

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANITSAL KULE TÜRÜ YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ VE ALTERNATİF SİSTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Ramazan ACAR

**HAZİRAN 2009
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANITSAL KULE TÜRÜ YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ VE ALTERNATİF SİSTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

İnş. Müh. Ramazan ACAR

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İnşaat Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29/05/2009
Tezin Savunma Tarihi : 15/06/2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Ömer İskender TULUK**

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2009

ÖNSÖZ

Anıtsal kule türü yapıların deprem davranışının incelenmesi ve alternatif sistemlerin geliştirilmesini konu alan bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Üniversite hayatımın başından itibaren benden hiçbir desteğini esirgemeyen, üstün bilim insanlığının yanında, eşsiz bir kişiliğe sahip değerlerli danışman hocam Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN'e minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Lisans eğitimden itibaren bana destek olan, yol gösterici olmaya çalışan, tanıdığım için kendimi şanslı saydığım, kıymetli hocam Yrd. Doç. Dr. Ramazan LİVAOĞLU'na minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Öğrenimim süresince eğitimimi tamamlamamda emeği geçen tüm bölüm hocalarıma, jüri üyeleri sayın Prof. Dr. İng. Ahmet DURMUŞ ve Yrd. Doç. Dr. Ömer İskender TULUK başta olmak üzere birlikte çalışmaktan onur duyduğum Ohio State Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Halil SEZEN'e, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen İnş. Yük. Müh. Fikret EYGÖREN'e ve beni destekleyen tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca Bilim İnsanı Destekleme Programı kapsamında beni maddi ödüllendirerek çalışmalarımı destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkürler ederim.

Beni sabırla destekleyen, her şeyimi borçlu olduğum canım aileme ve özellikle fedakarlıklarının karşılığını ödeyemeyeceğim anne ve babama minnettar olduğumu belirtir çalışmamın bilim dünyasına ve ülkemize faydalı olmasının dilerim.

Ramazan ACAR
Trabzon 2009

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar (ÇİZELGELER) DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Kule Tipi Yapılar ile İlgili Genel Notlar	3
1.2.1. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	4
1.2.2. Kule Tipi Yapıların Taşıyıcı Sistemleri	6
1.3. Minareler	8
1.3.1. Minarelerin Kısa Tarihi	11
1.3.2. Minare Bölümleri	15
1.3.3. Minarelerde Taşıyıcı Sistem.....	17
1.3.3.1. Yığma Minarelerin Taşıyıcı Sistemi.....	17
1.3.3.2. Betonarme Minarelerin Taşıyıcı Sistemi.....	19
1.4. Minareler ile Diğer Kule Türü Yapılar Arasındaki Yapısal Farklar	20
1.5. Minareler ve Depremler.....	21
1.6. Minare Hasarlarının Sınıflandırılması	23
1.7. Kule Türü Yapıların Tasarım Esasları.....	29
1.7.1. Yönetmelikler	30
1.7.2. Kesit Sınır Değerleri.....	30
1.8. Minarelerde Dinamik Yük Oluşturan Etkiler	32
1.8.1 Rüzgar.....	33
1.8.2 Deprem	34
1.8.2.1. Elastik Sistemlerin Titreşim Hareket.....	36
1.8.2.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler	37
1.8.2.1.1.1. Serbest Titreşim.....	38

1.8.2.1.1.2.	Zorlanmış Titreşim	42
1.8.2.1.2.	Çok Serbestlik Dereceli Sistemler	46
1.8.2.1.2.1.	Sönümsüz Serbest Titreşim (Modal Analiz)	47
1.8.2.1.2.2.	Sönümlü Zorlanmış Titreşim	49
1.8.2.1.2.2.1.	Modların Süper Pozisyonu Yöntemi	50
1.8.2.1.2.2.2.	Sayısal İntegrasyon Yöntemi	53
1.8.2.1.2.2.2.1.	Newmark Yöntemi	55
1.8.2.2.	Tepki Spektrumları	63
1.8.2.3.	Minarelerin Deprem Hesabında Kullanılacak Yöntemler	65
1.8.2.3.1.	Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi	66
1.8.2.3.2.	Mod Birleştirme Yöntemi	69
1.8.2.3.4.	Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi	72
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEMELER	73
2.1.	Geleneksel Betonarme Minarelerin Dinamik Analizi	73
2.1.1.	Minarenin Geometrik ve Kesit Özellikleri	73
2.1.2.	Minarenin Malzeme Özellikleri	74
2.1.3.	Uygulamaya Konu Olan Minarenin Deprem Hesapları	76
2.1.3.1.	Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ile Hesaplama	76
2.1.3.2.	Mod Birleştirme Yöntemi ile Hesaplama	77
2.1.3.3.	Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi ile Hesaplama	81
2.1.3.4.	Deprem Analizi Sonuçlarının Karşılaştırılması ve İrdelenmesi	84
2.1.3.5.	Kapasite Kontrolü	86
2.2.	Betonarme Minareler İçin Önerilen Taşıyıcı Sistem	89
2.2.1.	Önerilen Taşıyıcı Sisteme Sahip (Payandalı) Minarenin Deprem Hesapları	91
2.2.1.1.	Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ile Hesaplama	91
2.2.1.2.	Mod Birleştirme Yöntemi ile Hesaplama	92
2.2.1.3.	Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi ile Hesaplama	96
2.3.	Geleneksel Minare ile Payandalı Minarenin Deprem Davranışlarının Karşılaştırılması	99
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	103
4.	KAYNAKLAR	105
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Ülkemizde son yıllarda meydana gelen depremlerde anıtsal kule türü yapılar önemli oranda hasar görmüş ve yıkılmıştır. Diğer taraftan bu yapıların rüzgar nedeniyle de yıkıldığı haberleri basında sıkça yer almaktadır. Bu durumda anıtsal kule türü yapılar konusundaki mevcut durumun ortaya konması, hasar nedenlerinin araştırılması ve bu çalışmalardan çıkartılacak sonuçlara göre gerekli önlemlerin alınması, can güvenliği ve mal kaybının önlenmesi açısından son derece önemlidir.

Bu çalışma anıtsal kule türü yapıları, mimari ve taşıyıcı sistem özellikleri bağlamında tanıtmak, yatay yükler etkisindeki dinamik davranışları irdelemek, bu yükler etkisinde bu tür yapılarda meydana gelebilecek hasarların nedenlerini ortaya koymak ve daha uygun taşıyıcı sistem geliştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda çalışma üç bölümden oluşmaktadır.

Çalışmanın birinci bölümünde genel olarak kule türü yapılar hakkında tanıtıcı bilgiler verilmektedir. Anıtsal kule türü yapıların diğer kule türü yapılardan farklılıkları üzerinde durulmuştur. Kule türü yapı hasarlarının irdelenerek sınıflandırılması ve deprem bölgelerinde incelenen minarelere ilişkin hasar bilgileri de bu bölümde verilmektedir.

İkinci bölümde ülkemizde 1999 yılında meydana gelen yıkıcı depremlerde hasar gören minareler dikkate alınarak analizlerde esas alınacak temsili bir minare seçilmiştir. Temsili minarenin deprem davranışı Türkiye Deprem Yönetmeliğinde verilmiş olan yöntemlere göre belirlenerek yöntemlerin etkinliği araştırılmıştır. Önerilen payandalı bir minarenin de sunulduğu bu bölümde, geleneksel minare ile payandalı minarenin deprem davranışları karşılaştırılmalı sunulmaktadır.

Son bölümde ise yapılan çalışmaların tümünden çıkarılan sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir. Önerilen minarenin deprem davranışının genel olarak geleneksel betonarme minareden daha üstün olduğu söylenebilir. Ancak çok sayıda minare için benzer işlemlerin yapılması, önerilen taşıyıcı sistemin etkinliğinin yorumlanması, sonuçların genellenmesi açısından gerekli olmaktadır. Son bölümü kaynaklar dizini ile özgeçmiş izlemektedir.

Anahtar Kelimeler: Anıtsal kule türü yapılar, Minareler, Deprem davranışı, Geleneksel minare, Payandalı minare

SUMMARY

Investigation of Behaviors of Monumental Tower Structures and Development of Alternative Systems

Monumental tower structures were damaged large rate during main earthquakes occurred in recent years. In addition, news of minaret damages due to wind effect has been expressed mostly in press. In this case, it is necessary to put forward existing knowledge about these tower structures, to investigate damage reasons, to prevent loss of human lives and goods.

It is aimed in this study to introduce monumental tower structures depending on architectural and structural system properties, to evaluate dynamic behavior of these structures subjected to lateral load effects, to put forward damage reasons for these structures exposed these load effects and to develop alternative structural system. This study carried out for this aim consisting of three main sections.

The first section includes; informative knowledge about tower like structures, differences between monumental tower structures and other tower structures, evaluation of damages occurred in minaret type structures during past Turkey earthquakes.

In the second section, it is selected a representative minaret considering damaged minaret dimensions during 1999 Turkey destructive earthquakes to carried out dynamic analysis. Seismic analysis of the representative minaret was carried out considering earthquake design methods given in Turkish Earthquake Code. An alternative minaret which is called minaret with props was also considered for seismic analysis. Comparative seismic analyses were carried out for these minarets and results were given with comparatively.

In the third section, the results and recommendations of the study are given. It may be concluded that Minaret with props good behaved that traditional minaret in generally. But more seismic analyses should be carried out for many other minarets with different dimensions to generalize conclusions

Key Words: Monumental tower like structures, Minarets, Seismic behaviour, Traditional minarets, Minarets with props

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. CN Tower Toronto, Kanada	7
Şekil 1.2. Bazı Minare Örnekleri: (a) Cairo, Ahmad ibn Tulun Cami (Tulunid Devri, 876-9), (b) Diyarbakir, Türkiye, Ayni Cami (Osmanlı Devri, c. 1489), (c). Marrakesh, Morocco, Kutubiyya Cami (Almohad Devri, 12. yüzyıl), (d). Bukhara, Uzbekistan, Kalyan Cami (1514), (e). Turfan, Xinjiang Şehri, Kuzey Çin, Amin Cami, (1778), (f). Timbukte, Mali, DjinguereBer Cami (Songhay Devri, 14. yüzyıl), (g). San'a Yemen, Al-Bakiriyya Cami (Osmanlı Devri, 1598), (ğ). Beni-Isguen, Algeria, Mzab Saharan Köyü Cami, (h). Lahore, Pakistan, Wazir Khan Cami (Mughal Devri, 1634), (ı). Cairo, Amir Qurqumas Cami (Memlük zamanı sonrası,1506)	10
Şekil 1.3. Selçuklu dönemi anıtlarında minare uygulamaları: Konya İnce Minareli ve Sivas Gök Medrese	12
Şekil 1.4. Mimar Sinan'dan önce minare uygulamaları: Beyazıt ve Firuzağa Cami.....	13
Şekil 1.5. Mimar Sinan'dan Lale devrine kadar minare uygulamaları: İstanbul Sultanahmed ve Edirne Selimiye Camileri.....	13
Şekil 1.6. Lale devrinden cumhuriyet dönemine kadar minare uygulamaları: Yıldız ve Nur-u Osmaniye Camileri.....	14
Şekil 1.7. Modern mimariye ait minareler: Sabancı Cami	14
Şekil 1.8. Tipik Minare Bölümlenmesi (Tuluk vd., 2006)	15
Şekil 1.9. Yığma minarelerde kullanılan taş blok, kenet ve zıvanaların kullanımı	19
Şekil 1.10. 1999 depremlerinde külah kısmında meydana gelen hasar (SDR, 2005).....	24
Şekil 1.11. Petek bölgesinde meydana gelen hasar	24
Şekil 1.12. Gövde bölgesinde meydana gelen hasar.....	25
Şekil 1.13. Yığma minarelerde gövdenin altında meydana gelen hasarlar.....	26
Şekil 1.14. Betonarme minarelerde gövdenin altında meydana gelen hasarlar.....	27
Şekil 1.15. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde hasar alan 12 Kasım 1999 Düzce depreminde yıkılan Koçyazı'daki minare.....	28
Şekil 1.16. Geçiş bölgesinde meydana gelen hasarlar	28
Şekil 1.17. Kaide hasarları.....	29

Şekil 1.18. Çevredeki bina üzerine yıkılan minare.....	29
Şekil 1.19. Rüzgar yükünün zamana bağlı değişimi.....	33
Şekil 1.20. Boyuna rüzgâr etkisinden dolayı minarede oluşan eğilme momentinin yükseklik boyunca dağılımı.....	34
Şekil 1.21. İdeal bir yer hareketinde yerdeğiştirme, hız ve ivmenin değişimi	36
Şekil 1.22. 19 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi (kuzey-güney bileşeni) Yarımca istasyonuna ait ivme, hız ve yer değiştirmenin zaman bağlı değişimi	36
Şekil 1.23. Tek serbestlik dereceli sistem modelleri	37
Şekil 1.24. Sönümlü bir sistemin kritik üstü, kritik ve kritik altı sönüm durumlarında titreşimi.....	42
Şekil 1.25. Ortalama ivme grafiği.....	58
Şekil 1.26. Lineer ivme grafiği.....	59
Şekil 1.27. Deprem tepki spektrumlarının şematik olarak açıklanması	65
Şekil 1.28. Spektrum katsayısının periyotla değişim grafiği.....	69
Şekil 1.29. Mod Birleştirme Yöntemi ile hesap için akış diyagramı.....	71
Şekil 2.1. Geleneksel minarenin geometrik ve kesit özellikleri	75
Şekil 2.2. Geleneksel minarenin bilgisayar modeli	77
Şekil 2.3. Minare ilk 4 mod ve burulma mod şekli	78
Şekil 2.4. Mod birleştirme yöntemine göre (a) pozitif (S_{max}) normal gerilme dağılışı, (b) negatif (S_{min}) normal gerilme dağılışı	80
Şekil 2.5. Mod birleştirme yöntemine göre (a) pozitif (V_{max}) kayma gerilmesi dağılımı, (b) negatif (V_{min}) kayma gerilmesi dağılımı	80
Şekil 2.6. Deprem kayıtları; (a) 12 Kasım Düzce depremi Düzce istasyonu kaydı, (b) 17 Ağustos Kocaeli depremi Yarımca istasyonu kaydı.....	81
Şekil 2.7. (a) 12 Kasım Düzce ve (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre tepe noktası deplasmanın zamanla değişimi	82
Şekil 2.8. (a) 12 Kasım Düzce ve (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen normal gerilmenin zamanla değişimi.....	82
Şekil 2.9. (a) 12 Kasım Düzce ve (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen kayma gerilmenin zamanla değişimi	83

Şekil 2.10. (a) 12 Kasım Düzce, (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre pozitif (S_{max}) normal gerilme dağılışı, (c) 12 Kasım Düzce, (d) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre negatif (S_{min}) normal gerilme dağılışı.....	83
Şekil 2.11. (a) 12 Kasım Düzce, (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre pozitif (V_{max}) kayma gerilmesi dağılışı, (c) 12 Kasım Düzce, (d) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre negatif (V_{min}) kayma gerilmesi dağılışı.....	84
Şekil 2.12. Tasarım spektrumu, 12 Kasım Düzce ve 17 Ağustos Kocaeli depremi analizinden elde edilen yatay deplasmanın minare yüksekliği boyunca değişimi	86
Şekil 2.13. Eksenel kuvvet-eğilme momenti etkileşim diyagramı ve talep edilen kapasiteler.....	88
Şekil 2.14. Payandalı minarenin geometrik ve kesit özellikleri	90
Şekil 2.15. Payandalı minarenin bilgisayar modeli	92
Şekil 2.16. Payandalı minare ilk 4 mod ve burulma mod şekli	93
Şekil 2.17. Payandalı minarenin mod birleştirme yöntemine göre (a) pozitif (S_{max}) normal gerilme dağılışı, (b) negatif (S_{min}) normal gerilme dağılışı.....	95
Şekil 2.18. Payandalı minarenin mod birleştirme yöntemine göre (a) pozitif (V_{max}) kayma gerilmesi dağılımı, (b) negatif (V_{min}) kayma gerilmesi dağılımı.....	95
Şekil 2.19. (a) 12 Kasım Düzce ve (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre payandalı minare tepe noktasının deplasmanın zamanla değişimi	96
Şekil 2.20. (a) 12 Kasım Düzce ve (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen normal gerilmenin zamanla değişimi.....	97
Şekil 2.21. (a) 12 Kasım Düzce ve (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen kayma gerilmenin zamanla değişimi	97
Şekil 2.22. (a) 12 Kasım Düzce, (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre pozitif (S_{max}) normal gerilme dağılışı, (c) 12 Kasım Düzce, (d) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre negatif (S_{min}) normal gerilme dağılışı.....	98
Şekil 2.23. (a) 12 Kasım Düzce, (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre pozitif (V_{max}) kayma gerilmesi dağılışı, (c) 12 Kasım Düzce, (d) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre negatif (V_{min}) kayma gerilmesi dağılışı.....	98

Şekil 2.24. 12 Kasım Düzce depremine göre payandalı ve geleneksel minarenin tepe noktasının deplasmanın zamanla değişimi	100
Şekil 2.25. 17 Ağustos Kocaeli depremine göre payandalı ve geleneksel minarenin tepe noktasının deplasmanın zamanla değişimi.....	100
Şekil 2.26. 12 Kasım Düzce depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen normal gerilmelerin zamanla değişimi.....	101
Şekil 2.27. 17 Ağustos Kocaeli depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen normal gerilmelerin zamanla değişimi.....	101
Şekil 2.28. 12 Kasım Düzce depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen kayma gerilmelerin zamanla değişimi	102
Şekil 2.29. 17 Ağustos Kocaeli depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen kayma gerilmelerin zamanla değişimi	102

TABLolar (ÇİZELGELER) DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. 1999 depremlerinden sonra minare hasarları	22
Tablo 1.2. Kule türü yapıların minimum donatı sınırları	31
Tablo 1.3. ACI 307-79 ve DIN 1056 minimum donatı değerleri	31
Tablo 1.4. Deprem yükünü azaltma katsayısı $R_a(T)$	67
Tablo1.5. Etkin yer ivmesi katsayısı (A_0)	67
Tablo1.6. Yerel zemin sınıfları ve zemin karakteristik periyotları (T_A ve T_B)	69
Tablo 2.1. Minarenin kesit alanı, kütle ve ağırlıkları	76
Tablo 2.2. Modal değerler	79
Tablo 2.3. Maksimum kesit etkileri	84
Tablo 2.4. Etkileşim diyagramı apsis ve ordinat değerleri	87
Tablo 2.5. Kritik kesit kesme kapasitesi	89
Tablo 2.6. Payandalı minarenin kesit alanı, kütle ve ağırlıkları	91
Tablo 2.7. Modal değerler	94
Tablo 2.8. Minarelere etkiyen deprem yükleri	99
Tablo 2.9. Minarelerin tepe noktası deplasmanları	99
Tablo 2.10. Minarelere Periyotları	100

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: İntegral sabiti
$A(T)$: Spektral ivme katsayısı
A_0	: Etkin yer ivme katsayısı
B	: İntegral sabiti
c	: Sönüm
c_{cr}	: Kritik sönüm
d	: Çap
D_n	: Spektral yerdeğiştirme
E_c	: Betonun elastisite modülü
E_s	: Betonarme çeliğinin elastisite modülü
F	: Sisteme etkiyen dış kuvvet
f	: Doğal frekans
f_I	: Atalet kuvveti
f_D	: Sönüm kuvveti
f_S	: Rijitlik kuvveti
f_{cd}	: Betonun tasarım basınç dayanımı
f_{ck}	: Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{su}	: Donatı minimum çekme dayanımı
f_{yd}	: Donatı tasarım dayanımı
f_{yk}	: Donatının karakteristik akma dayanımı
g	: Yerçekimi ivmesi
$q(t)$: Genelleştirilmiş koordinat
I	: Bina önem katsayısı
k	: Rijitlik
m	: Kütle
M_n	: Genelleştirilmiş kütle

\bar{M}_n	: Efektif kütle
R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı, Anma moment parametresi
r	: Frekans oranı
$R_a(T)$: Deprem yükü azaltma katsayısı
$S(T)$: Spektrum katsayısı
S_d	: Yerdeğiştirme tepkisinin maksimum değeri (yerdeğiştirme spektrumu)
S_v	: Hız tepkisinin maksimum değeri (hız spektrumu)
S_a	: İvme tepkisinin maksimum değeri (ivme spektrumu)
$S_{ae}(T)$: Elastik spektral ivme
$S_{aR}(T_r)$: Azaltılmış ivme spektrumu ordinatı
t	: Zaman
T	: Doğal periyot
T_d	: Sönümlü sistemin doğal periyot
T_1	: Birinci doğal titreşim periyodu
V_t	: Toplam eşdeğer deprem yükü
W	: Toplam yapı ağırlığı
$Z1, Z2, Z3, Z4$: Yerel zemin sınıfları
γ_{beton}	: Betonun birim hacim ağırlığı
μ_c	: Poisson oranı
ε_{cu}	: Ezilme birim kısalması
ε_{sh}	: Pekleşme birim şekil değiştirmesi
ε_{su}	: Kopma birim şekil değiştirmesi
ψ	: Faz açısı
ρ	: Donatı oranı
σ	: Kesitteki normal gerilme
u	: Yapının yerdeğiştirmesi
u_g	: Zeminin yerdeğiştirmesi
u_0	: Eşdeğer statik yerdeğiştirme
\dot{u}	: Hız

\ddot{u}	: İvme
\ddot{u}_g	: Yer hareketini ivmesi
ω	: Sönümsüz doğal açısal frekans
ω_D	: Sönümlü titreşime ait doğal açısal frekans
ξ	: Sönüm oranı
Δt	: Zaman aralığı
ϕ	: Donatı çapı
Φ	: Modal matris
ϕ_i	: Sönümsüz sistemin mod şekilleri
σ	: Kesitteki normal gerilme

Kısaltmalar

TS	: Türk Standartları
ACI	: American Concrete Institute
ANSI/ASCE	: American National Standard Institute/ American Society of Civil Engineers
CQC	: Tam Karesel Birleştirme Yöntemi
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
EDYY	: Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi
MBY	: Mod Birleştirme Yöntemi
SRSS	: Modal Maksimumların Kareleri Toplamının Karekökü Yöntemi
ZTAHY	: Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi

Not: Yukarıdaki semboller diziminde yer almayan semboller metin içinde ilgili oldukları yerlerde tanımlanmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Anıtsal kule türü yapılar (minareler); haberleşme kuleleri, sanayi bacaları, deniz fenerleri, radar kuleleri ve ayaklı su depoları gibi kule türü bir olarak değerlendirilebilir. Bu tip yapılar genellikle çelik, betonarme, ön gerilmeli betondan imal edilmektedir. Bu yapılardan minareler de özellikle tarihi olanlarda yaygın olarak yığma (tuğla, kesme taş v.b) ve ahşap taşıyıcı sisteme sahip olanları da görmek mümkündür.

Minareler dışındaki diğer kule tipi yapılar hakkında literatürde çok sayıda çalışma yer almaktadır ve bunlar genel olarak da insanların yoğun olarak yaşadığı bölgelerin dışında inşa edilmektedir. Diğer taraftan minarelerin bulunduğu camiler insanların kısa süreli de olsa çok yoğun olarak bulunduğu yerlerdir. Bu nedenle minareler konusundaki mevcut durumun ortaya konması, hasar nedenlerinin araştırılması ve bu çalışmalardan çıkartılacak sonuçlara göre gerekli önlemlerin alınması, ülke insanın can güvenliği ve mal kaybının önlenmesi açısından son derece önemlidir.

Bilindiği gibi Türkiye yıkıcı depremlerin sıklıkla meydana geldiği ülkelerden biri olup yaklaşık 2-3 yılda bir hasara yol açan depremler meydana gelmektedir. Bu depremlerin birçoğunda da minareler, sahip oldukları narin taşıyıcı sistemin de etkisiyle, hasar görmüş ya da yıkılmışlardır. Nitekim 1999 depremlerinde İzmit, Düzce, Bolu ve Adapazarı'nda bir çok minare hasar görmüş ya da yıkılmıştır. Sadece Düzce ilinde 115 adet minarenin deprem anında göçmesi yada ağır hasarlı olması nedeniyle deprem sonrası yıkılması (Düzcedamla, 2006), bu tür yapıların depremden ne kadar fazla etkilendiğini göstermesi açısından yeterli olacaktır. Minareler halkın en yoğun olarak yaşadığı yerleşim merkezlerine yapıldığından meydana gelen depremde minarelerin hasar görmeleri halinde genellikle, insanlık için son derece önemli olan, çok sayıda can kayıpları meydana gelmektedir. Bu gün olduğu gibi bu yapıların hesap ve tasarımına gerekli özen gösterilmezse bundan sonraki muhtemel depremlerde de benzer durumlarla karşılaşılacağı maalesef kaçınılmaz olacaktır.

Taşıyıcı sistem seçimi, yeni yapılacak minareler için ne kadar önemli ise, eski yığma minarelerin taşıyıcı sistem özelliklerinin belirlenmesi de o kadar önemlidir. Bu minarelerin eklendiği cami kitlesiyle birlikte birer kültür mirası oldukları göz önüne

alınırsa, bunların gelecek kuşaklara hasarsız bir biçimde iletilebilmeleri, gerekli bakım ve onarımları için taşıyıcı sistem özelliklerinin bilinmesini gerektirmektedir (Doğangün vd., 2006).

Yapılan literatür taramasında doğrudan minarelerin hesap ve tasarımı için hazırlanmış herhangi bir standart yada yönetmeliğin bulunmadığı dikkati çekmektedir. Bu konuda yayınlanmış tek kılavuz olma özelliği taşıyan ve 1999 depremlerinden hemen sonra acilen hazırlanan Diyanet İşleri Başkanlığı'nın "Minarelerin Yapımında Uygulanacak Esaslar" talimatı ise minarelerin biçimsel ve konstrüktif olarak ölçülü ve güvenli inşa edilmelerine hizmet edecek nitelikten uzaktır. Bu nedenle minarelerin yapımında gerekli dinamik hesapları ve detayları da içeren bilimsel araştırma temeline oturtulmuş bir yönetmeliğin hazırlanması ülke şartları için bir zorunluluk haline gelmiştir. İşte bu amaçla bu çalışmada minareler, mimari ve taşıyıcı sistem özellikleri bağlamında tanıtılacak, yatay yükler etkisindeki dinamik davranışları irdelenecek, bu yükler etkisinde minarelerde meydana gelebilecek hasarlar ve bunların nedenleri ortaya konacaktır.

Birçok kişinin can kaybetmesine ve çok sayıda hasara rağmen depremden sonra da minarelerin deprem performansları neredeyse unutulmuş, bunların deprem davranışlarını belirlemeye yönelik olarak, yok denecek kadar az çalışma gerçekleştirilmiştir. Depremlerden sonra haber ajanslarında çıkan yıkılan minare haberleri dışında, teknik anlamda ilk yayınlar 1999 depremleri sonrasında yaptıkları gözlemlere dayalı olarak H. Sezen, G.Y. Fırat ve M.A. Sözen tarafından gerçekleştirilmiştir (Fırat, 2001; Sezen vd., 2003). 1999 depremlerinden sonra oluşan depremler ya da rüzgar etkisiyle de zaman zaman minare hasarları meydana gelmiş ve bu hasarlar yaralanmalara ya da mal kayıplarına neden olmuştur. Minarelerin sürekli hasar görmesi nedeniyle Doğangün ve çalışma arkadaşları da minarelerin yapısal ve mimari özellikleri konularında çalışmalar gerçekleştirmişlerdir (Acar vd., 2007; Doğangün, 2008; Doğangün, 2007a; Doğangün, 2007b; Sezen, 2008; Tuluk, 2006).

Bu çalışmanın başlıca amacı; herhangi bir yönetmeliği olmayan fakat çok sayıda inşa edilen minarelerin deprem davranışlarını ortaya koyarak bu yapıların zayıf yönlerini giderecek şekilde alternatif bir taşıyıcı sistem önermek ve her iki taşıyıcı sistemin dinamik davranışlarını karşılaştırmaktır.

Çalışmada bu amacın yanından;

- Minarelerin dinamik davranışı hakkında tasarımcıya bir fikir vermek
- Bu yapıların uygulama safhalarında mühendislerin yer alması için, mühendislere yol gösterici çözüm tekniği önermek
- Deprem yönetmeliğinde verilmiş olan deprem yükü hesap yöntemlerinin birbirlerine göre etkinliklerini irdelenmek
- Minare hasarlarını yapılan dinamik analizler ışığında yorumlayarak minareler için alternatif sistem önermek
- Önerilen taşıyıcı sistemin dinamik davranışlarını ortaya koymak
- Bu yapılar için bir standart geliştirerek bu konudaki eksiği gidermek

hedefleri de seçilmiştir.

1.2. Kule Tipi Yapılar ile İlgili Genel Notlar

Bu başlık altında, minareler dışındaki diğer kule tipi yapılar ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenecek ve bu yapıların taşıyıcı sistemleri hakkında genel bilgiler verilecektir. Minareler ise ayrı başlık altında incelenecektir.

Düşük ya da normal yüksekliğe sahip yapılarda genel veya yaklaşık hesap yöntemlerini kullanmak çözüm için yeterli olurken yüksek yapılarda pek tercih edilmez. Çünkü yüksek yapılarda genel olarak yanal yükler daha etkin karakterlidir. Aynı zamanda bu yüklerin rasgele ve karmaşık yapıda olması hesabı zorlaştırmakta ve dinamik analizi zorunlu kılmaktadır. Dinamik analizin uygulamadaki karmaşıklığı ve zahmetli olması sebebiyle önceleri yaklaşık sonuçları veren statikçe eşdeğer yöntemler benimsenmekteydi. Bu sonuçlar güvenli tarafta kalmak adına dinamik analizden daha yüksek değerler vermektedir. Daha sonra bilgisayar teknolojisinin gelişmesi, hesapların daha kolay ve daha kesin olarak elde edilmesine olanak vermiştir (Beyazoğlu, 2006).

Kule tipi yapılar yüksek yapılar içinde daha ayrıntılı bir bölüm teşkil eder. Doğrusal yayılı kütleli ya da ters sarkaç şeklinde matematik modelleme yoluyla dinamik çözüme gidilir. Dinamik analiz üzerine yapılan araştırmaların büyük çoğunluğunda rüzgar özelliklerinin ayrıntılı olarak irdelenmesi, rüzgar etkilerinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Fakat ülkemizde deprem riskinin fazla olması deprem kuvvetlerine karşı analiz yapmayı zorunlu hale getirmektedir.

Bu tip yapıların karakteristik özellikleri yükseklikleridir. Bu yüzden taşıyıcı sistemin özelliklerine bağlı olarak ikinci mertbe momentleri mutlaka hesaplarda göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca taşıyıcı sistem betonarme kabuk olduğundan kabuk üzerindeki boşluklar ve süreksizlikler için gerekli önlemler alınmalıdır (Beyazoğlu 2006).

Ülkemizde kule türü yapılarla ilgili henüz bir yönetmelik bulunmadığından en çok başvuru kaynaklarından biri bacalarla ilgili hazırlanmış en önemli yönetmelik olarak kabul edilen Amerikan Beton Enstitüsü'nün (ACI) çıkarmış olduğu ACI 307 yönetmeliğidir.

Bu yönetmelik ilk olarak 1934 yılında çıkarılmıştır ve periyodik olarak da yenilenmektedir. Rüzgar yükleri, ısı yüklemesi ve sismik yükleri kapsar. Ayrıca ısı değişiminin beton kabuk için hesabı ve ısı gerilmelerinin tek basına ve rüzgar ve deprem yükü ile kombinezonları hakkında hesap yöntemlerini içerir. Donatı çeliği, minimum beton dayanımı, çeşitli yüklemesi durumlarında kabul edilebilir gerilmeleri içerir. Özel bir yönetmeliği olmayan birçok ülkede de genellikle Amerikan yönetmeliği ile birlikte o ülkenin kendi betonarme yapı kuralları birlikte kullanılır (Pinfold, 1975).

1.2.1. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Kule tipi yapılar, diğer yüksek yapılarda olduğu gibi tasarım, hesap zorluğu ve uygulama tekniği nedeniyle diğer yapılardan farklı olarak değerlendirilmelidir. Bu tip yapılar hakkında yazılan eserlere bakıldığında hesap yöntemleri yanında uygulama teknikleri üzerinde de durulduğu görülmüştür (Beyazoğlu, 2006).

Pinfold (1975), betonarme bacalar ve kuleler hakkında bir eser yazmıştır. Yanal yükleri, sıcaklık etkilerini, yalıtımı, uygulama ve tasarım yöntemlerini detaylı bir şekilde anlatmaktadır.

Aydoğan ve Hasgür (1988), betonarme bacalar üzerine yazdıkları eserde, betonarme baca elemanları, gövde, kaplama ve temelle ilgili bilgilere yer vermişler, ayrıca bacaya gelen dış yükleri ve hesap yöntemlerini incelemiştir.

Jackson (1978), bacalardaki asit, sıcaklık sorunu, yalıtım ve tasarımında dikkat edilmesi gereken konulara değinmiştir. Ayrıca uygulamada kullanılan birleşim elemanları vs. hakkında bilgiler vermiştir.

Güven (1980), bacaların ve kulelerin sayısal hesap yöntemlerini ayrı ayrı incelemiş ve bunlara etkiyen yükleri araştırmıştır. Ayrıca konuyla ilgili sayısal örnek çözümlerine yer vermiştir.

İnşaat mühendisliğinde kule tipi yapılar üzerine yapılmış çalışmalar, bu tip yapıların yanal yüklere karşı hassas olması nedeniyle daha çok bu alanda yapılmıştır. Gerçekten de bu yapıların yanal yüklerden kolay etkilenmesi sebebiyle dinamik analiz sonucuna yakın sonuçlar almak için statik ya da yarı-statik yöntemler geliştirilmiş, daha sonraları teknolojinin gelişmesiyle dinamik analiz yöntemlerinin uygulanması mümkün olmuştur. Gerek bilgisayar teknolojisinin karmaşık dinamik analiz problemlerinin çözümünde kullanılması gerekse rüzgar tüneli gibi gözleme ve ölçmeye dayalı analiz yöntemlerinin geliştirilmesi bu tür yapıların tasarımında kolaylıklar sağlamıştır (Beyazoğlu, 2006).

Konuyla ilgili dinamik analiz çalışmaları literatürde mevcuttur. Tezcan ve Yavaş (2000), kule tipi yapıların deprem ve rüzgar yükleri karşısında davranışlarını incelemiş ayrıca kuleyle ilgili tasarım kriterlerine değinmişlerdir.

Chopra (2001), baca tipi yapıları konsol şeklinde ve kütleli konsol boyunca düzgün yayılmış kabul ederek bu tüp yapıların tek serbestlik dereceli kabul edebileceğini söylemiştir.

Dowrick (1978) de bacaları, kütlesi boyunca düzenli dağılmış kabul edip incelerken, TV kulesi ve gözetleme kulesi vs. gibi yapıları ters sarkaç şeklinde kabul etmiş, bu yapıların deprem karşısındaki dinamik özellikleri incelemiştir.

Houghton and Carruther (1976), Sachs (1978), Dyrbye and Hansen (1996), yaptıkları çalışmalarda rüzgarın yapılar üzerindeki etkisini incelemişler, ayrıca kule ve baca gibi özel yapılardaki rüzgar etkilerini deneysel ve teorik olarak açıklamışlardır.

Hansen'da (1998) ise rüzgar etkisinde başlayan titreşimlerin baca şeklinde olan yapılara etkisini incelemiş, çeşitli bacalar için bazı karakteristik bilgiler vermiştir.

Wilson'da (2000) betonarme bacaların depreme dayanıklı tasarımı için uygun sünenlik faktörlerine göre hesaplar yapmış ve sonuçları uluslararası baca yönetmelikleri ile karşılaştırmıştır.

Hara vd. (1999), soğutma kulelerine etkiyen periyodik rüzgar yüklerini sonlu elemanlar metodu yardımıyla incelemiş, sonuçları monolitik yükleme sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Ayrıca tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışlarla donatı oranı arasındaki ilişkiyi araştırmıştır.

Cho vd. (1999), kuleler ve bacalar üzerine çeşitli yönlerde etkiyen rüzgar ve bunlardan doğan titreşimlerin sönümü arasındaki farkı incelemiş, doğal frekansla sönüm oranı arasında bir ilişki kurmak istemiştir.

Köseoğlu (1986), temeller üzerine yazdığı kitapta, kulelere ve bacalara yönelik özel bir bölüm ayırmış ve bu tip yapılar için yapılması gereken temel tiplerinden bahsederek çözümlü örneklerle yer vermiştir.

1.2.2. Kule Tipi Yapıların Taşıyıcı Sistemleri

Kule tipi yapılar denince akla; haberleşme kuleleri, sanayi bacaları, deniz fenerleri, radar kuleleri, minareler ve ayaklı su depoları gelmektedir. Bu tip yapılar genellikle çelik, betonarme, ön gerilmeli betondan imal edilir. Baca ve minareler yığma olarak da yapılabilmektedir. Günümüzde yapılan ve yapılmakta olan bu tip yapılara bakıldığında sanayi bacalarının ve haberleşme kulelerinin diğerlerinden daha yüksek olduğunu görülür.

(1) Bacalar: 150 yıldır kullanılan bacalar; günümüzde prefabrikten, tuğladan, çelikten ve betonarmeden imal edilen ve yükseklikleri 400 m. ye kadar ulaşan yapılardır. Sanayi bacalarının yüksek olması başlıca iki sebebe dayanmaktadır. Birincisi, baca çekisi, baca yüksekliği arttıkça kolaylaşır. İkincisi, sanayinin yoğun olduğu bölgelerde hava kirliliği problemini çözmek için atık gazların atmosferde daha yükseklere bırakılması zorunluluğu da baca yüksekliğini arttırır.

Yüksekliğin az olduğu, yüksek ısıya dayanıklı olması istenen bacalarda tuğla tercih edilir. Atık gazların çeliği korozyona uğratması, çeliğin bakım ve onarım masraflarının bu yüzden artması ve dış etkilere karşı betonarmeye göre daha dayanıksız oluşu gibi sebeplerden ötürü bacanın genellikle betonarme olması tercih edilir. Çelik baca yüksekliği yaklaşık 120 m.ye kadar inşa edilirken betonarme bacalar 400 m. ye kadar çok rahat inşa edilmektedir. Bunda betonarmenin çeliğe göre rüzgar titreşimlerine karşı daha dayanıklı olması da büyük bir etkidir (Aydoğan ve Hasgür, 1988).

Bacalar, uzun silindir şeklindeki yapı tiplerinin birçoğunda olduğu gibi farklı problemleri bünyesinde barındırır. Bu yüzden diğer kule tipli yapılardan ayrı düşünülürler. Bacayla ilgili en önemli özel problem baca borusundaki gazın termal ve korozif etkilerinin ortaya çıkmasıdır. Bu etkilerle birlikte, beton ile izolasyon malzemesi arasındaki yüksek ısı ve farklı sıcaklık mekanizması, betonun korunmasını zorunlu kılar. Yüksek ısıda, baca

gazları izolasyon ve hareket farkı problemlerine neden olurken, düşük ısıda, gazlar asit yoğunlaşmasından dolayı sorunlara neden olurlar (Pinfold, 1975).

(2) Kuleler: Kuleler genellikle televizyon ve radyo yayıncılığında kamu için yada geniş manzara, yemek v.s. gibi amaçlarla halkın kullanımı için inşa edilen yüksek yapılarıdır. Yüksek frekanslı radyo iletişim ağlarının gelişiminden dolayı kule yapımı birçok ülkede artmaktadır. (Pinfold, 1975).

Kuleler genel olarak dört bölüme ayrılarak incelenir. Bunlar; temel, gövde, baş kısmı ve anten kısmıdır. Televizyon kulelerinde baş kısmı genellikle silindirik veya disk formu olarak yapılırlar. Buralar kafeterya, restaurant vs. olarak planlanan halka açık kısımlardır (Güven, 1982).

Haberleşme kulelerinin yüksek olmasının sebebi, TV ve radyo yayın sinyallerinin taşınmasında büyük ve güçlü antenlere ihtiyaç duyulmasıdır. Özellikle mikrodalga iletimi yapan kulelerin yüksekliği her şeyden önce yapının inşa edildiği topografyaya bağlı olmakla birlikte kırsal kesimlerde en az 75 m. şehir merkezlerinde de 140 m olması beklenir (Pinfold,1975).

Toplam yüksekliği 553.33 m. olan CN Tower'da kayar kalıpla yapılmış 446 m. yüksekliğinde ve 130.000 ton ağırlığında beton sütun bulunur (Pinfold, 1975).



Şekil 1.1. CN Tower Toronto, Kanada

Kuleler sayı olarak bacalardan az olsa da bacalara göre tasarım sırasında çok çeşitli türde problemlerle karşılaşılır. Bacalardaki gibi yüksek sıcaklık problemiyle karşılaşılmaz ama uzun anten güneşe maruz kaldığı için sapar. Ayrıca rüzgar da göz önünde bulundurulmalıdır (Pinfold, 1975).

Kulelerde karşılaşılan başlıca problemler için yapılanlar aşağıdaki gibi sıralayabilir (Pinfold, 1975);

- Platform ve galerilerin desteklenmesi.
- Asansör ve lokanta için gerekli teçhizatlar (periyodik olarak dönebilen bas kısımları) gibi mekanik servislerin temin edilmesi.
- Rüzgar ve güneşe maruz kalmaktan dolayı antende oluşabilecek açılmal dönmelerin sınırlandırılması.
- Halka açık alanlardaki dinamik hareketin sınırlandırılması.
- Tehlike çıkışının ve yeterli yanma direncinin sağlanması.

(3) Radar Kuleleri ve Deniz Fenerleri: Radar kuleleri genellikle iki bölüm olarak kabul edilir: kule yapısı ve radar kısmı (sinyal vericisi). Deniz fenerleri genel görünüşü itibariyle bacalara benzemekle birlikte taşıyıcı sistemlerindeki en önemli fark duvarların içinde bulunan ve taşıyıcı özelliği olan merdivenlerdir (Beyazoğlu, 2006).

1.3. Minareler

Minare, “camilere bitişik ya da ayrı yapılan, ezan okumak ve sesi çevreye yayabilmek amacıyla bir ya da birkaç balkonu (şerefesi) bulunan kule tipi yüksek yapı” olarak tanımlanmaktadır (Tuluk vd., 2006).

Minareler taşıyıcı sistem özellikleri bakımından diğer yapı türlerinden oldukça farklı bir davranış sergilerler. Minarelerin yüksek ve narin yapıda olmalarından dolayı deprem ve rüzgâr gibi doğal yükler karşısında olağan dışı davranışlar sergilerler. Bu tür betonarme yapılar genellikle temelde ankastre olarak tasarlanırlar ve yapımlarında kayar kalıp tekniği kullanılır. Bununla beraber zati ağırlıklar, rüzgar, deprem gibi etkiler yapının dizayn boyutlarını belirleyen önemli faktörlerdir (Nuhoğlu ve Şahin, 2005).

Son derece önemli bir cami geleneğinin oluşumuna ev sahipliği yapmış ve önemli bir kültürel miras birikimine sahip olan Anadolu, günümüzde bu mirası inkar edecek nitelikte bir cami mimarisine sahne olmaktadır. Bu camilerin simgesel ve işlevsel ayrılmaz

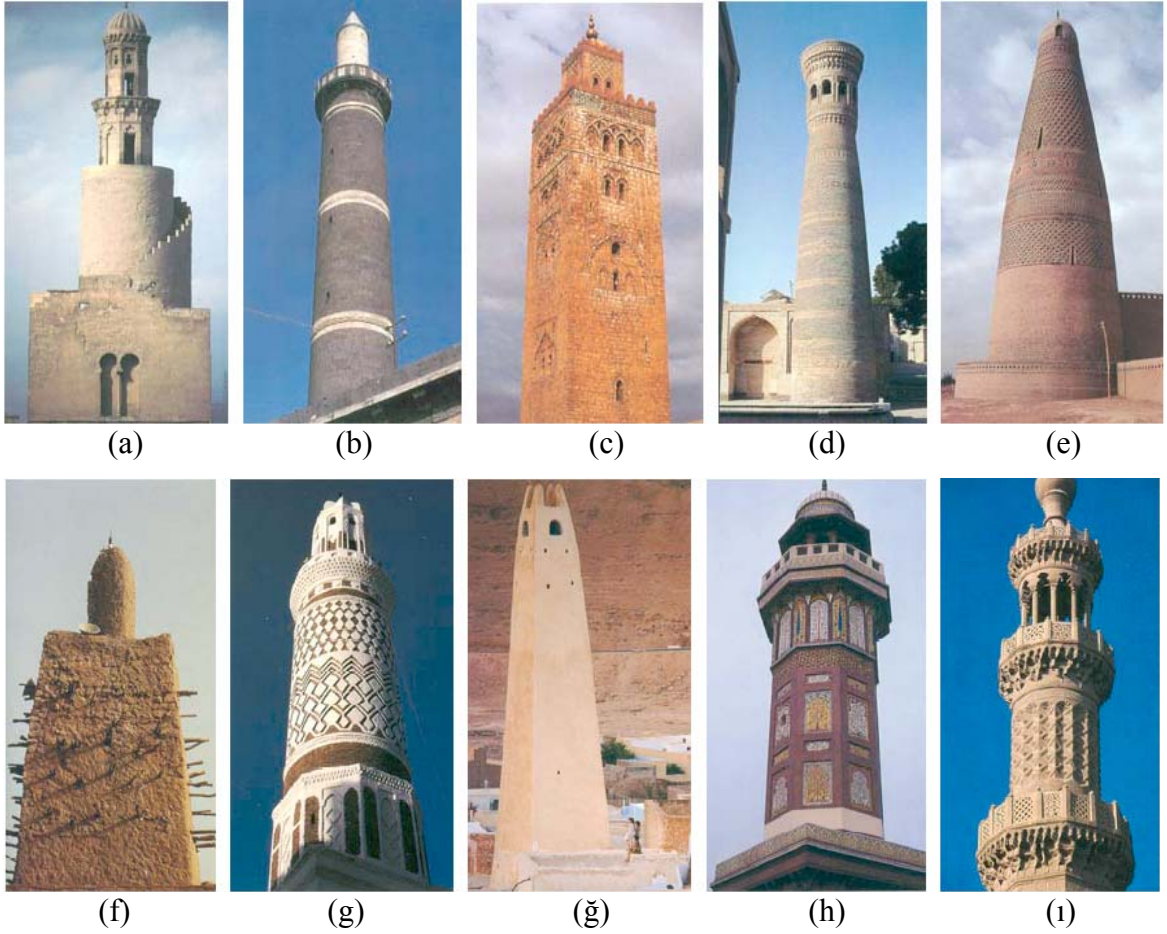
parçalarından olan minareler ölçü, oran, denge, biçim, bezeme gibi genel tasarım öğeleri bağlamında gösterdikleri yetersizlikler yanında, gelişmiş malzeme ve yapım teknolojisine rağmen rüzgar ve deprem gibi doğal dış etkilere karşı dayanıksızlıklarıyla da dikkati çekmektedirler. Diğer taraftan, yapılan literatür taramasından, depremden hemen sonra acilen hazırlanan Diyanet İşleri Başkanlığı'nın "Minarelerin Yapımında Uygulanacak Esaslar" talimatı dışında doğrudan minarelerin hesap ve tasarımı için hazırlanmış herhangi bir standart ya da yönetmeliğin bulunmadığı anlaşılmaktadır (Doğangün vd., 2006).

Mimarlık tarihinde, minarelerin uygulandıkları bütün coğrafyalarda rüzgar gibi doğal etkilere karşı dayanımlarının sağlanabilmesi için özel önlemler alınarak tasarlanmışlardır. Bu coğrafyalar arasında Anadolu, İslam toplumlarıyla tanıştığı 11. yy.dan itibaren köklü bir cami geleneğinin oluşumuna tanıklık etmiştir. Özellikle 16. yy., Mimar Sinan'la birlikte gerek mekan organizasyonu, biçim arayışları, kitle kuruluşları gerekse de yapım teknikleri açısından bu geleneğin doruk noktaya ulaştırıldığı dönem olmuştur. Bu dönemde cami mimarisinin simgesel ve işlevsel ayrılmaz parçalarından birisi olan minareler de genel cami anlayışındaki bu ileri gelişmişlik düzeyinden payına düşeni almış, ölçü, oran, denge, biçim, bezeme gibi genel tasarım öğeleri bağlamında gösterdikleri yetkinlik yanında yapım teknikleri açısından da dönemin gelişmiş teknolojisini tekrarlamışlardır. Bunun yanında Osmanlı mimarlarının ve özellikle Mimar Sinan'ın bu tür yapıları inşa ederken coğrafyanın deprem bölgesi olup olmadığına bağlı olarak gerektiğinde ek konstrüktif önlemler aldığı dikkati çekmektedir. Erzurum Lala Mustafa Paşa camisinde olduğu gibi özellikle camilerin en kritik mimari elemanları diyebileceğimiz minarelerin cami ana kitleleriyle bağlantılarında, boyutlandırılmalarında özel çözümlere gidildiği bilinmektedir (Tuluk, 1999).

İlk minarenin yapıldığı tarihten günümüze kadar, dünyanın değişik bölgelerinde, farklı malzeme ve yapısal sisteme sahip çok sayıda görkemli minare inşa edilmiştir. Dünyanın değişik bölgelerinde yapılmış tarihi minarelerden bazıları Şekil 1.2'de görülmektedir. Günümüzde ise cami mimarisi, artan malzeme seçeneğine ve gelişmiş yapım teknolojilerine rağmen 16. yy. Osmanlı cami geleneğini taklitten öteye geçememiştir. 16. yy.da taş malzemeyle yığma tekniğinde yapılan camiler 20. yy.da beton malzemeyle betonarme tekniğiyle aynı biçim dilini tekrarlayanın ötesinde oran, denge, uyum gibi genel tasarım öğelerinden yoksun olarak da çoğunlukla mimar olmayan kişilerin elinde plansız olarak çıkmaktadır. Çoğunlukla bir inşaat ustasının el yordamıyla inşa ettiği bu

yapılar önemli strüktürel sistemler içermelerine rağmen mühendisler tarafından herhangi bir statik hesaplama da tabi tutulmamaktadır (Tuluk vd., 2006).

Son zamanlarda haberlere konu olan şiddetli rüzgarlarla devrilen minareler tüm bunları doğrular niteliktedir. Yıkılanların önemli bir kısmının nispeten son zamanlarda inşa edilen betonarme minareler oldukları da gözden kaçmamaktadır. Bunun yanında bir deprem coğrafyası olan ülkemizde son yıllarda meydana gelen depremler de genelde tüm yapılarda gözlenen konstrüktif bozukluklara bağlı hasar ve yıkılmaların, zaten kritik bir biçimlenme gösteren minarelerde de yoğun olarak yaşandığını göstermektedir.

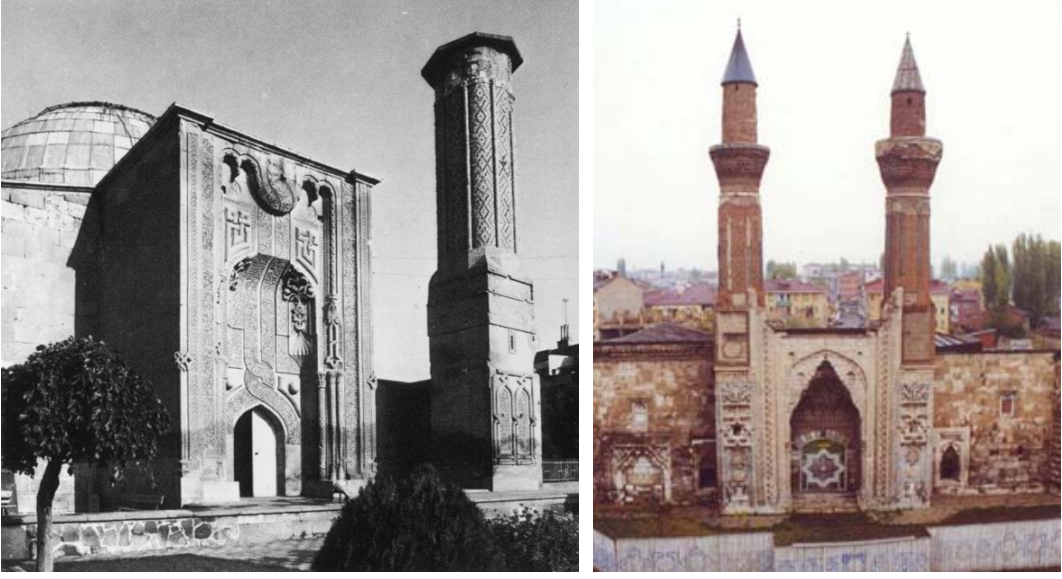


Şekil 1.2. Bazı Minare Örnekleri: (a) Cairo, Ahmad ibn Tulun Cami (Tulunid Devri, 876-9), (b) Diyarbakir, Türkiye, Ayni Cami (Osmanlı Devri, c. 1489), (c). Marrakesh, Morocco, Kutubiyya Cami (Almohad Devri, 12. yüzyıl), (d). Bukhara, Uzbekistan, Kalyan Cami (1514), (e). Turfan, Xinjiang Şehri, Kuzey Çin, Amin Cami, (1778), (f). Timbukte, Mali, DjinguereBer Cami (Songhay Devri, 14. yüzyıl), (g). San'a Yemen, Al-Bakiriyya Cami (Osmanlı Devri, 1598), (ğ). Beni-Isguen, Algeria, Mzab Saharan Köyü Cami, (h). Lahore, Pakistan, Wazir Khan Cami (Mughal Devri, 1634), (ı). Cairo, Amir Qurqumas Cami (Memlük zamanı sonrası, 1506). (Doğangün vd, 2006).

1.3.1. Minarelerin Kısa Tarihi

İslam'ın ilk yıllarında, Hz. Muhammed zamanında ezanın çevredeki bir yapının çatısına çıkılarak ya da yükseltilmiş bir platformdan, daha sonra ise mescitlerin önünde ya da çatısına çıkılarak okunduğu bilinmektedir. İslamiyet'ten önce gözetleme ya da işaret verme amaçlı kullanılan ve "manara" ya da "minar" olarak anılan kuleler, İslamiyet'le birlikte yanına cami eklenerek, bugünkü anlamda minareye dönüştürülmüştür (Ödekan, 1997). Dört halife devrinde minare yapıldığına dair herhangi bir kanıt olmamakla birlikte İslam mimarisinde ilk minarenin Emevi valisi I. Muaviye zamanında Mısır Valisi Mesleme tarafından Kahire'deki Amr Camiinde (642) yaptırıldığı bilinmektedir (Tuluk vd., 2006).

İran ve Orta Asya'da medrese, mescit ve türbe gibi mimari yapılardan oluşan külliyelerin elemanları haline gelen minareler, Mezopotamya'da ilk Abbasi camileriyle birlikte Ziguratların benzeri silindirik kulelere dönüşmüşlerdir (Ülgen 1996). Silindirik, köşeli ve yivli gövdeli Türkistan ve Horasan minareleri ise Karahanlılar'ın İslamiyet'i kabulüyle birlikte Türk minarelerinin öncüsü olarak kabul edilmektedir. Türkler Karahanlılarla birlikte değişik bölgelerde, farklı malzemelerle birçok minare biçimi denemişlerdir. Selçukluların İran'da yaptıkları tuğla minareler, Anadolu'da yerini taş minarelere bırakmıştır (Şekil 1.3). Biçim olarak da İran'da yukarı doğru hafifçe daralan silindirik gövdeli, gövdeleri baklava ve yıldız motifleriyle geometrik motifli kompozisyonlardan oluşan tuğla minareler göze batarken, Anadolu'da silindirik ve basık bir gövdeye sahip çoğu kez yapıya bitişik olarak, medreselerde ise taş portalin üzerinden yükselen minareler ön plana çıkmaktadır (Ülgen, 2006).



Şekil 1.3. Selçuklu dönemi anıtlarında minare uygulamaları: Konya İnce Minareli ve Sivas Gök Medrese (Tuluk vd., 2006)

Erken Osmanlı Döneminde minarelerin yerinin, sayısının ve biçiminin kesinleşmediği, ancak Klasik Dönemde belirli bir standarda kavuşacak minare uygulamalarının bu dönemde denendiği söylenebilir. Klasik Dönem ise minare uygulamasının belli bir üsluba kavuştuğu, yapının boyutlarına, yapıldığı yere, yaptıran kişinin statüsüne göre yerinin, sayısının ve biçiminin kesinleştiği dönem olmuştur (Tuluk vd., 2006).

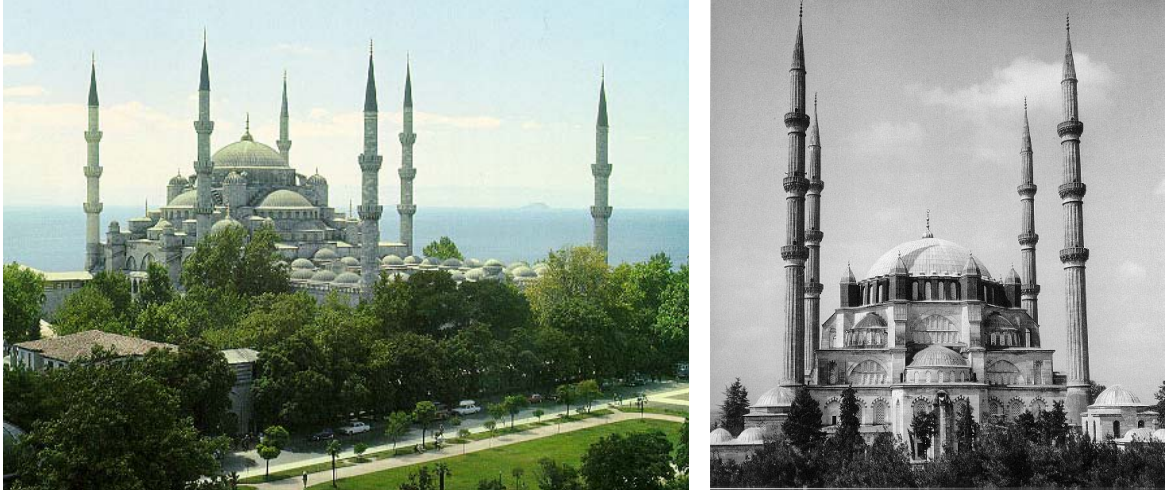
Farklı kültür ortamlarında konum ve biçimleniş açısından çeşitlenebilen minareler en olgun biçimini Klasik Devir Osmanlı Camilerinde bulmuştur. Camiye bitişik yada ayrı olabilen minareler, malzeme olarak taş, tuğla ya da ahşap, biçim olarak ise; kübik, silindirik ya da çokgen olabilirler. Minareler camilerin yanı sıra medrese ve türbelerin de önemli öğelerinden birisi olmuşlardır (Tuluk vd., 2006). Klasik Devir Osmanlı Minareleri de biçimsellik açısından değişiklik gösterir. Eyice bu değişikliklere göre İstanbul'daki Osmanlı minarelerinin üç ayrı devirde gruplandırmıştır. Mimar Sinan devrine kadar, Mimar Sinan'dan Lale devrine kadar ve Lale devrinden Cumhuriyet devrine kadar (Eyice, 1963).

(1) Mimar Sinan'dan önce inşa edilen minareler: Bu devir minarelerinin gövdeleri kalın, kürsüleri sadedir. Minarelerin küp bölümleri geçiş baklavaları ile kendini belirler. Beyazıt, Murat Paşa, Koca Mustafa Paşa, Firuzağa, Atik Ali Paşa Cami minareleri bu devir minarelerine örnek gösterilebilir.



Şekil 1.4. Mimar Sinan'dan önce minare uygulamaları: Beyazıt ve Firuzağa Cami (Ertek ve Fahjan, 2007)

(2) Mimar Sinan'dan Lale devrine kadar inşa edilen minareler: XVI. yy. ilk yarısından Mimar Sinan ile başlayan bu devir, Mimar Davut, Mimar Ahmet, Mimar Mehmet Ağa ile devam etmiştir. Bu devir mimarları üslubu daha da geliştirerek minareleri önceki devirlere göre daha da inceltmişlerdir. Bu devirde inşa edilen minarelerin ortak özelliği cami ile bir kompozisyon oluşturmalarıdır. Süleymaniye, Sultanahmet, Şehzade, Selimiye, Yeni, Ahmet Paşa, Sinan Paşa, Rüstem Paşa, Kılıç Ali Paşa, Şemsi Paşa cami minareleri bu devir minarelerine örnek gösterilebilir.



Şekil 1.5. Mimar Sinan'dan Lale devrine kadar minare uygulamaları: İstanbul Sultanahmed ve Edirne Selimiye Camileri (Doğangün vd, 2006)

(3) Lale devrinden Cumhuriyet devrine kadar inşa edilen minareler: Bu devir minareleri batı üslubunun etkisiyle oldukça ince ve bol süslemeli olarak inşa edilmişlerdir.

Minare kp kısmı krevi bir Şekil almıştır. Nusretiye, Yıldız, Nur-u Osmaniye, Ayazma, Laleli, Beylerbeyi, DolmabahŐe, Valide Sultan Cami minareleri bu devir minarelerine örnek verilebilir.



Şekil 1.6. Lale devrinden cumhuriyet dönemine kadar minare uygulamaları: Yıldız ve Nur-u Osmaniye Camileri (Ertek ve Fahjan, 2007)

Ülkemizde inşa edilen ve modern mimariye ait cami minareleri Osmanlı dönemi minarelerine oldukÇa benzeyen çoğunlukla betonarmeden inşa edilen minareleridir. Gelişmiş malzeme ve teknolojik imkanlara paralel olarak oldukÇa yüksek minareler yapılmaya baŐlanmıŐtır. Adana ilinde inşa edilen ve 99 m yüksekliğindeki VAKSA cami minareleri ülkemizde inşa edilen en yüksek betonarme minareler olup günümüz modern cami minarelerine örnek verilebilir.

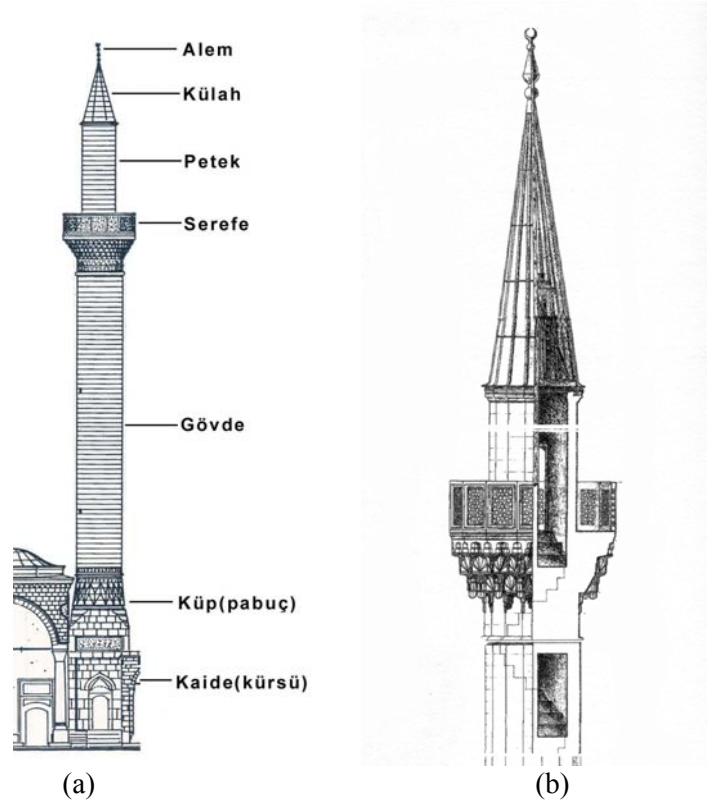


Şekil 1.7. Modern mimariye ait minareler: Sabancı Cami (Sezen vd, 2008)

1.3.2. Minare Bölümleri

Dünyanın değişik bölgelerinde, yöredeki mevcut malzemeye, yapıldığı yıldaki teknolojiye, kültür ve sanat birikimlerine bağlı olarak farklı özelliklere sahip minareler inşa edilmiştir. Kuzey Afrika ve İspanya'dan Suriye'ye kadar yayılan bölgede çoğunlukla kornişlerle katlara ayrılmış dört köşe minareler, daha doğuda ise silindirik minareler dikkati çekmektedir (Ülgen, 1996). Kullanılan malzeme ve seçilen geometri, minarenin taşıyıcı sisteminin belirlenmesinde başlıca rol oynamaktadır.

Osmanlı Klasik Dönemindeki biçimlenişiyle minareler alttan yukarıya; *kaide* (*kürsü*), *geçiş elemanı* (*pabuç*, *küp*), *gövde*, *şerefe*, *petek*, *külâh* ve *alem* bölümlerinden oluşmaktadır (Şekil 1.8). İç kısmında şerefelere ulaşımı sağlayan bir merdivenin de yer aldığı minareler, günümüzde benzer kısımlarla betonarme olarak da inşa edilmektedir (Doğangün vd., 2006).



Şekil 1.8. Tipik Minare Bölümlenmesi (Tuluk vd., 2006)

(1) Temel: Zemin içerisinde kalan ve kürsünün ankastre bağlandığı, üst yapıdan gelen etkileri zemine aktaran minare ögesidir. Cami temeline bitişik veya münferit radye olarak inşa edilir. Zeminin uygun olması durumunda radye temelin dışında ayaklı depolardakine benzer şekilde dairesel sürekli temel sistemi de kullanılabilir (Doğangün vd., 2006).

(2) Kaide (kürsü): Minarenin cami ana kitlesiyle bağlantısının kurulduğu, gövdeden gelen kesit etkilerini temele ileten, prizmatik biçimli en alt bölümüdür. Minarenin giriş kapısı genellikle burada yer almaktadır. Genelde kare kesitli geometriye sahip kaideler, çokgen ve dairesel olarak ta tasarlanmıştır.

(3) Geçiş elemanı (Pabuç, Küp): Minarenin bu ögesi, boyutları ve geometrisi birbirinden farklı olan kaide ve gövde arasında, akıcı ve kesintisiz bir geçişi sağlamak amacıyla yapılmaktadır. Dolayısıyla bunların geometrik şekilleri, kaidenin ve gövdenin şekline göre farklılık göstermektedir (Tuluk vd., 2006).

(4) Gövde: Minarenin yükselen ana bölümüdür. Kare, çokgen ve silindirik formda, yükseldikçe daralan ve yükseklik boyunca sabit kesitli olan minare gövdeleri bulunmaktadır. Selçuklular döneminde yükseldikçe kesiti küçülen minareler görülse de, daha sonraları çoğunlukla yükseldikçe daralmayan gövdeler tercih edilmiştir.

(5) Şerefe: Daha önceleri müezzinin yüksekten ezan okuyabilmesi amacıyla yapılan, küçük balkon şeklindeki minare ögesidir. Günümüzde ise ezanlar genellikle merkezi sistemle hoparlör kullanılarak okunduğundan bu öğelerin daha çok estetik yönü ön plana çıkmaktadır.

(6) Petek: Son şerefe ile külah arasında kalan minare ögesidir. Bu kısım genellikle gövdeye benzer özellikler göstermekle birlikte, merdivenin en üst şerefede bitmesinden dolayı sadece dış duvardan oluşmaktadır.

(7) Külah: Gövdeyi örten koni biçimindeki minarenin bu ögesi, önceleri ahşap iskeletli ve kurşun kaplı çatı olarak düşünülmüştür. Dolayısıyla bu tür çatıların kullanıldığı minarelerde külah, taşıyıcı sistem olarak petekten farklı taşıyıcılık özelliklerine sahiptir. Ancak günümüzde inşa edilen betonarme minarelerde bu kısım peteğin devamı şeklinde, yine betonarme olarak inşa edilmektedir. Dolayısıyla petekle ayrı değil birlikte, taşıyıcı sistemin bir parçası olmaktadır (Doğangün vd., 2006).

(8) Merdiven: Minareye çıkabilmek amacıyla iç kısımda inşa edilen minare elemanıdır. Minare malzemesine bağlı olarak ahşap, çelik, yığma ya da betonarmeden inşa edilebilir. Merdivenin kendi taşıyıcı sistemi ve basamakların gövdeye bağlantı şekli,

minarenin dış yüklere karşı genel performansını doğrudan etkilemektedir (Doğangün vd., 2006).

(9) Alem: Minarenin sembolik içerikli ve genellikle metalden yapılmış bitiş elemanıdır.

1.3.3. Minarelerde Taşıyıcı Sistem

Minareler genellikle yüksek ve narin yapılar olduklarından, rüzgar ve deprem yükleri bu yapıların taşıyıcı sisteminin belirlenmesinde ağırlık yüklerinden daha etkili olmaktadır. Ülkemizde sadece minareler için değil diğer kule türü yapıların taşıyıcı sistemine, hesap ve tasarımlarına ve bunlarda uygulanması gereken detay bilgilerine ilişkin bir standart ya da yönetmelik bulunmamaktadır. Oysa, kule türü yapıların taşıyıcı sistemlerinin hesap ve tasarımında, bu yapıların yükseklikleri ve narinliklerine bağlı olarak bazı özel tasarım ve yapım problemleri ortaya çıkmaktadır. Rüzgar yüklerinin belirlenmesi için TS 498, depreme göre hesap için ise kısmen “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” dışında ülke mimar-mühendis ve diğer teknik elemanlara hem hesaplarda hem de uygulamada yardımcı olacak herhangi bir dokümana literatürde rastlanmamıştır (Doğangün vd., 2006).

Dış etkilere maruz minare duvarlarında zamanla çatlaklar ve deformasyonlar meydana gelebilir. Bu etkiler karşısında malzeme zamanla dayanım kaybına uğrayabilir ve kesitte azalmalar meydana gelebilir. Ancak merdivenler böyle bir etkiye maruz kalmadığından da zaman içerisinde deformasyonlar ve dayanım kayıpları minimum olmaktadır. Ayrıca minarelerin deprem davranışlarına önemli katkıları olan merdivenler önemli taşıyıcı sistem elemanlarıdır.

1.3.3.1. Yığma Minarelerin Taşıyıcı Sistemi

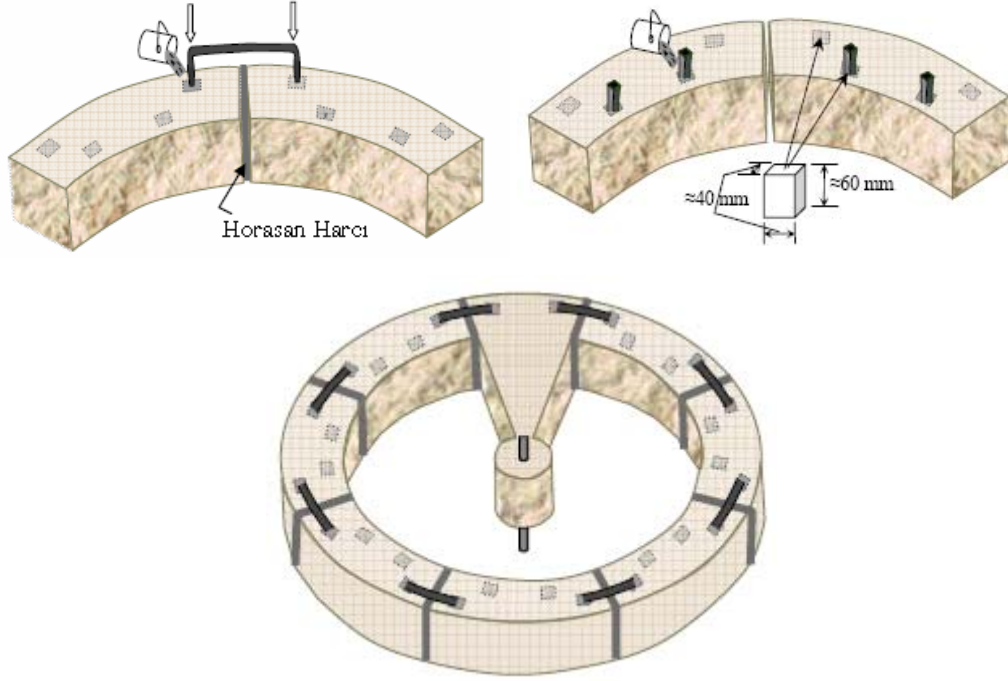
Yığma yapılarda kullanılan harç dayanımının düşük olması deprem bölgelerinde inşa edilen minare gibi kule türü yapılarda temel problemdir. Osmanlı bu sorunu, 16 yy. başlarında, 1509 meydana gelen yıkıcı depremden sonra, çözmüştür (Oğuzmert, 2002). Osmanlı minarelerinde uygulanan bu özel sistem de Şekil 1.9’da gösterildiği gibi taş bloklarının yatay ve düşey bağlantıları demir çubuklar sağlanmaktadır. Bu başarılı

birleştirme tekniğiyle iyi bir yapısal sistem oluşturulmaktadır. Bunun en iyi göstergesi yüzyıllar önce yapılan birçok minarenin deprem ve fırtına gibi birçok doğal afete rağmen hala ayakta kalmasıdır.

Yığma minarelerde kullanılan her bir taş taşıyıcıdır. Aynı hizadaki taşların oluşturduğu taş dizisine kur denir. Bir kur basamak ve çevresindeki dış duvardan oluşur. Aynı kurdaki taşlar birbirine kenet denilen demir ankrajlarla, alt ve üst kurdaki taşlara zıvanalarla bağlanır. Kurlar üst üste gelirken araya 1-2 mm yastık harcı konur. İki merdiven taşı horasan harcı ile oluşturulan geniş basamak yüzeyinin büyük kısmı üstteki basamağın altında kalır (Uluengin vd., 2001).

Eski minarelerde taşların birleştirilmesinde bağlayıcı malzeme olarak aynı zamanda “horasan harcı” adı ile bilinen bir harç çeşidi de kullanmıştır. Horasan harcının yapımında kullanılan kirecin, eritilip süzöldükten sonra, mayalanıp sağlamlaşması için 10-15 yıl toprak altında bekletildikten sonra kullanıldığı belirtilmektedir. Bu da minarelere verilen önemin derecesi hakkında günümüz insanına önemli ipuçları vermektedir (Tuluk vd., 2006).

Minarelerde döner merdivenler, minare boşluğunda zeminden başlayıp yukarı çıkmaya uygun kama formuna benzer yontulmuş tek parçalı taşların, üst üste binecek şekilde yerleştirilmesiyle inşa edilmişlerdir. Her basamak, çekirdek ortalarında açılmış içi kurşun dolu oyuklara yerleştirilen, dikdörtgen kesitli demir bir çubukla birbirine bağlanmaktadır (Tuluk vd., 2006).



Şekil 1.9. Yığma minarelerde kullanılan taş blok, kenet ve zıvanaların kullanımı (Doğangün vd., 2006)

1.3.3.2. Betonarme Minarelerin Taşıyıcı Sistemi

Betonarme minareler için Diyanet İşleri Başkanlığı ya da başka bir kurum tarafından ayrıntılı bir şekilde hazırlanmış herhangi bir belge ve detaya ulaşılamamıştır. Dolayısıyla standartlaşmış bir betonarme minare uygulamasından söz etmek mümkün değildir. Bu durumda minareler genelde usta marifetiyle inşa edildiğinden, ustalar daha önceden öğrendikleri ya da kendilerinin geliştirdikleri inşa tekniklerini ve detayları minarelerde uygulamaktadırlar.

Betonarmenin genel üstünlükleri yanında minare türü kule yapılarda özel bir sorun olan temele ankraj, bu yapı malzemesiyle nispeten daha kolay sağlanmaktadır. Minare temeli, işçiliği daha kolay olduğundan genellikle radye temel olarak seçilmektedir. Minareler için zeminin uygun olması durumunda radye temelin dışında, ayaklı depolardakine benzer şekilde dairesel sürekli temel sistemi de kullanılabilir. Temelin üstüne genellikle çokgen kesite sahip kaide kısmı inşa edilmektedir.

Çokgendeki yüz sayısı, genelde ustanın elinde bulundurduğu kalıba göre değişmektedir. Kaideden gövdeye geçişi sağlayan geçiş elemanı, betonarme minarede

taşıyıcı sistem için son derece kritik bir eleman niteliğindedir. Çünkü bu eleman aracılığı ile kesit değişimi gerçekleşmekte ve kaideden gelen donatıların bir kısmı bu eleman içinden gövdeye uzatılmaktadır. Bu nedenle de minarenin emniyeti açısından geçiş elemanı, en kritik eleman olarak ortaya çıkmaktadır. Betonarme minarelerde silindirik gövdeler kayar kalıp kullanılarak nispeten daha kolay bir şekilde inşa edilebilmektedirler. Ancak, gövde inşaatında da şerefelere ve merdivene yapılacak bağlantılarda kullanılacak donatıların seçilmesi yine ustalık marifeti gerektirmektedir. Çünkü bırakılacak bu bağlantı demirlerinin detayları ve mesnetlenme şekilleri, kendinden beklenen görevi yerine getirebilmesi için son derece önemlidir.

Betonarme minarelerde şerefelere ulaşımı sağlayan merdivenler, tıpkı yığma minarelerde olduğu gibi genel taşıyıcı sistemin bir parçası olduğundan minarelerin ayakta kalabilmeleri için son derece önemli bir işleve sahiptirler.

1.4. Minareler ile Diğer Kule Türü Yapılar Arasındaki Yapısal Farklar

Yapılan literatür taramasında minarelerin dinamik davranışını ortaya koyan çalışmaların yok denecek kadar az olması minarelerin, kule tipi yapılarından, sanayi bacalarına benzer davranış göstereceği düşüncesi de minarelerin bu denli ihmal edilmesinin sebeplerinden biridir. Bu düşüncenin temeli, her iki yapının dış kabuğa sahip, kütleleri yükseklikleri boyunca yayılı, yüksek narin yapılar olmasıdır. Yapılan çalışmalarda minarelerin taşıyıcısının sadece dış kabuktan oluşmadığı, merdivenlerinde taşıyıcı sistemin önemli bir elemanı olduğu görülmüştür. Ayrıca minarelerin dış kabuk yapısından dolayı, dış kabuk elemanları olan kaide, geçiş ve şerife gibi öğeler, deprem davranışı olarak bacalarınkinden farklı olduğu görülmüştür. Minarelerde kullanılan malzeme çeşitliliği, narinliklerinin farklı olması, kullanılış amacı, halkın yoğun olarak yaşadığı bölgelerde inşa edilmesi gibi özellikler de minareleri diğer kule türü yapılarından ayrı dikkate alınmasının sebepleri arasında gösterilebilir.

İçi boş olan bacaların kesiti aşağıdan yukarıya doğru azalarak süreklilik gösterir. Minarelerde ise kaideden sonra geçiş bölgesinde yapı süreksizliğe uğrayarak gövde bölgesine geçer. Geçiş bölgesinden sonra minare kesiti, genellikle değişmeden üst şerfeye veya külah altına kadar sabit olarak devam eder. Minarelerde bulunan merdivenler de taşıyıcı sistemin bir parçasıdır. Merdiven, minarenin özellikle dinamik yüklere karşı rijitliğine ve sünekliğine önemli derecede katkıda bulunmaktadır. Bunun yanın da

minarede bulunan şerefeler kısmide olsa kütleinin toplandığı bölgelerdir. Kapı boşluklarının da minarenin dinamik davranışına etki ettiği görülmüştür.

Minareler kule türü yapılar grubunda olduğundan, diğer kule türü yapılar gibi dinamik yüklere karşı hassas yapılardır. Kule türü yapıların analiz yöntemleri ve hesap esasları minareler için de geçerlidir. Minarelere en yakın davranışı gösteren bacalar ile ilgili yapılan çalışmaları minareler için yol gösterici çalışmalar olarak dikkate alınabilir. Çeşitli ülkelerin, bacalar için hazırlamış olduğu standart ve yönetmelikleri minareler için tamamen kabul etmek yanlış olacaktır. Ancak minareler için bir standardın geliştirilmesi için örnek olarak kabul edilebilir.

1.5. Minareler ve Depremler

Deprem veya rüzgar esnasında yıkılan minareler bir çok can ve mal kaybına yol açmasına rağmen modern ve tarihi Türk minarelerin performansları hakkında çok az sayıda çalışma mevcuttur (Oğuzmert, 2002; Nuhoglu ve Şahin, 2005; Doğangün vd., 2006). Minarelerin, yaşanmış depremlerde nasıl bir performans gösterdikleri, hasarların hangi bölgelerde ve nasıl oluştuğu bilgilerine yeterince sahip değiliz. Bunun nedeni, tarihi dokümanlarda ve son yıllarda yaşanan depremlerde hazırlanan raporlarda, bu yapıların hasar durumları hakkında ya hiçbir bilginin yer almaması veya çok az bilginin yer almasıdır. Örneğin 3 Temmuz 1709 İzmir de hazırlanan raporda, “Sultan Mehmet Camii minaresi şerefenin üstünden yıkılarak kubbenin üstüne düşmüş ve kubbeye büyük hasar vermiştir” (Ambraseys ve Finkel, 1993).

Türkiye, topraklarının %90'dan fazlası deprem bölgesi olan, dünyadaki aktif deprem bölgelerinden birsidir. 20. yy da 57 yıkıcı deprem meydana geldiği ve bu depremlerde yaklaşık 90,000 can kaybı ve mal kaybı olduğu bilinmektedir. Bu depremlerde çok sayıda minare hasar görmüş veya yıkılmıştır. 1999 depremlerinden sonra bazı çalışmalar yapılmış ve minare hasarlarını gösteren bazı resimler yayınlanmıştır (JSCE 1999, Bilham 1999, PU 2000, Motosaka and Somer 2002 Sezen vd. 2003). Sezen vd., (2003), 1999 Kocaeli ($M_w7.4$) ve Düzce ($M_w7.2$) depremlerinde 64 yığma ve betonarme minarenin hasar gördüğünü kaydetmiştir. Bu iki yıkıcı deprem sonrasında, sadece Düzce ilinde 115 minarenin yıkıldığı rapor edilmiştir (Düzcedamla, 2006).

Yıkılan minareler insan hayatı, camiler ve çevredeki yapılar üzerinde tehlike teşkil etmektedir. 12 Mart 1992 Erzincan depreminde ($M_w6.8$) yığma bir minarenin yıkılarak

camii çatısına düşmüştür. Camin çatısının çökmesi, 30 kişinin hayatını kaybetmesine sebep olmuştur (Karaesmen vd., 2002). Aynı kazalar 12 Kasım 1999 Düzce depreminde de meydana gelmiştir (Doğangün vd., 2007)

Tablo 1.1 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinde, farklı illerde meydana gelen minare hasarlarını özetlemektedir. Yığma minareler Tip I, betonarme minareler Tip II olarak isimlendirilmiştir. Depremden sonra yapılan gözlemlerde, minarelere hasarlarının, genellikle geçiş bölgesinin hemen üstünde olduğu görülmüştür.

Tablo 1.1. 1999 depremlerinden sonra minare hasarları (Sezen vd., 2003; Fırat, 1999)

İsim	Şehir	Bulunduğu yer veya koordinat	Tip	Hasar durumu
Kubbeli	Yalova	İstiklal Cad.	I	Geçiş bölgesinin hemen üzerinden yıkılmıştır
Hacı Hayriye	Yalova	Altinkuyu Cad.	I	Geçiş bölgesinin 7 m üzerinden yıkılmıştır
Hacı Saffet	Yalova	Bağlaraltı Cad.	I	Geçiş bölgesinin hemen üzerinden yıkılmıştır
Bilali Habeşi	Yalova	İstanbul Cad.	I	Geçiş bölgesinin hemen üzerinden yıkılmıştır
Bahçelievler	Yalova	Fatih Cad.	I	Geçiş bölgesinin hemen üzerinden yıkılmıştır
Emir Bayir	Yalova	Fatih Cad.	I	Geçiş bölgesinin hemen üzerinden yıkılmıştır
Kuşkonmaz	İstanbul	Üsküdar	I	Üstte yakın bölge hasar görmüştür
Sinan Pasa	İstanbul	Beşiktaş	I	Üstte yakın bölge yıkılmıştır.
Mihrimah Sultan	İstanbul	Edirnekapı	I	Cami hasar görmüş,minare hasar görmemiştir
Fatih	İstanbul	Fatih	I	Cami hasar görmüş,minare hasar görmemiştir
Hırka-i Şerif	İstanbul	Fatih	I	Külâh kısmı eğilmiştir
İskender Pasa	İstanbul	Fatih	I	Külâh kısmı düşmüştür
Aziziye Merkez	Düzce	40.50N-31.08E	I	Geçiş bölgesinin hemen üzerinden yıkılmıştır
Cedidiye Merkez	Düzce	40.50N-31.09E	I	Geçiş bölgesinin hemen üzerinden yıkılmıştır
Öksüztekke	Bolu	40.44.488N-31.35.851E	I	İkinci şerefenden yukarısı yıkılmıştır
Şemsi Ahmet Paşa (İmaret)	Bolu	40.43.852N-31.36.635E	I	Geçiş bölgesinin hemen üzerinden yıkılmıştır
Saraçhane	Bolu	40.43.935N-31.36.513E	I	Cami hasar görmüş,minare hasar görmemiştir
Yıldırım Bayezid	Bolu	40.44.040N-31.36.576E	I	Cami hasar görmüş,minare hasar görmemiştir
Kadı	Bolu	40.43.901N-31.36.495E	I	Cami hasar görmüş–minare yıkılmıştır
Merkez Yeni	İzmit	Değirmendere	I	Geçiş bölgesinin üstünden hasar görmüştür
Orta	İzmit	Kavaklı	I	Geçiş bölgesinin üstünden hasar görmüştür
Uzunçiftlik B. M.E.	İzmit	Acısu	I	Geçiş bölgesinin üstünden hasar görmüştür
Rumeli Palas	Düzce	40.50.877N-31.08.444E	II	Hasar görmemiştir
Uzun Mustafa Mrk.	Düzce	40.50.755N-31.08.736E	II	Yıkılmıştır
Burhaniye	Düzce	40.50N-31.09E	II	Gövdenin altında küçük çatlaklar oluşmuştur
Nusrettin	Düzce	40.50N-31.09E	II	Külâh kısmı düşmüştür
Karaca	Düzce	40.50.733N-31.09.950E	II	Gövdenin altından yıkılmıştır
Koçyazı köyü	Düzce	40.50.569N-31.10.249E	II	Gövdenin altından çatlamıştır (Ekim-99) Yıkılmıştır (Aralık-99)
Sıralı köyü	Düzce	40.49.246N-31.11.544E	II	Gövdenin altından hasar görmüş ve yıkılmıştır
Hamidiye	Düzce	40.50.838N-31.09.950E	II	Gövdenin altından çatlamıştır
Kültür Mahallesi	Düzce	40.50.623N-31.09.257E	II	Betonda dökülmeler olmuştur
Aydınpınar	Düzce	40.49.796N-31.09.190E	II	Gövdenin altından hasar görmüş ve yıkılmıştır
Yeşil	Düzce	40.49.966N-31.09.480E	II	Gövdenin altından hasar görmüş ve yıkılmıştır
Asar	Düzce	40.50.012N-31.09.650E	II	Gövdenin altından çatlamıştır
Amimilli Yeni	Düzce	40.49.897N-31.10.087E	II	Gövdenin altından 5m yukarıdan yıkılmıştır
Mimar Sinan Nur	Düzce	40.50.006N-31.10.236E	II	Gövdenin altından hasar görmüş ve yıkılmıştır
M. Fevzi Çakmak	Düzce	40.49.928N-31.10.525E	II	Gövdenin altından hasar görmüş ve yıkılmıştır
Huzur	Düzce	40.49.680N-31.11.324E	II	Hasar görülmemiştir

Doğanlı Köyü	Düzce	40.48.182N-31.14.190E	II	Hasar görülmemiştir
Üç Köprü Merkez	Düzce	40.47.662N-31.15.018E	II	Gövdenin altundan çatlamıştır
Cumhuriyet Mah.	Düzce	Düzce Şehir Merkezi	II	Gövdenin altundan hasar görmüş ve yıkılmıştır
Düzce Merkez	Düzce	Düzce Şehir Merkezi	II	Gövdenin altundan hasar görmüş ve yıkılmıştır
Aşağı Yuvacık	Düzce	Fay kırığından 30 m	II	Hasar görülmemiştir
Yeşiltepe	Kaynaşlı	40.46.690N-31.17.467E	II	Gövdenin altundan hasar görmüş ve yıkılmıştır
Karacaali	Kaynaşlı	40.46.496N-31.18.204E	II	Gövdenin altundan çatlamıştır
Dariyeri Hasanbeyi	Kaynaşlı	-	II	Hasar görülmemiştir
Sanayi	Bolu	40.44.280N-31.37.562E	II	Hasar görülmemiştir
Kültür	Bolu	40.44.507N-31.36.340E	II	Gövdenin altundan çatlamıştır
Ozayan	Bolu	40.44.638N-31.35.405E	II	Gövdenin altundan çatlamıştır
Paşaköy Eniştebey	Bolu	40.43.803N-31.34.689E	II	İki minaresinden biri gövde altundan çatlamıştır
Sümer	Bolu	40.43.575N-31.35.587E	II	Hasar görülmemiştir
Aslahaddin	Bolu	40.43.981N-31.36.732E	II	Hasar görülmemiştir
Kabaklar	Bolu	40.44.859N-31.36.111E	II	Hasar görülmemiştir
Yeşil	Bolu	40.44.170N-31.36.170E	II	Hasar görülmemiştir
Kavaklı	Adapazarı	40.46N-30.23E	II	Gövdenin altundan hasar görmüş ve yıkılmıştır
Yeni	Adapazarı	40.46N-30.24E	II	Gövdenin altundan çatlamıştır
Aziziye	Adapazarı	40.46N-30.34E	II	Gövdenin altundan hasar görmüş ve yıkılmıştır
Tozlu	Adapazarı	40.46N-30.34E	II	Gövdenin altundan hasar görmüş ve yıkılmıştır
Şerefiye	Adapazarı	Çark Caddesi	II	Gövdenin altundan hasar görmüş ve yıkılmıştır
Gölcükte yıkılan minare	Gölcük	Ford fabrika karşısı	II	Gövdenin altundan çatlamıştır
İzmit-1	İzmit	Eski Otoban Yolu Yanı	II	Yıkılmıştır
İzmit-2	İzmit	Otoban Yanı-TEM	II	Külâh kısmı düşmüştür
İzmit-3	İzmit	Şehir Merkezi	II	Gövdenin altundan çatlamıştır
Gölyaka	Gölyaka	Şehir Merkezi	II	Gövdenin altundan hasar görmüş ve yıkılmıştır

1.6. Minare Hasarlarının Sınıflandırılması

Minarelerde meydana gelen hasarları, yapı detayları, özellikleri ve bölümleri, zemin özellikleri, deprem büyüklüğü gibi birçok etkene bağlıdır. Meydana gelen son depremlerde yapılan gözlemlerde bu hasarların belirli birkaç bölgede olduğu görülmüştür (Sezen vd., 2008).

(1) Külâh bölgesinde meydana gelen hasarlar: Betonarme minarelerde külâh kısmı da gövde ile birlikte (monolithical) betonarmeden inşa edildiğinden betonarme minarelerde bu bölgede meydana gelmiş hasarla karşılaşılmasıdır. Ancak yığma minarelerde külâh, gövde ile aynı malzemedden veya farklı bir malzemedden inşa edilmektedir. Külâh kısmı farklı malzemen yapılan yığma minareler külâhlarının, çok az olsa da, hasar gördüğü veya düştüğü görülmüştür.



Şekil 1.10. 1999 depremlerinde külah kısmında meydana gelen hasar (SDR, 2005)

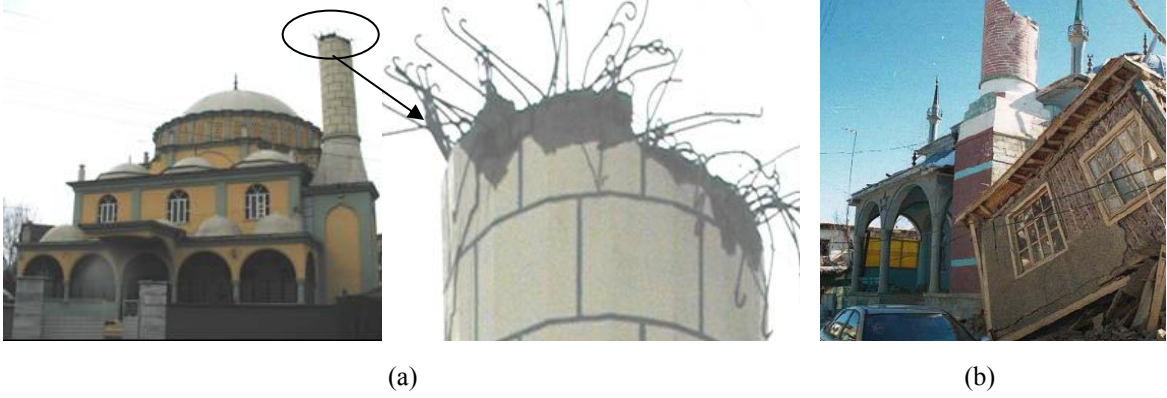
(2) Petek bölgesinde meydana gelen hasarlar: Betonarme minarelerde petek bölgesinde meydana gelen hasarlar görülmemiŐ ancak yığma minarelerde çok az da olsa meydana gelen hasar türüdür. Şekil 1.11’de hasar durumu, hasar yüzeyinin 45° ye yakın olması, hasarın kayma gerilmelerinden oluŐtuĐunu göstermektedir.



Şekil 1.11. Petek bölgesinde meydana gelen hasar (CIAI’S, 2006)

(3) Gövde bölgesinde meydana gelen hasarlar: Geçiş ile Şerefe arasında bulunan bu bölgede meydana gelen hasarlar pek sık karşılaşılan bir hasar türü değildir. Şekil 1.12a 1999 depreminde betonarme bir minarede, Şekil 1.12b 2002 Sultandağı depreminde yığma bir minarede meydana gelen hasar durumunu göstermektedir. Yığma minarenin hasar Şekli

yapının kayma gerilmeleri sonucunda hasar gördüğünü göstermektedir. Betonarme minarelerde gövde hasarları, şerefelerde kütle yığılmaları ve bu bölgede yapılan boyuna donatı bindirme boyunun yeterli ve dağılımının uygun olmamasından kaynaklanmaktadır. Şekil 1.12a’da donatı uçlarının 180° kanca yapıldığı görülmektedir.



Şekil 1.12. Gövde bölgesinde meydana gelen hasar ([a] Sezen vd., 2008, [b] Doğangün vd., 2007).

(4) Gövdenin altında meydana gelen hasarlar: Minare hasarlarının en yaygın olanı geçiş ile gövdenin birleştiği bölgede meydana gelen hasarlardır. Bu bölgeden yıkılan veya hasar gören minarelerin, hasarlı veya yıkılan minarelerin çoğunluğunu oluşturdukları rapor edilmiştir (Şekil 1.13 ve Şekil 1.14). Minarelerin bu bölgede hasar görmesi veya yıkılmasının iki temel sebebi vardır. Birincisi, yatay ve düşey kesit etkilerinin artmasına karşın kesitin ani küçülmesidir. İkincisi, Şekil 1.14’de görüldüğü gibi, betonarme minarelerde boyuna donatıların bu bölgede eklenmesidir. 1999 depremlerinden önce düz yüzeyli donatının kolay işlenmesi ve ucuz olması nedeniyle Türkiye’de çok yaygın olarak kullanılmaktaydı. Düz yüzeyli donatıda yeterli bindirme boyu nervürlü donatının bindirme boyundan fazla olması gerekir. Ancak meydana gelen hasarlar incelendiğinde buna dikkat edilmediği ve donatı uçlarının 180° kanca yapıldığı gözlenmiştir. Bu nedenlerden dolayı kesit taşıma gücüne ulaşmadan, donatı ile beton arasındaki aderasın kaybolması sonucu minare hasar görmektedir (Doğangün vd., 2007, Sezen vd., 2008).



(a) 600 yıllık Bolu İmaret camii



(b) 500 yıllık Bolu Kadı camii



(c) 27 Haziran 1998 Adana-Ceyhan depremi ($M_s=5.9$)



(d) 6 Haziran 2000 Çankırı-Orta depremi ($M_s=6.1$)



(e) 3 Şubat 2002 Sultandağı depremi ($M_w=6.5$)



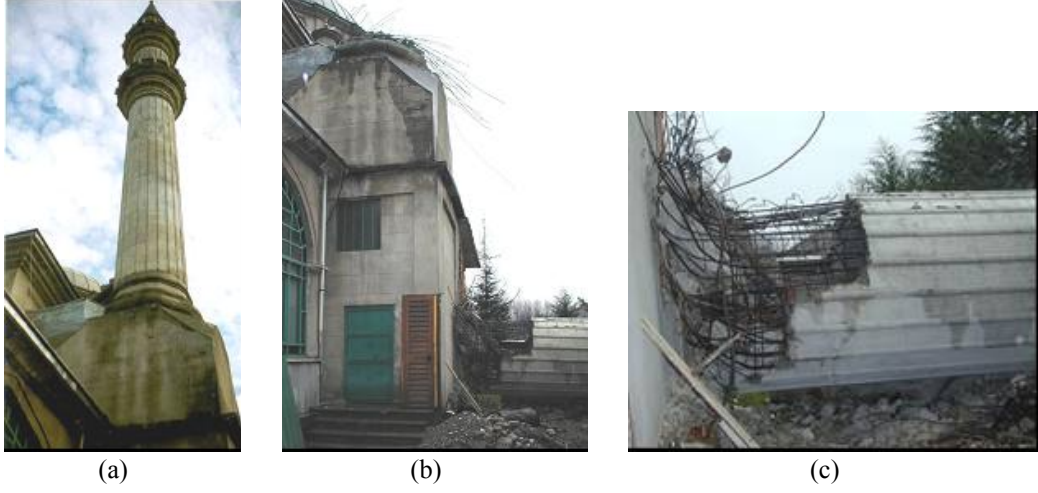
(f) 1 Mayıs 2003 Bingöl depremi ($M_w=6.4$)

Şekil 1.13. Yığma minarelerde gövdenin altında meydana gelen hasarlar ([a] Taşkın vd. 2003, [b] Wenk vd. 1998, [c] Ulusay vd. 2002, [d] Doğangün 2004).



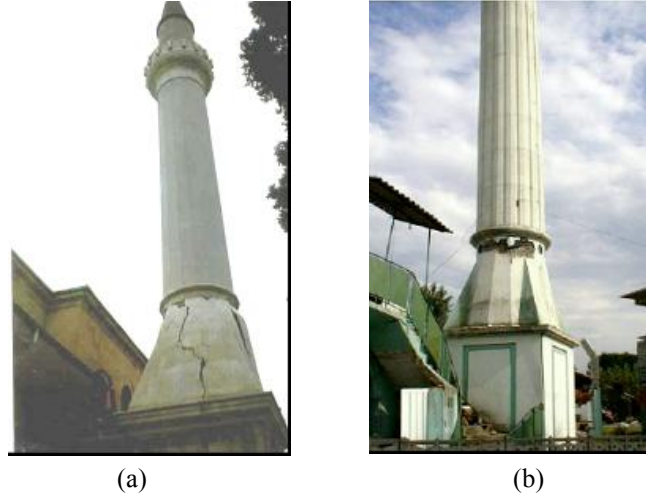
Şekil 1.14. Betonarme minarelerde gövdenin altında meydana gelen hasarlar (Sezen vd, 2008).

Şekil 1.15a'da görünen minarede 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde gövdenin altında küçük çatlaklar meydana gelmiştir. 12 Kasım 1999 Düzce depreminde çatlakların olduğu, düz yüzeyli donatının eklendiği, bölgeden yıkılmıştır. Şekil 1.15b'de donatının bindirme boyu yaklaşık 80 cm'dir. Şekil 1.15c'de gövde boyuna donatısının uçlarının 180° kanca yapıldığı görünmektedir. Filiz boylarının kısa olması ve gövde boyuna donatısına kanca yapılması gibi yanlış uygulamalar kesiti zayıflatmaktadır. Birinci depremde, zayıf olan bu kesitte, küçük hasar alan minare ikinci depremde yıkılmıştır (Sezen vd, 2008).



Şekil 1.15. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde hasar alan 12 Kasım 1999 Düzce depreminde yıkılan Koçyazı'daki minare (Sezen vd, 2008).

(5) Geçiş bölgesinde meydana gelen hasarlar: Minarenin temel ve kaide rijitliğine oranla bu bölgede hasar meydana gelmez. Minare rijitliği ve dayanımı geçiş bölgesinde, kaideden gövdeye doğru, gittikçe azalmaktadır. Şekil 1.16'da görülen hasarlarda gövdenin altına yakın bölgede meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 1.16. Geçiş bölgesinde meydana gelen hasarlar (Sezen vd, 2008).

(6) Diğer hasar durumları: Yukarıdaki yaygın minare hasarlarına ilişkin fotoğraflardan görüldüğü gibi, kaide kısmı hasara uğramamış ve ayakta kalmıştır. Minarelerin kaide kısmı hem kesit dayanımı olarak, hem de rijitlik olarak gövde kısmından

çok daha üstün durumdadır. Şekil 1.17’de görüldüğü gibi, caminin veya çevre yapıların yıkılarak kaide zarar vermesi sonucunda kaide dayanımını yitirmektedir.



Şekil 1.17. Kaide hasarları (Sezen vd, 2008).

Yukarıda, Türkiye de yaşanan son depremlerde minare hasarlarının türleri ve nedenleri üzerinde durulmuştur. Birçok nedenden dolayı minareler camiler üzerine düşmekte, can ve mal kaybı için büyük tehlike arz etmektedir. Aynı şekilde bu tehlike çevredeki diğer yapılar içinde vardır. Şekil 1.18’de, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremini hasarsız atlatan bir binanın üzerine minarenin düşmesi sonucu bina hasar almıştır. Bu durum, minarelerin yapılardan güvenli uzakta olmasını gerektirmektedir (Sezen vd. 2008).



Şekil 1.18. Çevredeki bina üzerine yıkılan minare (Hürriyet 2006).

1.7. Kule Türü Yapıların Tasarım Esasları

Kule türü yapılar ve özellikle bacalar için hazırlanmış uluslararası standartlarda verilen kriter ve bacaların tasarım kriterleri üzerinde yapılan çalışmalar, minareler dikkate

alınarak, bu başlık altında özetlenecektir. Bu kriterler ve çalışmalar, minareler ile ilgili şu ana kadar yapılan ve ileride yapılacak çalışmalarla desteklenerek, minareler için bir standardın gelişmesinde yardımcı olacağı düşünülmektedir.

1.7.1. Yönetmelikler

Birçok ülkede baca tasarımı için özel bir yönetmelik bulunmamaktadır. Bu ülkelerin çoğu genel betonarme yönetmeliğini kullanmaktadır. Bazı ülkeler ise (A.B.D., Polonya, Fransa, Almanya vs.) betonarme bacalar için özel şartnameler hazırlamışlardır. Birbirlerinden bağımsız olarak hazırlanan bu şartnameler, her ülkenin kendi deneyimlerini yansıtır ve uygulamada da oldukça çeşitlidirler. Baca dizaynı bir ülke şartnamesine göre yeterli gözükürken, diğer bir ülkenin şartnamesine göre oldukça yetersiz olabilir (Pinfeld, 1975).

Ülkemizde henüz bacalarla ilgili bir yönetmelik bulunmadığından en çok başvurulan kaynaklardan biri de bu konuda yazılmış en önemli İngilizce yönetmelik kabul edilen Amerikan Beton Enstitüsü'nün (ACI) hazırlamış olduğu ACI 307 yönetmeliğidir.

Bu yönetmelik ilk olarak 1934 yılında çıkarılmıştır ve periyodik olarak da yenilenmektedir. Rüzgar yükleri, ısı yüklemesi ve sismik yükleri kapsar. Donatı çeliği, minimum beton dayanımı, çeşitli yüklemesi durumlarında kabul edilebilir gerilmeleri içerir. Özel bir yönetmeliği olmayan birçok ülkede de genellikle Amerikan yönetmeliği ile birlikte o ülkenin kendi betonarme yapım kuralları birlikte kullanılır (Pinfeld, 1975).

1.7.2. Kesit Sınır Değerleri

Baca ve kule kabuklarındaki minimum donatı miktarı çeşitli ülke yönetmeliklerine göre değişir. Ama genel olarak minimum donatı sınırları Tablo 1.2'deki gibi özetlenebilir.

Tablo 1.2. Kule türü yapıların minimum donatı sınırları (Pinfeld, 1975)

Donatı düzlemi	Düşey	Yatay
Donatı oranı: $\rho \geq$	%0.25 – 0.30	%0.25 – 0.30
Donatı çapı: $\phi \geq$	$\phi 8 - \phi 12$	$\phi 8 - \phi 10$
Donatı aralığı (mm) \leq	250 - 300	250 - 300

Maksimum donatı oranı ise genel olarak % 2'yi aşamaz. Bu oran bölgesel olarak da % 4 olarak tespit edilmiştir (Pinfeld, 1975).

Minimum betonarme kabuk kalınlığı çeşitli ülke yönetmeliklerine göre 12 cm ile 20 cm arasında değişir. Betonarme kabuk kalınlığı 20 cm olan ülkelerdeki standart uygulama donatıyı kabuk yüksekliği boyunca çift sıra halinde yerleştirmektedir (Pinfeld, 1975).

Minimum gövde kalınlığı, iç çapı 8.5 m den küçük olan bacalarda 20 cm dir. 8.5 m den büyük çaplarda ise 1 m için 1 cm kalınlık ilavesi yapılacaktır (Aydoğan ve Hasgür, 1988).

Aydoğan ve Hasgür' de (1988) ACI 307-79 ve DIN 1056 'ya göre baca boyuna ve enine (çembersel) donatı oranlarının minimum değerleri ve aralıkları Tablo 1.3.'deki gibi verilmiştir. Donatı oranından giderek boyuna donatı alanını hesaplarken halka en kesitin alanı, çembersel donatı alanını hesaplarken ise ortalama düşey halka kesit alanı esas alınacaktır. Kullanılan beton kalitesi en az C20, beton paspayı 5 cm olmalıdır. Donatı çapı 10 mm.den az olamaz.

Tablo 1.3. ACI 307-79 ve DIN 1056 minimum donatı değerleri

Donatı düzlemi		Düşey		Yatay	
Standart		ACI-307	DIN 1056	ACI-307	DIN 1056
Min. donatı oranı: $\rho_{min} \geq$	İçte	$\Sigma \rho_{min} \geq 0.0025$	0.0010	0.0010	0.0010
	Dışta	Dışta: $\rho_{min} \geq \rho_{min}/2$	0.0020	0.0010	0.0015
Maks. donatı aralığı (mm)	İçte	600	$\leq \begin{cases} \text{Baca kalınlığı} \\ 250 \text{ mm} \end{cases}$	300	200
	Dışta	300		$\leq \begin{cases} \text{Baca kalınlığı} \\ 300 \text{ mm} \end{cases}$	200

Kule tipi yapılarda kullanılan malzeme ve yapı davranışı ile ilgili olarak yapılan bir takım çalışmalar da mevcuttur. Halabian ve El Nagggar (2000), yaptıkları çalışmada güçlü rüzgarların sebep olduğu eğilme momentinin ve yapının doğal frekansının betonun elastisite modülüne göre nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Kulenin dinamik tepkisi (dynamic response) beton dayanımının azalmasıyla artmaktadır. Yapılan deneylerde malzeme dayanımının %25'lik artışıyla, taban momentinde %5 azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

Wilson 'da (2000), betonarme bacaların şiddetli depremlerdeki davranışlarını süneklik faktörlerini göz önüne alarak değerlendirmiştir. Tipik betonarme bacaların kırılma olmadığını, gerilmenin artması ve ardından donatının akması sırasında süneklikte bir miktar artış olduğunu belirtmiştir. Yaptığı deneyler sonucu bulduğu sonuçları uluslararası baca yönetmelikleri ile karşılaştırmıştır.

1.8. Minarelerde Dinamik Yük Oluşturan Etkiler

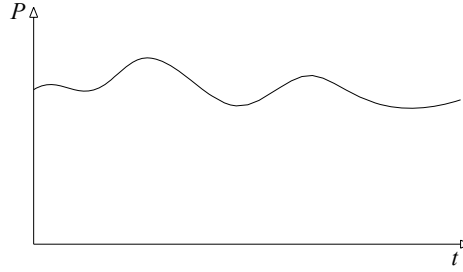
Mühendislikte yapıları, emniyet, ekonomi ve estetik koşulları göz önünde bulundurularak projelendirilir. Bir mühendislik yapısını bu koşulları dikkate alarak projelendirmek için yapının hizmet süresi boyunca maruz kalacağı yük veya yük etkilerinin gerçekçi bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Minarelere etkiyen yükler; kalıcı, hareketli ve dinamik yüklerdir. Minare öğelerinin, kaide, geçiş, gövde, şerefeler, petek ve külahın, ağırlığı ve varsa kaplama ağırlığı kalıcı yük olarak alınır. Hareketli yükler ihmal edilecek kadar küçük olduğundan dikkate alınma gerek yoktur. Bu iki yük grubu statik yük olarak nitelendirilmektedir.

Dinamik yükler ise rüzgar ve deprem yükleridir. Dinamik kelimesi zamanla değişen anlamında kullanılmaktadır. Örneğin bir yapıda yükün büyüklüğü, doğrultusu ve etkime yeri zamana bağlı olarak ortaya çıkabilir. Bunun sonucu olarak da taşıyıcı sistemde meydana gelen iç etkiler, şekil değiştirme ve yer değiştirmeler zamanın bir fonksiyonu şeklindedir.

1.8.1. Rüzgar

Bir akışkan olan havanın atmosfer koşullarına göre hareketi sırasında yapıların rüzgâra karşı yüzeyleri rüzgâr etkisinde kalmaktadır. Rüzgâr yükü, rüzgâr hızının ve yönünün değişmesiyle zamanla artıp eksilen bir yükür. Diğer taraftan yapıların şekilleri de rüzgâr yüklerinin değişmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Genellikle hesapları rüzgâr yükünün en fazla olan değerine göre yapmak yeterli olmaktadır. Ancak burada rüzgârın bazı özel yapılar üzerinde titreşim hali; dolayısıyla dinamik etki yapabileceğini belirtmek uygun olmaktadır (Durmuş, 1989).



Şekil 1.19. Rüzgar yükünün zamana bağlı değişimi

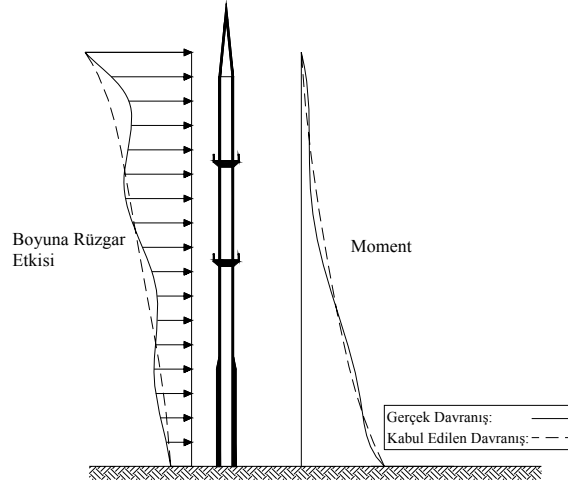
Bu tip yüksek yapılarda rüzgâr; yüklerin hâkim kaynağını oluşturur. Bu yapılarda rüzgâr etkisi genel olarak “boyuna rüzgâr etkileri” ve “enine rüzgâr etkileri” olmak üzere iki kısma ayrılır. Bu bileşenlerde minarede hem statik hem de dinamik etkilere neden olmaktadır. Bu nedenle rüzgâr etkilerinin belirlenmesi bu iki tür yükün belirlenmesini içermektedir (Temüz, 2007).

Rüzgâr olayının çok karmaşık bir yapıya sahip olması rüzgâr hızının tayininde olasılık yöntemlerinin kullanılmasına sebep olmaktadır. Rüzgârın etki ettiği yüzey olarak yapı düşey ekseninden geçen düzlem alınıp, rüzgâr yükünün tatbik noktası, alanın ağırlık merkezi olarak dikkate alınmakta ve rüzgâr etkisinin yatay olduğu kabul edilmektedir (Temüz, 2007).

Bacalarda olduğu gibi minarelerde de rüzgâr yükü, minarenin yapılacağı yere ve minare yüksekliğine bağlı olarak rüzgâr hızının değişeceği alanlarda, rüzgâr hızının büyüklüğünden başka, rüzgâr yönüyle ilgili olarak, aşağıda belirtilen bazı etkenlerin bir bölümü veya tümü tarafından etkilenmektedir. Bu etkiler:

- ◆ Bölge türbülansı
- ◆ Türbülans seviyesi
- ◆ Minare etrafında başka yapıların bulunması
- ◆ Havanın yoğunluğu
- ◆ Minarenin doğal titreşim frekansı
- ◆ Yapı sönüm miktarı
- ◆ Yapının titreşim modu şekilleridir (Temüz, 2007)

Rüzgâr akımı, yeryüzü ile irtibat halinde olması nedeniyle meydana gelen sürtünmeden dolayı yavaşlar. Günümüzde boyuna rüzgâr etkileri yüzeydeki sıfır noktasından atmosferik sıfır tabakasının en üst noktasındaki maksimum değere kadar yükseklikle değişen bir etki olarak kabul edilen rüzgâr akımıdır. Yükseklik boyunca hızın değişimi en genel anlamda Üst Kuralı (*Power Law*) veya Logaritmik Kural Değişimi (*Logaritmik Law*) ile bulunabilir. Bulunan rüzgâr hızlarının minare yüksekliğine etkidiği varsayılır. Minareye etkiyen boyuna rüzgâr etkisi ve minare tepkisini aşağıdaki şekil göstermektedir (Yazıcıoğlu, 2004).



Şekil 1.20. Boyuna rüzgâr etkisinden dolayı minarede oluşan eğilme momentinin yükseklik boyunca dağılımı

1.8.2. Deprem

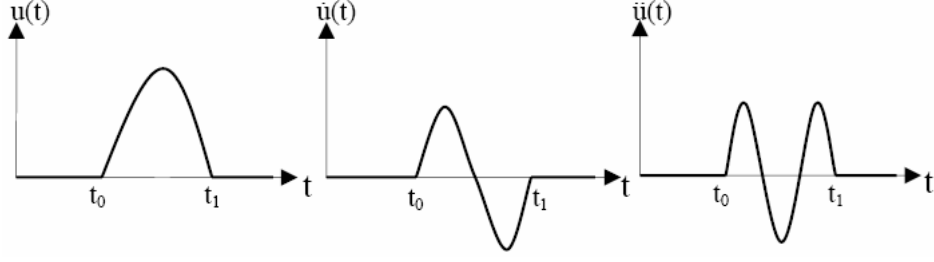
Deprem yer içinde fay denilen kırıklar üzerinde biriken enerjinin, şekil değiştirme biçiminde, aniden boşalması sonucu meydana gelen yer kabuğunun dalga hareketidir. Yer değiştirme hareketi depremin büyüklüğü ile orantılıdır. Yer kabuğunda meydana gelen ve

birikmiş deformasyon enerjisi boşalmalarının harmonik olmaması nedeniyle deprem titreşimleri oldukça karmaşıktır.

Doğal afetlerin en önemlilerinden biri olan depremin diğer doğal afetlerden en önemli farkı, meydana gelmeden önce hiçbir uyarının olmamasıdır. Yapılan deprem tahminlerinin de doğru çıkmaması bize güvenilir bir deprem uyarı sistemimim henüz mevcut olmadığını göstermektedir. Bu nedenle yapıların depreme karşı dayanıklı düzenlenerek yapıların deprem etkilerinden korunması gereği ortaya çıkmaktadır.

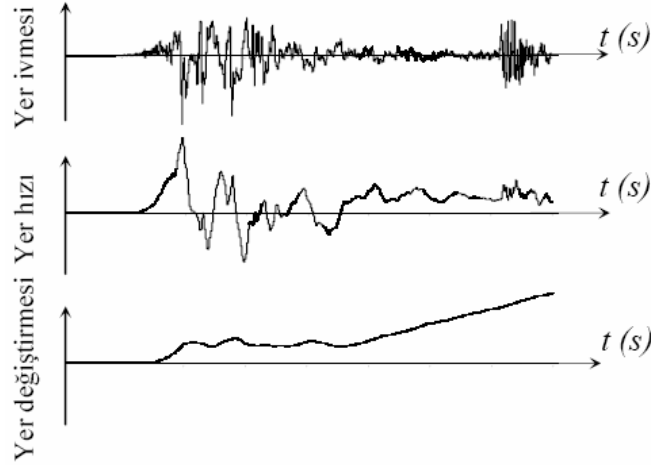
Depremden dolayı yapıya gelen gerçek yüklerin belirlenmesinin çok zor olduğu herkesçe kabul edilmektedir. Deprem sırasında temel zemini titreşim yapmakta dolayısıyla da yapı temeli ani dönme ve ötelenmelerin etkisinde kalmaktadır. Temelin bu tür hareketleri üst yapıda harekete zıt yönde atalet kuvvetlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu aşamaya kadar basit olan bu olay yapıların titreşim yapmaya başlamasıyla karmaşık bir hal almaktadır. Yapının titreşimi sonucu yapı elemanlarında iç kuvvetler oluşacaktır ancak deprem yükünün periyodik olmamasından dolayı bu iç kuvvetler değişik değerler alacaktır. Yapı elemanlarında meydana gelen iç kuvvetlerin deprem süresince belirlenmesi veya depremde oluşan maksimum iç kuvvetlerin belirlenmesi gerekir.

Eğer bir deprem hareketini meydana getiren fayın yırtılmaya maruz bölgesinde basit tek bir kayma hareketi meydana geldiği kabul edilirse, bu hareketin odaktan yeteri kadar uzak bir bölgede Şekil 1.21 de gösterildiği gibi bir yerdeğiştirme, hız ve ivme etkisi ortaya çıkaracağı söylenebilir. Görüldüğü gibi ivme sıfırdan başlamış, bir maksimum değere ulaşmış ve tekrar sıfıra dönmüştür. Hız ve yerdeğiştirme değerleri de, ivmeye uygun olarak ortaya çıkar. Ancak Şekil 1.22 de verilen gerçek depremde değişim çok daha karmaşıktır. Bu ise, deprem hareketinin birbirini izleyen bir kayma veya yırtılma hareketiyle meydana geldiğini göstermektedir. Her bir küçük kayma boyunun fayın değişik yerlerinde meydana gelmesiyle, deprem hareketinin oluştuğu ve çeşitli tabakalardan kırılma ve yansımalarla bu hareketin daha da karmaşıklaştığı kabul edilebilir (Celep ve Kumbasar, 2004).



Şekil 1.21. İdeal bir yer hareketinde yerdeğiştirme, hız ve ivmenin değişimi

Değişik depremlere ait aynı yerde elde edilen kayıtların birbirinden tamamen farklı olduğu gibi, aynı depremin farklı yerlerde elde edilen kayıtları da birbirine benzememektedir. Bu durumda, başlangıçta deprem kuvvetlerinin hesabı için bir takım kabuller yapmak gerekli olacaktır. Hareketin karmaşıklığı ve üst yapı deprem davranışının bir çok parametreye bağlı olması göz önüne alındığında bu etkinin tam olarak belirlenmesinin imkansız denecek kadar zor olduğu görülebilir (Livaoğlu, 2001).



Şekil 1.22. 19 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi (kuzey-güney bileşeni) Yarımcı istasyonuna ait ivme, hız ve yer değiştirmenin zaman bağlı değişimi

1.8.2.1. Elastik Sistemlerin Titreşim Hareketi

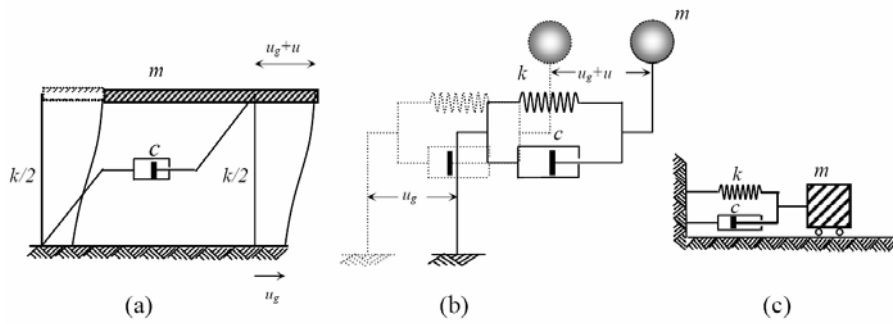
Bir yapının yer hareketi altında incelenmesi sırasındaki ilk adım basit bir modelle temsil edilmesidir. Bir yapının titreşim durumundaki konumunun belirlenmesi için gerekli olan parametre sayısı serbestlik derecesi olarak isimlendirilir. Mühendislik yapıları toplanmış kütle sistemleri halinde basitleştirilirse, genel olarak serbestlik derecesi en az

toplanmış kütle sayısı kadar olmaktadır. Basitleştirilmemiş sürekli sistemlerin serbestlik dereceleri ise sonsuzdur. Matematik çözümleri sonuçun da toplanmış kütle sistemleri adi diferansiyel denklemlerin, sürekli kütle sistemleri ise kısmi türevli diferansiyel denklemlerin çözümünü gerektirmektedirler. Kule türü yapılar ve minareler sürekli sistemlerse de günümüzde yaygın olan bilgisayar çözümü için sistemler ayrıklaştırılır ve çok serbestlik dereceli sistem haline getirilir. Çok serbestlik dereceli sistemlerin incelenmesinde tek serbestlik dereceli sistemlerin ana kavramları kullanıldığı için tek serbestlik dereceli sistemlerin ayrıntılı incelenmesi faydalıdır (Celep ve Kumbasar, 2004).

1.8.2.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Bir sistemin hareket halinde bulunduğu konum, tek bir parametrenin verilmesiyle bulunabiliyorsa, bu tür yapılar tek serbestlik dereceli olarak isimlendirilirler (Celep, Kumbasar, 1992). Bu tür yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesi için sistemin hareket denkleminin yazılması gerekmektedir. Hareket denklemi, sisteme etkiyen kuvvetlere, atalet kuvvetlerinin de eklenmesiyle elde edilen denge olarak düşünülebilir.

Sönümünde dikkate alındığı tek serbestlik dereceli sistemlere ilişkin olarak kullanılan bazı modeller Şekil 1.23’de görülmektedir. Bu şekildeki m yapı kütlelerini, c yapı sönümünü, k yapı rijitliğini, u_g zeminin, u yapının yer değiştirmesini temsil etmektedir.



Şekil 1.23 Tek serbestlik dereceli sistem modelleri (Livaoğlu, 2001).

Tek serbestlik dereceli bir sistemin davranışı, sistemin matematiksel ifadesi olan hareket denkleminin çözümüyle anlaşılmaktadır. Sistemin matematik modeli, gerçeğe ne

kadar yakın oluşturulursa, elde edilecek sonuçlar da aynı oranda gerçek sistem davranışını göstermektedir. En genel halde titreşim hareketi Denklem 1’de verilmiştir.

$$m \cdot \ddot{u}(t) + c \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u(t) = F(t) \quad (1)$$

Burada $F(t)$ sisteme etkiyen dış kuvveti, m yapı kütleini, c yapı sönümünü, k yapı rijitliğini, $\ddot{u}(t)$ yapı ivmesini, $\dot{u}(t)$ yapı hızını ve $u(t)$ yer değiştirmelerini göstermektedir. İfadeden de anlaşılacağı gibi yük, ivme, hız ve yerdeğiştirme zamana (t) bağlı terimlerdir. Bundan sonraki ifadelerde daha kısa bir gösterim şekli olması için t ifadelerde yazılmayacaktır.

1.8.2.1.1.1. Serbest Titreşim

Bir yapı herhangi bir dinamik etki olmaksızın başlangıç yer değiştirmesi gibi bir etkiyle statik halden salınım haline geçirildiğinde, yapmış olduğu harekete serbest titreşim hareketi denmektedir (Livaoğlu, 2001). Sistemin serbest salınım özelliklerinin bilinmesi, sistemler için, doğal titreşim frekansını (doğal periyodu) ve sönüm oranının belirlenmesinde yardımcı olmaktadır. Bu nedenle karmaşık bir yer hareketinin herhangi bir yapı sistemi üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi için serbest titreşim özelliklerinin iyi anlaşılmasında yarar vardır.

(1) Sönümsüz Serbest Titreşim: Dış kuvvetin ve sönümüm olmadığı ya da ihmal edildiği tek serbestlik dereceli lineer sistemlerin hareket denklemi,

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklem basit harmonik hareket titreşimini ifade eder. Denklem 2’nin tüm elemanları m ’ye bölünürse hareket denklemi,

$$\frac{m\ddot{u}}{m} + \frac{ku}{m} = 0 \rightarrow \ddot{u} + \frac{k}{m}u = 0 \quad (3)$$

şekline dönüşür. ω açısal frekansı (hızı) göstermek üzere, $\frac{k}{m} = \omega^2$ ifadesi Denklem 3'de yerine yazılırsa,

$$\ddot{u} + \omega^2 u = 0 \quad (4)$$

halini almaktadır. Bu diferansiyel denklemin çözümü için Euler denklemi ($u = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)$) dikkate alınarak çözüm aranır. A ve B sabitleri ne olursa olsun sistem $\cos(\omega t)$ ve $\sin(\omega t)$ terimlerinden dolayı ω dairesel frekansı ile harmonik bir hareket yapar. $\omega = \sqrt{k/m}$ (rad/s) olduğundan tek serbestlik dereceli sistemin açısal frekansı yalnız kütle ve yay sabitine bağlıdır. Buradan ω 'ye bağlı olarak doğal frekans (f) ve doğal periyot (T),

$$f = \omega / 2\pi \quad (5)$$

$$T = 1 / f \rightarrow T = 2\pi / \omega \quad (6)$$

bağıntılarıyla belirlenebilir. Euler denkleminin türevi alınarak sistemin başlangıç koşulları; yani sistemin kütlelerinin $t = 0$ anındaki ilk konumunun $u(0) = u_0$ ve ilk hızının $\dot{u}(0) = \dot{u}_0$ olduğu kabulüyle, yerdeğiştirme ve hız ifadeleri,

$$u(0) = u_0 \quad \dot{u}(0) = \dot{u}_0 \quad u_0 = A \quad \dot{u}_0 = B\omega \quad (7)$$

başlangıç şartlarına bağlı olarak,

$$u = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \text{ ve } \dot{u} = -A\omega \sin(\omega t) + B\omega \cos(\omega t) \quad (8)$$

şeklinde belirlenir. Burada $A = u_0$ ve $B = \frac{\dot{u}_0}{\omega}$ olarak bulunur. Bu sabitler Denklem 8'de yerlerine yazılırsa yerdeğiştirme ve hız ifadeleri,

$$u = u_0 \cos(\omega t) + \frac{\dot{u}_0}{\omega} \sin(\omega t) \text{ ve } \dot{u} = -u_0 \omega \sin(\omega t) + \dot{u}_0 \cos(\omega t) \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir.

(2) Sönümlü Serbest Titreşim: Sönümlü serbest titreşimde de, sönümsüz serbest titreşimde olduğu gibi sisteme etkiyen bir dış yük mevcut değildir. Ancak sönümsüz serbest titreşimden farklı olarak sönüm mevcuttur. Bu titreşim hareketi için hareket denklemi,

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (10)$$

şeklindedir. Her iki tarafın m 'ye bölünmesi halinde,

$$\frac{m\ddot{u}}{m} + \frac{c\dot{u}}{m} + \frac{ku}{m} = 0 \quad (11)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklem, ζ sönüm oranı göstermek üzere; $(c/m) = 2\zeta\omega$ ve $k/m = \omega^2$ olarak,

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega \cdot \dot{u} + \omega^2 \cdot u = 0 \quad (12)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 12 bir adi diferansiyel denklem olup bu denklemin çözümü $u = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t}$ şeklinde aranır,

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (13)$$

olarak yazılabilir. Bu durumda hareketin şekli için Denklem (14)'de karekök içerisinde gösterilen ifadenin işaretine göre üç farklı durum ortaya çıkmaktadır. Bunlar kritik üstü, kritik ve kritik altı sönümü olarak adlandırılmaktadır.

a. Kritik üstü sönüm durumu: Bu durumda,

$$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 > \frac{k}{m} \quad (14)$$

olmakta dolayısıyla da sönüm rijitlikten daha büyük bir etki göstermektedir. Bu durumda yer değiştirme,

$$u = A_1 e^{-\lambda_1 t} + A_2 e^{-\lambda_2 t} \quad (15)$$

şeklinde olacağından yer değiştirmede bir azalma olacak dolayısıyla da kütle yarım dairesel bir hareket yaparak başlangıç konumuna geri dönecektir. Başka bir deyişle titreşim hareketi meydana gelmeyecektir.

b. Kritik sönüm durumu: Bu durumda,

$$\left(\frac{c}{2m} \right)^2 = \frac{k}{m} \quad (16)$$

şeklinde olmaktadır. Bu durum titreşimin meydana gelmeye başlayacağı sınırı göstermektedir. Bu sınıra karşılık gelen sönüme *kritik sönüm* denilmektedir. Kritik sönüm, titreşim hareketini engelleyecek en küçük sönüm oranı olarak da tanımlanmaktadır (Livaoğlu, 2001). Kritik sönüm değeri,

$$c_{cr} = 2\sqrt{k \cdot m} \quad (17)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Yapıların dinamik hesaplarında yaygın olarak kullanılan sönüm oranı kritik sönüm yardımıyla tanımlanmaktadır. Sönüm oranı (ξ),

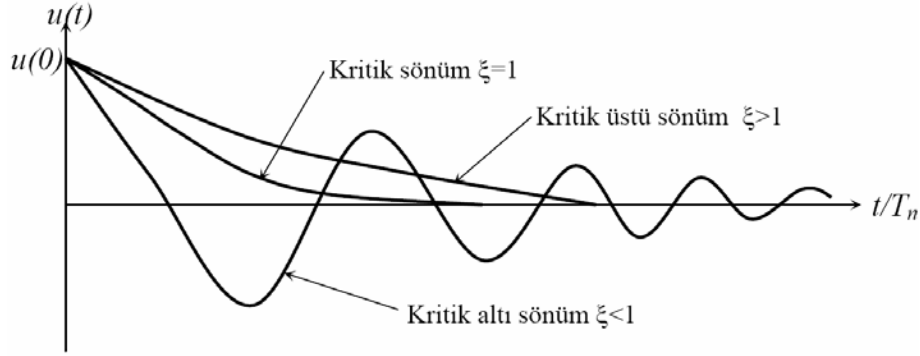
$$\xi = \frac{c}{2m\omega}; \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow \xi = \frac{c}{2m\sqrt{k/m}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{c_{cr}} \Rightarrow \xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad (18)$$

bağıntısıyla ifade edilebilmektedir. Bunun anlamı bir serbestli dereceli sistemin sahip olduğu sönümün kritik sönüme oranıdır.

c. Kritik altı sönüm durumu: Bu durumda,

$$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 < \frac{k}{m} \quad (19)$$

olmakta, dolayısıyla rijitlik sönüme göre etkili olduğundan titreşim hareketi meydana gelmektedir.



Şekil 1.24. Sönümlü bir sistemin kritik üstü, kritik ve kritik altı sönüm durumlarında titreşimi (Livaoglu, 2001).

Genel olarak ξ sönüm oranı, çelik çerçevelerde 0.02 (%2) civarında, betonarme yapılarda 0.05 (%5) çelik-betonarme türü kompozit yapılarda 0.03 (%3) civarında olduğu bilinmektedir. Sönüm oranı genel olarak 0.10 (%10) dan küçüktür. Bunun için kritik ve kritik üstü sönümle ilgilenmenin yapı dinamiği ve inşaat mühendisliği açısından herhangi bir önemi yoktur (Chopra, 1995; Livaoglu, 2001).

Bir çok yapı için sönümlü titreşimden elde edilen ω_d ve T_d gibi titreşim özellikleri, sönümsüz titreşimden elde edilen ω ve T değerleriyle pratik olarak aynıdır (Chopra, 1995; Livaoglu, 2001).

1.8.2.1.1.2. Zorlanmış Titreşim

Zorlanmış titreşimin serbest titreşimden farkı, yapı titreşim hareketi yaparken serbest titreşim de herhangi bir dış yük etkimezken, zorlanmış titreşimde yapının kendisine bir dış kuvvetin etkimesidir.

(1) Sönümsüz Zorlanmış Titreşim: Sönümsüz zorlanmış titreşim, titreşime sebep olan bir dış etkinin bulunması ve sistemde sönümün olmamasıdır. Bu durumda hareket denklemi,

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = F(t) \quad (20)$$

şeklinde yazılabilir. $F(t) = F_0 \sin \Omega t$ şeklinde ifade edilir ve denklemin her iki tarafı m 'ye bölünürse,

$$\ddot{u}(t) + \frac{k}{m}u(t) = \frac{F_0}{m} \sin \Omega t \quad (21)$$

şeklini alır. Bu denklem için homojen ve özel kısım diye ayrık düşünülürse toplam yer değiştirme ifadesi,

$$u(t) = u_h(t) + u_p(t) \quad (22)$$

$$\ddot{u}_h + \frac{k}{m}u_h = 0 \quad (\text{Homojen kısım}) \quad (23)$$

$$\ddot{u}_p + \frac{k}{m}u_p = \frac{F_0}{m} \sin \Omega t \quad (\text{Özel kısım}) \quad (24)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemlerden homojen kısım bilindiği gibi sönümsüz serbest titreşim hareketidir. Buna göre;

$$u_h(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \quad (25)$$

olarak elde edilmişti. Özel kısım ise;

$$u_p(t) = u_f \sin \Omega t \quad (26)$$

olarak dikkate alınabilir. Bu şekilde işlemlere devam edilerek özel kısmın hareket denklemi,

$$u_p(t) = \frac{\frac{F_0}{k}}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2} \sin \Omega t \quad (27)$$

olarak elde edilir. Burada,

$$\frac{F_0}{k} = u_0 \quad \text{Eşdeğer statik yerdeğiştirme}$$

$$\frac{\Omega}{\omega} = r \quad \text{Frekans oranı}$$

$$u_f = \frac{u_0}{1 - r^2}$$

olmak üzere toplam davranış,

$$u(t) = u_0 \cos(\omega t) + \frac{\dot{u}_0}{\omega} \sin(\omega t) + \frac{u_0}{1 - r^2} \sin \Omega t \quad (28)$$

olarak elde edilir.

Periyodik bir dış yük etkisi altındaki bir sistem, Denklem (28)'de görüleceği gibi, hem kendi frekansında hem de dış yükün frekansında titreşim yapma eğilimi gösterir. Ancak bu iki frekansın eşit olması ($r = 1$) durumunda sistemin genliği sürekli büyüyerek sistemde yer değiştirme artarak sonsuza gider. Bu olaya rezonans adı verilmektedir. Rezonans durumunda yer değiştirme ifadesi olan Denklem (28)'in çözümü sonsuz olur ve bu durum sistemde göçmeye yol açar.

(2) Sönümlü Zorlanmış Titreşim: Sönümlü zorlanmış titreşim, titreşime sebep olan bir dış etkinin bulunması ve sistemde sönüm etkisinin olmasıdır. Bu durumda hareket denklemi,

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t) \quad (29)$$

şeklindedir. $F(t) = F_0 \sin \Omega t$ şeklinde ifade edilir ve denklemin her iki tarafı m 'ye bölünürse,

$$\ddot{u}(t) + \frac{c}{n}\dot{u}(t) + \frac{k}{m}u(t) = \frac{F_0}{m}\sin \Omega t \quad (30)$$

şeklini alır. Bu denklem için homojen ve özel kısım diye ayrık düşünülürse toplam yer değiştirme ifadesi,

$$u(t) = u_h(t) + u_p(t) \quad (31)$$

$$\ddot{u}_h + \frac{c}{m}\dot{u}_h + \frac{k}{m}u_h = 0 \quad (\text{Homojen kısım}) \quad (32)$$

$$\ddot{u}_p + \frac{c}{m}\dot{u}_p + \frac{k}{m}u_p = \frac{F_0}{m}\sin \Omega t \quad (\text{Özel kısım}) \quad (33)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemlerden homojen kısım bilindiği gibi sönümlü serbest titreşim hareketidir. Buna göre;

$$u_h(t) = e^{-\xi\omega t} (A \cos(\omega_d t) + B \sin(\omega_d t)) \quad (34)$$

olarak elde edilmişti. Burada ω sönümsüz doğal açısal frekansı (hızı), ω_d sönümlü doğal açısal frekansı göstermektedir. Özel kısım ise;

$$u_p(t) = C \sin(\Omega t) + D \cos(\Omega t) \quad (35)$$

olarak yazılıp denklem gerekli şekilde düzenlenirse,

$$u_p(t) = U_f \sin(\Omega t - \Psi) \quad (36)$$

olarak elde edilir. Burada Ψ faz açısı olup,

$$C = \frac{(1-r^2)u_0}{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2} \quad (37)$$

$$D = \frac{-2\xi r u_0}{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2} \quad (38)$$

$$U_f = \sqrt{C^2 + D^2} \quad (39)$$

$$\psi = \tan^{-1}\left(-\frac{D}{C}\right) \Rightarrow \tan \Psi = \frac{2\xi r}{1-r^2} \quad (40)$$

$$DMF = \frac{U_f}{u_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (41)$$

olmak üzere özel ve homojen çözümler toplanırsa,

$$u(t) = e^{-\xi\omega t} (A \cos(\omega_d t) + B \sin(\omega_d t)) + U_f \sin(\Omega t - \Psi) \quad (42)$$

olarak elde edilir.

1.8.2.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Bu sistemlerde, sistemin hareket halindeki konumu birden fazla parametrenin verilmesi ile belirlenebilmektedir. Sistemin serbestlik derecesi, hareket halindeki konumunu tam olarak belirleyebilmek için gerekli ve yeterli parametre sayısına eşittir. Böyle bir sistem, serbestlik derecesi sayısı kadar bağımsız hareket türüne sahiptir. Tek serbestlik dereceli sistemin dinamik davranışı tek bir diferansiyel denklemle ifade edilebilir. Ancak, çok serbestlik dereceli bir sistemde birde fazla yer değiştirme parametresini bulunması hareketi temsil eden diferansiyel denklem sayısının da bu ölçüde artmasını beraberinde getirir. En genel şekilde hareket denklemi; sistemdeki atalet kuvvetleri, sönüm etkileri ve şekil değiştirme sonucu meydana gelen elastik kuvvetler ile dış kuvvetlerin dengesinden ibarettir.

Günümüzde kullanılan Sonlu Elemanlar Teorisine göre çözüm yapan bilgisayar programları, tüm yapı sistemlerini çok serbestlikli toplanmış kütle modeline göre çözmektedir. Sistemin kütlelerini, sonlu elemanların düğüm noktalarına toplayarak, her düğüm noktası için yerdeğiştirme ve dönme koordinatı hesaplamaktadır. Yani serbestlik derecesi sonsuz olan minareler gibi sürekli sistemlerde çok serbestlik dereceli sistemler olarak basitleştirilerek çözüm aranmaktadır. Böyle sistemlerde hareket halindeki konumu belirleyen parametreler belirli noktaların yer değiştirilmesi olarak seçilebilir. Çok

serbestlik dereceli sistemlerin hareket denklem takımı, tek serbestlik dereceli sistemin hareket denkleminin genelleştirilmesi olarak düşünülebilir.

$$f_I + f_D + f_S = f(t) \quad (43)$$

Burada, f_I , atalet kuvvetine, f_D , sönüm kuvvetine ve f_S , rijitlik kuvvetine ait vektörleri göstermektedir.

1.8.2.1.2.1. Sönümsüz Serbest Titreşim (Modal Analiz)

Sönümsüz serbest titreşim çok serbestlik dereceli bir sistemde,

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (44)$$

denklemini tarafından belirlenir. Burada; m kütle matrisi ve k rijitlik matrisidir. Çözümün,

$$u(t) = \bar{u} \sin(\omega t + \theta) \quad (45)$$

şeklinde basit harmonik hareket olduğu kabul edilip, Denklem (44)'de yerine yazılırsa

$$(k - \omega^2 m)\bar{u} = 0 \quad (46)$$

veya $d = [d_{ij}] = k^{-1} = [k_{ij}]^{-1}$ fleksibilite matrisiyle yazılırsa

$$(I - \omega^2 dm)\bar{u} = 0 \quad (47)$$

homojen lineer denklem sistemi elde edilir. Bu sistemin sıfırdan farklı çözümü ancak katsayılar matrisinin determinantının sıfır olması ile mümkündür.

$$|k - \omega^2 m| = 0, \quad |I - \omega^2 dm| = 0 \quad (49)$$

Elde edilen bu son ifadeye sistemin *Frekans Denklemi* denir. Denklem çözümüden, sistemin serbestlik derecesi kadar; $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ile gösterilen serbest titreşim frekansı elde edilir. Homojen Denklem (46) veya (47), $\omega = \omega_i$ şeklindeki her serbest titreşim frekansı için ayrı ayrı $\bar{u} = \phi_i$ alınarak çözülebilir. Bu amaçla lineer homojen olan bu n bilinmeyenli denklemin, bilinmeyenlerinden biri seçilerek $n-1$ bilinmeyene indirilmesi ve $n-1$ bilinmeyenin, seçilen bilinmeyen cinsinden hesaplanması gerekir.

$$(k - \omega^2 m)\phi_i = 0, \quad (I - \omega^2 dm)\phi_i = 0 \quad (50)$$

Böylece elde edilen ϕ_i vektörüne söz konusu titreşim frekansına karşılık gelen *Serbest Titreşim Mod Şekli* denir. Her sistemin serbestlik derecesi kadar mod şekli vardır: $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$. Buradaki ϕ_i 'nin elemanları yer değiştirmelere karşılık geldiği için mod şekli, sistemin karşı gelen frekansla titreşimi sırasında aldığı konumu verir. Ancak, homojen Denklem (50)'nin determinanı sıfır olacak şekilde ω_i hesaplandığı için $\phi_i = [\phi_{1i}, \phi_{2i}, \dots, \phi_{ni}]$ vektörünün n bilinmeyenine karşılık, ω_i frekans denkleminin tek katlı kök ise yukarıda da belirtildiği gibi $n-1$ bağımsız denklem bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak ϕ_i vektörünün elemanlarından birisi keyfi seçildiğinde, diğerleri ona bağlı olarak hesaplanabilir (Celep, Kumbasar, 1992). Modların kolonlara yerleştirilmesiyle bulunan,

$$\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n] \quad (51)$$

kare matrisi ise sistemin *Modal Matrisi* denir. Serbest titreşim modunu veren Denklem (50) ω_i ve ω_j gibi iki farklı titreşim frekansı için,

$$k \cdot \phi_i = \omega_i^2 \cdot m \cdot \phi_i, \quad k \cdot \phi_j = \omega_j^2 \cdot m \cdot \phi_j \quad (52)$$

olarak yazılabilir. Bu ifadeler sırasıyla ϕ_j^t ve ϕ_i^t ile çarpılırsa,

$$\phi_j^t \cdot k \cdot \phi_i = \omega_i^2 \cdot \phi_j^t \cdot m \cdot \phi_i, \quad \phi_i^t \cdot k \cdot \phi_j = \omega_j^2 \cdot \phi_i^t \cdot m \cdot \phi_j \quad (53)$$

elde edilir. Kütle ve rijitlik matrisinin simetrik olduğu ve Denklem (53)'deki eşitliklerin her iki tarafında skaler büyüklükler olduğu göz önüne alınırsa,

$$(\phi_j^t \cdot k \cdot \phi_i)^t = \phi_i^t \cdot k \cdot \phi_j, \quad (\phi_j^t \cdot m \cdot \phi_i)^t = \phi_i^t \cdot m \cdot \phi_j \quad (54)$$

bağıntıları bulunur. Denklem (53) ve (54) uygun biçimde birleştirilmesiyle,

$$\left(\frac{1}{\omega_i^2} - \frac{1}{\omega_j^2}\right) \cdot \phi_i^t \cdot k \cdot \phi_j = 0, \quad (\omega_i^2 - \omega_j^2) \cdot \phi_i^t \cdot m \cdot \phi_j = 0 \quad (55)$$

elde edilir. ω_i ve ω_j iki farklı frekans olduğundan Denklem (55)'deki eşitliklerin sıfıra eşit olması için,

$$\phi_i^t \cdot k \cdot \phi_j = 0, \quad \phi_i^t \cdot m \cdot \phi_j = 0, \quad i \neq j \quad (56)$$

olması gerektiği bilinmektedir. Bu bağıntılar ϕ_i ve ϕ_j mod vektörlerinin hem kütle hem de rijitlik matrisine göre ortogonalite özelliğini ifade etmektedir. Mod vektörlerinin hesabında elamanların oranı sabit kalmak üzere, değişik çözümler yapılabilir. Şekil aynı olduğu halde farklı genlikler elde edilebilir. Bu keyfiliği bir normalize işlemi kabul edilerek ortadan kaldırılabilir. Hesap kolaylığı bakımından genellikle, bütün genlikler en büyük genlik esas alınarak normalize edilir. Diğer bir normalize şeklinde de kütle matrisi aynı mod vektörü ile sağdan ve soldan çarpılarak sonucun birim olması sağlanır (Celep, Kumbasar, 1992).

1.8.2.1.2.2. Sönümlü Zorlanmış Titreşim

Çok serbestlik dereceli bir sistemin zorlanmış titreşimi,

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (57)$$

denklemini ile belirlenir. Yer değiştirme vektörü $u(t)$ 'nin çözümü için *Modların Süperpozisyonu Yöntemi ve Sayısal İntegrasyon Yöntemi* kullanılır.

1.8.2.1.2.2.1. Modların Süperpozisyonu Yöntemi

Bu yöntemde öncelikle sistemin sönümsüz serbest titreşimi ele alınır. Madde 1.8.2.1.2.1.1'de belirtildiği şekilde mod vektörleri (ϕ_i) bulunur. Daha sonra sistemin sönümlü ve zorlanmış davranışı ele alınarak, mod vektörlerinin uygun katsayılarla çarpılıp toplanmasından oluştuğu kabul edilir.

$$u(t) = \sum_{i=1}^n \phi_i \cdot q_i(t) = \Phi \cdot q(t) \quad (58)$$

Burada, Φ , modal matrisi göstermektedir. $q(t)$, zamana bağlı katsayılarına sistemin genelleştirilmiş veya normal koordinatları denir. Bu katsayılar mod şekillerinin çözüme olan katkılarını göstermektedir. Genellikle, moda karşı gelen frekans arttıkça modların davranışa olan katkıları azalır. Bu sebeple, sayısal çözümlerde ilk birkaç modla hesap yapmak bazı sistemlerde yeterli yaklaşım sağlayabilir. Yer değiştirme için yazılan Denklem (58) türevleri ile birlikte hareket denkleminde yerine yazılırsa,

$$\sum_{i=1}^n m \cdot \phi_i \cdot \ddot{q}_i(t) + \sum_{i=1}^n c \cdot \phi_i \cdot \dot{q}_i(t) + \sum_{i=1}^n k \cdot \phi_i \cdot q_i(t) = p(t) \quad (59)$$

ve Denklem (59)'un ϕ_j^t ile çarpılması halinde ise,

$$\sum_{i=1}^n \phi_j^t \cdot m \cdot \phi_i \cdot \ddot{q}_i(t) + \sum_{i=1}^n \phi_j^t \cdot c \cdot \phi_i \cdot \dot{q}_i(t) + \sum_{i=1}^n \phi_j^t \cdot k \cdot \phi_i \cdot q_i(t) = \phi_j^t \cdot p(t) \quad (60)$$

şeklinde elde edilir. Farklı doğal frekanslardan elde edilen mod vektörlerinin ortogonallik bağıntıları,

$$\phi_j^t \cdot k \cdot \phi_i = 0, \quad \phi_j^t \cdot m \cdot \phi_i = 0, \quad i \neq j \quad (61)$$

yanında, benzer ortogonallik bağıntısının

$$\phi_j^t \cdot c \cdot \phi_i = 0, \quad i \neq j \quad (62)$$

sönüm matrisi içinde geçerli olduğu kabul edilirse,

$$M_j = \phi_j^t \cdot m \cdot \phi_j, \quad K_j = \phi_j^t \cdot k \cdot \phi_j = \omega_j^2 \cdot M_j, \quad C_j = \phi_j^t \cdot c \cdot \phi_j = 2\xi_j \omega_j M_j, \quad P_j = \phi_j^t \cdot p \quad (63)$$

olmak üzere,

$$M_j \cdot \ddot{q}_j(t) + C_j \cdot \dot{q}_j(t) + K_j \cdot q_j(t) = P_j(t) \quad (64)$$

veya

$$\ddot{q}_j(t) + 2\xi_j \cdot \omega_j \cdot \dot{q}_j(t) + \omega_j^2 \cdot q_j(t) = P_j(t) / M_j \quad (65)$$

şeklinde ifade edilebilir. Verilen Denklem (62)'nin geçerli olabilmesi için c sönüm matrisinin m veya k ile orantılı bölümlerden oluştuğu kabul edilebilir (Celep, Kumbasar, 1992). Böylece Denklem (57)'de verilen ve sistemin dinamik davranışını gösteren diferansiyel denklem sistemi, genelleştirilmiş koordinat, q_j , kütle M_j , sönüm C_j ve yük P_j kullanılarak, ayrık duruma getirilmiş olur. Elde edilen her bir denklem tek serbestlik dereceli sistem için bulunanın benzeridir.

Denklem (64)'ün $t = 0$ da $q_i = 0$ ve $\dot{q}_i = 0$ başlangıç şartları altındaki serbest titreşim çözümü, Madde 1.8.2.1.1.1.2.'dekine benzer olarak,

$$q_i(t) = e^{-\xi_i \omega_i t} \left(\frac{\dot{q}_i(0) + q_i(0) \xi_i \omega_i}{\omega_{di}} \sin(\omega_{di} t) + q_i(0) \cos(\omega_{di} t) \right) \quad (66)$$

yazılabilir. Benzer şekilde sükunetten zorlanmış titreşime başlayan tek serbestlik dereceli sistem için, Madde 1.8.2.1.1.2.2. de verilmiş olan denklemin çözümü,

$$q_i(t) = \frac{1}{M_i \omega_{di}} \int_0^t P_i(\tau) \cdot e^{-\xi_i \omega_i (t-\tau)} \sin(\omega_{di}(t-\tau)) d\tau \quad (67)$$

olarak verilebilir.

Normal koordinatlar $q_i(t)$ ile yer değiştirme vektörü $u(t)$ arasındaki bağintıyı bulmak için Denklem (58) $\phi_j^t m$ ile çarpılır Denklem (61)'de verilen ortogonallik bağintıları kullanılırsa,

$$\phi_j^t \cdot m \cdot u = \phi_j^t \cdot m \cdot \phi_j \cdot q_j \quad (68)$$

veya

$$q_j(t) = \frac{1}{M_j} \phi_j^t \cdot m \cdot u \quad (69)$$

elde edilir. Sistemdeki elastik kuvvetler

$$f_s(t) = k \cdot u = k \sum_{j=1}^n \phi_j \cdot q_j \quad (70)$$

veya

$$f_s(t) = m \sum_{j=1}^n \omega_j^2 \cdot \phi_j \cdot q_j \quad (71)$$

olarak bulunur.

Zorlanmış titreşim için elde edilen bu ifadelerde,

$$\begin{bmatrix} \ddot{u}_g \end{bmatrix} = 1 \cdot \ddot{u}_g, \quad 1^t = [1, 1, \dots, 1] \quad (72)$$

olmak ve \ddot{u}_g yer hareketinin ivmesini göstermek üzere

$$p(t) = -m \cdot \ddot{u}_g \quad (73)$$

olarak yerine yazılması ile sistemin yer hareketi altındaki davranışı elde edilir. Sonuç olarak,

$$\dot{u}_i(t) = \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) \cdot e^{-\xi_i \omega_{di}(t-\tau)} \sin(\omega_{di}(t-\tau)) d\tau \quad (74)$$

$$L_i = \phi_i^t \cdot m \cdot 1 \quad (75)$$

olmak üzere çözüm,

$$q_i(t) = \frac{L_i \cdot \dot{u}_i(t)}{M_i \omega_{di}} \quad (76)$$

şeklinde bulunur. Sisteme etkiyen elastik kuvvetler Denklem (71)'den

$$f_s(t) = m \sum_{j=1}^n \frac{\omega_j^2 \cdot \phi_j \cdot L_j \cdot \dot{u}_j}{M_j \cdot \omega_{di}} \quad (77)$$

elde edilir. Toplamadaki terimler her bir modun etkisini göstermektedir. Ayrıca yer hareketinin yönünün pratik hesaplara etkisi olmadığı için Denklem (74)'de yer ivmesinin işareti hesap dışı bırakılmıştır. *Duhamel İntegrali* olarak bilinen Denklem (74)'deki $\dot{u}_i(t)$ ifadesinin mutlak değer olarak maksimumuna *Hız Spektrumu* denir.

1.8.2.1.2.2.2. Sayısal İntegrasyon Yöntemi

Çok serbestlik dereceli sistemlerde kullanılan Modların Birleştirilmesi Yöntemi, süperpozisyon kuralı kullandığı için doğrusal elastik hesapta geçerlidir. Davranışın

doğrusal elastik olmadığı durumlarda süperpozisyon ilkesi geçerli olmaz. Eğer klasik sönüm kavramı kabul edilmezse veya elastik ötesi bir davranış söz konusu ise, hareket denklemlerinin ayrıklaştırılması sonucu bulunan Modların Birleştirme Yöntemi geçerli olmaz. Bu durumda hareket denklemlerinin sayısal çözümü söz konusu olur. Yer hareketi etkisi altındaki sistemlerin çözümünde kullanılan yaygın bir yöntemde hareket denklemlerinin zaman alanında adım adım sayısal integrasyonudur (Celep ve Kumbasar 2004).

Direkt integrasyonda Dinamik Hareket Denklemi adım adım sayısal işlemler kullanılarak integre edilmektedir. Burada “direkt integrasyon” teriminden denklemlerin farklı bir forma dönüştürülmeden işlemlerin adım adım yürütüldüğü anlaşılmalıdır. Direkt sayısal integrasyon iki husus dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Bunlardan birincisi herhangi bir (t) anında dinamik denge denklemini sağlamak yerine Δt zaman aralıklarında denklemi sağlamayı amaçlamaktadır. Bunun anlamı basit olarak atalet ve sönüm kuvvetlerini içeren statik denge denklemi çözüm aralığı içerisinde her Δt zaman aralığında çözümün araştırılmasıdır. Bu nedenle statik analizde kullanılan çözüm teknikleri direkt integrasyonda ekili bir şekilde kullanılacağı gözükmemektedir. İkinci husus her Δt zaman aralığında yerdeğiştirme, hız ve ivme değerlerinin değişiminin gösterilmesidir. Bu değişim üzerinde yapılan kabullerin şekli çözümün doğruluğunu ve stabilitesini göstermektedir. Çözümde u_0 , \dot{u}_0 , \ddot{u}_0 ise $t=0$ anındaki başlangıç terimleri olarak bilinmektedir. Dinamik hareket denkleminin çözümü $t=0$ ile $t=T$ zaman aralığında dikkate alınırsa T çözüm zamanı n zaman aralığına bölünürse, ($\Delta t = T/n$) t anındaki çözüm bilindiği için bundan hareketle ($t+\Delta t$) anındaki çözüm bulunabilir. Başka bir deyişle başlangıç şartlarından hareketle Δt zaman sonraki çözüm elde edilebilir. Bu işlem çözüm aralığı boyunca devam etmektedir. Direkt integrasyona dayanan yöntemlerden, İnterpolasyona Dayanan Metodlar, Merkezi Fark Metodu, Haubolt, Wilson- θ ve Newmark Metodu en etkili olanlarıdır.

Bahsedilen yöntemlerden en çok kullanılan yöntem olan Newmark Metodu ayrıntılı bir şekilde aşağıda sunulmuştur. Diğer yöntemlerden İnterpolasyona Dayanan Metodlar, sisteme uygulanan kuvveti dikkate alan bir yöntem olup lineer sistemler için oldukça etkili olan bir sayısal integrasyon yöntemidir. Eğer Δt zaman aralıkları küçük ise yapılan interpolasyon yöntemi doğru sonuç verir. Merkezi Fark ve Haubolt Metodu ise yer değiştirmenin zamana bağlı türevleri (hız ve ivme) bir sonlu fark yaklaşımına dayanmaktadır. Wilson- θ Metodu ise Lineer İvme Metodunu değiştirerek ivmenin genelleştirilmiş zaman aralığı boyunca lineer olarak değiştiği kabulüne dayanmaktadır.

1.8.2.1.2.2.2.1. Newmark Yöntemi

Newmark Yönteminde birinci terim aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{u}_{i+1} = a_1 \dot{u}_i + a_2 \ddot{u}_i + a_3 \ddot{u}_{i+1} \quad (78)$$

Yer değiştirmenin $u = 1, t, t^2$ değerleri sırasıyla türevlenip Denklem (78)'de yerine yazılırsa;

$$u = 1 \quad \dot{u} = 0 \quad \ddot{u} = 0 \rightarrow 0 = a_1 0 + a_2 0 + a_3 0 \quad (79)$$

herhangi bir katsayı bulunmaz. Yer değiştirmenin diğer değeri ($u = t$) için;

$$u = t \quad \dot{u} = 1 \quad \ddot{u} = 0 \rightarrow 1 = a_1 1 + a_2 0 + a_3 0 \rightarrow \alpha_1 = 1 \quad (80)$$

a_1 katsayısı bulunur. Yer değiştirmenin diğer değeri ($u = t^2$) için;

$$u = t^2 \quad \dot{u} = 2t \quad \ddot{u} = 2 \rightarrow 2\Delta t = a_1 2t + a_2 2 + a_3 2 \quad (81)$$

olarak yazılır. $i=0$ hesap adımında $t=0$ ve $i+1$ hesap adımında yani Δt adım sonrası için Denklem (81) düzenlenirse;

$$2\Delta t = a_1 2 \cdot 0 + a_2 2 + a_3 2 \quad (82)$$

olur. Denklem (82)'nin sonucu; $a_2 + a_3 = \Delta t$ olarak düzenlenir.

$$a_3 = \gamma \Delta t \quad (83)$$

olarak seçilirse,

$$a_2 = (1-\gamma) \Delta t \quad (84)$$

olur. a_1, a_2, a_3 katsayıları Denklem (78) de yerine yazılırsa birinci terim elde edilmiş olur.

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + (1 - \gamma)(\Delta t)\ddot{u}_i + \gamma(\Delta t)\ddot{u}_{i+1} \quad (85)$$

Newmark Yöntemindeki ikinci terimde aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$u_{i+1} = b_1 u_i + b_2 \dot{u}_i + b_3 \ddot{u}_i + b_4 \ddot{u}_{i+1} \quad (86)$$

Yer değiştirmenin $u = 1, t, t^2$ değerleri sırasıyla türevlenip Denklem (86)'de yerine yazılırsa;

$$u = 1 \quad \dot{u} = 0 \quad \ddot{u} = 0 \rightarrow 1 = b_1 1 + b_2 0 + b_3 0 + b_4 0 \rightarrow b_1 = 1 \quad (87)$$

b_1 katsayısı bulunur. Yer değiştirmenin diğer değeri ($u = t$) için;

$$u = t \quad \dot{u} = 1 \quad \ddot{u} = 0 \rightarrow \Delta t = b_1 0 + b_2 1 + b_3 0 + b_4 0 \rightarrow b_2 = \Delta t \quad (88)$$

b_2 katsayısı bulunur.. Yer değiştirmenin diğer değeri ($u = t^2$) için;

$$u = t^2 \quad \dot{u} = 2t \quad \ddot{u} = 2 \rightarrow \Delta t^2 = b_1 0 + b_2 2 \cdot 0 + b_3 2 + b_4 2 \quad (89)$$

olarak yazılır. Denklem (89)'nin sonucu; $b_3 + b_4 = \Delta t^2/2$ olarak düzenlenir.

$$b_4 = \beta \Delta t^2 \quad (90)$$

olarak seçilirse,

$$b_3 = \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t^2 \quad (91)$$

olur. b_1, b_2, b_3, b_4 katsayıları Denklem (86) da yerine yazılırsa Newmark Yönteminin ikinci terim elde edilmiş olur.

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t)\dot{u}_i + (0.5 - \beta)(\Delta t)^2\ddot{u}_i + \beta(\Delta t)^2\ddot{u}_{i+1} \quad (92)$$

Yöntemin daha doğru sonuç vermesi için,

$$\gamma = \frac{1}{2} \text{ ve } \frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4} \quad (93)$$

olarak seçilmesi gerekir.

i anındaki hareket denklemi;

$$m\ddot{u}_i + c\dot{u}_i + ku_i = p_i \quad (94)$$

$i+1$ anındaki hareket denklemi;

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\dot{u}_{i+1} + ku_{i+1} = p_{i+1} \quad (95)$$

Newmark Metodunun iki özel hali bulunmaktadır. Bunlar;

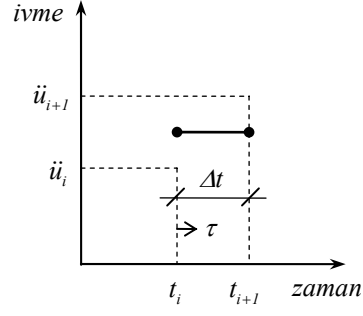
Eğer i adımdan $i+1$ adımına kadar ivmenin değişimi sabit bir değer olduğu kabul edilirse, buna ortalama ivme metodu denir.

$$\ddot{u} = \frac{\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}}{2} \quad (96)$$

Eğer i adımdan $i+1$ adımına kadar ivmenin değişimi lineer olduğu kabul edilirse, buna da lineer ivme metodu denir.

$$\ddot{u} = \frac{\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i}{\Delta t} \tau \quad (97)$$

(1) Ortalama İvme Metodu : $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\beta = \frac{1}{4}$ alınırsa Denklem (85) ve Denklem (92)'de Δt zaman aralığında ivmenin değişimi sabittir veya ortalama bir değerdir.



Şekil 1.25. Ortalama ivme grafiği

$$\ddot{u}(\tau) = \frac{1}{2}(\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \quad (98)$$

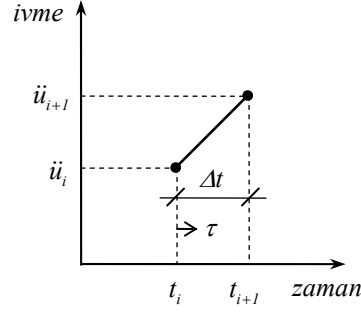
$$\dot{u}(\tau) = \dot{u}_i + \frac{\tau}{2}(\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \quad (99)$$

$$u(\tau) = u_i + \dot{u}_i\tau + \frac{\tau^2}{4}(\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \quad (100)$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \frac{\Delta t}{2}(\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \quad (101)$$

$$u_{i+1} = u_i + \dot{u}_i\Delta t + \frac{\Delta t^2}{4}(\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \quad (102)$$

(2) Linear İvme Metodu : $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\beta = \frac{1}{6}$ alınırsa Denklem (85) ve Denklem (92)'de Δt zaman aralığında ivmenin değişimi lineerdir.



Şekil 1.26. Lineer ivme grafiği

$$\ddot{u}(\tau) = \ddot{u}_i + \left(\frac{\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i}{\Delta t} \right) \tau \quad (103)$$

$$\dot{u}(\tau) = \dot{u}_i + \ddot{u}_i \tau + \frac{\tau^2}{2\Delta t} (\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i) \quad (104)$$

$$u(\tau) = u_i + \dot{u}_i \tau + \ddot{u}_i \frac{\tau^2}{2} + \frac{\tau^3}{6\Delta t} (\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i) \quad (105)$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \ddot{u}_i \Delta t + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i) \rightarrow \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \quad (106)$$

$$u_{i+1} = u_i + \dot{u}_i \Delta t + \ddot{u}_i \frac{\Delta t^2}{2} + \frac{\Delta t^3}{6\Delta t} (\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i) \rightarrow u_{i+1} = u_i + \dot{u}_i \Delta t + \Delta t^2 \left(\frac{1}{3} \ddot{u}_i + \frac{1}{6} \ddot{u}_{i+1} \right) \quad (107)$$

Newmark Metodunun Artımsal Formülasyonu :

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + (1 - \gamma)(\Delta t)\ddot{u}_i + \gamma(\Delta t)\ddot{u}_{i+1} \quad (108)$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t)\dot{u}_i + (0.5 - \beta)(\Delta t)^2\ddot{u}_i + \beta(\Delta t)^2\ddot{u}_{i+1} \quad (109)$$

Denklem (108) artımsal olarak ifade edilirse;

$$\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i = (\Delta t)\ddot{u}_i - \gamma(\Delta t)\ddot{u}_i + \gamma(\Delta t)\ddot{u}_{i+1} \rightarrow \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i = (\Delta t)\ddot{u}_i + \gamma(\Delta t)[\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i] \quad (110)$$

$$\Delta \dot{u}_i = (\Delta t) \ddot{u}_i + (\gamma \Delta t) \Delta \ddot{u}_i \quad (111)$$

Denklem (109) artımsal olarak ifade edilirse;

$$u_{i+1} - u_i = (\Delta t) \dot{u}_i + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_i + \beta (\Delta t)^2 [\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i] \quad (112)$$

$$\Delta u_i = (\Delta t) \dot{u}_i + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_i + \beta (\Delta t)^2 \Delta \ddot{u}_i \quad (113)$$

Denklem (113)'den $\Delta \ddot{u}_i$ çekilecek olursa;

$$\Delta \ddot{u}_i = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta u_i - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i \quad (114)$$

Denklem (114), Denklem (111)'da yerine yazılırsa;

$$\Delta \dot{u}_i = (\Delta t) \ddot{u}_i + (\gamma \Delta t) \left[\frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta u_i - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i \right] \quad (115)$$

$$\Delta \dot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i \quad (116)$$

Artımsal hareket denklemi;

$$m \Delta \ddot{u}_i + c \Delta \dot{u}_i + k \Delta u_i = \Delta p_i \quad (117)$$

Denklem (114) ve Denklem (116), Denklem (117)'de yerine yazılır ve düzenlenirse;

$$\left[k + \frac{\gamma}{\beta (\Delta t)} c + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} m \right] \Delta u_i = \Delta p_i + \left[\frac{1}{\beta (\Delta t)} m + \frac{\gamma}{\beta} c \right] \dot{u}_i$$

$$+ \left[\frac{l}{2\beta} m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - l \right) c \right] \ddot{u}_i \quad (118)$$

Denklem (118) şu şekilde ifade edilebilir;

$$\hat{k} \Delta u_i = \Delta \hat{p} \quad (119)$$

$$\hat{k} = \left[k + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} c + \frac{l}{\beta(\Delta t)^2} m \right] \quad (120)$$

$$\Delta \hat{p} = \Delta p_i + \left[\frac{l}{\beta(\Delta t)} m + \frac{\gamma}{\beta} c \right] \dot{u}_i + \left[\frac{l}{2\beta} m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - l \right) c \right] \ddot{u}_i \quad (121)$$

Denklem (119)'dan;

$$\Delta u_i = \frac{\Delta \hat{p}}{\hat{k}} \quad (122)$$

Adım adım çözümde ilk önce Δu_i elde edilir. Daha sonra Denklem (114) ve Denklem (116) yardımıyla $\Delta \dot{u}_i$ ve $\Delta \ddot{u}_i$ elde edilir ve bir sonraki adıma ait değerler,

$$\begin{aligned} u_{i+1} &= u_i + \Delta u_i \\ \dot{u}_{i+1} &= \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i \\ \ddot{u}_{i+1} &= \ddot{u}_i + \Delta \ddot{u}_i \end{aligned} \quad (117)$$

şeklinde elde edilir.

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{p_{i+1} - c\dot{u}_{i+1} - ku_{i+1}}{m} \quad (118)$$

Newmark metodunun stabil olması için aşağıdaki mantıksal ifadeyi sağlaması gerekir. T_n yapı doğal periyodunu ifade etmektedir.

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma-2\beta}} \quad (119)$$

Ortalama ivme metodu için ($\gamma = 1/2, \beta=1/4$),

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq \infty \quad (120)$$

Lineer ivme metodu için ($\gamma = 1/2, \beta=1/6$),

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq 0.551 \quad (121)$$

Newmark Metodunda Hesap Adımları :

$$\text{Ortalama ivme metodu için: } \gamma = \frac{1}{2} \rightarrow \beta = \frac{1}{4} \quad (122)$$

$$\text{Lineer ivme metodu için: } \gamma = \frac{1}{2} \rightarrow \beta = \frac{1}{6} \quad (123)$$

1. Adım: Başlangıç hesaplamaları

$$\text{a) } \ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m} \quad (124)$$

b) Δt seçilir

$$\text{c) } \hat{k} = k + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)}c + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}m \quad (125)$$

$$\text{d) } a = \frac{1}{\beta\Delta t} + \frac{\gamma}{\beta}c, \quad b = \frac{1}{2\beta} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c \quad (126)$$

2. Adım: i zaman adımı için gerekli hesaplamalar

$$\text{a) } \Delta \hat{p}_i = \Delta p_i + a\dot{u}_i + b\ddot{u}_i \quad (127)$$

$$\text{b) } \Delta u_i = \frac{\Delta \hat{p}_i}{\hat{k}} \quad (128)$$

$$\text{c) } \Delta \dot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i \quad (129)$$

$$\text{d) } \Delta \ddot{u}_i = \frac{I}{\beta (\Delta t)^2} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta (\Delta t)} \dot{u}_i - \frac{I}{2\beta} \ddot{u}_i \quad (130)$$

$$\begin{aligned} \text{e) } u_{i+1} &= u_i + \Delta u_i \\ \dot{u}_{i+1} &= \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i \\ \ddot{u}_{i+1} &= \ddot{u}_i + \Delta \ddot{u}_i \end{aligned} \quad (131)$$

3. Adım: Bir sonraki zaman adımı için, yani $i+1$ zaman adımı, 2. adımda yapılan hesaplamalar i yerine $i+1$ alınarak tekrarlanır.

1.8.2.2. Tepki Spektrumları

Zaman alanında sayısal çözümlenme, yerdeğiştirme ve kesit etkisi gibi bir sistem parametresinin zamana bağlı olan değişimini verir. Ancak, taşıyıcı sistemin boyutlandırılmasında genel olarak bu parametrelerin en büyük değeri etkili olur. Bu nedenle, uzun ve yorucu olan sayısal çözümlenmeye ihtiyaç kalmadan, deprem hareketinin spektrumu kullanılarak, boyutlandırmada esas olan değerlerin elde edilmesi önemli ölçüde kolaylık sağlar. Yer hareketinin spektrumunun elde edilmesi tek serbestlik dereceli sisteme dayandığı için, bu tür işlem tek serbestlik dereceli bir sistem için kolayca yapılabilir (Celep ve Kumbasar, 2004).

Tek serbestlik dereceli sistemin deprem etkisi altında hareket denklemi,

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{u}_g \quad (132)$$

şeklinde yazılabilir. Verilen bir depremin spektrumu, bu deprem etkisine maruz kalan tek serbestlik dereceli bir sistemin tepkisinin (ivme, hız ve yerdeğiştirme) maksimumunu, sabit sönüm oranları için serbest titreşim periyoduna bağlı olarak gösteren eğridir. Bu denklemden sistemin yapacağı rölatif yer değiştirmenin (u), hızın (\dot{u}) yada ivmenin (\ddot{u}) belirlenmesi, yapının deprem hareketine karşı sırasıyla yerdeğiştirme, hız yada ivme spektrumlarına karşı gelmektedir. Bunların belirlenmesi için literatürde çeşitli yöntemler verilmiştir. Bu yöntemlerden birisi Madde 1.8.2.1.2.2.2 altında verilmiştir. Verilmiş olan sayısal integrasyon yöntemi ile yer değiştirme, hız ve ivme tepkilerinin zamanla değişimi hesaplanabilir. Ancak bunların zamanla değişimleri yerine genellikle bunların maksimum değerlerinin belirlenmesi deprem hesapları için yeterli kabul edilmektedir. Yer değiştirme, hız ve ivme tepkilerinin maksimum değerleri sırasıyla S_d , S_v ve S_a ile gösterilmektedir.

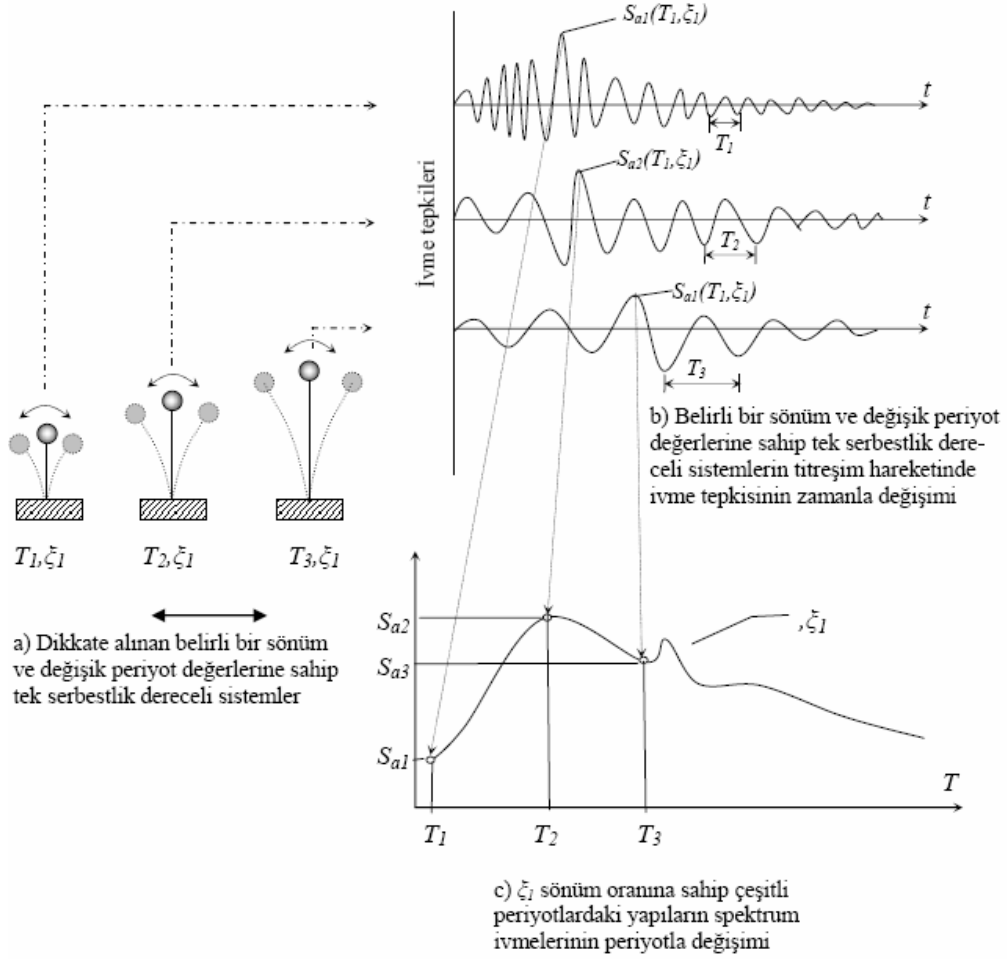
Sönümün küçük olmasından dolayı $\omega_d = \omega$ ve $T_d = T$ olarak yazılabileceği daha önce de ifade edilmişti. $S_d(\xi, T)$, $S_v(\xi, T)$, ve $S_a(\xi, T)$, fonksiyonları sönümsüz doğal periyoda göre çizilirse sırasıyla bağıl yer değiştirme spektrumu, bağıl hız spektrumu ve mutlak ivme spektrumu elde edilir. Genel bir ifadeyle bunlara deprem spektrumları denilmektedir. Kolaylık olsun diye, yer değiştirme tepki spektrumu, hız tepki spektrumu ve ivme tepki spektrumu denildiği gibi hepsine birden tepki spektrumu da denilmektedir (Livaoglu, 2001). Doğal periyodu $T < 3s$ olan yapılar için bu tepki spektrumları arasında,

$$S_a(\xi, T) \approx \omega S_v(\xi, T) \approx \omega^2 S_d(\xi, T) \quad (133)$$

yazılabilir (Celep ve Kumbasar, 2004; Durmuş, 2004). Burada yer değiştirme ve hız spektrumu sistemi yere göre rölatif yerdeğiştirme ve hızı kullanılarak elde edilirken, ivme spektrumunda sistemin mutlak ivmesi göz önüne alınmaktadır.

$$\begin{aligned} S_d(\xi, T) &= [u(t, \xi, \omega)]_{max} \\ S_v(\xi, T) &= [\dot{u}(t, \xi, \omega)]_{max} \\ S_a(\xi, T) &= [\ddot{u}(t, \xi, \omega) + \ddot{u}_g]_{max} \end{aligned} \quad (134)$$

Livaoğlu 2001'deki çalışmasında spektrumları nasıl belirlendiğini şematik olarak açıklamıştır (Şekil 1.27). Şekil 1.27'de sadece bir sönüm oranı (ζ_1) için çizilmiştir. Farklı sönüm oranları için aynı işlemler tekrarlanarak farklı eğriler çizilebilir.



Şekil 1.27. Deprem tepki spektrumlarının şematik olarak açıklanması (Livaoğlu, 2001)

1.8.2.3. Minarelerin Deprem Hesabında Kullanılacak Yöntemler

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007) ülkemizde tüm yapılar için geçerli olan tek deprem yönetmeliğidir. Deprem Yönetmeliğinde minareler ile ilgili herhangi bir hesap veya tasarım kriteri ortaya konulmamıştır. Ancak Deprem Yönetmeliği Madde 2.8 (Bina Türü Olmayan Yapılar) Tablo 2.8'de kütlesi yüksekliği boyunca yayılı, yerinde dökülmüş betonarme silo, endüstri bacaları ve benzeri taşıyıcı sisteme sahip yapıların deprem hesabı, taşıyıcı sistemi yeterince

tanımlayan ayırık dinamik serbestlik dereceleri göz önüne alınarak Mod Birleştirme Yöntemi (MBY) veya Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemine (ZTAHY) göre yapılması şartı getirmektedir.

Minarelerde kule türü bir yapı olup, şerefelerin dışında kütlesi yüksekliği boyunca yayılıdır. Deprem Yönetmeliğinde belirtilen kritere göre minarelerin deprem hesabında yarı dinamik bir yöntem olan Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi (EDYY) yeterli olmayacaktır. Bu yöntem sadece karşılaştırma amacıyla kullanılabilir. Minarelerin deprem hesabında, genel durumlar için geçerli, dinamik yöntemler olan Mod Birleştirme Yöntemi veya Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi kullanılacak.

Tezcan ve Yavaş, 2000'deki çalışmalarında EDYY'nin kule tipi yapılar için moment değerlerinin yapının üst kısımlarında %25'e varan oranlarda daha fazla çıktığını dolayısıyla statik yükün dinamik yüke oranının rölatif olarak büyük olması güvenli tarafta kalmak için tercih edilebileceğini belirtmişlerdir. Celep ve Kumbasar, 2004; DBYBHY, 2007; Doğançün ve Livaoğlu 2001'de MBY sonuçlarının EDYY sonuçları ile karşılaştırmayı öngörmüşlerdir.

Bu tez kapsamında Minarelerin deprem yükü altındaki davranışları MBY ve ZTAHY ile ortaya konacak, MBY ile ZTAHY sonuçları ve MBY ile EDYY sonuçları karşılaştırılacaktır.

1.8.2.3.1. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi

Eşdeğer Değer Deprem Yüğü Yönteminde bölgenin, zeminin ve yapının belirli özellikleri göz önüne alınarak Eşdeğer taban kesme kuvveti hesaplanır. Gerçekte Mod Süperpozisyonu Yönteminin basitleştirilmiş şeklidir. Eşdeğer Deprem Yüğü hesabında yapının her iki yönü için 1. modları dikkate alınarak yapılan eşdeğer statik kuvvet hesabının, çok yüksek ve çok özel yapıların dışında, yeterli bir yaklaşımı sağladığı kabul edilir. Yapının deprem süresi boyunca yapacağı titreşim özellikleri dikkate alınmadan maksimum değerlere göre statik yükler belirlenir.

Toplam eşdeğer deprem yükü (V_t), taban kesme kuvveti olarak bilinir ve W toplam yapı ağırlığı olmak üzere,

$$V_t = W \frac{A(T_1)}{R_d(T_1)} \geq 0.10 A_o IW \quad (135)$$

şeklinde belirlenir. Denklem (135) R_a deprem yükü azaltma katsayısı taşıyıcı sistem davranış katsayısına (R) ve yapı birinci periyoduna (T_1) bağlı olarak Tablo 1.4'deki gibi belirlenmektedir. DBYBHY Tablo 2.8'de kütlesi yüksekliği boyunca yayılı olan yapılar için davranış katsayısı $R=3$ olarak belirtilmiştir.

Tablo 1.4. Deprem yükünü azaltma katsayısı $R_a(T)$

Periyot aralığı	$R_a(T)$
$0 \leq T \leq T_A$	$1.5 + (R - 1.5)(T_1/T_A)$
$T > T_A$	R

$A(T_1)$ spektral ivme katsayısı olmak üzere,

$$A(T_1) = A_o I S(T_1) \quad (136)$$

şeklinde belirlenir. A_o etkin yer ivmesi katsayısını, I yapı önem katsayısını, $S(T_1)$ 1. moda ait spektrum katsayısını ifade etmektedir. Minareler, insanların yoğun olarak yaşadığı bölgelerde bulduklarından, insanların kısa süreli ve yoğun olarak buldukları camilerin yakınında veya bitişik inşa edildiklerinden Deprem Yönetmeliğine göre yapı önem katsayısı $I=1.2$ alınması gerekmektedir. A_o etkin yer ivmesi katsayısı DBYBHY'de Tablo 1.5'deki gibi verilmiştir.

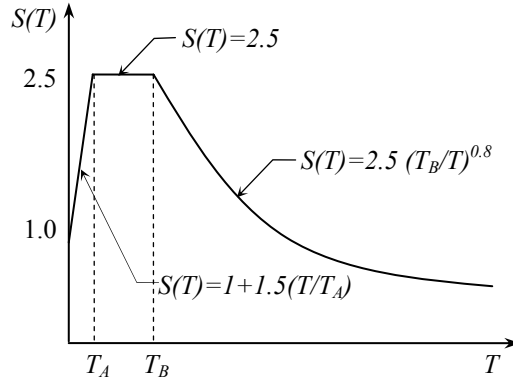
Tablo 1.5. Etkin yer ivmesi katsayısı (A_o)

Deprem Bölgesi	A_o
1	0.4
2	0.3
3	0.2
4	0.1

Spektrum katsayısı Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemine göre deprem hesabında zeminle ilgili olarak kullanılan parametre olmaktadır. Bu katsayı yerel zemin koşullarına, yapı doğal periyoduna (T) bağlı olarak belirlenmektedir. Spektrum katsayıları,

$$\begin{aligned}
S(T_1) &= 1 + 1.5(T_1/T_A) & (0 \leq T_1 \leq T_A) \\
S(T_1) &= 2.5 & (T_A < T_1 \leq T_B) \\
S(T_1) &= 2.5(T_B/T_1)^{0.8} & (T_B < T_1)
\end{aligned} \tag{137}$$

ifadesiyle Deprem Yönetmeliğinde verilmiştir. Burada; T_A ve T_B saniye olarak Zemin Spektrum Karakteristik Periyotlarını göstermektedir. Spektrum katsayısında başlangıçta yükselen eğri bu iki değer arasında en büyük değerine ulaşmakta ve yapı periyodunun büyümesi ile spektrum katsayısı küçülmektedir. Deprem yönetmeliğinde bu katsayının en büyük değeri 2.5 olarak sınırlandırılmaktadır. Burada vurgulanması gereken bir husus, bu şekilde verilen diyagramın (Şekil 1.28) spektrum ivmesini göstermediğini dolayısıyla da buradan alınan değerlerin doğrudan spektrum ivmesi gibi kullanılmayacağıdır. Yani yönetmelikte tanımlanan spektrum, yer çekimi ivmesi (g) ile boyutsuzlaştırılmış ivme spektrumuna karşılık gelmektedir. Ayrıca spektrum değişimi sönüm oranına bağlı değildir, ortalama bir sönüm oranı kullanılarak basitleştirilmiştir.



Şekil 1.28. Spektrum katsayısının periyotla değişim grafiği

Yerel zemin sınıfları ve bu zemin ait spektrum karakteristik periyotları (T_A ve T_B) Tablo 1.6'de verilmiştir.

Tablo1.6. Yerel zemin sınıfları ve zemin karakteristik periyotları (T_A ve T_B)

Yerel Zemin Sınıfı	T_A (s)	T_B (s)
Z1	0.10	0.30
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90

1.8.2.3.2. Mod Birleştirme Yöntemi

Mod Birleştirme Yöntemi modal bir çözümlerdir. Bu yöntemde toplam deprem yükü, taban kesme kuvveti, kesit tesirleri (iç kuvvet bileşenleşenleri) ve yer değiştirmeler gibi büyüklüklerin zamanla değişimleri değil, bunların maksimum değerleri dikkate alınarak çözümlenmektedir. Zaman Tamın Alanındaki analizden farklı olarak iç kuvvet değerleri, yapıda yeterli sayıda doğal titreşim modunun her biri için belirlenen maksimum katkılarının istatistiksel olarak birleştirilmesi ile hesaplanmaktadır. İstatistiksel olarak belirlemenin nedeni, dikkate alınacak olan mod katkılarının farklı zamanlarda meydana gelmesidir. Mod katkılarının mutlak değerlerinin doğrudan toplanması halinde büyük değerler hesaplanmakta ve bu değerler gerçekçi olmamaktadır. Mod katkılarının birleştirilmesi için Deprem Yönetmeliği'nde Karelerinin Toplamının Kare Kökü Kuralı (SRSS) ve Tam Karesel Birleştirme Kuralı (CQC) önerilmektedir.

Bunlardan SRSS kuralının uygulanabilmesi için dikkate alınan iki periyottan küçüğünün büyüğüne oranının 0.8 den küçük olması gerekmektedir. Aksi durumda Tam Karesel Birleştirme Kuralının kullanılması zorunlu olmaktadır. SRSS kuralında hesabı istenen büyüklük, her bir modun katkısına bağlı olarak

$$r(t) = \sqrt{r_1^2(t) + r_2^2(t) + \dots + r_n^2(t)} \quad (138)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. CQC kuralında ise modlarda eşit sönüm dikkate alınması halinde, korelasyon katsayısı (ρ_{in}),

$$\beta_{in} = \frac{\omega_i}{\omega_n} \quad (139)$$

olmak üzere,

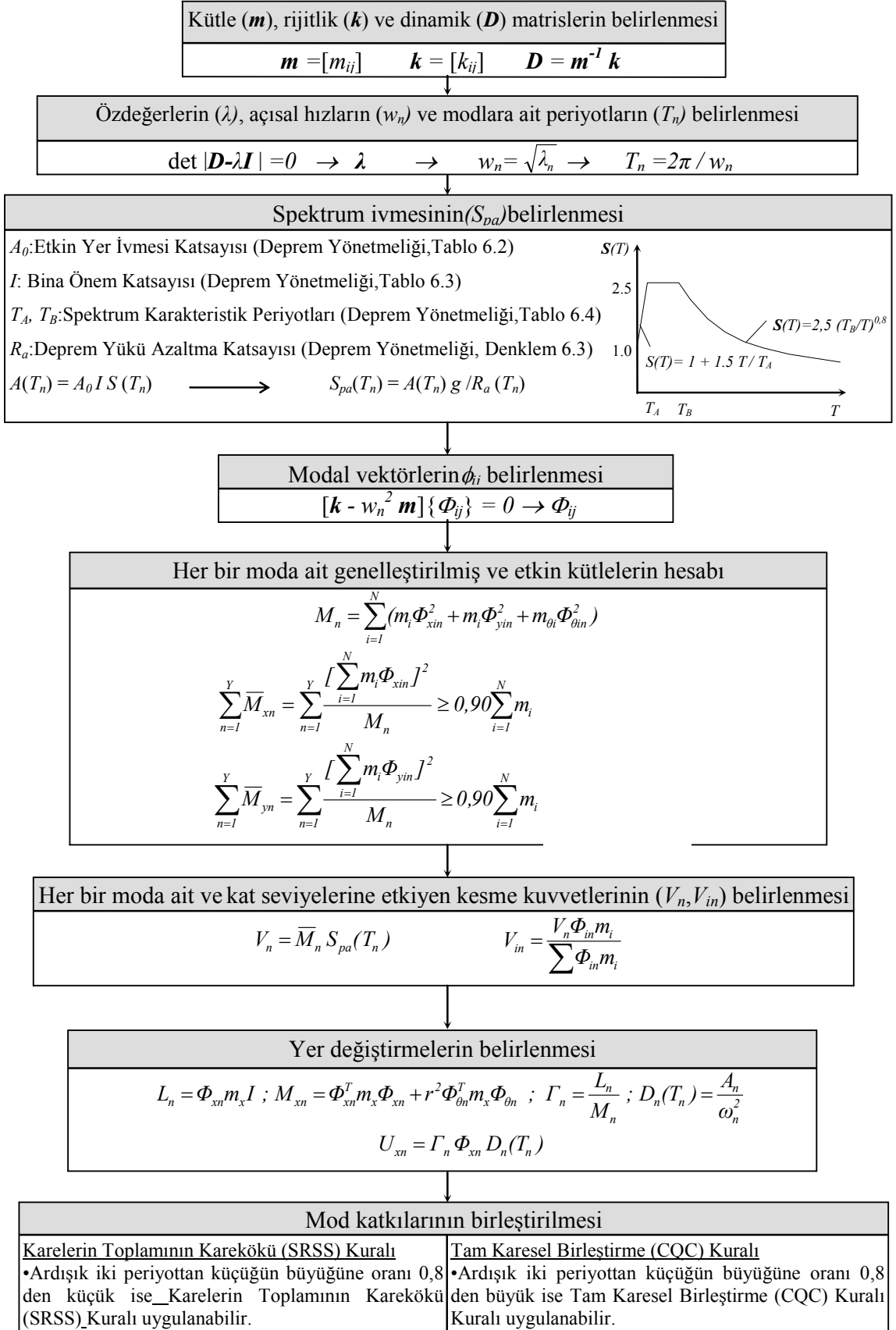
$$\rho_{in} = \frac{8\xi^2(1+\beta_{in})\beta_{in}^{3/2}}{(1-\beta_{in}^2)^2 + 4\xi^2(1+\beta_{in})^2} \quad (140)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. Burada yapının deprem hesabı için istenen büyüklük ise,

$$r(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^Y \sum_{n=1}^Y \rho_{in} r_i r_n} \quad (141)$$

Hesaba katılacak mod sayısı konusunda bütün yönetmeliklerde bazı kısıtlamalar getirilmektedir. Örnek olarak Deprem Yönetmeliğinde hesaba katılacak moda ait toplam etkili kütle, toplam kütlein %90'ından az olamaz. Bu konu üzerinde yapılan bir çok çalışmada belirtildiği gibi genelde toplam kütlein %80'ni hesaba katarak yüksek modların etkisinin dikkate alındığı düşünülmektedir. Fakat bu kabul sonuçların doğruluğuna artırıcı bir yönde etki yapmamaktadır (Ju ve diğ, 2000).

Doğangün ve Livaoglu 2001'deki çalışmalarında bina türü yapılar için Mod Birleştirme Yönteminin hesap adımlarını Şekil 1.29'deki gibi özetlemişlerdir. Bu akış diyagramı kule türü yapılara uyarlanırsa, M_n genelleştirilmiş kütle, \bar{M}_n efektif kütle, ve $D_n(T)$ spektral yer değiştirme değerlerini, d çapını, r^2 ise $d^2/6$ değerini göstermektedir.



Şekil 1.29. Mod Birleştirme Yöntemi ile hesap için akış diyagramı

1.8.2.3.3. Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi

En çok zaman alan bu çözümlemede, taşıyıcı sistem, zaman alanında boyutlama için kabul edilen benzetilmiş veya gerçek deprem hareketleri esas alınarak, adım adım çözülür. Taşıyıcı sistemin davranışı elastik kabul edileceği gibi daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için elastik ötesi davranışta hesaba katılabilir. Yalnız bu durumda her bir yükleme adımı için ayrı bir rijitlik matrisi oluşturulması gerekir. Kabul edilen deprem hareketi ve taşıyıcı sistemin davranışı için yapılan mesnet kabulleri, kesit atalet momenti değerlerinin geçerliliği oranında elde edilen sonuçların güvenilir olduğu unutulmamalıdır. Bu çözümleme yöntemi, araştırma amacıyla kullanılmanın yanında, daha basit yöntemlerle yapılan çözümlemelerde bulunan sonuçların yorumlanmasında da kullanılır (Celep, Kumbasar, 1992).

Genel hareket denklemi,

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (142)$$

şeklinde olduğu daha önce verilmişti. Yer hareketi etkisinde hareket denkleminin,

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \quad (143)$$

şeklinde olacağı ve Madde 1.8.2.1.2.2'de bu denklemin çözüm teknikleri üzerinde durulmuştur. Madde 1.8.2.1.2.2.2'de verilmiş olan direkt sayısal yöntemler yardımıyla bu hareket denkleminin adım adım çözüm tekniği ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Bu yöntemde çözüm için daha önce kaydedilen gerçek ya da yapay yollarla üretilen benzetilmiş ivme değerleri kullanılmaktadır. Bir yapının deprem hesabı için bir deprem kaydının kullanılması için doğru olmamaktadır. Çünkü aynı özelliklere sahip iki deprem bilindiği kadarıyla meydana gelmemiştir. Bu nedenle, deprem yönetmeliğinde en az üç kaydedilmiş ya da benzetilmiş ivme kaydının kullanılması öngörülmektedir. Bu ivme kayıtlarında iki koşul aranmaktadır. Birincisi, kuvvetli yer hareketi kısmının süresi, ivmelerin zarfları $\pm 0.05g$ den az olmamak koşulu ile yapının 1. periyodundan ve 15 s'den az olmamalıdır. İkincisi, ivme kaydına göre %5 sönüm oranı için hesaplanacak spektral ivme değeri $S_a > 0.9 g A(T_1)$ olmalıdır.

2.YAPILAN ÇALIŞMALAR BULGULAR VE İRDELEMELER

Bu bölümde betonarme minarelerin deprem karşısındaki dinamik davranışları incelenecektir. Minarelerin, depremde olası yıkılma sebepleri irdelenecektir. Günümüzde yapılan minarelerin büyük bir çoğunluğunun betonarme olmasından dolayı da betonarme minareler için alternatif bir taşıyıcı sistem üzerinde durulacaktır.

Analizlerde kullanılan minare modellerinde ya var olan minareler yada 1999 yılında Marmara bölgesinde meydana gelen depremlerde hasar gören yada yıkılan minarelerin ortalama boyutları, malzeme özellikleri ve zemin şartları seçilmiştir.

2.1. Geleneksel Betonarme Minarelerin Dinamik Analizi

2.1.1. Minarenin Geometrik ve Kesit Özellikleri

Gerek minareler için yapılan bilimsel çalışmalarda, gerekse deprem sonrasında incelemelerde bulunan diğer araştırmacıların tespitlerine göre çok farklı yüksekliklerde minareler bulunmaktadır. Sezen ve diğ. 2008 de yaptıkları çalışmada Türkiye de betonarme minareler 10 m den 55 m ye kadar çeşitli yüksekliklerde inşa edildiği belirtilmiştir. Bu durumda yapılan incelemelerde en yaygın olarak görülen ve ortalama boyutlara yakın ölçü ve detaya sahip minare tipini örnek minare olarak seçmek, Türkiye'deki minareleri temsil açısından daha uygun olacaktır. Bu bağlamda temsili minare için aşağıda açıklanan boyutlar ve detaylar seçilmiştir. Genel olarak tek şerefeli minarelerin yükseklikleri 25 m, çift şerefeli minarelerin yükseklikleri ise 30 m civarında değişmektedir. Bu incelemelere dayalı olarak minare yüksekliği 30.0 m olarak belirlenmiştir. Yine gözlemlere dayalı olarak, bu yüksekliğin, 5.0 m si külah, 17.0 m si gövde, 2.0 m si geçiş elemanı ve 6.0 m si kaide yüksekliği olarak seçilmiştir. Dairesel gövde kesitlerinin çapı 1.70 m ile 2.0 m arasında değişmekte olup bu çalışmada 1.74 m, gövde kalınlığı ise 0.18 m olarak dikkate alınmıştır. Merdiven, 36° merkez açılı ve 0.20 m yüksekliğinde basamaklardan ve merkezde çapı 0.30 m olan sütundan meydana gelip ikinci şerefeye kadar devam etmektedir. Temsili minareye ilişkin kesit ve detaylar Şekil 2.1'de görülmektedir.

Minare 4.0m x 4.0m x 4.0m boyutlarında çok rijit radye temele ankastre olarak oturmaktadır. Deprem bölgelerinde yapılan hasar incelemelerinden temelden hasar gören minarelere rastlamadığından hesaplarda temeller dikkate alınmamış ve minarenin temele ankastre oturduğu kabul edilmiştir.

2.1.2. Minarenin Malzeme Özellikleri

Analizde kullanılacak malzeme özellikleri de belirlenirken, yapılan incelemelerde minarelerde en yaygın olarak kullanılan malzeme özelliklerini göz önünde tutulmuştur. Böylece Türkiye'deki minareler malzeme bakımında da temsil edilmiştir. Seçilen malzeme özellikleri şöyledir;

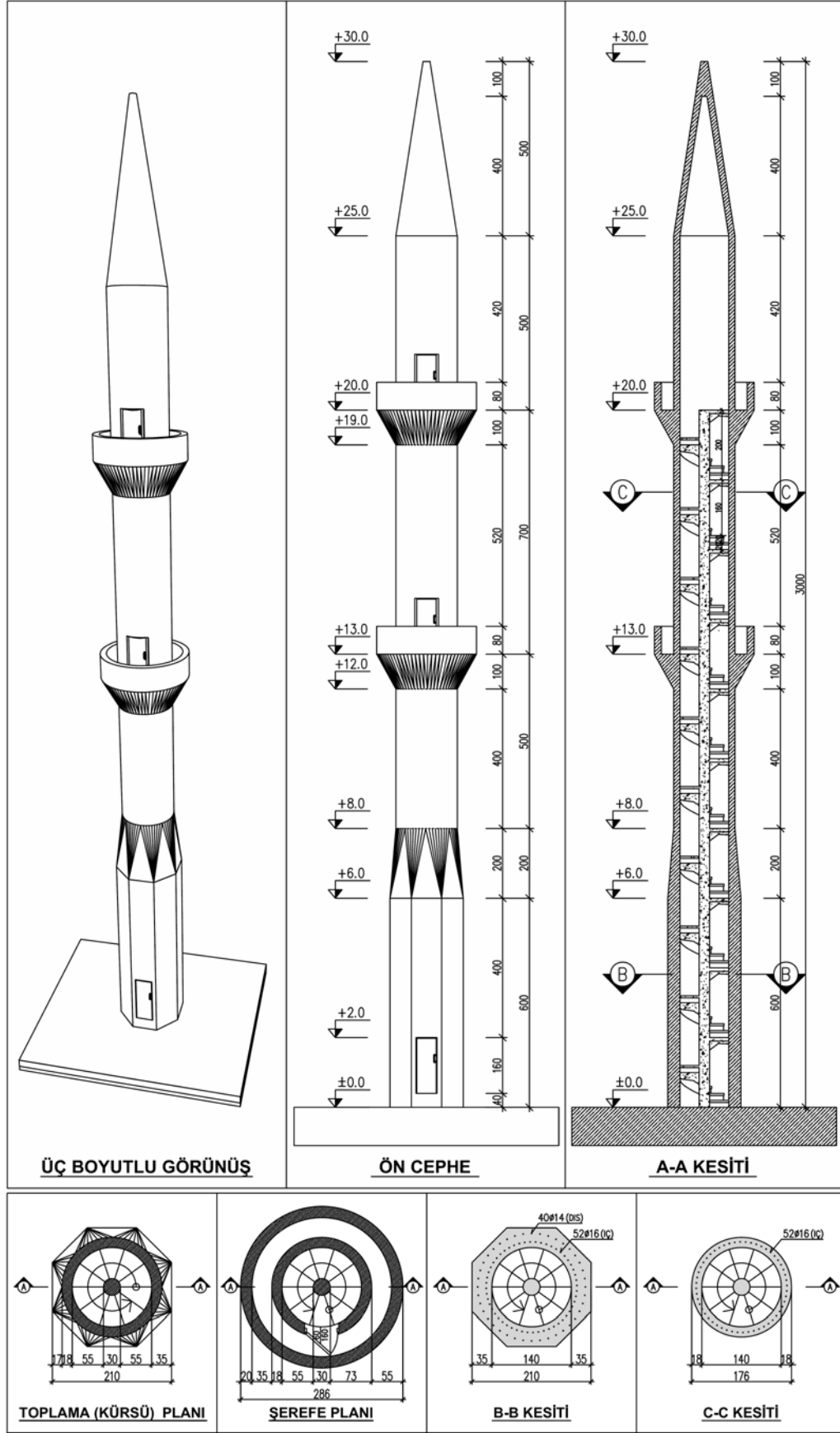
Beton (C16) :

Karakteristik basınç dayanımı, f_{ck}	16.0 MPa
Tasarım basınç dayanımı, f_{cd}	11.0 MPa
28 günlük betonun elastisite modülü, E_c	27000 MPa
Birim hacim ağırlığı, $\gamma_{betonarme}$	25.0 kN/m ³
Poisson oranı, μ_c	0.020
Ezilme birim kısalması, ε_{cu}	0.003

f_{ck} : Çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan deney silindirlerinde % 10 risk altında tanımlanan karakteristik beton basınç mukavemeti

Betonarme çeliği (S220 (BÇ Ia)) :

Karakteristik akma dayanımı, f_{yk}	220.0 MPa
Tasarım dayanımı, f_{yd}	191.0 MPa
Minimum çekme dayanımı, f_{su}	340.0 MPa
Elastisite modülü, E_s	200000 MPa
Poisson oranı, μ_c	0.03 (elastik bölgede)
Pekleşme birim şekil değiştirmesi, ε_{sh}	0.002
Kopma birim şekil değiştirmesi, ε_{su}	0.12



Şekil 2.1. Geleneksel minarenin geometrik ve kesit özellikleri

2.1.3. Uygulamaya Konu Olan Minarenin Deprem Hesapları

Uygulamaya konu olan minarenin deprem hesabı, Deprem Yönetmeliğinde belirtilmiş olan EDYY, MBY ve ZTAHY'ne göre yapılacaktır. Deprem Yönetmeliğinde minareler gibi kütlesi yüksekliği boyunca yayılı olan yapılar için taşıyıcı sistem davranış katsayısı $R=3$ ve insanların kısa süreli ve yoğun bulunduğu yapılar için bina önem katsayısı $I=1.2$ olarak verilmiştir. Dikkate alınan minarenin birinci derece deprem bölgesinde bulunduğu ve zeminin orta sıkı kum, çakıl (Z4) olduğu kabul edilmektedir. Minare elemanlarının kesit alanı, kütle ve ağırlıkları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Minarenin kesit alanı, kütle ve ağırlıkları

Elemanlar	Kesit alanı (m ²)	Kütle (ton)	Ağırlık (kN)
Kürsü	2.110	31.22	306.25
Toplama	0.893~2.110	7.65	75.00
Gövde	0.893	37.82	371.00
Şerefe	0.893~1.834	2x8.09	2x79.37
Külâh	0.071~0.893	5.10	50.00
Sütün ($\phi 30$)	0.071	3.60	35.32
Merdiven	0.147	7.49	73.43
Toplam=		1069.74	

2.1.3.1. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemiyle Hesaplama

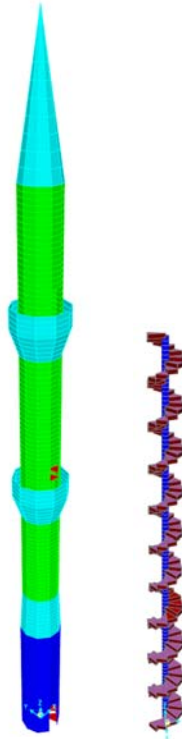
Yukarıda verilen minare ve zemin özelliklerine göre Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemiyle deprem hesabı için deprem yönetmeliğinden alınan değerler şöyledir:

Etkin yer ivmesi katsayısı, A_0	0.40
Bina önem katsayısı, I	1.20
Zemin grubu	C
Yerel zemin sınıfı,	Z4
Spektrum karakteristik periyotları, T_A, T_B	0.20s, 0.90s
Doğal titreşim periyodu (modal analizden)	
y doğrultusunda	0.643s
x doğrultusunda	0.626s
Spektrum katsayısı, $S(T_1)(T_A \leq T_{x,y} \leq T_B)$	2.50
Taşıyıcı sistem davranış katsayısı, R	3.00

Deprem yükü azaltma katsayısı, $R_d(T_I)$ ($T_{xI,yI} > T_A$)	3.00
Spektral ivme katsayısı, $A(T_I) = A_0 \cdot I \cdot S(T_I)$	1.20
Taban kesme kuvveti, $V_t = W \cdot A(T_I) / R_d(T_I)$	$427.90 \text{ kN} \geq 0.1 A_0 \cdot I \cdot W = 51.34 \text{ kN} \checkmark$
Doğal titreşim periyodu (modal analizden)	

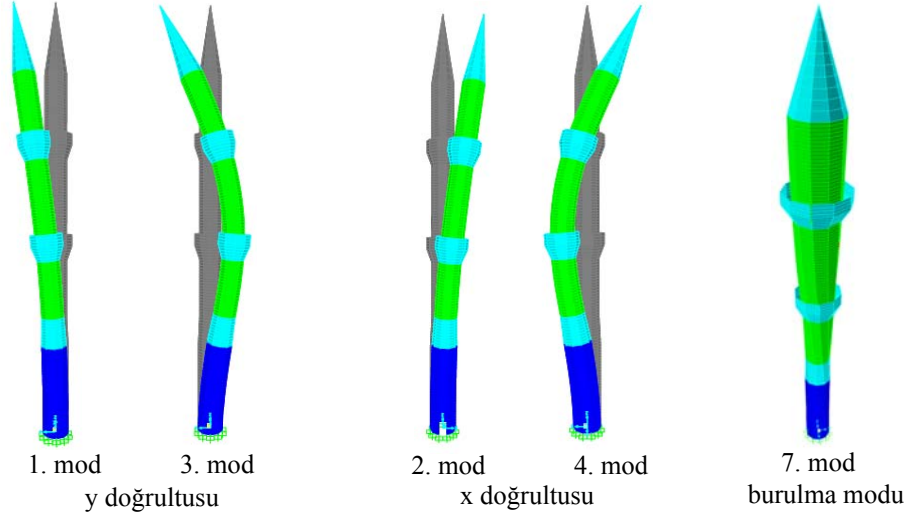
2.1.3.2. Mod Birleştirme Yöntemiyle Hesaplama

Uygulamaya konu olan minarenin modal analizi SAP 2000 Ver.10.1.0 bilgisayar programı yardımıyla yapılmıştır. Yukarıda verilen geometrik ve malzeme özellikleri kullanılarak Şekil 2.2'deki sonlu elamanlar bilgisayar modeli oluşturulmuştur. Kürsü, toplama, gövde, şerefe, petek, külah ve merdivenler kabuk (shell) eleman, sütun ise çerçeve (frame) eleman olarak modellenmiştir. Model oluşturulurken toplam 1632 düğün noktası, 100 frame, 1606 shell eleman kullanılmıştır. Toplama ve şerefelerde kalınlıkları lineer değişen, Şekil 2.1'de verilmiş olan geometrik modeli tam olarak ifade eden, shell elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Geleneksel minarenin bilgisayar modeli

Deprem yönetmeliğine göre Mod Birleştirme Yönteminde kullanılacak mod sayısının, etkin kütlelerin toplam kütlelerin %90'ını sağlayana kadar olmalıdır. Modal katkılar toplam kütlelerin %90'ına 14. moda ulaşılmış ve hesaplarda ilk 20 mod dikkate alınmıştır. Deprem hesabına katılan ilk yirmi modun toplam modal katkısı x doğrultusunda, %92 ve y doğrultusunda, %90'dır. Şekil 2.3'de ilk 4 mod şekli ile burulma modu (7. mod) görülmektedir.



Şekil 2.3. Minare ilk 4 mod ve burulma mod şekli

Dikkate alınan minarenin rijitlik ve kütle matrisine bağlı serbest titreşim çözümlerinden elde edilen ilk yirmi moda ilişkin periyot değerleri ve sadece y doğrultusu için, spektrum katsayıları, $S(T_n)$, deprem yükü azaltma katsayıları, $R_d(T_n)$, spektral ivme katsayıları, $A(T_n)$, ivme spektrumu, $S_{pa}(T_n)$, etkin kütleler, (\bar{M}_n) , modal katkı oranları ve taban kesme kuvvetleri, V_n , Tablo 2.2'de verilmektedir. Modların birleştirilmesinde kullanılan Tasarım Spektrumu Deprem Yönetmeliği 2007 de tanımlanmıştır.

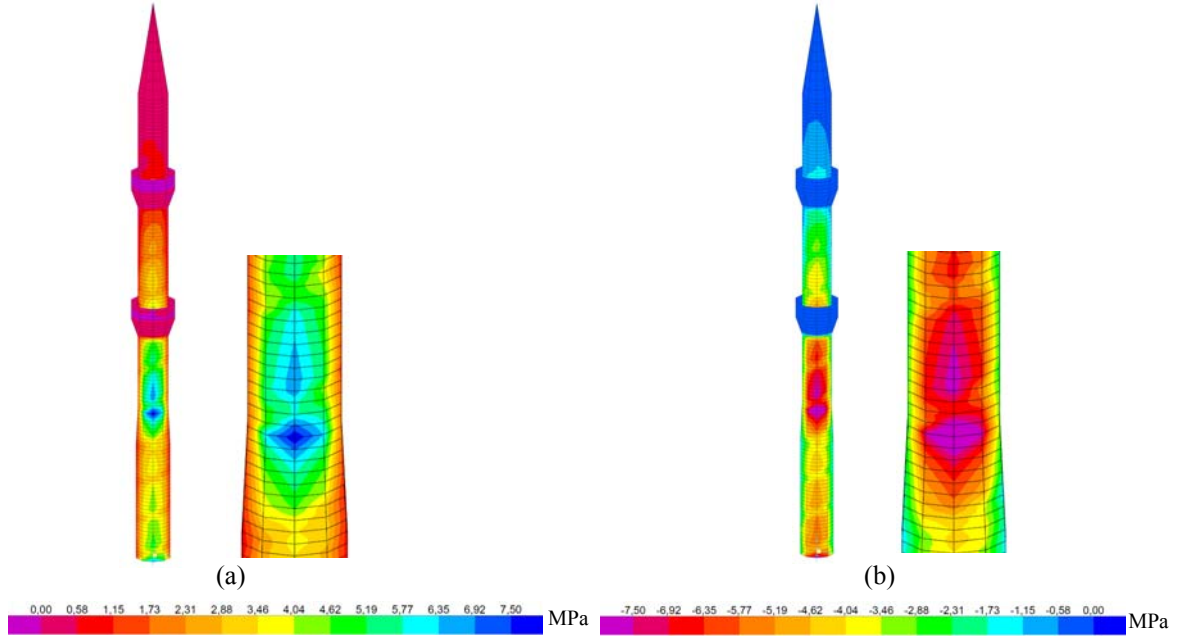
Tablo 2.2. Modal değerler

Mod (n)	Doğ.	Periyot T_n (s)	$S(T_n)$	$R_d(T_n)$	$A(T_n)$	$S_{pa}(T_n)$	Etkin kütle (\bar{M}_n)		
							y doğrultusu (kN)	Modal katkı oranı y doğrultusu (%)	Kesme kuvveti (V_n) y doğrultusu (kN)
1	y	0.643	2.500	3.000	1.200	3.924	501.57	46.889	183.991
2	x	0.626	2.500	3.000	1.200	3.924	0.00	0.000	0.000
3	y	0.136	2.022	2.522	0.970	3.775	245.57	22.957	86.665
4	x	0.131	1.981	2.481	0.951	3.760	0.00	0.000	0.000
5	y	0.056	1.418	1.918	0.681	3.481	97.61	9.125	31.766
6	x	0.055	1.410	1.910	0.677	3.476	0.00	0.000	0.000
7	bur.	0.052	1.394	1.894	0.669	3.465	0.02	0.002	0.008
8	y	0.033	1.244	1.744	0.597	3.359	0.50	0.470	1.578
9	y	0.031	1.233	1.733	0.592	3.350	63.91	5.975	20.017
10	x	0.031	1.229	1.729	0.590	3.347	0.00	0.000	0.000
11	x	0.021	1.156	1.656	0.555	3.287	0.00	0.000	0.000
12	y	0.019	1.146	1.646	0.550	3.279	23.03	2.153	7.058
13	x	0.019	1.146	1.646	0.550	3.278	0.00	0.000	0.000
14	x	0.016	1.117	1.617	0.536	3.253	0.00	0.000	0.000
15	y	0.015	1.112	1.612	0.534	3.248	26.97	2.521	8.189
16	x	0.013	1.098	1.598	0.527	3.236	0.00	0.000	0.000
17	x	0.012	1.092	1.592	0.524	3.230	0.00	0.000	0.000
18	y	0.012	1.091	1.591	0.524	3.229	7.47	0.698	2.253
19	y	0.012	1.089	1.589	0.523	3.227	0.15	0.014	0.046
20	y	0.012	1.089	1.589	0.523	3.227	0.36	0.034	0.111
Toplam							967.16	%90.838	

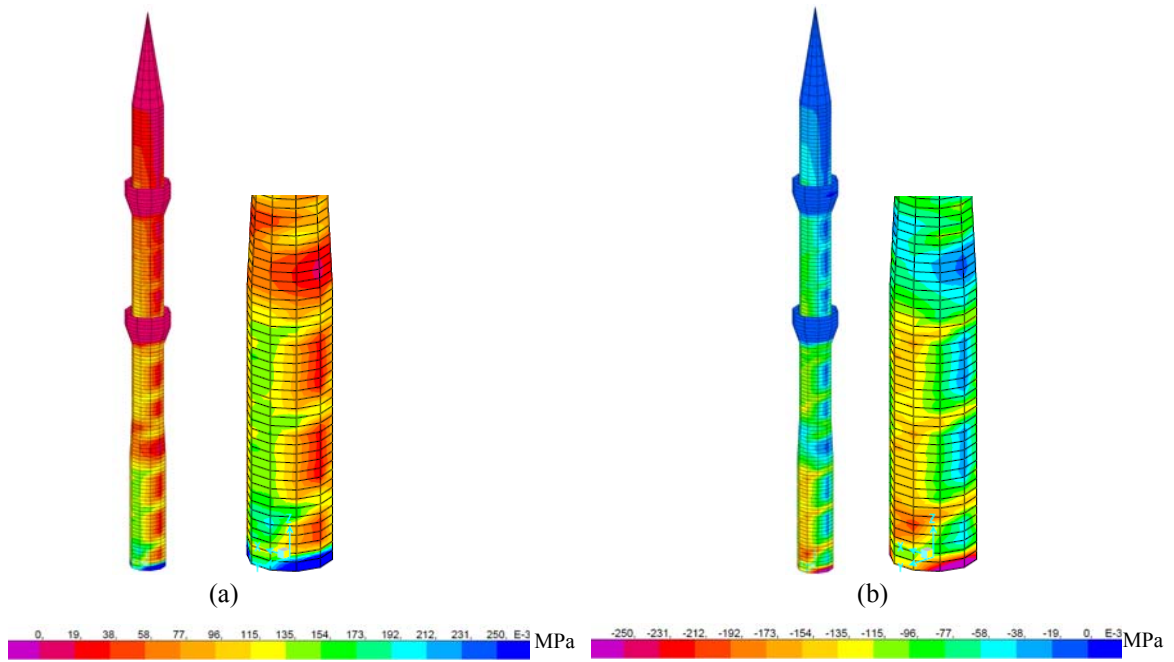
Minare için mod birleştirme yöntemi ile hesapta deprem yönetmeliğinde belirtilmiş olan mod katkılarının toplamı %90'ını sağlama koşulu, bina türü yapılara göre oldukça yüksek bir modda (14.-20. modlar) sağlanmıştır. Zira bina türü yapılarda genelde ilk üç modu dikkate almak yeterli olurken, bu şekilde bir kanıtı minarelere de genellemek tasarımcıların oldukça eksik bir değer almasına yol açabilir.

Her bir mod için bulunan sonuçları *Tam Karesel Birleştirme Kuralına (CQC)* göre birleştirmesi sonucu toplam taban kesme kuvveti 214 kN olarak elde edilir. Aynı şekilde minare tepe noktasının yapmış olduğu yer değiştirme değeri de 0.08 m olarak belirlenir.

Mod birleştirme yöntemine göre minarede meydana gelen maksimum ve minimum normal gerilmelerin dağılımı Şekil 2.4'de, kayma gerilmelerinin dağılımı ise Şekil 2.5'de verilmektedir.



Şekil 2.4. Mod birleştirme yöntemine göre (a) pozitif (S_{max}) normal gerilme dağılışı, (b) negatif (S_{min}) normal gerilme dağılışı

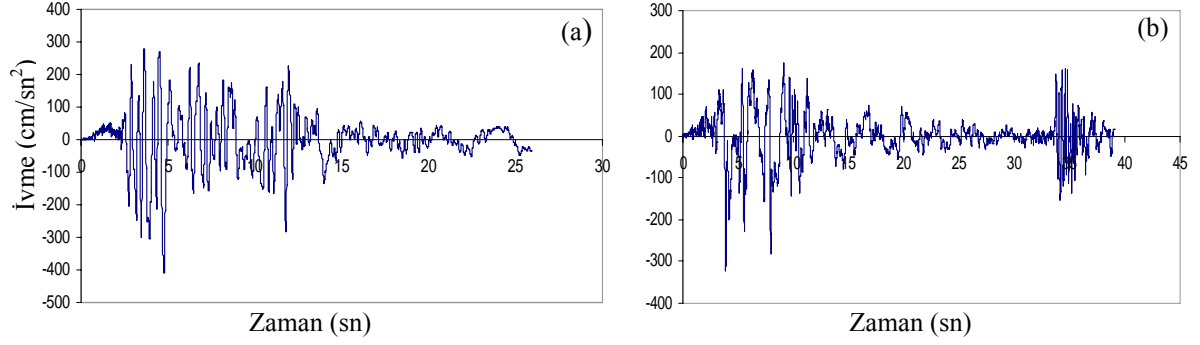


Şekil 2.5. Mod birleştirme yöntemine göre (a) pozitif (V_{max}) kayma gerilmesi dağılımı, (b) negatif (V_{min}) kayma gerilmesi dağılımı

Mod birleştirme yöntemine göre minarenin yüksekliği boyunca meydana gelen yatay yer değiştirmeler, zaman tanım alanında hesap yöntemiyle yapılan deprem analizinde elde edilen yatay yer değiştirmelerle karşılaştırmak amacıyla aynı şekil üzerinde (Şekil 2.10) verilmiştir.

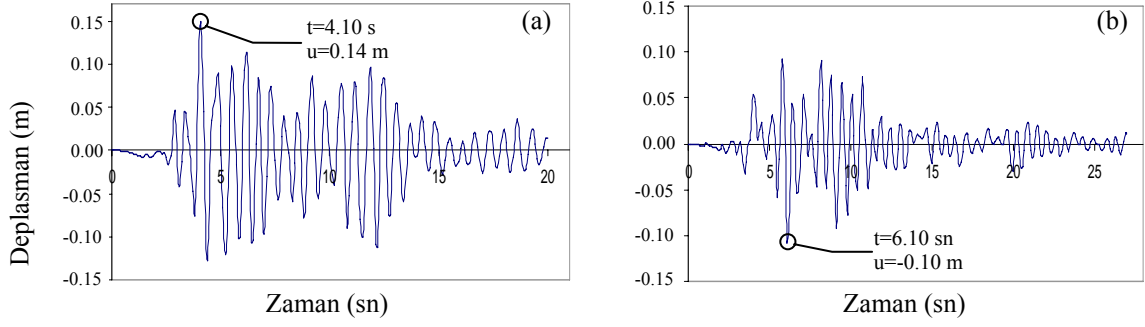
2.1.3.3. Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemiyle Hesaplama

Minarenin zaman tanım alanında hesap yöntemi ile deprem analizi için, Şekil 2.6'da verilmiş olan, 12 Kasım 1999 Düzce depremi Düzce istasyonu ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Yarımca istasyonu kaydının Kuzey-Güney bileşeni kullanılmıştır.



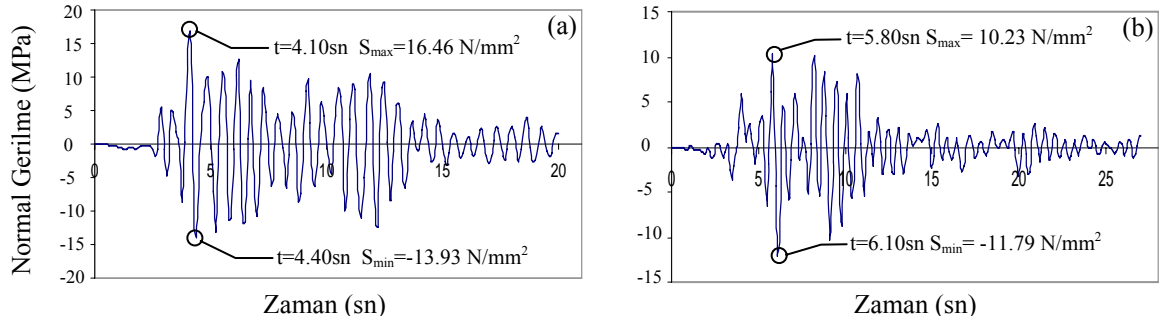
Şekil 2.6. Deprem kayıtları; (a) 12 Kasım Düzce depremi Düzce istasyonu kaydı, (b) 17 Ağustos Kocaeli depremi Yarımca istasyonu kaydı

12 Kasım Düzce ve 17 Ağustos Kocaeli depremi kayıtlarına göre yapılan zaman tanım alanında analizlerde minare tepe noktasının deprem süresince yapmış olduğu deplasman diyagramı Şekil 2.7'de verilmiştir. Tepe noktasının maksimum deplasmanı 12 Kasım Düzce depreminde $t=4.10. sn$ 'de $u=0.14 m$ ve 17 Ağustos Kocaeli depreminde $t=6.10. sn$ 'de $u=0.10 m$ olarak hesaplanmıştır.

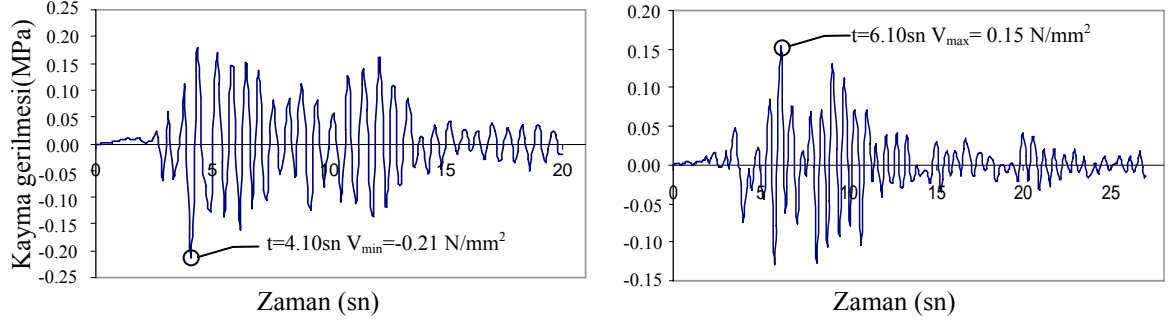


Şekil 2.7. (a) 12 Kasım Düzce ve (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre tepe noktası deplasmanın zamanla değişimi

Yapılan gözlemlerden gövde ile geçiş elemanının kesişim bölgesinin depremlerde en fazla hasara uğrayan bölge olduğu görülmüştür. Bu kesitte dikkate alınan iki deprem kaydı için meydana gelen normal gerilmenin zamanla değişimi Şekil 2.8’de, kayma gerilmelerinin zamanla değişimi ise Şekil 2.9’da verilmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi maksimum normal ve kayma gerilmeleri ötelenmede olduğu gibi 12 Kasım Düzce depremi için daha yüksek değerler elde edilmiştir.

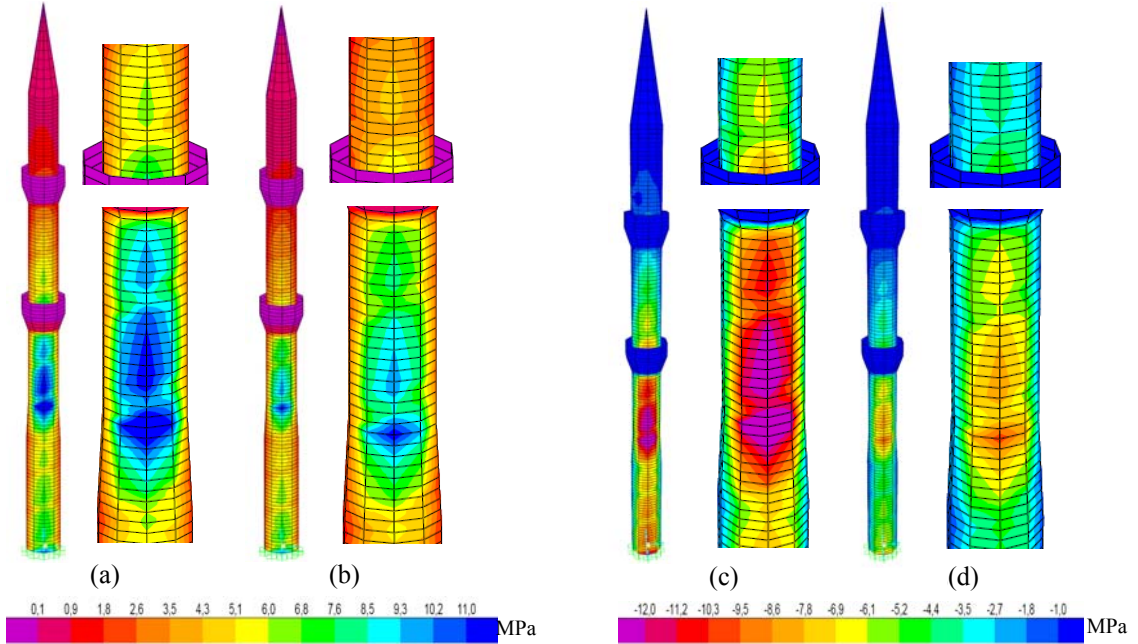


Şekil 2.8. (a) 12 Kasım Düzce ve (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen normal gerilmenin zamanla değişimi



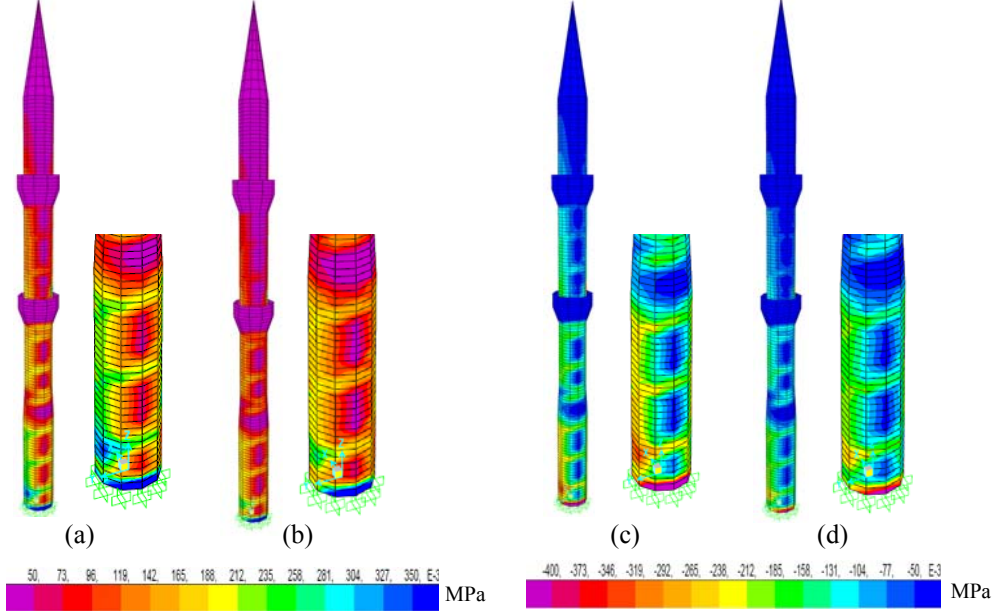
Şekil 2.9. (a) 12 Kasım Düzce ve (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen kayma gerilmenin zamanla değişimi

Deprem analizlerinden elde edilen normal gerilme dağılışı Şekil 2.10'da görülmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi gerilme yığılmasının en büyük olduğu ve maksimuma ulaştığı değerler geçiş elemanının hemen üst kısmında meydana gelmektedir. İkinci olarak zorlanan bölge ise yine şekilden görüldüğü gibi şerefe seviyeleri olmaktadır. Diğer taraftan bu şekilden, Düzce depreminin Kocaeli depremine göre kritik kesitte daha fazla zorlanmaya neden olduğu ancak en fazla zorlanan kesitlerin her iki deprem için de minarenin aynı kısımlarında gerçekleştiği de görülmektedir.



Şekil 2.10. (a) 12 Kasım Düzce, (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre pozitif (S_{max}) normal gerilme dağılışı, (c) 12 Kasım Düzce, (d) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre negatif (S_{min}) normal gerilme dağılışı

Normal gerilmelere benzer olarak kayma gerilmelerinin minare yüksekliği boyunca değişimleri Şekil 2.11’de görülmektedir.



Şekil 2.11. (a) 12 Kasım Düzce, (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre pozitif (V_{max}) kayma gerilmesi dağılışı, (c) 12 Kasım Düzce, (d) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre negatif (V_{min}) kayma gerilmesi dağılışı

2.1.4. Deprem Analizi Sonuçlarının Karşılaştırılması ve İrdelenmesi

Mod Birleştirme Yöntemi ve Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemine göre tabanda ve kritik kesitte (tabandan 8 m yukarıda) hesaplanan normal kuvvet, eğilme momenti ve kesme kuvvetleri Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.3. Maksimum kesit etkileri

Kesit	Kesme kuvveti (kN)			Eğilme momenti (kN m)			Eksenel kuvvet (kN)		
	MBY ¹	ZTH-D ²	ZTH-K ³	MBY	ZTH-D	ZTH-K	MBY	ZTH-D	ZTH-K
8 m	204	370	272	2490	4695	3371	592	593	591
taban	214	465	304	3902	7295	5414	960	966	962

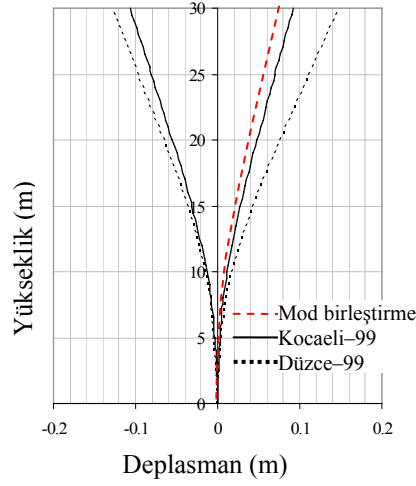
¹ Mod birleştirme yöntemi ile analiz sonucu

² Düzce depremi zaman tanım alanında hesap yöntemi ile analiz sonucu

³ Kocaeli depremi zaman tanım alanında hesap yöntemi ile analiz sonucu

Eşdeğer deprem yükü yönteminden toplam taban kesme kuvveti ($V_t = 427.90$ kN), mod birleştirme yöntemi ile hesaplanan deprem yükünden ($V_{taban} = 214$ kN) yaklaşık %100 daha fazladır. Bu durum eşdeğer deprem yükü yöntemi kütlelerini %100'ünün birinci modda etkin olduğu kabulüne dayanmasına karşın minarenin birinci modunda sadece kütlelerin %47'sinin etkin olmasından kaynaklanmaktadır. Eşdeğer deprem yükü yöntemiyle deprem analizi yapmak oldukça güvenli tarafta, ekonomik olmayan, sonuçlar doğurmaktadır. Böylece Deprem Yönetmeliğinde belirtildiği gibi kütlesi yüksekliği boyunca yayılı olan yapılar için dinamik yöntemlerle deprem analizi yapmanın gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Tezcan ve Yavaş 2000'de yaptıkları çalışmada da eşdeğer deprem yükü yöntemi ile kule tipi yapıların deprem analizi sonuçlarının, dinamik yöntemlerle elde edilen sonuçlardan %25 daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Minare tepe noktasının, yukarıda verilmiş olan ivme kayıtlarına göre yapılan zaman tanım alanında deprem analizinde, elde edilen maksimum deplasmanları 12 Kasım Düzce ve 17 Ağustos Kocaeli depremi için sırasıyla, 0.14 m ve 0.10 m'dir. Buna karşın mod birleştirme analizinde elde edilen tepe noktası maksimum deplasmanı 0.08 m'dir. Şekil 2.12'de sunulmuş olan yatay öteleme şekillerinden görüldüğü gibi rölatif yer değiştirmeler kaide kısmının hemen üstünden itibaren artmaya başlamaktadır. Bunun nedeni kaidenin gövdeye göre çok daha rijit olmasıdır. Bu kısımdan sonra minare gövdesi eğilme davranışı göstererek üst ucuna kadar ötelenmeler rölatif olarak artmıştır. Mod birleştirme, 17 Ağustos Kocaeli depremi, 12 Kasım Düzce depremi analizi sonucu hesaplanan, tepe noktasının gövde alt noktasına rölatif yer değiştirmesi sırasıyla 0.07 m, 0.09 m, 0.012 m'dir.



Şekil 2.12. Tasarım spektrumu, 12 Kasım Düzce ve 17 Ağustos Kocaeli depremi analizinden elde edilen yatay deplasmanın minare yüksekliği boyunca değişimi

2.1.5. Kapasite Kontrolü

Minarenin kritik kesitlerinde yapılacak kapasite kontrolleri için kullanılacak iç kuvvet değerleri Tablo 2.3’de verilmişti. Gerek deprem bölgesinde yapılan gözlemlere, gerekse de temsili minarenin yukarıda yapılan dinamik hesaplarına göre en fazla zorlanan kesit gövde ile geçiş elemanının kesişim bölgesi olmaktadır. Buradaki kesit betonarme halka kesit olarak dikkate alınmaktadır. Bu kesitin bileşik eğilmeye ve kesmeye karşı kapasiteleri belirlenerek üzerine etkiyen bu kesit etkilerini taşıyıp taşıyamayacağı aşağıda denetlenmektedir.

Minarenin kapasite kontrolü için Doğangün 2008’de halka kesitler için sunulan olan normal kuvvet-eğilme momenti etkileşim diyagramları (abaklar) kullanılmıştır. N normal kuvveti, M eğilme momentini, A_c kesit alanını, d_o kesitin dış çapını ve f_{cd} betonun tasarım basınç dayanımını ifade etmek üzere söz konusu diyagramların apsis ve ordinatında sırasıyla,

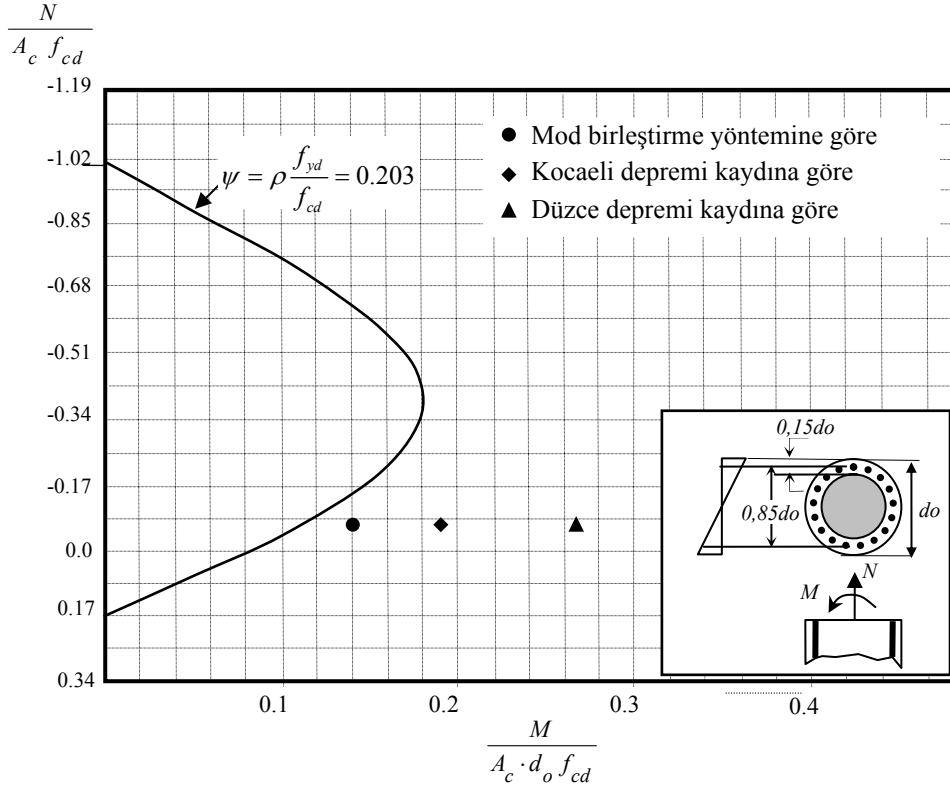
$$\frac{N}{A_c \cdot f_{cd}} \text{ ve } \frac{M}{A_c \cdot d_o f_{cd}} \quad (144)$$

boyutsuz değerleri bulunmaktadır. Mod birleştirme, 1999 Kocaeli ve Düzce deprem kayıtlarına göre yapılan zaman tanım alanında hesap yöntemi için bu değerler Tablo 2.4’de verilmiştir.

Tablo 2.4. Etkileşim diyagramı apsis ve ordinat değerleri

Yöntem	$\frac{N}{A_c \cdot f_{cd}}$	$\frac{M}{A_c \cdot d_o \cdot f_{cd}}$
	Mod birleştirme	0.060
Kocaeli depremi	0.060	0.193
Düzce depremi	0.060	0.269

Bu abaklardan faydalanmak için kesitteki donatı oranının bir fonksiyonu olan mekanik donatı oranının ($\psi = \rho [f_{yd}/f_{cd}]$) belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 2.1’deki verilere göre kritik kesitte toplam donatı ($52\phi 16$) alanı $A_s = 104.52 \text{ cm}^2$, kesit alanı $A_c = 0.90 \text{ m}^2$ ve kesitteki donatı oranı $\rho = 0.0116$ ’dir. Mekanik donatı oranı ise $\psi = 0.203$ olarak belirlenir. Buna göre uygulamada dikkate alınan minare için kesitin normal kuvvet-eğilme momenti çiftlerine göre kesitin kapasitesini gösteren eğri Şekil 2.13’de çizilmiştir. Mod birleştirme yöntemi için, 1999 Kocaeli ve Düzce deprem kayıtlarına göre yapılan zaman tanım alanında hesap yöntemi için hesaplanan normal kuvvet-eğilme momenti çifti için talep edilen kapasitelerde hesaplanarak aynı Şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Eksenel kuvvet-eğilme momenti etkileşim diyagramı ve talep edilen kapasiteler

Minare gövdesinin kesme kapasitesi kontrolleri için TS 500 (2000)'de kolonların kesme dayanımı için verilmiş olan denklem kullanılmıştır.

$$V_{kapasite} = 0.8 \left(0.65 f_{ctd} A_c \left(1 + 0.007 \frac{N}{A_c} \right) + \frac{A_{sw} f_{ywd} d}{s} \right) \quad (145)$$

Burada A_c kesit alanını, f_{ctd} tasarım çekme dayanımını, N dinamik analizlerden hesaplanan eksenel kuvveti, A_{sw} yatay donatı (etriye) alanını, f_{ywd} yatay donatı tasarım dayanımını, d ektili kesit çapını ve s yatay donatı aralığını ifade etmektedir. Denklem 145'deki ilk terim betonun kesme dayanımına katkısını, ikinci terim yatay donatının kesme dayanımına olan katkısını ifade etmektedir. Donatının kesme dayanımına olan katkısı ihmal edilecek olursa, $f_{ctd} = 0.9 \text{ N/mm}^2$, $A_c = 900000 \text{ mm}^2$, Tablo 2.3'de verilmiş olan eksenel kuvvetlere göre hesaplanan minare kritik kesitinin kesme kapasitesi Tablo 2.5'de sunulmuştur.

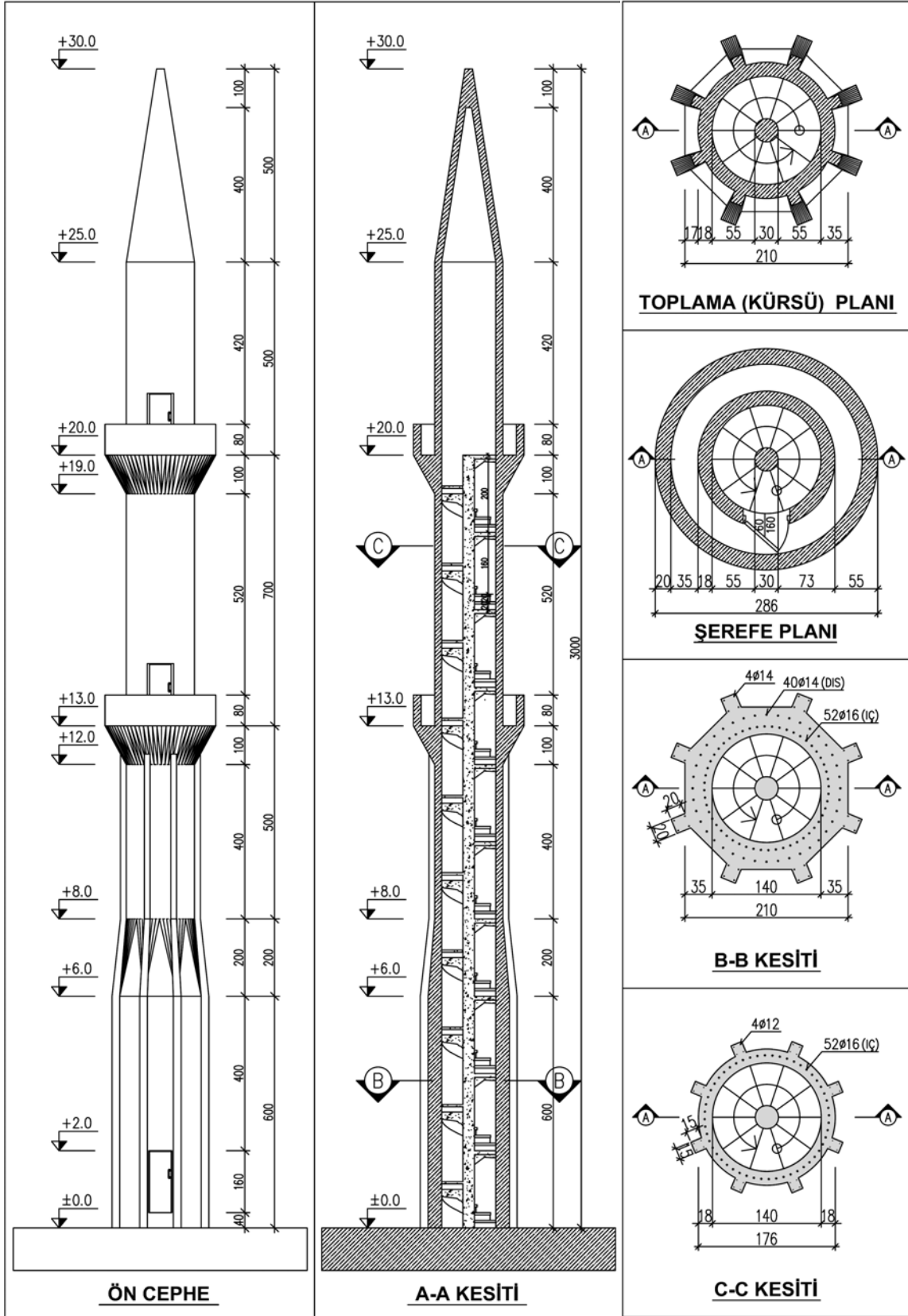
Tablo 2.5. Kritik kesit kesme kapasitesi

Yöntem	N (kN)	V _d (kN)	V _{kap.} (kN)	V _d < V _{kap.}
Mod birleştirme	592	204	423	✓
Kocaeli depremi	592	272	423	✓
Düzce depremi	593	370	423	✓

2.2. Betonarme Minareler İçin Önerilen Taşıyıcı Sistem

Klasik taşıyıcılı betonarme minarelerin kapasitesinin düşük olduğu ve özellikle gövde ile toplamının birleşim yerinde gerilme yığılmalarının olduğu yukarıda yapılan analizlerde görülmüştür. 1999 depremlerinde yapılan gözlemlerden de minarelerin büyük bir çoğunluğu bu bölgeden hasara uğramıştır. Bunlardan dolayı bundan sonra yapılacak olan minarelerde bu kritik kesite ayrı bir önem gösterilmesi ve gerekirse ek önlemlerin alınmasının zorunlu olduğu görülmektedir. Bu önlemler kritik kesitteki gerilme yığılmasını azaltacak yönde olması gerekmektedir. Bu amaçla aşağıda sunulmuş olan alternatif taşıyıcı sistem üzerinde durulmaktadır.

Öneri taşıyıcı sistemde (payandalı sistem), minarenin dış yüzünden kürsünün köşe sayısı kadar temelden başlayarak birinci şerefenin altında biten payandalar kullanılmıştır. Kaidede 0.20mx0.20m ve gövdede 0.15mx0.15m boyutundaki payandalı minare sistemi Şekil 2.14'de verilmiştir.



Şekil 2.14. Payandalı minarenin geometrik ve kesit özellikleri

2.2.1. Önerilen Taşıyıcı Sisteme Sahip (Payandalı) Minarenin Deprem Hesapları

Klasik taşıyıcı sistem ile öneri taşıyıcı sisteme sahip minarelerin davranışının tam olarak karşılaştırılması için aynı tasarım kriterleri seçilmiştir.

Uygulamaya konu olan minarenin deprem hesabı, Deprem Yönetmeliğinde belirtilmiş olan EDYY, MBY ve ZTAHY'ne göre yapılacaktır. Minare elemanlarının kesit alanı, kütle ve ağırlıkları Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6. Payandalı minarenin kesit alanı, kütle ve ağırlıkları

Elemanlar	Kesit alanı (m ²)	Kütle (ton)	Ağırlık (kN)
Kürsü*	2.430	37.16	364.50
Toplama*	1.073~2.430	8.93	87.58
Gövde*	1.073** ve 0.893	37.82	389.90
Şerefe	0.893~1.834	2x8.09	2x79.37
Külâh	0.071~0.893	5.10	50.00
Sütün ($\phi 30$)	0.071	3.60	35.32
Merdiven	0.147	7.49	73.43
		Toplam=	1159.47

* Payanda içeren kesitler
** Payandanın olduğu gövde kesiti

2.2.1.1. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemiyle Hesaplama

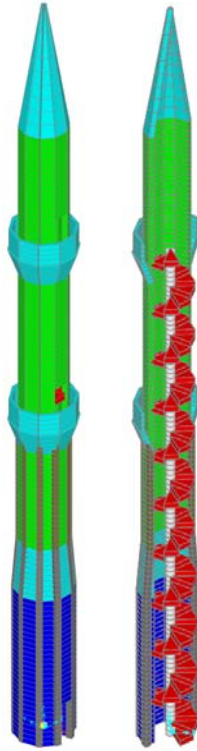
Yukarıda verilen minare ve zemin özelliklerine göre Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemiyle deprem hesabı için deprem yönetmeliğinden alınan değerler şöyledir:

Etkin yer ivmesi katsayısı, A_0	0.40
Bina önem katsayısı, I	1.20
Zemin grubu	C
Yerel zemin sınıfı,	Z4
Spektrum karakteristik periyotları, T_A, T_B	0.20s, 0.90s
Doğal titreşim periyodu (modal analizden)	
y doğrultusunda	0.573s
x doğrultusunda	0.559s
Spektrum katsayısı, $S(T_1)(T_A \leq T_{x1,y1} \leq T_B)$	2.50
Taşıyıcı sistem davranış katsayısı, R	3.00

Deprem yükü azaltma katsayısı, $R_d(T_I)$ ($T_{xI,yI} > T_A$)	3.00
Spektral ivme katsayısı, $A(T_I) = A_0 \cdot I \cdot S(T_I)$	1.20
Taban kesme kuvveti, $V_t = W \cdot A(T_I) / R_d(T_I)$	$463.79 \text{ kN} \geq 0.1 A_0 \cdot I \cdot W = 55.65 \text{ kN} \checkmark$
Doğal titreşim periyodu (modal analizden)	

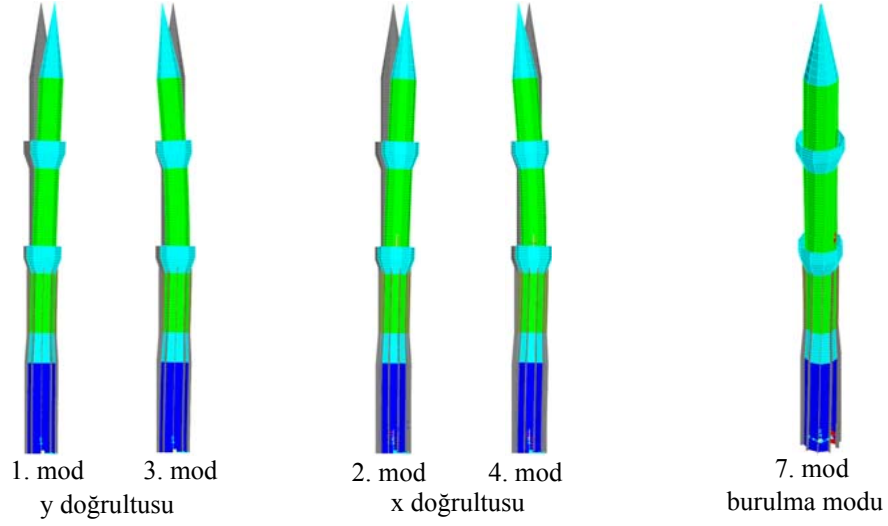
2.2.1.2. Mod Birleştirme Yöntemiyle Hesaplama

Yukarıda verilen geometrik ve malzeme özellikleri kullanılarak Şekil 2.15'deki sonlu elamanlar bilgisayar modeli oluşturulmuştur. Kaide, toplama, gövde, şerefe, petek, külah ve merdivenler kabuk (shell) eleman, sütun ise çerçeve (frame) eleman olarak modellenmiştir. Model oluşturulurken toplam 2252 düğün noktası, 100 frame, 2226 shell eleman kullanılmıştır. Kaide ve gövdedeki payandalarda kalınlıkları sabit ve toplama bölgesindeki payandalarda kalınlıkları lineer değişen shell elemanlar kullanılmıştır. Böylece Şekil 2.14'de verilmiş olan geometriye sahip minare gerçeğe daha yakın biçimde bilgisayarda modellenmiştir.



Şekil 2.15. Payandalı minarenin bilgisayar modeli

Modal katkılar toplam kütlelerin %90'ına 14. modda ulaşılmış ve hesaplarda ilk 20 mod dikkate alınmıştır. Deprem hesabına katılan ilk yirmi modun toplam modal katkısı x doğrultusunda, %92 ve y doğrultusunda, %90'dır. Şekil 2.16'de ilk 4 mod şekli ile burulma modu (7. mod) görülmektedir.



Şekil 2.16. Payandalı minare ilk 4 mod ve burulma mod şekli

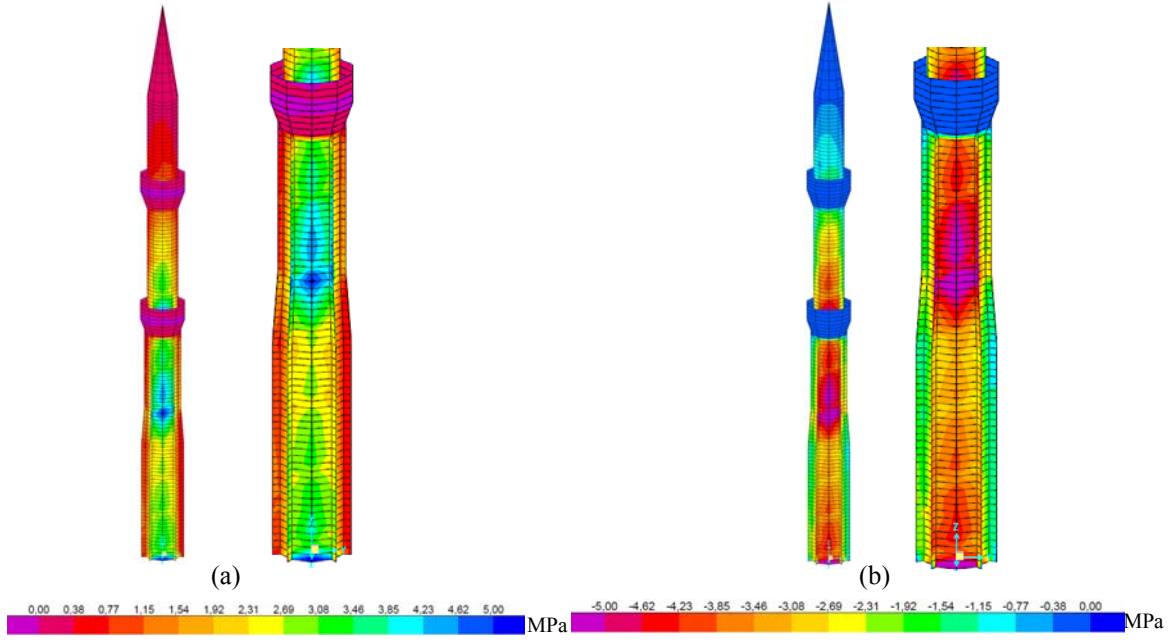
Dikkate alınan minarenin rijitlik ve kütle matrisine bağlı serbest titreşim çözümlerinden elde edilen ilk yirmi moda ilişkin periyot değerleri ve sadece y doğrultusu için, spektrum katsayıları, $S(T_n)$, deprem yükü azaltma katsayıları, $R_a(T_n)$, spektral ivme katsayıları, $A(T_n)$, ivme spektrumu değerleri, $S_{pa}(T_n)$, etkin kütleler, (\bar{M}_n) , modal katkı oranları ve taban kesme kuvvetleri, V_n , Tablo 2.7'de verilmektedir. Modların birleştirilmesinde kullanılan Tasarım Spektrumu Deprem Yönetmeliği 2007 de tanımlanmıştır.

Tablo 2.7. Modal değerler

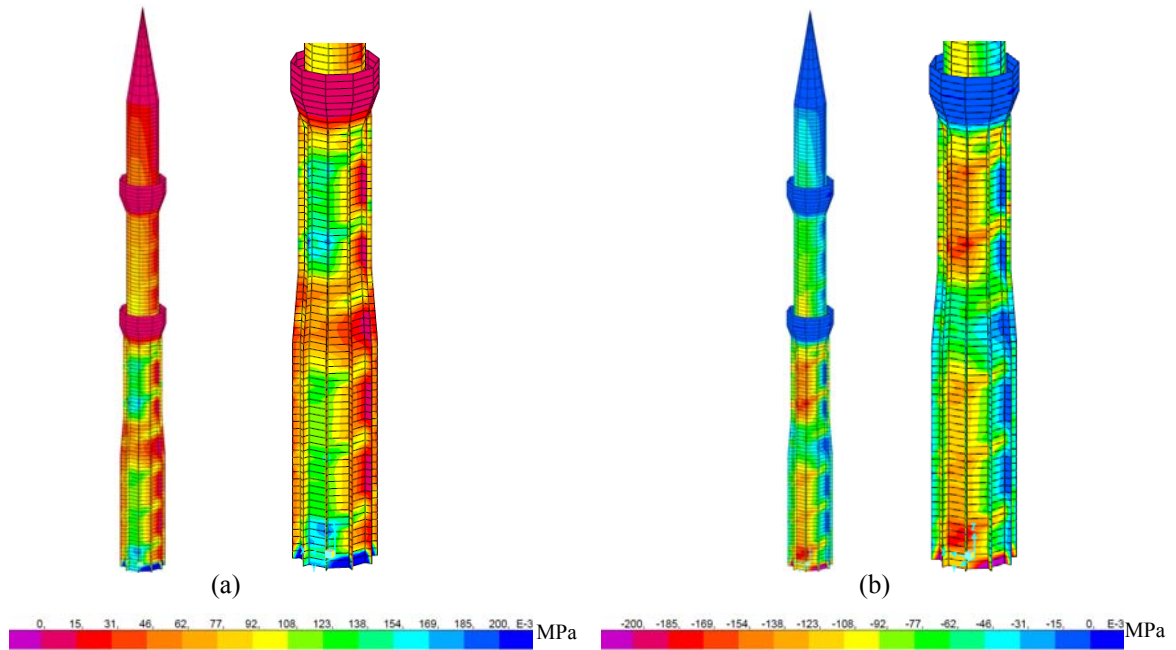
Mod (n)	Doğ.	Periyot T_n (s)	$S(T_n)$	$R_d(T_n)$	$A(T_n)$	$S_{pa}(T_n)$	Etkin kütle (\bar{M}_n)		
							y doğrultusu (kN)	y doğrultusu (%)	y doğrultusu (kN)
1	y	0.573	2.500	3.000	1.200	3.924	501.69	43.269	196.864
2	x	0.559	2.500	3.000	1.200	3.924	0.00	0.000	0.001
3	y	0.133	1.998	2.498	0.959	3.766	276.23	23.824	104.035
4	x	0.128	1.963	2.463	0.942	3.753	0.00	0.000	0.000
5	y	0.055	1.412	1.912	0.678	3.477	111.07	9.579	38.622
6	x	0.054	1.407	1.907	0.675	3.474	0.00	0.000	0.001
7	bur.	0.052	1.393	1.893	0.669	3.465	0.04	0.003	0.014
8	y	0.031	1.233	1.733	0.592	3.350	63.42	5.470	21.247
9	y	0.030	1.228	1.728	0.590	3.346	0.01	0.001	0.004
10	x	0.030	1.227	1.727	0.589	3.345	19.51	1.683	6.528
11	x	0.021	1.159	1.659	0.556	3.289	0.00	0.000	0.000
12	y	0.020	1.152	1.652	0.553	3.284	0.00	0.000	0.000
13	x	0.019	1.146	1.646	0.550	3.278	26.20	2.260	8.591
14	x	0.016	1.118	1.618	0.537	3.253	0.00	0.000	0.000
15	y	0.015	1.111	1.611	0.533	3.248	31.47	2.714	10.220
16	x	0.013	1.100	1.600	0.528	3.238	0.00	0.000	0.000
17	x	0.012	1.093	1.593	0.525	3.231	0.00	0.000	0.000
18	y	0.012	1.092	1.592	0.524	3.230	5.25	0.453	1.696
19	y	0.012	1.089	1.589	0.523	3.227	15.50	1.337	5.003
20	y	0.012	1.089	1.589	0.523	3.227	0.08	0.007	0.024
Toplam							1050.49	%90.601	

Her bir mod için bulunan sonuçları *Tam Karesel Birleştirme Kuralına (CQC)* göre birleştirmesi sonucu toplam taban kesme kuvveti 235 kN olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde minare tepe noktasının yapmış olduğu yer değiştirme değeri de 0.065 m olarak belirlenmiştir.

Mod birleştirme yöntemine göre payandalı minarede meydana gelen maksimum ve minimum normal gerilmelerin dağılımı Şekil 2.17'de, kayma gerilmelerinin dağılımı ise Şekil 2.18'de verilmektedir.



Şekil 2.17. Payandalı minarenin mod birleştirme yöntemine göre (a) pozitif (S_{max}) normal gerilme dağılışı, (b) negatif (S_{min}) normal gerilme dağılışı

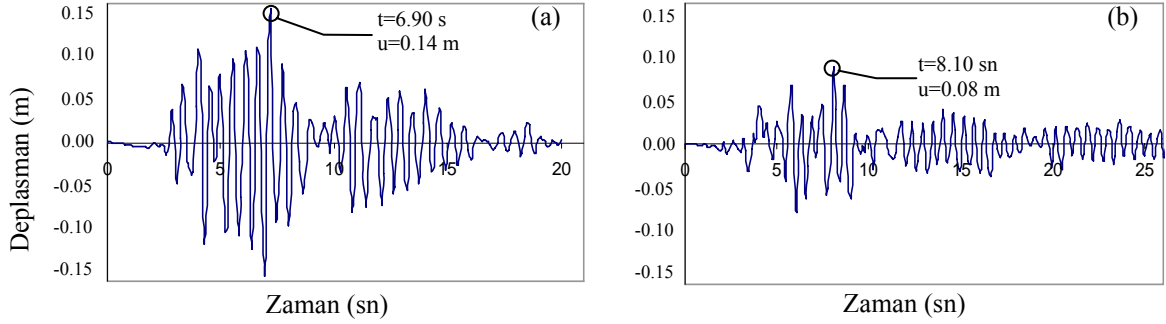


Şekil 2.18. Payandalı minarenin mod birleştirme yöntemine göre (a) pozitif (V_{max}) kayma gerilmesi dağılımı, (b) negatif (V_{min}) kayma gerilmesi dağılımı

2.2.1.3. Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemiyle Hesaplama

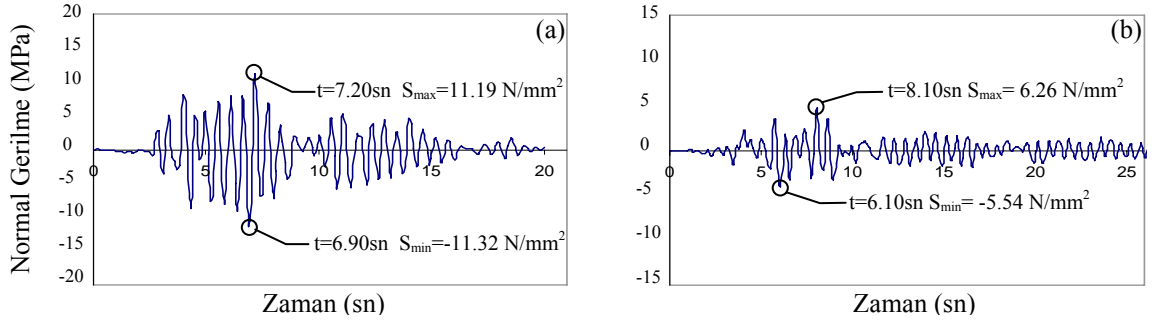
Minarenin zaman tanım alanında hesap yöntemi ile deprem analizi için, Şekil 2.6'da verilmiş olan, 12 Kasım 1999 Düzce depremi Düzce istasyonu ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Yarımca istasyonu kaydının Kuzey-Güney bileşeni kullanılmıştır.

12 Kasım Düzce ve 17 Ağustos Kocaeli depremi kayıtlarına göre yapılan zaman tanım alanında analizlerde minare tepe noktasının deprem süresince yapmış olduğu deplasman diyagramı Şekil 2.19'da verilmiştir. Tepe noktasının maksimum deplasmanı 12 Kasım Düzce depreminde $t=6.90$ sn'de $u=0.14$ m ve 17 Ağustos Kocaeli depreminde $t=8.10$ sn'de $u=0.08$ m olarak hesaplanmıştır.

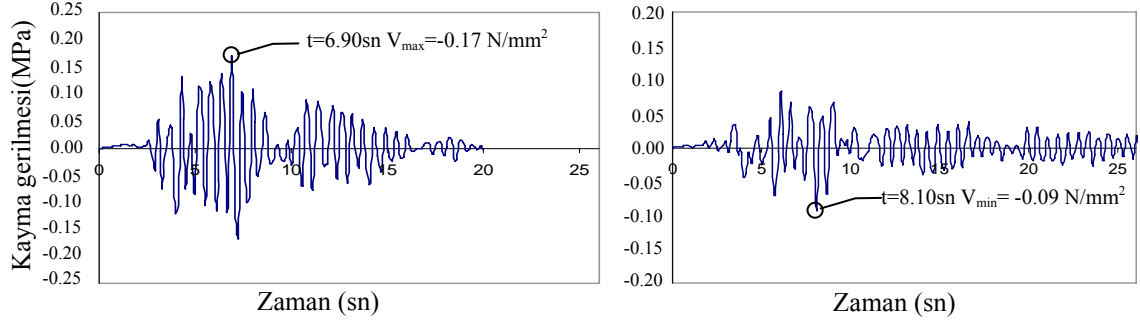


Şekil 2.19. (a) 12 Kasım Düzce ve (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre payandalı minare tepe noktasının deplasmanın zamanla değişimi

Geçiş bölgesinde, dikkate alınan iki deprem kaydı için, meydana gelen normal gerilmenin zamanla değişimi Şekil 2.20'de, kayma gerilmelerinin zamanla değişimi ise Şekil 2.21'de verilmektedir.

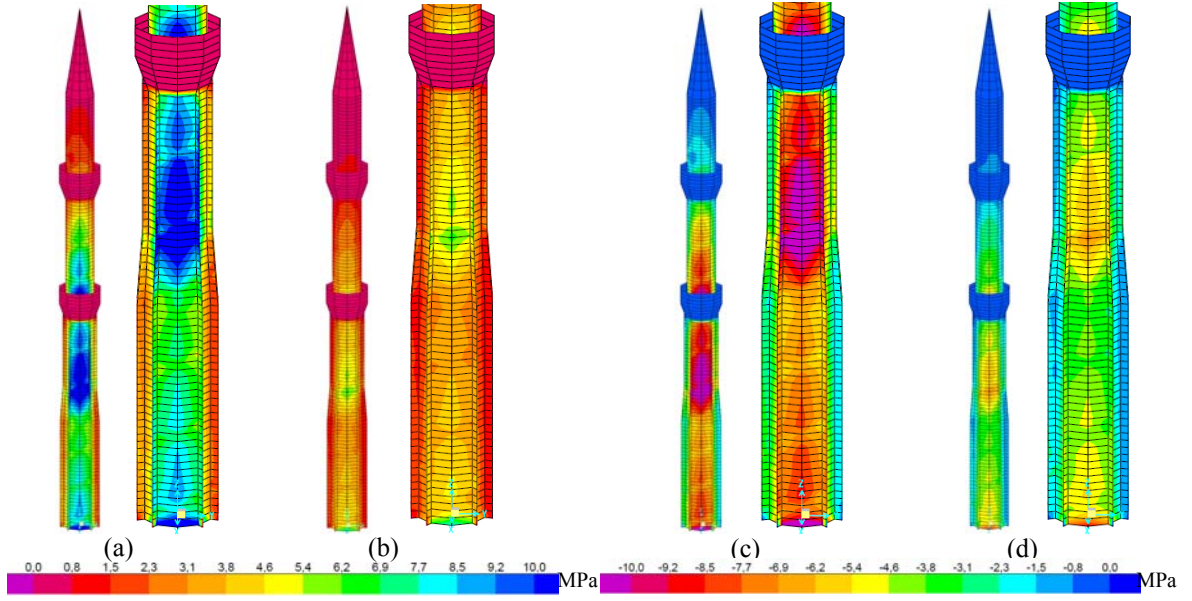


Şekil 2.20. (a) 12 Kasım Düzce ve (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen normal gerilmenin zamanla değişimi



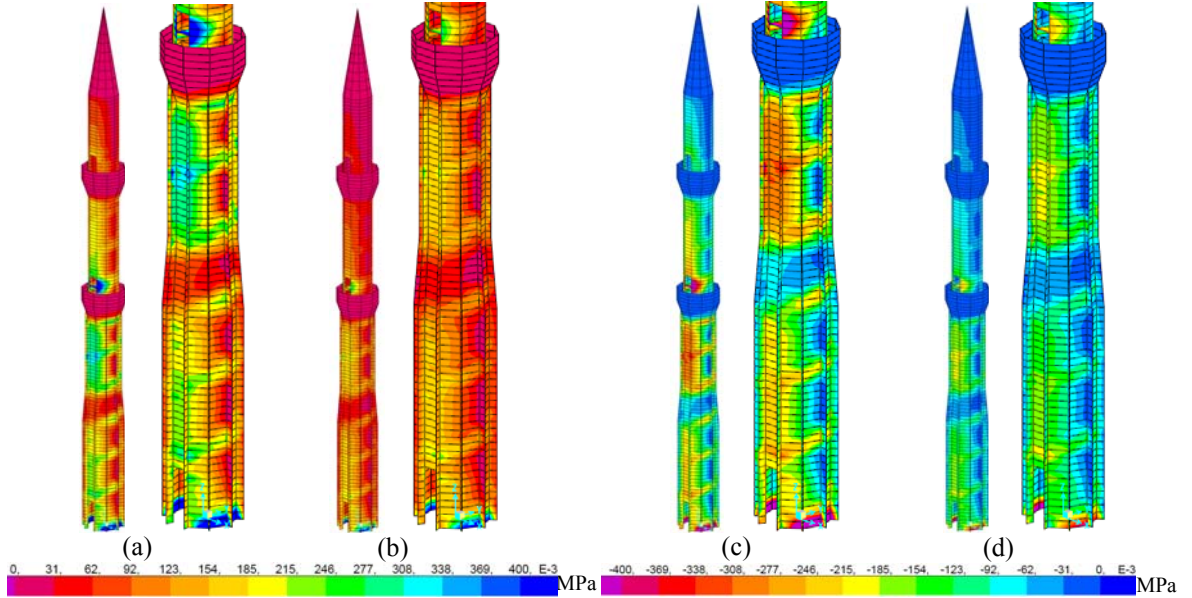
Şekil 2.21. (a) 12 Kasım Düzce ve (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen kayma gerilmenin zamanla değişimi

Deprem analizlerinden elde edilen normal gerilme dağılışı Şekil 2.22'de görülmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi gerilme yığılmasının en büyük olduğu ve maksimuma ulaştığı değerler geçiş elemanının hemen üst kısmında meydana gelmektedir. İkinci olarak zorlanan bölge ise yine şekilden görüldüğü gibi şerefe seviyesi olmaktadır. Diğer taraftan bu şekilden, Düzce depreminin Kocaeli depremine göre kritik kesitte daha fazla zorlanmaya neden olduğu ve en fazla zorlanan kesitlerin her iki deprem için de minarenin aynı kısımlarında gerçekleştiği de görülmektedir.



Şekil 2.22. (a) 12 Kasım Düzce, (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre pozitif (S_{max}) normal gerilme dağılışı, (c) 12 Kasım Düzce, (d) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre negatif (S_{min}) normal gerilme dağılışı

Normal gerilmelere benzer olarak kayma gerilmelerinin minare yüksekliği boyunca değişimleri Şekil 2.23’de görülmektedir.



Şekil 2.23. (a) 12 Kasım Düzce, (b) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre pozitif (V_{max}) kayma gerilmesi dağılışı, (c) 12 Kasım Düzce, (d) 17 Ağustos Kocaeli depremine göre negatif (V_{min}) kayma gerilmesi dağılışı

2.3. Geleneksel Minare ile Payandalı Minarenin Deprem Davranışının Karşılaştırılması

Geleneksel taşıyıcı betonarme minarenin dinamik analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar Madde 2.1’de payandalı minarenin dinamik sonuçları ise Madde 2.2’de verilmişti. Bu başlık altında yukarıda sunulmuş olan analiz sonuçları birlikte değerlendirilerek karşılaştırılmaktadır. Minarelere etkiyen deprem yükleri Tablo 2.8’de verilmiştir. Payandalı minarenin ağırlığı 1159 kN geleneksel minarenin ağırlığı ise 1070 kN olduğundan, deprem parametreleri altında payandalı minareye daha fazla deprem yükü etkimiştir.

Tablo 2.8. Minarelere etkiyen deprem yükleri

Yükleme durumları	Geleneksel Minare (kN)	Payandalı Minare (kN)
EDYY	428	464
MBY	214	235
ZHY-D	465	471
ZHY-K	304	355

Bu yükler altında minarelerin tepe noktasında meydana gelen deplasman değerleri Tablo 2.9’da verilmektedir. Payandalı minareye etkiyen büyük deprem kuvvetlerine karşın minarenin yapmış olduğu deplasmanlar geleneksel minarenin yapmış olduğu deplasmandan daha azdır.

Tablo 2.9. Minarelerin tepe noktası deplasmanları

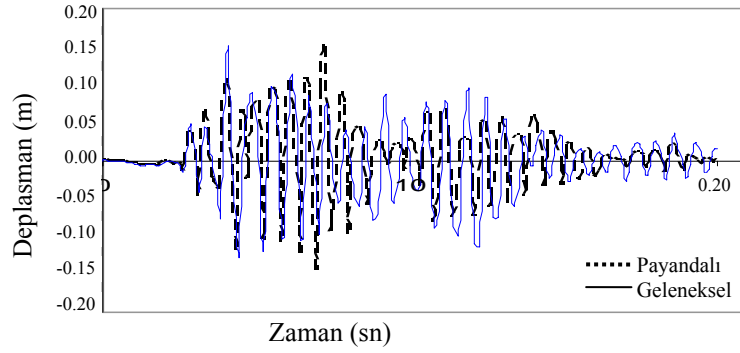
Yükleme durumları	Geleneksel Minare (m)	Payandalı Minare (m)
MBY	0.08	0.06
ZHY-D	0.14	0.14
ZHY-K	0.10	0.08

Yapı periyodu aynı malzeme ve koşullar için kütle ve rijitliğe bağlı olarak değişmektedir. Her iki minarenin yapmış olduğu ilk 7 mod değerleri Tablo 2.10’da sunulmaktadır. Payandalı minarenin burulma modu hariç tüm modlarına ilişkin periyotlar geleneksel minarenin periyotlarından küçüktür. Özellikle etkin olan 1. ve 2. mod arasındaki fark daha da fazladır. Genel olarak kütleyle artan periyot rijitlikle azalmaktadır. Payandalı minarenin kütlelerinin daha fazla olmasına karşın periyodunun düşük olması yapının rijitliğinin periyot üzerinde daha fazla etkin olduğunu göstermektedir.

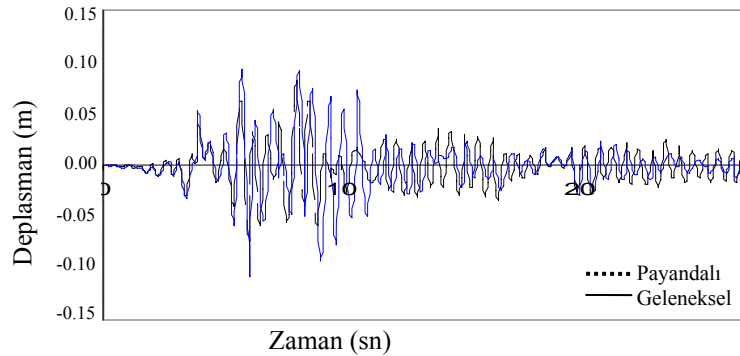
Tablo 2.10. Minarelere İlişkin Periyotlar

Mod no	Geleneksel Minare (m)	Payandalı Minare (m)
1	0.643	0.573
2	0.626	0.559
3	0.136	0.133
4	0.131	0.128
5	0.056	0.055
6	0.055	0.054
7	0.052	0.052

Geleneksel ve payandalı minarenin 12 Kasım 1999 Düzce ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi kayıtlarına göre tepe noktasının zamanla yapmış olduğu deplasmanlar sırasıyla Şekil 2.24 ve Şekil 2.25’de verilmiştir.

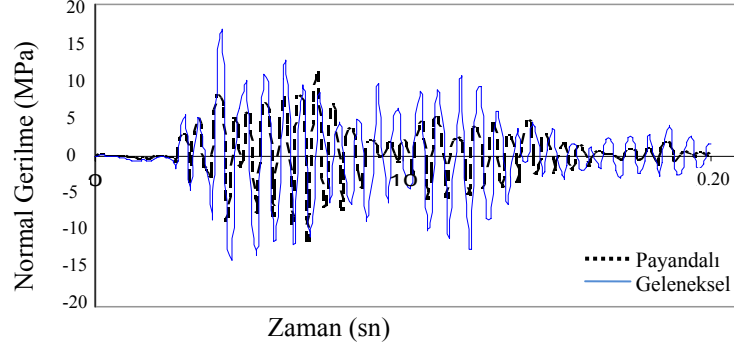


Şekil 2.24. 12 Kasım Düzce depremine göre payandalı ve geleneksel minarenin tepe noktasının deplasmanının zamanla değişimi

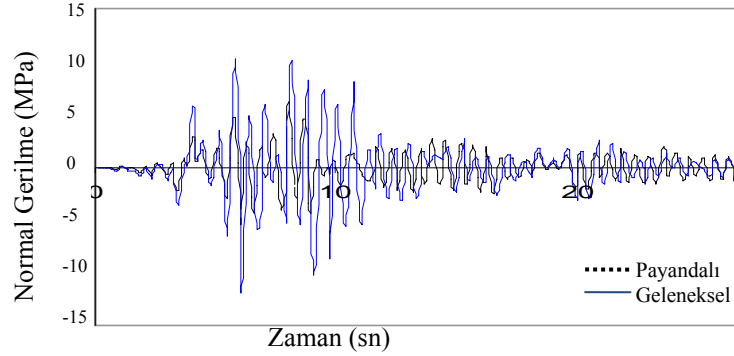


Şekil 2.25. 17 Ağustos Kocaeli depremine göre payandalı ve geleneksel minarenin tepe noktasının deplasmanının zamanla değişimi

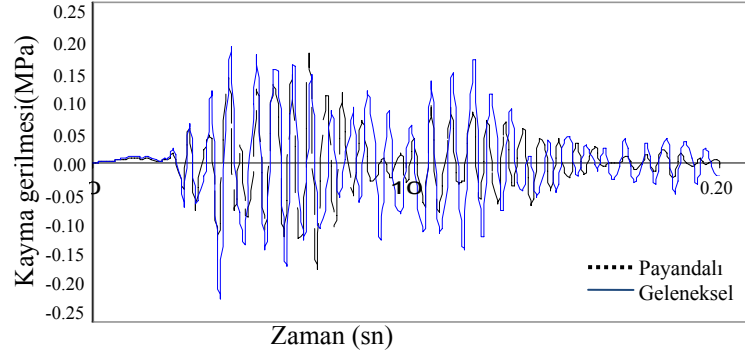
Geleneksel ve payandalı minarenin 12 Kasım 1999 Düzce ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi kayıtlarına göre geçiş bölgesinde meydana gelen normal gerilmenin zamanla değişimleri sırasıyla Şekil 2.26 ve Şekil 2.27’de kayma gerilmelerinin değişimleri ise sırasıyla Şekil 2.28 ve Şekil 2.29’da verilmektedir.



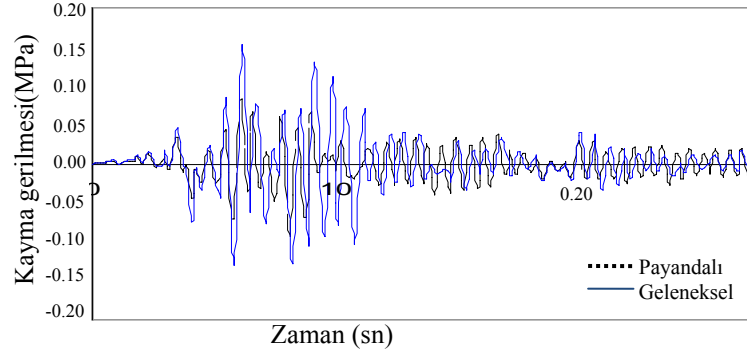
Şekil 2.26. 12 Kasım Düzce depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen normal gerilmelerin zamanla değişimi



Şekil 2.27. 17 Ağustos Kocaeli depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen normal gerilmelerin zamanla değişimi



Şekil 2.28. 12 Kasım Düzce depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen kayma gerilmelerin zamanla değişimi



Şekil 2.29. 17 Ağustos Kocaeli depremine göre geçiş elemanı ile gövdenin kesişim bölgesinde meydana gelen kayma gerilmelerin zamanla değişimi

3.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kule türü anıtsal yapı denildiği zaman enkesit boyutlarına göre yüksekliği oldukça fazla ve belirli bir özelliği olan yapılar anlaşılmaktadır. Bu yapılar dinamik yüklemelere karşı normal yapılara göre daha hassas yapılardır. Bu bağlamda minareler ister yığma ister betonarme olsun kule tipi anıtsal yapı olarak değerlendirilebilir. Diğer kule türü yapılar için yapılan çalışmaları ve geliştirilmiş yöntemler minareler için yol gösterici olarak kabul edilebilir. Ancak tamamen minareler için yapılmış çalışmalara ve geliştirilmiş yöntemlere de ihtiyaç duyulmaktadır.

Minareler son yıllardaki depremlerde önemli oranlarda hasar görmüştür. 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinde inceleme ekipleri tarafından deprem bölgesinde 64 adet minare incelenmiştir. Bu minarelerin 52 adetinin hasar gördüğü veya yıkıldığı rapor edilmiştir. Bu durum ülkemizdeki minarelerin ne derece riskli olduklarını göstermektedir. Durum böyle olunca, minare hasarlarını en aza indirmek amacıyla, yeni yapılacak minarelerin gerekli hesapları yapılarak tekniğine uygun olarak yapılması, bir çoğu tarihi eser kapsamına giren mevcut minarelerin ise deprem ve rüzgara karşı performanslarının belirlenmesi ve buna bağlı olarak gerekli onarım ve güçlendirme çalışmalarının yapılması son derece önemlidir.

Deprem sonrası yapılan gözlemlerden elde edinilen bilgilere göre minarelerde meydana gelen hasarların %90'a yakını geçiş elemanın hemen üstünde, gövdenin tabanında meydana gelmektedir. Bu hasarın oluşmasında bu bölgede kesitin geometrik olarak ani küçülmesinin etkisi olduğu gibi donatı ankrajının da yeteri derecede sağlanamamasının da etkisi bulunmaktadır. Bunun için elemanlar arasında yumuşak geçiş yapılması uygun olacaktır. Bunun yolu da gövde ile kaide arasında aşırı kesit farkının olmamasıdır. İkinci olarak depremlerde fazla zorlanan ve hasar oluşan bölge şerefe bölgesi olmaktadır. Bu bölgede hasarın oluşmasında yine donatı ankrajının etkisi ön plana çıktığı gibi şerefeden dolayı yerel olarak burada kütle yığılması olmasının da etkisi bulunmaktadır. Bu iki hasar türü yapılan model çözümlerinde de ortaya çıkmıştır. Çalışmada dikkate alınan ve gerekli deprem hesapları yapılan geleneksel minarenin kapasitesinin dikkate alınan depremler için yetersiz olduğu görülmüştür.

Minarelerin dinamik davranışlarını belirlemek için deprem yüklerinin hesabı amacıyla, deprem yönetmeliğinde verilmiş olan hesap yöntemleri kullanılmıştır. Bu

yöntemlerden uygulaması en kolay olan Eşdeğer Deprem Yüğü Yönteminin minareler için çok ekonomik olmayan sonuçlar doğuracağı görülmüştür. Böylece Deprem Yönetmeliğinde belirtildiğı gibi kütleli yüksekliğı boyunca yayılı olan yapılar için dinamik yöntemlerle deprem analizi yapmanın gerekliliğı ortaya çıkmaktadır. Mod Birleştirme ve Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi bu çalışmada kullanıldığı gibi diğer minarelerin deprem davranışlarının belirlemek için kullanılabilir. Burada minare için Mod Birleştirme Yöntemi ile yapılan hesaplarda etkin kütleli %90'ına ulaşmak için çok sayıda modun kullanılması gerektiğini belirtmek uygun olmaktadır.

Deprem bölgelerinde yapılan hasar belirleme çalışmalarında, minarelerin deprem davranışları incelenmiş ve tekniğine de uygun olarak hesaplanıp detaylandırılmayan geleneksel taşıyıcı minarelerin birçoğunun kapasitesinin yetersiz olduğu ve hasarların belli bölgelerde olduğu görülmüştür. Bu veriler ışığında minarelerin deprem güvenliğini arttırmak için minarelerin kapasitesini arttıracak ve gerilme yığılmalarını daha makul seviyelere indirebilecek yeni taşıyıcı sistemlerin araştırılması da önemli olmaktadır. Bu bağlamda bu çalışmada payandalı minare olarak da adlandırılabilen taşıyıcı sistem incelenmiştir.

Geleneksel ve payandalı taşıyıcı sisteme sahip iki minarenin davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Analiz sonucu geleneksel taşıyıcı sisteme sahip minare için bulunan yatay deplasmanların yaklaşık %20, normal ve kayma gerilemelerinin yaklaşık %40 daha büyük olduğu görülmüştür. Geleneksel taşıyıcı minarede oluşan gerileme yığılmalarının, payandalı olan ve bu çalışmada önerilen minarede payandaların olduğu bölge içerisinde dağıldığı görülmüştür. Geleneksel taşıyıcı minareye göre daha iyi performans gösteren payandalı minare ile ilgili çalışma sayısının artırılması ve parametrik çalışmaların yapılarak detaylarının ortaya konması minarelerin deprem güvenlikleri için son derece önem arz etmektedir.

4. KAYNAKLAR

- ACI 307/79, 1979. Design and Construction of Reinforced Concrete Chimneys, American Concrete Institute committee, USA.
- Acar, R., Livaoğlu, R., Doğangün, A. ve Sezen, H., 2007. The Effect Subsoils on the Seismic Response of Reinforced Concrete Cylindrical Minarets, 5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Mayıs, SE-24, Tehran.
- Aliyazıcıoğlu C., 2004. Betonarme Endüstri Bacalarının Zemin Etkileşimini de Dikkate Almak Suretiyle Tasarımları, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ambraseys, N. N. ve Finkel C., 1993. Material for the Investigation of the Seismicity of the Eastern Mediterranean Region During the Period 1690-1710, Historical Investigation of European Earthquakes, 1, 173-174.
- Anonim, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- Aydoğan, M. ve Hasgür Z., 1988. Betonarme Bacalar, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Beyazoğlu A., 2006. Kule Tipi Betonarme Yapıların Analizi ve Betonarme Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Celep, Z. ve Kumbasar N., 2005. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul.
- Cho, K. P. ve Tamura, Y., 1999. Field Measurement of Damping in Industrial Chimneys and Towers, First International Conference on Advances in Mechanics, 1, 695-700.
- Chopra, A. K., 2001. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall.
- DIN, 1986. Beton Kalender, DIN 1056, Deutch Institut Norme.
- Doğangün, A., 2004. Performance of Reinforced Concrete Buildings During the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey, Engineering Structures, 26, 841-856.
- Doğangün, A., Tuluk, Ö. İ., Livaoğlu, R. ve Acar, R., 2006. Traditional Turkish Minarets on the Basis of Architectural and Engineering Concepts, Proceedings of 1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures, Nisan, P34, 1-10, Kahire.

- Doğangün, A., Acar, R., Livaoğlu, R. ve Tuluk, Ö. İ., 2006. Performance of Masonry Minarets Against Earthquakes and Winds in Turkey, Proceedings of 1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures, Nisan, P32, 1-10, Kahire.
- Doğangün, A., Acar, R., Livaoğlu, R. ve Sezen, H., 2007. Comparison of Structural Response of Traditional and Strengthened Reinforced Concrete Minarets, 5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Mayıs, SS-46, Tehran.
- Doğangün, A., Sezen, H., Tuluk, Ö. İ., Livaoğlu, R. ve Acar, R., 2007. Traditional Turkish Masonry Minarets and Their Earthquake Damage, Int J Archit Heritage, 1, 1-21.
- Doğangün, A., 2008. Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, Birsen Yayınevi, 4. Baskı, İstanbul.
- Doğangün, A., Acar, R., Sezen, H., ve Livaoğlu, R., 2008. Investigation of Dynamic Response of Masonry Minaret Structures, Bull Earthquake Eng, 6, 505-517.
- Dowrick, D.J., 1978. Earthquake Resistant Design, John Wiley & Sons Ltd., 374 s.
- Durmuş, A., 2004. Deprem Mühendisliği Ders Notları, Trabzon (Yayınlanmamış).
- Durmuş, A., Aliyazıcıoğlu, C. ve Öz, E., 2006. Betonarme Bacaların Rüzgar Yüklerine Göre Tasarımı İçin ACI ve CICIND Yönetmeliklerinin Karşılaştırılması, 7. Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, Ekim, İstanbul.
- Eurocode 8, EN 1998-6, 2005. Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 6 : Towers, Masts and Chimneys, European Standard, European Committee for Standardization, Brussels.
- Ertek, E., Farjan, Y.M., 2007. Osmanlı Minarelerinin Yapısal Sistemleri: Sınıflandırma, Modelleme ve Analizi, 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Ekim, 413-424, İstanbul.
- Eyice, S., 1963. İstanbul Güzel Sanatlar Akademisi ve Türk Sanatı Araştırma ve İncelemeleri, I. Berksoy Matbaası, İstanbul.
- Fırat, G Y., 2001. A Study of the Structural Response of Minaret in the 1999 Anatolian Earthquakes, M. Sc. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Güven, N., 1982. Televizyon Kuleleri ve Sanayi Bacaları, Çağlayan Matbaası, 122 s.
- Hansen, S.O., 1998. Vortex-Induced Vibrations of Line-Like Structures, CICIND Report, 15, 15-23.
- Hara, T., Kato, S. ve Ohya, M., 1999. R/C Cooling Tower Behavior Subjected to Cyclic Wind Loading, First International Conference on Advances in Mechanics, 1, 341-346.

- Houghton, E.L. ve Carruthers, N.B., 1976. Wind forces on buildings and structures: an Introduction, Edward Arnold Ltd., 243 s.
- Jackson, K.R., 1978. A Guide to Chimney Design, IPC Science and Technology Pres Limited, 143 s.
- JSCE Committee, 1999. Damage to Domes, Minarets and Historical Structures, Report on Kocaeli Earthquake, Japan Society of Civil Engineers, Türkiye.
- Köseoğlu S., 1987. Temeller Statiği ve Konstruksiyonu, Matbaa Teknisyenleri Basımevi 3. Baskı, İstanbul.
- Livaoğlu, R., 2001. Yapıların Deprem Hesabında Burulma Düzensizliğinin ve Hesap Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Motosaka, M. ve Somer, A., 2002. Ground Motion Directionality Inferred From a Survey of Minaret Damage During the 1999 Kocaeli and Duzce earthquakes, J Seismol, 6, 419-430.
- Nuhoğlu, A. ve Şahin, S., 2005, Sanayi bacalarının ve minarelerin dinamik davranışları, 1. Deprem Sempozyumu, Mart, 433-443, Kocaeli.
- Oğuzmert, M., Dynamic Behaviour of Masonry Minarets, M. Sc. Thesis, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Istanbul, 2002.
- Ödekan, A., 1997. Minare, Eczacıbaşı Sanat Ansiklopedisi, Cilt:2, İstanbul.
- Öz, E., 2007. Betonarme Bacaların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yapısal Çözümleme Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Pinfold, G. M., 1975. Reinforced Concrete Chimneys and Towers, Viewpoint Publications, Londra.
- SAP2000, 2006. Integrated Software for Structural Analysis&Design, Computer and Structures Inc., California.
- Sezen H., Fırat G. Y. ve Sözen M. A., 2003. Investigation of Performance Monumental Structures During the 1999 Kocaeli and Duzce Earthquake, 5th National Confrence on Earthquake Engineering, Mayıs, İstanbul.
- Sezen, H., Acar, R., Doğançün, A. ve Livaoğlu, R., 2008. Dynamic Analysis and Seismic Performance of Reinforced Concrete Minarets, Engineering Structures, 30, 2253-2264.
- Taşkın, B., Özdemir, P. ve Özel, N. M., 2003. 6 Haziran 2000 Çankırı-Orta Depreminin Değerlendirmesi. 5. Ulusal Deprem Konferansı, Mayıs, AT-130, İstanbul.

- Temüz, H. T., 2007. Minarelerin Rüzgar Yükleri Altında Davranışlarının İncelenmesi ve Bunların Rüzgara Göre Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Tuluk, Ö. İ., 1999. Mekana Bağlı Strüktür Analizi: Osmanlı Dini Mimarisinde Örnekleme (15.-17. yy), Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Tuluk, Ö. İ., Doğangün, A., Livaoğlu, R. ve Acar, A., 2006. Mimari ve taşıyıcı sistem özellikleri bağlamında Türk minare geleneği, Yapı Dünyası Dergisi, 122, 41-49.
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, T.S.E., I. Baskı, Ankara.
- Uluengin, F., Uluengin, B. ve Uluengin, M.B., 2001. Osmanlı Anıt Mimarisinde Klasik Yapı Detayları, Yem Yayınları, İstanbul.
- Ulusay, R., Aydan, Ö., Erken, A., Kumsar, H., Tuncay, E. ve Kaya, Z., 2002. 3 Şubat 2002 Çay-Eyber bölgesinin Araştırılması ve Mühendislik İncelemesi, Türk Deprem Vakfı, 213 s.
- Ülgen, A., 1996. Klasik Devir Minareleri, Alfa Basın Yayım Dağıtım, İstanbul.
- Wilson, J.L., 2000. Code Recommendations for the Aseismic Design of Tall Reinforced Concrete Chimneys, CICIND Report, 16, 8-12.
- URL-1 CIAI'S, The Minaret of a Mosque in the City Center of Izmir in Turkey, After the Earthquake, <http://ciai-s.net/dramatic2.htm>, 12. Ekim.2008.
- URL-2 Düzcedamla, Camiler Deprem Etkisini Açıklıyor, <http://duzcedamla.com/text/index.dwx?TextID=2811>, 16 Mayıs 2006.
- URL-3 Hürriyet, Gazete Deprem Resimleri Arşivi, <http://arsiv.hurriyetim.com.tr/fix98/deprem/depremgaleri.htm>, 24 Aralık 2006.
- URL-4 SDR, Research the Damage of 1999 Kocaeli Earthquake in Turkey, System and Data Research Co., Ltd, Earthquake Disaster Mitigation Consultant, http://www.sdr.co.jp/damage_tr/eq_damage_main_html, 20 Ocak 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Ramazan ACAR 1982 yılında Ağrı'da doğdu. İlk ve orta öğretimini burada bitirdi. 2001 yılında girdiği ÖSYM sınavından derece yaparak Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 2005 yılında üniversite ikincisi bölüm ve fakülte birincisi olarak lisans eğitimi-öğrenimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilin Dalına Yüksek Lisans Öğrenimine birinci sıradan girdi. Lisans ve lisansüstü öğrenimi sırasında 4 SCI & AHSI ve 3 ulusal makale, 5 uluslararası ve 1 ulusal bildiri olmak üzere toplam 13 yayın yapmıştır. TÜBİTAK Bilim İnsanı Yetiştirme Programından Yurtiçi Yüksek Lisans Bursu aldı. Çok sayıda ulusal ve uluslararası projeler hazırladı. Bekar olan ACAR iyi derecede İngilizce bilmektedir.