....	6
1.2.1.1 Selçuklu mimarisinde minare.....	8
1.2.1.2 Erken dönem Osmanlı mimarisinde minare.....	10
1.2.1.3 Klasik dönem Osmanlı mimarisinde minare.....	11
1.2.1.4 Geç dönem Osmanlı mimarisinde minare.....	13
2. BURSA VE ULUCAMİ	15
2.1 Bursa Şehri	15
2.2 Bursa'nın Depremselliği	15
2.3 Bursa'da Meydana Gelmiş Tarihi Depremler Ve Minare Hasarları	21
2.4 Bursa Ulucami Ve Minareleri	27
2.4.1 Bursa Ulucami doğu minaresi.....	28
3. YAPISAL MODELLEME YAKLAŞIMI	33
3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	33
3.2 Yığma Yapı Modelleme Yöntemleri.....	35
3.3 Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemleri	37
3.4 Malzeme Özellikleri	39
3.5 Göçme Şekilleri.....	49
3.6 Tarihi Yapılarda Yapısal Değerlendirme	51
4. MİNARE MAKRO MODELİ VE ANALİZ SONUÇLARI	57
4.1 Makro Modelleme Yaklaşımı.....	57
4.2 Makro Modele Ait Malzeme Değerlerinin Belirlenmesi	60
4.3 Makro Modele Ait Modal Analiz Sonuçları	61
4.4 Periyot Kontrolü Ve Periyodu Etkileyen Durumların Değerlendirilmesi.....	63
4.5 Makro Modele Ait Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz	66
4.5.1 Makro modele ait yer değiştirme kontrolleri	68
4.5.2 Makro modele ait kesme dayanımı kontrolleri	72
4.5.3 Makro modele ait gerilme dağılımları	74
4.6 Makro Modele Ait Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz.....	78

4.6.1 Makro modele ait doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre yerdeğiştirme kontrolleri	80
4.6.2 Makro modele ait doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre kesme dayanımı kontrolleri	82
4.6.3 Makro modele ait doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre gerilme dağılımları	83
4.7 Makro Modele Ait Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	86
5. MİNARE MİKRO MODELİ VE ANALİZ SONUÇLARI	89
5.1 Mikro Modelleme Yaklaşımı	89
5.2 Mikro Modele Ait Malzeme Değerlerinin Belirlenmesi	91
5.3 Mikro Modele Ait Modal Analiz Sonuçları	98
5.4 Mikro Modele Ait Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz	99
5.4.1 Mikro modele ait yer değiştirme kontrolleri	99
5.4.2 Mikro modele ait kesme dayanımı kontrolleri	102
5.4.3 Mikro modele ait gerilme dağılımları	103
5.5 Makro Ve Mikro Modele Ait Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	106
5.6 Mikro Modele Ait Statik İtme Analizi Ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..	107
5.7 Makro Ve Mikro Modele Ait Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	113
6. SONUÇLAR	115
KAYNAKLAR.....	119
ÖZGEÇMİŞ.....	123

KISALTMALAR

DAF : Doğu Anadolu Fay Hattı

KAF : Kuzey Anadolu Fay Hattı

M.Ö. : Milattan Önce

M.S. : Milattan Sonra

MS : Deprem büyüklüğü

sn : saniye

TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

vd. : ve diğerleri

yy : yüzyıl



SEMBOLLER

- A : Duvar yatay en kesit alanı
- b : Duvar yatay kesitinde kayma gerilmelerinin dağılımıyla ilgili şekil katsayısı
- E_b : Tuğla elastisite modülü
- E_j : Harç elastisite modülü
- E_m : Yığma birleşim elastisite modülü
- f_b : Tuğla basınç dayanımı
- f_j : Harç basınç dayanımı
- F_S ve F_1 : Yerel zemin etki katsayıları
- f_m : Yığma birleşim basınç dayanımı
- f_{vd} : Duvar tasarım kesme dayanımı
- f_{vdo} : Duvar tasarım başlangıç kesme dayanımı
- f_{vk} : Duvar karakteristik kesme dayanımı
- f_{vko} : Duvar başlangıç kesme dayanımı
- K , α ve β : Deneysel çalışma sonucu elde edilen katsayılar
- N_{Ed} : Ortak yük etkisi altında hesaplanan aksenal kuvvet
- R_a : Deprem yükü azaltma katsayısı
- S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
- S_s : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
- S_{Ds} ve S_{D1} : Tasarım spektral ivme katsayıları
- T : Doğal titreşim periyodu
- T_L : Sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş sınırı
- T_A ve T_B : Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyotları
- V_{Ed} : Ortak yük etkisi altında hesaplanan duvar kesme kuvveti
- V_{Rd} : Duvar tasarım kesme kuvveti dayanımı
- σ_d : Ortak yük etkisi altında hesaplanan düşey basınç gerilmesi



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.2 : Türk – Osmanlı minare kısımları	4
Şekil 2.1 : Plaka hareketleri (AFAD, 2014) [13].....	16
Şekil 2.2 : Türkiye deprem tehlike haritası (AFAD, 2018) [14]	16
Şekil 2.3 : Bursa aktif fay haritası (B.Ü.KRDAE) [16].....	17
Şekil 2.4 : Yatay elastik tasarım spektrumu (TBDY, 2018) [17]	19
Şekil 2.5 : Ulucami rapor sorgulama ekranı [18]	19
Şekil 2.6 : Ulucami koordinatlarına göre elde edilen yatay elastik tepki spektrumu	20
Şekil 2.7 : Ulucami doğu minaresi görünüşü	29
Şekil 2.8 : Ulucami batı minaresi kaide onarımı görüntüleri.....	30
Şekil 2.9 : Ulucami doğu minaresi içindeki taş hatıllar.....	30
Şekil 2.10 : Ulucami doğu minaresinin planı [29].....	31
Şekil 2.11 : Ulucami doğu minaresinin kesiti – Ulucami doğu minaresinin görünüşü [29].....	32
Şekil 3.1 : Sonlu eleman türleri	34
Şekil 3.2 : Bir boyutlu sonlu eleman örnekleri.....	34
Şekil 3.3 : İki boyutlu sonlu eleman örnekleri.....	35
Şekil 3.4 : Üç boyutlu sonlu eleman örnekleri	35
Şekil 3.5 : Yığma yapıların modelleme teknikleri: (a) Yığma birleşim (b)Ayrıntılı mikro model (c) Basitleştirilmiş mikro model (d) Makro model	36
Şekil 3.6 : (a) Doğrusal davranış (b) Doğrusal olmayan davranış.....	37
Şekil 3.7 : Doğrusal ve doğrusal olmayan davranış	39
Şekil 3.8 : Tuğla birimlerin basınç altındaki gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri (Kaushik, Rai, & Jain, 2007)	41
Şekil 3.9 : Tuğla birimlerin elastisite modülü – basınç dayanımı arasındaki ilişkisi (Kaushik, Rai, & Jain, 2007)	42
Şekil 3.10 : Harç küplerinin basınç altındaki gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri (Kaushik, Rai, & Jain, 2007)	43
Şekil 3.11 : Harç küplerinin elastisite modülü – basınç dayanımı arasındaki ilişkisi (Kaushik, Rai, & Jain, 2007)	43
Şekil 3.12 : Yığma birleşimlerin basınç altındaki gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri (Kaushik, Rai, & Jain, 2007)	44
Şekil 3.13 : Yığma birleşimlerin elastisite modülü – basınç dayanımı arasındaki ilişkisi (Kaushik, Rai, & Jain, 2007).....	44
Şekil 3.14 : (a) Kenet (b) Zivana (c) Kenet/Zivana – birim birleşimi.....	47
Şekil 3.15 : Tek eksenli yükleme altındaki davranış (a) Basınç gerilmesi (b) Çekme gerilmesi (Lourenço, 1996).....	47
Şekil 3.16 : Kayma gerilmesi altındaki davranış (Lourenço, 1996).....	48
Şekil 3.17 : Beton hasar görebilirlik modeli.....	48
Şekil 3.18 : SAP2000 basit beton hasar modeli.....	49
Şekil 3.19 : Ara yüzlerin göçme şekilleri (a)Basınç kırılması (b)Çekme kırılması (c)Kayma kırılması (Abdulla, K.F. v.d., 2017).....	49

Şekil 3.20 : Yığma birimlerin göçme şekilleri (Abdulla, K.F. v.d., 2017)	50
Şekil 3.21 : Tipik kayma kırılması.....	50
Şekil 3.22 : Tipik diyagonal kırılma	51
Şekil 3.23 : Tipik eğilme kırılma	51
Şekil 3.24 : Statik itme eğrisi ve sınır durumları	53
Şekil 4.1 : Ulucami doğu minaresi için oluşturulan makro model	58
Şekil 4.2 : Ulucami doğu minaresi imakro model merdiven detayı	59
Şekil 4.3 : Ulucami doğu minaresi imakro model şerefe detayı.....	59
Şekil 4.4 : Ulucami doğu minaresi imakro model gövde-petek geçiş detayı	60
Şekil 4.5 : Makro modele ait ilk yedi mod şekli.....	63
Şekil 4.6 : RSN 1165 ivme kaydı, X ve Y yönlerine ait ivme – zaman grafiği.....	67
Şekil 4.7 : RSN 1165 – Ölçeklendirilmiş ivme spektrumu.....	68
Şekil 4.8 : Yer değiştirme kontrolü için seçilen noktalar	69
Şekil 4.9 : 1, 2 ve 3 numaralı noktaların zamana bağlı yerdeğiştirme grafikleri.....	70
Şekil 4.10 : Makro modele ait minare yükseklik boyunca maksimum yer değiştirme grafiği.....	71
Şekil 4.11 : Kesme kuvveti kontrolü yapılan yüzeyler.....	72
Şekil 4.12 : Makro modele ait X yönündeki depreme karşılık gelen minimum ve maksimum asal gerilme dağılımları (MPa).....	76
Şekil 4.13 : Makro modele ait Y yönündeki depreme karşılık gelen minimum ve maksimum asal gerilme dağılımları (MPa).....	77
Şekil 4.14 : RSN 1165 – 1999 Kocaeli depremine ait Humid diyagramları ve anlamlı kısmı.....	79
Şekil 4.15 : RSN 1165 depreminin kısaltılmış ivme-zaman grafiği	79
Şekil 4.16 : Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz sonucuna göre 1, 2 ve 3 numaralı noktaların zamana bağlı yerdeğiştirme grafikleri.....	80
Şekil 4.17 : Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analize ait minare yükseklik boyunca maksimum yer değiştirme grafiği.....	81
Şekil 4.18 : Makro modele ait doğrusal olmayan analize göre X yönündeki depreme karşılık gelen minimum ve maksimum asal gerilme dağılımları (MPa).....	84
Şekil 4.19 : Makro modele ait doğrusal olmayan analize göre Y yönündeki depreme karşılık gelen minimum ve maksimum asal gerilme dağılımları (MPa).....	85
Şekil 4.20 : Makro modele ait doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre çekme sınır gerilmesinin aşıldığı bölgelerin gösterimi (MPa).....	87
Şekil 5.1 : Bursa Ulucami doğu minaresi mikro modeli.....	90
Şekil 5.2 : Mikro modele ait petek – gövde geçiş bölgesi	91
Şekil 5.3 : Mikro modele ait basamak – gövde bağlantıları	91
Şekil 5.4 : Referans alınan duvar modeli (Abdulla, K.F. v.d., 2017)	92
Şekil 5.5 : Referans çalışmada elde edilen sayısal modele ait statik itme grafiği ve deneysel modele ait grafik (Abdulla, K.F. v.d., 2017).....	93
Şekil 5.6 : Referans alınan çalışmaya ait minimum asal gerilme dağılımları (Abdulla, K.F. v.d., 2017)	94
Şekil 5.7 : Tuğla ve harç için tanımlanan gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri.....	95
Şekil 5.8 : SAP2000 programı ile modellenen duvar	95
Şekil 5.9 : Referans çalışma ile SAP2000 modeline ait kuvvet-yer değiştirme sonuçlarının karşılaştırılması	96
Şekil 5.10 : SAP2000 modeline ait minimum asal gerilme dağılımları	96
Şekil 5.11 : SAP2000 modeline ait duvar göçme şekilleri	97
Şekil 5.12 : Minare modelinde kullanılan tuğla ve harç gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.....	97

Şekil 5.13 : Mikro model modal analiz sonucu elde edilen ilk yedi mod şekli.....	99
Şekil 5.14 : 1, 2 ve 3 numaralı noktaların zamana bağlı yerdeğiştirme grafikleri...	100
Şekil 5.15 : Minare yükseklik boyunca maksimum yer değiştirme grafiği.....	101
Şekil 5.16 : Mikro modele ait X yönündeki depreme karşılık gelen minimum ve maksimum asal gerilme dağılımları (MPa)	104
Şekil 5.17 : Mikro modele ait Y yönündeki depreme karşılık gelen minimum ve maksimum asal gerilme dağılımları (MPa)	105
Şekil 5.18 : Makro ve mikro modele ait zaman tanım alanında doğrusal analiz sonuçlarına göre çekme sınır gerilmesinin aşıldığı bölgelerin gösterimi (MPa)	107
Şekil 5.19 : Mikro modele ait statik itme analizi.....	108
Şekil 5.20 : Statik itme sonucu kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi	109
Şekil 5.21 : İtme analizi sonucu oluşan birim şekil değiştirme dağılımı.....	110
Şekil 5.22 : İtme analizi adımlarında oluşan maksimum asal gerilme dağılımları (MPa)	111
Şekil 5.23 : İtme analizi adımlarında gövde-küp geçişinde oluşan gerilme dağılımları (MPa)	112
Şekil 5.24 : İtme analizi sonucu gövde-küp geçiş detayı ve gerilme dağılımı	112
Şekil 5.25 : Makro ve mikro modele ait doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre çekme sınır gerilmesinin aşıldığı bölgelerin gösterimi (MPa).....	114



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Önerilen hedef performans düzeyleri.	54
Çizelge 3.2 : Performans düzeyleri ile ilgili hesap yöntemleri ve gerilme, şekil değiştirme sınırları.	55
Çizelge 4.1 : Ulucami doğu minaresinin eleman boyutları.	57
Çizelge 4.2 : Kullanılan malzeme özellikleri.....	61
Çizelge 4.3 : Periyot, frekans değerleri ve kütle katılım oranları.	62
Çizelge 4.4 : Parça sayısına göre periyot değişimi.	65
Çizelge 4.5 : Minare kısımlarının periyoda etkisi.....	65
Çizelge 4.6 : Ulucami doğu minaresi makro modelde öteleme oranları.	71
Çizelge 4.7 : Duvar başlangıç kesme dayanımları, f_{vko} (MPa) (TBDY 2018 – 11.2.10).....	73
Çizelge 4.8 : Makro model için denklem (4.11) ve (4.12)'de kullanılan değerler ..	73
Çizelge 4.9 : Kesme dayanımlarının karşılaştırılması.	74
Çizelge 4.10 : Maksimum taban kesme kuvvetleri ve zaman değerleri.	75
Çizelge 4.11 : Ulucami doğu minaresi makro modeline ait zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonucu elde edilen öteleme oranları.	82
Çizelge 4.12 : Ulucami doğu minaresi makro modeline ait zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre kesme dayanımlarının karşılaştırılması.....	83
Çizelge 4.13 : Doğrusal olmayan analiz süresince oluşan maksimum taban kesme kuvvetleri ve zaman değerleri.....	83
Çizelge 5.1 : Tuğla ve harç boyutları.....	89
Çizelge 5.2 : Duvar modelinde kullanılan malzeme değerleri.....	94
Çizelge 5.3 : Periyot, frekans değerleri ve kütle katılım oranları.	98
Çizelge 5.4 : Ulucami doğu minaresi mikro modelde öteleme oranları.	101
Çizelge 5.5 : Mikro model için denklem (4.11) ve (4.12) kullanılan değerler.	102
Çizelge 5.6 : Mikro model için kesme dayanımlarının karşılaştırılması.	102
Çizelge 5.7 : Maksimum taban kesme kuvvetleri ve zaman değerleri.	103
Çizelge 5.8 : Belirlenen noktaların adımlardaki yer değiştirme değerleri.	109
Çizelge 5.9 : Son adımda oluşan yer değiştirmelere göre elde edilen öteleme oranları.....	109



BURSA ULUCAMI DOĞU MİNARESİNİN DAVRANIŞININ DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZLER İLE İNCELENMESİ

ÖZET

Yaşadığımız coğrafya yüzyıllar boyunca birçok millete ve kültüre ev sahipliği yapmıştır. Yurdumuzun her köşesinde varlığını gösteren birbirinden farklı dönemlere ait birçok eser dönemin üslup ve mimari anlayışını yansıtan önemli kaynaklar olarak günümüze kadar gelmiştir. Bize kadar ulaşmış olan bu kültürel mirasımızı korumak ve gerekli önlemleri alarak gelecek nesillere aktarmak bizim için bir görev olmuştur.

Minarelerin günümüzdeki mevcut sistemlerini iyice anlamak ve performanslarını değerlendirerek gelecek yıllara aktarabilmek, çalışmamızın temel amacını oluşturmaktadır.

Çalışmanın ilk kısmında cami ve mescitlerde bulunan minare gelişimi anlatılmış, Türk-Osmanlı minaresinin kısımları açıklanarak Türk-Osmanlı minare mimarisi ele alınmıştır.

İkinci kısımda; çalışma kapsamında incelenecek minare olan Bursa Ulucami doğu minaresi tanıtılmıştır. Bu minarenin bulunduğu Bursa ilinin depremselliği ve tarihte geçirdiği depremlerin minareler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bursa Ulucami'nin bulunduğu alana ve zemin koşullarına göre yatay elastik tepki spektrumu elde edilmiştir.

Üçüncü kısımda; çalışmada kullanılacak sonlu elemanlar ile ilgili kısaca bilgi verilmiş ve modelleme yaklaşımları açıklanmıştır. Sayısal analiz yöntemleri açıklanmış ve analizlerde kullanılacak malzeme özelliklerine değinerek malzeme değerlerini elde etmek için referans alınan literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Yığma elemanlar ve yığma birleşimlerde oluşabilecek göçme çeşitlerinden bahsedilmiştir. Tarihi yapılarda yapısal değerlendirmeye yönelik performans seviyeleri açıklanmıştır. Bu performans seviyelerinin belirlenmesinde yapılacak doğrusal ve doğrusal olmayan analizler sonucunda sağlanması gereken sınır koşulları ve izlenecek adımlara değinilmiştir.

Dördüncü kısımda; SAP2000 V20.2 programı kullanılarak Ulucami doğu minaresine ait makro model oluşturulmuştur. Makro modele ait modal analiz yapılarak yapı periyodu, kütle katılımları elde edilmiş periyot kontrolleri yapılar periyot değerini etkileyen durumlar incelenmiştir. Yine aynı model ile zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarında öteleme oranı kontrolü ve kesme dayanımı kontrolü yapılmıştır. Gerilme dağılımları gösterilerek, sınır değerleri aşan kısımlar belirlenmiştir.

Beşinci kısımda minare modeli için mikro modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Mikro modelde tuğla ve harç ayrı ayrı olarak kabuk eleman olarak modellenmiştir. Mikro modele ait yapılan modal analiz ve zaman tanım alanında doğrusal analiz sonuçları değerlendirilerek sınır koşulları kontrol edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar makro modelden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Tuğla ve harcın ayrı ayrı olarak modellendiği mikro modelde son olarak, statik itme analizi yapılmıştır. Tuğla ve harç malzemeleri için gerilme-birim şekil değiştirme malzeme modelleri elde edilmiştir. Malzeme modelleri ile doğrusal olmayan davranış tanımlanmış ve statik itme analizi yapılmıştır. Yapılan itme analizi yerdeğiştirme kontrollü olarak tanımlanmıştır. Seçilen noktaya ait makro model doğrusal olmayan analiz sonucu elde edilen maksimum yer değiştirme değeri, hedef yerdeğiştirme olarak verilmiştir. Analiz sonuçları, makro model doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Sonuç kısmında ise oluşturulan makro ve mikro modellerde yapılan doğrusal ve doğrusal olmayan analizlere ait elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

INVESTIGATION OF THE BURSA GRAND MOSQUE EASTERN MINARET'S BEHAVIOR BY LINEAR AND NONLINEAR ANALYSIS

SUMMARY

Our geography has been home to many nations and cultures for centuries. Many works belonging to different periods showing their existence in every corner of our country have come to our day as important sources reflecting the style and architectural understanding of the period. It has been our duty to protect this cultural heritage that has reached us and to take the necessary precautions to the next generations.

The main purpose of our study is to understand the current systems of the minarets and hand down the next generations by evaluating their performance.

In the first part of the study, the development of minarets in mosques and masjids is explained. Parts of the Turkish-Ottoman minaret are mentioned. The changes of Turkish-Ottoman minaret architecture according to the periods are discussed.

In the second part; The seismicity of Bursa and the effects of earthquakes on the historical minarets were investigated. According to the ground conditions and the coordinates where Bursa Grand Mosque is located, horizontal elastic response spectrum was obtained. East minaret of Bursa Grand Mosque , which is the minaret to be examined, is introduced.

In the third part; It is mentioned the methods that followed in the scope of the study. Brief information is given about the finite element method that used in the study. Macro modeling, micro modeling and simplified micro modeling, which is the modeling approach for masonry structures, are defined. Linear and non-linear numerical analysis methods have been explained that used in this astudy. The material properties used in the minaret are mentioned. Literature studies have been taken as reference for obtaining conversion formulas of the material values to be used in the analyzes. The types of failure that may occur in masonry elements (brick and mortar) and masonry units are mentioned. Performance levels for structural

evaluation in the historical buildings are explained. The boundary conditions and the steps to be followed as a result of linear and non-linear analyzes to determine these performance levels are mentioned.

In the fourth section; A macro model of the eastern minaret of Ulucami was created by using SAP2000 V20.2 software. The modal analysis of the macro model was carried out. The period and the mass participation values are obtained. The effects of number of mesh and minaret sections on the period was examined. On the same macro model, time history linear and nonlinear analysis are made. According to the results of these analyzes, boundary conditions of displacements ratio, stress distribution and shear forces were controlled. The parts exceeding the limit values of stress distributions are shown.

In the fifth part; Micro modeling approach is used for minaret model. In the micro model, brick and mortar are modeled separately as shell elements. Boundary conditions were checked by evaluating the results of the modal analysis and the linear time history analysis. These results were compared with the results are obtained from the macro model. Lastly, static pushover analysis is made for micro minaret model. In this analysis, stress-strain curves obtained for brick and mortar elements. These curves defined for nonlinear behavior of the minaret. Pushover analysis is made as displacement control. The maximum displacement value which is obtained from macro model nonlinear time history analysis for selected point is given as the target displacement of pushover analysis. The analysis results were compared with the results of the macro model nonlinear time history analysis.

In the conclusion part; The results that obtained from linear and nonlinear analyzes for macro and micro model were evaluated.

1. GİRİŞ

Yaşadığımız coğrafya yüzyıllar boyunca birçok millete ve kültüre ev sahipliği yapmıştır. Yurdumuzun her köşesinde varlığını gösteren birbirinden farklı dönemlere ait birçok eser dönemin üslup ve mimari anlayışını yansıtan önemli kaynaklar olarak günümüze kadar gelmiştir. Bize kadar ulaşmış olan bu kültürel mirasımızı korumak ve gerekli önlemleri alarak gelecek nesillere aktarmak bizim için bir görev olmuştur.

Tarihi bir silüete sahip olan Bursa şehri de birçok kültürü barındırmanın yanı sıra yedi asra yakın bir zaman boyunca da Osmanlı Devleti'ne beşiklik etmiş, bu süreçte de şehirde birçok cami, medrese, türbe, han ve hamam gibi yapılar yapılmıştır. Ülkemizde büyük ölçüde etkili olan deprem ve meydana gelen diğer afetler sebebiyle zarar gören farklı dönem ve şekillerde onarılmış bu eserler yüzyıllardır ayakta kalmayı başarmıştır. Bu gelişmelerle günümüze kadar ulaşmış kültürel miraslarımızdan biri de narin ve ince kule tipi yapılar olan minarelerdir.

Minarelerin günümüzdeki mevcut sistemlerini iyice anlamak ve performanslarını değerlendirerek gelecek yıllara aktarılabilme çalışmamızın temel amacını oluşturmaktadır.

1.1 Minare'nin Gelişimi

Minare, ezan okumak ve sesi çevreye yayabilmek amacıyla camilere bitişik ya da ayrı yapılan, bir ya da birkaç balkonu (şerefe) bulunan, kule biçimli yüksek yapılardır. [1]

Minare kelimesi, sözlükte “ışık” veya “ateş çıkan” yani “görünen” yer anlamlarını barındıran Arapça bir kelime olan “menare” kelimesinden gelmektedir. Bazı bölgelerde ezan okunan yer anlamına gelen “mi'zene” kelimesi de kullanılmaktadır. [2]

İslam ülkeleri mimarisinin en önemli yapı tiplerinden olan cami ve mescitler, yapıldıkları zamana ait izleri barındırmanın yanı sıra milletlerin zevk ve mimari karakterini yansıtmaktadır. Taşıdıkları bu özellikler, yapılara ait birçok kısımda göze

çarpmaktadır. Müslümanlara ait bir ibadet çeşidi olan namaza çağrı için okunan ezanı etrafa yaymak amacıyla kullanılan minareler de bu yapılara ait en karakteristik unsurlardan biridir ve yapılar için simgesel bir değer taşımaktadır. Minareler, dahil oldukları yapılara dönem ve üslup özellikleri bakımından belirli bir kimlik verir ve yapıları şehir dokusunda daha da anlamlı hale getirir. Bulunduğu yerde Müslümanların varoluşlarının da bir ifadesidir. Bu değerlere sahip olan minarelerin görselliği, yapıya ilk bakıldığında göze çarpan unsurlardan biri olması özelliği ile de birleşince yapıya ait diğer unsurlara karşı bir üstünlük kazanmaktadır. [3,4,5]

Minare kavramı ilk mescitlerde bulunmamaktadır. Bu kısmın, cami bütününde yer alması belli bir süreçten sonra meydana gelmiştir. Ezan okunmasına karar verildiği zaman Hz. Bilal, Medine'deki mescidin yakınında bulunan en yüksek evin damından sabah namazı için ezan okumuştur. Daha sonra Mescid-i Nebevî'nin arka kısmında ezan okumak için özel bir yer yapılmıştır. Mekke fethedildiğinde ise yine Hz. Bilal, al-Azraki adlı bir müellife göre Kabe damından ezan okumuştur.[3] Zamanla, ezan sesinin daha uzaklara duyurulabilmesi amacıyla yüksek kulelere ihtiyaç duyulmuştur. [6]

Eski Kahire olan Fustat Vali'si Mesleme b. Muhalled, Hicri 53, Miladi 673 yılında Emevi Halifesi Hazreti Muaviye'nin emri ile yapılan Amr Camii'nin köşelerine birer minare yaptırmıştır. Bu minareler tarihteki yapılan ilk cami minareleridir.[2,3] Daha sonraki dönemlerde minarelerin yapımı yaygınlaşmıştır.

İlk zamanlarda özel bir mimari forma sokulmadan yapılan minareler, dini mimaride önemli bir unsur haline gelmiş ve her bölgenin mimari üslubuna göre çeşitli şekillerde inşa edilmiştir.[3] İslam ülkeleri minarelerini genellikle batı ve doğu minareleri şeklinde iki grupta incelemek mümkündür. Alınan kiliselerin camiye çevrilmesiyle ortaya çıkmış olan dört köşe ve kule şeklindeki minareler, genellikle Afrika ve Endülüs'ten Suriye'ye kadar olan kısımda yaygındır. Bu köşeli minareler kornişlerle katlara ayrılmış, pencereler vasıtasıyla da iç mekanla ilişkileri sağlanmıştır. Doğudakiler ise daha çok silindirik ve ince gövdeli olup, saf, abidevi yapılardır.[2,4]

Bunların haricinde ise farklı şekillere sahip minareler de mevcuttur. Gaznelilerin yıldız şeklindeki yani keskin yivli minaresi, helezonik sarmal şeklindeki malviye tipi

minareler, Hindistan, Delhi'deki yivli Kutub Minar gibi birçok farklı tipte minare şekline rastlamak mümkündür.[2] (Şekil 1.1)



Şekil 1.1 : Dünya minareleri: (a)Hasan II Camii,Fas (b)Kutup Minar,Delhi, (c)Sidi Ukba Ulu Camii,Tunus (d)Samarra Camii Kebiri,Irak (e)Sultan III. Mesud, Afganistan, (f)Kutlug Timur Minaresi,Ürgeç.

Kullanılan yapı malzemesi açısından bakıldığında; İspanya ve Mısır'da taş, Kuzey Afrika'da tuğla, Arabistan, Suriye ve Anadolu'da taş ve tuğla, Irak, İran ve Afganistan'da tuğla, Hindistan'da taş ve tuğla gibi malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. [1]

1.2 Türk – Osmanlı Minaresi

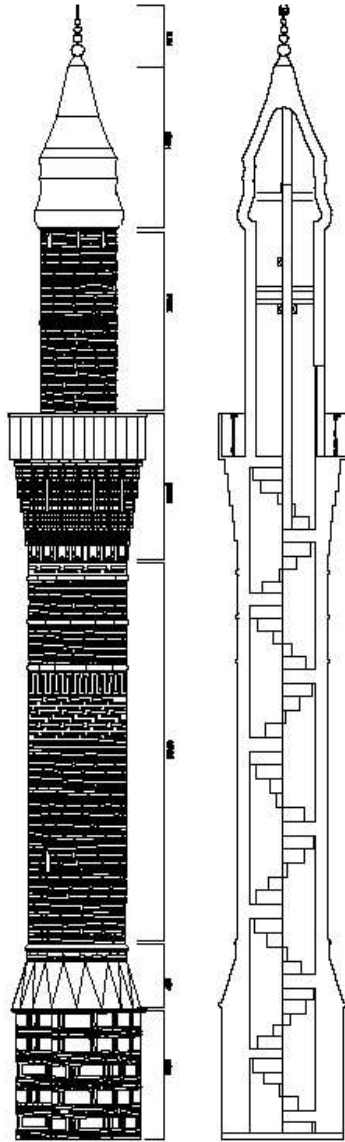
Türk-Osmanlı mimarisinde minare, birçok kaynakta 7 kısım olarak ele alınmıştır. Bu kısımlar aşağıdan yukarıya doğru sıralanırsa; kürsü (kaide), pabuç, gövde, şerefe, petek, külah, alem olarak isimlendirilmiştir. (Şekil 1.2)

Bunlara ek olarak yüzeyde gözükmeyen, kaidenin ankastre olarak bağlandığı ve üst yapıdan gelen etkileri zemine kadar aktaran temel kısmı da mevcuttur. Minare temelleri hakkında genelde bilgi olmamakla beraber, çoğunlukla kaide boyutlarında olup derinleştikçe ampatmanlı olarak kademelenip, genişleyerek devam ettiği görülmektedir. [7]

1.Kürsü;

Kürsü, minarenin kaide kısmıdır. Minarenin toprak üstündeki tabanıdır ve ana yapıya bitişik ya da ayrı olabilir. Genellikle dörtgen şekilde olup bazen de silindirik ve çok köşeli olarak inşa edilmiştir. Bazı büyük yapılarda payanda vazifesini gören kürsülere de rastlanmaktadır. [1,8]

Minarenin içindeki merdivenin giriş kapısı genellikle kaide kısmından açılır. Bu kapı kürsünün çoğunlukla batı cephesindedir. Bazı küçük camilerde ise minare kapısı cami içinden açılabilmektedir. [1,8]



Şekil 1.2 : Türk – Osmanlı minare kısımları.

2.Pabuç:

Kürsü ile gövdeyi bağlayan kısımdır. [2]

Mimari bakımdan minarenin en önemli kısmını teşkil eder. Kürsünün kare ve geniş satırlı poligonal planından, minare gövdesinin daha dar çaplı yuvarlak planına geçişi sağlayan parçadır. 19.yy minarelerinde pabuç kısmı mevcut değildir ve bu özelliğiyle diğer dönem minarelerinden ayrılırlar. [1,8]

Yüzeysel üçgenli pabuç ilk olarak 14.yy Beylikler Döneminde görülen bir formdur. [1]

3.Gövde:

Pabuç ile şerefe arasındaki bölümdür. [2]

Gövde genellikle hep aynı çapta silindirik veya çokgen olarak yükselen kısımdır. Bunun dışında bazı örneklerde yivli, burmalı, sıra dilimli gibi farklı biçimlere de rastlanmaktadır.

İçinde helezonik biçimde yukarıya doğru devam eden çekirdekli ve çekirdeksiz olarak kurulabilen merdiven bulunmaktadır. Minare içi hava sirkülasyonunu sağlama ve aydınlatma amacıyla gövde boyunca belirli aralıklarla pencereler açılmıştır.

Bazı dönemlerde gövdenin alt ve üst sınırları birer bilezikle işaret edilmiştir. [8]

4.Şerefe:

Adı “çıkıntılı yer, burç” anlamındaki “şürfe” kelimesinden gelir. [2]

Müezzinin ezan okumak için çıktığı küçük balkon “şerefe” olarak adlandırılır ve gövdenin üzerinde yuvarlak bir balkon teşkil eder. [2,8]

Şerefeyi meydana getiren ve minarenin en dikkat çekici tarafı olan üç kısım şu şekilde sıralanabilir;

- Müezzinin üzerinde dolaştığı, şerefe tabanı,
- Bu taban çıkıntısını gövdeye bağlayan takviye kısmındaki konsollar veya çıkmalar,
- Tabanın etrafını çeviren ve devirlerinin izlerini taşıyan şerefe korkuluklarıdır.

[8]

Yapıldıkları dönemin mimari özelliklerini yansıtmaları bakımından ayrı bir önem taşıyan şerefeler ilk minarelerde bir adet olup, zamanla sayıları üçe kadar çıkmıştır. [2,9]

5.Petek:

Minarenin şerefeden külaha kadar olan kısmına “Petek” adı verilir. Bu kısım müezzinin rahatça şerefeye çıkmasını sağlar. Ayrıca minarenin bütün iç kısmını hava tesirlerinden koruyacak olan külahı da bu petek kısmı taşımaktadır. Gövdeye nispetle biraz daha ince olan peteğin içinde, eğer minare tek şerefeli ise merdiven yoktur. Ortadaki mihver ise ahşaptır. [8]

Petekte şerefeye açılan bir kapı bulunur. Bu kapı Türk – Osmanlı minarelerinde muhakkak kible istikametindedir. Eski Anadolu minarelerinde ise böyle bir mecburiyet bulunmamaktadır. Petek ve minare bazen bir bilezik ile nihayetlenir. [8]

6.Külah:

Minarenin çatısıdır. Osmanlılarda genellikle ortasında yekpare ağaçtan bir seren bulunan, ahşap bir iskelet üzerine kurşun levhalar kaplanarak inşa edilirler. Eski gravürlerden şekillerinin önceden beri konik olduğunu anlamak mümkündür. [9]

İslam dünyasının diğer bölgelerinden etkilenecek geç devirlerde taştan ve değişik biçimlerde yapılmıştır. [2]

Fırtına ve yangınlar neticesinde kolay tahribe uğrayan külahlar sık sık tamir gördükleri için, bugün hemen hemen orijinal numune kalmamıştır.[8]

7.Alem:

Arapça olan bu kelimenin manası “bayrak” demektir. Minare ve kubbelerin tepelerine takılan Ay’a (Hilal) benzeyen bu süslemenin menşei eski Türklerin ve hatta başka milletlerin, kuvvet remzi olarak kullandıkları boynuzdan gelmektedir. [9]

Külahın sonunda yer alan ve yaldızlı madenden, taştan veya seramikten yapılan alemler, minarenin en üst kısmında bulunur ve gövdenin zarif biçimde sona ermesini sağlar. Kişinin dikkatini tepede tutarak semaya doğru çeker ve bu şekilde kubbeye bir yükseliş tesiri verir. [2,8]

Alem, külahın uç kısmında kurşunların aralıklarını kapatarak bir baskı oluşturmakta ve böylece minare yukarıdan aşağı bütün hava tesirlerine karşı korunmaktadır. [8]

1.2.1 Türk – Osmanlı minaresinin gelişimi

Türklerde minare, ilk Müslüman Türk devleti olan Karahanlılardan günümüze kesintisiz bir devamlılığın izlenebildiği mimari elemanlardan biridir. [10] (Şekil 1.3)

Osmanlı dönemi minareleri şeklini alıncaya kadar oranlar, çap ve bazı detaylarında türlü değişiklikler geçirmiş olsa bile başlangıçtan beri genel formunu hep muhafaza etmiştir. Silindirik, ince gövdeli biçimindeki bu minareler, şehirlerimizi süsleyen ve kendine özgü mimarisiyle Türk varlığını ortaya koyan narin ve nazik bir sembol haline gelmiştir.[9,10]

Yapı malzemesi olarak genellikle tuğla ve taş kullanılmış, bazı mescit minareleri ise ahşap olarak inşa edilmiştir. Tezyini şekilleri ise sırlı tuğlalar, çiniler, mozaik renkli taşlar ve kabartma taş çeşitlerinde yapılmıştır. Minarelerin gövde ve petekleri, burmalı, yivli, oluklu olarak yapılmış zamanla boyları yükselmiş ve gövdeleri incelenerek zarafeti bir kat daha artmıştır.[9]



Şekil 1.3 : Osmanlı öncesi minare örnekleri (a) Balasag Unda Burana (Karaahanlılar), (b) İsfahan Ali (Selçuklu), (c) Siirt Ulu Cami (Büyük Selçuklu).

Anadolu'daki minareler iki ayrı kültürden etkilenmiş olup başlıca bu kültürlerde bulunan iki minare biçiminin hakim olduğu görülmektedir. Güneydoğu Anadolu'da Diyerbakır Ulucamii (11.yy) örneğinde olduğu gibi, Suriye (Arap) geleneğine bağlı dört köşe gövdeli minareler yapılmıştır. Suriye'de Emeviler döneminden beri yerleşerek tesirlerini Anadolu'da gösteren bu biçimdeki minareler, 16. Yüzyıla kadar inşa edilmeye devam edilmiş, daha sonra yerini tamamen Asya'dan gelen Türk tesirli yuvarlak minarelere bırakmıştır. Asya (Türk) geleneğine bağlı bu minareler genellikle tuğla olarak inşa edilmeye başlanmıştır. Anadolu'da bunlardan başka çoğunlukla mescitlerde rastlanan bir minare şekli daha mevcuttur. Doğrudan doğruya yapıya ya da avlu duvarının bir cephesine bitişik bir merdiven ile bunun yukarı ucundaki bir şerefeden ibaret oluşan "minber biçimi minareler" olarak adlandırılan

minareler vardır. Bu tip minareler ise daha çok Kayseri-Nevşehir bölgelerinde sıkça görülmektedir. [2,4]

Anadolu Selçuklu mirasının üzerine bina edilen Osmanlı mimarisindeki minare uygulamalarında; minare konumu, malzemesi, kaide, pabuç, şerefe gibi elemanlarında göze çarpan gelişmeler, Klasik Dönem'in taş malzemeli, yapı ile orantılı ve zarif minarelerine birer hazırlığı teşkil etmektedir. [10] (**Şekil 1.4**)

Klasik Osmanlı döneminde minarelerin yeri kesinleşmekle beraber, kütle kompozisyonu açısından görünümünde de bir ahenk mevcuttur. Ana kütledeki kademelenme ile şerefelerin sıra halinde yükselişi, tam bir uyum oluşturmaktadır.



Şekil 1.4 : Osmanlı dönemi minare örnekleri (a) Antalya Yivli Minare (b) Bursa Ulucami (c) Edirne Üç Şerefeli Cami (d) Selimiye Cami (e) Büyük Mecidiye Cami.

Klasik Dönemi takip eden son dönem mimarisinde minareler batı üslubunun etkisinde kalarak oldukça ince ve bol süslemeli şekilde inşa edilmişlerdir. Klasik üsluptan gittikçe uzaklaştığı bu dönemde minare konumu tekrar değişmiş, oran ve ahenk ortadan kalmıştır. Bu olumsuz durumlar neticesinde Neo Klasik olarak adlandırılan yeni bir üslup oluşmuştur.

1.2.1.1 Selçuklu mimarisinde minare

Karahanlı olarak adlandırılan Hakan Türk sülalesinin 926 tarihinde İslamiyet'i kabulü ile anıtsal Türk minarelerinin meydana getirilişi başlamaktadır. Karahanlı minarelerinin, Türklerin eski zamanda ateş yakarak haber vermek amacıyla inşa ettikleri "kargu" adı verilen yüksek kuleler ile dini metinler ve azizlerin kemiklerinin

saklandığı dört köşe ve kademeli olan “idiz ev”, diğer yörelerdeki ismiyle “pagoda”lardan ilham alınarak yapıldığı ileri sürülmektedir. Karahanlılar 992’de Batı Türkistan’ı almışlar ve burada ilk tuğla minarelerini inşa etmişlerdir. Üslup olarak minareler yuvarlak kesitli, gövdesi teyinatlı ve kitabe kuşağı bulunan tuğla minarelerdir. İnşa ettikleri bu minareler arasından önemlileri olarak Bahara’daki Vabkent Minaresi ile şimdiki Kırgızistan’da yer alan Burana ve Tirmiz minareleri gösterilebilir. [4,6]

Türk tarihi boyunca denenen çeşitli minare şekilleri sonucunda Selçukluların kendileri için en uygun şekil olan silindirik gövdeli ince, uzun minare modelini benimsemesiyle bu üslupta gelişerek ilerleyen Türk - Osmanlı minare şekli, ortaya çıkmıştır. 1058 tarihli Damgan Mescid-i Cuma’sının minaresi, 1060 tarihli Save Mescid-i Meydan Minaresi ile Mescid-i Pa menar’ın silindirik minaresi, Selçuklu minarelerinin en güzel örneklerindedir. [4]

Karahanlıların geniş çaplı, hantal, silindirik gövdeli minarelerinin yerini Büyük Selçuklular Dönemi’nde daha zarif ve yüksek örnekler alır. Minarelerin gövdelerin yukarıya doğru hafifçe daralan silindirik gövdeye sahiptir. Anıtsal bir görünüme sahip olan bu minarelerde tuğla malzeme kullanılmakta olup başarılı tuğla işçilikleri göze çarpmaktadır. Gövdesinde tuğla ile yapılmış olan baklava ve yıldız motiflerle geometrik desenlerden süslemeler oluşturulmuştur. Dekorasyon açısından önemli bir özellik de gövdede yer alan yazı kuşağıdır ve bu kuşaklarda zamanla çini mozaiğine de yer vermeye başlanmıştır. [4,6,10]

Büyük Selçuklu minarelerinde genellikle tuğla olarak kullanılan malzeme, Anadolu Selçuklu döneminde kaidelerde yerini taş malzemeye bırakmıştır. Genelde kare şeklinde yapılan kaidelerden sonraki üst kısımlarda yine tuğla kullanımının devamı sağlanmıştır. Anadolu’nun bazı bölgelerde ise taş minarelere de rastlamak mümkündür. Anadolu’daki minareler, İran’daki Selçuklu minarelerine göre dekor ve form açısından farklılık göstermekte olup, genellikle silindirik, kalın ve basık bir gövdeye sahiptir. Bunların yanı sıra kaide ve gövde arasındaki çap farkından dolayı geçişi sağlayan “pabuç” elemanı ortaya çıkmış, çini ve çini mozaiği sadece yazı kuşaklarında değil, diğer kısımlarda da kullanılmaya başlanmıştır.13. yy’ın başlarında Selçuklularda olduğu gibi sadece yazı kuşaklarında yer alan sırlı işçilik; yüzyılın sonuna kadar kaide, pabuç ve gövdeye yayılmıştır. Minarelerin çoğunun külâh ve şerefeleri bugün mevcut değildir.[4,6,10]

13.yüzyılın ikinci yarısına gelindiğinde Selçuklu minarelerinde gözlenen en önemli yenilikler taç kapı yanında çifte minare uygulaması, minare gövdesinin zengin dekorasyonu, çift şerefe ve yivli gövdelerdir. [4]

1.2.1.2 Erken dönem Osmanlı mimarisinde minare

Osmanlı Devleti'nin kuruluşundan 16. yüzyıl ortalarına kadar olan zamanı içeren erken devir Osmanlı mimarisinde, Selçukluların camiyle oran ilişkisi gözetilmeksizin yapılmış, yukarıya doğru daralan anıtsal kulelerin yerini, daha mütevazı ve yapının silüetiyle orantılı, küçük ölçekli ve sade minareler almıştır. Aynı zamanda sırlı tuğla, çini mozaik, dekoratif tuğla mozaik gibi Selçuklu dönemindeki mimari ibarelerde zamanla azalarak ortadan kaybolmuştur. Bunun haricinde Erken Osmanlı dönemi minareleri biçim olarak Selçuklu minarelerine benzemektedir. Kaideler dönemin ilk zamanlarında çoğunlukla dörtgen, son zamanlar ise çoğunlukla sekizgen olmak üzere altıgen, ongen ve onikigen planlı formlarda da uygulanmıştır. Gövdeleri genellikle daire şeklinde veya dış yüzleri köşeli görünümde olacak şekilde çokgendir. Yüzleri kesme taştan olan minarelerin bazılarının üzerinde kabartma veya süs zincirler bulunmakta olup gövdeleri sonraki dönem minarelerine göre daha kalındır. Minare gövdelerine daha ince gözükme için açılan yivler sarmal, zikzaklı veya düşey olarak yapılmaktadır. Bunun dışındaki bazı minare gövdeleri ise poligonal, burmalı ve benzeri biçimlerde gövdeler de inşa edilmiştir. [4,6]

Gövdedeki baklava dilimli süslemeler Erken Osmanlı Dönemi'nin izleridir. Kaideler Erken Osmanlı Dönemi minarelerinin çoğunda almaşık tekniktir. Bu tip almaşık teknikli kaidelere genellikle Bursa ve çevresinde rastlanmaktadır. [10]

Anadolu Selçuklularının sekizgen ve dörtgen pabuçları Erken Osmanlı Döneminde hiç kullanılmamıştır. Bu dönemde kaideden gövdeye doğru daralarak yükselen bir kuruluş biçimi oluşturulup daha uzun ve zarif tutularak, yüzeysel ya da prizmatik karakterli üçgenler ters-düz olarak nöbetleşe dizilmeleriyle şekillenmiştir. Erken Osmanlı Dönemi'ne ait olduğu bilinen orijinal pabuçlardan 21'inde yüzeysel üçgenli pabuç, 16'sında prizmatik üçgenli pabuç vardır. Prizmatik üçgenli pabuçlar daha ziyade taş pabuçlu minarelerde tercih edilmiştir. [6,10]

Minarelerin iç kuruluşlarında da bazı değişiklikler olmuş ve Anadolu Selçuklu minarelerindeki helezonik merdiven ortasındaki çekirdek bazı büyük minareler

haricinde kullanılmamış, küçük cami ve mescit minareleri çoğunlukla çekirdeksiz olarak inşa edilmiştir. [6]

Erken Osmanlı döneminde cami girişinin sağında, solunda ya da her iki köşesine konumlandırılan minareler ana kütle köşesine (cami ile son cemaat yerinin birleştiği köşeye) bitişik olup gövdesi bazı örneklerde duvar üzerinden yükselmektedir. Çift minare uygulaması Selçuklu dönemi mimarisinden farklı olarak taç kapının iki kenarında değil, ana kütle köşelerine çekilmiştir. Cami giriş cephesi solundaki örnekler de giderek azalmış ve istisnai örnekler haricinde klasik dönemde ortadan kalmıştır. [4]

Tek kubbeli camiler başlığındaki en eski camilerden biri olan Alaaddin Bey Cami'nin minaresi elde kalmış ilk Osmanlı minaresidir. Minare, son cemaat yerinin doğusunda duvara yapılmış vaziyettedir. Kaide ve küp kısmı taş, üst kısmı tuğladır. Petek ve külah yenidir fakat gözde kısmı ve şerefe orijinal olabilir. [11]

1.2.1.3 Klasik dönem Osmanlı mimarisinde minare

Minareler, teknik ve estetik bakımdan en endamlı, oranlı ve dengeli şeklini Klasik Osmanlı dönemi olarak adlandırdığımız 16.yy'da Mimar Sinan döneminde almıştır. [3,4]

Klasik devirde minarelerin sanatsal hale gelmesi ve minare güzelliklerinin başlıca sebepleri bu dönem üslubunun getirdiği sadelik ve zariflikle beraber yapı ile bağlantısındaki ahengin oluşturduğu ölçülerden kaynaklanmaktadır. Yapının kütle kompozisyonu açısından minarelerin ana kütledeki kademelenmesi ile şerefelerin sıra halinde yükselişi, tam bir uyum oluşturarak görünümde bir ahenk meydana getirmektedir. [4]

Erken Osmanlı dönemi minare yapımında kullanılan tuğla özellikle İstanbul'un fethinin ardından yerini tamamen taşa bırakmıştır. Silindirik veya çok köşeli ve ince uzun gövdeli olan minarelerin şerefe altları devrine göre mukarnas dolgulu veya oval geçişlidir. [2]

Erken dönemlerde genellikle yapı duvarı üzerinden yükselen minareler, Klasik döneme geçişle çoğunlukla beden duvarına kısmen yapışık veya tamamen ayrı olmak üzere, zeminden başlayarak yükselmektedir. [4]

Yine bu dönemde minarelerin, yapı dahilindeki konumları bazı farklı konumlardaki örnekler haricinde kesinleşmiştir. Tek minareli camilerde genellikle kuzey giriş cephesinin (ana kütle cephesi) sağına yerleştirilmiştir. Bazı camilerde sol kısımda yer alabilmektedir.

İki minareye sahip selatin camilerde, cami kütleleri ile avlunun birleştiği köşelerde olup dört minareye sahip camilerde ise cami kütleleri girişi köşelerine ve avlu köşelerine yerleştirilmiştir. (Süleymaniye Camii) Tek örnek olan 6 minareli Sultan Ahmet Camii'sinde ise avlu köşelerine iki adet ve cami kütleleri köşelerine dört adet olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu dönemde minare için yer arama meselesi kalmamıştır.[4]

Klasik Osmanlı döneminde yapılan camilerde, hem şerefe sayılarında hem de minare sayılarında bir artış olmuştur. Bu tür camilerde şerefe sayılarının ana kütleyle yaklaştıkça artması dikkat çekmektedir. Cami kütlelerine bitişik minareler üç şerefeli, diğer minareler ise iki şerefeli olarak yapılmıştır. Örnek olarak, Edirne Selimiye Camii'nde caminin dört köşesinde ana kütleyle bitişik inşa edilmiş olan minarelerin hepsi üçer şerefeli olarak yapılmıştır. İstanbul Sultanahmet Camii'nde Osmanlı mimarisinde ilk ve son defa sayıları altı adet yapılmış olan minarelerden avlu köşelerinde olanlar ikişer, cami kütleleri köşelerinde olanlar ise üçer şerefelidir. İstanbul Yeni Camii'de ise cami kütleleri ile avlunun birleştiği köşelerde yer alan iki minarenin de üçer şerefeli olarak yapıldığı görülmektedir. Daha sonraki camilerde tek şerefe yapımına devam edilmiş olsa da çok şerefeli uygulamalara bu dönemde geçilmiştir.

Bu dönemde minare dekorasyonu konusunda da gelişmeler olmuştur. 15.yy dan itibaren kaideden gövdeye geçiş unsuru olan pabuç kısmındaki baklavalar giderek yerini piramidal üçgenlere bırakmıştır. Eski döneme nazaran bu dönemde kalın minare yapımı azalmış, minare kalınlıkları genellikle bir müezzinin geçeceği çapta tutuşmuştur. Minare gövdelerinin bazıları incelerek yükselmekte olup genellikle aynı çapta devam etmektedir. Çoğunda silindirik olan gövde dış yüzeylerindeki taşlar gövdeye hafif köşeli görünüm verecek şekilde yontulmuştur. Şerefe korkuluklarındaki süslemeler artmıştır.[4]

1.2.1.4 Geç dönem Osmanlı mimarisinde minare

Klasik dönemde tam bir anlam kazanan cami mimarisi Sinan'dan sonra Davut, Dalgıç Ahmet ve Mehmet Ağa gibi mimarların da katkılarıyla bir süre daha devam etmiştir. 18. Yy ortalarından itibaren Osmanlı mimarisinde batı tesirleri etkili olmaya başlamıştır. Klasik üslubun oranlarındaki uyum, ölçü ve esaslar yavaş yavaş kaybolmaya başlamıştır. Minare süslemeleri ve gövde planı da değişime uğramıştır. Zevklerde meydana gelen bu değişimler sonucunda mümkün merteye ince ve süslü minare inşasına başlanmıştır.

Bu dönemde camiler mimari bir hesaplama dışında yapılmaya başlanmıştır. Önce tek minareli olarak yapılan camilere, sonradan ikinci minarelerinin eklenmesi bu dönem camilerinin dış dış kompozisyonlarının ilk tasarlandığı gibi oluşturulmadığını göstermektedir. [4]

1755 tarihinde yapılmış olan Nuruosmaniye Camii, Osmanlı mimarisinde Barok Üslupta yapılmış cami olup, minaresi de bu üslubu yansıtan ilk örnektir.

Dekorasyon açısından, özellikle minarelerin şerefe ve pabuç kısımlarındaki değişiklikler, klasik üsluptan gittikçe uzaklaşıldığını ortaya koymaktadır. Şerefelerdeki mukarnasların yerini, girintili çıkıntılı, kabarık nişli sarkıtmalar ve girlandlar ile antik sütun başlığı tarzında uygulamalar almıştır. Minarelerin pabuç kısımlarının geçiş unsuru olma özelliği ortadan kalkmıştır ve bu kısma tezyini bir karakter verilmiştir. Kaidelerde ise bir takım girinti ve çıkıntılar, gereksiz süsler yapılmış, kaide oldukça uzamıştır.

Klasik dönemde kesinleşen minare konumu tekrar değişmiştir. Camilerde son cemaat yerine hünkar kasrı yapılmaya başlanmış, minare kaideleri bu kısmın içinde gizlenmiştir.

Bütün bu değişimler sonrasında Türk sanatı 19.yy sonlarına doğru yeni bir üslup oluşturarak bunu Neo Klasik adlandırmıştır. Bu üslupla birçok eserde Klasik Üslup yeniden yaşatılmaya çalışmıştır.



2. BURSA VE ULUCAMI

2.1 Bursa Şehri

Bursa ili ve çevresi M.Ö. 5200 yılından beri yerleşim yeri olarak kullanılmaktadır. Kent, M.Ö. 185 yılında Kartaca kralı Hannibal tarafından Bithynia Kralı I.Prusias'a atfen kurulmuş ve Prusias ad Olypnum adını almıştır. Zamanla Prusias ismi ilk Prusa daha sonra da Bursa olarak değişmiştir. Bithynia, Roma ve Bizans dönemlerinden sonra Sultan Orhangazi tarafından 1326 yılında kan dökmeden “vire” yöntemiyle Osmanlı Devleti döneminde Türklerin hakimiyetine geçmiştir. Bursa şehri 1362 yılında Edirne fethedilinceye kadar Osmanlı Devleti'nin başkentliğini yapmış, İstanbul'un fethine kadar da başkentliği Edirne ile paylaşmıştır.

Barındırdığı birçok kültürün yanı sıra Osmanlı Devleti'ne beşiklik ettiği yaklaşık yedi asırlık bu süreçte şehirde birçok cami, medrese, türbe, han ve hamam gibi yapılar yapılmıştır. Bu yapılar dönemin üslup ve mimari anlayışını yansıtan önemli kaynaklar olarak günümüze kadar gelmiştir.

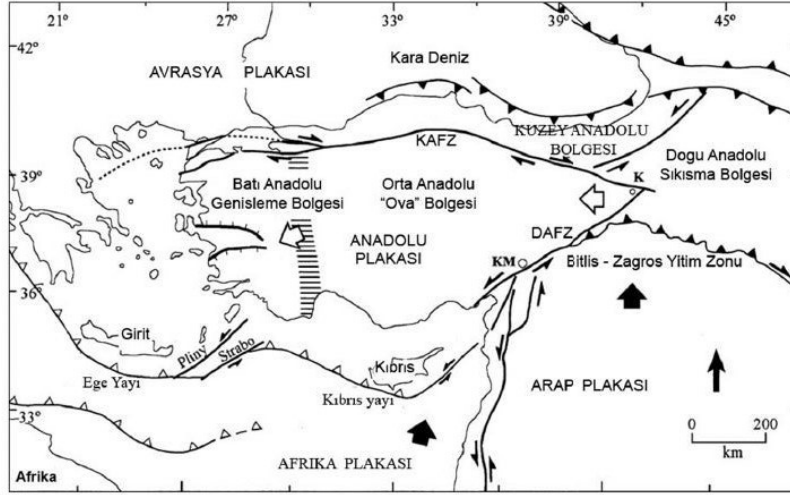
2.2 Bursa'nın Depremselliği

Yer kabuğundaki plakalar daima hareket halindedir. Bu plaka hareketleri sırasında yer kabuğunda enerji birikimi olmakta, biriken enerji de kırılarak ortaya çıkmakta bu şekilde de depremler meydana gelmektedir.

Dünyadaki en aktif ve etkili depremler üç kuşakta meydana gelmekte olup bu depremlerin %81'i Pasifik Deprem Kuşağı'nda gerçekleşmektedir. Bunu takip eden %17'lik depremin meydana geldiği kuşak Alp-Himalaya Deprem Kuşağıdır ve Türkiye de bu deprem kuşağı içerisinde yer almaktadır. Son olarak da Atlantik okyanusu sırtı boyunca uzanan Atlantik Kuşağı bulunmaktadır. [12]

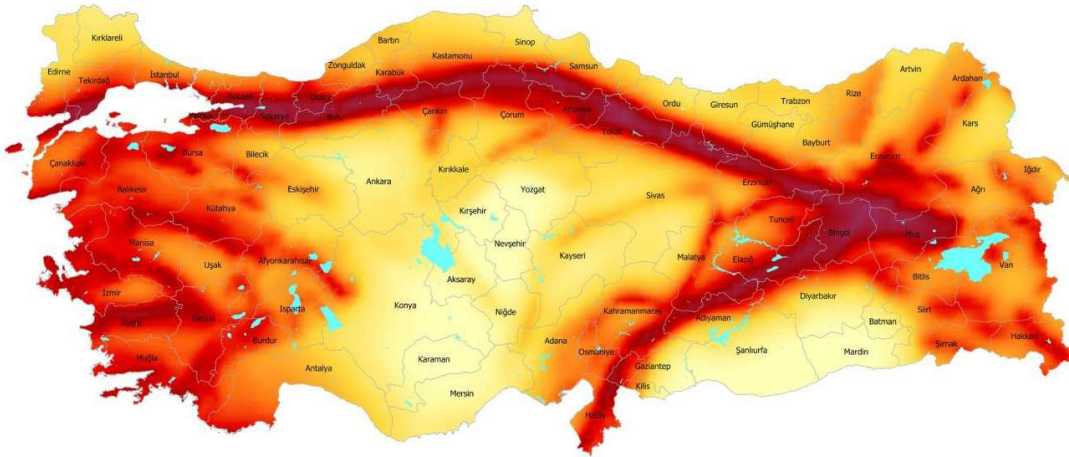
Afrika ve Arap plakasının kuzeye doğru hareket etmesi sebebiyle, güneyde Doğu Anadolu Fay Hattı ile sınırlanan ve arada kalan Anadolu plakası Karadeniz plağıyla sınırını oluşturan Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde sağ yanal atılımlı hareket

oluşturarak batıya doğru kaymaktadır. Ege kısmında da baskılanan bu hareket sebebiyle horst-graben faylanması meydana gelmektedir. [12] (Şekil 2.1)



Şekil 2.1 : Plaka hareketleri (AFAD, 2014). [13]

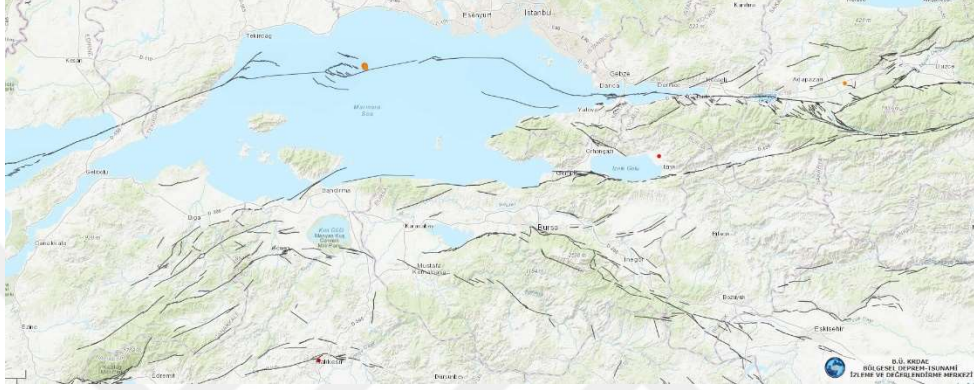
Türkiye'nin 2019 yılında yayınlanan son deprem tehlike haritasına göre de en belirgin olan aktif fay bölgelerinin Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF), Doğu Anadolu Fay Hattı (DAF) ve ege kıyısındaki horst-graben faylarının olduğu görülmektedir (Şekil 2.2)



Şekil 2.2 : Türkiye deprem tehlike haritası (AFAD, 2018). [14]

Türkiye'deki en uzun fay hattı olan Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın uzunluğu yaklaşık 1500 km'dir ve yılda 0,5~1,5 cm hareket etmektedir. Fay doğuda, Karlıoava'da Doğu Anadolu Fayı ile kesiştiği noktadan başlamaktadır. Orta kısımda dışa bükey bir yay yaparak Mudurnu Vadisi'nin batısına kadar devam etmekte, Dokursun Vadisi batısına geldiğinde ise üç ana kola ayrılmaktadır. Kuzey kol, Sapanca gölü, Armutlu

Yarımadası kuzeyi, Marmara Denizi kuzeyi boyunca geçerek Saros Körfezi'ne kadar uzanır. Orta kol, Geyve, İzmit, Gemlik, Bandırma güzergahını takip ederek Bayramiç'e kadar gelir. Bursa şehri ise fayın üçüncü parçası olan güney kolunda yer almaktadır. Güney kol Yenişehir, Bursa, Manyas, Gönen'den geçerek Pazarköy'e kadar uzanmaktadır. Bu aktif ve etkili fay üzerinde bulunan Bursa şehri 1. derece deprem bölgesi olmakla beraber, tarihteki örnekleriyle de büyük depremlerin meydana geldiği bir bölgedir. [15] (Şekil 2.3)



Şekil 2.3 : Bursa aktif fay haritası (B.Ü.KRDAE). [16]

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018 yılında son şekliyle yayınlanmış ve şuan günümüzde geçerli olan yönetmektir. [17] Bu yönetmeliğe göre tarihi ve kültürel değeri olan tescilli yapıların ve anıtların deprem etkisi altında değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi yönetmelik kapsamı dışında bırakılmıştır. Fakat yapıya gelecek olan deprem etkileri ve analizlerde izlenecek adımlar yine yönetmeliğe uygun olarak hesaplanabilir.

Yerel zemin katsayılarına bağlı olarak deprem yer hareketi spektrumları oluşturularak yapının kendi periyot değerine göre alacağı deprem etkisi belirlenmektedir. Bu bağlamda yapının bulunduğu koordinatlar ve zemin çeşidine göre alınan değerler ile spektrum sınır değerleri elde edilmektedir. Bu değerler gerekli bilgilerin tanıtılması sonucu <https://tdth.afad.gov.tr/> adresinden internet üzeri erişim ile sağlanmaktadır.[18]

İlk adımda elde edilen veriler olan birbirine dik iki yatay doğrultudaki deprem etkilerinin geometrik ortalamasına karşı gelen *harita spektral ivme katsayıları*, harita spektral ivmelerinin yer çekimi ivmesine bölünerek bulunduğu boyutsuz katsayılarıdır.

S_S : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı

S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı

Bu değerler TBDY 2018'deki tablolardan alınan F_S ve F_1 olarak tanımlanan *yerel zemin etki katsayıları* ile çarpılarak *tasarım spektral ivme katsayıları* olan S_{DS} ve S_{D1} elde edilir.

$$S_{DS} = S_S F_S$$

$$S_{D1} = S_1 F_1 \quad (2.1)$$

Bu değerler kullanılarak yatay tasarım spektrumları köşe periyotları olan T_A ve T_B değerleri bulunur. (2.2) Bulunan bu değerler (2.3) denklemleri kullanılarak doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yer çekimi ivmesi cinsinden yatay elastik tasarım ivme spektrumu ordinatları tanımlanır.

$$T_A = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.2)$$

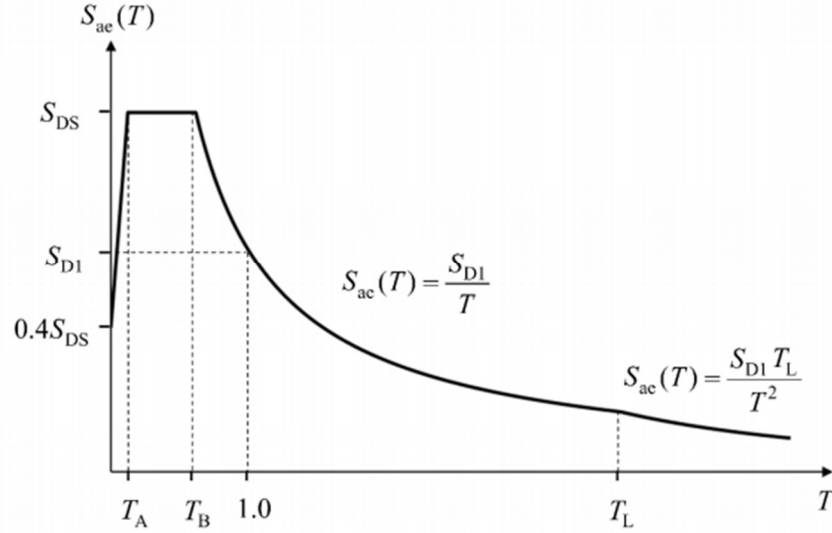
$$S_{ae}(T) = \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_A}\right) S_{DS} \quad (0 \leq T \leq T_A)$$

$$S_{ae}(T) = S_{DS} \quad (T_A \leq T \leq T_B)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T} \quad (T_B \leq T \leq T_L)$$

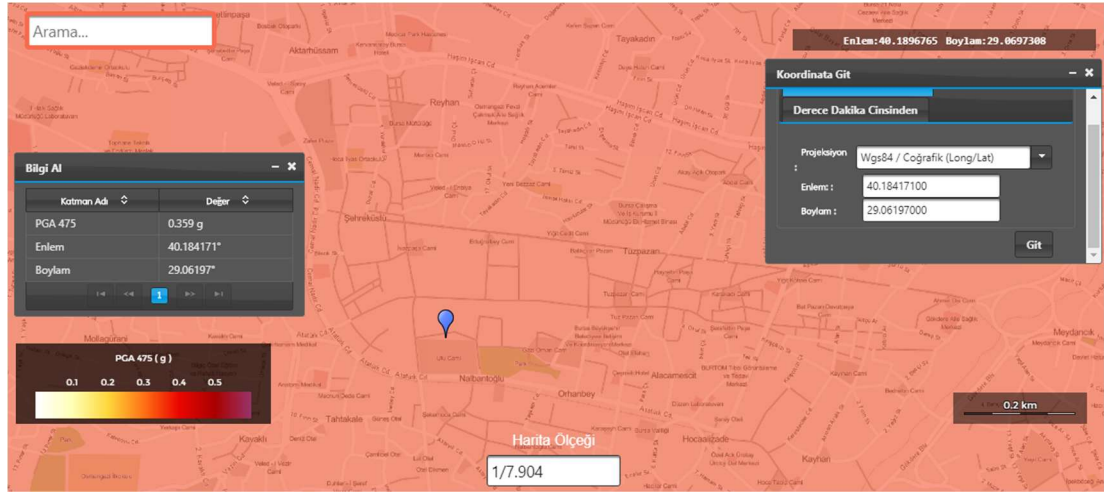
$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (T_L \leq T) \quad (2.3)$$

Elde edilen bu değerler ile yatay elastik tasarım spektrumu oluşturulur. (Şekil 2.4) Düşey deprem etkisinin göz önüne alınacağı durumlarda da TBDY 2018'de belirtildiği gibi benzer adımlar takip edilerek düşey elastik tasarım spektrumu elde edilir. Bu çalışmada düşey deprem etkileri göz önüne alınmayacaktır.



Şekil 2.4 : Yatay elastik tasarım spektrumu (TBDY, 2018). [17]

Çalışma kapsamında incelenecek Ulucami minaresinin bulunduğu koordinatlar Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Tekrarlanma periyodu 475 yıl olan, 50 yılda aşılma olasılığı %10 luk seyrek deprem yer hareketine göre Deprem Düzeyi 2 alınmıştır. Zemin sınıfı ZC olarak alınmış ve bu bilgiler eşliğinde çıkartılan rapor değerleri kullanılarak yatay elastik tasarım spektrumu elde edilmiştir. Sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş sınırı olan T_L değeri 6sn olarak alınmıştır. (Şekil 2.6)



Şekil 2.5 : Ulucami rapor sorgulama ekranı. [18]

$$S_S = 0.861 \quad S_1 = 0.229 \quad PGA = 0.359 \quad PGV = 21.969$$

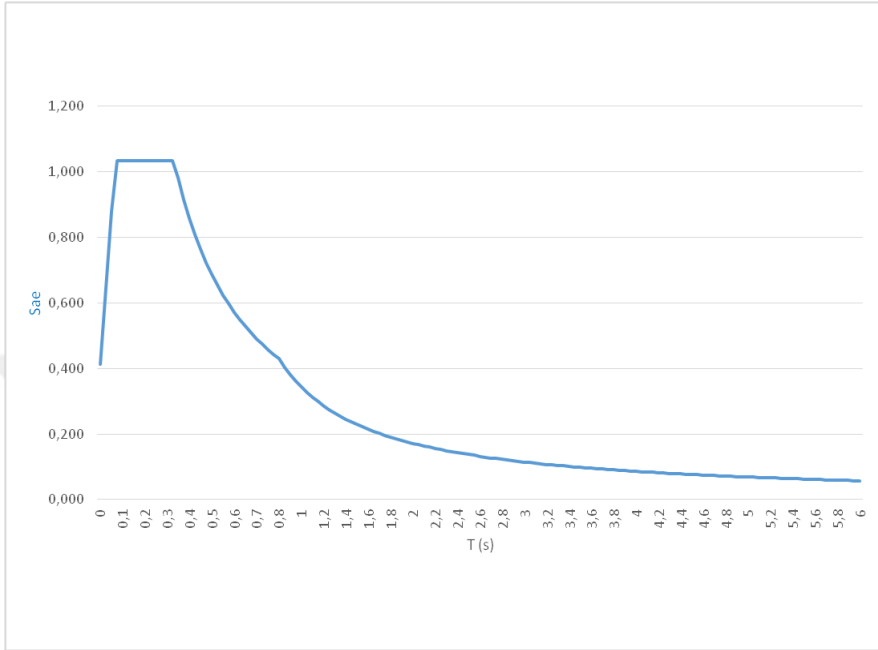
Yerel Zemin Sınıfı ZC ve S_S değerleriyle elde edilen $F_S = 1.2$

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve S_1 değerleriyle elde edilen $F_1 = 1.5$

$$S_{DS} = S_S F_S = 0.861 \times 1.2 = 1.033$$

$$S_{D1} = S_1 F_1 = 0.229 \times 1.5 = 0.344$$

$$T_A = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 0.066 \text{ sn} \quad T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 0.332 \text{ sn}$$



Şekil 2.6 : Ulucami koordinatlarına göre elde edilen yatay elastik tepki spektrumu.

Elde edilen tepki spektrumu ileriki analiz adımlarında deprem kaydı ölçeklendirme işlemlerinde kullanılmıştır.

2.3 Bursa'da Meydana Gelmiş Tarihi Depremler Ve Minare Hasarları

Ülkemizin deprem kuşağında yer almasıyla birlikte aktif fay hatları üzerinde bulunan Bursa şehri günümüze kadar birçok deprem geçirmiştir. Bu depremlerden şehirde en büyük hasara neden olan ve buna bağlı olarak can ve mal kaybının olduğu deprem 1855 Bursa depremleridir.

Tarihi süreçte Bursa'da mevcut ve ulaşılabilen bilgilere göre çok şiddetli ya da altı şiddetinden büyük olarak tanımlayabileceğimiz otuz civarında depremin meydana geldiği tespit edilmektedir. Bu depremler aletsel ölçümlerin olmadığı dönemlerde gerçekleşmiş depremler olup deprem sayısı ve şiddeti konusu kaynaklara göre farklılık gösterebilmektedir. [19]

Eski eserlerde tarif edilen M.S. 33 yılında İznik ve Bursa civarında etkili olan deprem, M.S. 120 yılında İznik ve Bursa başta olmak üzere Güney Marmara'da etkili olan deprem, M.S. 123 yılında Erdek'de etkili olan deprem, M.S. 262 yılında olan deprem, M.S.358 yılında İzmit'i tamamen yıktığı anlatılan deprem, M.S. 362 yılında olan deprem ve yine M.S. 368 yılında İznik'te hissedilen deprem adı geçen etkili, tarihi depremlerdir. Bu kayıtlarda kentlerin depremden nasıl ve ne derece etkilendiği, depremin şiddeti tanımlanmaktadır. Bursa çevresinde gerçekleşen bu depremlerde Bursa'nın nasıl ya da ne kadar etkilendiğine dair kesin bir bilgi yoktur fakat deprem şiddetinin izlendiği bu adı geçen bölgeler Bursa şehrine yakın olduğu için bu depremlerden Bursa'nın da ciddi anlamda etkilendiği düşünülmektedir. [20]

Takip eden yıllarda ise 1417, 1674 yılında meydana gelmiş Bursa merkezli VII şiddetindeki depremler, 1851 yılında Bursa-M.Kemalpaşa'da meydana gelen VIII ve VII şiddetlerinde iki deprem olmuştur. Ardından Bursa tarihindeki en yıkıcı ve etkili depremlerden olan IX şiddetinde 28 Şubat 1855 tarihli deprem sonrasında da 11 Nisan 1855 yılında meydana gelmiş olan X şiddetindeki ikinci büyük deprem olmuştur. Daha sonraki yıllarda ise şiddeti VI ve üzeri olarak belirlenen ve merkezi Bursa olan 1860, 1863, 1866, 1871, 1876, 1878, 1881, 1887, 1894, 1899 yılları depremleri meydana gelmiştir. [21,22]

Bu depremler haricinde merkez üssü Marmara Denizi olan bazı büyük depremlerden de Bursa şehri etkilenmiştir.

Merkez üssü Marmara Denizi olan bir deprem, 10 Mayıs 1556 tarihinde İstanbul ve Bursa'da hasara sebebiyet vermişti. Bursa'nın 20 Mayıs 1556 tarihli kadı sicilinde bulunan bilgiler, şehirdeki Ertuğrul Cami'sinin minaresinin deprem sırasında yıkıldığını ve minare kalıntılarının ortadan kaldırılmasını öngören bir karara varılmış olduğu bilinmektedir. [23]

22 Mayıs 1766 tarihinde yıkıcı gücü üst seviyede olan bir deprem oldu. Merkez üssü Marmara Denizi'nin doğu bölümünde olan bu depremin, Bursa ve diğer bölgelerdeki yapılar üzerinde büyük hasara neden olduğu söylenmektedir. Esas büyük hasar Bursa'daki Emir Sultan Camii ve türbesindeydi. Öyle ki depremden sonra bu büyük ibadet yerinde dua etmek imkansız hale geldiği belirtilmiştir. [23]

Bursa'da meydana gelen felaketlerden en büyüklerinden biri olan ve hakkında en fazla belge ve çalışma bulunan deprem 1855 yılında ardı ardına yaşanan iki büyük deprem felaketidir. Bu depremde tarihi eserlerin yanı sıra birçok ev ve dükkan gibi binalar da büyük ölçüde hasar görmüş ve bir kısmı da tamamen yıkılmıştır. [19,24]

28 Şubat 1855 Depremi

28 Şubat 1855 yılında Çarşamba günü meydana gelen ve “küçük kıyamet” olarak adlandırılan ilk depremin merkez üssü Bursa'dır ve birinci derecede Bursa'yı etkilemiştir. Depremin etkisi bazı kaynaklarda “bütün yapıları titreştiren ve yıkılmaların başlamak üzere olduğunu hissettiren 15-20 saniye süren dikey sallantılar gerçekleşir” şeklinde ifade edilmiştir. Depremin artçı sarsıntılarının ise Cumartesi gecesine kadar sürdüğü kaydedilmiştir. [19]

Meydana gelen bu depremin şiddeti IX olarak belirlenmiştir. [25]

İlk depremde merkeze bağlı kısımlarda 300'e yakın kişi hayatını kaybetmiştir. Deprem, Bursa'nın kendine özgü abidevi yapılarını büyük ölçüde yıkıma uğratmış, evlerin çoğu harap olmuş veya hasarlanmış tek bir sağlam ev kalmamıştır. Deprem en fazla batı bölgesi ve kuzey kasabaları zarara meydana getirmiş, şehrin alçak ve çukur kısımlarında daha etkili olmuştur. Depremin sarsıntıları İstanbul'da da hissedilmiş ve bazı yapılarda küçük çapta hasarlar meydana getirmiştir. [19,24]

Bursa'da mevcut ve çoğu kagir olan 125 adet minareli cami ve mescitten birkaçı yıkılmış, çoğunda ise çatlaklar ve yarıklar meydana geldiği bildirilmiştir. İlk verilere göre bunlar arasında yirmi kadar caminin minaresinin sağlam kaldığı; diğerlerinin ise çatlamış ya da yarılmış olduğu haber verilmiştir. Daha geç tarihli bir belgede ise

camilerin çoğunun minarelerinin yıkıldığı; kubbelerinin ve makber türbelerinin ise sakatlandığı; diğer binaların çoğunun da yine sakatlandığı haber verilmiştir. A. Muhtar Paşa ise ilk depremde bütün minarelerin şerefelerinden yukarlarının yıkıldığı, Ulucami'nin bazı kubbelerinin çöktüğünü ve kagir binalardan sağlam kalan olmadığını belirtmiştir. [19]

Deprem sonrası halka yardım için nakdi yardım yapılması, hayrat kamu ve özel binaların durumlarının belirlenip ihtiyaçlarının giderilmesi için her bir yapı için ayrı ayrı defterler düzenlenerek tamirlerinin yapılması ya da tehlikeli durumda olanların ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Bu konularda hızlı hareket ederek somut sonuçlar alamadan, 42 günlük süre ardından ikinci büyük deprem meydana gelmiştir. Bu depremden sonra ise sıkıntılar daha da katlanmış deprem sonrası olan yangınların da eklenmesiyle felaketin boyutları artmıştır. [19]

11 Nisan 1855 Depremi

11 Nisan 1855 tarihinde gecesinde meydana gelen ikinci deprem bazı kaynaklarda “Memleket güya bir şiddetli fırtınada iki büyük dalga arasında kalan gemi gibi sallanır ve binalar bir iki arşın ileri ve geri gidip gelir olmuş. Bu veçhile hareket-i arz iki dakika kadar sürmüştür” şeklinde kaydedilmiştir. Deprem sırasında büyük gürültünün koptuğu ve yerlerden sular çıktığından da bahsedilmektedir. [19]

Şiddeti X olarak belirlenen depremde faylanma $L=20$ km, etkilediği alan ise $r=250-300$ km 'dir. [25]

11 Nisanda meydana gelen bu depremin Türkiye'de ve Bursa'da yaşanan en şiddetli ve dehşetli depremlerden biri olduğu daha dar bir bölgeyi etkilemiş olmakla beraber meydana gelen yıkımın, 28 Şubatta olan ilk depremden de fazla olmasından anlaşılmaktadır. Deprem etkisinin yanı sıra oluşan yangınlarla da felaketin boyutu artmıştır. 2000'den fazla kişinin hayatını kaybettiği depremde daha önceki depremde hasar alan fakat yıkılmayan camiler, türbeler, han ve hanelerin tamamı harap olmuş ve yıkılmış, sağlam yapılarda ise çatlaklar oluşmuştur. Şehre gelen suların yolları yıkılmış ve sular kesilmiştir. Dört yüz elli yıllık dayanıklılıklarıyla meşhur olan Subaşı ve Urganlı köprüleri tamamen yıkılmıştır. [19,24]

Sultan Osman ve Orhan türbeleri enkaz yığına haline gelmiş; ayrıca birçok cami ve türbe ile kırk civarında Tekke harap olmuş ya da yanmıştır.

- Sultan Orhan Gazi Camii minaresi şerefesine kadar tamamen yıkılmış ve alt tarafı tahrip olmuş ve yanında bulunan okul yıkılmış, imaret ve ambar da kısmen hasar görmüştür.
- Ulucami bu depremde en fazla hasara uğrayan yapılardan biridir. İki minaresi de şerefesinden yıkılmış, cami kubbelerinde çatlaklar ve hasarlar meydana gelmiş ve yapının bir kısmı yıkılmıştır.
- Emir Sultan Camii fazla zarar görmemiş ve minarelerinde çatlaklar meydana gelmiştir, imaret ve ambarı yıkılmış, medresesinde hasarlar meydana gelmiştir.
- Çelebi Mehmed Camii minaresi şerefesine kadar yıkılış ve alt tarafında çatlaklar oluşmuştur.
- Muradiye Cami'sinde küçük çaplı hasarlar oluşmuş, minaresi ve türbesinin kubbesinde çatlaklar meydana gelmiştir.
- Hüdavendigâr Camii minaresi şerefesinin üst tarafından yıkılmış, türbesinin sağ duvarları yıkılmış diğer kısımlarında fazla hasar olmamıştır.
- Üftade Cami'nde çatlaklar meydana gelmiş ve minaresi şerefesi üst tarafından yıkılmıştır.
- Kayhan(Kayağan) Camii ve Hayreddin Paşa Camii de tamamen yıkılmış, minareleri de şerefelerinden itibaren yıkılmıştır.
- Yıldırım Camii ilk depremden fazla hasar görmemiş, ancak minaresinin yarısından yukarısı yıkılmıştır.
- Yukarıda bahsedilen bu camilerin dışında, Hacılar Camii, Şehadet Camii, Alaaddin Camii, Hamzabey Camii, İvaz Paşa Camii, Altıparmak Camii, Araplar Camii, Başçı İbrahim Camii, Davutkadı Camii ve Şeyh Konevi Camii belirli ölçülerde hasara uğramışlardır. [24,26]

Bursa'da birçok mescit olup çoğu depremde hasar görmüştür. Akbıyık (Veled-i Harir) Mescidi, Enbiya Mescidi, Nakkaş Ali Mescidi, İbn-i Bezzaz (Reyhan) Mescidi ve Hacı Evrenos Mescidi önemli olanlarıdır. Adı geçen bu mescitler gerekli onarımları yapıldıktan sonra kullanılır duruma getirilmiştir. [24]

İlk belirlemelerde detaylıca hazırlanan keşif raporlarında kayıt altına alınmış, adı geçen tarihi eserler eski mimari tarzına uygun olarak yeniden yaptırılmış ve zaman zaman gördüğü ek tamiratlarla günümüze kadar varlığını sürdürmüştür. [24]

Gökmenzade Hacı Efendi tam adıyla Gökmenzade Seyyid Hüseyin Rıfat Efendi'nin yazdığı "İşaretnüma" adlı çalışması Türk tarihinde bilimsel veriler ve unsurlar içeren ilk deprem tarihi kitabıdır. Bu kitapta özellikle 1855 yılında meydana gelen "küçük kıyamet" diye adlandırılan Bursa merkezli deprem başta olmak üzere birçok deprem hakkında bilgi vermektedir. Burada yazar "eğer artçılardan biri ilk deprem kadar şiddetli olsaydı, Uludağ parça parça olur, dere-tepe dümdüz olurdu" ve "3600 nüfus telef oldu dediler ise de, hakikat üzere adedi malum olmadığı" cümleleri ile anlattığı depremde, 150 cami minaresinden sadece 3-4 minarenin ayakta kaldığını belirtmiştir. [27]

Yine başka bir kaynakta ise 600 minarenin yıkılmış olduğu yazmaktadır. [28]

Bursa'da yer alan minareler incelendiğinde minarelerin birçoğunun 1855 yılındaki depremde yıkıldığı ve daha sonra yeniden inşa edildiği bilgisi eserlere ait kitabelerden ve yazılı kaynaklardan anlaşılmaktadır. Depremde zarar gören minarelerin aynı türde hasar görmesini engellemek için yapılan tamirat ve rekonstrüksiyonlarda boy/gövde çapı oranının daha küçük olduğu görülmüştür.

1855 depreminden sonra uzun süre küçük depremler olduğu anlaşılıyor. Bu depremden yaklaşık 5 yıl sonra 18 Nisan 1860 tarihinde de sarsıntı olmuştur. Bursa valisinin gönderdiği rapora göre "birincisi şiddetlice ve diğerleri birbirinden hafif üç defa hareket-i arz vuku bulmuş ise de hamdolsun bir güne mazarrat olmamış idi" olarak kaydedilmiştir. [26]

Bursa'da meydana gelmiş depremlerden aletsel dönemde olan 2 Mayıs Harmancık depremidir. MS=6.1 büyüklüğündedir. Harmancık, Bursa'nın en güneyinde yer alan Kütahya ile Balıkesir sınırlarının kesiştiği noktada bulunan bir bölgedir.

Deprem ve yangın gibi felaketlerin yanısıra, günümüze kadar ulaşan kültür varlıklarımızı tarih boyunca tahribine sebep olan bir başka konu da gerçekleşmiş yağmalardır. Timur'un oğlu 1402-03'de Ankara Savaşı'nda Osmanlı Sultanı I.Bayezid'i yenilgiye uğrattıktan sonra ordusunun bir kolu Bursa şehrine yürümüş ve şehri yıkıp yağmalamıştır. 1326-1402 arasında kalan döneme ilişkin, günümüze Bursa'dan hiçbir belgenin ulaşmamış olmasının sebebi yapılan bu yağma olduğu

düşünülebilir. Yine aynı şekilde Bursa'nın büyüyen Osmanlı devletinin başkenti olduğu dönemde (1326-1361), inşa edilmiş olan mimari yapıların, günümüzde görülmemesinin nedeni de aynıdır. [23]

Aynı şekilde 1413 yılında da Karamanoğulları Bursa'yı kuşatmış yakıp yağmalamışlardır. Bu iki yağma olayından sonra şehri tekrar kurmuşlardır. Bu durum da İspanyol seyyah Pero Tafur'un 1437'deki Bursa'yı ziyaretinden "diğer şehirlerden daha büyük ve daha gelişmiş, şehirde yaklaşık 4000 kişi oturuyor, Türkiye'de böylesine büyük, kalabalık ve zengin başka bir şehir olduğun düşünmüyorum" şeklinde bahsetmiştir. [23]

Bursa, 1607-09 yıllarında Celali isyanlarında yine saldırıya uğramış ve bu saldırı sırasında Ermeni seyyah Polonya'lı Simeon arkadaşlarıyla Olimpos Dağı'na tırmanışını aktarırken "Oradan Celalilerin şehrin yarısını yakıp yıkmış olduğuna şahit olduk" satırları yazmıştır. [23]

Celali isyanları sonucunda, 1607'de şehrin yarısının yanması dışında seyahatnamelerin belgelediği sonraki yangın 1801 senesinde meydana gelmiştir. İngiliz seyyah William George Browne Haziran 1801 ve Haziran 1802 yıllarında olmak üzere iki defa Bursa'yı ziyaret etmiştir. Bu iki ziyareti arasında şehri korkunç bir yangının yok ettiğini, bölge yerlilerinin yanan yerlerin en kaliteli, şık ve değerli yerler olduğunu, aynı zamanda ahşap kadar taş yapıların da bu yangınlardan fazlaca etkilendiği ifade ettiklerini yazmıştır. [23]

1804'te şehri ziyaret eden Alman seyyah ve araştırmacı, Joseph von Hammer yangını yazılarında şu şekilde kaleme almıştır; "1800'deki (Aslında 1801) korkunç yangın şehrin üçte ikisini silip süpürmüştü ve yıkıntılar tamamen onarılamamıştı. Kalenin tepesinden, yeni çatılı evlerin miktarına bakınca, bu felaketin yol açtığı zarar görülebiliyordu. Nerdeyse tamamının çatılarından olduğu minareler, bu korkunç yangının "anıtları"ymışçasına yükselen sütunlar gibi gözükyor." Şeklinde ifade etmiştir. Yazdığı ikinci bir pasajda da yine Bursa'nın en eski ve önemli yerleşim yerlerinden biri olan, Emir Sultan Mahallesi'nin de, 1801'de yok olan yerler arasında olduğunu not düşmüştür. [23]

2.4 Bursa Ulucami Ve Minareleri

Şehir merkezinde bulunan caminin yapımına 1396 yılında başlanmış 1400 yılında tamamlanmıştır. Yıldırım Bayezid tarafından yaptırılan cami, Timur ve daha sonra Karamanoğlu Mehmet Bey tarafından yaptırılmıştır. Daha sonraki yangın ve depremlerden dolayı da cami bir çok defa onarım ve değişiklik görmüştür. Selçuklu mimarisinden Osmanlı – Türk sanatına geçişin, yeni doğmakta olan büyük Türk İmparatorluğunun ilk büyük eseridir. [29]

Dış ölçüleri yaklaşık 55x69 metre boyutlarında kesme taşlarla kaplı, sağlam bir yapı olan Ulucami çok kubbeli camilerin en klasik ve abidevi olanıdır. Caminin üzerindeki kubbelerin yükseklikleri birbirinden farklıdır. Enine düzenli dikdörtgen planlı yapının kalın duvarlarla çevrili on iki eş ayak üzerine pandantifler aracılığıyla geçişin sağlandığı asıl ibadet alanı, yirmi kubbe ile örtülmüştür. Orta sıranın, kuzeydeki asıl kapısından itibaren ikinci bölümün üstünde aydınlık feneri bulunan camlı kubbe bulunmaktadır. Bunun altındaki şadırvan, esere çekicilik kazandırır. Doğu, batı ve kuzey cephelerdeki kapılardan ortadaki camiye girilir.

Doğu ve batı köşelerinde iki minaresi bulunmaktadır. Bu minarelerden batıdaki cami duvarına bitişiktir. Sekizgen kaidesinin güneybatısındaki mermer kitabede Yıldırım Bayezid'in emriyle yapılmış olduğu yazmaktadır. Batıdaki minarede şerefeye çıkış iki yolludur, birinin kapısı cami içine diğerinki cami avlusuna açılır. Taş kaide üzerinde tuğla gövde bulunmaktadır. Külâhının son hali tuğla üzeri sıvadır.

Doğudaki minare ise Yavuz Sultan Selim zamanında yaptırılmış ve cami beden duvarından ayrıdır. Doğu minaresinde şerefeye çıkış tek merdiven ile sağlanmıştır. Kare kaide üzerine devam eden tuğla gövde bulunmaktadır. Külâhı batı minaresinde olduğu gibi tuğla üzerine sıvadır. [29]

1855 depreminden sonraki kayıtlara göre Ulucami bu depremde ağır hasar alan yapılardan biridir. Mihrab kubbesi sırasında bulunan kapıya kadar üç kubbeye önemli çatlaklar vardır. Diğer kubbeler de zedelenmiştir. Sağ tarafındaki minarenin altında bulunan mektep yıkılmıştır. İki minaresi de şerefesinden yıkılmış, cami kubbelerinde çatlaklar ve hasarlar meydana gelmiş ve yapının bir kısmı yıkılmıştır. [26]

Eski Eserler Sevenler Kurumu'nun 1961 yılında yaptırdığı restorasyon çalışması notlarına göre büyük onarımlar 1567, 1572, 1668, 1670, 1742, 1815, 1855, 1961 tarihlerinde yapılmıştır;

- 1571 onarımında mihrap nakışları onarılmıştır.
- 1668'de batı minaresinin tepesindeki aleme yıldırım isabet etmiş ve külahı da yakmıştır.
- 1815'te Sultan Mahmut onartmış ve kendi eli ile de yazdığı artistik bir eser olan levhayı Ulucamiye hediye etmiştir.
- 1855 depreminde caminin 18 kubbesi çökmüş, mihrap ile batı minaresi dibindeki kubbe kalmış, sonra hemen onarıma başlanmıştır.
- 1889'da batı minaresi dibindeki bir dükkanda çıkan yangınla minarenin tepesindeki külah yanmış (o zaman minarelerin tepeleri ahşap ve üstü kurşun ile örtülü) oradan bir ateş doğu minaresine sıçramış ve onun da tepesini yakmıştır. Tamirlerinde bugünkü kagir şekli ihdas edilmiştir.
- 1959-61 onarımı bir restorasyondur. Dış bedenindeki kireç sıvası kaldırılmış ve büyük kapı da aslı gibi onarılmıştır.

Arşivlerdeki raporlarından birinde sadece merdivenin başlangıcı belli olan iki minarenin birçok defa yıkılmış yerine yenisinin yapılmış olduğu yazılmaktadır. [29]

2.4.1 Bursa Ulucami doğu minaresi

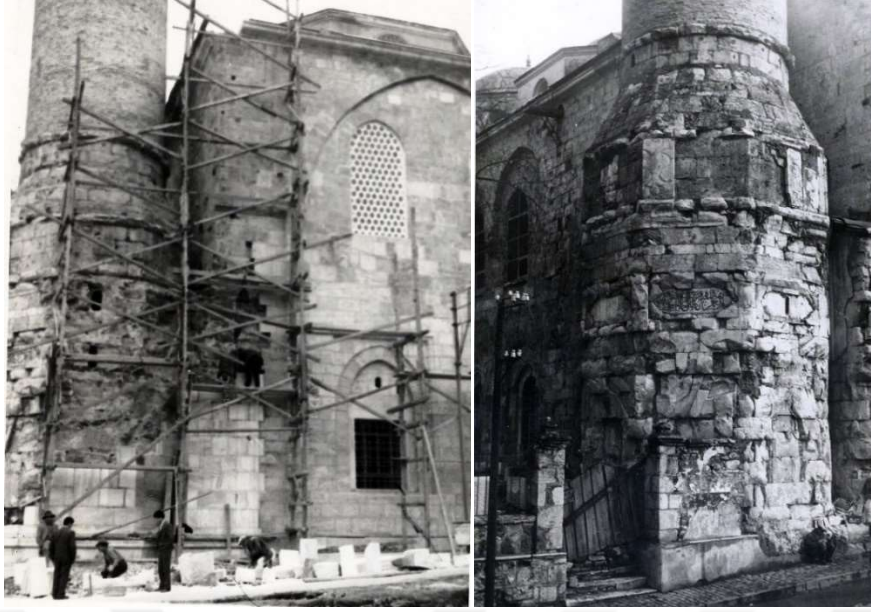
Bursa Ulucami doğu minaresi ana yapıdan 1m kadar ayrı konumdadır. (**Şekil 2.7**) Minare tek şerefelidir. Şerefeye çıkış kapısı kare kaideden açılmaktadır. Şerefeye çıkış için çekirdekli tek merdiven yolu vardır.



Şekil 2.7 : Ulucami doğu minaresi görünüşü.

Minare belirli dönemlerde farklı onarımlar geçirmiş, çoğunluk kısmının 18.yy larda yapılan onarımlardaki şekliyle günümüze kadar geldiği düşünülmektedir.

Kaidesi taş ve harçtan yapılmıştır. Batı minaresinde olduğu gibi doğu minaresinin de kadiesinin taş olan malzemesinin üzeri mermer kaplanmıştır. (**Şekil 2.8**) Minarede toplamda 109 basamak bulunmaktadır. Basamak yükseklikleri değişkenlik göstermekte olup 47. basamaktan sonra artış göstermektedir.



Şekil 2.8 : Ulucami batı minaresi kaide onarımı görüntüleri.

Yerinde yapılan gözlemlerde minarenin 15. basamak seviyesine kadar tüm elemanlarının taş olduğu görülmüştür. Sonraki kısımda gövde kısmına geçilmekte ve bu kısım tuğla olarak devam etmektedir. Merdiven-çekirdek sistemi malzemesi de bu seviyeden sonra tuğlaya dönmektedir.

Tuğla kalınlıkları 2-3-4 cm olup yer yer 5-6 cm'ye ulaşmaktadır. Harç kalınlığı ise 1-4 cm arasında değişiklik göstermektedir. Çekirdekteki tuğla kalınlığı 4-5 cm ve harç kalınlığı 3-4-5 cm civarındadır. Minare boyunca küçük lokal onarımlar tespit edilmiştir.

Minare içinde 38. ve 58. basamak seviyesinde 1 sıra taş hatıl görülmektedir.(**Şekil 2.9**)

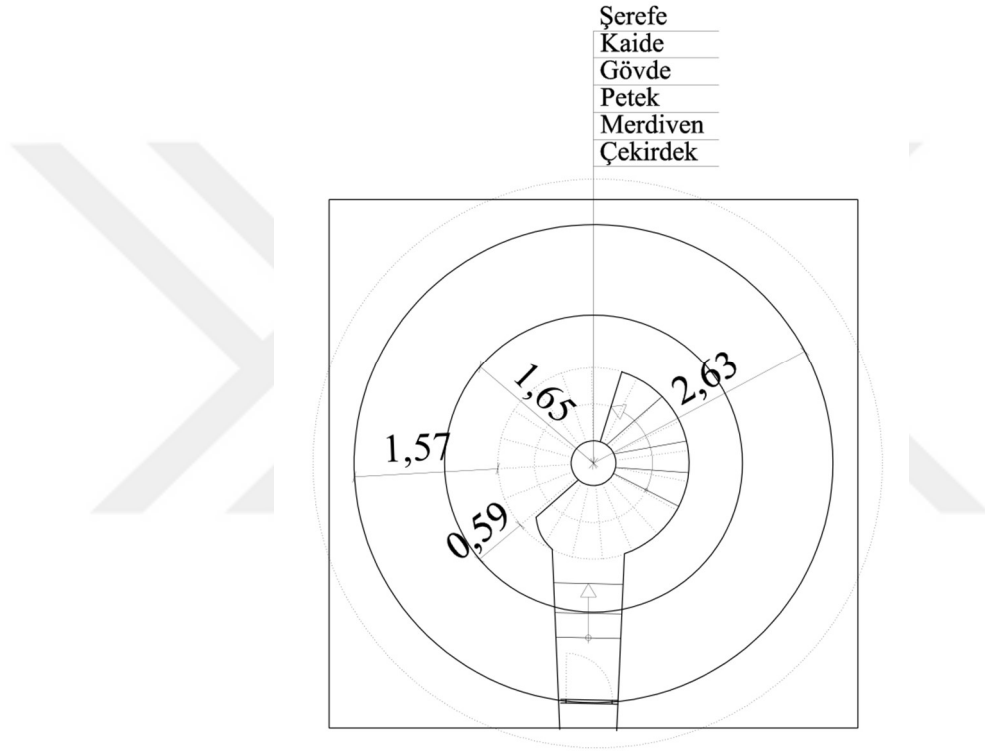


Şekil 2.9 : Ulucami doğu minaresi içindeki taş hatıllar.

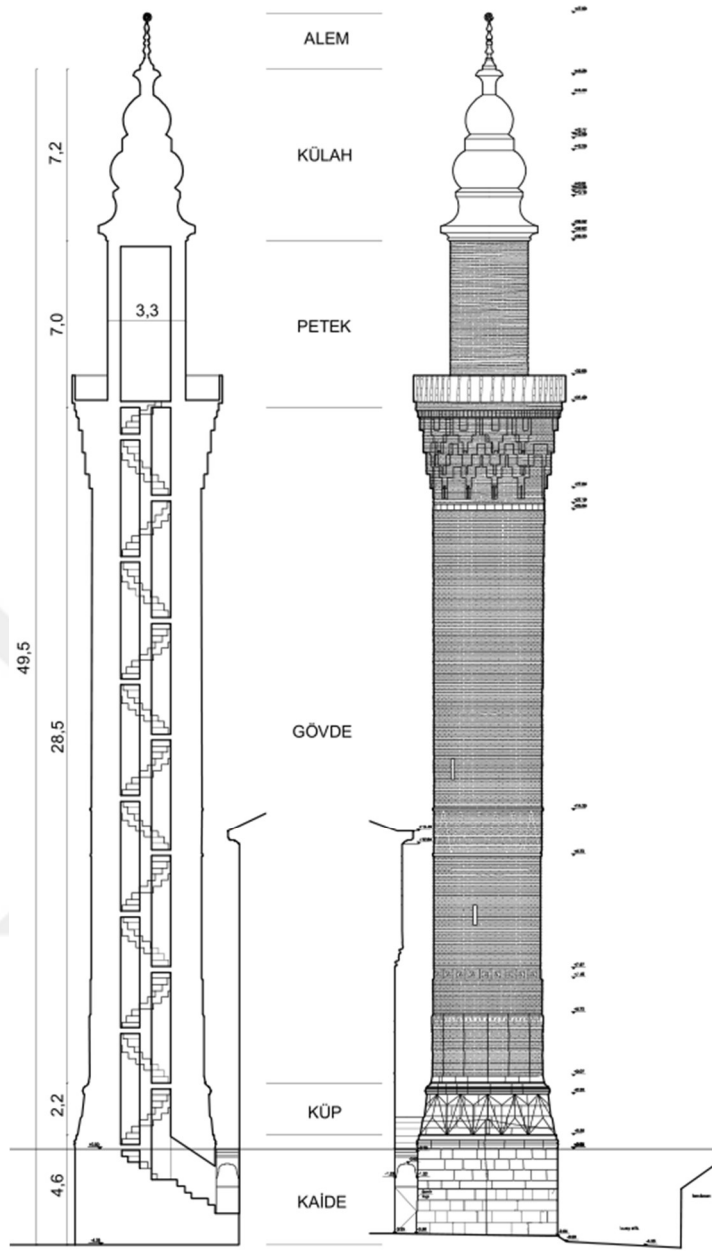
Duvarları desteklemek amacıyla yer yer ahşap yatay elemanlar yerleştirildiği görülmektedir. Basamak içinde ve dışında farklı yönlerde yerleştirilmiştir. Ahşap hatılların düşeydeki aralıkları 1,2 m olarak ölçülmüştür. Bu hatıllar dış duvardan çekirdeğe kadar uzanmaktadır. 55. basamaktan sonra bulunmamaktadır.

Minare külahı barok tarzı boğumlu mimariye sahiptir. Malzemesi tuğla üzeri svadır.

Minareye ait plan Şekil 2.10'da yer almaktadır. Minarenin mevcut durumunun rölöve kesitleri Şekil 2.11'de gösterilmiştir. [29]



Şekil 2.10 : Ulucami doğu minaresinin planı. [29]



Şekil 2.11 : Ulucami doğu minaresinin kesiti – Ulucami doğu minaresinin görünüşü.
[29]

3. YAPISAL MODELLEME YAKLAŞIMI

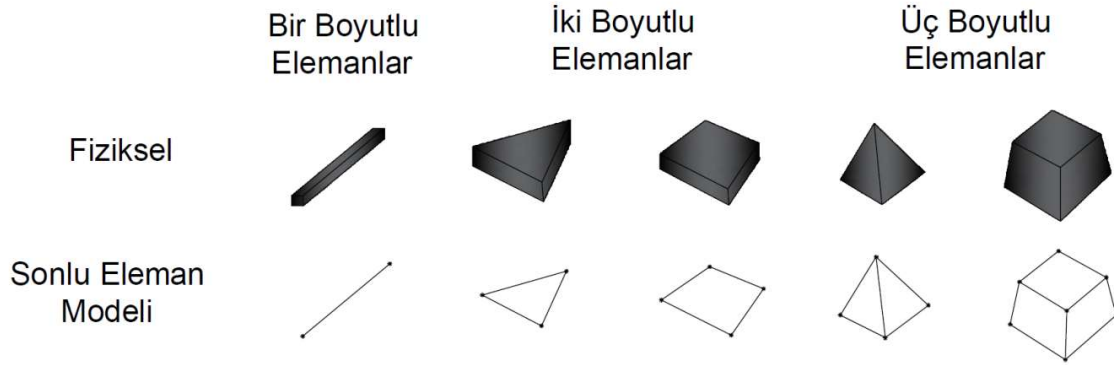
Yapılan çalışmalara göre dünya nüfusunun %50'si deprem bölgesinde yaşamakta ve meydana gelen depremlerde birçok yapı hasar almaktadır. Bunlardan tarihi yığma yapılar hem kültürel miras değeri taşımakta hem de kullanım alanlarına göre herhangi bir göçme durumunda birçok insanı can kaybı yoluyla etkileyebilmektedir. Bu sebeple tarihi yapıların mevcut durumda düşey yükler ve deprem yükleri altındaki taşıyıcı sistem güvenliğinin belirlenmesi, yapıda meydana gelen hasarların yorumlanması ve önerilen onarım ve güçlendirme müdahalesinin yeterliliğinin belirlenmesi önem taşımaktadır.

Değerlendirme kapsamında ilk olarak yapının taşıyıcı sistem modeli oluşturulur ve belirlenen koşullar altında yapısal analiz yapılarak elde edilen sonuçlar yorumlanmaktadır. Tarihi yapıların çok çeşitli tür ve özelliklere sahip olması sebebiyle yapıya ait malzeme ve yapısal özelliklere bağlı olarak farklı modelleme teknikleri kullanılmaktadır. Bu tür yapılar modellenirken malzeme ve taşıyıcı sistem elemanları ve bunların birleşimleri için basitleştirici kabuller yapılması gerekmektedir. Elde edilen sonuçlar, modelin gerçekteki durumuna yakınlığı ve yapılan kabullerin uygunluğu oranınca yapı gerçek davranışını yansıtmaktadır. [30]

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu eleman yönteminde, statik ve dinamik yapısal davranışın analizinde, malzemeye ait gerilme ve şekil değiştirme arasındaki bağıntıyı, mesnet şartlarını ve varsa başlangıç koşullarını temsil eden denklemler kullanılmaktadır. Bu yöntem, gelişmiş sayısal yöntemlerin kullanılarak daha karmaşık analizlerin yapılmasını sağlayan yazılımlar yardımıyla daha da ayrıntılı bir yapısal analiz yapmaya olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda faydalı sonuç elde etmek için etkin modelleme büyük önem taşımaktadır. Sonlu eleman analizinde, bir boyutlu elemanlar (doğrusal çubuk veya eğrisel elemanlar, kiriş ve kolonlar), iki boyutlu elemanlar (yüzeysel duvarlar, eğrilikli yüzeye sahip kabuklar) veya üç boyutlu katı elemanlar (kalın yapısal

elemanlar) kullanılarak modelleme yapmak mümkündür. (Şekil 3.1) Eleman türünün seçilmesinde taşıyıcı sistem elemanının geometrisi önemli rol oynamaktadır. [30]



Şekil 3.1 : Sonlu eleman türleri.

Bir Boyutlu Sonlu Elemanlar

Çerçeve sistemlerinde de kullanılan çubuk eleman, kullanımı en genel olan elemanlardan biridir. Tarihi yapılardaki yapı elemanlarını modellemek amacıyla, eğilme momenti, kesme kuvveti ve burulma momenti etkisi altında bulunan kiriş elemanlar kullanılabilir. Tarihi yapılarda yapı kararlılığına fazlaca katkıda bulunan gergiler ve kirişler, tek boyutlu çubuk veya kiriş eleman olarak modellenebilir. Küçük çubuk elemanlar birleştirilerek tek boyutlu eğrisel elemanlar oluşturulabilir. (Şekil 3.2)

Bir Boyutlu Sonlu Elemanlar

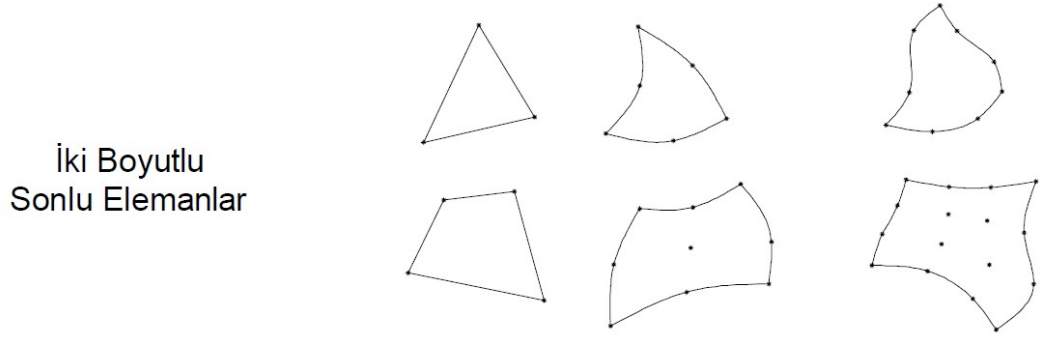


Şekil 3.2 : Bir boyutlu sonlu eleman örnekleri.

İki Boyutlu Sonlu Elemanlar

İki boyutlu elemanlar levha, plak ve kabuk eleman olarak incelenebilir. Düzlem içi kuvvetlere ve burulma momentine sahip elemanlar levha olarak adlandırılırken, düzlem dışı kuvvet ve eğilme momenti alan elemanlara ise plak denmektedir. Bu iki eleman birleştirilerek daha kapsamlı olan düzlemsel kabuk eleman tanımlanmaktadır.

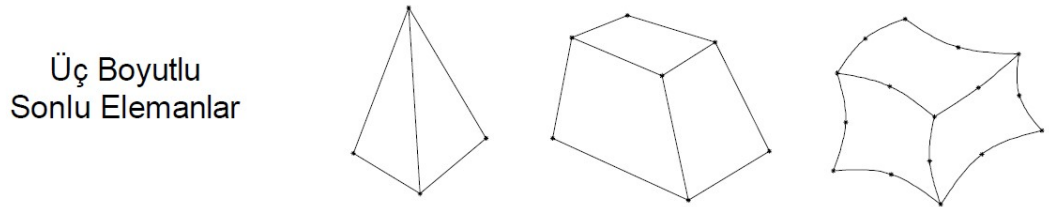
Genellikle denge ve şekil değiştirme şartlarının sağlanması bakımından kabuk eleman yaygın biçimde kullanılmaktadır. İki doğrultuda eğriliğe sahip yüzeysel taşıyıcı sistemler için küçük boyutlu düzlemsel elemanlar birleştirilerek modelleme yapılabilmektedir. (Şekil 3.3)



Şekil 3.3 : İki boyutlu sonlu eleman örnekleri.

Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar

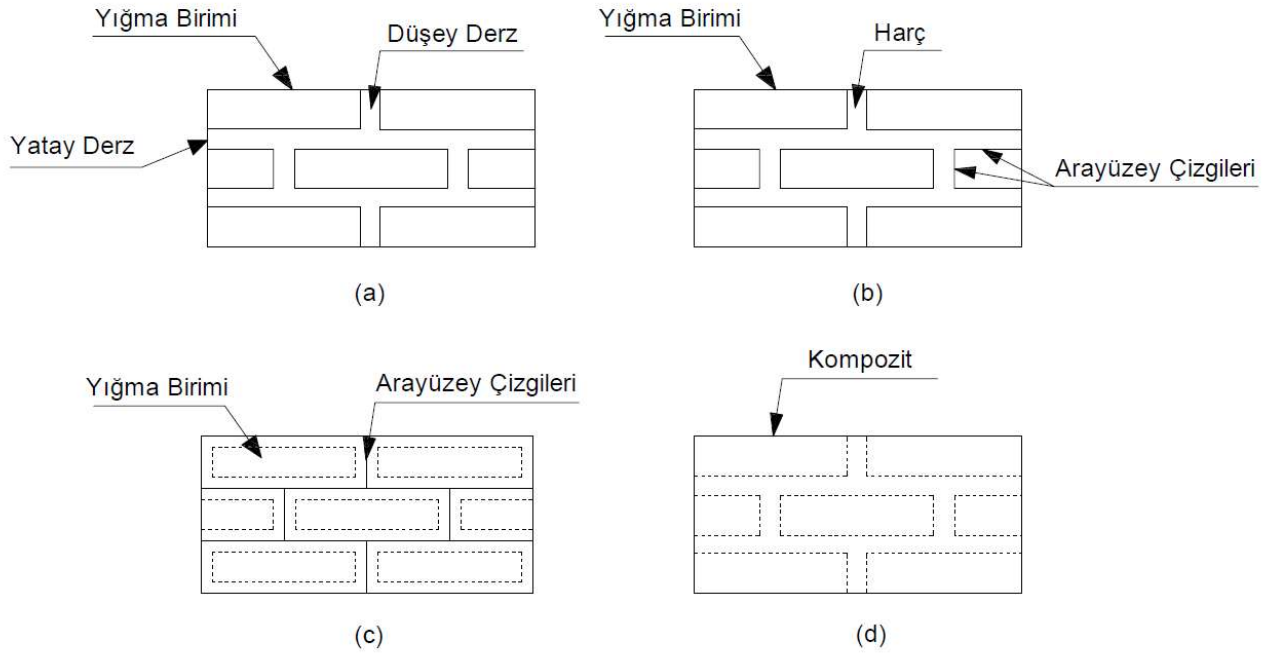
Katı elemanlar, yapıların üç boyutlu olarak modellenmesinde kullanılan, hacimsel sonlu elemanlardır. Taşıyıcı duvar gibi, kalın taşıyıcı elemanlar için kullanılmak üzere bu üç boyutlu hacimsel sonlu elemanlar geliştirilmiştir ve değişik geometrilere tanımlanabilmektedir. (Şekil 3.4)



Şekil 3.4 : Üç boyutlu sonlu eleman örnekleri.

3.2 Yığma Yapı Modelleme Yöntemleri

Yığma yapıların sayısal analizinde kullanılan sonlu elemanlar modeli oluşturulurken taşıyıcı elemanlar farklı tekniklerle modellenebilmektedir. Lourenço (2007) yaptığı çalışmada bu yaklaşımları makro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve ayrıntılı mikro modelleme olarak tanımlamıştır. (Şekil 3.5) [31]



Şekil 3.5 : Yığma yapıların modelleme teknikleri: (a) Yığma birleşim (b)Ayrıntılı mikro model (c) Basitleştirilmiş mikro model (d) Makro model.

Makro modelleme yaklaşımında yığma bir duvar kompozit bir malzeme olarak ele alınmakta ve tüm duvara tek bir malzeme değeri tanımlanarak analiz yapılmaktadır. Basitleştirilmiş mikro modellemede ise kargir elemanlar arasındaki harç derzleri geometrik modelde ihmal edilmekte, yığma birimleri geometrinin bozulmaması için genişletilmiş şekilde modellenmektedir. Yığma birimlerin ara yüzleri çizgiler ile tanımlanmakta ve bu şekilde yığma duvar, potansiyel kırılma-kayma çizgileri ile birbirine bağlanmış bir dizi elastik blok olarak kabul edilmektedir. Ayrıntılı mikro modellemede ise kargir yapıyı oluşturan bileşenler yani yığma birim, harç ve bu yığma birimlerin birleşim yüzelerindeki harç derzleri ayrı ayrı dikkate alınmaktadır. Her bileşen için kendi malzeme tanımı oluşturularak analiz yapılmaktadır. [31]

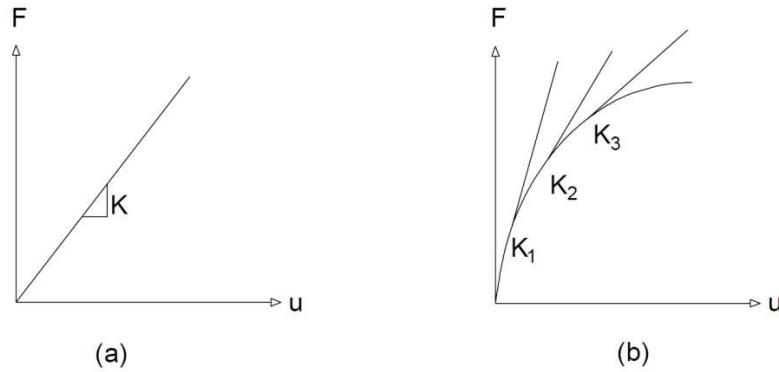
Bu modelleme tekniklerinin biri diğerine karşı tercih edilmemekte ve her birinin farklı uygulama alanları bulunmaktadır. Makro modelleme yapının yeterince büyük boyutlara sahip sağlam duvarlardan oluştuğunda tercih edilebilirken, mikro modelleme daha çok yığma yapı davranışının lokal davranışları hakkında fikir sahibi olmak için kullanılabilir. Ayrıntılı mikro modelleme gerçeğe daha yakın sonuç vermekte fakat modelleme ve analiz süresini çokça uzatması sebebiyle mikro

modellemeye göre daha pratik bir kullanım sunan makro modelleme tercih edilebilmektedir.

Yığılma yapıların doğru mikro veya makro modellemesi, malzemenin kapsamlı bir deneysel tanımını gerektirir. Bu sebeple malzeme özelliklerinin ampirik formüllere dayalı hesabından daha çok, mümkün olduğunca gerçeğe yakın değerlerini elde ederek devam etmekte fayda vardır.

3.3 Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemleri

Mevcut binaların doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri ile değerlendirilebilmektedir. Doğrusal olmayan davranışın doğrusal davranıştan ayrılması, geometriye bağlı büyük şekil değiştirme ya da malzemenin doğrusal olmayan davranışından kaynaklanmaktadır. Doğrusal davranışta sabit rijitlik kabulü yapılırken doğrusal olmayan davranışta rijitlikteki değişim göz önüne alınmaktadır. Doğrusal ve doğrusal olmayan davranış **Şekil 3.6** 'da verilmiştir.



Şekil 3.6 : (a) Doğrusal davranış (b) Doğrusal olmayan davranış.

Doğrusal Analiz Yöntemleri

En yaygın uygulanan yöntem olan doğrusal statik analizin, tek ve çok modlu olan uygulamaları mevcuttur. Tek modlu olan “Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi” ve çok modlu olan “Mod Birleştirme Yöntemi” olarak adlandırılmaktadır. Deprem etkisi, yapının bulunduğu bölgeye ve zemine uygun spektrum ile tanımlanır. Yapının elastik ötesi davranışından oluşan dayanım kapasitesindeki artış ve depremin yapıdan talebinde olan azalma, R_d (Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı) ile hesaba katılır. Yapının elastik ötesi şekil değiştirme yapabilme yani süneklik özelliğine göre deprem yüğü azaltma katsayısı belirlenir. Süneklik özelliği fazla olan yapıda, deprem

yükü azaltma katsayısı da büyük olacaktır fakat buna bağlı olarak, kabul edilebilir hasar düzeyinin de fazla olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. İlgili deprem etkisinde ortaya çıkacak hasarın bu yapıya göre kabul edilebilir olması gerekmektedir. Yığma yapılarda elastik ötesi davranış genellikle sınırlı olduğu için $R_a=3$ olarak önerilir. Ancak, minareler gibi taşıyıcı sistemi izostatik olan sistemlerde $R_a=2$ olarak alınması önerilmektedir. (Şekil 3.7) [30]

Elde edilen deprem kuvvetleri sonrasında yapının depremdeki davranışı, deprem etkisinde ortaya çıkan gerilme ve yerdeğiştirmelerden de yapının en çok zorlanan bölümleri anlaşılabilir. Doğrusal elastik analiz yapıldığı için, genellikle gerilmeler büyük değerlere ulaşsa da yapının doğrusal olmayan davranışı sebebiyle ortaya çıkan yerel ezilmeler, gerilmelerin sınırlı kalmasını sağlar. Meydana gelmesi beklenen gerilmeler azaltılmış deprem etkilerinden, yerdeğiştirmeler ise azaltılmamış deprem etkilerinden elde edilir. [30]

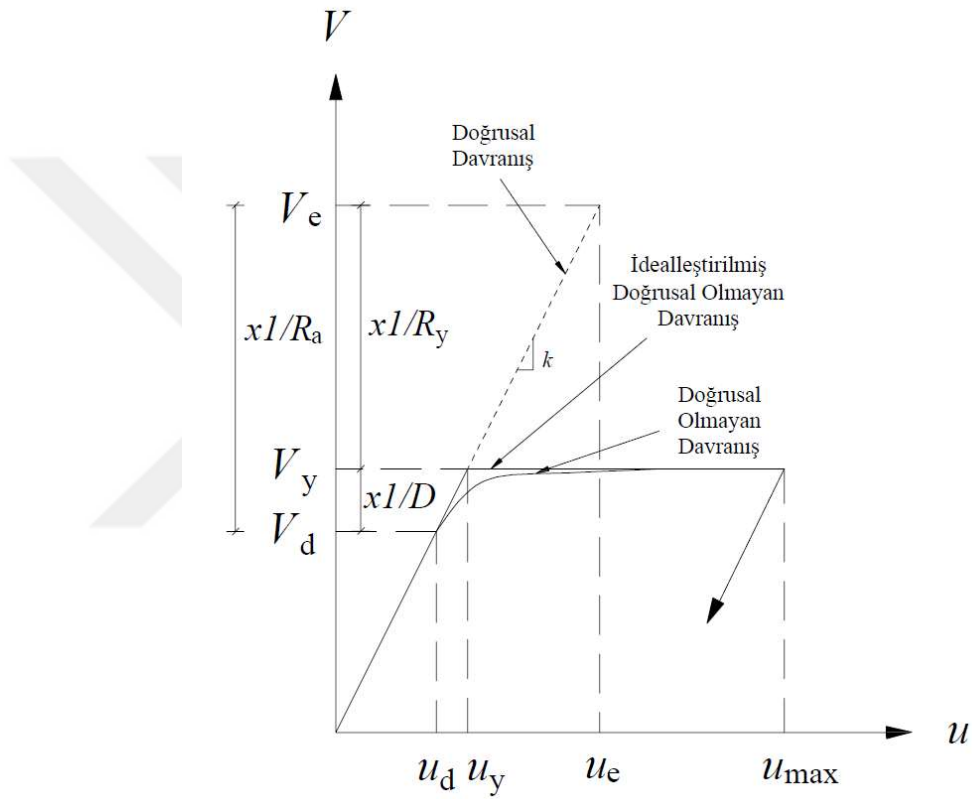
Zaman tanım alanında doğrusal analiz yöntemi ise yapının kütle, sönüm ve rijitlik özelliklerini göz önüne alarak oluşturulan hareket denkleminin, seçilen bir ivme kaydı altında sayısal çözümlemesidir. Yapının bulunduğu yere ve zemin özelliklerine bağlı olarak yapıya ait yatay elastik tasarım spektrumu elde edildikten sonra bu spektruma uygun olarak yeterli sayıdaki deprem kaydı yapıya etkililmektedir. Bu yöntemde de yapının elastik ötesi davranışını göz önüne almak için deprem yükü azaltma katsayısı gerilme ve iç kuvvetlerinin hesabında kullanılırken şekil değiştirme ve yerdeğiştirmeler ise azaltılmamış deprem kuvvetlerinden elde edilir. Bu değerler zamana bağlı olarak hesaplandığı için, hem analiz süresi uzun hem de değerlendirilecek sonuç oldukça fazladır. [30]

Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemleri

Doğrusal olmayan analiz tek modlu ve çok modlu itme analizi ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz olarak mevcut binaların deprem güvenliklerinin belirlenmesi ve yüksek binaların incelenmesi için geliştirilmiştir. Bu analiz yönteminin tarihi binalarda kullanılmasında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. İlk olarak doğrusal olmayan analizin kullanılacağı yapının yeterli süneklik yani elastik ötesi şekil değiştirme yapabilme yeteneği olmalıdır. Tarihi yapılarda süneklik diğer yapılara göre sınırlı olduğu bilinmektedir. Diğer taraftan analiz sonuçlarını en fazla etkileyen parametreler olan analiz ve malzeme özelliklerinin doğru

belirlenmesi, elde edilecek sonuçların doğruya yakın olması açısından oldukça önemlidir. Analizde bu parametrelerin değişim aralığının da incelenmesi gerekir.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap, deprem yer hareketinin etkisi altında taşıyıcı sistemin hareket denklemlerini ifade eden diferansiyel denklem takımının zaman artımları ile adım adım doğrudan integrasyonuna karşı gelir. Bu işlem sırasında, doğrusal olmayan davranış nedeni ile sistem rijitlik matrisinin zamanla değişimi göz önüne alınır.



Şekil 3.7 : Doğrusal ve doğrusal olmayan davranış.

3.4 Malzeme Özellikleri

Anadolu'daki minareler incelendiğinde bölgenin tarih boyunca önemli kültürlerle ev sahipliği yapmış bir bölge olması sebebi ile birçok tekniğin kullanıldığı ve gelişimin sağlandığı görülmektedir. Türk – Osmanlı minare yapısında ise farklı bölgelerde ve dönemlerde farklı malzemelerin ve tekniklerin hakim olduğu görülmektedir.

Yığma yapılarda olduğu gibi minareler de tuğla ve harç, taş ve harç veya almalı yapı olarak taş, tuğla ve harç gibi farklı malzemelerden oluşmaktadır. Bu malzemelerin farklı yerlerden temin edilerek farklı boyutlarda, farklı uygulama

teknikleri ve farklı kalitedeki işçilik ile bir araya getirilmesiyle yapının mekanik özellikleri ve yapısal davranışı oldukça karmaşık bir hal almaktadır.

Tarihi yığma yapılarda test için örnek almak ve materyal özelliklerini belirlemek yığmanın anizotropik yapısından dolayı oldukça zordur. Bu sebeple malzeme mekanik özellikleri izotropik malzeme varsayımı ile tanımlanarak analiz yapılabilmektedir. Bu malzeme değerleri için literatürde yönetmeliklere uygun olarak gerçekleştirilmiş birçok deney bulunmaktadır. Yapılan deneylerde tuğla ve harç mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ayrı olarak ele alınabildiği gibi, belirli malzeme değerleri ve geometrik özellikler dikkate alınarak yapılmış yığma birimlerine yönelik deneysel testler de mevcuttur. Bu sebeple yığma malzeme değerlerini ve doğrusal olmayan davranışını literatür çalışmalarındaki yöntemlere göre alınmıştır. [33]

Bu çalışma kapsamında incelenecek yapının malzemeleri başta olmak üzere yığma yapılarda en yaygın olarak kullanılan malzemelerin özellikleri ve kuvvet - şekil değiştirme grafiklerini elde ederken takip edilen adımlar aşağıdaki şekilde incelenebilir.

Tuğla:

Killi toprak çıkarılarak belirli bir süre bekletilir ve olgunlaşması sağlanır. Daha sonra balçık ile suyla yoğrularak kalıplara dökülür ve kurutulur. Kurutulan kalıplaşmış malzemenin 600 ile 12000C arasındaki sıcaklıkta fırınlarda ve ocaklarda pişirilmesi sonucunda da tuğla malzemesi elde edilir. Hamurun plastikliğini azaltmak, kurutma ve pişirme sırasındaki büzülmeyle engellemek ve pişirme sıcaklığını düşürmek amacıyla kile belirli oranlarda öğütülmüş kuvarz kumu, feldispat, talk, pişmiş killerin tozu gibi maddeler katılır. [30]

Tuğla malzeme istenilen formda üretilmesi, örgü kolaylığı ve süsleme imkanı olması gibi avantajlarından dolayı yaygın şekilde kullanılmıştır. Tarihte yapıların yanı sıra minare yapımında da kullanılmış olup günümüzde de kullanımı devam etmektedir. Minare kısımlarında; harç ile birlikte tek veya taş ile sıralar oluşturularak almalı şekilde kullanılmıştır.

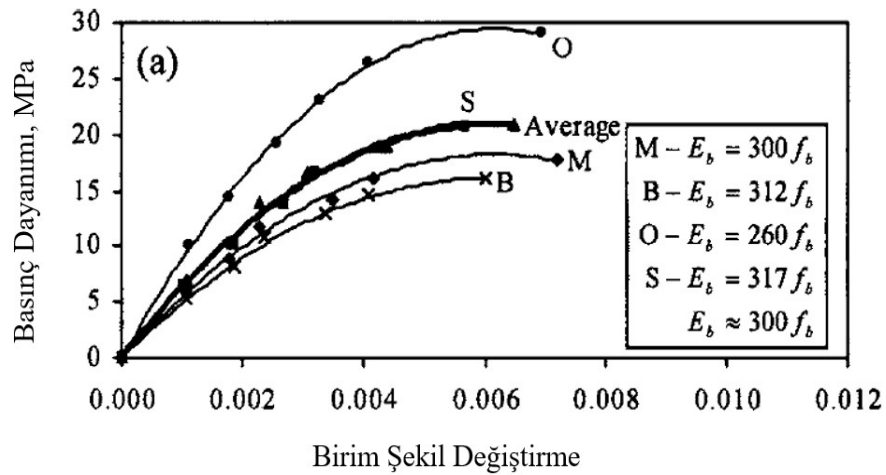
Gevrek ve gözenekli bir malzeme olan tuğlanın kalitesini kilin cinsi, öğütülmüş tozlar gibi katkıların varlığı ve miktarı, pişirme sıcaklığı, üretim biçimi (harman

tuğlası, fabrika tuğlası) ve porozitesi (boşluk hacmi/tuğla hacmi) etkiler. Tuğla porozitesi arttıkça basınç dayanımı azalır. Tuğla duvarın dayanımı ise tuğla kalitesi, kullanılan harç ve tuğla örülme düzenine bağlı olarak değişmektedir.

Tuğla hasarları atmosfer, su ve nem etkisine bağlı olarak, hacim değişikliği, kabarma, yüzeyinde beyaz lekeler, çatlaklar şeklinde ortaya çıkmaktadır. [30]

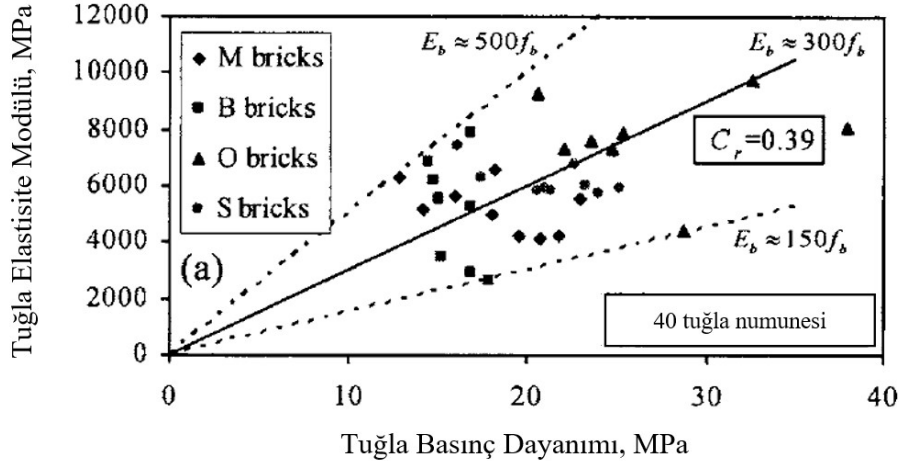
Harç küplerinin, yığma birimlerinin ve farklı tuğla ve harç kombinasyonları ile inşa edilmiş yığma birleşimlerin tek eksenli basınç altındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini değerlendirmek için çeşitli testler yapılmıştır.

Kaushik, H.B. v.d. tarafından yapılan çalışmada dört farklı tip tuğlanın her birinden alınan on numune ile gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler ile ortalama gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan tuğlaların basınç dayanımları 12 MPa ve 38 MPa aralığında olduğu görülmüş ve tüm tuğla tipleri için de ortalama bir gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. (Şekil 3.8) Yapılan bu tuğla testlerine göre, göçme gerilmesinin yaklaşık üçte birine kadar doğrusal davranış sergilediği daha sonra davranışın doğrusal olmayan şekilde ilerlediği belirtilmiştir. [32]



Şekil 3.8 : Tuğla birimlerinin basınç altındaki gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri (Kaushik, Rai, & Jain, 2007).

Tuğla elastisite modülünün (E_b), basınç dayanımı (f_b) ile olan değişimi Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Elastisite modülünün (E_b), basınç dayanımının (f_b) 150 ve 500 katı aralığında değiştiği görülmüştür. [32]



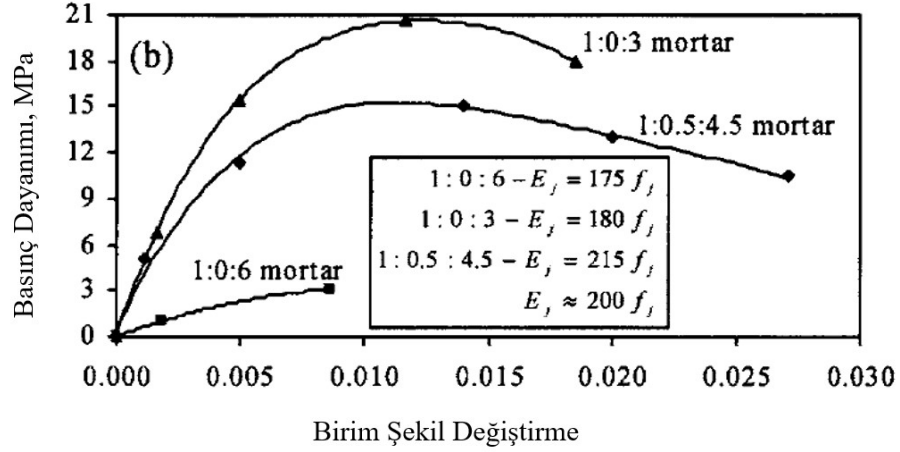
Şekil 3.9 : Tuğla birimlerin elastisite modülü – basınç dayanımı arasındaki ilişki (Kaushik, Rai, & Jain, 2007).

Bağlayıcı Olarak Kullanılan Harçlar

Harçlar ve sıvalar, agrega denilen ince daneli malzemelerin matris denilen bir bağlayıcı hamur ile bir araya getirilmesi sonucu elde edilen, plastik şekil verilmeye elverişli kompozit malzemelerdir. Yığma yapılarda yapı elemanlarını birbirlerine bağlayarak dış yüklere karşı birlikte bir bütün olarak hareket etmelerini sağlayan bir malzemedir. Minarelerde de bu amaçla tuğla ve taş aralarında kullanılmıştır.

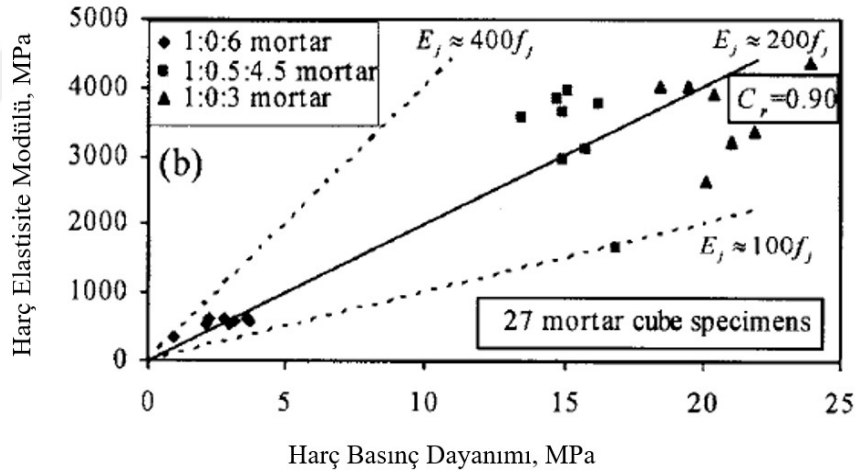
Harcın kendi başına yüksek dayanıma sahip olmasındansa, yığma birimler arasında bağlayıcılığının yüksek olması çoğu durumda daha iyidir.

Yine Kaushik, H.B. v.d. tarafından yapılan çalışmada her birinden dokuz adet numunenin alındığı üç farklı derecedeki harcın deneysel çalışmaları sonucunda basınç altındaki gerilme – birim şekil değiştirme diyagramları elde edilmiştir. Göçme gerilmesinin yaklaşık üçte birine kadar doğrusal şekilde devam eden eğriyi, tuğlaya oranla çok daha ileriye uzanan doğrusal olmayan bir eğri izlemektedir. (**Şekil 3.10**)



Şekil 3.10 : Harç küplerinin basınç altındaki gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri (Kaushik, Rai, & Jain, 2007).

Harç elastisite modülünün (E_j), basınç dayanımı (f_j) ile olan değişimi Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan harçların basınç dayanımlarının 2 MPa ile 24 MPa arasında değiştiği görülmüştür. Elastisite modülünün (E_j), basınç dayanımının (f_j) 100 ve 500 katı aralığında değiştiği görülmüştür. [32]

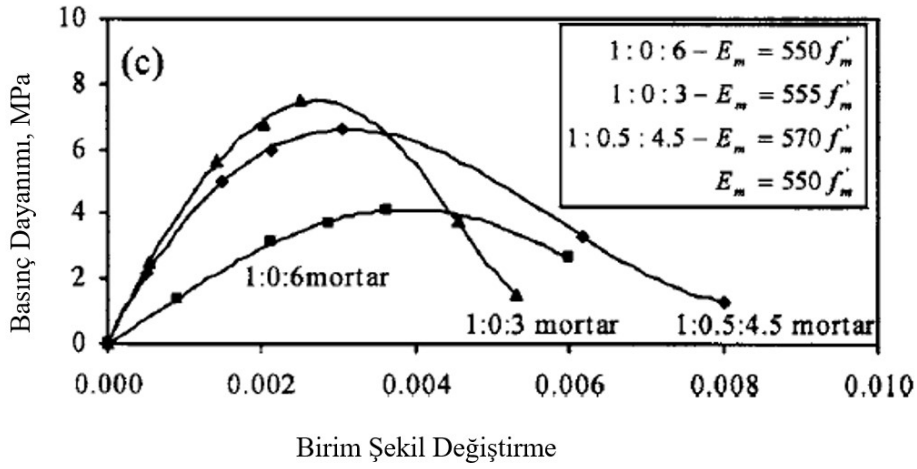


Şekil 3.11 : Harç küplerinin elastisite modülü – basınç dayanımı arasındaki ilişkisi (Kaushik, Rai, & Jain, 2007).

Yığma Birleşimler

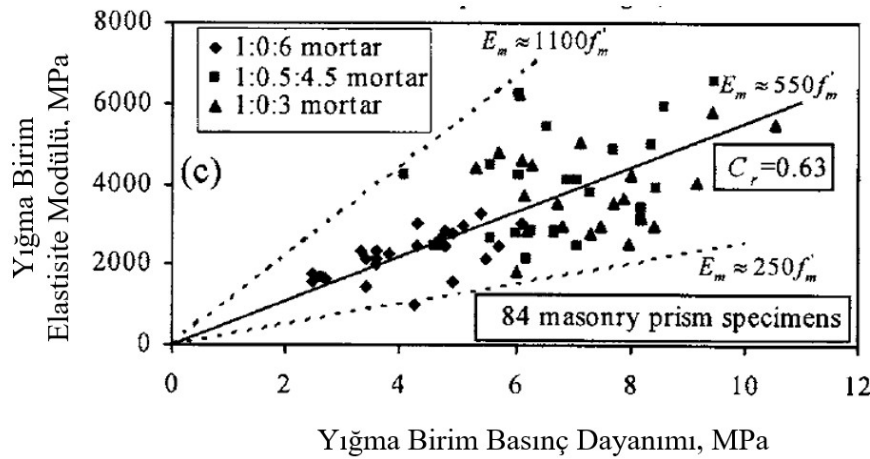
Kaushik, H.B. v.d. tarafından yapılan çalışmada dört farklı tuğla tipi ve üç farklı harç ile yapılmış farklı kombinasyonların her birinden yedişer yığma birleşim numuneleri elde ederek deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda ise yığma birleşimlerin basınç altındaki gerilme – birim şekil değiştirme diyagramları elde edilmiştir. Göçme

gerilmesinin yaklaşık üçte birine kadar doğrusal şekilde devam etmiş, doğrusal olmayan davranışla birlikte tuğlalarda çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir. (Şekil 3.12)



Şekil 3.12 : Yığma birleşimlerin basınç altındaki gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri (Kaushik, Rai, & Jain, 2007).

Çalışmada kullanılan yığma birimlerin basınç dayanımlarının 2.5 MPa ile 11 MPa arasında değiştiği görülmüştür. Yığma birleşimlerin elastisite modülünün (E_m), basınç dayanımı (f_m) ile olan değişimi Şekil 3.13’de gösterilmiştir. Elastisite modülünün (E_m), basınç dayanımının (f_m) 250 ve 1100 katı aralığında değiştiği görülmüştür. [32]



Şekil 3.13 : Yığma birleşimlerin elastisite modülü – basınç dayanımı arasındaki ilişkisi (Kaushik, Rai, & Jain, 2007).

Yığma birleşimin davranışını belirlemek için büyük öneme sahip olan basınç dayanımı değerini deneylerle elde etmek her zaman kolay olmamaktadır. Diğer taraftan yığma birimi oluşturan tuğla ve harcın numune alımı ve değerlendirilmesi

daha kolaydır. Bu sebeple tuğla ve harca ait basınç dayanımları kullanılarak yığma birleşimin basınç dayanımı tahmin etmek adına birçok deneysel çalışma yapılmış ve bu dayanımlar arası bağıntı oluşturulmuştur. [34]

Bu üç basınç dayanımı Eurocode6 (CEN 1996)'da şu şekilde ilişkilendirilmiştir;

$$f_m' = K f_b^\alpha f_j^\beta \quad (3.1)$$

Buradaki K, α ve β sabit değerlerdir. Literatürde yapılan deneysel çalışma sonuçlarına dayanarak bu katsayılar $K=0,65$, $\alpha=0,49$ ve $\beta=0,32$ olarak alınmıştır. Böylece yığma birleşimin dayanımı Denklem 3.2 kullanılarak bulunabilmektedir.

$$f_m' = 0.63 f_b^{0.49} f_j^{0.32} \quad (3.2)$$

Taş

Taş, yoğun, sert, kütle halindeki kayalara verilen isimdir ve eski çağlardan beri yapı üretiminde en çok kullanılan malzemedir. [30] Taşlar, basınç dayanımı yüksek olan bir malzemedir. Çekme dayanımı ise basınca oranla çok düşüktür. Dış etkilere karşı dayanımı yüksek olduğu için kullanım ömrü de fazladır. Doğada doğal olarak bulunması, temininin kolay olması, insan eliyle oyulup işlenebilir ve farklı boyutlarda biçimlendirilerek kullanılabilir olması yapılarda tercih edilme sebeplerinden bazıları olarak sayılabilir.

Taşlar elde edildiği kayacın oluşumuna, içerdikleri maddelere, kristal yapısına ve sahip oldukları boşluk oranlarına göre farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olmaktadır. [30] Yapı taşları homojen, sert, iyi oluşmuş, damarsız, çatlaksız, yarıksız, dona dayanıklı ve ocak suyunu yitirmiş olmalıdır. Erken dönem sonrası, tuğla malzemenin yerini daha dayanıklı olan taşın almasıyla birlikte, Osmanlıda en fazla kullanılan yapı malzemesi olmuştur. Minarelerde de genel mimaride olduğu gibi taş malzemenin kullanılması ağırlık kazanmıştır. Taş malzeme harç ile tek olarak kullanıldığı gibi tuğla ile birlikte almalı şekilde de kullanılmıştır.

Taşlardaki hasarlar; sıcaklık farkı sonucu oluşan hacim değişiklikleri, donma-çözülme sonucu hacim artışına bağlı oluşan çekme gerilmeleri, nem ile taş içine taşınan zararlı tuzlar ve asitlerin neden olduğu kimyasal bozulmalar, güneş yanmasıyla oluşan çatlakların artmasıyla taşın parçalanması gibi sebepler dolayısıyla meydana gelmektedir. Bunların sonucu olarak; yüzey kaybı, parça kopması,

oyuklanma, çatlak oluşumu, çiçeklenme, şekerlenme, renk değişimi, aşınma gibi taş hasarları ortaya çıkmaktadır. [30]

Bu özelliklerinin yanı sıra kullanıldıkları yapılarda ağırlığı arttırdıkları için yapıya etkileyen deprem yükünü de arttırmaktadırlar. İstenilen performansın elde edilmesi için taşlar arası uygun birleşimin iyi şekilde sağlanması gerekmektedir. (Baştürk vd. , 2013-kaynak ekle)Bu sebeple taşlar arası kullanılan bağlayıcı özelliğe sahip harçların ve metal elemanların önemi fazlaca anlaşılmaktadır.

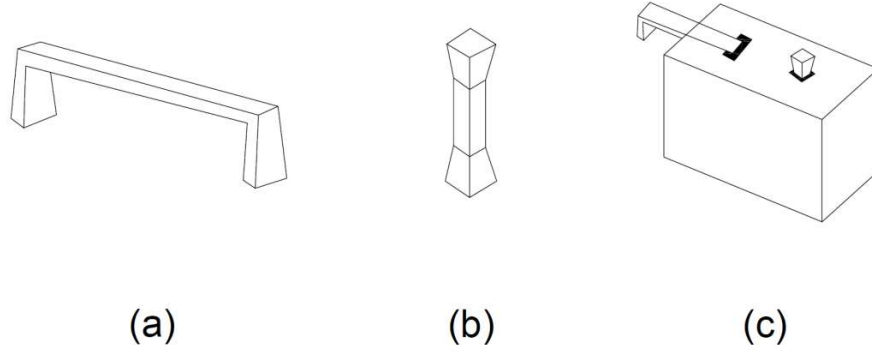
Metal Elemanlar:

Tarihi yapılarda farklı şekillerde kullanılan metal elemanlar kuşaklama demiri, gergi demiri, simid adı verilen demir halka ve bilezikler, kenet ve zıvana gibi farklı şekillerde kullanılmıştır. Demirin minarelerde kullanımı ise kenet ve zıvana olarak görülmektedir. [35]

Kenet demirleri, taşların birbirine yatay yönde bağlantısını sağlayarak örgü sistemini rijit bir duruma getirmektedir. Kenet elemanlar döverek biçimlendirilir ve iki ucu kıvrılarak birleştirilecek birimlere sabitlenir. Minarelerde yatayda aynı hizadaki taşların oluşturduğu taş dizisine kur denmekte ve bir kur bir basamak ve çevresindeki dış duvardan oluşmaktadır. Aynı kurdaki elemanlar birbirine kenet ile bağlanmaktadır. [35]

Zıvana; sütunla başlık ve altlığını birbirine bağlamakta ya da minare örgüsünde olduğu gibi üst ve alt kurdaki taşların bağlantısında kullanılan bağlantı elemanına verilen isimdir. Her iki yığma birim arasında sürekliliği sağlayarak deprem, sel ve rüzgar gibi dinamik yanal hareketler karşısında yapının bütünlüğünü korumasını sağlamaktadır. [35,36]

Kenet ve zıvananın uygulanmasında yığma birimde gerekli çap ve derinlikte bir delik açılmaktadır. Kenet veya zıvana uçları bu deliğe yerleştirildikten sonra kalan boşluklara eritilmiş kurşun dökülür ve uçların taş ile bağlantısı sağlam şekilde sağlanmış olmaktadır. Ayrıca boşlukları dolduran kurşun; demirin paslanmasına ve sürtünme oluşmasına da engel olmaktadır. (Şekil 3.14) [36]

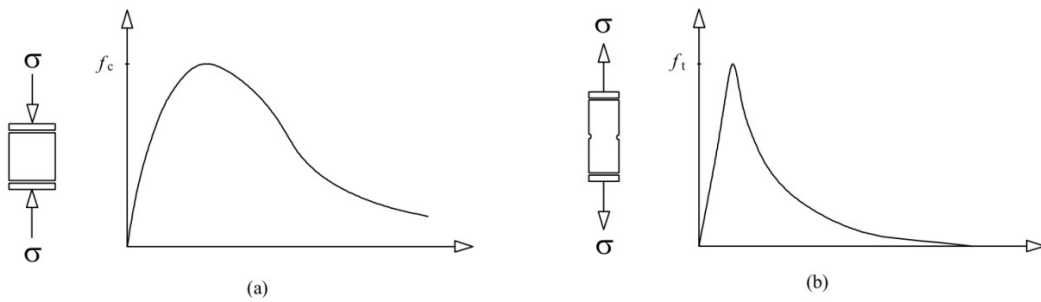


Şekil 3.14 : (a) Kenet (b) Zıvana (c) Kenet/Zıvana – birim birleşimi.

Tanımlanan Malzeme Gerilme-Şekil Değişirme Grafikleri

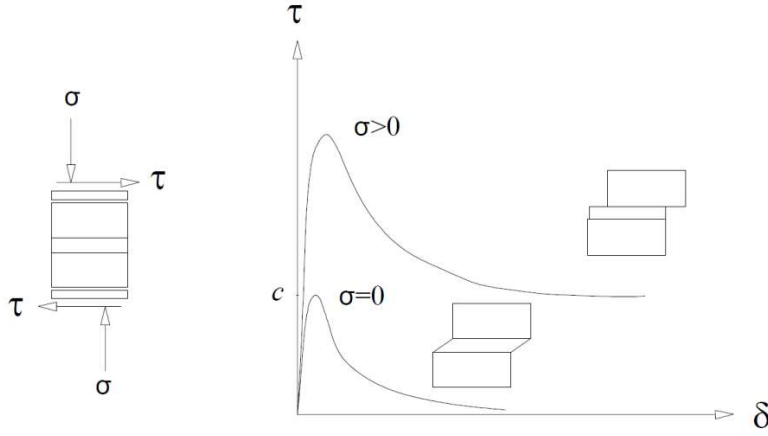
Yumuşama, bir numune üzerindeki sürekli bir deformasyon artışına karşı mekanik direncin kademeli olarak azalmasıdır. Aşamalı olarak çatlak büyümesi nedeniyle göçmeye başlayan tuğla, harç, kaya veya beton gibi yarı gevrek malzemelerin belirgin bir özelliğidir. Malzeme içerisinde zaten mikro boyutta olan çatlaklar yük arttıkça büyür. Pik yükün etrafında çatlak oluşumu hızlanır ve makro çatlakların oluşumu başlar. Yapılan testlerde makro çatlakın büyümesi, diğer bölgelerdeki yük boşalırken küçük bir bölgede çatlamanın lokalizasyonuna ve böylelikle yumuşamaya sebep olur. [31]

Şekil 3.15'te tek eksenli gerilme altında yarı gevrek olan malzemelerin karakteristik gerilme-yer değiştirme diyagramları gösterilmiştir. [31]



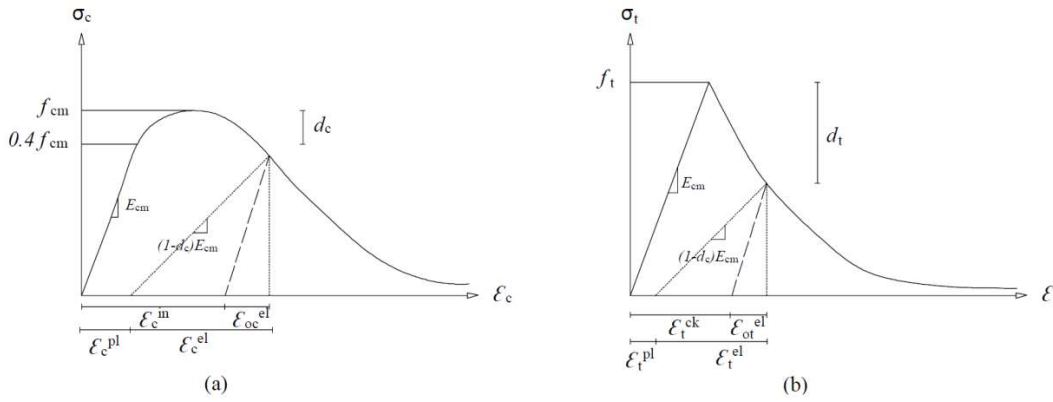
Şekil 3.15 : Tek eksenli yükleme altındaki davranış (a) Basınç gerilmesi (b) Çekme gerilmesi (Lourenço, 1996).

Buna ek olarak kayma gerilmesine karşılık gelen, birim-harç ara yüzünün kaymasından oluşan, genellikle mod 2 olarak tanımlanan diğer bir göçme mekanizması da meydana gelmektedir. (**Şekil 3.16**)



Şekil 3.16 : Kayma gerilmesi altındaki davranış (Lourenço, 1996).

Beton hasar modeli betonun yanı sıra taş, harç gibi diğer yarı-gevrek malzemelerin davranışını tahmin etmek için geliştirilmiştir. Bu modelin ana göçme şekilleri basınç sebebiyle oluşan kırılmalar veya çekme sebebiyle oluşan çatlaklar şeklindedir. Tarihi yapılardaki malzeme davranışlarının beton hasar modelini yansıtmaması sebebiyle analizlerde bu model kullanılmıştır. Beton hasar modelindeki kontrol noktalarının ve grafik eğiminin belirlenmesi **Şekil 3.17**'de tanımlanmıştır. [37]

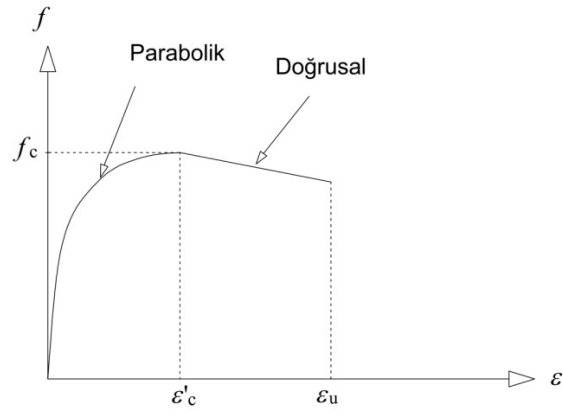


Şekil 3.17 : Beton hasar görebilirlik modeli.

SAP2000 programında tanımlanabilir basit beton modeli **Şekil 3.18**'de verilmiştir. Grafik eğrisi için (3.3) ve (3.4) denklemleri verilmiştir. Çekme gerilmesi değeri ise maksimum basınç gerilmesinin 0.10 katı olarak alınmıştır. Çekme gerilmesi grafiği maksimum değerinden sonra plastik olarak tanımlanmıştır. [38]

$$f = f_c \left(2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^2 \right) \quad \varepsilon \leq \varepsilon_c \quad (3.3)$$

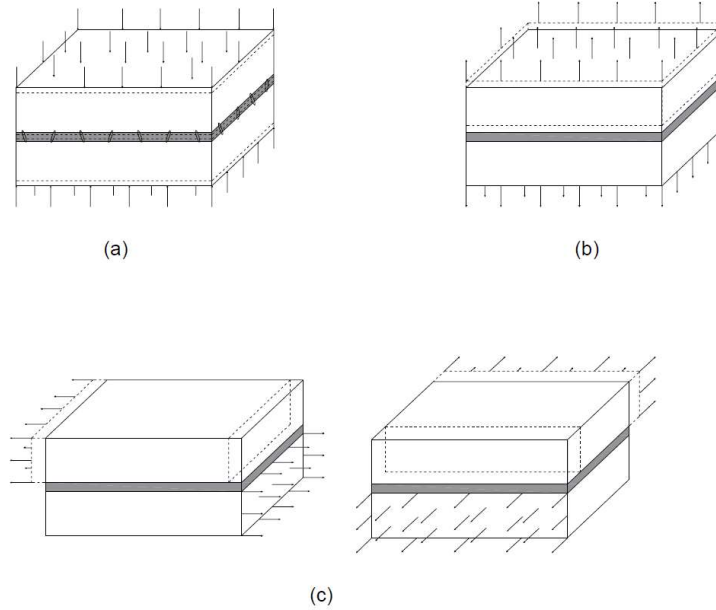
$$f = f_c \left(1 - 0.2 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_u - \varepsilon_c} \right) \right) \quad \varepsilon_c < \varepsilon \leq \varepsilon_u \quad (3.4)$$



Şekil 3.18 : SAP2000 basit beton hasar modeli.

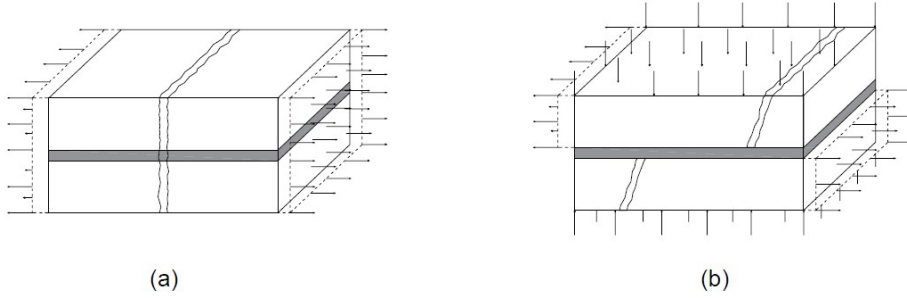
3.5 Göçme Şekilleri

Yığma birimlerin çekme davranışı sebebiyle arasındaki birleşim yüzeylerinde doğrusal davranışı takip eden göçme davranışı meydana gelir. Bu durum sonucunda oluşan çekme kırılması ve kesme kayması göçme şekilleri **Şekil 3.19**'da verilmiştir. [39]



Şekil 3.19 : Ara yüzlerin göçme şekilleri (a)Basınç kırılması (b)Çekme kırılması (c)Kayma kırılması (Abdulla, K.F. v.d., 2017).

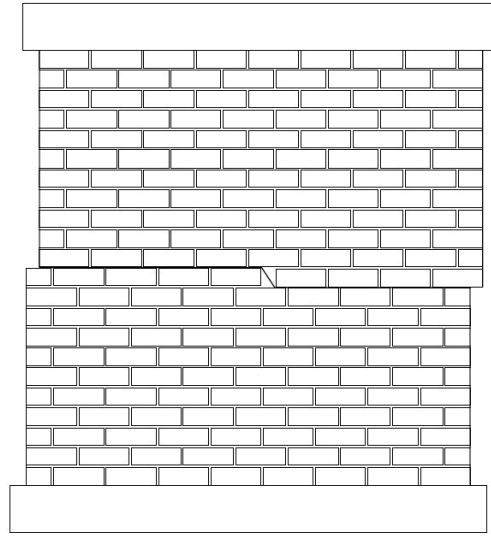
Aynı şekilde yığma birimlerinde de göçme meydana gelmektedir. Yığma birimlerinde aksenal ve kesme gerilmeleri uygulanması sonucunda oluşan çekme kırılması ve diyagonal çatlak göçme şekilleri de **Şekil 3.20**'de verilmiştir. [39]



Şekil 3.20 : Yığma birimlerin göçme şekilleri (Abdulla, K.F. v.d., 2017).

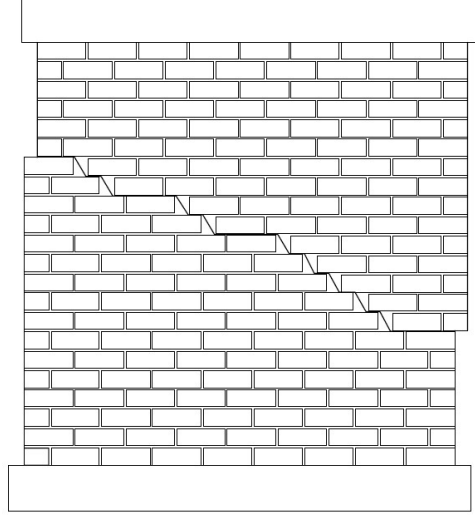
Tuğla ve harç malzemelerinden oluşan yığma duvarların düzlem içi yükleme sonucu göçme şekiller üç şekilde gerçekleşebilmektedir.

Yatay kuvvetin etki ettiği kayma dayanımı zayıf bir yığma duvarın göçme şekli **Şekil 3.21**'de verilmiştir. Bu göçme şekli yatay bağlantıların birinde yatay çatlak ile karakterize edilebilir. [39]



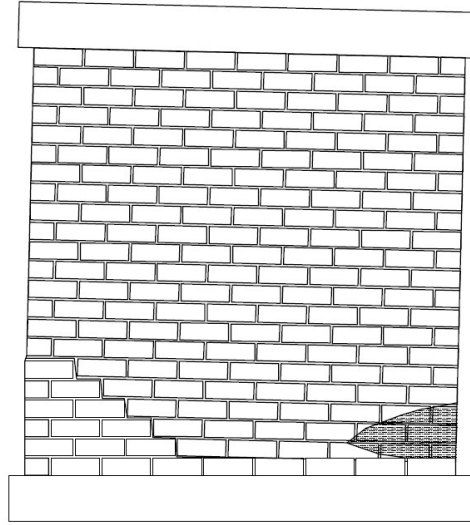
Şekil 3.21 : Tipik kayma kırılması.

Yatay ve düşey kuvvelerin birlikte etkilendiği duvarlarda görülen göçme şekli **Şekil 3.22**'de gösterilmiştir. Bu tip kesme kırılması en çok rastlanan göçme şeklidir. Derz ve tuğlalar boyunca devam eden veya yatay ve düşey derzleri takip eden diyagonal çatlaklar ile karakterize edilebilir. [39]



Şekil 3.22 : Tipik diyagonal kırılma.

Duvarın kayma direncinin fazla olduğu durumlarda meydana gelen göçme şekli **Şekil 3.23**'te verilmiştir. Bu tür göçmeler, kayma direnci fazla olan duvarın alt bölgelerinde bir kısmın ezilmesi ve/veya zıt taraftaki kısımda bir açıklık meydana gelmesi ile ortaya çıkmaktadır. [39]



Şekil 3.23 : Tipik eğilme kırılma.

3.6 Tarihi Yapılarda Yapısal Değerlendirme

Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanmış olan “Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu” tarihi yapılara yönelik müdahale yaklaşımlarında dikkat edilecek hususlar konusunda yol gösterici nitelikte olup, buradaki değerlendirmeler dikkate alınarak tarihi yapı performansı adımları irdelenmiştir.

Tarihi yapıların taşıyıcı sistem güvenliğinin değerlendirilmesinde üç deprem düzeyi öngörülmektedir. Bunlar:

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1): En büyük deprem olarak tanımlanan ve çok seyrek deprem olan, 50 yılda aşılma olasılığı %2 ve tekrarlanma periyodu 2475 yıl olan yer hareketidir,

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2): Standart tasarım depremi olarak tanımlanan seyrek deprem hareketi olan 50 yılda aşılma olasılığı %10 ve tekrarlanma periyodu 475 yıl olan yer hareketidir,

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3): Sık deprem olarak tanımlanan, 50 yılda aşılma olasılığı %50 ve tekrarlanma periyodu 72 yıl olan yer hareketidir.

Bu deprem düzeylerine ait yatay ve düşey elastik spektrum elde etme adımları yönetmelikte tanımlanmıştır (TBDY 2018). Genellikle yatay deprem bileşeninin göz önüne alınması yeterli olmakta, büyük açıklıkların veya konsolların bulunduğu tarihi yapılarda ise düşey deprem bileşeni de dikkate alınmaktadır. Tarihi yapının analizinde kullanılacak yöntem zaman tanım alanında hesap ise gerekli deprem yer hareketlerinin seçilerek yapı zemin koşullarına göre belirlenen spektruma göre ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Bu kısım ile ilgili izlenecek adımlar Bölüm 2 içerisinde anlatılmıştır.

Mevcut yapıların deprem güvenliğinin belirlenmesi için geliştirilmiş olan performans kavramı tarihi yapılarda da uygulanabilmektedir. Değerlendirilmesi yapılacak tarihi yapının önemi, fonksiyonu, kullanıcı ve ziyaretçi sayısına bağlı olarak “Kabul Edilebilir Hasar Seviyesi” tanımlanmaktadır.

Yapılan analizler sonucu elde edilen tüm sonuçlar, taşıyıcı sistem davranışının ve deprem etkisinin tanımlanmasındaki kabullere bağlıdır. Tarihi yapılardaki belirsizliklerden dolayı yapısal analizde kullanılan malzeme ve taşıyıcı sistem parametreleri sınırlı hassasiyet ile belirlenebilmekte ve bu sebeple değerlendirmedeki kabuller ve matematiksel yöntemler mümkün olduğunca basit tutulmalıdır.

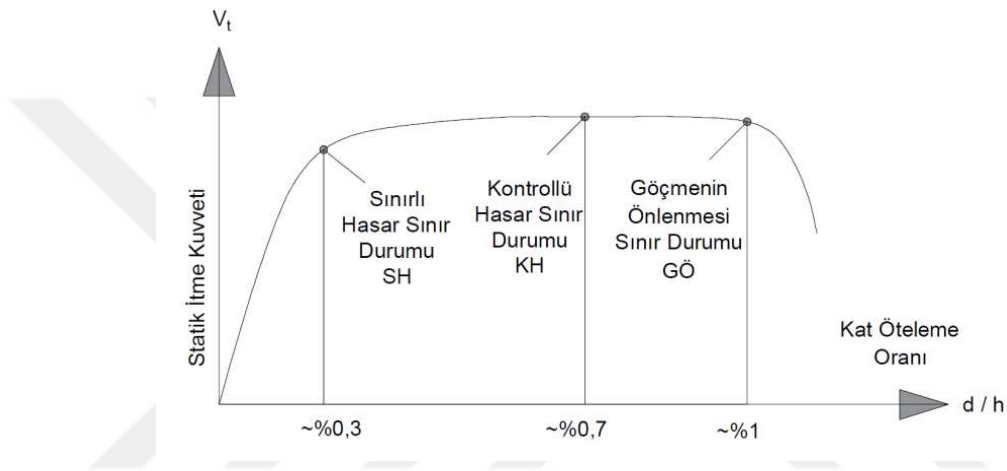
Belirli bir deprem etkisi altındaki tarihi yapılar için “Yapısal Performans Düzeyleri” **Şekil 3.24**'te gösterilmiş olup, aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

a. Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi: Doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı ve taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasarın meydana geldiği durumdur.

b. Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi: Yapının taşıyıcı sistem elemanlarında çoğunlukla onarılması mümkün olan hasarların meydana geldiği düzeydir.

c. Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi: Yapının taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği, yapının kısmen veya tamamen göçmeye yaklaştığı, ancak göçmenin önlendiği duruma karşılık gelir. [30]

Tarihi yapılarda öteleme oranı, farklı seviyelerde alınan noktaların yatayda yaptığı yerdeğiştirmelerinin farkının, yine bu noktalar arasındaki yükseklik farkına oranı şeklinde hesap edilmektedir.



Şekil 3.24 : Statik itme eğrisi ve sınır durumları.

Seçilen bir deprem güvenliği seviyesinin bütün tarihi yapılar için aynı şekilde sağlanmasını beklemek doğru olmaz. Sağlanacak güvenlik seviyesinin tarihi yapının önemine ve müdahale edilebilirlik durumuna göre seçilmesi gerekmektedir. Bazı yapılar tarihi özellikleri sebebiyle kapsamlı müdahaleler uygulanamayabilir. Bu tür yapılar için yüksek bir güvenlik seviyesi seçerek elverişsiz müdahale gereksinimleri elde etmek yerine daha düşük bir güvenlik seviyesi öngörerek, yapı için uygulanabilir daha az kapsamlı müdahale öngörmek uygun olmaktadır. Örneğin; evrensel öneme sahip yapıya daha ileri bir performans durumu öngörülürken, yerel öneme sahip bir yapı için daha düşük bir performans durumu önerilebilir. Fakat incelenecek yerel öneme sahip bir yapı için daha ileri bir performans durumu da öngörülebilir. Bu sebepten mevcut bir tarihi yapının deprem güvenliği incelemesinin en az iki farklı performans düzeyi esas alınarak yapılması önerilmektedir. Bu iki performans düzeyi esas alınarak elde edilen sonuçların değerlendirilmesiyle bir karar

almak daha uygun olacaktır. Tarihi yapılar için önerilen performans düzeyleri **Çizelge 3.1**'de verilmiştir. [30]

Çizelge 3.1 : Önerilen hedef performans düzeyleri.

Tarihi Yapıların Önemine Göre Seçilebilecek Performans Düzeyleri	Ulusal Öneme Sahip Tarihi Yapı Grup I	Evrensel Öneme Sahip Tarihi Yapı	
	DD-3 (50/%50, 72 yıl) Sınırlı Hasar Düzeyi (SH)	DD-2 (50/%10, 475 yıl) Sınırlı Hasar Düzeyi (SH)	DD-1 (50/%2, 2475 yıl) Sınırlı Hasar Düzeyi (SH)
Yerel Öneme Sahip Tarihi Yapı Grup II	DD-3 (50/%50, 72 yıl) Kontrollü Hasar Düzeyi (KH) DD-3 (50/%50, 72 yıl) Göçmenin Önlenmesi Düzeyi (GÖ)	DD-2 (50/%10, 475 yıl) Kontrollü Hasar Düzeyi (KH) DD-2 (50/%10, 475 yıl) Göçmenin Önlenmesi Düzeyi (GÖ)	DD-1 (50/%2, 2475 yıl) Kontrollü Hasar Düzeyi (KH) DD-1 (50/%2, 2475 yıl) Göçmenin Önlenmesi Düzeyi (GÖ)

İncelenen yapıdaki hasarın yani elastik ötesi şekil değiştirmenin küçük olduğu durumlarda, dayanıma göre değerlendirme yapmak uygundur. Dayanıma göre yapılan değerlendirmede doğrusal hesap yöntemleri kullanılmaktadır. Hasar göçmeye sebep olmayacak şekilde kontrollü olması kaydıyla büyük olması durumunda ise şekil değiştirmeye göre değerlendirme yapmak tercih edilmektedir. Performans düzeylerine göre hesap yöntemleri ve gerilme, şekil değiştirme sınırları **Çizelge 3.2**'de verilmiştir. [30]

Çizelge 3.2 : Performans düzeyleri ile ilgili hesap yöntemleri ve gerilme, şekil değiştirme sınırları.

Performans Düzeyi	Hesap Yöntemi ve Sınırlar
Sınırlı Hasar Sınır Durumu (SH)	1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve azaltılmamış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmıyor. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 0,3 sınırını aşmıyor.
Kontrollü Hasar Sınır Durumu (KH)	1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve $R_a \leq 3$ azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmıyor. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 0,7 sınırını aşmıyor. 2. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme oranı % 0,7 sınırını aşmıyor. b) Malzemelerin şekil değiştirme kapasiteleri aşılmıyor.
Göçme Öncesi Sınır Durumu (GÖ)	1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve $R_a \leq 3$ azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları belirli bir oranla (--1.5 katı) aşılabılır. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 1 sınırını aşmıyor. 2. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme oranı % 1 sınırını aşmıyor. b) Malzemelerin şekil değiştirme kapasiteleri sınırlı oranda (--1,2 katı) aşılabılır.

Tüm hasar durumları için taşıyıcı sistemin bütünsel davranışı sonucu elde edilecek öteleme oranları azaltılmamış deprem etkisinde incelenir ve sınır değerleri buna göre irdelenir. Verilen performans sınır durumları %0,3, %0,7 ve %1,0 olarak kabul edilebilir. Şekil değiştirmeye göre yapılan doğrusal olmayan davranışa yönelik değerlendirme yapılması durumunda ise malzeme şekildeğiştirme kapasitelerinin gerekli sınır değerler arasında kaldığının da gösterilmesi gerekmektedir.

Tarihi yapılarda belirsizliklerin fazla olması sebebiyle doğrusal olmayan davranış durumunda bile, deprem yükü azaltma katsayısı kullanarak doğrusal değerlendirme yöntemleri kullanılabilir.

Çizelge 3.1 ve **Çizelge 3.2**'de önerilen performans düzeyleri ve sınır koşulları sadece yol gösterici olarak verilmiş olup performans düzeyi ve müdahale stratejisine kara verirken tarihi yapının özelliklerinin dikkate alınması gerekmektedir.



4. MİNARE MAKRO MODELİ VE ANALİZ SONUÇLARI

Bu çalışmada seçilen Bursa Ulucami'nin doğu minaresi, SAP2000 V20.2 paket programı kullanılarak makro olarak modellenmiştir. Minare makro modeli için modal analiz ve zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.1 Makro Modelleme Yaklaşımı

İlk olarak minare yapısını daha iyi anlamak ve tanımlayabilmek adına daha genel bir modelleme şekli olan makro modelleme kullanılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilerek oluşturulacak ayrıntılı mikro modelin yapı davranışını daha iyi bir şekilde yansıması amaçlanmıştır. Minare modellemesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın ilk kısmında sonlu elemanlar modelinde en etkili unsurlardan olan modellemedeki kabullerin ve malzeme değerlerinin olabildiğince gerçek değerlere yakın tanımlanması amaçlanmıştır. Yapılan modelde aslına uygun olarak hazırlanmış rölöve çiziminden faydalanılmıştır. Minare elemanlarının boyutları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

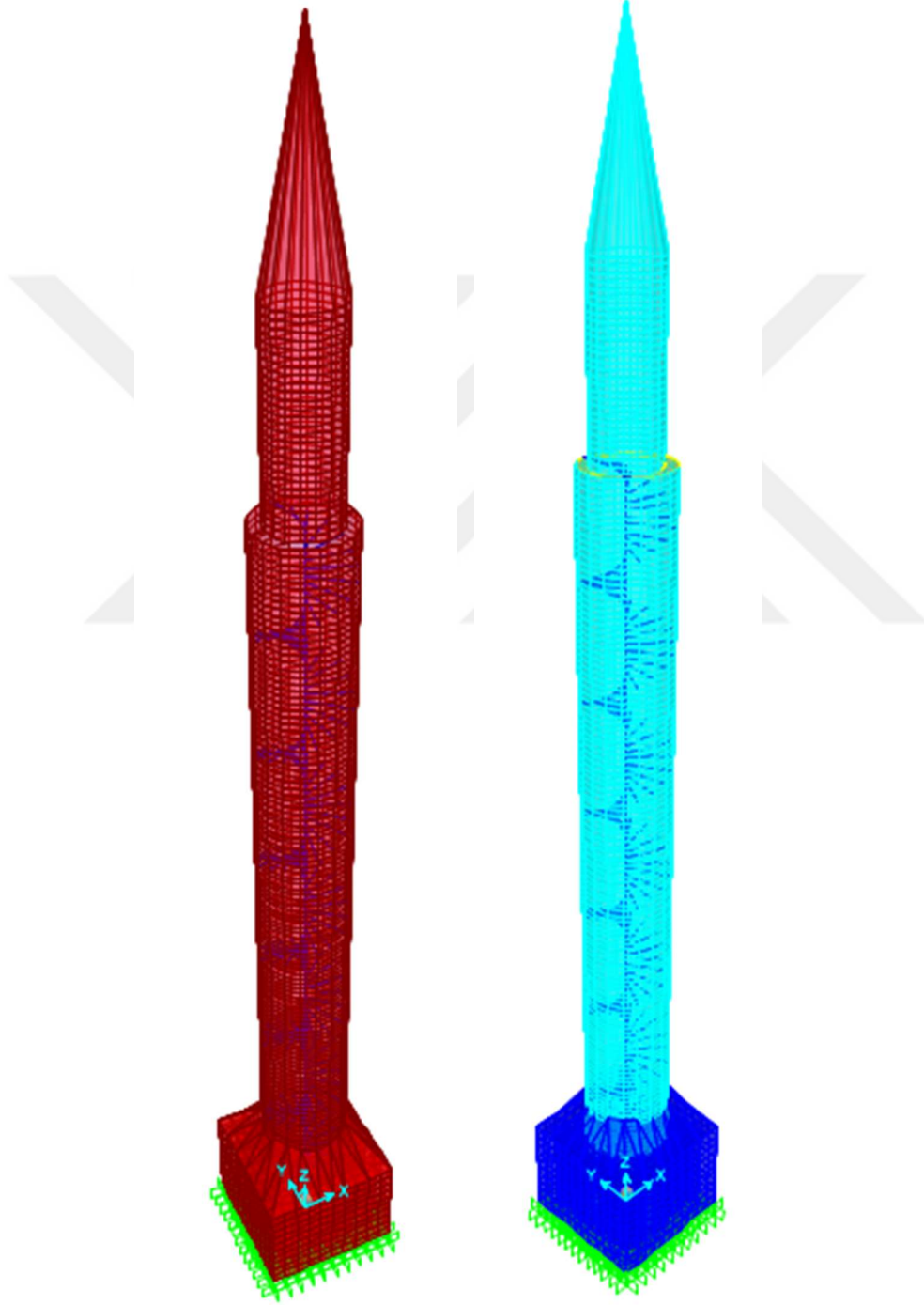
Çizelge 4.1 : Ulucami doğu minaresinin eleman boyutları.

Ölçü Kısım	Kaide	Küp	Gövde	Petek	Külâh
Yükseklik (m)	4,6	2,2	28,5	7	7,2
Dış Çap/Kalınlık (m)	5,85	-	5,26	3,3	-
İç Çap (m)	2,12	-	2,12	2,12	-
Duvar Kalınlığı (m)	1,85	-	1,57	0,59	-

Modelleme sırasında kullanılan sonlu eleman yöntemi için modelin farklı kısımlarında farklı eleman modelleri seçilmiştir. Kaide katı eleman olarak, küp, gövde, petek, külâh kısımları kabuk eleman ve merdiven çekirdek kısmı ise çubuk

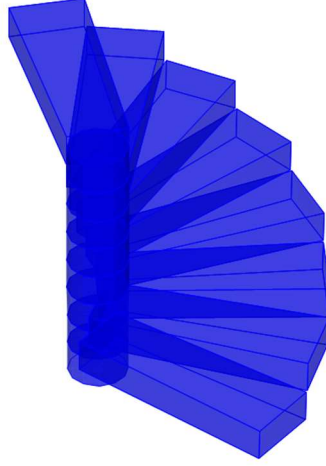
eleman olarak modellenmiştir. Minare modelinin üç boyutlu şekli **Şekil 4.1**'de gösterilmiştir.

SAP2000 programında yapılan modelde kaide, küp, çekirdek ve merdiven elemanları için taş malzeme; gövde, petek ve külah elemanları için ise tuğla malzeme tanımlanmıştır.



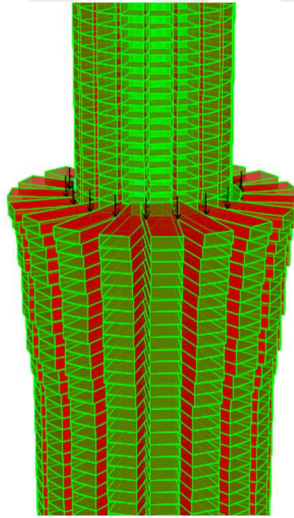
Şekil 4.1 : Ulucami doğu minaresi için oluşturulan makro model.

Merdiven modellemesinde bir tam tur, 20 derecelik açı ile dönen 18 adet basamak ile tamamlanmıştır. Basamaklar değişken kesitli olarak tanımlanmıştır. Rıht yüksekliği 27 cm olarak alınmıştır. (Şekil 4.2)



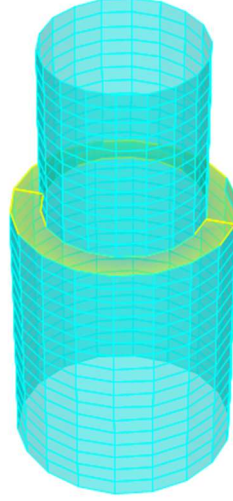
Şekil 4.2 : Ulucami doğu minaresi imakro model merdiven detayı.

Şerefe korkuluklarına ait yük, şerefe uçlarına noktasal yük olarak verilmiştir.(Şekil 4.3)



Şekil 4.3 : Ulucami doğu minaresi imakro model şerefe detayı.

Gövdeden peteğe geçiş kısmında elemanlar arası yük aktarımının daha iyi sağlamak amacıyla bu bölgede rijit bir eleman tanımlanmıştır. (Şekil 4.4)



Şekil 4.4 : Ulucami doğu minaresi imakro model gövde-petek geçiş detayı.

4.2 Makro Modele Ait Malzeme Değerlerinin Belirlenmesi

Tuğla ve harç için alanda noktasal basınç deneyleri yapılmış, elde edilen sonuçlar ASTM, D5731-95 numaralı deney standartlarında verilen formül ve değerler kullanılarak tek eksenli basınç değerleri elde edilmiştir. [40]

δ_{uc} malzemenin tek eksenli basınç dayanımı olup (4.1)'de verilen formül kullanılarak elde edilmiştir. C katsayısı numune boyutuna göre standarttaki Tablo 1'den, 18 olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar ise **Çizelge 4.2**'de gösterilmiştir. [40]

$$\delta_{uc} = C I_{S(50)} \quad (4.1)$$

Taş malzeme için basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri ise yapılan önceki çalışmalardan alınmış bu çalışmalar referans olarak kabul edilmiştir. Şahin, A. yaptığı çalışmada taş malzeme için $E=10000$ MPa, Serhatoğlu, C. ise yine taş malzeme için $E=7000$ MPa olarak almıştır. Bu değerlerden $E=10000$ MPa seçilerek taş malzeme için kullanılmıştır. [41,42]

Analiz modelinde makro modelleme yönteminin kullanılması sebebiyle tuğla ve harç olarak ayrı ayrı belirlenen malzeme dayanımları literatürdeki Kaushik, H.B. v.d tarafından yapılan çalışmada kullanılan formüllerden uygun olanı ile birleştirilerek yığma birimi temsilen tek bir değer elde edilmiştir. Yine aynı çalışmadaki formüller

ile tuğla ve harç malzemelerine ait elastisite modülü değerleri de elde edilmiştir. [32]

Tuğla için;

$$E_b = 300 f_b \quad (4.2)$$

Harç için;

$$E_j = 200 f_j \quad (4.3)$$

Yığma Birim için;

$$f_m = 0.63 f_b^{0.49} f_j^{0.32} \quad (4.4)$$

$$E_m = 550 f_m \quad (4.5)$$

formülleri kullanılmıştır. Elde edilen değerler aşağıdaki **Çizelge 4.2**'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Kullanılan malzeme özellikleri.

Malzeme	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Poisson Oranı
Taş	-	10	22	0,2
Tuğla	22,4	6,72	18	0,17
Harç	10	2	18	0,15
Yığma Birim	6,04	3,32	18	0,17
Rijit Eleman	0	1000	0	0

4.3 Makro Modele Ait Modal Analiz Sonuçları

Minare modeli oluşturma ve malzeme tanımlama adımlarından sonra periyot, mod şekilleri ve kütle katılımları elde edilmiştir.

Analiz sonucu çıkan periyot değeri ile minarelerde hızlı periyot hesabıyla ilgili olarak önceki çalışmalarda geliştirilmiş ampirik formüller ile kontrol edilmiş ve bu çalışmalarda verilen maksimum hata sınırı aşılmamıştır.

Yapılan modal analiz sonucunda elde edilen periyot, frekans ve X-Y yönlerindeki kütle katılım oranları **Çizelge 4.3**'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Periyot, frekans değerleri ve kütle katılım oranları.

Mod	Periyot (sn)	Frekans(sn^{-1})	X Yönü Kütle Katılım	Y Yönü Kütle Katılım	Toplam Kütle Katılım-X	Toplam Kütle Katılım-Y
1	1,21	0,82	0,41	0,00	0,41	0,00
2	1,21	0,83	0,00	0,41	0,41	0,41
3	0,26	3,91	0,13	0,00	0,54	0,41
4	0,26	3,92	0,00	0,13	0,54	0,54
5	0,14	7,18	0,07	0,00	0,61	0,54
6	0,14	7,19	0,00	0,07	0,61	0,61
7	0,13	7,68	0,00	0,00	0,61	0,61
8	0,11	9,51	0,00	0,00	0,61	0,61
9	0,08	12,99	0,08	0,00	0,70	0,62
10	0,08	13,00	0,00	0,08	0,70	0,70
11	0,05	19,42	0,00	0,06	0,70	0,76
12	0,05	19,43	0,06	0,00	0,76	0,76
24	0,03	39,73	0,02	0,00	0,88	0,86
36	0,02	56,19	0,00	0,00	0,90	0,90
48	0,02	64,01	0,00	0,00	0,92	0,92
60	0,01	72,33	0,00	0,00	0,94	0,94
120	0,01	115,70	0,00	0,00	0,95	0,95

Modal analiz sonuçlarına göre X yönü kütle katılım 3. modda %54 katılım, 12. modda %76 katılım, 24. modda %88 katılım, 36. modda %90 katılım ve son olarak TBDY 2018’de göz önüne alınması gereken kütle katılım sınırı olan %95’lik katılıma 104. modda ulaşılmıştır.

Minareye ait ilk 7 mod şekli **Şekil 4.5**’te verilmiştir.



Şekil 4.5 : Makro modele ait ilk yedi mod şekli.

X yönünde en fazla kütle katılımı 1. modda, Y yönünde en fazla kütle katılımı 2. modda ve burulma yönünde ise en fazla kütle katılımı 8. modda olmuştur.

4.4 Periyot Kontrolü Ve Periyodu Etkileyen Durumların Değerlendirilmesi

Elde edilen hakim periyot değeri $T_1=1,21$ sn'dir. Periyot değeri önceki çalışmalarda minarelerde hızlı periyot hesabı için geliştirilmiş formüllerle kontrol edilmiştir. İlk olarak C.S. Oliveeria v.d. 11 minare üzerinde yaptığı çalışmada (4.6)'deki formülden yola çıkarak modellerine uyumlu bir ampirik denklem (4.7) oluşturulmuştur. Bu denklemde malzeme özellikleri kendi modellerine uygun olarak katsayılara dönüştürülmüş ve α , β ve δ katsayıları elde edilmiştir. Bu çalışmadaki malzeme değerlerinin, denklemde kullanılan malzeme değerlerinden farklı olması sebebiyle (4.7) denklemi kullanılmamıştır. [43]

$$f = \frac{1}{2\pi} (1.875)^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (4.6)$$

$$f = \alpha \cdot A^{-0.5} \cdot I^\beta \cdot H^\delta \quad (4.7)$$

Diğer bir çalışma olan Diğer bir çalışma olan Rivaoglu, R. v.d. yaptığı çalışmada da yine (4.6) formülünden yola çıkılarak (4.8) formülü elde edilmiştir.[44] Bu formül çalışmadaki minareye uygulandığında elde edilen sonuç ise (4.9)'da verilmiştir. Denklem içeriğinde tek çeşit malzeme kullanılmış olması sebebiyle sonlu elemanlar modeli de sadece tuğla eleman olarak revize edilerek analiz yapılmıştır. Analiz sonucu çıkan periyot değeri $T = 1,31$ sn'dir.

$$T_1 = 0.223H^{1.91}A^{1.53}I^{-0.97}\rho^{-0.41}E^{-0.13} \quad (4.8)$$

$$T_1 = 0.223 \times 42.3^{1.91} \times 18.2^{1.53} \times 46.58^{-0.97} \times 1800^{-0.41} \times 3.321E9^{-0.13} = 1.55 \text{ sn} \quad (4.9)$$

Elde edilen sonlu elemanlar periyot değeri ile ampirik formüldeki periyot değeri karşılaştırıldığında hata oranı %18 olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamındaki maksimum hata oranı olan %18 değeri aşılmayarak sağlanmıştır.

Bulunan periyot değerleri Bursa Ulucami doğu minaresi için önceki çalışmalarda yapılmış ortam ölçümleri ve analiz sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Serhatoğlu, C. tezinde yapılan ortam ölçümlerinde $T_1=1,22$ sn, $T_2=1,21$ sn, $T_3=0,297$ sn olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada yapılan analizlerde ise $T_1=1,27$ sn, $T_2=1,28$ sn, $T_3=0,28$ sn değerleri bulunmuştur. Şahin, A. tarafından yapılan başka bir çalışmada ise yapılan modal analiz sonucunda $T_1=1,6$ sn, $T_2=1,6$ sn, $T_3=0,19$ sn değerleri elde edilmiştir. [41,42]

Sonraki adımda periyodu etkileyebilecek parametreler irdelenmiştir.Bu yaklaşımla ilgili ele alınan konular eleman parça sayısı ve minare elemanlarının etkileridir.

Sonlu elemanlar modelinde analiz sonuçlarını en çok etkileyen durumlardan biri olan elemanın bölündüğü parça sayısının periyot üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk modelde parça aralıkları merdiven rıht yüksekliği olan 27cm düşey aralık ile 20 derece aralıklarla konumlandırılmış basamak uçları-gövde birleşim noktalarının oluşturduğu ağ yapısı dikkate alınmıştır. İkinci modelde bu parçaların tamamı ikiye bölünerek hesap yapılmış, sonraki adımda ise yine önceki adımdaki elemanlar ikiye bölünerek analizler sonlandırılmıştır. Elde edilen toplam parçacık sayısı her eleman modeli için belirtilmiş ve analiz süreleri de eklenerek periyotlardaki değişim izlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : Parça sayısına göre periyot değişimi.

Düşeyde Mesh Aralığı	Düğüm Noktası Sayısı	Çubuk Eleman Sayısı	Kabuk Eleman Sayısı	Katı Eleman Sayısı	Analiz Süresi	T1 (sn)	T2 (sn)	T3 (sn)
0,27m	5787	1994	3150	1840	10 sn	1,215	1,212	0,256
0,135m	29356	7441	11916	14720	1dk 34sn	1,229	1,227	0,255
0,0675m	173949	24458	46980	117760	48dk 40sn	1,235	1,233	0,255

Sonlu elemanlar modelinde analiz yaparken parçacık sayısının artması elde edilen sonuç açısından gerçekteki sonuca daha yakınlaştırmakta fakat bununla birlikte de analiz süresinin çok daha artmasına sebep olmaktadır. Periyot değerindeki değişime bakıldığında olası gerçek değere yakın olan birinci durumun ilerleyen aşamalarda kullanılabileceği düşünülmüştür.

Son olarak ise minare kısımlarının periyoda olan etkisi incelenmiştir. Periyot değişimleri **Çizelge 4.5**'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Minare kısımlarının periyoda etkisi.

Gövde	Kaide	Çekirdek	Merdiven	Petek	Küp	Külâh	T1 (sn)	T2 (sn)	T3 (sn)
+	+	+	+	+	+	+	1,21	1,21	0,26
+	+	+	+	+	+	-	1,15	1,15	0,22
+	+	+	+	+	-	+	1,35	1,35	0,27
+	+	+	+	+	-	-	1,29	1,29	0,23
+	+	+	+	-	-	-	1,14	1,14	0,20
+	-	+	+	-	-	-	1,38	1,38	0,24
+	+	-	-	+	+	+	1,19	1,19	0,25
+	+	-	-	-	-	-	1,10	1,10	0,19
+	-	-	-	-	-	-	1,33	1,33	0,23
+	-	-	-	+	-	-	1,49	1,49	0,26

Analizler sonucunda yapılan değerlendirilmede elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir,

- Külah modele dahil edilmediğinde, yapı periyodu azalmıştır. K lahın modele kütlesel katkısı daha fazladır.
- Kaideden gövdeye geçişi sağlayan k p elemanı modele dahil edilmediğinde periyotta artış olmuştur. K p elemanın yapı rijitliğine katkısı vardır.
- Merdiven ve çekirdek modele dahil edilmediğinde periyotta azalma görülmüştür. Bunun sebebi olarak merdivenlerin, rijitliğe oranla kütleye katkısının daha fazla olduğu söylenebilir.
- Kaidenin modelden çıkarılması durumunda ise periyotta artış olmuştur. Kaidenin yapı rijitliğine katkısı oldukça fazladır.
- Sadece gövde ve petek kısımlarının analizinde bulunan periyot değeri tam modelin periyodundan %23 oranında daha fazladır. Sadece gövdenin modellendiği durumda ise bu oran %10'a düşmektedir.

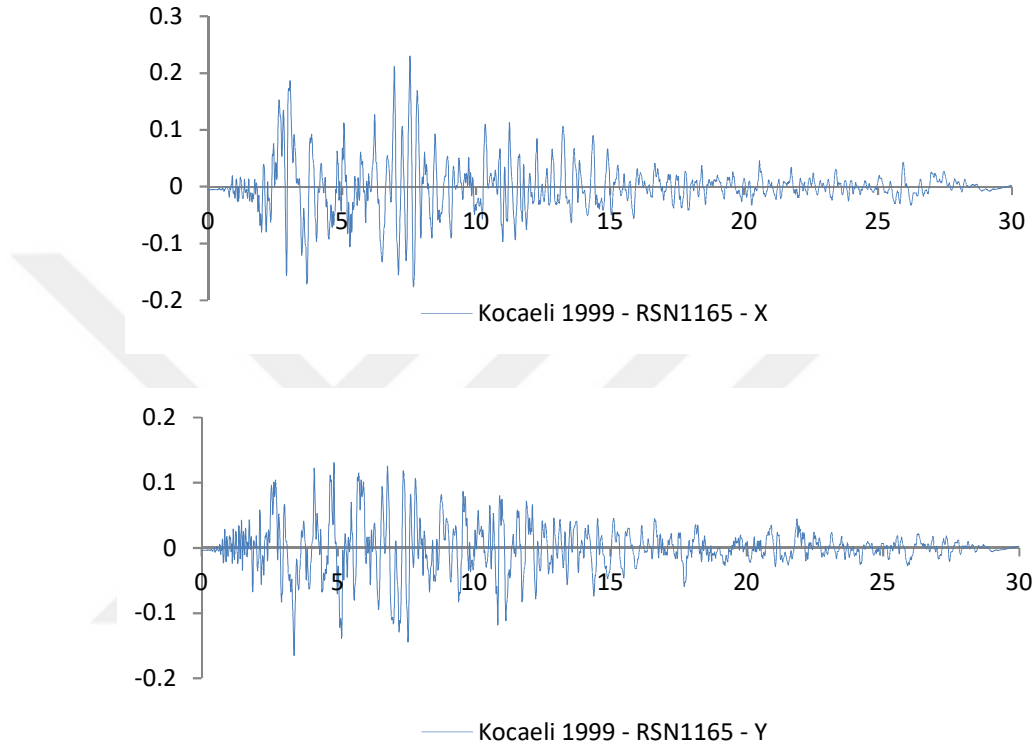
4.5 Makro Modele Ait Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz

Makro olarak modellenen Bursa Ulucami doğu minaresinin gerilme ve yerdeğiştirme sınırlarının değerlendirilmesi için doğrusal zaman tanım alanında hesap yapılmıştır. Bu analiz sırasında 17 Ağustos 1999 tarihinde Kocaeli'nde meydana gelmiş depreme ait yer hareketi kaydı kullanılmıştır. Deprem kaydı Peer Ground Motion Database sayfasından alınmıştır. Seçilen depremin kayıt numarası RSN1165'tir. Kaydedilen deprem süresi 30 sn'dir. Adım aralığı 0,005 sn olup toplam 6000 adım vardır. [45]

Doğrusal zaman tanım alanında analiz yapılmadan önce deprem kayıtları yapının bulunduğu bölgeye tanımlı olan spektruma göre ölçeklendirilmiştir. Ulucami'nin bulunduğu koordinatlara göre elde edilen yatay elastik tasarım spektrumlarının oluşturulma adımları Bölüm 3'te anlatılmıştır. İndirilen ham deprem kaydı ivme-zaman grafikleri **Şekil 4.6**'da gösterilmiştir.

Literatürdeki taş, tuğla ve almaşık yapıdaki minareler için A. Doğangün v.d. [48] tarafından yapılan çalışmada, sönüm oranı %5 olarak alınmıştır. A.C.Altunışık [49] tarafından taş ve tuğlanın birlikte kullanıldığı yığma minarede sönüm oranı %5 olarak alınmıştır. Bir diğer çalışma olan A.M.Türk ve A.M.Coşgun [50] tarafından yapılan çalışmada ise yapılan analizde minare yapısı için sönüm oranının %2 olarak alındığını belirtmişlerdir. C.S. Oliviera v.d. [43] tarafından yapılan başka bir

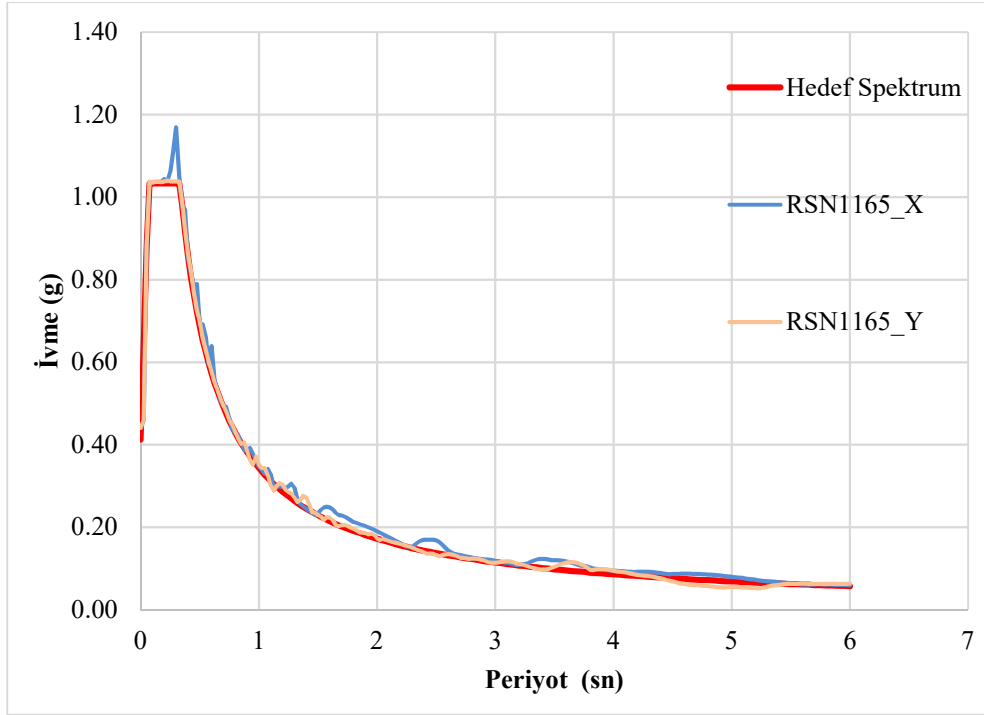
çalışmada ise taş malzemeli minarelerde yapılmış ortam ölçümleri sonucu elde edilen sönüm oranları verilmiş ve elde edilen sönüm oranları %0,21-%2,67 arasında değişmektedir. Fakat yapılacak analizlerde sönüm oranı %5 olarak göz önünde bulundurulmuştur. Betonarme yapılarda da olduğu gibi yapılan ortam ölçümlerinin daha düşük sönüm oranı değerleri vermesine rağmen %5 olarak alınan sönüm oranı, bu çalışmada da yapılan dinamik analizlerde %5 olarak alınmıştır.



Şekil 4.6 : RSN 1165 ivme kaydı, X ve Y yönlerine ait ivme – zaman grafiği.

TBDY 2018’de de yer alan deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi için *deprem kayıtlarının basit ölçeklendirme yöntemi* ve *deprem kayıtlarının spektral uyum sağlayacak şekilde ölçeklendirilmesi* şeklinde iki temel yöntem bulunmaktadır. İlk yöntemde, ivme değerlerinin sabit bir faktör ile artırılması veya azaltılması şeklinde uygulanır. Bu yöntemde kayıta ait spektrumun $0,2 T_p$ ve $1,5 T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin, yapının bulunduğu alan ve zemine göre elde edilmiş olan tasarım spektrumunun yine bu periyot aralığındaki genliklerinden daha küçük olmaması gerekmektedir. Bu çalışmada ise, ölçeklendirme yöntemi olarak *deprem kayıtlarının spektral uyum sağlayacak şekilde ölçeklendirilmesi* yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemde göre, dönüştürülen deprem yer hareketi spektrumu, tüm periyotlar için elde edilen tasarım spektrumu ordinatlarından küçük olmayacaktır. Spektral uyumunu

sağlayacak şekilde ölçeklendirme işlemi, ivme kaydının frekans içeriğinin tasarım spektrumuna uyum sağlayacak şekilde değiştirilmesiyle yapılır. Ölçeklendirme SeismoMatch programı ile yapılmıştır. İvme kayıtlarının elde edilen yatay elastik tepki spektrumuna göre ölçeklendirilmiş son hali ise **Şekil 4.7**'de verilmiştir. [17,46]



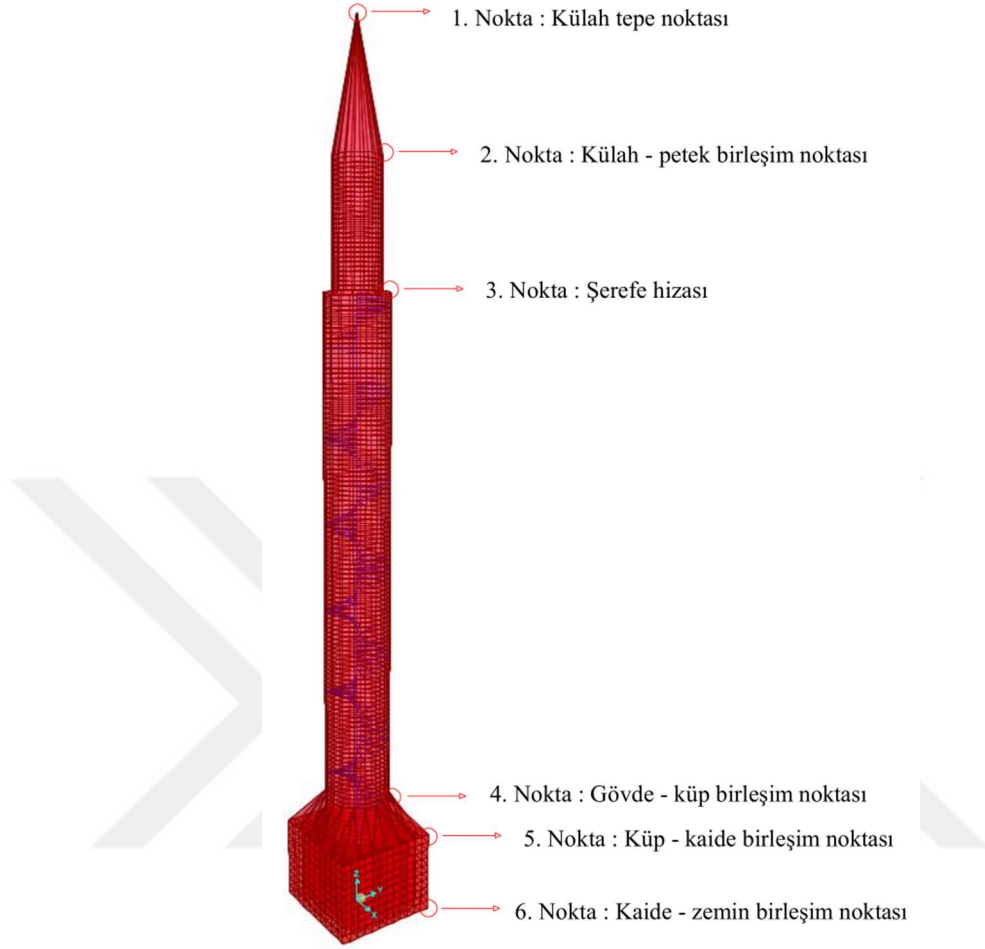
Şekil 4.7 : RSN 1165 – Ölçeklendirilmiş ivme spektrumu.

Doğrusal analizde yapının elastik ötesi davranışından oluşan dayanım kapasitesindeki artış ve depremin yapıdan talebinde olan azalma, R_a (Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı) ile hesaba katılır. Elastik ötesi davranışın genellikle sınırlı olduğu yığma yapılarda $R_a=3$ olarak önerilir. Ancak, minareler gibi taşıyıcı sistemi izostatik olan sistemler için $R_a=2$ olarak alınması önerilmektedir. Bu analizde de R_a değeri 2 olarak alınmıştır. X ve Y yönlerinde ayrı ayrı uygulanan ivme kayıtları sonucunda belirlenen azaltılmış deprem yüküne karşılık gelen dayanım değerleri, sınır değerler ile karşılaştırılmıştır. Yerdeğiştirme karşılaştırmaları ve öteleme hesabı ise azaltılmamış deprem yüküne göre yapılmıştır. [30]

4.5.1 Makro modele ait yer değiştirme kontrolleri

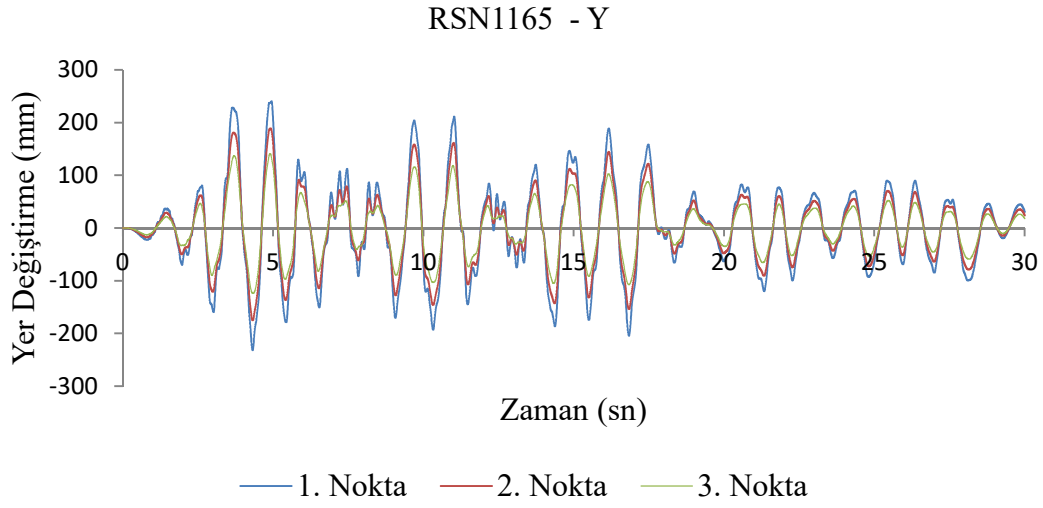
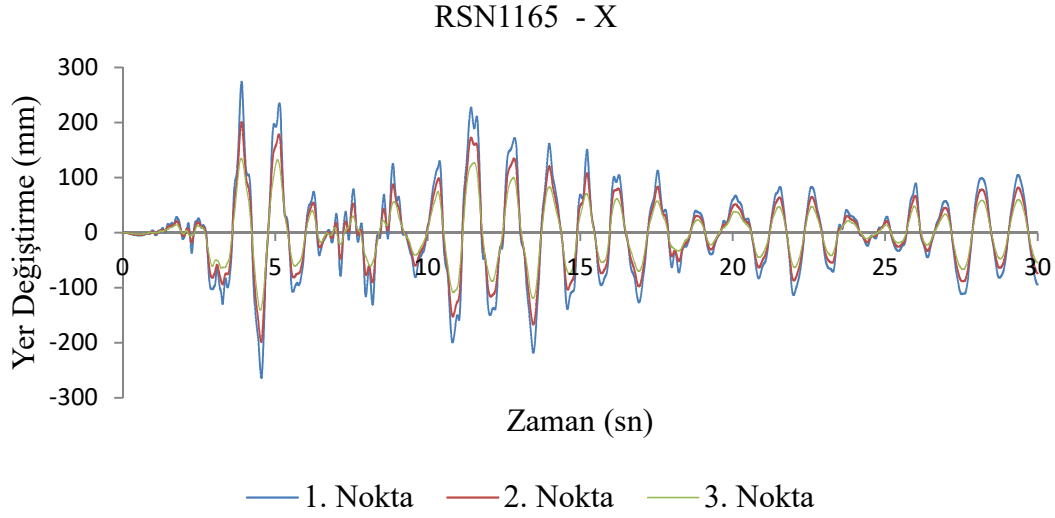
Yapılan doğrusal zaman tanım alanında analiz sonuçlarına göre belirlenen bazı noktaların maksimum yerdeğiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerlere göre göreceli öteleme oranları belirlenerek sınır koşulları ile karşılaştırılmıştır. Belirlenen bu noktalar, tarihi yapılarda genellikle güvenliğin en zayıf olduğu düşünülen, farklı

elemanların oluşturduğu birleşim bölgelerinden veya kesit değişimlerinin olduğu bölgelerden seçilmiştir. Numaralandırmaların yerleri **Şekil 4.8**'de verilmiştir.



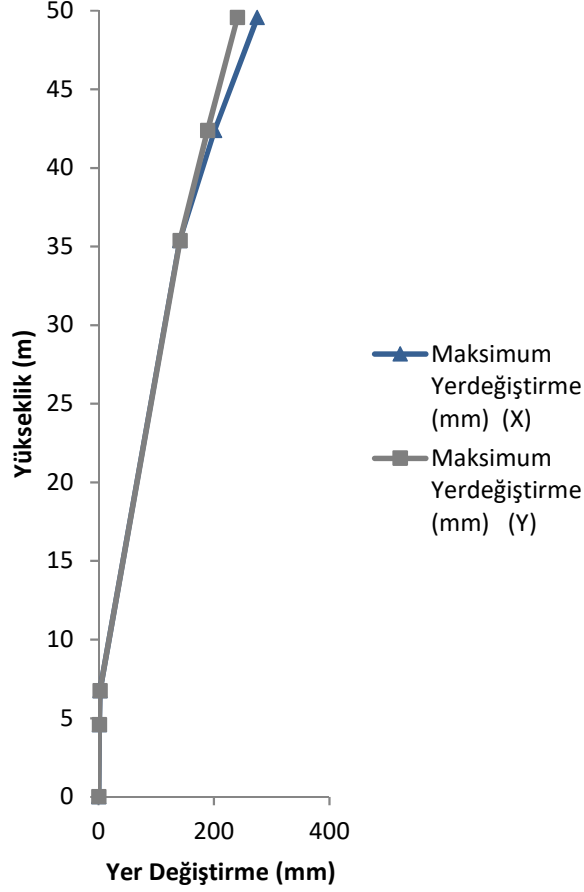
Şekil 4.8 : Yer değiştirme kontrolü için seçilen noktalar.

Belirlenen noktalardan 1,2 ve 3 numaralı noktalara ait azaltılmamış deprem yükü etkisi altındaki zamana bağlı şekil değiştirme grafikleri **Şekil 4.9**'da gösterilmiştir. Grafikler sırasıyla X ve Y yönlerinde etkiyen deprem için elde edilmiştir.



Şekil 4.9 : 1, 2 ve 3 numaralı noktaların zamana bağlı yerdeğişirme grafikleri.

Minare yüksekliği boyunca azaltılmamış deprem yükü etkisinde, X ve Y yönlerinde oluşan maksimum yer değişirme grafiği **Şekil 4.10**'da verilmiştir. X yönünde maksimum tepe yerdeğişirmesi 275mm iken Y yönünde maksimum tepe yerdeğişirmesi 241mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.10 : Makro modele ait minare yükseklik boyunca maksimum yer değiştirme grafiği.

Yapılan zaman tanım alanında analiz sonuçlarına göre belirlenen noktalara ait yerdeğiştirme değerleri **Çizelge 4.6**'da verilmiştir. Farklı seviyelerde alınan bu noktaların birbirine göre yatayda yaptığı yer değiştirme farkı ile yine bu noktaların arasındaki yükseklik farkına oranı ile elde edilen öteleme oranları bulunmuştur.

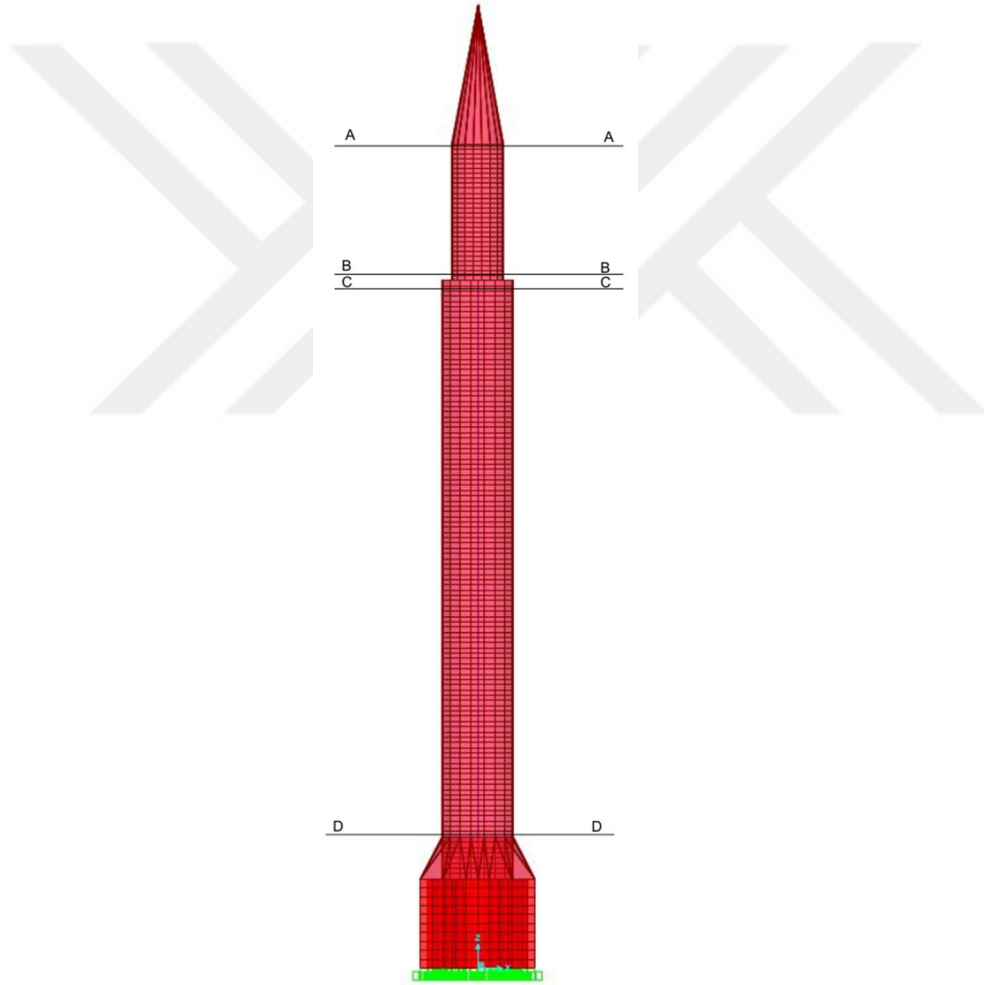
Çizelge 4.6 : Uluçami doğu minaresi makro modelde öteleme oranları.

	Nokta No	Yükseklik (m)	Maksimum Yerdeğiştirme (mm) (X)	Maksimum Yerdeğiştirme (mm) (Y)	Öteleme Oranı (X)	Öteleme Oranı (Y)
	1→2	49.55	274.88	240.536	1.03%	0.72%
	2→3	42.37	201.004	188.59	0.86%	0.68%
	3→4	35.37	140.658	141.006	0.48%	0.49%
	4→5	6.75	2.376	2.108	0.06%	0.05%
	5→6	4.59	1.164	1.014	0.03%	0.02%
	6	0	0	0	-	-

Bursa Ulucami doğu minaresi makro modeline ait zaman tanım alanında doğrusal hesap yapılmış, azaltılmamış deprem etkisi sonucunda, tepe noktası maksimum öteleme oranı X yönünde %1,03 olarak bulunmuştur. Bölüm 3, Şekil 3.24’te bahsedilen performans seviyeleri sınır değerlerine göre, sınır değeri %1 olan “*Göçmenin Önlenmesi Sınır Durumu*” koşulunu sağlamaktadır.

4.5.2 Makro modele ait kesme dayanımı kontrolleri

Minare yüksekliğince belirlenen dört farklı noktaya ait kesme kuvvetleri, bu yüzeylerdeki mevcut kesme dayanımları ile karşılaştırılmıştır. A,B,C ve D olarak belirlenen yüzeyler Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 : Kesme kuvveti kontrolü yapılan yüzeyler.

Kesme kuvveti dayanımları hesabı TBDY 2018, Bölüm 11’e göre yapılmıştır. [17]

Duvar karakteristik kesme dayanımı f_{vk} değeri denklem (4.10) ile elde edilmiştir.

$$f_{vk} = f_{vko} + 0.4\sigma_d \quad (4.10)$$

Duvar başlangıç kesme dayanımı f_{vko} olup TBDY 2018'deki tablodan 0.30 MPa olarak alınmış, **Çizelge 4.7**'de verilmiştir. σ_d olarak ifade edilmiş olan düşey basınç gerilmesi değeri, seçilen yüzeylere ait maksimum kesme kuvvetinin meydana geldiği zamana göre elde edilen düşey gerilmeler olarak modelden alınmıştır.

Çizelge 4.7 : Duvar başlangıç kesme dayanımları, f_{vko} (MPa) (TBDY 2018 – 11.2.10)

Kargir Birim	Genel Amaçlı Harç		İnce Tabaka Harç
Tuğla	M10-M20	0.30	0.30
	M2.5-M9	0.20	
	M1-M2	0.10	
Beton	M10-M20	0.20	0.30
Gazbeton	M2.5-M9	0.15	0.30
Doğal veya Yapay Taş	M1-M2	0.10	Kullanılamaz

Duvar kesme kuvveti dayanımı V_R için (4.11) ve (4.12) denklemleri kullanılarak bunlardan küçük olan değer alınmıştır. Denklem (4.12)'de verilen b değeri duvar yüksekliğinin duvar uzunluğuna oranı olup TBDY 2018, 11.4.3'e göre 1'den küçük 1.5'tan büyük alınmayacaktır. Çalışmadaki yapının minare olması ve bu değer için çok daha büyük bir değer çıkması sebebiyle b=1.5 olarak kabul edilmiştir.

$$1. \quad V_R = f_v A \quad (4.11)$$

$$2. \quad V_R = A \frac{1.5 f_{vko}}{b} \sqrt{1 + \frac{N_{Ed}}{1.5 A f_{vko}}} = A f_{vko} \sqrt{1 + \frac{N_{Ed}}{1.5 A f_{vko}}} \quad (4.12)$$

(4.11) ve (4.12) denklem hesaplarında kullanılan değerler **Çizelge 4.8**'de verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Makro model için denklem (4.11) ve (4.12)'de kullanılan değerler.

Kesit No	Alan (m ²)	σ_d (kPa)	f_{vko} (kPa)	f_{vk} (kPa)	N_{Ed} (kN)
A	5,023	40,58	300	316,2	203,8
B	5,023	161,31	300	364,5	810,3
C	18,200	58,53	300	323,4	1065,2
D	18,200	624,84	300	549,9	11372,1

Belirlenen A,B,C ve D noktaları için elde edilen denklem sonuçları **Çizelge 4.9**'da gösterilmiştir.

X ve Y yönünde etkiyen depremler sonucu elde edilen kesme kuvvetlerinden maksimum olan değerler alınmıştır. Hesaplanan dayanım değerlerinden küçük olanlar seçilerek deprem sırasında etkiyen maksimum yükler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma değerleri **Çizelge 4.9**'da verilmiştir.

Çizelge 4.9 : Kesme dayanımlarının karşılaştırılması.

Kesit No	Denklem 1	Denklem 2	Etkiyen Kesme Kuvveti
	V_{Rd1} (kN)	V_{Rd2} (kN)	V_{Ed} (kN)
A	1588,7	1573,6	279,5
B	1831,9	1757,0	594,3
C	5887,3	5805,2	638,2
D	10010,5	8439,3	2111,1

Deprem azaltma katsayısı $R_d=2$ alınarak azaltılmış deprem etkisi altında yapılan analiz sonucunda minareye gelen maksimum kesme kuvvetlerinin, kesme dayanım değerlerini aşmadığı görülmüştür. Yapı “*Kontrollü Hasar Durumu*” koşulunu sağlamaktadır.

4.5.3 Makro modele ait gerilme dağılımları

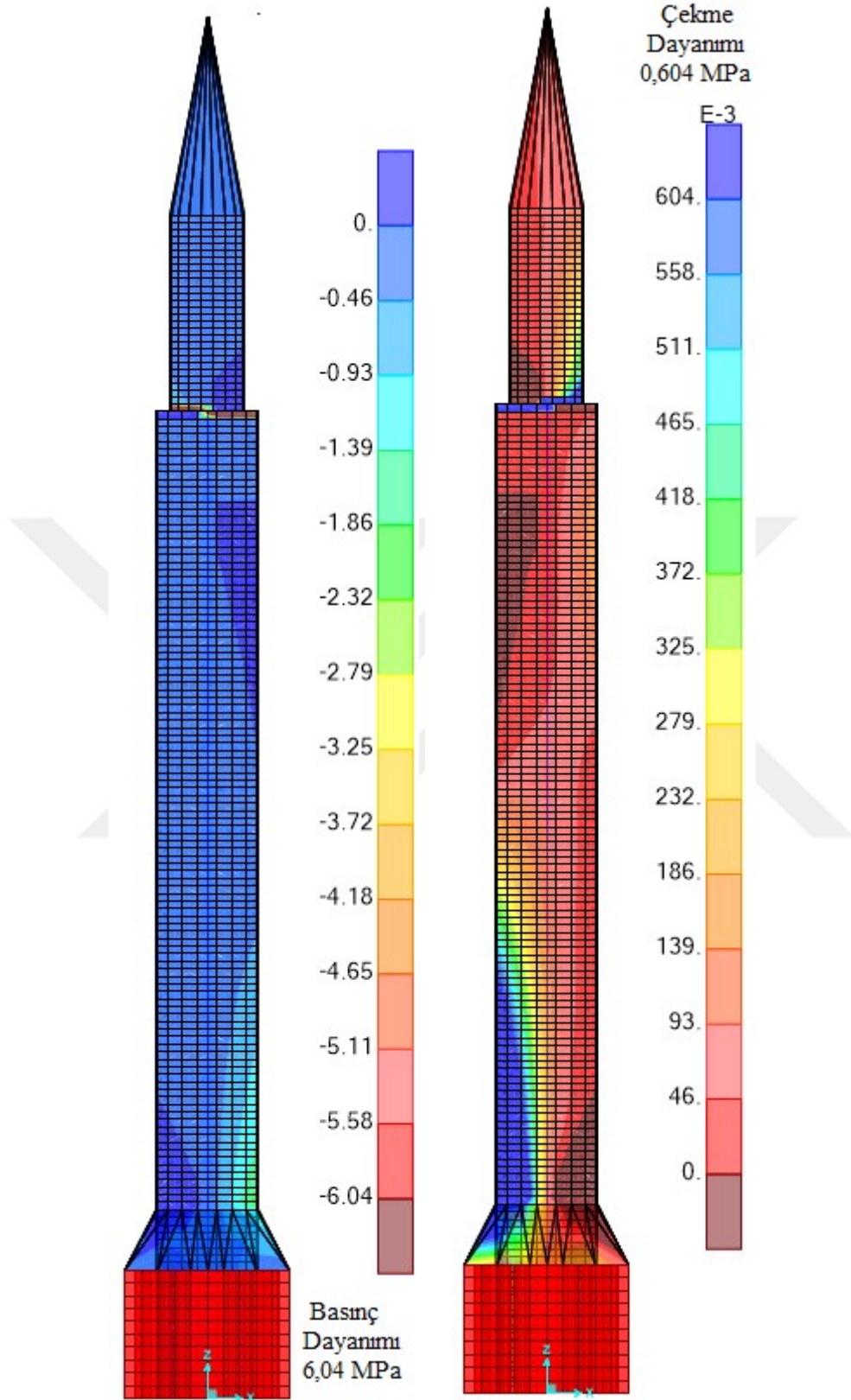
Yapılan zaman tanım alanında analiz süresince tabana gelen maksimum deprem kuvvetleri X ve Y yönünde belirlenmiştir. (**Çizelge 4.10**) Bu kuvvetlerin minareye etkidiği zamanlara ait gerilme dağılımları elde edilmiştir. Minimum ve maksimum asal gerilmeler X ve Y yönleri için ayrı ayrı sırasıyla **Şekil 4.12** ve **Şekil 4.13**'te gösterilmiştir. Gerilme dağılımlarının gösteriminde, malzeme basınç ve çekme dayanımı değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.10 : Maksimum taban kesme kuvvetleri ve zaman değerleri.

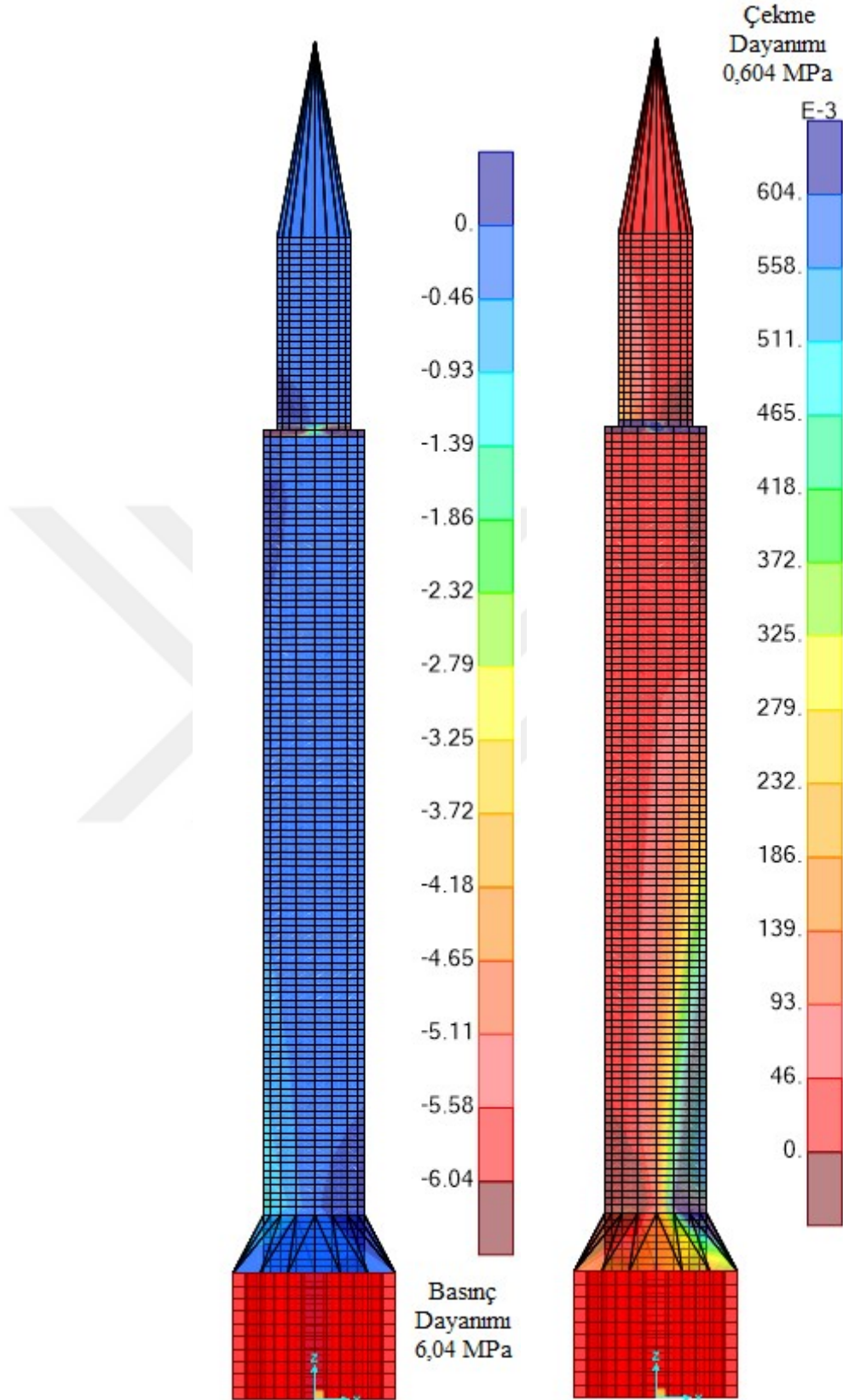
	Maksimum Taban Kesme Kuvveti (kN)	Zaman (sn)
X Yönü	-2372	4,025
Y Yönü	1877	10,17

X yönündeki depreme göre oluşan gerilmelerde petekten gövdeye geçiş kısmında çekme gerilmeleri bir miktar aşılmakta, gövdeden küp kısmına geçişte ise çekme gerilmeleri malzeme sınır değerlerini aşmaktadır.





Şekil 4.12 : Makro modele ait X yönündeki depreme karşılık gelen minimum ve maksimum asal gerilme dağılımları (MPa).



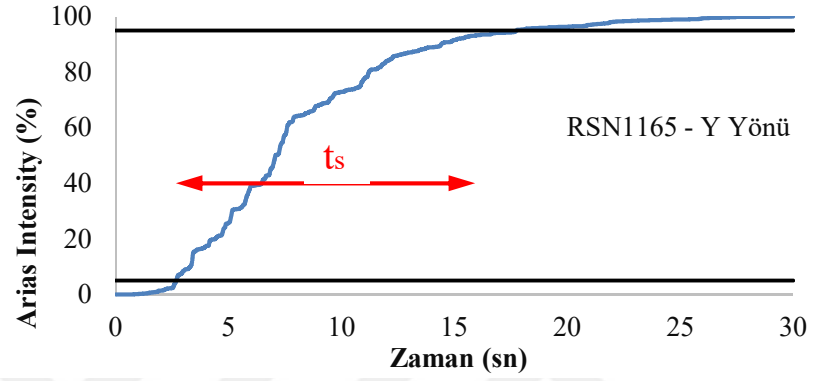
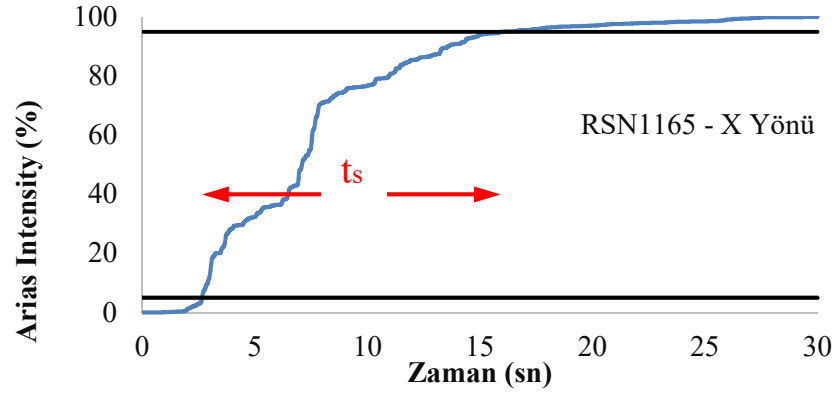
Şekil 4.13 : Makro modele ait Y yönündeki depreme karşılık gelen minimum ve maksimum asal gerilme dağılımları (MPa).

4.6 Makro Modele Ait Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz

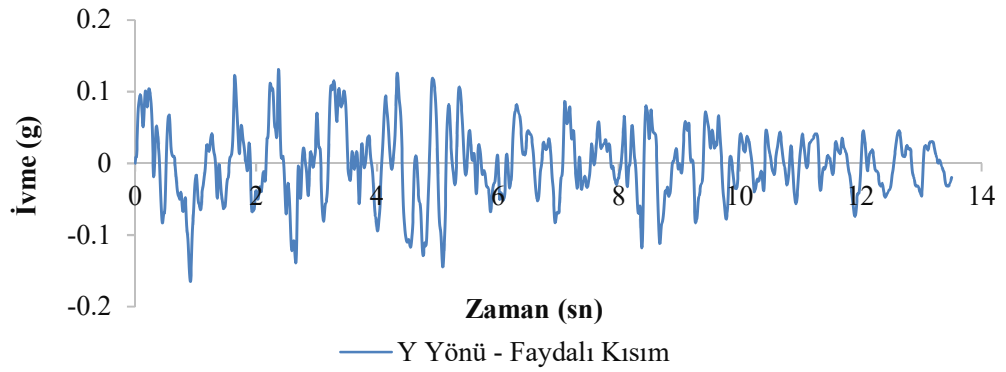
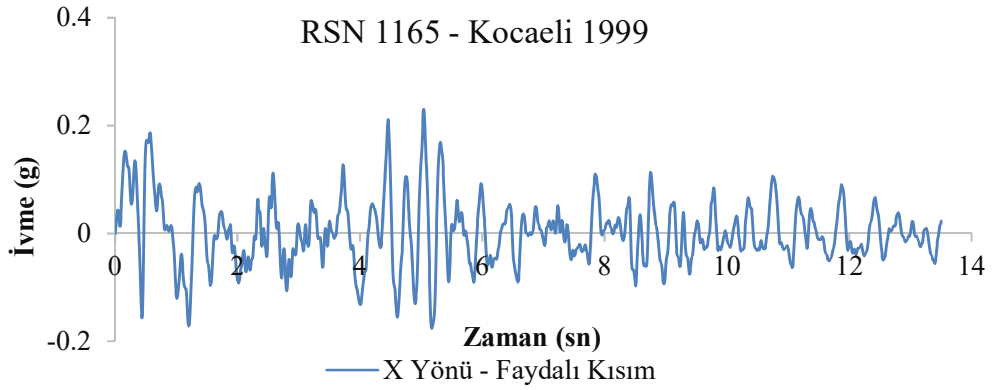
Makro modelleme yaklaşımı ile modellenen Bursa Ulucami doğu minaresi için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapılmıştır. Doğrusal olmayan davranış, malzemenin doğrusal olmayan davranışını veren malzemeye ait gerilme – birim şekil değiştirme grafiği ile tanımlanmıştır.

Analizde, doğrusal analizde kullanılan RSN1165 kodlu 1999 Kocaeli depremi ivme kaydı kullanılmıştır. Bu deprem kaydında 0,005sn aralıkla kaydedilmiş X yönünde 6000 adet, Y yönünde 6000 adet olmak üzere toplamda 12000 adet kayıtlı adım bulunmaktadır. Analizini yapacağımız yapının boyutları ve eleman sayısı göz önünde bulundurulduğunda, uygulanacak bu deprem kaydının analiz süresini çokça uzatacağı ve sonuç verilerinin bilgisayar belleğinde fazlaca alan kaplayacağı ön görülmüştür. Bu sebeple depreme ait ivme kaydının anlamlı kısmının alınarak kaydın kısaltması yoluna gidilmiştir. Yapılacak bu işlem için ise 1970 yılında Arturo Arias tarafından önerilen “Arias Intensity”den faydalanılmıştır. Bu yöntemle göre deprem sırasında ortaya çıkan enerji ile bir büyüklük tanımlanmaktadır. Deprem sırasında ortaya çıkan enerji, yer ivmesinin karesinin zamana göre integrali olarak tanımlanan denklem (4.13)’e göre hesaplanmış ve kümülatif toplamalarının %5 ile %95 arasındaki anlamlı kısmı alınarak, dışında kalan deprem adımları silinmiştir. Hesaplamalarda “Seismo Signal” programından faydalanılmıştır. [47] Elde edilen sonuçlar **Şekil 4.14**’te verilmiştir. Faydalı kısmı alınan deprem kayıtlarına ait ivme-zaman grafikleri **Şekil 4.15**’te verilmiştir. [12]

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_d} a(t)^2 dt \quad (4.13)$$



Şekil 4.14 : RSN 1165 – 1999 Kocaeli depremine ait Humid diyagramları ve anlamlı kısmı.



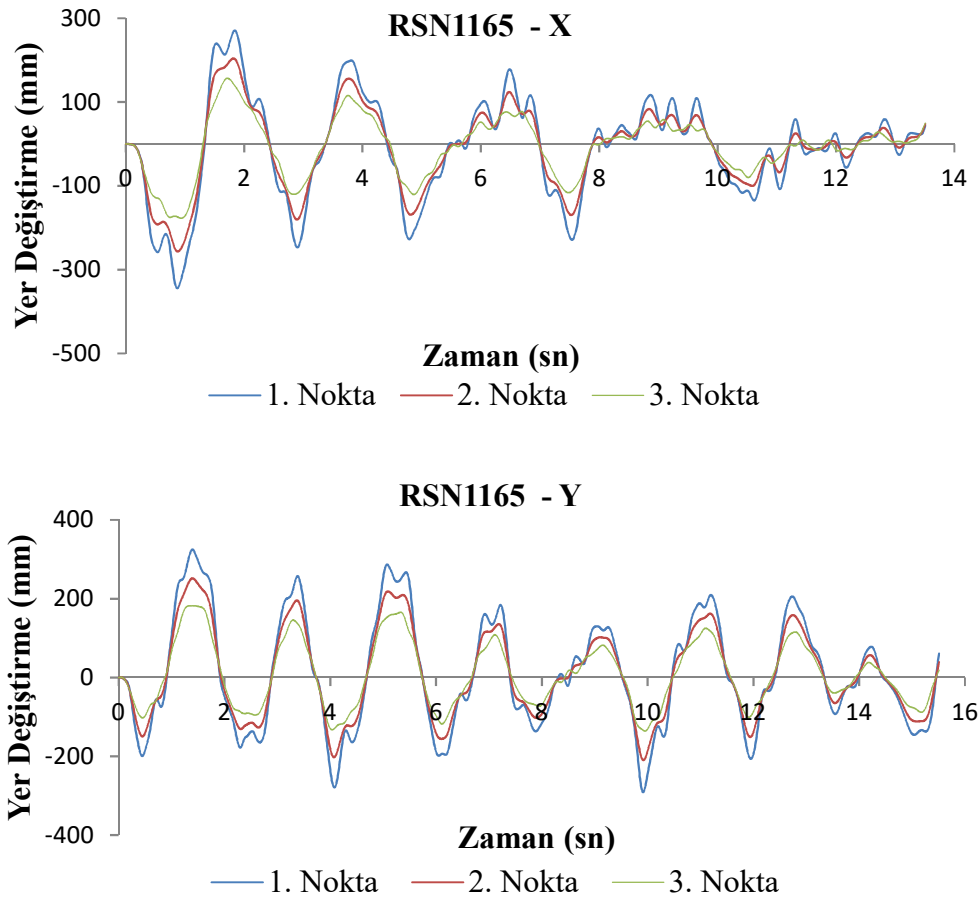
Şekil 4.15 : RSN 1165 depreminin kısaltılmış ivme-zaman grafiği.

Kısaltılan deprem kaydı için Bölüm 4.3'te anlatılan adımlar tekrarlanarak ölçeklendirilmiş ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz için modele uygulanmıştır.

Doğrusal olmayan zaman tanım alanındaki bu analiz için Çizelge 3.2'de belirtildiği şekilde azaltılmamış deprem etkileri kullanılmıştır. Yer değiştirme ve dayanım kontrolleri azaltılmamış deprem etkisi sonucuna göre yapılmıştır.

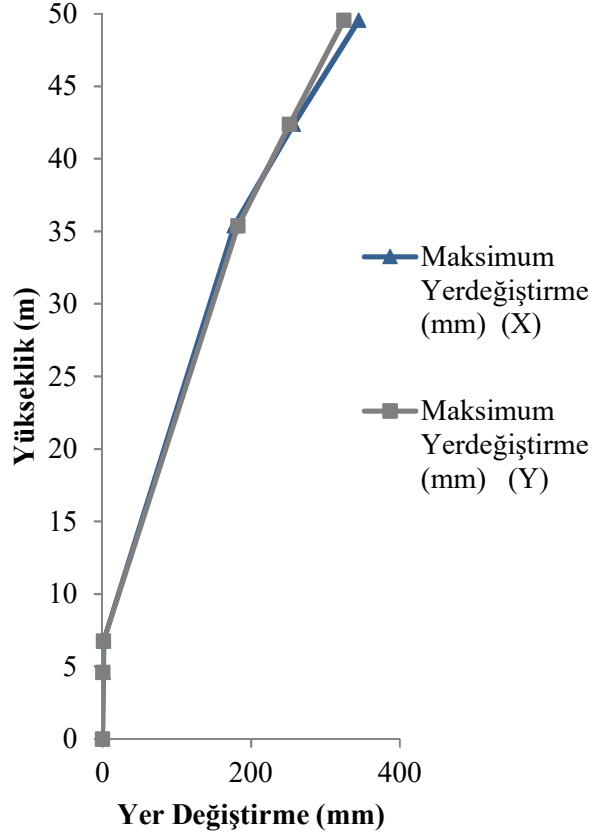
4.6.1 Makro modele ait doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre yerdeğiştirme kontrolleri

Yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonucunda Şekil 4.8'de verilen noktalara göre yerdeğiştirme kontrolleri yapılmıştır. Belirlenen bu noktalardan 1,2 ve 3 numaralı noktalara ait azaltılmamış deprem yükü etkisi altındaki zamana bağlı şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Grafikler sırasıyla X ve Y yönlerinde etkiyen deprem için elde edilmiştir.



Şekil 4.16 : Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz sonucuna göre 1, 2 ve 3 numaralı noktaların zamana bağlı yerdeğiştirme grafikleri.


Minare yüksekliği boyunca azaltılmamış deprem yükü etkisinde, X ve Y yönlerinde oluşan maksimum yer değiştirme grafiği Şekil 4.17’de verilmiştir. X yönünde maksimum tepe yerdeğiştirmesi 345mm iken Y yönünde maksimum tepe yerdeğiştirmesi 325mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.17 : Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analize ait minare yükseklik boyunca maksimum yer değiştirme grafiği.

Belirlenen noktalara ait yerdeğiştirme değerleri ve bu noktalara göre hesaplanan öteleme oranları Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11 : Ulucami doğu minaresi makro modeline ait zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonucu elde edilen öteleme oranları.

	Nokta No	Yükseklik (m)	Maksimum Yerdeğiştirme (mm) (X)	Maksimum Yerdeğiştirme (mm) (Y)	Öteleme Oranı (X)	Öteleme Oranı (Y)
	1→2	49.55	344.601	324.834	1.22%	1.02%
	2→3	42.37	256.765	251.736	1.14%	0.99%
	3→4	35.37	177.109	182.124	0.61%	0.63%
	4→5	6.75	1.558	1.293	0.03%	0.03%
	5→6	4.59	0.852	0.678	0.02%	0.01%
	6	0	0	0	-	-

Bölüm 3, Şekil 3.24’te bahsedilen performans seviyeleri sınır değerlerine göre, Bursa Ulucami doğu minaresi makro modeline uygulanan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçlarında tepe noktası maksimum öteleme oranı X yönünde %1,22 olup, sınır değeri %1 olan “Göçme Öncesi Sınır Durumu” koşulunu aşarak göçmeye ulaşmaktadır.

Doğrusal olmayan analiz süresince oluşan maksimum birim şekil değiştirme değerleri, modeldeki eleman sayısının ve uygulanan zaman tanım alanında analize ait adım sayısının fazla olması sebebiyle oldukça uzun sürmektedir. İmkanlar dahilinde bu değerler alınamamıştır.

4.6.2 Makro modele ait doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre kesme dayanımı kontrolleri

Şekil 4.11’de minare yüksekliğince A,B,C ve D olarak belirlenen dört farklı noktaya ait kesme kuvvetleri, bu yüzeylerdeki kesme dayanımları ile karşılaştırılmıştır.

Kesme kuvveti dayanımları hesabı TBDY 2018, Bölüm 11’e göre yapılmıştır.

Çizelge 4.7’den alınan duvar başlangıç kesme dayanımı (f_{vko}) değeri kullanılarak denklem (4.10)’a göre duvar karakteristik kesme dayanımı f_{vk} değeri elde edilmiştir. Daha sonra, denklem (4.14) ve (4.15) kullanılarak kesme kuvveti dayanımları bulunmuştur. [17]

$$V_R = f_{vk} A \quad (4.14)$$

$$V_R = Af_{vko} \sqrt{1 + \frac{NEd}{1.5Af_{vko}}} \quad (4.15)$$

(4.14) ve (4.15) denklemlerinde kullanılan değerler ve bu denklemlerden elde edilen sonuçlar **Çizelge 4.12**'de verilmiştir. Kesitlere ait kesme dayanımları ile analiz sonucu kesitlere etkileyen kesme kuvvetleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.12 : Ulucami doğu minaresi makro modeline ait zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre kesme dayanımlarının karşılaştırılması.

Kesit No	Alan (m ²)	σ_d (kPa)	f_{vko} (kPa)	f_{vk} (kPa)	N_{Ed} (kN)	V_{Rd1} (kN)	V_{Rd2} (kN)	V_{Ed} (kN)
A	5.023	43.52	300	317.4	218.6	1594.3	1578.1	263.2
B	5.023	286.69	300	414.7	1440.1	2082.9	1928.1	507.9
C	18.200	58.35	300	323.3	1061.9	5884.8	5803.2	543.7
D	18.200	633.35	300	553.3	11526.9	10070.8	8471.7	3065.9

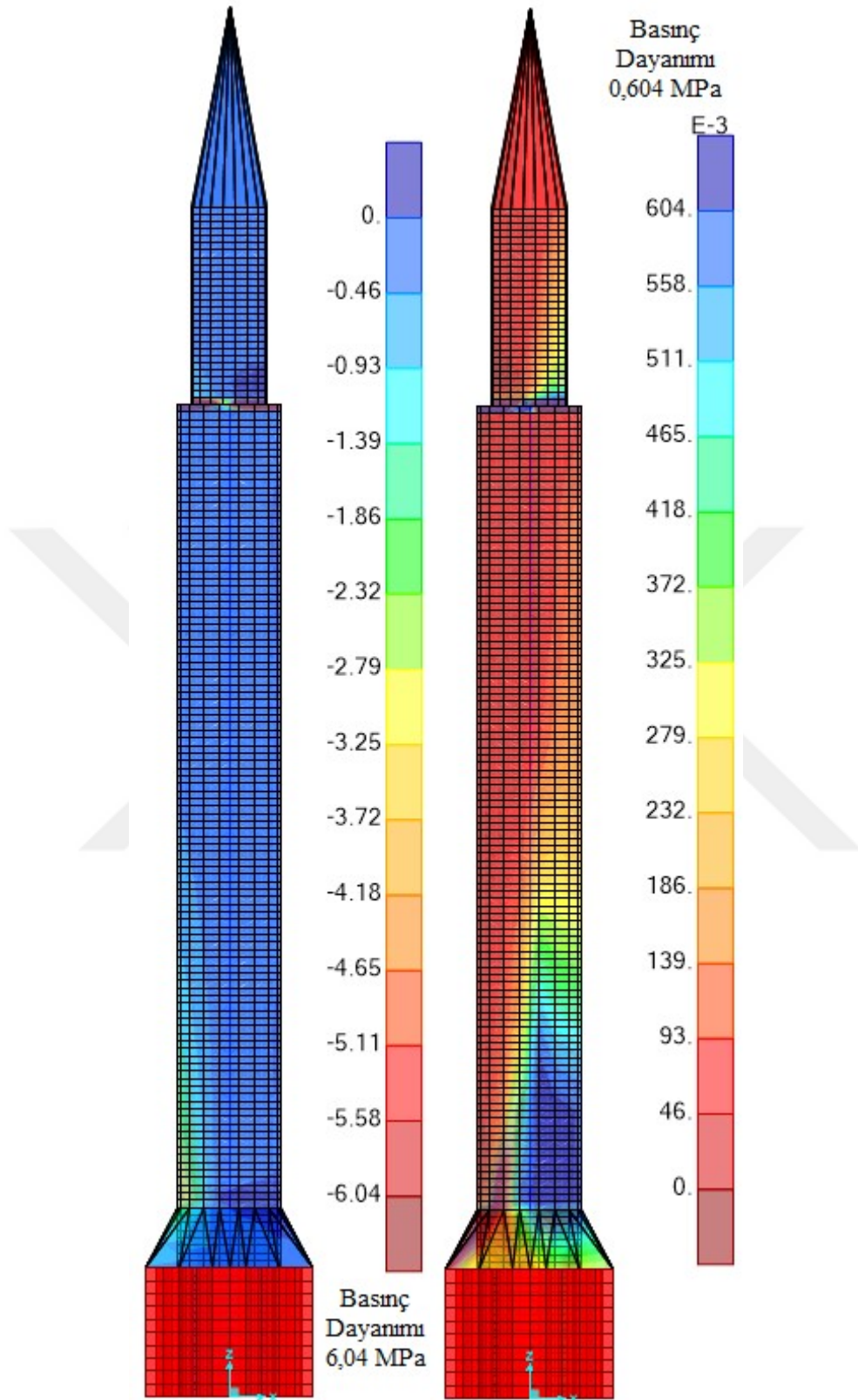
Yapılan değerlendirme sonucunda azaltılmamış deprem etkisi altında minareye gelen maksimum kesme kuvvetlerinin, kesme dayanım değerlerini aşmadığı görülmüştür. Yapı kesme kontrolü sonuçlarına göre “*Kontrollü Hasar Durumu*” koşulunu sağlamaktadır.

4.6.3 Makro modele ait doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre gerilme dağılımları

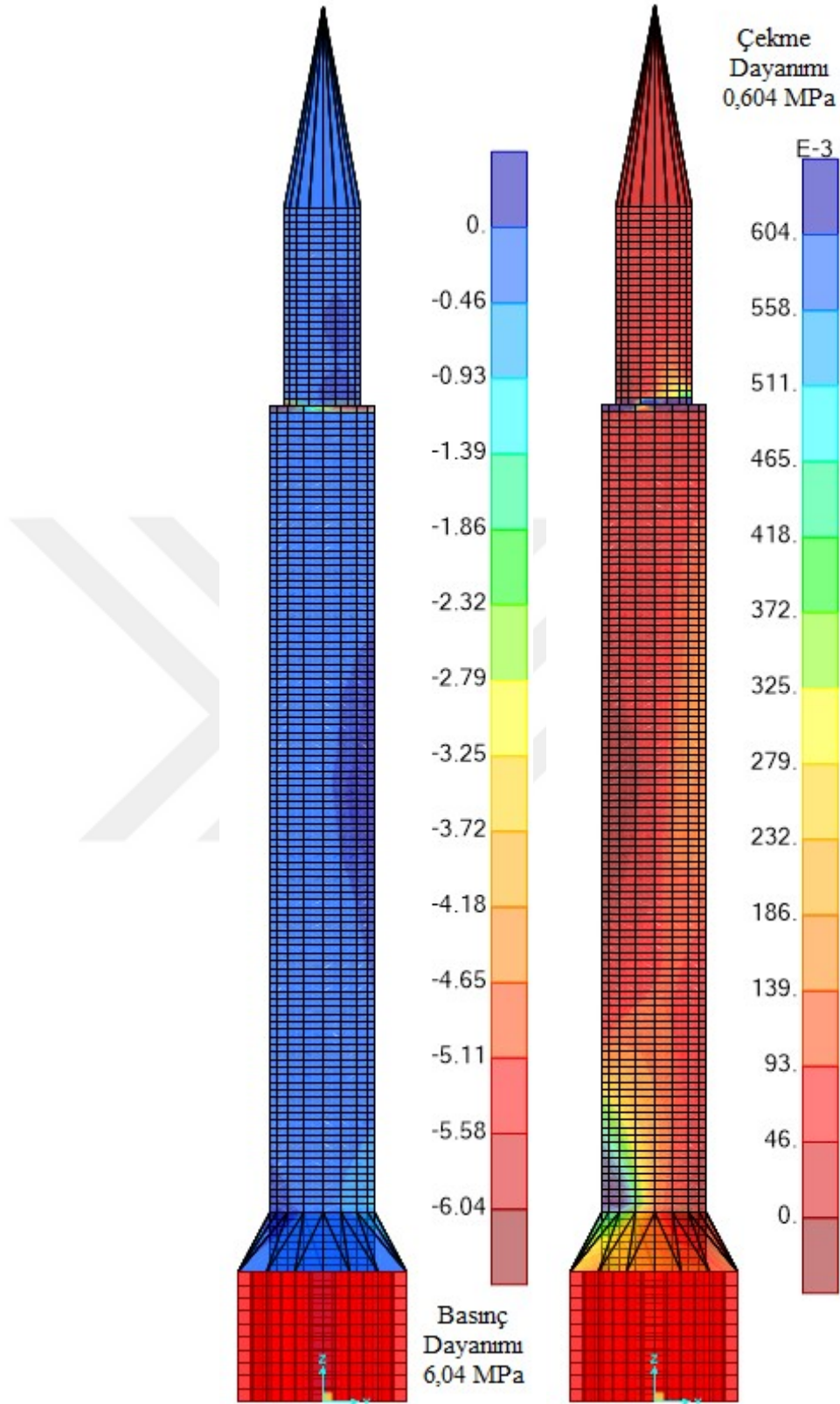
Yapılan zaman tanım alanında analiz boyunca tabana gelen maksimum deprem kuvvetleri X ve Y yönünde belirlenmiştir. (**Çizelge 4.13**) Bu kuvvetlerin minareye etkilediği zamanlara ait gerilme dağılımları elde edilmiştir. Minimum ve maksimum asal gerilmeler X ve Y yönleri için ayrı ayrı sırasıyla **Şekil 4.18** ve **Şekil 4.19**'da gösterilmiştir. Gerilme dağılımlarının gösteriminde, malzemeye ait basınç ve çekme dayanımı değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.13 : Doğrusal olmayan analiz süresince oluşan maksimum taban kesme kuvvetleri ve zaman değerleri.

	Maksimum Taban Kesme Kuvveti (kN)	Zaman (sn)
X Yönü	4867	0,585
Y Yönü	-5312	0,915



Şekil 4.18 : Makro modele ait doğrusal olmayan analize göre X yönündeki depreme karşılık gelen minimum ve maksimum asal gerilme dağılımları (MPa).



Şekil 4.19 : Makro modele ait doğrusal olmayan analize göre Y yönündeki depreme karşılık gelen minimum ve maksimum asal gerilme dağılımları (MPa).

4.7 Makro Modele Ait Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Oluşturulan makro modele ait doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

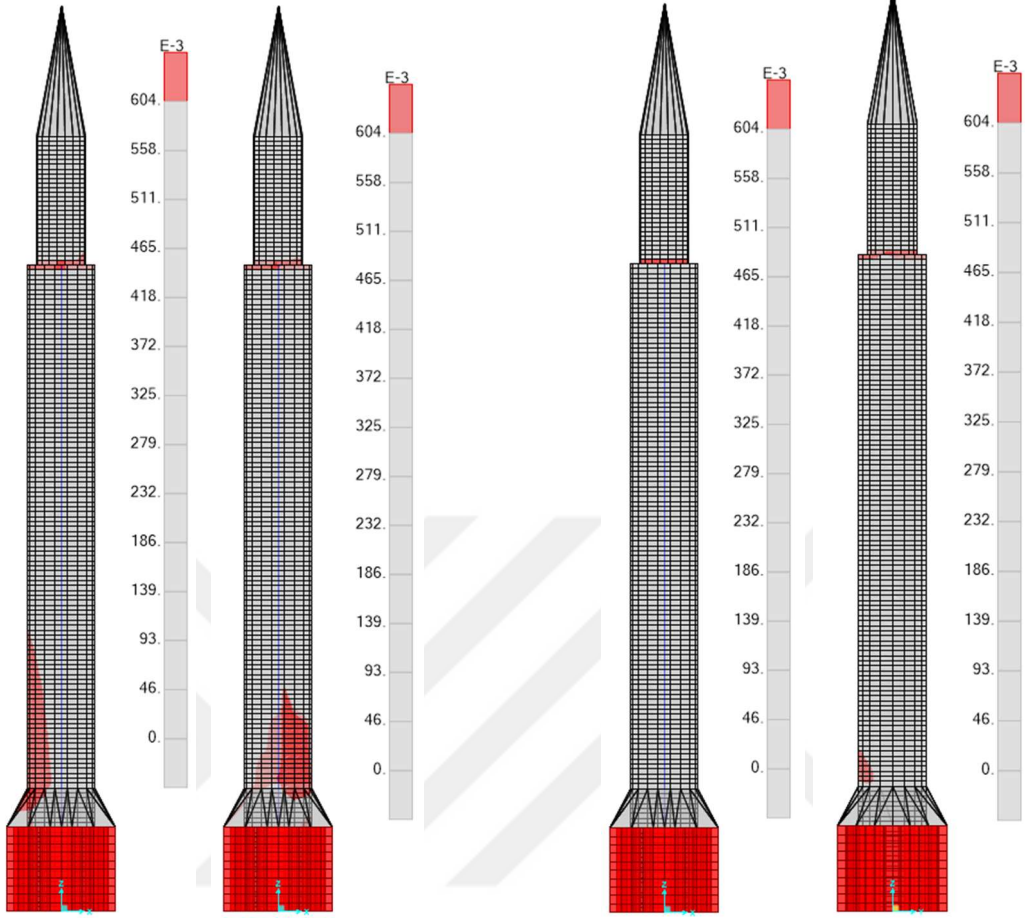
- Doğrusal analizde deprem yükü azaltma katsayısı $R_a = 2$ olarak alınmış, dayanım kontrolleri bu şekilde elde edilen sonuçlara göre yapılmıştır. Doğrusal olmayan analizde ise azaltılmamış deprem etkisi sonuçlarına göre değerlendirilme yapılmıştır.
- Yer değiştirme değerleri elde edilirken, iki analizde de azaltılmamış deprem etkisi sonuçları dikkate alınmıştır.
- Doğrusal analizde X yönünde maksimum tepe noktası yer değiştirme değeri 275 mm iken doğrusal olmayan analizde 345 mm olarak bulunmuştur. Y yönündeki maksimum yer değiştirme değerleri ise doğrusal analiz için 241 mm, doğrusal olmayan analiz için ise 325 mm olarak elde edilmiştir.
- Doğrusal analiz sonucu X yönü öteleme oranı %1 iken, doğrusal olmayan analizde %1,22 olarak elde edilmiştir. Y yönü öteleme oranları ise doğrusal ve doğrusal olmayan analiz için sırasıyla %0,72 ve %1,02 olarak bulunmuştur.
- Seçilen kesitlere etkiyen maksimum kesme kuvveti değerleri, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz için birbirine yakın değerler olarak elde edilmiştir.
- Doğrusal ve doğrusal olmayan analizler sonucu elde edilen gerilme dağılımlarında, çekme dayanımlarının bazı bölgelerde aşıldığı görülmüştür. X ve Y yönlerinde aşılan bölgelerin gösterimi **Şekil 4.20**'de gösterilmiştir.

**Doğrusal
Analiz**

**Doğrusal Olmayan
Analiz**

**Doğrusal
Analiz**

**Doğrusal Olmayan
Analiz**



X Yönü

Y Yönü

Şekil 4.20 : Makro modele ait doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre çekme sınır gerilmesinin aşıldığı bölgelerin gösterimi (MPa).



5. MİNARE MİKRO MODELİ VE ANALİZ SONUÇLARI

Bu çalışmada seçilen Bursa Ulucami'nin doğu minaresi, SAP2000 V20.2 paket programı kullanılarak mikro olarak modellenmiştir. Mikro modelde minareye ait tuğla ve harç elemanları ayrı ayrı olarak modellenmiştir. Oluşturulan modelde modal analiz ve zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

5.1 Mikro Modelleme Yaklaşımı

Bursa Ulucami doğu minaresi, SAP2000 paket programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak mikro olarak modellenmiştir. Mikro modeldeki minare eleman boyutları makro modelde de olduğu gibi aslına uygun olarak hazırlanmış rölöve çiziminden alınmıştır. Minare elemanları için kullanılan sonlu eleman çeşidi, boyutları ve elemanlar arası birleşim noktaları geçiş kabulleri makro model ile aynı olarak alınmıştır. Yapılan kabuller ve modelleme yaklaşımı Bölüm 4'te anlatılmaktadır.

Mikro model için gövde ve petek kısımlarını oluşturan tuğla ve harç elemanları ayrı ayrı modellenmiştir. Tuğla ve harç boyutları **Çizelge 5.1**'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Tuğla ve harç boyutları.

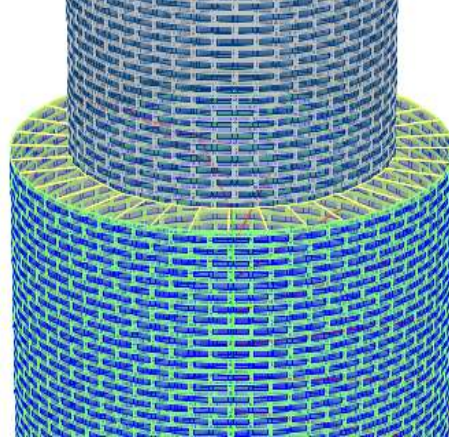
	Global Eksen	Gövde (mm)	Petek (mm)
Tuğla	X	280	280
	Z	50	50
Harç	X -Z	40	40

SAP2000 programında oluşturulan Bursa Ulucami doğu minaresi **Şekil 5.1**'de verilmiştir.



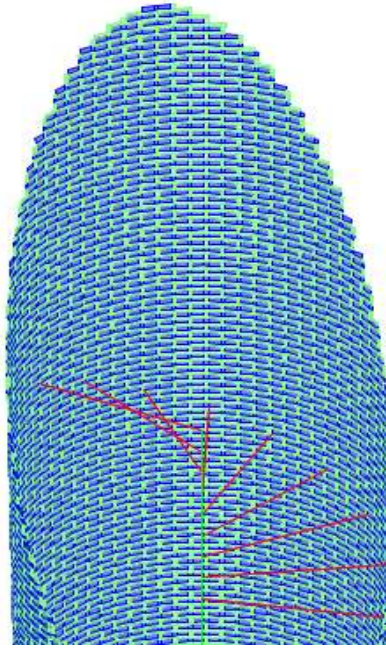
Şekil 5.1 : Bursa Ulucami doğu minaresi mikro modeli.

Oluşturulan mikro modele ait bazı detaylar gösterilmiştir. Petek – gövde geçiş kısmında rijit eleman tanımlanarak tüm yüklerin düzenli aktarımının sağlanması amaçlanmıştır. (Şekil 5.2)



Şekil 5.2 : Mikro modele ait petek – gövde geçiş bölgesi.

Çubuk eleman uçlarının, gövdeyi oluşturan kabuk eleman noktaları ile bağlantısı sağlanmıştır. Merdiven basamaklarının gövdeye bağlandığı nokta detayları **Şekil 5.3**'te verilmiştir.



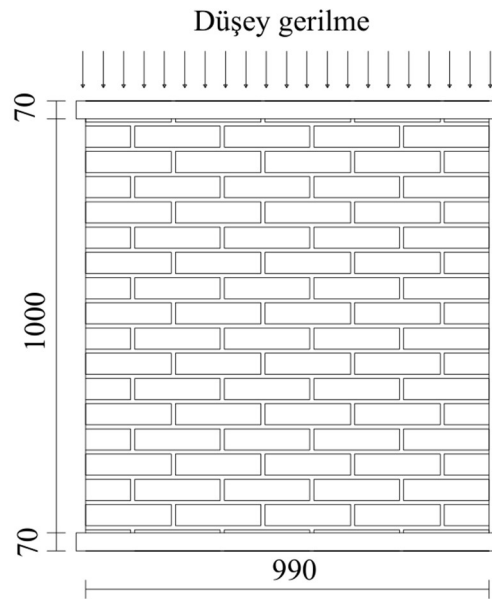
Şekil 5.3 : Mikro modele ait basamak – gövde bağlantıları.

5.2 Mikro Modele Ait Malzeme Değerlerinin Belirlenmesi

Mikro modelde doğrusal analizin yanı sıra doğrusal olmayan yöntemler ile de analiz yapılmıştır. Doğrusal olmayan analiz için malzeme tanımlı doğrusal olmayan analiz yöntemi seçilmiştir. Bu sebeple malzemeler için doğrusal olmayan gerilme-birim şekil değiştirme bağıntıları kullanılmıştır. Bu grafikler SAP2000 programına uygun şekilde tanımlanarak analizler yapılmıştır.

Malzeme modellerini tanımlamak adına referans bir çalışma alınarak SAP2000 programında oluşturulan model ile sonuçları karşılaştırılmıştır. Referans alınan çalışma Kurdo F. Abdulla v.d. tarafından 2017 yılında yayınlanmış bir makaleden alınmıştır. [39] Çalışmada, basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi kullanılarak oluşturulmuş bir yığma birleşim duvarının doğrusal olmayan analizi ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Doğrusal olmayan davranış tuğlada malzeme tanımlayarak, ara yüzeylerde yay bağlantı elemanları kullanılarak tanımlanmıştır. Bu duvar modeli uygun kabullerle SAP2000 programında modellenerek, doğrusal olmayan statik itme analizi uygulanmıştır. Burada uygulanabilir bulunan malzeme modelleri ise minare ana modelinde kullanılmıştır.

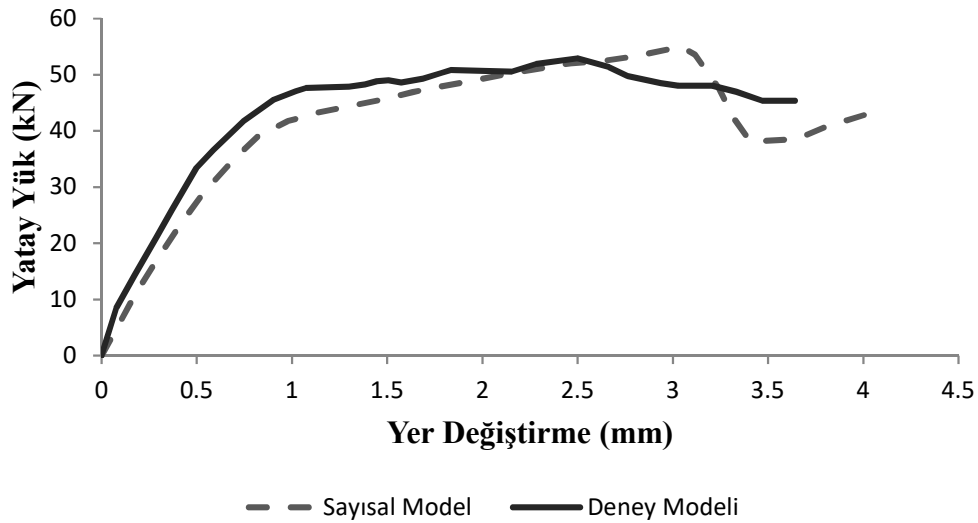
İlk olarak yapılan deneysel çalışmaları anlatılmış bu çalışmada tuğla ve harç olarak 900mm X 1000mm X 100mm boyutlarında duvar oluşturulduğu belirtilmiştir. Tuğla malzeme boyutları 210mm X 52mm X 100mm, harç kalınlığı ise düşey ve yatayda aynı olacak şekilde 10mm'dir. Başlangıç koşulları olarak duvar alt ve üst uç noktalarından çelik kiriş ile tutturulmuş ve düzlem dışı hareketleri tutulmuştur. Alt kiriş zemine sabitlenmiştir. Üst kirişe ise düşeyde basınç gerilmesi uygulanmış ve bu yüklemelerden sonra üst kirişin düşey hareketi de tutulmuştur. Daha sonra üst kirişe yatayda sabit yük adım adım uygulanarak gerilme ve yer değiştirme değerleri kaydedilmiştir. Duvarlar farklı düşey basınç gerilmeleri altında test edilmiştir. (Şekil 5.4)



Şekil 5.4 : Referans alınan duvar modeli (Abdulla, K.F. v.d., 2017).

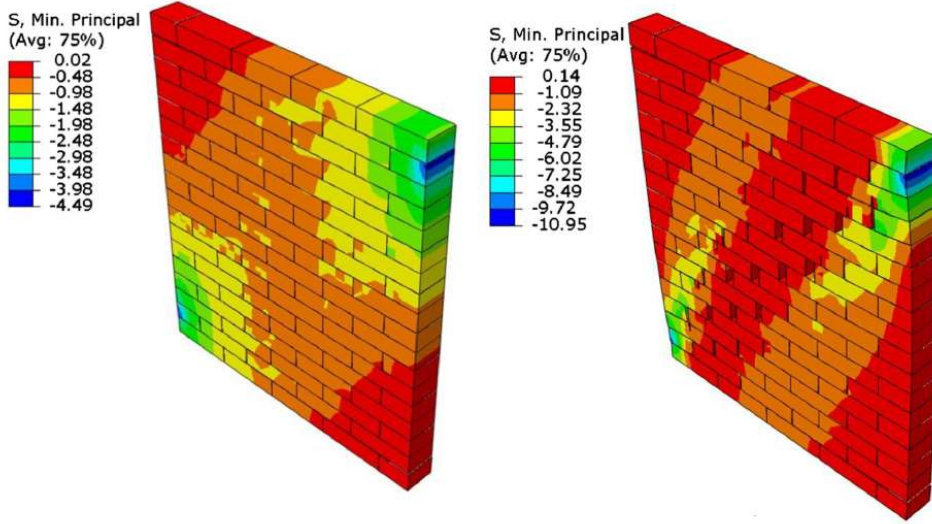
Göçme adımlarında gözlenen çatlaklar sırasıyla diyagonal çatlak, birimlerin kendilerinde oluşan çatlak ve basınç altında kırılma şeklinde gözlemlendiği kaydedilmiştir.

Referans alınan çalışmanın sayısal modelinde Abaqus 6.13 yazılımı kullanılmıştır. Duvar basitleştirilmiş mikro model yöntemi ile katı eleman olarak modellenmiştir. Basitleştirilmiş mikro model oluşturulurken tuğlalar genel geometrinin bozulmaması hedeflenerek genişletilerek modellenmiş ve harç yerine ara yüzeylere yay bağlantı elemanları tanımlanmıştır. Oluşturulan sayısal modelde başlangıç koşulları olarak duvar alt ve üst uç noktalarından çelik kiriş yardımı ile düşey ve düzlem dışı yönde sabitlenmiştir. Daha sonra duvarın üst kısmındaki kirişe 0,3 MPa ve 1,21 MPa değerlerinde yük verilmiştir. Düşey yük sonrasında yatayda yer değiştirme kontrollü olarak statik itme uygulanarak analiz yapılmıştır. Çalışmadaki deneysel ve sayısal statik itme analizi sonuçları kuvvet-yer değiştirme olarak **Şekil 5.5**'te verilmiştir. Detaylı bilgiler referans kaynakta mevcuttur. [39]



Şekil 5.5 : Referans çalışmada elde edilen sayısal modele ait statik itme grafiği ve deneysel modele ait grafik (Abdulla, K.F. v.d., 2017).

Analiz sonucu sırasıyla 1mm ve 4mm'lik yer değiştirmelere karşılık gelen minimum asal gerilme dağılımları **Şekil 5.6**'da verilmiştir. Başlangıçta basınç gerilmeleri duvarın hasar almayan bölgelerinde yayıldığı görülmektedir. İlerleyen durumlarda çatlaklar derz boyları ve birimlerde oluşmuştur. Bunun sonucunda basınç gerilmelerinde tekrar bir dağılım oluşmuş ve gerilmeler tekrar çatlamamış kısımlarda yoğunlaşmıştır.



Şekil 5.6 : Referans alınan çalışmaya ait minimum asal gerilme dağılımları (Abdulla, K.F. v.d., 2017).

Referans alınan çalışmayla karşılaştırılmak üzere SAP2000 programında duvar modeli oluşturulmuştur. SAP2000 programının katı elemanlarda doğrusal olmayan analize imkan sunmaması sebebiyle, duvar modeli kabuk eleman olarak mikro modelleme yöntemi ile oluşturulmuştur. Modeldeki tuğla ve harç boyutları deneysel çalışmadan kullanılan malzemelere göre alınmıştır.

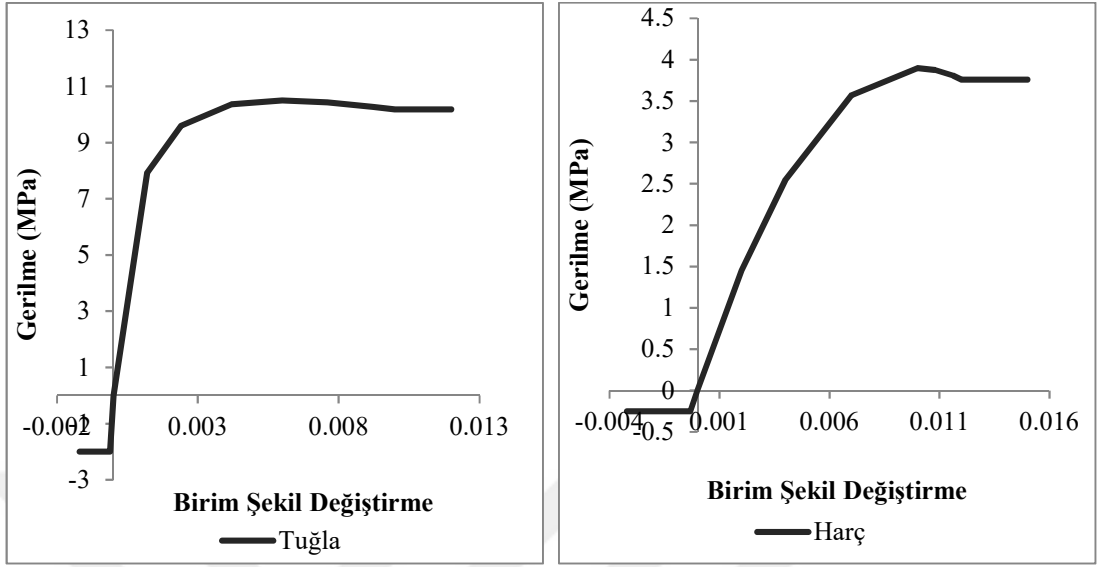
Ayrı ayrı modellenen tuğla ve harç malzemeleri için referans çalışmanın deneysel kısmında verilen malzeme elastisite modülü değerleri dikkate alınmıştır. Bu değerler kullanılarak malzemelere ait basınç dayanımları değerleri elde edilmiştir. Çekme dayanımı değerleri için ise referans kaynakta sayısal modelde kullanılan tuğla ve ara yüzler için verilen değerler kullanılmıştır. Bu bilgiler toplamında SAP2000 modelinde kullanılmak üzere elde edilen malzeme değerleri **Çizelge 5.2**'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Duvar modelinde kullanılan malzeme değerleri.

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Poisson Oranı
Tuğla	16,7	10,5	2	0,15
Harç	0,78	3,9	0,25	0,15

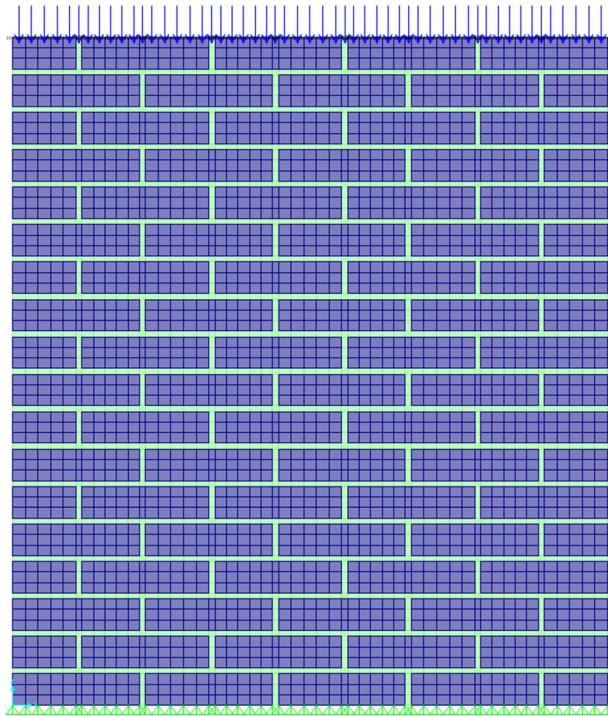
Burada verilen malzeme değerleri kullanılarak malzemelere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuş ve programda tanımlanmıştır. Grafik elde etmek

için beton gibi yarı gevrek malzemeler için de kullanılan beton hasar modeli kullanılmıştır. Tanımlanan malzeme grafikleri Şekil 5.7’de verilmiştir.



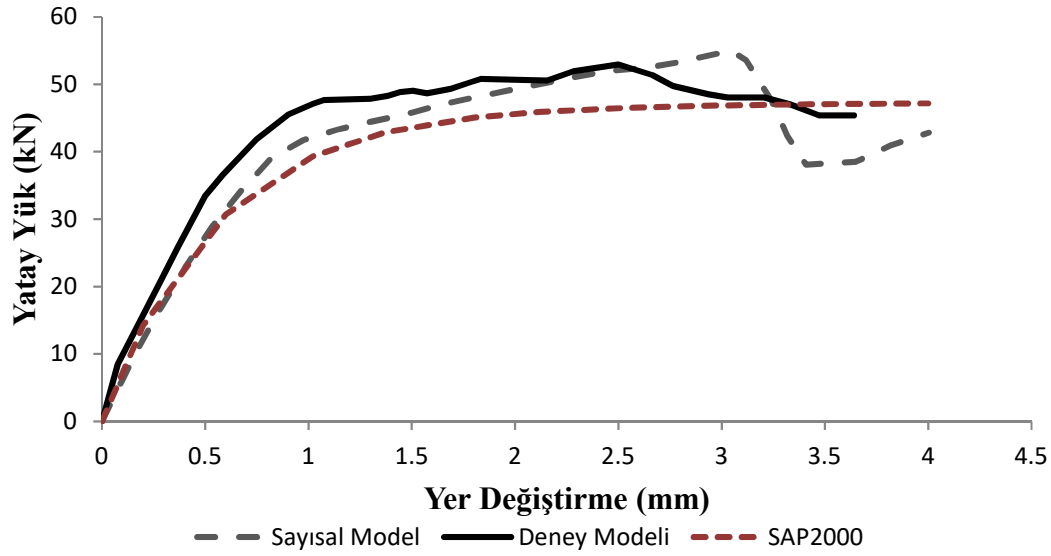
Şekil 5.7 : Tuğla ve harç için tanımlanan gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri.

Bu kabullerle oluşturulan duvar modeli Şekil 5.8’de verilmiştir.



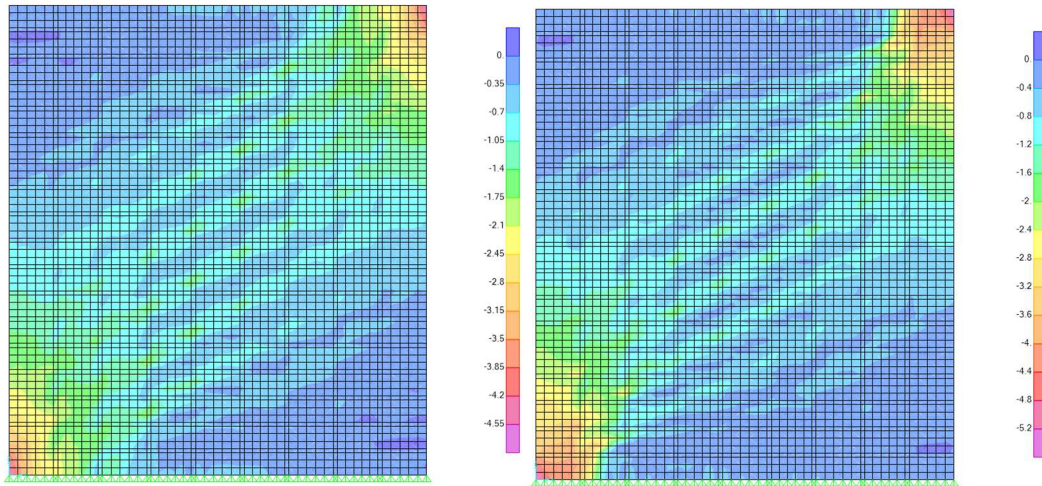
Şekil 5.8 : SAP2000 programı ile modellenen duvar.

Yapılan analiz sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisinin referans alınan çalışma ile karşılaştırılması Şekil 5.9’da verilmektedir.



Şekil 5.9 : Referans alışma ile SAP2000 modeline ait kuvvet-yer değiştirme sonuçlarının karşılaştırılması.

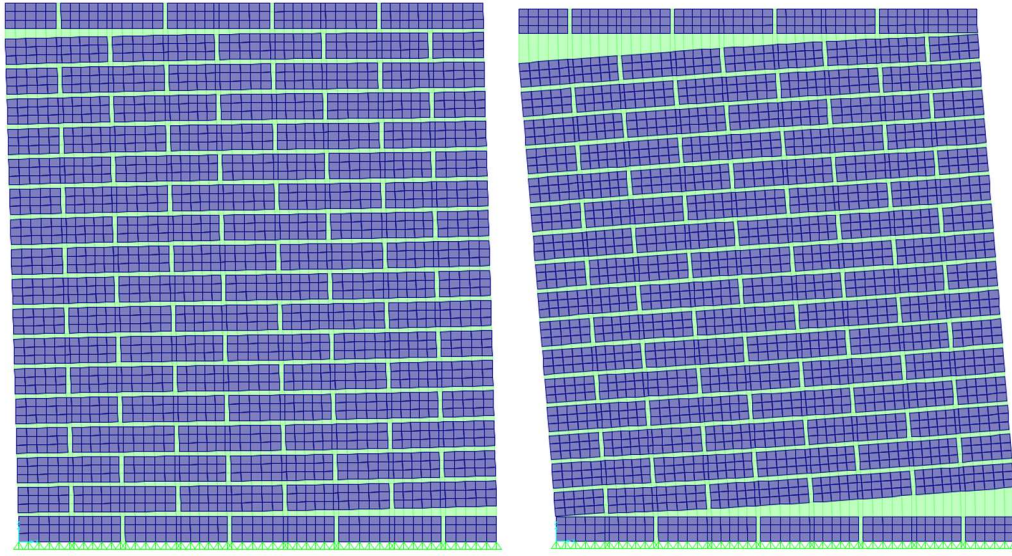
Yapılan analiz sonucunda sırasıyla 1mm ve 4mm yer değiştirmedeki elde edilen minimum asal gerilme dağılımları Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10 : SAP2000 modeline ait minimum asal gerilme dağılımları.

Doğrusal olmayan statik itme analizi sonucunda sırasıyla 1mm ve 4mm için duvardaki gme şekli Şekil 5.11’de verilmiştir. Burada duvar topuk ve çapraz köşesinde çekme bölgeleri oluşarak açılmalar meydana gelmiştir. Referans çalışmadaki duvar ortasındaki çapraz düşey derz açılmalarını görememe sebebimiz SAP2000programının mikro modellemede bize bu olanağı sağlamamasından

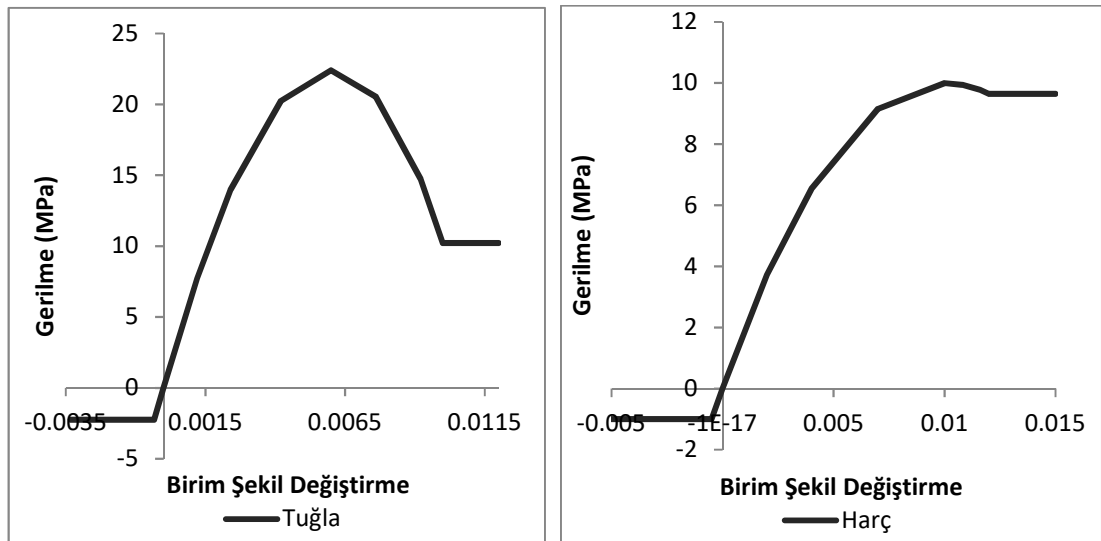
kaynaklanmaktadır. Bu sebeple de gerilme yığılmaları yer değiştirmeden aynı yüzeyler boyunca yayılmaya devam etmektedir.



Şekil 5.11 : SAP2000 modeline ait duvar göçme şekilleri.

Yapılan duvar modellerinin referans modeller ile karşılaştırılması sonucunda kullanılan malzeme modelleri uygun görülmüş ve minare modelinde bu malzeme modelleri göz önüne alınarak devam edilmiştir.

Minare için Çizelge 4.2’de bahsedilmiş olan değerlere uygun olarak tuğla ve harç için malzeme gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Minarede kullanılacak malzeme modelleri Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.12 : Minare modelinde kullanılan tuğla ve harç gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.

5.3 Mikro Modele Ait Modal Analiz Sonuçları

Bursa Ulucami doğu minaresine ait oluşturulan mikro modelin modal analizi yapılmıştır. Mikro modele ait periyot, mod şekilleri ve kütle katılımları sonuçları elde edilmiştir.

Yapılan modal analiz sonucunda elde edilen periyot, frekans ve X-Y yönlerindeki kütle katılım oranları **Çizelge 5.3**'te verilmiştir.

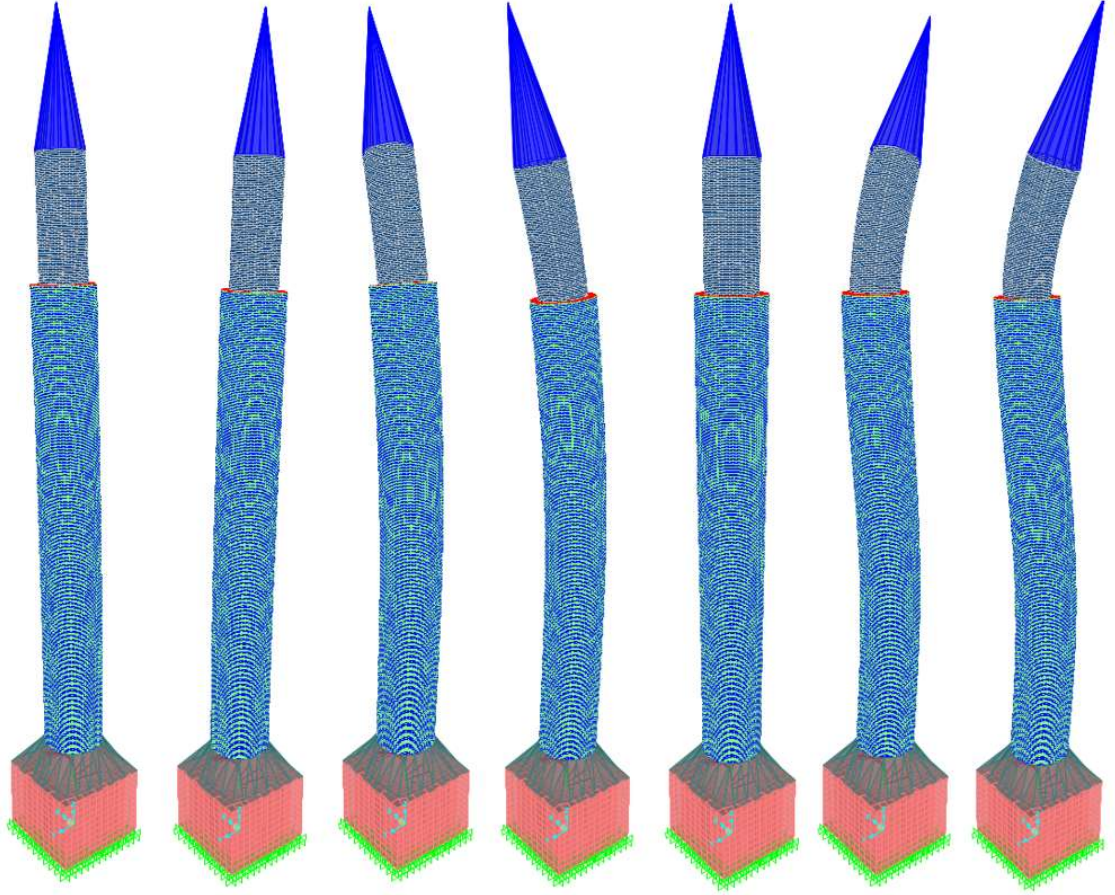
Çizelge 5.3 : Periyot, frekans değerleri ve kütle katılım oranları.

Mod	Periyot (sn)	Frekans (sn ⁻¹)	X Yönü Kütle Katılımı	Y Yönü Kütle Katılımı	Toplam Kütle Katılım-X	Toplam Kütle Katılım-Y
1	1.24	0.81	0.42	0.05	0.42	0.05
2	1.24	0.81	0.05	0.42	0.47	0.47
3	0.26	3.78	0.15	0.00	0.63	0.48
4	0.26	3.78	0.00	0.15	0.63	0.63
5	0.15	6.54	0.00	0.00	0.63	0.63
6	0.14	7.11	0.07	0.00	0.70	0.63
7	0.14	7.12	0.00	0.07	0.70	0.70
8	0.11	8.91	0.00	0.00	0.70	0.70
9	0.08	12.46	0.07	0.00	0.77	0.70
10	0.08	12.48	0.00	0.07	0.78	0.77
11	0.07	13.45	0.00	0.00	0.78	0.77
12	0.07	15.19	0.00	0.00	0.78	0.78
24	0.04	23.54	0.01	0.01	0.85	0.85
36	0.03	32.71	0.00	0.00	0.88	0.88
48	0.02	53.05	0.00	0.01	0.91	0.91
60	0.02	60.55	0.00	0.00	0.93	0.93
72	0.02	65.49	0.00	0.00	0.94	0.94
80	0.01	71.69	0.00	0.00	0.95	0.95

Makro modelde elde edilen hakim periyot değeri T=1,21 sn iken mikro modelde elde edilen hakim periyot değeri T=1,24 sn'dir.

Modal analiz sonuçlarına göre X yönü 3. modda %63 katılım, 12. modda %78 katılım, 24. modda %85 katılım, 36. modda %88 katılım ve son olarak TBDY 2018'de göz önüne alınması gereken kütle katılım sınırı olan %95'lik katılıma 80. modda ulaşılmıştır.

Mikro model modal analizi sonucunda elde edilen ilk 7 mod şekli **Şekil 5.13**'te verilmiştir.



Şekil 5.13 : Mikro model modal analiz sonucu elde edilen ilk yedi mod şekli.

X yönünde en fazla kütle katılımı 1. modda, Y yönünde en fazla kütle katılımı 2. modda ve burulma yönünde ise en fazla kütle katılımı 8. modda olmuştur.

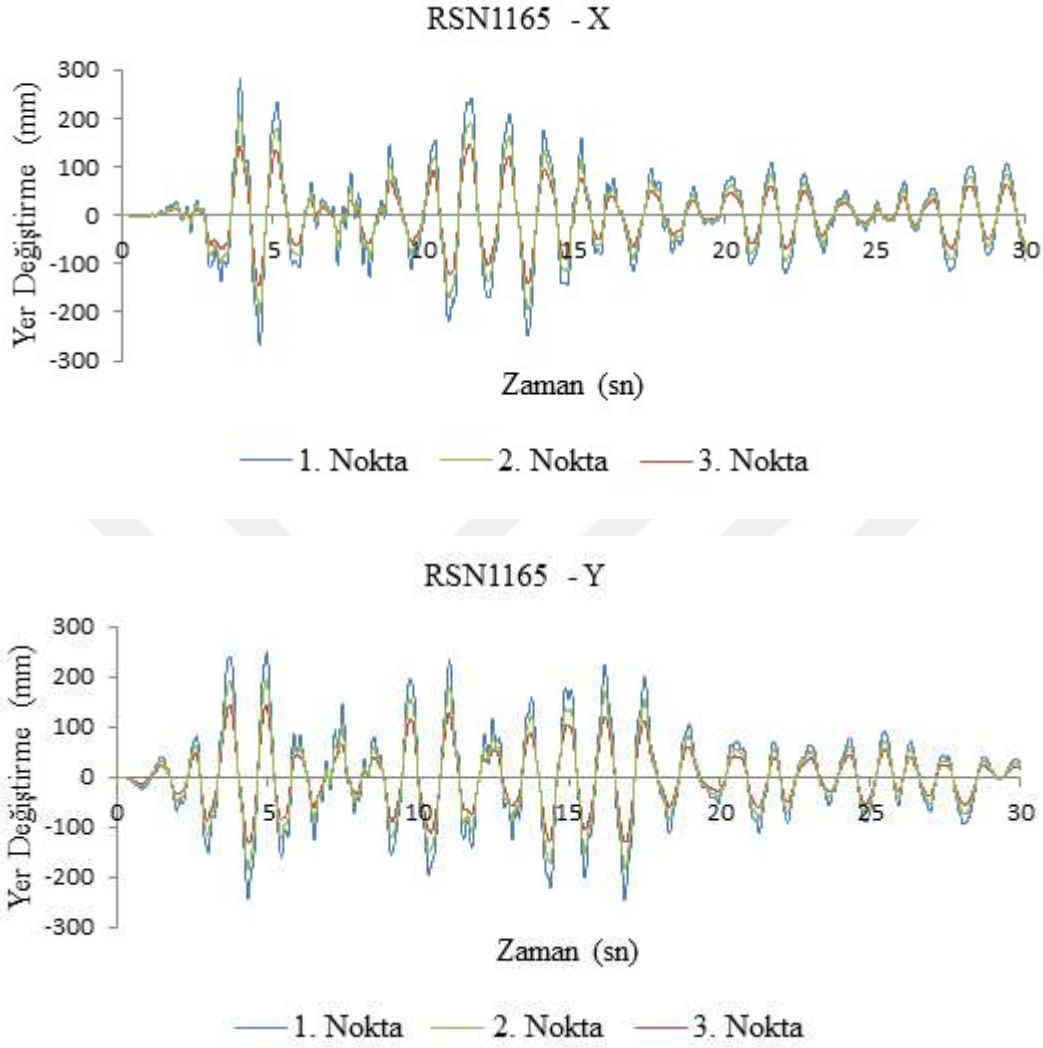
5.4 Mikro Modele Ait Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz

Oluşturulan mikro modelde zaman tanım alanında doğrusal analiz için Bölüm 4.3'te anlatılan adımlar izlenmiştir. Şekil 4.6'da X ve Y bileşenleri verilen, RSN1165 kodlu Kocaeli 1999 depremi Ulucami'nin bulunduğu alana ait oluşturulan spektruma göre ölçeklendirilmiştir. X ve Y yönlerinde ayrı ayrı uygulanan ivme kayıtları sonucunda belirlenen azaltılmış deprem yüküne karşılık gelen dayanım değerleri, sınır değerler ile karşılaştırılmıştır. Yerdeğiştirme karşılaştırmaları ve öteleme hesabı ise azaltılmamış deprem yüküne göre yapılmıştır.

5.4.1 Mikro modele ait yer değiştirme kontrolleri

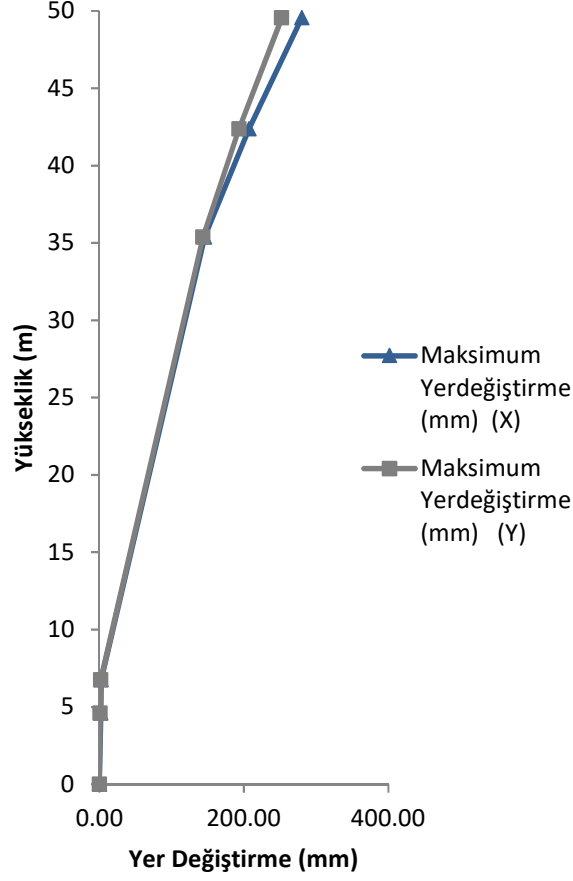
Ölçeklendirilen ivme değerleri kullanılarak, azaltılmamış deprem kuvvetleri sırasıyla X ve Y yönünde etkitilmiştir. Buna bağlı olarak Şekil 4.8'de belirtilen 1,2 ve 3.

noktalara ait zamana bağılı yer değiştirme değerleri elde edilmiş ve grafikleri **şekil 5.14**'te verilmiştir.



şekil 5.14 : 1, 2 ve 3 numaralı noktaların zamana bağılı yerdeğiştirme grafikleri.

Minare yüksekliği boyunca azaltılmamış deprem yükü etkisinde, X ve Y yönlerinde oluşan maksimum yer değiştirme grafiği **şekil 5.15**'te verilmiştir. X yönünde maksimum tepe yerdeğiştirmesi 280mm iken Y yönünde maksimum tepe yerdeğiştirmesi 252 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.15 : Minare yükseklik boyunca maksimum yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.6'da belirtilen minare boyunca seçilmiş olan noktalara ait X ve Y yönlerindeki maksimum yer değiştirme değerleri ve bu değerler kullanılarak elde edilen öteleme oranları Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Ulucami doğu minaresi mikro modelde öteleme oranları.

Nokta No	Yükseklik (m)	Maksimum Yerdeğiştirme (mm) (X)	Maksimum Yerdeğiştirme (mm) (Y)	Öteleme Oranı	
				(X)	(Y)
1→2	49.55	280.35	252.37	1.02%	0.82%
2→3	42.37	207.12	193.34	0.88%	0.72%
3→4	35.37	145.64	143.21	0.50%	0.49%
4→5	6.75	2.50	2.06	0.03%	0.05%
5→6	4.59	1.80	1.03	0.04%	0.02%
6	0	0.00	0.00	-	-

Bölüm 3, Şekil 3.24’te bahsedilen performans seviyeleri sınır değerlerine göre, Bursa Ulucami doğu minaresi mikro modeline uygulanan azaltılmamış deprem etkisi sonucunda, tepe noktası maksimum öteleme oranı X yönünde %1,02 olup, sınır değeri %1 olan “Göçmenin Önlenmesi Sınır Durumu” koşulunu sağlamaktadır.

5.4.2 Mikro modele ait kesme dayanımı kontrolleri

Bölüm 4, Şekil 4.11’de gösterilen ve A,B,C ve D olarak belirlenen yüzeylere ait kesme kuvvetleri, bu kesitlerdeki kesme dayanımları ile karşılaştırılmıştır. Kesme dayanımlarının hesabı Bölüm 4.3.2’deki adımlar izlenerek TBDY 2018, Bölüm 11’e göre yapılmıştır. (4.11) ve (4.12) denklemlerinde kullanılan değerler **Çizelge 5.5**’te verilmiştir.

Çizelge 5.5 : Mikro model için denklem (4.11) ve (4.12) kullanılan değerler.

Kesit No	Alan (m ²)	σ_d (kPa)	f_{vko} (kPa)	f_{vk} (kPa)	N_{Ed} (kN)
A	5,023	41,63	300	316,7	209,1
B	5,023	166,50	300	366,6	836,3
C	18,200	57,03	300	322,8	1038,0
D	18,200	607,99	300	543,2	11065,4

Bu denklemlerden elde edilen sonuçlar **Çizelge 5.6**’da verilmiştir. Deprem yükleri için ise X ve Y yönünde etkiyen depremler sonucu elde edilen kesme kuvvetlerinden maksimum olan değerler alınmıştır.

Çizelge 5.6 : Mikro model için kesme dayanımlarının karşılaştırılması.

Kesit No	Denklem 1 V_{Rd1} (kN)	Denklem 2 V_{Rd2} (kN)	Etkiyen Kesme Kuvveti V_{Ed} (kN)
A	1590,6	1575,1	252,4
B	1841,4	1763,8	562,2
C	5875,2	5795,7	588,2
D	9886,2	8372,0	1993,6

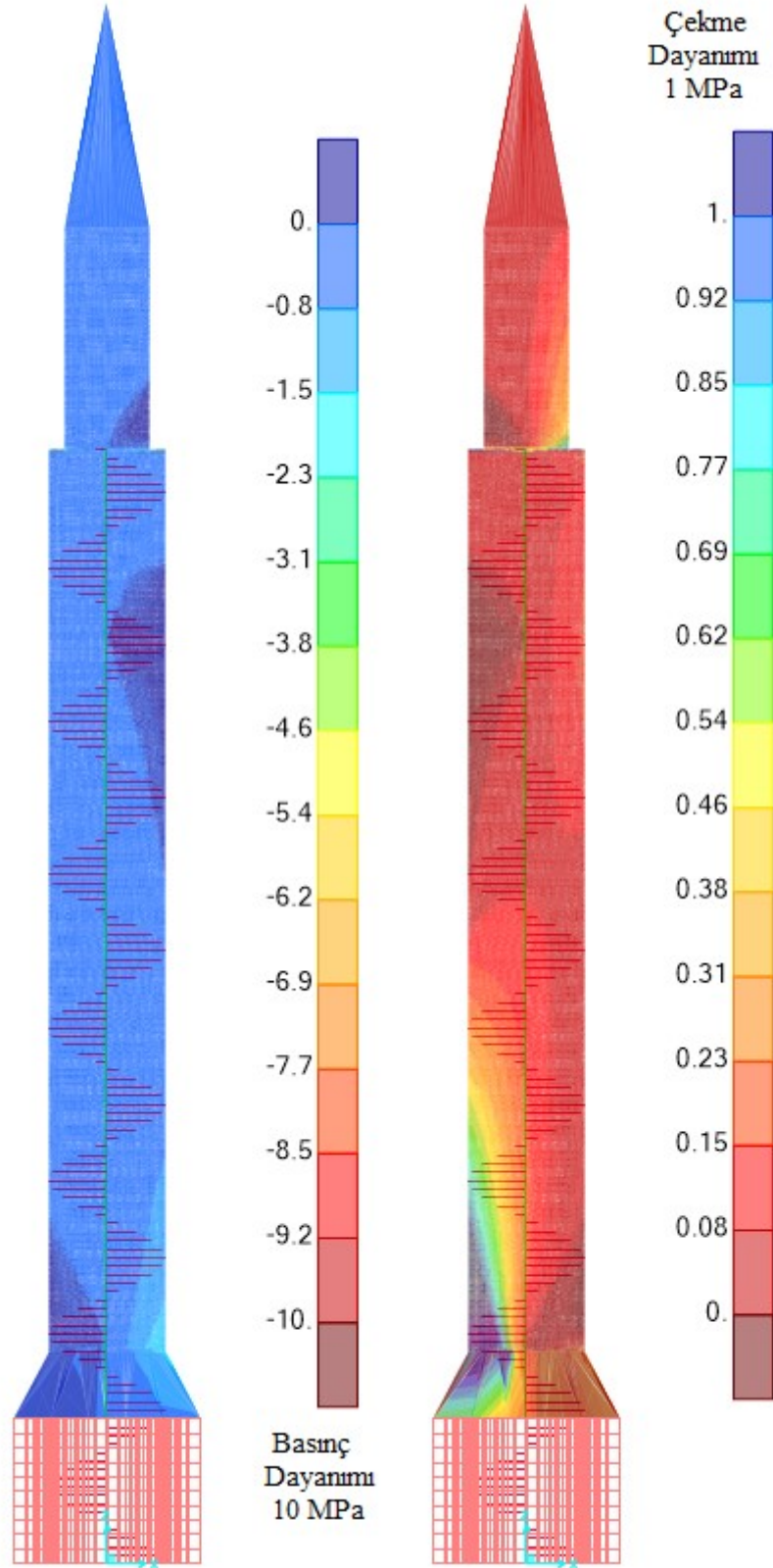
Hesaplanan dayanım değerlerinden küçük olanlar seçilerek deprem sırasında etkiyen yükler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda deprem azaltma katsayısı $R_a = 2$ alınarak azaltılmış deprem etkisi altında minareye gelen maksimum kesme kuvvetlerinin, kesme dayanım değerlerini aşmadığı görülmüştür. Yapı “*Kontrollü Hasar Durumu*” koşulunu sağlamaktadır.

5.4.3 Mikro modele ait gerilme dağılımları

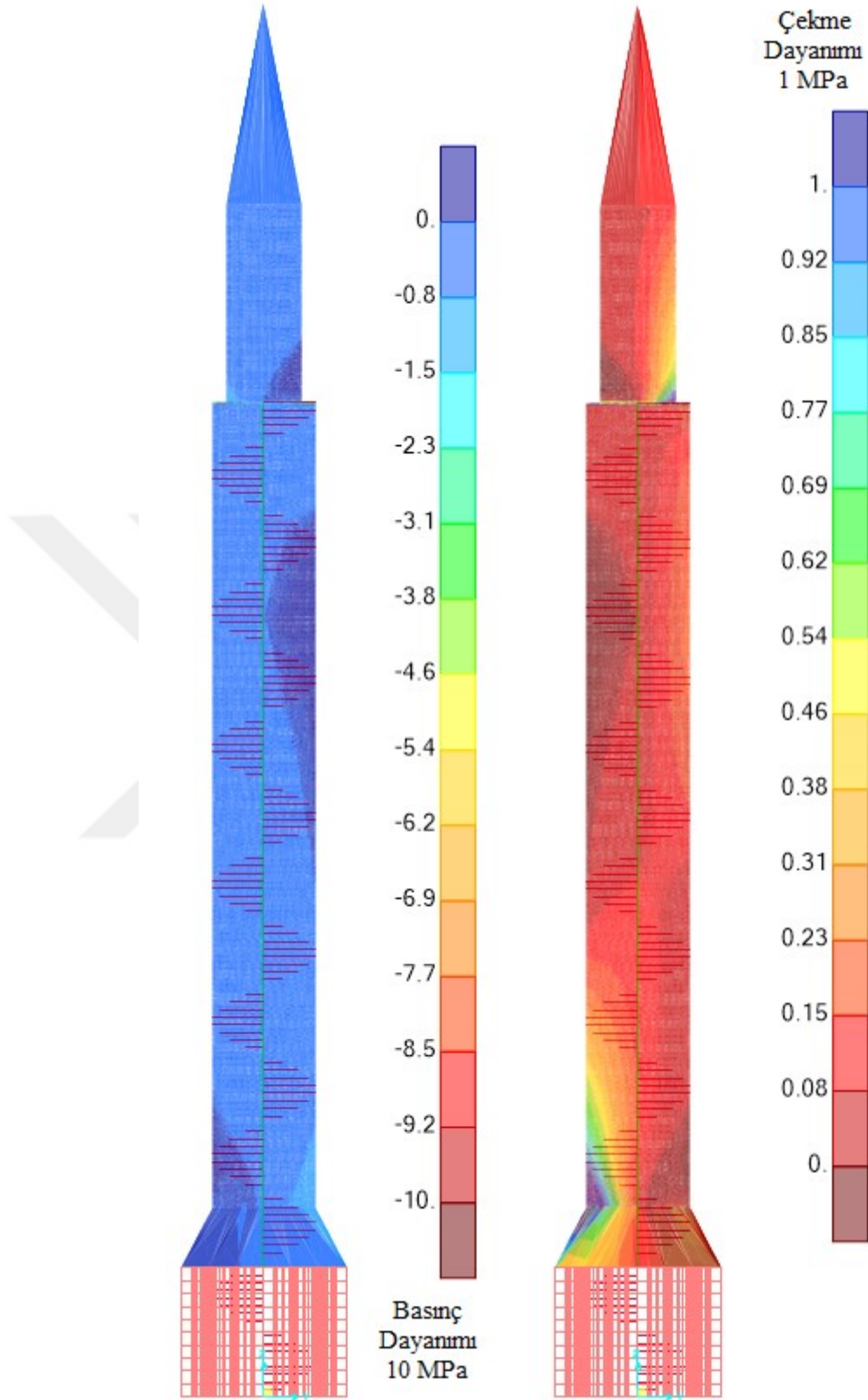
Yapılan zaman tanım alanında analiz süresince tabana gelen maksimum deprem kuvvetleri X ve Y yönünde belirlenmiştir. (**Çizelge 5.7**) Bu kuvvetlerin minareye etkidiği zamanlara ait gerilme dağılımları elde edilmiştir. Minimum ve maksimum asal gerilmeler X ve Y yönleri için ayrı ayrı sırasıyla **Şekil 5.16** ve **Şekil 5.17**'de gösterilmiştir. Gerilme dağılımlarının gösteriminde, malzeme basınç ve çekme dayanımı daha küçük olan harca ait değerler kullanılmıştır.

Çizelge 5.7 : Maksimum taban kesme kuvvetleri ve zaman değerleri.

	Maksimum Taban Kesme Kuvveti (kN)	Zaman (sn)
X Yönü	-2110,3	4,04
Y Yönü	-1737	7,35



Şekil 5.16 : Mikro modele ait X yönündeki depreme karşılık gelen minimum ve maksimum asal gerilme dağılımları (MPa).



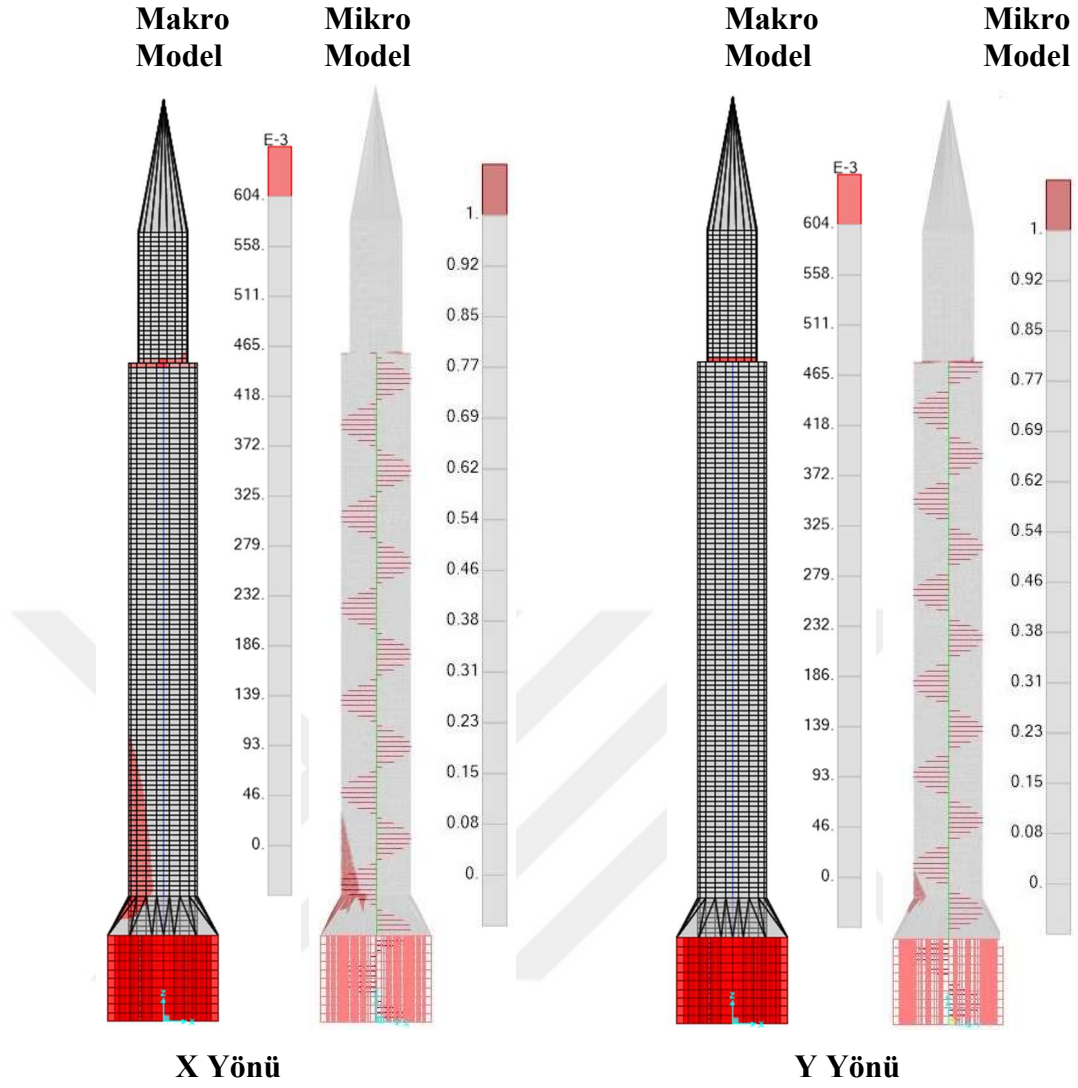
Şekil 5.17 : Mikro modele ait Y yönündeki depreme karşılık gelen minimum ve maksimum asal gerilme dağılımları (MPa).

5.5 Makro Ve Mikro Modele Ait Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz

Sonuçlarının Karşılaştırılması

Makro ve mikro olarak modellenen minare için elde edilen modal analiz ve zaman tanım alanında doğrusal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

- Makro modele ait hakim periyot değeri $T = 1,21 sn$ iken mikro modelde hakim periyot $T = 1,24 sn$ 'dir.
- Yapılan zaman tanım alanında doğrusal analizler için deprem yükü azaltma katsayısı $R_a = 2$ olarak alınıp elde edilen sonuçlara göre dayanım hesapları yapılmıştır. Yer değiştirme kontrolleri için azaltılmamış deprem etkisi altında bulunan sonuçlar kullanılmıştır.
- Yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz sonucunda sırasıyla makro ve mikro modeller için X yönünde oluşan maksimum tepe noktası yer değiştirme değerleri 275mm ve 280mm olarak bulunmuş, Y yönünde ise yine sırasıyla 241mm ve 252 mm olarak elde edilmiştir.
- Makro ve mikro model için elde edilen X yönü maksimum öteleme oranı %1'dir. Bu değerler Y yönü için sırasıyla %0,72 ve %0,82 olarak elde edilmiştir.
- Seçilen kesitlere etki eden maksimum kesme kuvvetleri için makro ve mikro modelde birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir.
- Makro ve mikro modellere ait analizler sonucu elde edilen gerilme dağılımlarında, çekme dayanımlarının bazı bölgelerde aşıldığı görülmüştür. X ve Y yönlerinde aşılın bölgelerin gösterimi **Şekil 5.18**'de gösterilmiştir.
- Makro ve mikro model için yapılan tüm karşılaştırmalarda elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi mikro modelde tuğla ve harç malzemeleri ayrı ayrı tanımlanmış olup, yine bu malzeme değerlerine göre elde edilen kompozit yığma birleşim malzeme değeri makro model için kullanılmıştır. Bu iki analize göre elde edilen yakın sonuçlara bakılarak, mikro ve makro modeldeki malzeme değerlerini elde etmek için kullanılan dönüşüm ve birleşim formüllerinin uygun olduğu söylenebilir.



Şekil 5.18 : Makro ve mikro modele ait zaman tanım alanında doğrusal analiz sonuçlarına göre çekme sınır gerilmesinin aşıldığı bölgelerin gösterimi (MPa).

5.6 Mikro Modele Ait Statik İtme Analizi Ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi

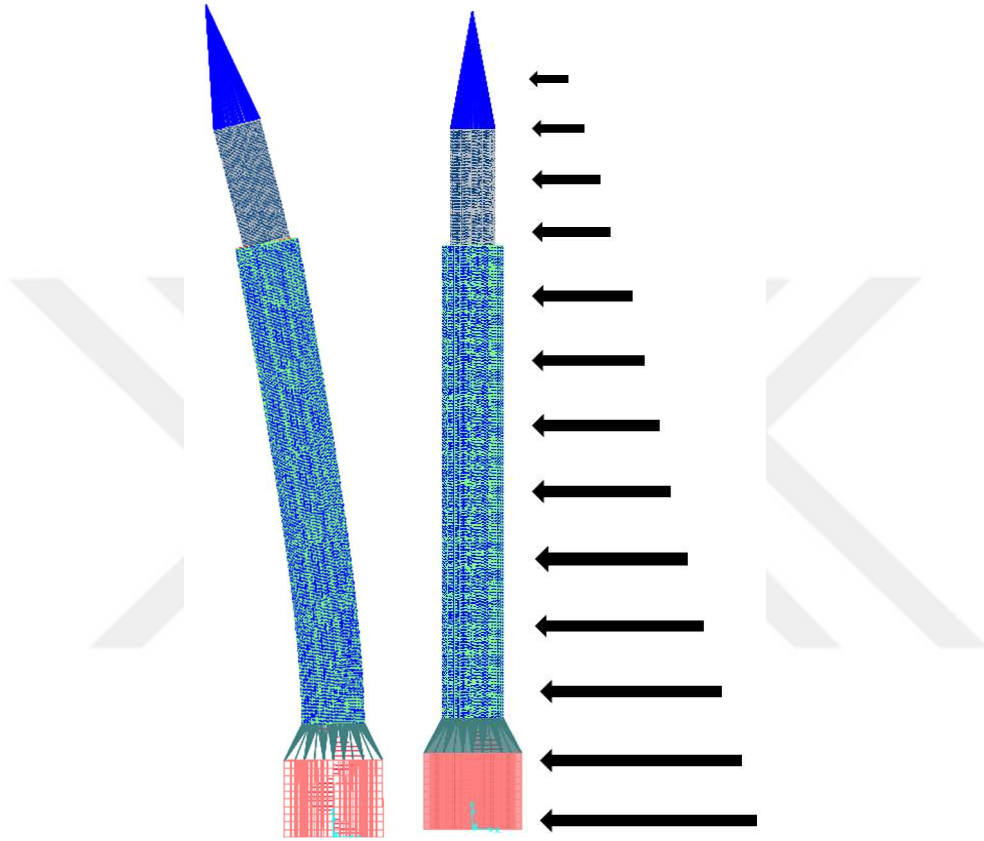
Oluşturulan mikro modelde tuğla ve harç ayrı ayrı tanımlanmış olup toplamda 108218 adet kabuk eleman vardır. Kullanılan SAP2000 programı bu sayıda elemana sahip bir model için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz tanımlanmasına olanak sağlamaması sebebiyle, mikro model için statik itme analizi yapılmıştır.

Modele ait malzeme davranışı tuğla ve harç için malzeme eğrileri ile Bölüm 5.2’de açıklandığı şekilde tanımlanmıştır.

Statik itme analizi yer değiştirme kontrollü yapılmış olup külah-petek birleşim noktasında bulunan 2 numaralı noktanın yer değiştirmesine bağlı olarak tanımlanmıştır. Yer değiştirme değeri Bölüm 4.4’te yapılan, zaman tanım alanında

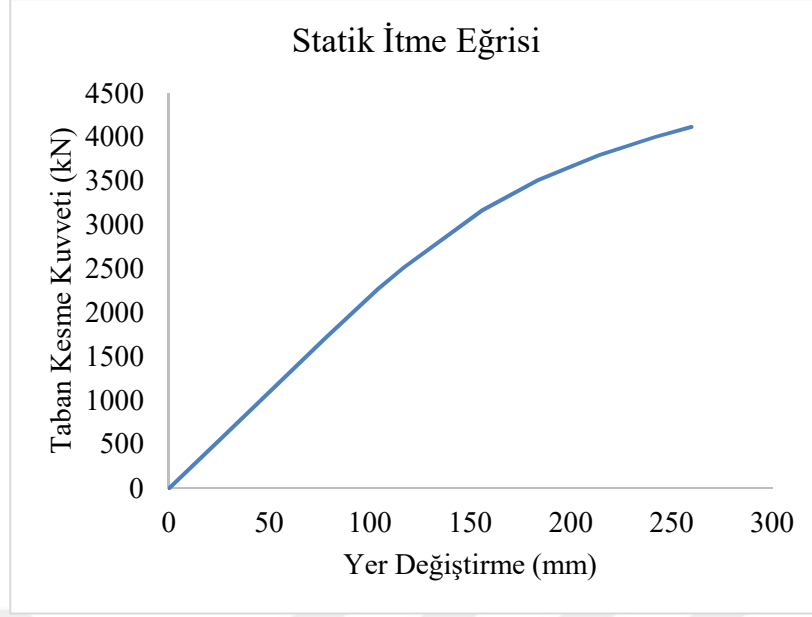
doğrusal olmayan analiz sonucundan elde edilen değere göre X yönünde 26 cm olarak tanımlanmıştır.

İtme analizinde kütlelerin bir bölgede toplu kabulü yapılmayarak, kütlelerin yapı boyunca yayılmış olduğu göz önüne alınmıştır. Yapılan itme analizinde yatay kuvvet, her bir düğümüne uygulanmış olup o noktaya bağlı kütle ile orantılıdır. (Şekil 5.19)



Şekil 5.19 : Mikro modele ait statik itme analizi.

İtme analizi sonucu oluşan kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 5.20'de verilmiştir. Hedef yerdeğiştirmeye ulaşma durumu beş adım ile gösterilmiş ve elde edilen sonuçlar bu adımlar göz önüne alınarak verilmiştir.



Şekil 5.20 : Statik itme sonucu kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi.

Belirlenen beş adıma ait 1,2,3 ve 4 numaralı noktaların yer değiştirme değerleri **Çizelge 5.8**'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Belirlenen noktaların adımlardaki yer değiştirme değerleri.

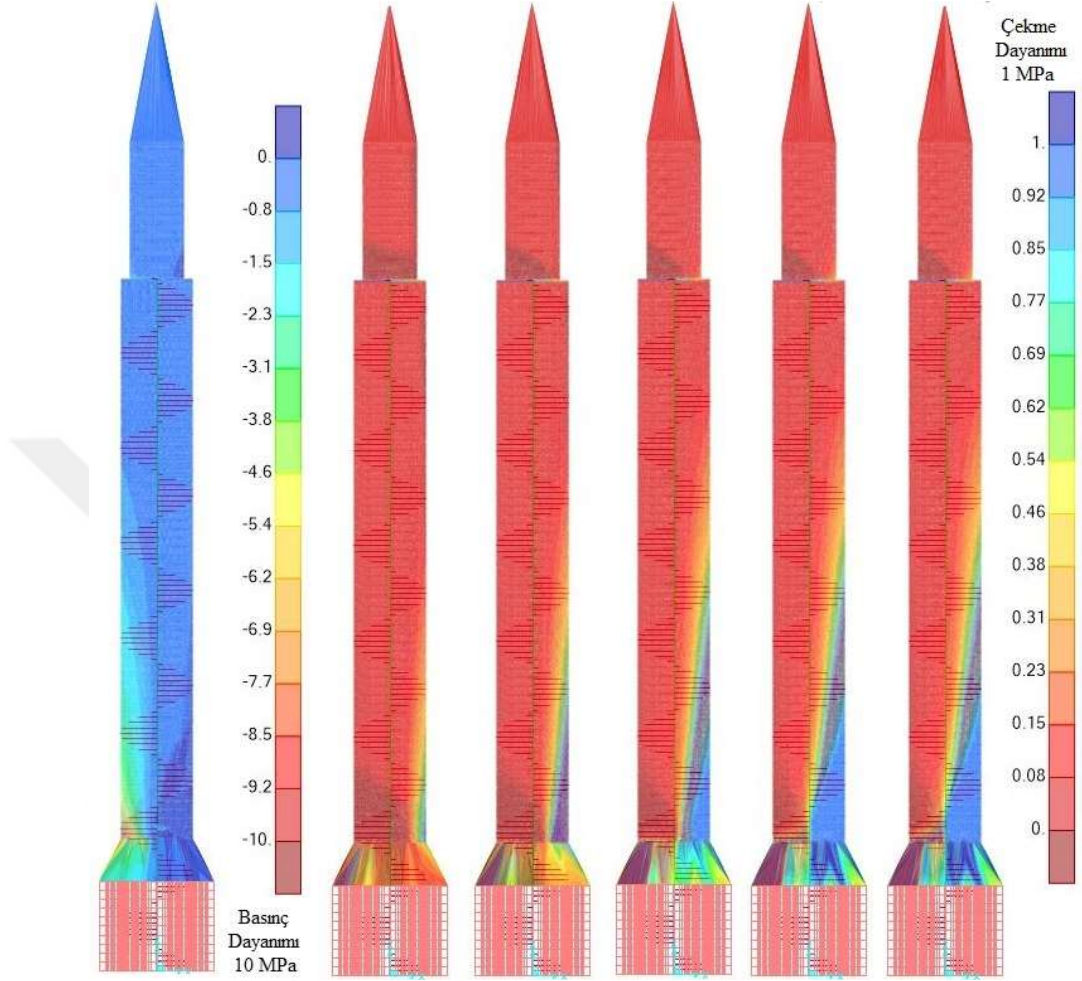
Adım No	Yer Değiştirme (mm)				
Nokta No	1. Adım	2. Adım	3. Adım	4. Adım	5. Adım
1	97.47	146.11	228.55	299.99	322.21
2	77.92	116.92	183.54	241.76	259.92
3	77.92	88.67	139.92	185.27	199.48
4	1.06	1.47	1.85	2.04	2.07

Son adımda hedef yerdeğiştirmeye ulaşmış sisteme ait nokta yerdeğiştirmeleri dikkate alınarak hesaplanan öteleme oranları **Çizelge 5.9**'da verilmiştir.

Çizelge 5.9 : Son adımda oluşan yer değiştirmelere göre elde edilen öteleme oranları.

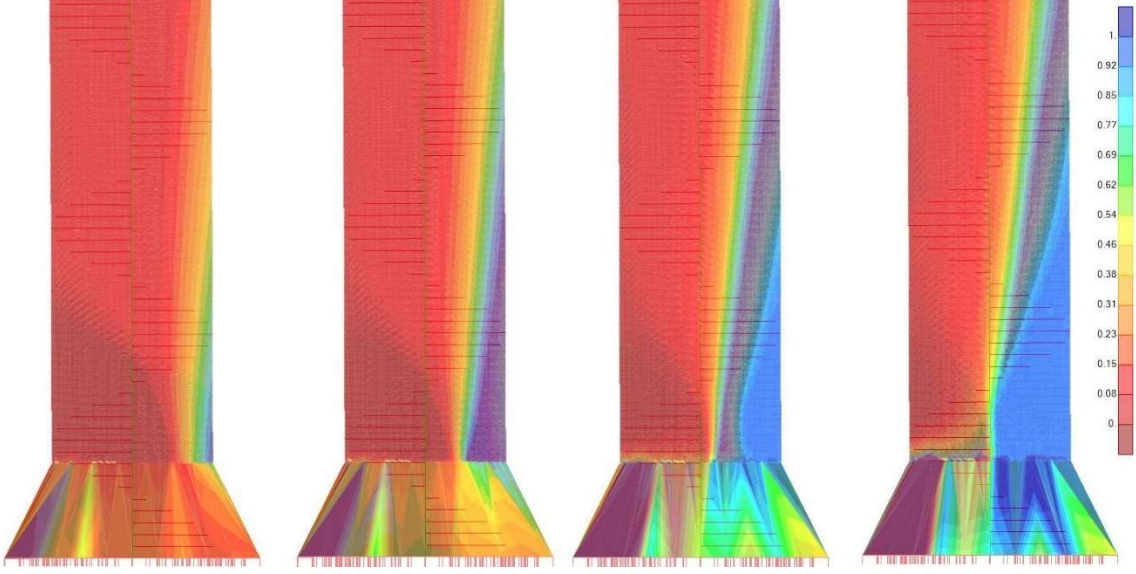
Nokta No	Yükseklik (m)	Maksimum Yerdeğiştirme (mm) (X)	Öteleme Oranı (X)
1→2	49.55	322.2	0.87%
2→3	42.37	259.9	0.86%
3→4	35.37	199.5	0.69%
4→5	6.75	2.1	0.03%
5→6	4.59	1.5	0.03%
6	0	0.0	-

İtme analizinde adımlara ait gerilme dağılımları **Şekil 5.22**'de verilmiştir. Çekme gerilmelerinin sınır değerleri aştığı bölgelerde, sonraki adımlarda açılmalar meydana gelmiştir.



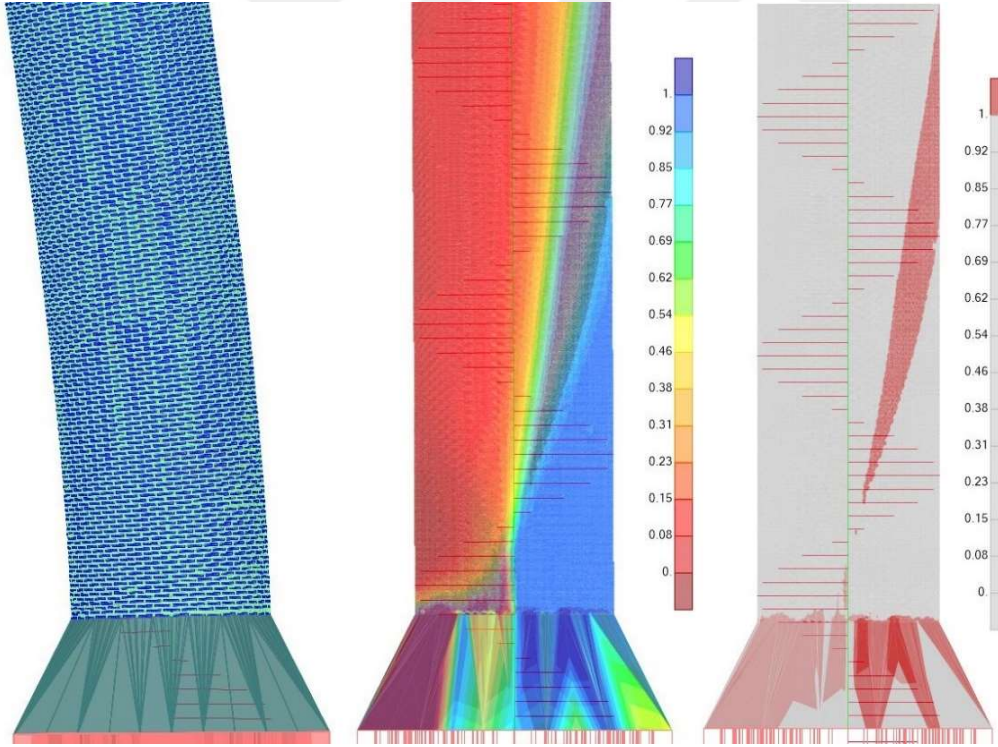
Şekil 5.22 : İtme analizi adımlarında oluşan maksimum asal gerilme dağılımları (MPa).

Gövdeden küpe geçiş kısmındaki gerilme dağılımları ilk dört adım için **Şekil 5.23**'te verilmiştir. Çekme bölgesindeki gerilmelerin harç dayanımı sınır koşulunu aşmasının ardından bu kısımlarda hasar oluşmuş ve gerilmeler diğer bölgelerde tekrar yayılmıştır.



Şekil 5.23 : İtme analizi adımlarında gövde-küp geçişinde oluşan gerilme dağılımları (MPa).

Son adımda gerçekleşmiş olan açılma detayı ve gerilme dağılımı ise **Şekil 5.24**'te gösterilmiştir. Ölçeklendirme katsayısı 20 olarak alınmıştır.



Şekil 5.24 : İtme analizi sonucu gövde-küp geçiş detayı ve gerilme dağılımı.

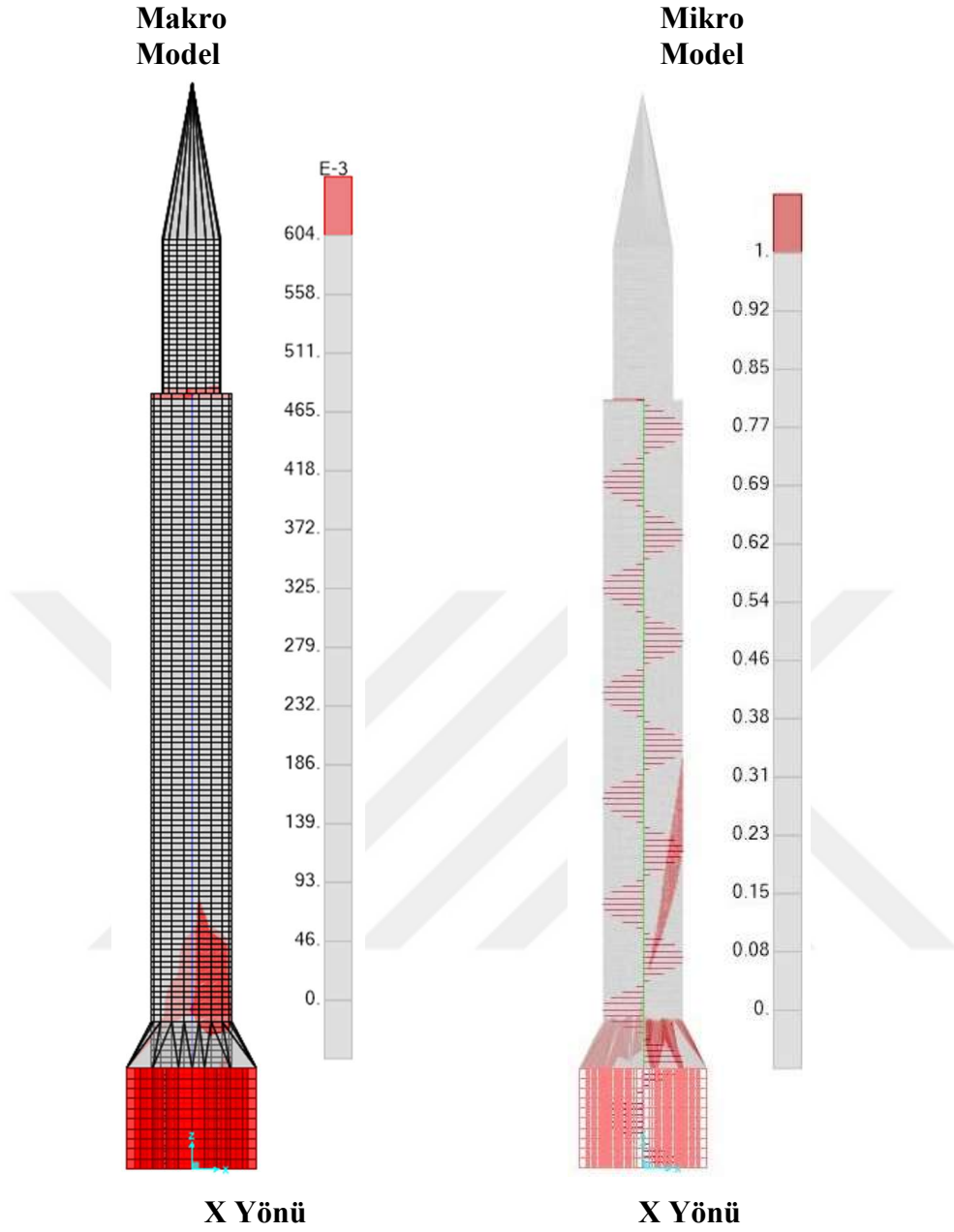
Mikro model itme analizi sonucunda elde edilen değerlere göre gerilmeler daha çok gövde-küp geçiş bölgesinde yığılmıştır. Bu bölgelerde çekme dayanımının aşıldığı kısımlarda gerilme yığılmaları oluşmuş, kuvvet arttırıldıkça birim şekil değiştirme

sınır değerleri aşılarak, açılmalar meydana gelmiştir. Hasarın oluştuğu bu kısımlardaki aşılın gerilme değerleri tekrar dağılmıştır.

5.7 Makro Ve Mikro Modele Ait Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Makro modelde yapılmış olan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçları ile buradaki yer değiştirme değeri hedef yer değiştirme olarak tanımlanmış olan mikro modele ait doğrusal olmayan statik itme analizi sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

- Makro modelde elde edilen X yönüne ait tepe noktası maksimum yer değiştirme değeri 345mm olarak bulunmuştur. Bu değer mikro model tepe noktasında 380mm'dir
- Makro modelden elde edilen X yönüne ait maksimum öteleme oranı %1,22 iken bu değer mikro modelde uygulanan itme analizinde %0,87 olarak bulunmuştur.
- Makro ve mikro modelde yapılan doğrusal olmayan analizlerde elde edilen gerilme değerlerine göre bazı bölgelerde çekme gerilmeleri aşılmıştır. X yönü için elde edilen gerilme dağılımları **Şekil 5.25**'te verilmiştir. Gerilme yığılmaları iki modelde de gövde-küp geçiş bölgesinde olduğu görülmüştür.
- Mikro modelde tuğla ve harç malzemelerinin ayrı olarak modellenmesi sonucu gerilme yığılmalarının oluştuğu bölgelerde, aşılın gerilme değerleri sonucunda hasar oluşumu gözlemlenebilmiş ve bu sebeple gerilme dağılımlarında hasar ilerleyişine bağlı olarak değişimler meydana gelmiştir. Makro modelde ise hasar mekanizması oluşmamış ve bu sebeple gerilme yığılmaları oluştuğu bölgelerde süreklilik göstermiştir.



Şekil 5.25 : Makro ve mikro modele ait doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre çekme sınır gerilmesinin aşıldığı bölgelerin gösterimi (MPa).

6. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında seçilen Bursa Ulucami doğu minaresi, SAP2000 V20.2 programı ile makro modelleme ve mikro modelleme yaklaşımları kullanılarak modellenmiştir. Bu yaklaşımlarla elde edilen modeller için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri uygulanmış ve bu analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

İlk olarak rölöve kayıtlarına göre oluşturulan makro modele ait modal analiz yapılmış, elde edilen periyot değerlerini etkileyen durumlar araştırılmış ve mikro model oluşturmada yol gösterici olabilecek durumlar tespit edilmiştir. Makro modelde kompozit olarak göz önüne alınan yığma birleşim malzeme basınç dayanımı $f_c = 6,04 \text{ MPa}$ ve elastisite modülü $E = 3,32 \text{ GPa}$ olarak alınmıştır. Yapılan modal analiz sonucu hakim periyot $T=1,21$ sn olarak bulunmuştur. Kütle katılım oranı hakim periyot için %41 iken 3. modda %54 ve 104. modda ise %95 olduğu görülmüştür.

Periyot kontrolü için elde edilen hakim periyot değeri, önceki çalışmalarda oluşturulan formüller kullanılarak elde edilen periyot değeri ile karşılaştırılmış ve hata payı olan %18 değeri aşılmayarak periyot kontrolü yapılmıştır.

Oluşturulan makro model modal analizinde, yapı parça sayısının periyoda etkisine bakılmıştır. Modele ait parça sayısının artırılması sonucunda periyot değeri de bir miktar değişmiştir. Fakat hesap süresini çokça uzatmakta olması ve periyot değişimindeki farkın göz ardı edilebilecek seviyede olması sebebiyle düşey mesh aralığı 0,27m olarak alınan ilk model ile analizlere devam edilmiştir.

Minareyi oluşturan elemanların periyot üzerindeki etkisi incelenmiştir. Geçiş bölgesinde bulunan küp elemanın, merdiven ve çekirdek kısmının, kaidenin yapı rijitliğine katkısının olduğu, külahın ise rijitliğe oranla kütleli katkısının daha fazla olduğu görülmüştür. Sadece gövde ve petek kısımlarının modellenmesi durumunda bulunan periyot değeri %23 daha fazla iken, sadece gövdenin modellenmesi durumunda ise periyot değeri %10 daha az çıkmaktadır.

Buradan elde edilen modelleme yaklaşımları ile Ulucami doğu minaresine ait mikro model oluşturulmuş ve modal analizinde hakim periyodu $T=1,24$ sn olarak bulunmuştur.

Oluşturulan makro ve mikro modeller için zaman tanım alanında doğrusal analiz yapılmış ve elde edilen yer değiştirme, kesme dayanımları ve gerilme dağılımları kontrol edilerek karşılaştırılmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal analiz için RSN1165 kodlu 1999 Kocaeli depremi seçilmiş ve ivme kayıtları bölgeye ait oluşturulmuş yatay elastik ivme spektrumuna göre ölçeklendirilerek modellere tanımlanmıştır. Dinamik analizlerde sönüm oranı %5 olarak alınmıştır.

Yapılan doğrusal analizler sonucunda azaltılmamış deprem etkisi altında elde edilen maksimum yer değiştirmeler X yönünde oluşmuş, makro ve mikro model için sırasıyla 275mm ve 280mm olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre elde edilen öteleme oranları ise iki model için de %1 olarak bulunmuştur. Çizelge 3.2’de verilen performans düzeyi sınır durumlarına göre, sınır değeri %1 olan “*Göçme Öncesi Hasar Sınır Durumu*” koşulunu sağlamaktadır.

Deprem yükü azaltma katsayısı $R_d=2$ olarak alınmış deprem etkisinde, belirlenen kesitlere göre yapılan kesme kontrollerinde makro ve mikro model için bulunan kesme dayanım koşulları aşılmayarak, yapının Çizelge 3.2’ye göre “*Kontrollü Hasar Durumu*” performansını sağladığı görülmüştür.

Uygulanan deprem kayıtlarına göre, yapıya gelen maksimum taban kesme kuvveti anında yapıda oluşan gerilme dağılımları incelenmiştir. Gerilme yığılmalarının makro ve mikro modelde, eleman kesitlerinin değiştiği petek-gövde birleşim noktası ve gövde-küp birleşim noktasında meydana geldiği görülmüştür. Gerilme dağılımlarının ise her iki model için yakın değerler verdiği görülmüştür.

Doğrusal olmayan analizlerdeki davranış, malzemeye ait doğrusal olmayan davranış olarak tanımlanmıştır. Malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri için referans bir çalışma seçilmiştir. Bu çalışma ile sağlaması yapılarak elde edilen malzeme eğrileri belirlenmiştir. Minareye ait malzeme dayanım değerleri kullanılarak aynı şekilde oluşturulan eğriler, doğrusal olmayan davranış tanımı için programa tanımlanmıştır.

Makro modelde uygulanan doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz sonucunda, azaltılmamış deprem etkisi altında belirlenen noktalardaki yer değiştirme değerlerine bağlı olarak bulunan öteleme oranlarının, “*Göçme Öncesi Sınır Durumu*”

koşulu olan %1 değerini aşarak %1,22 olduğu görülmüştür. Yapı buna göre göçme bölgesinde kalmaktadır.

Mikro modelde harç ve tuğla elemanlar ayrı ayrı tanımlanmış olması sebebiyle çok sayıda eleman bulunmaktadır. Programın bu miktardaki elemanın doğrusal olmayan analizine imkan sağlamaması sebebiyle, mikro model için statik itme analizi yapılmıştır. Uygulanan yatay yükte, kütlelerin yapı boyunca dağılımı göz önüne alınmıştır. Herbir düğüme uygulanmış olan yük, o noktaya ait kütle ile orantılı olarak verilmiştir. Yapılan analiz yer değiştirme kontrollü olarak yapılmış ve 2 numaralı noktaya, makro modele ait doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz sonuçlarından elde edilen maksimum yer değiştirme değeri, hedef yerdeğiştirme olarak verilmiştir. Elde edilen maksimum öteleme oranı %0,87 olup yapı “*Göçme Öncesi Sınır Durumu*” koşulunu sağlamaktadır.

Yapılan itme analizi sonucunda oluşan gerilme dağılım adımları gösterilmiş ve hedef yerdeğiştirmeye ulaşılan adımda, minarenin gövde-küp birleşim bölgesinde açılmalar olduğu görülmüştür. Yapının bu kısımlarda oluşan hasarlar sebebiyle gerilme dağılımlarının değişimleri, analiz adımlarına göre gösterilmiştir.

Çalışmada tek deprem kaydı kullanılmış olması sebebiyle elde edilen sonuçlar genelleştirilememektedir. Yapı gerçek performansını belirlemek için daha fazla sayıda yer hareketi kaydı ile analiz yapılmalıdır. Çalışma kapsamının, mikro ve makro modellere ait doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yaklaşımlarının incelenmesinin temel amacı oluşturması sebebiyle tek deprem kaydı kullanılmıştır. TBDY 2018 2.5.1.3’e göre seçilecek deprem kaydı hesap takımlarının sayısı en az on bir adet olacak ve aynı depremden seçilecek kayıt takımı sayısı üçü geçmeyecektir.

Tarihi yapılarda yapısal değerlendirmenin, incelenen yapıya ait birçok farklı durum içerebileceği ve bunlara bağlı olarak farklı yaklaşımlarda bulunabileceği bilinmektedir. Minarelerin de kendine özgü bir mimariye sahip olmaları sebebiyle yapısal değerlendirme yapılmış çalışmalardan elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak ilerlenmektedir. Bu sebeple minarelerle ilgili çalışmaların sayısının daha da artarak, farklı yaklaşımlarla daha detaylı çalışmaların yapılması bu alandaki belirsizlikleri gidermek adına oldukça önem taşımaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] **Eczacıbaşı** (1997). Eczacıbaşı Sanat Ansiklopedisi, Minare. (2.Cilt) İstanbul
- [2] **Türkiye Diyanet Vakfı**. (2005). İslam Ansiklopedisi, Minare. İstanbul
- [3] **Kumbasar, Z. & Göncüoğlu, S.F.** (2006) Gelenekten Geleceğe Camiler. İstanbul
- [4] **Ülgen, A.** (1996) Klasik Dönem Minareleri – Osmanlı Cami Planında Minarenin Konumu
- [5] **Sözen, M. & Tanyeli, U.** (2005) Sanat Kavram ve Terimleri Sözlüğü (8. Baskı) İstanbul
- [6] **Uysal, A.O.** (t.y.) - Anadolu Selçuklularından Erken Osmanlı Dönemine Minare Biçimindeki Gelişmeleri
- [7] **Aksoy, İ.H.** (1982). İstanbul'da Tarihi Yapılarda Uygulanan Temel Sistemleri (Yüksek Lisans Tezi), (sayfa 53). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [8] **Eyice, S.** (1962) İstanbul Minareleri
- [9] **Öz, T.** (2015) İstanbul Camileri, (4. Baskı) Ankara
- [10] **Uysal, A.O.** (1994). Erken Osmanlı Döneminde Sırlı Tuğlalı Minareler
- [11] **Kuran, A.** (1964). İlk Devir Osmanlı Mimarisinde Cami
- [12] **Taşkın, B.** (2014). Sismoloji Ders Notları , İstanbul Teknik Üniversitesi
- [13] **AFAD, Gökçe, O., Tüfekci, M.K., Gürboğa, Ş.** (2014). Yüzey Faylanması Tehlikesinin Değerlendirilmesi Ve Fay Sakınım Bantlarının Oluşturulması
- [14] **AFAD.** (2018). Türkiye Deprem Tehlike Haritası. Erişim Tarihi: 2.05.2019, URL : <<https://www.afad.gov.tr/tr/24212/Turkiye-Deprem-Tehlike-Haritasi>>
- [15] **Demirtaş, R.**(t.y.) – Kuzey Anadolu Fay Sistemi Diri Fayları, Paleosismolojik Çalışmalar Ve Gelecek Deprem Potansiyelleri
- [16] **Boğaziçi Üniversitesi, KRDAE.** Erişim Tarihi:4.05.2019, URL: <<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/>>
- [17] **Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı,**Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 18 Mart 2018, Resmi Gazete Sayı : 30364
- [18] **AFAD.** Erişim Tarihi: 8.04.2019, URL: <<https://tdth.afad.gov.tr/>>
- [19] **Yıldız, M.** (1855). Bursa Depremleri

- [20] **Doğancı, K.**(t.y.) – Bursa Ve Civarını Etkileyen Depremler, Uludağ Üniversitesi
- [21] **Ergin, K., Güçlü, U., Uz, Z.** (23 Kasım 1967).Türkiye Deprem Kataloğu
- [22] **Öcalan, H. B.** (t.y.). “17. VE 18. YÜZYIL Bursa Depremleri”, Abacı, N. (2001) “Bursa Yöresinin Depremselliği Ve Deprem Tarihi”, Uludağ Üniversitesi Basım Evi, Bursa-2001
- [23] **Lowry, H. W.** (2004). “Seyyahların Gözüyle Bursa (1326-1923)”, Çeviren : Serdar Alper, İstanbul 2004
- [24] **Özcan, B.** (t.y.) – Bursa Depremleri. Erişim Tarihi: 2.04.2019, URL : <<https://dergipark.org.tr/download/article-file/28562>>
- [25] **Aytekel, F.** (2016) Tarihsel Depremler. URL: <<http://www.netdata.com/netsite/380cbc75/tarihsel-depremler?q=BURSA&p=1>>
- [26] **Oğuzoğlu, Y.** (t.y.) “Osmanlı Arşiv Kayıtlarına Göre 1855 Bursa Depremi”, Abacı, N. (2001) “Bursa Yöresinin Depremselliği Ve Deprem Tarihi”, Uludağ Üniversitesi Basım Evi, Bursa-2001
- [27] **Wikizero** (2011).Gökmenzade Hacı Çelebi. URL: <https://www.wikizero.com/tr/Bursa1%C4%B1_G%C3%B6kmenzade_Hac%C4%B1_%C3%87elebi>
- [28] **Zachariadou, E.** (1999). “Natural Disasters In The Ottoman Empire” , Halcyon Days in Crete III, A Symposium Held in Rethymnon (10-12 January 1997). Crete University Press, Rethymnon, 1999.
- [29] **T.C. Kültür Ve Turizm Bakanlığı Arşivleri.** (t.y.) Bursa Ulucami Raporları, (160201009-TF001)
- [30] **Vakıflar Genel Müdürlüğü** (2017). Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu
- [31] **Lourenco, P.B.** (1996) “Computational Strategy for Masonry Structures” (Doktora Tezi)
- [32] **Kaushik, H.B., Rai, D.C., Jain, S.K.** (2007). “Stress –strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression.”
- [33] **Barraza, J.A.** (2012). “Numerical Model for Nonlinear Analysis of Masonry Walls” (Doktora Tezi)
- [34] **Kaushik, H.B., Rai, D.C., Jain, S.K.** (2007) “Uniaxial compressive stress-strain model for clay brick masonry”
- [35] **Kurugöl, S., Küçük, S.G.** (2015) “Tarihi Eserlerde Demir Malzeme Kullanımı Ve Uygulama Teknikleri”. 5.Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu

- [36] **Ural, A. (2017)**. “Zıvana Demirlerinin Yığma Duvarların Kayma Davranışına Etkisinin İncelenmesi”. 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu
- [37] **Bolhassani, M., Hamid, A.A., Lau, A.C.W., Moon, F. (2015)**. “Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages”
- [38] **SAP2000 V20.0 Manuals (2016)**
- [39] **Abdulla, K.F., Cunningham, L.S., Gillie, M. (2017)** “Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach “
- [40] **American Society For Testing And Materials (ASTM) (1995)**. “D5731-95- Standart Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock.”
- [41] **Şahin, A., Mutlu, Ö. (2016)**. “Tarihi Yığma Minarelerin Modelleme Yaklaşımlarının Deprem Davranışına Etkisinin İncelenmesi – Bursa Ulucami Örneği”
- [42] **Serhatoğlu, C., Livaoğlu, R. (tarih)**. “Bursa Tarihi Minarelerinin Dinamik Davranışlarının Ve Performanslarının İncelenmesi”
- [43] **Oliveira, C.,S., Çaktı, E., Stengel, D. ve Branco, M. (2011)**. “Minaret Behavior Under Earthquake Loading: The Case Of Historical İstanbul”, Earthquake Engineering And Structural Dynamics, (41) 19-39.
- [44] **Serhatoğlu, C., Livaoğlu, R. (2017)**. “Tarihi Minarelerde Hakim Periyodun Hızlı Tespiti”, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği Ve Sismoloji Konferansı.
- [45] **PEER Ground Motion Database**. URL: <<https://ngawest2.berkeley.edu/site>>
- [46] **Seismosoft Earthquake Engineering Software Solutions - Seismo Match (2018)**
- [47] **Seismosoft Earthquake Engineering Software Solutions - Seismo Match (2018)**
- [48] **Doğangün, A., Acar, R., Sezen, H., Livaoğlu, R. (2008)**. “Investigation Of Dynamic Response Of Masonry Minaret Structures.”
- [49] **Altunışık, A.C. (2011)**. “Dynamic Response Of Masonry Minarets Strengthened With Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites.”
- [50] **Türk, A.M., Coşgun, C. (2012)**. “Seismic Behaviour And Retrofit Of Historic Masonry Minaret.”



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ayşe Zeynep Alamehmet
Doğum Tarihi ve Yeri : 1992
E-posta : zeynepalamehmet@gmail.com



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Özakasya Yapı Denetim 2013 - 2015
- Milli Saraylar – Dolmabahçe Sarayı 2017 -