Burgulu Yüksek Yapıların Yanal Yükler Altında Davranışlarının İncelenmesi

Abdullah Niğdelioğlu

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2022

The Behaviour Of Twisted Tall Buildings Under Lateral Loads

Abdullah Niğdelioğlu

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

January 2022

Burgulu Yüksek Yapıların Yanal Yükler Altında Davranışlarının İncelenmesi

Abdullah Niğdelioğlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Uğur ALBAYRAK

İkinci Danışman: Prof. Dr. Can BALKAYA

Ocak 2022

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Uğur ALBAYRAK ve Prof. Dr. Can BALKAYA danışmanlığında hazırlamış olduğum "Burgulu Yüksek Yapıların Yanal Yükler Altında Davranışlarının İncelenmesi" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik, ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik, ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik, ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 21/01/2022

Abdullah NİĞDELİOĞLU

İmza

ÖZET

Burgulu yüksek yapılara duyulan ilgi giderek artmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında yüksek yapıların yapısal bir formu olan bir burgulu yüksek yapının deprem ve rüzgar yükleri altında performansı incelenerek eşdeğeri olan prizmatik şekle sahip bir yapıyla karşılaştırılması yapılmıştır. Amerika Birleşik Devletleri ülkesinin Miami, Florida kentinde mevcut bulunan Grove at Grand Bay binası referans alınarak modellemeler ve analizler üç boyutlu analiz programı ETABS (V.18.1.1) ile yapılmıştır. Burgulu yapının her katı saat yönünün tersinde 3 derece döndürülerek toplamda 69 derece rotasyon yaptırılmıştır. Analizler sonucunda maksimum tepe deplasmanları, taban kesme kuvvetleri, göreli yer değiştirmeler ve devrilme momentleri incelenmiştir. Çalışmada, ASCE 7-16 yönetmeliğinden yararlanılmıştır. Döşemeler tam rijit diyafram olarak atanmıştır. Kolonlar betonarme olarak ve yapının merkezinde bulunan perdeler kompozit olarak modellenmiştir. Perde uç bölgelerinde bulunan betona gömülü I çelik profiline sahip bölgeler, kompozit kolon olarak modellenerek katmanlı perde duvar olarak modellenen kompozit perdelere rijit linklerle bağlanmıştır. Çalışmada, çelik plakalı betonarme kompozit perde duvarların incelemesi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, modellenen prizmatik ve burgulu yapı H/500 maksimum tepe deplasman kriterini ve göreli yer değiştirmeler ASCE 7-16 yönetmeliğinin koşullarını sağlamaktadır. Analiz sonucunda burgulu yüksek yapının yanal rijitliğinin prizmatik yüksek yapıya göre daha az olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Burgulu yüksek yapılar, vaka analizi, yanal yük, sonlu elemanlar analizi, kompozit perde duvar.

SUMMARY

The popularity of twisted tall buildings is increasing. Within the purpose of this thesis, the performance of twisted high-rise structures, a structural form of high-rise buildings, under earthquake and wind loads has been evaluated and compared to its counterpart, which has a prismatic shape. Modeling and analysis has been made with the three-dimensional analysis program ETABS (V.18.1.1) with reference to the Grove at Grand Bay building located in Miami, Florida, USA. Each floor of the building has been rotated 3 degrees counterclockwise, resulting in a total of 69 degrees of rotation. As a result of the analysis, maximum story displacements, base shear forces, story drifts and overturning moments are examined. In the study, ASCE 7-16 standard are used. Floors are assigned as rigid diaphragms. The columns are modeled as reinforced concrete and the walls in the center of the building are modeled as composite. Regions with I steel profile embedded in the concrete in the corner column regions are connected to the composite shear walls with rigid links. In the study, steel plate reinforced concrete composite shear walls are examined. According to the findings of the analysis, the modeled prismatic and twisted structures meet the H/500 maximum top displacement criterion, and the story drifts meet the requirements of ASCE 7-16 regulation. As an outcome of the analysis, the twisted tall structure has a lower lateral stiffness than the prismatic tall structure.

Keywords: Twisted tall buildings, case study, lateral force, finite element analysis, composite shear wall.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……..……v

SUMMARY…….……..vi

İÇİNDEKİLER……..vii

ŞEKİLLER DİZİNİ…….…….....x

ÇİZELGELER DİZİNİ……....xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ…….....xv

1. GİRİŞ VE AMAÇ……1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI……...3

2.1. Literatür Taraması Özeti…….....3

2.1.1. Modelleme Yöntemiyle Yapılan Çalışmalar…….....3

2.1.2. Rüzgar Tünel Testleri ile Yapılan Çalışmalar…….....7

3. BURGULU YÜKSEK YAPILAR, YANAL YÜKLER VE KOMPOZİT PERDE DUVARLAR……...……....9

3.1. Yüksek Yapılar……..……...……...…….9

3.2. Yüksek Yapılarda Kullanılan Taşıyıcı Sistem Türleri……...……12

3.3. Burgulu Yüksek Yapıların Tanımı ve Gelişim Süreci……...12

3.4. Burgulu Yüksek Yapı Örnekleri…….14

3.4.1. Turning Torso…….15

3.4.2. Evolution Tower……...……..16

3.4.3. Al Bidda Tower……..17

3.4.4. Generali Tower……...18

3.4.5. Cayan Tower……..19

3.4.6. Shanghai Tower……..20

3.4.7. Lakhta Center…….21

3.4.8. Regent Emirates Pearl……22

3.4.9. Mode Gakuen Spiral Towers……...……..23

İÇİNDEKİLER(devam)

Sayfa

3.5. Maksimum Tepe Deplasmanı Kriteri……..……...……24
3.6. Yüksek Yapılarda Rüzgar Etkisi……...…….……...…….…25
3.7. Yüksek Yapılarda Deprem Etkisi……...31
3.7.1. Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi…….....31
3.7.2. Mod Birleştirme Yöntemi(Tepki Spektrumu Analizi)…….....32
3.7.3. Zaman Tanım Alanında Analiz Yöntemi……...……..32
3.8. Kompozit Perde Duvarlar……..……...……...33
3.8.1. Kompozit Perde Duvarların Avantajları…….……...36
4. YÖNTEM……...…...…….....37
4.1. Grove At Grand Bay Güney Binasının Yapısal Bilgileri……...……..37
4.2. Yöntem……...……...…...43
4.3. Rüzgar Yükünün Tanımlanması……...48
4.3.1 Rüzgar Doğrultu Faktörü (K_d)…….……...49
4.3.2. Dış Basınç Katsayısı……. ……....49
4.3.3. Rüzgara Maruz Kalma Kategorileri ……..……...50
4.3.4. Rüzgar Yükü Yükleme Kombinasyonları……...…….……...51
4.3.5. Zemin Yükseklik Faktörü (K_d)……..…..……..51
4.3.6. Topoğrafik Faktör (K_{zt})……..…..……..52
4.3.7. Fırtına Etki Faktörü (G_f)……..…..……53
4.4. Etkin Kesit Rijitlikleri……...……..54
4.5. Deprem Yükünün Tanımlanması……...……..55
4.6. Kompozit Betonarme Perde Duvar Modellemesi……...….57
4.7. Uygulanan Diğer Yükler……...…...60
5. BULGULAR VE TARTIŞMA……..……..……...…...61
5.1. Prizmatik yapıya ait analiz sonuçları……...……....61
5.1.1 X yönünde uygulanan deprem kuvveti altında sonuçlar……61

İÇİNDEKİLER(devam)

Sayfa

5.1.2. Y yönünde uygulanan deprem kuvveti altında sonuçlar……...63
5.1.3. X yönünde uygulanan rüzgar kuvveti altında sonuçlar……..…..65
5.1.4. Y yönünde uygulanan rüzgar yükü altında sonuçlar…..……...67
5.1.5. Modal analiz sonuçları……...…...69
5.1.6. Yüklemeler altında oluşan kesit tesirleri……...69
5.2. Burgulu yapıya ait analiz sonuçları……...…..72
5.2.1. X yönünde uygulanan deprem kuvveti altında sonuçlar……..…72
5.2.2. Y yönünde uygulanan deprem kuvveti altında sonuçlar……..…....74
5.2.3. X yönünde uygulanan rüzgar kuvveti altında sonuçlar……...…..76
5.2.4. Y yönünde uygulanan rüzgar yükü altında sonuçlar…….....…...78
5.2.5. Modal analiz sonuçları……...…...80
5.2.6. Yüklemeler altında oluşan kesit tesirleri……...…80
6. SONUÇ VE ÖNERİLER……..……..……..……84
6.1. Çalışmanın Özeti……...…….84
6.2. Sonuçlar……...……...85
6.3. Öneriler……...86
KAYNAKLAR DİZİNİ……..……....87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.1. Home Insurance binası, Chicago (Günel ve Ilgın, 2014)…….….10
3.2. Guggenheim müzesi, Bilbao (en.wikipedia.org)……..…..…...10
3.3. Bir binanın yaklaşık maliyet dağılımı (Elnimeiri ve Almusharaf, 2010)……..11
3.4. Yıllara göre en yüksek 100 yapıda kullanılan malzeme türleri (CTBUH)……11
3.5. Twister ve Tordo (Vollers, 2005)……..……13
3.6. Turning Torso (en.wikipedia.org) ……..……..15
3.7. Evolution Tower (Nikandrov, 2016)……..……...16
3.8. Al Bidda Tower (mapio.net) ……..……..17
3.9. Generali Tower (Giuliani,2018)……...……...……..18
3.10. Cayan Tower (en.wikipedia.org)……..…….....19
3.11. Shanghai Tower (structurae.net)……..……...20
3.12. Lakhta Center (archdaily.com)……..……...…..…..21
3.13. Regent Emirates Pearl (skyscrapercenter.com)……....……..22
3.14. Mode Gakuen Spiral Towers (en.wikipedia.org) ……...23
3.15. Rüzgar tepki yönleri (Gunawardena vd., 2017) ……...…..26
3.16. Yüksek yapılarda vorteks etkisi (Taranath, 2012)…….……..26
3.17. Taipei 101 Rüzgar Tüneli Testi(RWDI)…….……...….28
3.18. Rüzgar tüneli şeması (Taranath, 2012)…….……..….28
3.19. Geleneksel olmayan yapı formları örnekleri (Alaghmandan vd, 2014)……..29
3.20. Farklı kesite sahip yapı planları (Alaghmandan vd, 2014)…….……...…29
3.21.a. Prizmatik yapıda cephede görülen basınç katsayıları……...30
3.21.b. Burgulu yapıda cephede görülen basınç katsayıları……..……...30
3.21. Basınç katsayıları (Shabab,2020)……30
3.22. Rüzgar akımı diyagramı (Ay vd., 2018)…….. ……..……....31
3.23. Eşdeğer deprem yükü yöntemi (Bourahla, 2015)……. ……..……32
3.24. Kompozit betonarme perde duvar ……..…34
3.25. Kompozit çelik plakalı betonarme perde duvar …….……34

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

3.26. Kompozit beton dolgulu çelik plakalı perde duvar ……..…….....34
3.27. Kompozit çelik plakalı betonarme perde (Zhou vd., 2020) …….…….....35
4.1.a. Grove at Grand Bay Kuzey Binası…….37
4.1.b. Grove at Grand Bay Güney Binası…….37
4.1. Grove at Grand Bay binaları (archello.com).……..…….…….....37
4.2. 20.kata ait mimari plan (metre)……..…….…..38
4.3. Kuzey binası eğimli kolonlar (DeSimone vd., 2015)…….....39
4.4. Kompozit perde duvar inşa hali (DeSimone vd., 2015)…….....40
4.5. Ardgermeli döşeme (DeSimone vd., 2015……..…….....…...41
4.6. Rüzgar hız haritası (asce7hazardtool.online)……...…….……42
4.7. ABD zemin sınıfı haritası (Rong ve Thomson, 2012)……...42
4.8. Prizmatik ve burgulu yapı modelleri…….……...…….44
4.9. Modellemelerde kullanılan mimari plan……...44
4.10.a. 1. Kat- 3° dönüş açısı…….……..45
4.10.b. 4. Kat- 12° dönüş açısı……...……..…45
4.10.c. 7 Kat- 21° dönüş açısı……..….45
4.10.d. 10. Kat- 30° dönüş açısı……..….45
4.10.e. 13. Kat- 39° dönüş açısı……45
4.10.f. 16. Kat- 48° dönüş açısı…….....45
4.10.g. 19. Kat- 57° dönüş açısı……..…….46
4.10.h. 22. Kat- 66° dönüş açısı……..…….....46
4.10. Burgulu yapı plan kesitleri…….....….46
4.11. Çevre kolonları enkesiti…….....46
4.12. Perde uç kolonları ve bağ kirişleri en kesiti……...…….47
4.13. Burgulu yapının dikey kesiti……...…….....48
4.14. Rüzgar doğrultusuna göre yatay uzunluklar…….....50
4.15. Rüzgar yükü yükleme kombinasyonları (ASCE 7-16)…….....51

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

4.16. Topoğrafik etki (Özlek, 2015)…….52
4.17. ASCE 7-16'a göre deprem spektrumu (seismicmaps.org)……..……56
4.18. Çelik profil kesit ölçüleri (steelsolutionscompany.com)……..…58
4.19. ETABS'de çok katmanlı kabuk perde duvar tanımlaması……..59
4.20. Çekirdek bölgesi……..59
4.21. Çelik plakalı kompozit betonarme perde duvar kesiti (mm)……...60
5.1. X yönü deprem yüklemesi altında deplasman değerleri……..……....61
5.2. Göreli yer değiştirme grafiği……..……..62
5.3. Devrilme momenti diyagramı……...…62
5.4. Y yönü deprem yüklemesi altında deplasman değerleri……...…63
5.5. Göreli yer değiştirme grafiği… ……..……..64
5.6. Devrilme momenti diyagramı……...…64
5.7. X yönü uygulanan rüzgar yüklemesi…….65
5.8. X yönü rüzgar yüklemesi altında deplasman değerleri…….....65
5.9. Göreli yer değiştirme grafiği…..……....66
5.10. Devrilme momenti diyagramı……..…….....…….66
5.11. Y yönü uygulanan rüzgar yüklemesi ……..67
5.12. Y yönü rüzgar yüklemesi altında deplasman değerleri ……..67
5.13. Göreli yer değiştirme grafiği……...…68
5.14. Devrilme momenti diyagramı……...……..68
5.15. X yönünde uygulanan deprem yükü altında eksenel kuvvet sonuçları……...70
5.16. Y yönünde uygulanan deprem yükü altında eksenel kuvvet sonuçları……...70
5.17. X yönünde uygulanan rüzgar yükü altında eksenel kuvvet sonuçları…….71
5.18. Y yönünde uygulanan rüzgar yükü altında eksenel kuvvet sonuçları…….71
5.19. X yönü deprem yüklemesi altında deplasman değerleri…….……72
5.20. Göreli yer değiştirme grafiği……..……..……....73
5.21. Devrilme momenti diyagramı…….……73
5.22. Y yönü deprem yüklemesi altında deplasman değerleri……..……...…74

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

5.23. Göreli yer değiştirme grafiği…….....……..75
5.24. Devrilme momenti diyagramı…….……75
5.25. X yönü uygulanan rüzgar yüklemesi……...76
5.26. X yönü rüzgar yüklemesi altında deplasman değerleri……..…….76
5.27. Göreli yer değiştirme grafiği……...……...….77
5.28. Devrilme momenti diyagramı……...…….….77
5.29. Y yönü uygulanan rüzgar yüklemesi……...78
5.30. Y yönü rüzgar yüklemesi altında deplasman değerleri…….…..78
5.31. Göreli yer değiştirme grafiği… ……..……79
5.32. Devrilme momenti diyagramı…….79
5.33. X yönünde uygulanan deprem yükü altında eksenel kuvvet sonuçları……...81
5.34. Y yönünde uygulanan deprem yükü altında eksenel kuvvet sonuçları……...81
5.35. X yönünde uygulanan rüzgar yükü altında eksenel kuvvet sonuçları…….82
5.36. Y yönünde uygulanan rüzgar yükü altında eksenel kuvvet sonuçları…….82
5.37. Burgulu yüksek yapının kendi yükü altında burulma diyagramı……83

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

3.1. En yüksek on burgulu yüksek yapı (en.wikipedia.org)…….……..…..…..….14
3.2. Tepe deplasmanı kabul edilebilirlik kriterleri (Ellingwood, 1986)……...…24
3.3. Uluslararası yönetmeliklerde deplasman limitleri (Smith, 2011)…….25
4.1. Risk kategorileri ve bina önem katsayıları (ASCE 7-16)…….…….43
4.2. Taşıyıcı sistemde kullanılan malzemeler……..…….....47
4.3. Taşıyıcı sistemde kullanılan beton sınıfları…..……..…..…..……...47
4.4. Taşıyıcı sistemde kullanılan donatı sınıfları ve net beton örtüsü……..…47
4.5. Rüzgar doğrultu faktörü katsayısı (ASCE 7-16)…….……...……..49
4.6. Dış basınç katsayıları (ASCE 7-16)……...…...50
4.7. Zemin yükseklik faktörü (ASCE 7-16)……..……...…….....52
4.8. Fırtına etkisi faktörü katsayısı (ASCE 7-16)……...……..54
4.9. Etkin kesit rijitlikleri (ACI 318-14)…….……...…...55
4.10. Yapı deprem parametreleri……..…….…….....55
4.11. Prizmatik yapı taban kesme kuvveti büyütme oranı……...……56
4.12. Burgulu yapı taban kesme kuvveti büyütme oranı……..57
4.13. İzin verilen kat ötelenme değerleri, Δ (ASCE 7-16)……..…….57
4.14. W 310 x 310 x 283 çelik profilinin kesit ölçüleri……..…….….58
5.1. Prizmatik yapı modal analiz sonuçları……..69
5.2. Burgulu yapı modal analiz sonuçları…….78

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
I_g	Atalet momenti
A_g	Kesit brüt alanı
H	Yapı yüksekliği
L	Rüzgar yönüne dik olan binanın yatay ölçüsü
B	Rüzgar yönüne paralel olan binanın yatay ölçüsü
C_p	Yapı yüzey konumuna bağlı katsayı
q_z	Rüzgarın çarptığı cephedeki basınç
q_h	Rüzgarın arka ve yan cephelerde oluşturduğu basınç
S_s	Kısa periyot bölgesi için harita spektral ivme katsayısı
S_1	1.0 sn periyot için harita spektral ivme katsayısı
T_L	Yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu(s)
R	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
Ω	Büyütme katsayısı
n	Hareketli yük kütle katılım sayısı
I_e	Bina önem katsayısı
T	Periyot
C_c	Net beton örtüsü
G_f	Fırtına etkisi faktörü
K_{zt}	Topoğrafik faktör
K_d	Rüzgar doğrultulu faktör
K_e	Zemin yükseklik faktörü
$\bar{I}_z$	Türbülans yoğunluğu
g_Q	Zemin tepkisi için tepe katsayısı
Q	Zemin tepki etkeni
g_R	Rezonans tepkisi için tepe katsayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler	Açıklama
R	Rezonans tepki katsayısı
g_V	Rüzgar tepkisi için tepe etkeni
n_1	Doğal frekans, Hz
R_n	Rezonans reaksiyon katsayısı
R_h	Rezonans reaksiyon katsayısı
R_B	Rezonans reaksiyon katsayısı
R_L	Rezonans reaksiyon katsayısı
N_1	Azaltılmış frekans
$L_{\bar{z}}$	Eşdeğer yükseklikte türbülansın integral uzunluk ölçeği
$V_{\bar{z}}$	$\bar{z}$ yüksekliğinde ortalama saatlik rüzgar hızı
Z_g	Atmosferik sınır tabakasının nominal yüksekliği
α	3 saniye fırtına hızı güç yasası üssü
$\hat{\alpha}$	α'nın karşılığı
$\bar{\alpha}$	Ortalama saatlik rüzgar hızı gücü yasası üssü
$\bar{b}$	Ortalama saatlik rüzgar hızı etkeni
$\hat{b}$	3 saniye şiddetli hız faktörü
c	Türbülans yoğunluk faktörü
ℓ	Uzunluk ölçeği faktörü
$\bar{\varepsilon}$	Yekpare uzunluk ölçeği güç yasası üssü
Z_{min}	Maruz kalma sabiti
β	Sönümleme oranı
h	Ortalama bina yüksekliği
V	Temel rüzgar hızı
t_w	Çelik profil gövde kalınlığı
t_f	Çelik profil başlık kalınlığı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler	Açıklama
h	Çelik profil yüksekliği
b	Çelik profil genişliği
Δ	İzin verilen kat ötelenme değerleri
$\mathbf{h_{sx}}$	Kat yüksekliği
δ_M	Doğrusal olmayan tepki yer değiştirmesi
C_d	Deplasman büyütme faktörü
δ_{max}	Maksimum deplasman

Kısaltmalar	Açıklama
ACI	American Concrete Institute
AISC	American Institute of Steel Construction
ANSI	American National Standards Institute
ASCE	American Society Civil Engineers
CFD	Computational Fluid Dynamics
CTBUH	Council on Tall Buildings and Urban Habitat
H-FBB	High frequeny base balance
RWDI	Rowan Williams Davies& Irwin Inc.
SM-PSS	Synchronous multi-pressure scanning system
SOM	Skidmore, Owings & Merrill LLP

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Bu tez çalışması doğrultusunda, burgulu yüksek bir yapının rüzgar ve deprem yükleri etkisinde davranışlarının incelenerek eşdeğeri olan prizmatik şekle sahip bir yapıyla karşılaştırılmasının yapılması ana gayedir. Tez çalışmasının amaçları aşağıda sıralanmıştır:

- Burgulu yüksek yapıların bir özelliği olan belli bir açı yaparak dönmesi ve kolonların eğimli bir şekilde dönüş yapması burgulu yüksek yapılarda nasıl bir davranış vereceği amaçlanmıştır.
- Burgulu şekle sahip bir yüksek yapı ile eşdeğeri olan bir prizmatik yüksek yapının yanal yükler altındaki davranışlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.
- Yüksek yapıların taşıyıcı sistemleri ve kullanılan malzeme türleri hakkında bilgiler verilmiştir. Mevcutta var olan bazı burgulu yüksek yapıların taşıyıcı sistem ve mimari özellikleri derlenerek gelecek çalışmalarda bu konuda çalışacak olan araştırmacılara katkıda bulunulması amaçlanmıştır.
- İnşaat endüstrisinde inşa edilecek gelecek burgulu yüksek yapıların yapımı ve imalatı aşamasında katkıda bulunulması amaçlanmıştır.
- Üç boyutlu analiz programı ETABS ile burgulu yüksek yapının analizlerinin yapılması amaçlanmıştır.
- Burgulu yüksek yapıların yanal yükler altında avantajlı ve dezavantajlı yönleri bu tez kapsamında araştırılmıştır.

Tez altı kısımdan oluşmaktadır. Birinci bölüm olan giriş kısmında tezin amaçlarından, tezin inşaat endüstrisine ve literatüre nasıl bir katkı sağlayabileceği konusunda açıklamalar yapılmıştır.

İkinci kısımda daha önce yapılmış, literatürde var olan çalışmalardan söz edilmiştir. Literatürde yapılmış çalışmalar kısaca değerlendirilmiştir .

Üçüncü kısımda yanal yükler altında yüksek yapılar ve kompozit perde duvarlardan söz edilmiştir. Burgulu yüksek yapıların tanımından söz edilerek inşa edilmiş bazı burgulu yüksek yapıların taşıyıcı sistem detayları ve mimari özellikleri incelenmiştir. Yüksek

yapılarda rüzgar ve deprem etkileri araştırılmıştır. Mevcut binalarda kullanılan kompozit perde duvar çeşitleri incelenmiştir.

Dördüncü kısımda, yapıların modellemesinde kullanılan yöntemler belirtilmiştir. Referans yapı olarak alınan Grove at Grand Bay Güney binasının yapısal ve mimari bilgileri gösterilmiştir. ASCE 7-16'a göre rüzgar ve deprem yüklerinin yapıya nasıl uygulandığı, etkin kesit rijitlik değerlerinin ne alındığı ve kompozit betonarme perde duvar modellemesi gösterilmiştir.

Beşinci kısımda, modellemesi yapılan prizmatik ve burgulu yapıların bulguları verilmiştir. Bu kapsamda deprem ve rüzgar yükleri x ve y yönünde olmak suretiyle yapılara uygulanmıştır. Analiz sonucunda taban kesme kuvvetleri, maksimum tepe deplasman değerleri, göreli yer değiştirmeler, devrilme moment değerleri ve kesit tesirleri gösterilmiştir.

Altıncı kısımda, yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirilmiş olup gelecek araştırmalar için birtakım önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu kısımda kronolojik sıraya göre burgulu yüksek yapılarla ilgili literatürde var olan çalışmalar incelenmiştir.

2.1. Literatür Taraması Özeti

2.1.1. Modelleme yöntemiyle yapılan çalışmalar

Scott vd. (2007)'a göre prizmatik yapıya sahip olmayan yapıların yapımında en birincil zorluğun döşeme plakası olduğu çalışmada ifade edilmiştir. Burgulu yüksek yapıların çekirdek bölgesinin dikey olarak sabit kalmasının pratik ve makul olabileceği belirtilmiştir. Performans bazlı tasarımın, prizmatik olmayan yüksek binalarda kullanılması gerektiği çalışmada belirtilmiştir.

Sev ve Başarır (2011) tarafından yapılan çalışmada yeni bir yapı formu olan burgulu yapılardan bilgiler verilmiştir. Çalışmada, mimari açıdan burgulu yapıların prizmatik formlu yüksek yapılara tepki olarak kullanılan bir yapı formu olduğu belirtilmiştir. Çalışmada yeni bir yapı formu olan burgulu yapıların tasarım aşamasında yaşanılan zorluklardan değinilmiştir.

Kim ve Hong (2011) tarafından yapılan çalışmada eğimli ve burgulu yapıların aşamalı çökme direnci kapasitelerinin (progressive collapse-resisting capacities) doğrusal olmayan ve dinamik analizlerle değerlendirilmesi yapılmıştır. 30 katlı olarak inşa edilen eğimli ve burgulu yapıların performansları prizmatik olarak modellenen emsal yapıya göre karşılaştırılması yapılmıştır. 30x30 m kare planına sahip ve her bir kat yüksekliği 3.5 m olan burgulu yüksek yapıların çekirdek bölgesi betonarme olarak modellenmiştir. Burgulu yapıların her bir katı 1,5 derece ve 3 derece döndürülerek sırasıyla 45 derece ve 90 derece dönüş açısı verilmiştir. Çalışma sonucunda, modellenen burgulu yapıların emsal modellenen prizmatik yapılara göre çok büyük olmayan aşamalı göçme potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir .

Moon (2012) tarafından yapılan çalışmada, farklı taşıyıcı sistemlere sahip burgulu yapılar modellenerek performansa bağlı yanal rijitlik performansı incelenmiştir. Parametrik modellemede Rhino ve Grasshopper yazılımları kullanılmış olup analizler SAP2000 sonlu elemanlar programı ile yapılmıştır. Farklı açılarda ve yüksekliklerde burgulu yüksek yapılar modellenerek analizler sonucunda maksimum deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarından biri olarak, burgulu yapının dönüş açısı arttıkça yanal rijitliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Burgulu yüksek yapıların, vorteksi azalttığı için prizmatik yüksek yapılara göre aerodinamik açısından daha iyi performans ortaya koyduğu belirtilmiştir.

Lee vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada 60 katlı dış destekli bir çelik taşıyıcı sistemine sahip bir burgulu yapının deprem performansı incelenmiştir. Modellemeler yapının farklı açılarda, farklı deprem bölgelerinde olması suretiyle analizler yapılmış olup üç boyutlu analiz programları ETABS ve PERFORM 3-D kullanılmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılmıştır. Modellemeler her katın 0 – 1.5 – 3 derece açı ile döndürülmesi suretiyle maksimum deplasman değerleri, periyot değerleri, kat ötelenmeleri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda burgulu yapıların, yüksek sismisite alana sahip bölgelerde yapının dönüş yaptığı açı değerinin kat ötelenmelerini etkileyen önemli bir faktör olduğu vurgulanmıştır.

Su vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada dünyanın en yüksek burgulu yüksek yapısı Shanghai kulesinin uzun dönemli yapısal performans izlemesi yapılmıştır. 400'den fazla sensör, yapının farklı bölgelerine konumlandırılarak taşıyıcı sistem ve yapının performansı izlenmiştir. Yapı, sonlu elemanlar programı MİDAS/GEN ile de modellenmiştir. Yapının farklı saatlerdeki deplasman değerleri, gerilme değerleri sensörler aracılığı ile ölçülmüştür.

Kwon ve Kim (2014) tarafından yapılan çalışmada 36 katlı çelik diyagridlı kare planına sahip bina 90 derece, 180 derece, 270 derece açılarla döndürülmek suretiyle aşamalı çökme direnç kapasitesi değerlendirilmesi, keyfi kolonlar kaldırılarak deprem yüküne maruz bırakılarak araştırılmıştır. Modeller, Kore yapı yönetmeliğine göre tasarlanmış olup doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, burgulu diyagridli yüksek yapıların aşamalı göçme potansiyelinin yapının

dönme açısı arttıkça azaldığı ortaya çıkmıştır. Diğer bir sonuç ise burgulu yapının yaptığı dönüş açısı arttıkça deprem kırılganlığının azaldığı gözlemlenmiştir.

Moon (2015) tarafından yapılan çalışmada burgulu yüksek yapı, eğimli yüksek yapı, daralan yapıya sahip yüksek yapı ve serbest forma sahip yüksek yapı modellenmiştir. Modellemelerde üç boyutlu analiz programı SAP2000 kullanılmıştır. Diyagridli ve çaprazlı tüp taşıyıcı sistemlerine sahip farklı yüksekliklerde burgulu yüksek yapıların tasarımı yapılmıştır. Çalışmada maksimum yanal deplasman alanları karşılaştırılmıştır. Burgulu yapılarda yapının dönüş açısı arttıkça yapının mukavemetinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Belostotsky vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada mevcut bulunan Evolution Tower burgulu yüksek yapısının betonarme yapı elemanlarının gerçek konumları dikkate alınarak mukavemet ve stabilite analizi gerçekleştirilmiştir. Yapı, ANSYS sonlu eleman yazılımı ile modellenmiştir.

Hverven (2017) tarafından yapılan çalışmada altıgen ve sekizgen plana sahip 6 adet konik ve burgulu yüksek yapı sonlu elemanlar programı ETABS ile modellenmiştir. Modeller deprem ve rüzgar yüklerine maruz bırakılmıştır. Bu yükler altında yapıların rijitliği ve esnekliği değerlendirilmiştir. Yapıların ikincil taşıyıcı sistemi tutkalla kaplanmış ahşap elemanlar ile modellenmiştir. Analiz sonucunda maksimum tepe deplasmanı, devrilme momenti, periyot ve göreli yer değiştirmeler elde edilmiştir. Çalışma sonunda,yapının yükseklik boyunca burgu veya konik halini almasının yapılarda global direngenliği azaltmadığı gözlemlenmiştir.

Jithin vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada betonarme burgulu yüksek yapılarda çelik çaprazların etkileri araştırılmıştır. Çelik çaprazlar V, X, ters V şeklinde modellenerek 19 katlı burgulu yüksek yapının rüzgar yükleri altında zaman tanım alanında analizi yapılmıştır. Çalışmada üç boyutlu analiz programı ETABS kullanılmıştır. Çelik çaprazların, burgulu yüksek yapılarda kullanılmasının yanal deplasmanı azalttığı görülmüştür. Çalışmada, çerçeve betonarme yapıya çelik çaprazların eklenmesi yapının periyodunun azalmasına, deplasmanlar ve kat ötelenmelerini de azalttığı gözlemlenmiştir.

Xiong ve Zhang (2018) tarafından yapılan çalışmada diyagridli tüp taşıyıcı sistemine sahip burgulu yüksek yapıların performansı incelenmiştir. Çalışmanın amacı olarak burgulu yüksek yapılarda bulunan her bir eleman yerleşiminin, yapının performansını nasıl etkilediğine dair birtakım kurallar bulmak olduğu yazarlar tarafından belirtilmiştir. Farklı dönüş açıları verilerek modellenen burgulu yüksek yapıların modellenmesi üç boyutlu analiz programı SAP2000 ile yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarından biri olarak döşemelerin dönüş açıları arttıkça burgulu yüksek yapılarda yan kolonların ve diyagonel çaprazların iç kuvvetlerinin artmaya meyilli olduğu belirtilmiştir.

Taşkın (2019) tarafından yapılan tez çalışmasında sonlu elemanlar programı ETABS kullanılarak burgulu yapılar üç kategoriye ayrılarak modellemeler oluşturulmuştur. Farklı yüksekliklerde, farklı açılarda, farklı taşıyıcı sisteme sahip yirmi iki burgulu yüksek yapı modellenerek analizler gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, 300 metre ve 90 derece dönme açısına sahip yatay kafes kirişli ve çerçeve tüpe sahip burgulu binaların maksimum tepe deplasman değerleri, modal analiz sonuçları ve kesit kuvvetleri irdelenmiştir. İkinci aşamada 300 metreye sahip burgulu yüksek yapıların dönüş açıları değiştirilmek suretiyle yapıda oluşacak tepkiler araştırılmıştır. Son aşamada 90 derece dönüş açısı yapan burgulu yüksek binaların yükseklikleri değiştirilerek modal özellikler ve maksimum tepe deplasmanları değerlendirilmiştir.

Song ve Zhang (2020) tarafından yapılan çalışmada diyagonel açısı, en boy oranı, köşe kolonu ve plan kesitinin burgulu diyagridler üzerindeki yanal rijitliğin etkisi incelenmiş ve optimal diyagonel açı aralığını araştırılmıştır. Çalışmada, ETABS programı kullanılmıştır. Sol ve sağ eğimli diyagonel açının, burgulu diyagridlerin yanal rijitliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Asimetrik köşegen açılara sahip burgulu diyagrid yapısının simetrik olana göre daha büyük yanal rijitlik sergilediği gözlemlenmiştir.

Shabab vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde türbülans modeli kullanılarak farklı rotasyonlara sahip burgulu formlu (90°, 180°, 270° ve 360°) yapılarla, prizmatik yapıya sahip yapının aerodinamik yük karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, burgulu yüksek yapılardaki aerodinamik yük etkisinin prizmatik yapıya göre daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Lee vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada burgulu şekle yapılarda deprem kayıtları kullanılarak doğrusal dinamik analiz yapılmıştır. Burgulu yapıların dönüş açısına göre oluşturulan modellemelerin dinamik özellikleri karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından biri olarak, burgulu yapının dönüş açısı arttıkça 50. kat ve üzerindeki katlarda göreli yer değiştirmelerin arttığı gözlemlenmiştir.

Navya vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada prizmatik forma sahip yapının, farklı yükseklik ve farklı dönme açılarına sahip burgulu yapılar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma kapsamında 24 adet model oluşturulmuştur. Çalışmanın sonucu olarak, prizmatik yapıya sahip olan yapıların deprem yükü altında burgulu yapılara göre daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir. Bunun sebebi olarak yanal rijitliğin burgulu yapılarda, prizmatik yapılara göre daha düşük olduğu çalışmada belirtilmiştir.

Shabab vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada kare, beşgen ve altıgen olmak üzere farklı kesitlere sahip prizmatik ve burgulu yüksek yapıların aerodinamik katsayılarının CFD metoduyla karşılaştırılması yapılmıştır. Üç adet prizmatik yüksek yapı ve on beş adet burgulu yüksek yapı analiz edilmiş olup burgulu yüksek yapılarda, rüzgarın oluşturduğu aerodinamik yükün prizmatik yapılara göre daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

2.1.2. Rüzgar tünel testleri ile yapılan çalışmalar

Tanaka vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada çeşitli prizmatik şekle sahip olmayan yüksek yapıların aerodinamik ve akım durumları incelenmiştir. Rüzgar tünel testleri gerçekleştirilerek aerodinamik kuvvetler ve rüzgar basınçları belirlenmiştir. Burgulu yüksek yapılarda farklı açı ve farklı şekle sahip planlarda analizler yürütülmüştür. Çalışmada, 180° dönüş açısı yapan kare alana sahip burgulu yüksek yapının daha iyi aerodinamik performans gösterdiği ifade edilmiştir.

Bandi vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada burgu yapılı modeller ile birlikte yirmi altı adet yüksek yapı modeli sınır tabaka rüzgar tünelinde testi yapılmıştır. Çalışma kapsamında, modellerde enine kesitlerdeki ve rotasyon açı değişikliklerinin oluşacak pik

basınç üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonunda, pik basıncın büyük ölçüde enine kesite ve yapının döndüğü açı miktarına bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

Kim vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada 180° dönüş açısı yapan bir yüksek yapı modeli ile prizmatik forma sahip bir yüksek yapının rüzgar ve karşı rüzgar yönünde tepkileri bir aeroelastik model testi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın sonunda burgulu yüksek yapının farklı doğrultulu rüzgar yükleri altında, ortalama ve dalgalı yer değiştirme tepkilerinin prizmatik yapıya göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Rüzgar yükü altında burgulu yüksek yapının aerodinamik sönüm oranları prizmatik yapı modeline benzer eğiliminde olduğu görülmüştür.

Bilgen (2019) tarafından yapılan tez çalışmasında burgulu yüksek yapıların aerodinamik ve yapısal nitelikleri araştırılmıştır. Referans yapı olarak seçilen mevcut Cayan Tower'ın hem yapının kendisi hem de emsali prizmatik olarak modellenmiştir. 3D olarak modellenen her iki yapı türü, rüzgar tüneli testlerine maruz bırakılarak sonuçlar elde edilmiştir. Rüzgar, yanal yükünün burgulu yapılarda etkisini anlamak için her 15 derece açı için testler gerçekleştirilmiştir. Rüzgar tüneli test sonuçları sonlu elemanlar programı Pointwise ile modellenen yapılar, CFD analiz sonuçlarına göre kesme kuvvetleri ve momentleri karşılaştırılmıştır. Her burgulu ve prizmatik yapılar üç boyutlu analiz programı ETABS ile modellenerek modal analizleri yapılmıştır.

Li vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada prizmatik şekle ve 90° burgu formuna sahip modellerde rüzgar etkileri, sınır tabaka rüzgar tüneli testlerinde hem basınç ölçümü hem de aero-elastik modeller ile ölçümü yapılarak incelenmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, her iki model için de yerel rüzgar kuvveti katsayıları, taban moment katsayıları, dikey korelasyon katsayıları analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, aerodinamik sönümlemenin özellikle rüzgar yönüne karşı göz ardı edilmemesi gerektiği gözlemlenmiştir. Diğer bir sonuç olarak, burgulu yapıların prizmatik yapılara göre daha iyi aerodinamik performans gösterdiği belirtilmiştir.

3. BURGULU YÜKSEK YAPILAR, YANAL YÜKLER VE KOMPOZİT PERDE DUVARLAR

Bu bölümde burgulu yüksek yapılardan, yüksek yapılara etkiyen yanal yüklerden ve kompozit perde duvarlar ile ilgili bilgiler verilmiştir.

3.1. Yüksek Yapılar

Yüksek yapıların tanımında kullanılan ortak bir ibare bulunmamaktadır. Farklı ülkelere, farklı bölgelere göre yüksek yapı tanımı değişmektedir. CTBUH'ın kabul ettiği tanıma göre en az 14 kat veya 50 metreye sahip olan yapılara yüksek yapı adı verilmektedir. CTBUH'nın kabullerine göre 50 metre ile 300 metre arasındaki yapılar yüksek yapı olarak kabul edilmektedir. 300-600 metre kapsamındaki yapılar çok yüksek yapılar olarak kabul edilmektedir. 600 metreden daha yüksek yapılara mega yüksek yapılar adı verilmektedir.

Yüksek yapıların inşası 19.yy sonlarına doğru yaygınlığı artmaya başlamıştır. Sanayi devriminin başlamasıyla gelişen teknoloji, yüksek yapıların popülerlik kazanmasına olanak sağlamıştır. Asansörün icadı, hidroforun kullanılmaya başlanması, gelişen yapı ve malzeme teknolojisi daha yüksek yapıların inşa edilmesine imkan vermiştir. İnsanlığın tarih boyunca kendini üstün gösterme arzusu, prestij, devletler arası rekabet, tanrıya ulaşma göstergesi olarak kabul ettiği değerler yüksek yapıların yapımında önemli faktörlerdir. İlk gökdelen olarak kabul edilen 12 katlı Home Insurance binası 1885 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin Chicago kentinde mühendis William Le Baron tarafından tasarlanmış ve inşa edilmiştir (Şekil 3.1). Home Insurance binasının inşasının ardından dünya çapında yüksek binaların sayısı hızla artış göstermiştir.



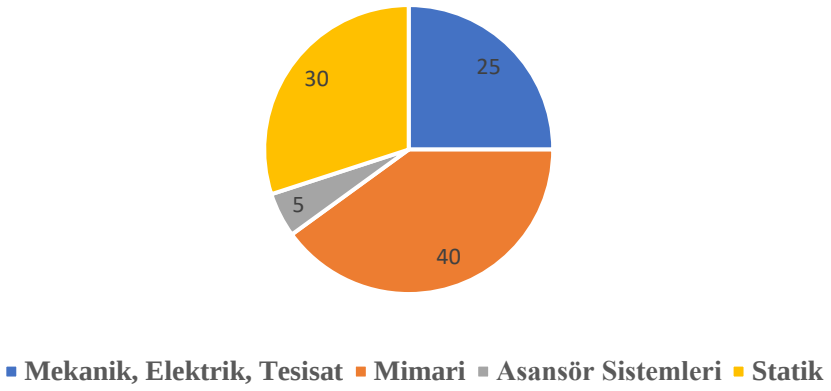
Şekil 3.1. Home Insurance binası, Chicago (Günel ve Ilgın, 2014)

1980'lerin başındaki postmodern hareket ile birlikte prizmatik yapıya sahip olmayan yapıların yapım süreci ülkelerde ivme kazanmıştır. Postmodernizm düşünce mimari, edebiyat ve felsefe gibi alanları derinden etkilemiştir. Postmodern mimari tarzını benimsemiş olan mimar Frank Gehry'nin tasarladığı Bilbao'da bulunan Guggenheim Müzesi bu düşüncenin bir örneğidir (Şekil 3.2).

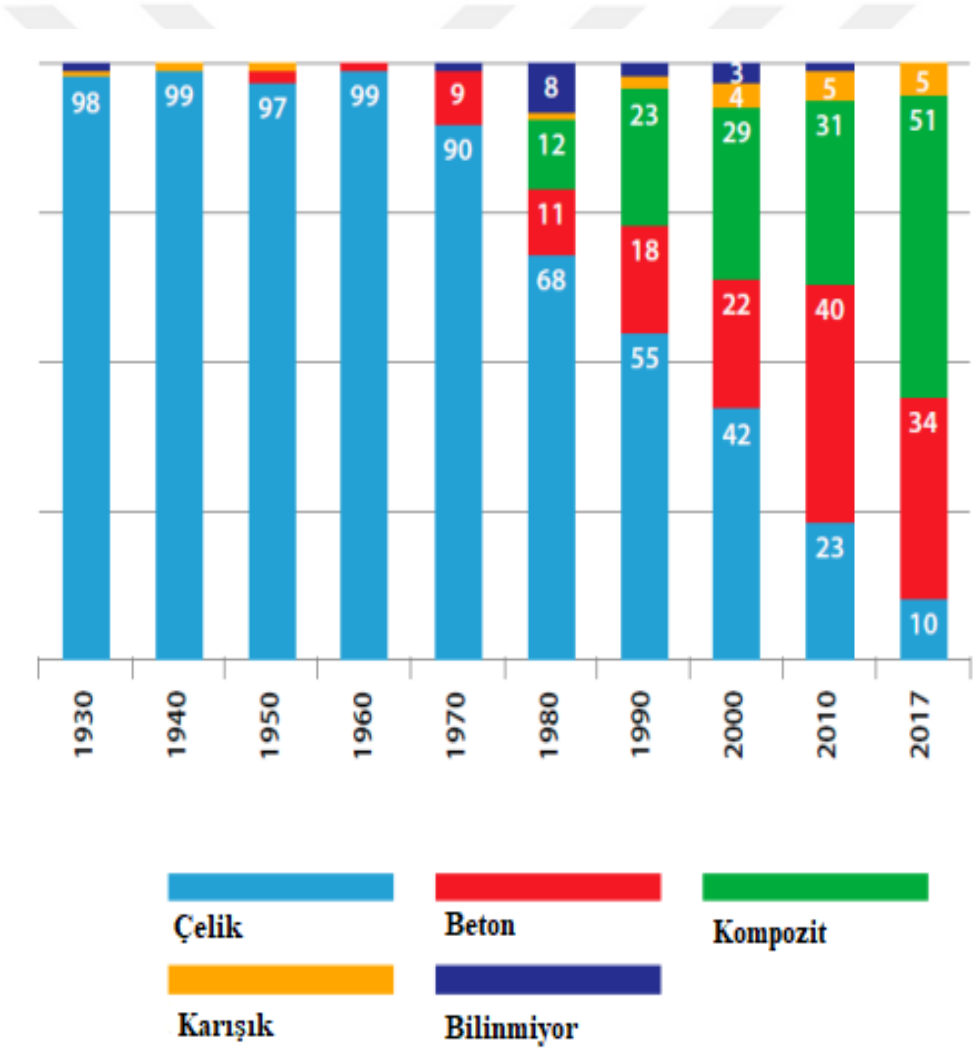


Şekil 3.2. Guggenheim Müzesi, Bilbao (en.wikipedia.org)

Gelecek yıllarda, yüksek yapıların daha çok eğrisel formlara sahip olacağı düşünülmektedir. Özellikle rüzgar yükünün yüksek yapılardaki oluşturduğu etki, bu yöndeki düşünceyi desteklemektedir. Yüksek yapıların rüzgar yüklerine çok hassas olması sebebiyle bu tür yükleri karşılamak için ek yapısal malzemeleri gerektirir (Elnimeiri ve Almusharaf, 2010). Şekil 3.3'de bir binanın yaklaşık olarak oluşturabileceği maliyetler yüzdesel olarak gösterilmiştir. Şekil 3.4'de yıllara göre en yüksek yüz binanın imalatında kullanılan malzeme türleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Bir binanın yaklaşık maliyet dağılımı (Elnimeiri ve Almusharaf, 2010)



Şekil 3.4. Yıllara göre en yüksek 100 yapıda kullanılan malzeme türleri (CTBUH)

3.2. Yüksek Yapılarda Kullanılan Taşıyıcı Sistem Türleri

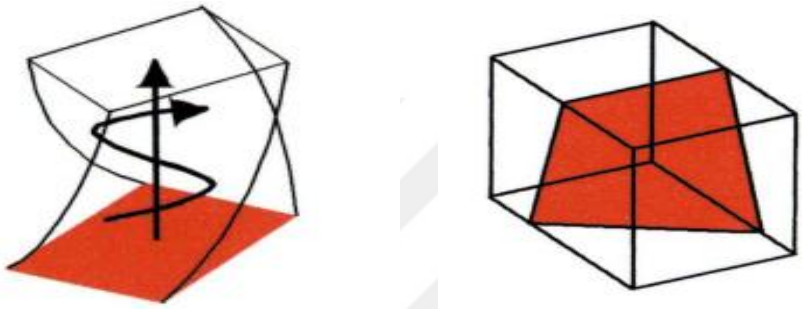
Yüksek yapılarda kullanılan taşıyıcı sistem türlerinin sınıflandırılmasında literatürde farklı araştırmacıların yapmış olduğu sınıflandırmalar yer almaktadır. Prizmatik yapıya sahip olan yüksek yapılarda birçok taşıyıcı sistem türü bulunmasına rağmen burgulu forma sahip yapılar için tümü uygulanamamaktadır (Özgen ve Sev, 2000). Çelik, betonarme ve kompozit yüksek yapılar için taşıyıcı sistem sınıflandırılmasında Günel ve Ilgın'ın (2014) yapmış olduğu sınıflandırma verilmiştir. Bu sınıflandırmada ifade edilen taşıyıcı sistemler şunlardır:

- **Rijit çerçeve sistemler**
- **Kirişsiz döşemeli sistemler**
- **Çekirdek sistemler**
- **Perde duvar sistemler**
- **Perdeli çerçeve sistemler**
  - **Çapraz çerçeveli sistemler**
  - **Perde duvarlı çerçeve sistemler**
- **Mega kolonlu sistemler**
- **Mega çekirdek sistemler**
- **Dış destekli sistemler**
- **Tübüler sistemler**
  - **Çerçeve tüp sistemler**
  - **Kafes tüp sistemler**
  - **Demet-tüp sistemler**

3.3. Burgulu Yüksek Yapıların Tanımı ve Gelişim Süreci

CTBUH'un tanımına göre, burgulu forma sahip olan yapılar yükseklik kazandıkça döşemeleri veya cepheleri kademeli olarak dönen yapılar olarak tanımlanmıştır. Bazı araştırmacılar tarafından da burgulu yapılar sınıflandırılmıştır. Vollers (2005) burgulu yüksek yapıların cephe uygulamalarına göre sınıflandırmış ve tanımlamıştır. Yazar, çalışmasında burgulu yapıları twister ve tordo olmak üzere iki sınıfa ayırmıştır. Twister dik

aks etrafında yatay bir şekilde dönen döşemelere sahip yapılar olarak tanımlamaktadır. Tordo kavramını yapının bir veya birden fazla cephesinin bir ortogonel yapıya veya bir dikdörtgen aksa bağlanması olarak tanımlamıştır (Şekil 3.5). Taşkın (2019) burgulu yüksek yapıları dönmeyle uyumlu, dönmeden bağımsız ve dönmeyle uyumlu iç sistem olarak üç kategoriye ayrılmıştır. Dönmeyle uyumlu sistem, sadece cephenin veya döşemenin dönüş açısı yaparak yapının burgu formuna verilen isimdir. Dönmeden bağımsız sistem, cephe veya döşeme ile birlikte taşıyıcı sistem elemanlarından kolonun da dönüş açısı yaparak burgu formunu alması olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.5. Twister ve Tordo (Vollers, 2005)

Burgulu yüksek yapıların ilk örneği 2005 yılında açılışı yapılan, İsveç ülkesinin Malmö kentinde bulunan Turning Torso'dur. Santiago Calatrava tarafından dizayn edilen yapı, Calatrava'nın "Twisting Torso" adı verilen insan formuna sahip heykeline dayanmaktadır. Turning Torso'nun yapımı, farklı forma sahip yüksek yapıların miladı sayılmaktadır. Bu yapının inşasıyla, farklı forma sahip yüksek yapılar için ilham kaynağı olmuştur. Burgulu yapılara olan ilginin artması dünya çapında yeni nesil ikonik olabilecek formda binaların yapılmasına olanak sağlamaktadır. Yapı ve mimari form arasındaki ilişki günümüzde zirveye ulaşmıştır (Szolomicki ve Szolomicka, 2019). Yapı teknolojisi ve mimarinin gün geçtikçe gelişmesi, burgulu yapıların inşasını günümüzde kolaylaştırmıştır ve hızlandırmıştır. Bu yapı formunun başlıca avantajları olarak aerodinamik rüzgar etkisini azaltması ve enerji verimliliğini sağlamasıdır.

Ekim 2021 tarihi itibariyle, dünyada inşa edilen ve inşası devam eden burgulu yüksek yapıların sayısı 33'tür. Çizelge 3.1'de en fazla yüksekliğe sahip ilk on burgulu yüksek yapının sıralaması verilmiştir. Çizelgede bulunan burgulu yüksek yapıların çoğunun, günümüzde Doğu ülkelerinde olması dikkat çekicidir.

Çizelge 3.1. En yüksek on burgulu yüksek yapı (en.wikipedia.org)

No	Bina İsmi	Ülke	Tamamlanma Yılı	Yükseklik	Toplam Rotasyon Açısı
1	Shanghai Tower	Çin	2016	632 m	120°
2	Lahkta Center	Rusya	2019	462 m	90°
3	Ocean Heights	Birleşik Arap Emirlikleri	2010	310 m	40°
4	Cayan Tower	Birleşik Arap Emirlikleri	2013	306 m	90°
5	Supernova Spira	Hindistan	2020	300 m	146°
6	Crown Sydney	Avustralya	2021	271 m	60°
7	Regent Emirates Pearl	Birleşik Arap Emirlikleri	2016	255 m	25°
8	Ningbo Bank of China Headquarters	Çin	2016	246 m	60°
9	Evolution Tower	Rusya	2015	246 m	156°
10	F&F Tower	Panama	2011	243 m	315°

İnşa süreci devam eden Suudi Arabistan'da bulunan Diamond Tower tamamlandığında uzunluğu boyunca 360 derece rotasyon yapan bir burgulu bina formunu alacaktır. Ayrıca Almanya ülkesinin Düsseldorf kentinde bulunan Twist adı verilen burgulu yapının, 2025 yılında inşasının tamamlanması beklenmektedir.

3.4. Burgulu Yüksek Yapı Örnekleri

Tez kapsamında, burgulu yüksek yapılar yapı mühendisliği açısından tip-1 ve tip-2 olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Tip-1, taşıyıcı sistem ve merkezi çekirdeğin sabitlenerek cephelerin veya döşemelerin dönüş yaptığı burgulu yüksek yapı çeşididir. Tip-2 merkezi iç çekirdeğin sabit olduğu, dış taşıyıcı sistemin döndüğü burgulu yüksek yapı çeşididir.

3.4.1. Turning Torso

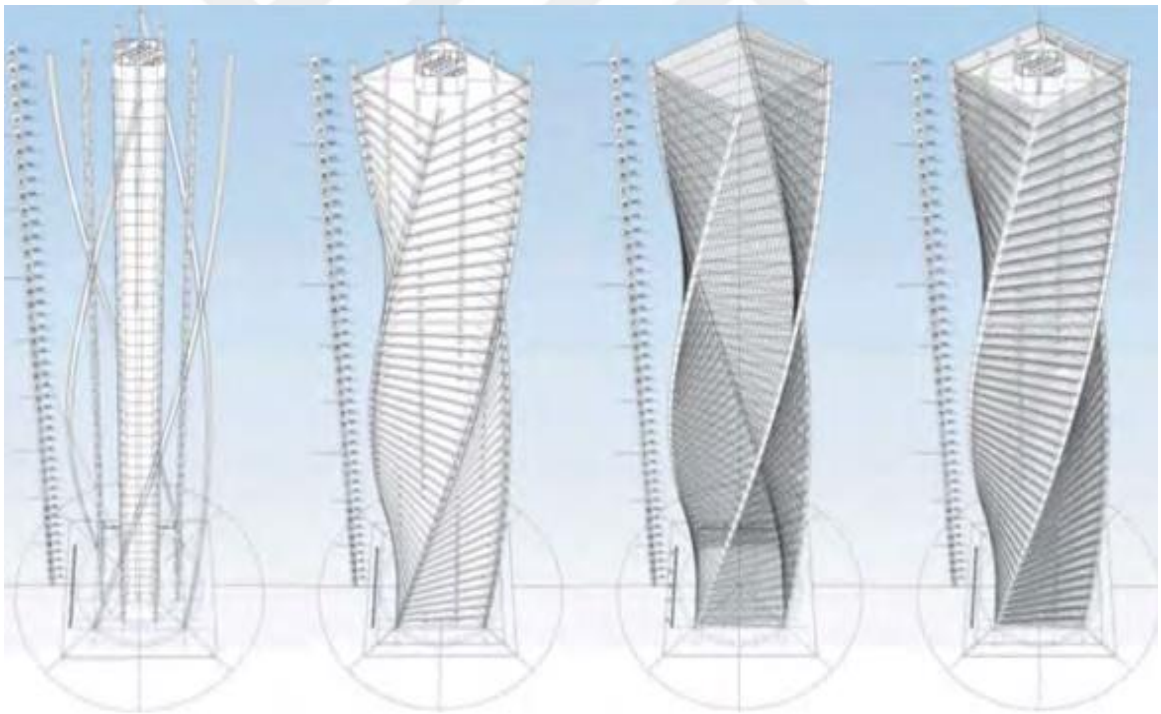
Turning Torso burgulu binası İsveç ülkesinin Malmö kenti içerisinde bulunmaktadır. Bina, burgulu yüksek yapıların ilk örneği kabul edilmektedir. 2001 yılında inşasına başlanan binanın inşası 2005 yılında tamamlanmış olup bina 57 kata ve 190 m mimari yüksekliğe sahiptir. Her bir kat yüksekliği 3.18 metredir, teras katı ve teknik katların yüksekliği ise 4 metredir. Bina, eşit forma sahip dokuz adet bölümden oluşur ve her bölümde beş kat bulunmaktadır. Binanın taşıyıcı sistemi olarak betornarme mega çekirdek sistemi tercih edilmiştir. Çekirdek bölgesinde kullanılan beton sınıfı C55/65'dir. Çekirdek bölgesinin iç çapı 10.6 metredir ve çekirdeğin kalınlığı üst katlara doğru azalmak suretiyle 2 metre ile 40 cm arasında değişmektedir (Saemundsson, 2007). Beşgen yapısına sahip olan binanın çevresinde çelik iskelet dış destek sistemi bulunmaktadır. Bu sistem yapıya etkiyen yanal yüklere bağlı deplasmanların azaltılmasında binaya destek olmaktadır (Günel ve Ilgın, 2014). Binanın temelinde 78 adet düşey güçlendirilmiş kazık sistemi bulunmaktadır. Yapı, Avrupa'nın en yüksek apartmanı olarak kabul edilmektedir (Emporis, 2016). Bina apartman ve ofis olarak hizmet vermektedir. İnşaat mühendisi ve mimar Santiago Calatrava tarafından tasarlanan burgulu yüksek yapı, 90° açı rotasyon yaparak dönmektedir. Her kat yaklaşık olarak 1.6° dönmektedir. Binanın yapısal formu şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Turning Torso (en.wikipedia.org)

3.4.2. Evolution Tower

DNA şekline sahip Evolution Tower, Rusya ülkesinin başkent Moskova şehri sınırları içerisinde yer almaktadır. 2008 yılında inşasına başlanan binanın 2015 yılında inşası tamamlanmıştır. Binanın mimari yüksekliği 246 metredir. Binanın taşıyıcı sistemi olarak perde duvar çerçeve sistemi tercih edilmiş olup betonarme olarak dizayn edilmiştir.Yapı merkezi çekirdek sistemine sahip olup, sekiz adet mega iç dikey kolonlara sahip olan yapının kolon çapları 2.1 metre ile 1.2 metre arasında değişmektedir. Yapının çevresinde cepheyle uyumlu şekilde dönen dört adet dış kolon bulunmaktadır. Bu dış kolonlar yaklaşık olarak 14° eğimli burgulu kolonlardır. 52 kata sahip olan yapı, her kat döşemesi saat yönünde yaklaşık olarak 3° dönerek 156° dönüş yapmaktadır (Nikandrov,2016). Binanın yapısal formu ve taşıyıcı sistem detayı şekil 3.7 de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Evolution Tower (Nikandrov, 2016)

3.4.3. Al Bidda Tower

Al Bidda Tower, Katar ülkesi Doha kenti içerisinde bulunmaktadır. 197 metre yüksekliğine sahip olan yapı 44 kattan oluşmaktadır. Yapı, betonarme ve çelik taşıyıcı sistemlerinden oluşmaktadır. Yapı, dairesel üçgen bir forma sahiptir. Üst katlardaki alan alt katlara göre daha fazladır. Yapının her katı yaklaşık olarak 1.5° açı yaparak, yapı boyunca 60° açı yaparak dönmektedir. Yapının merkezinde betonarme çekirdek bölgesi bulunmaktadır. Betonarme çekirdek kalınlığı 24. kat seviyesine kadar 50 santimetredir, bu kattan itibaren betonarme çekirdeğin kalınlığı 40 santimetreye kadar azalmaktadır. Yapının 30. kata kadar döşemeleri ardgerilmeli olarak tasarlanmıştır. Yapının her katı 1.5° dönmeyle uyumlu olarak kolonlar da dönmektedir. 9 adet kolona sahip olan yapıda, kolon ölçüleri değişmektedir. Dairesel kolonların çapı 1.4 metredir, dikdörtgen olan kolonların boyutları 1 metre x 1.7 metredir. Burgulu forma sahip olan yapının taşıyıcı sistemine destekleyici nitelikte dairesel çelik diyagrid çaprazlar tasarlanmıştır. Bu çaprazlar yapının kolonlarına veya kirişlerine bağlanmak suretiyle sabitlenmiştir (Golasz-Szolomicka, 2019). Yapının yapısal formu şekil 3.8 de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Al Bidda Tower (mapio.net)

3.4.4. Generali Tower

Generali Tower, İtalya'nın Milan şehrinde bulunmaktadır. Yapının mimari tasarımını Zaha Hadid mimarlık firması tarafından yapılmıştır. 177.4 metre yüksekliğine sahip olan yapı 43 kattan oluşmaktadır. Taşıyıcı sistem malzemesi olarak betonarme tercih edilmiştir. Yapı toplamda parametrik olarak 45° dönme açısı yapmaktadır. Yapının merkezinde iki adet olmak üzere çekirdek sistem bulunmaktadır. Çekirdek bölgesinin beton sınıfı 30.kata kadar C45/55 betonu, 30. katın yukarısındaki çekirdek bölgelerinde C32/40 betonu kullanılmıştır. Yapının temelinde 64 adet kazık olup bu kazıklar 1.5 metre çapına ve 36 metre uzunluğuna sahiptir. Temel bölgesinde yer alan radye temelin kalınlığı 2.50 metredir ve C32/40 betonu kullanılmıştır. Yapının döşemelerinde C32/40 beton sınıfı kullanılmış olup döşemeler ortalama 32 santimetre kalınlığa sahiptir. Dairesel kolonların çapı yapının üst katlarına doğru azalması suretiyle 110 santimereden 50 santimetreye kadar azalmaktadır. Dikdörtgen kolonların boyutları 120 cm x 80 cm ile 75 cm x 50 cm arasında değişmektedir. Kolonlarda yüksek dayanıma sahip beton sınıfları kullanılmıştır. Temel seviyesinden 21. kata kadar kolonlarda C60/75 beton sınıfı, 21.kattan 30. kata kadar kolonlarda C50/60 beton sınıfı ve 30. kattan üst seviyelerde kolonlarda C45/55 beton sınıfı kullanılmıştır (Giuliani,2018). Binanın yapısal formu şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Generali Tower (Giuliani, 2018)

3.4.5. Cayan Tower

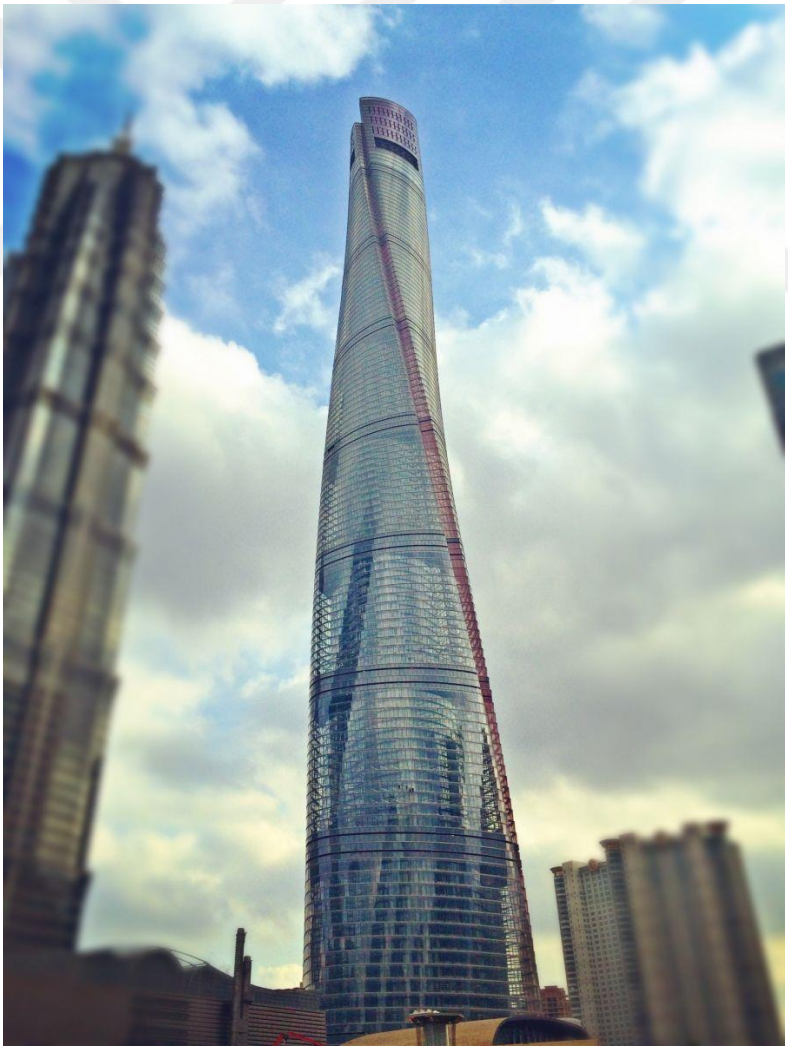
Cayan Tower, Birleşik Arap Emirlikleri ülkesinin Dubai kentinde bulunmaktadır. Yapının inşasına 2006 yılında başlanılmış olup, 2013 yılında tamamlanmıştır. 306.4 metre yüksekliğe sahip olan bina 73 kattan oluşmaktadır (CTBUH, 2016). Taşıyıcı sistem malzemesi olarak betonarme kullanılmıştır. Taşıyıcı sistem çekirdek bölgesiyle birlikte altı adet iç kolona, çevre kolonlara ve kirişlere sahiptir. Yapının mimari tasarımı ve yapısal mühendisliği Skidmore, Owings & Merrill LLP (SOM) firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapıdaki tüm kat alanları aynıdır. Dairesel çekirdeğe sahip yapının her katı saat yönünde 1.2° dönerek yapı toplamda 90° dönüş açısı yapmaktadır. Yapı 3 metre kalınlığına sahip temel tabakasına sahiptir. Yapının temelinde 99 adet kazık bulunmaktadır. Bu kazıkların her birinin çapı 1.2 metredir (Golasz-Szolomicka, 2019). Binanın yapısal formu şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Cayan Tower (en.wikipedia.org)

3.4.6. Shanghai Tower

Shanghai Tower, Çin ülkesinin Shanghai kentinde bulunmaktadır. Dünyanın en yüksek ikinci binası ve en yüksek burgulu yapısı olma özelliğine sahiptir. 2015 yılında yapı inşaatı tamamlanmıştır. Yapı 632 metre yüksekliğine sahip olup 128 kattan oluşmaktadır. Yapının taşıyıcı sisteminde betonarme ve çelik sistemlerden yararlanılmıştır. Taşıyıcı sistem, çelik dış destekli sistem ve dış çelik mega çerçeve sistemle tasarımı yapılmıştır. Her kat yaklaşık olarak 0.9° dönüş açısı yapmakta olup yapı toplamda 120° rotasyon yapmaktadır. Yapının temelinde 947 adet fore kazık sistem kullanılmıştır. Bu kazıkların çapı 1 metredir ve 52-56 metre uzunluklarına sahiplerdir (Golasz-Szolomicka, 2019). Şekil 3.11 de binanın yapısal formu gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Shanghai Tower (structurae.net)

3.4.7. Lakhta Center

Lakhta Center burgulu yapısı, 462 metrelik yüksekliğe sahip Rusya'nın St. Petensburg şehrinde bulunmaktadır. Avrupa'nın en yüksek yapısı olarak kabul edilmektedir. Yapı, temelden çatıya kadar 90 derecelik açı yaparak burgu formunu almıştır. Yapının temel sisteminde 264 mm ile 2000 mm arası çapa sahip olan betonarme kazıklar kullanılmıştır. Kompozit kolonlara sahip olan yapıda kolon boyutları 150 cm x150 cm ile 100 cm x100 cm arasında değişmektedir. Yapıda merkezi betonarme çekirdek duvar kullanılmıştır. Kompozit dış destekler, betonarme perde çekirdek duvarlara bağlanmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Lakhta Center (archdaily.com)

3.4.8. Regent Emirates Pearl

Abu Dhabi şehrinde bulunan ve 2016 yılında tamamlanan Regent Emirates Pearl burgulu yapısı 255 metreye sahip olup 52 kata sahiptir. Bina, her katı 0.56° dönerek toplamda 25° açıyla rotasyon yapmaktadır. Eğimli kolonlara sahip olan bina, kolon ölçüleri 40 cm x 160 cm ile 60 cm x 160 cm arasında değişmektedir. Binanın döşemeleri 27 cm kalınlığına sahip olup C50 betonu kullanılmıştır. Döşemeler ardgerme olarak tasarlanmış olup çevre kolonlar ve merkez çekirdek tarafından desteklenmektedir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Regent Emirates Pearl (skyscrapercenter.com)

3.4.9. Mode Gakuen Spiral Towers

Japonya Nagoya kentinde bulunan Mode Gakuen Spiral yapısı 36 kata sahiptir ve 170 metre yüksekliğine sahiptir. Yapı, çelik taşıyıcı sistemle tasarlanmış olup eğitim ve öğretim amaçlıyla üç meslek yüksekokulundan oluşmaktadır. Mode Gakuen Spiral yapısı, merkezi çekirdekli olup elips bir plana sahiptir (Şekil 3.14). Yapıda radyal olarak tasarlanmış üç spiral kanat bulunmaktadır. Dış yüzey, üçgen pencereli çelik diyagridden yapılmıştır. Merkezi çekirdeğin etrafına yerleştirilen 12 adet düz kolona iç kafes tüplerle çaprazlar bağlanmıştır. Bu şekilde dizayn edilen yapı, deprem ve şiddetli rüzgarların sebep olacağı yatay ve burulma kuvvetlerine rijit olması amaçlanmıştır. Yapıda bulunan tüp kafes sistemi ve iki adet titreşim sönümleme elemanı sismik etkilere karşı yüksek direnç sağlamaktadır. Yapının çatı katında kütle sönümleyici bulunmaktadır (Szolomicka ve Szolomicki, 2019).



Şekil 3.14. Mode Gakuen Spiral Towers (en.wikipedia.org)

3.5. Maksimum Tepe Deplasmanı Kriteri

Maksimum tepe deplasmanı kriteri, yüksek yapıların yanal yükler altında sağlaması gereken yapısal faktörlerden birisidir. Maksimum tepe deplasmanı ve göreli kat ötelenmeleri bir yapının yanal yükler altında nasıl davranış gösterdiği bilgisini vererek yapı hakkında bilgi vermektedir. Uluslararası yönetmeliklerdeki deplasman limitleri oldukça sınırlı olup az ve orta katlı binalarla ilgili tecrübelere dayanılarak bir takım kurallar bulunmaktadır. Yüksek yapıların yanal yükler altında maksimum tepe deplasman değerleri az ve orta katlı yapılara göre farklıdır ve yapının formuna göre değişkenlik göstermektedir (Smith, 2011). Çizelge 3.2'de deplasman kabul edilebilirlik kriterleri bir tabloda gösterilmiştir. Çizelge 3.3'de uluslararası yönetmeliklerde kabul edilmiş, rüzgar ve deprem yüklemeleri altında yapının türüne göre katlararası ötelenme oranı limiti ve maksimum tepe deplasmanı değerleri gösterilmiştir. Çizelgede, katlararası ötelenmede verilen oranda kat yüksekliği kullanılmaktadır.

Çizelge 3.2. Tepe deplasmanı kabul edilebilirlik kriterleri (Ellingwood, 1986)

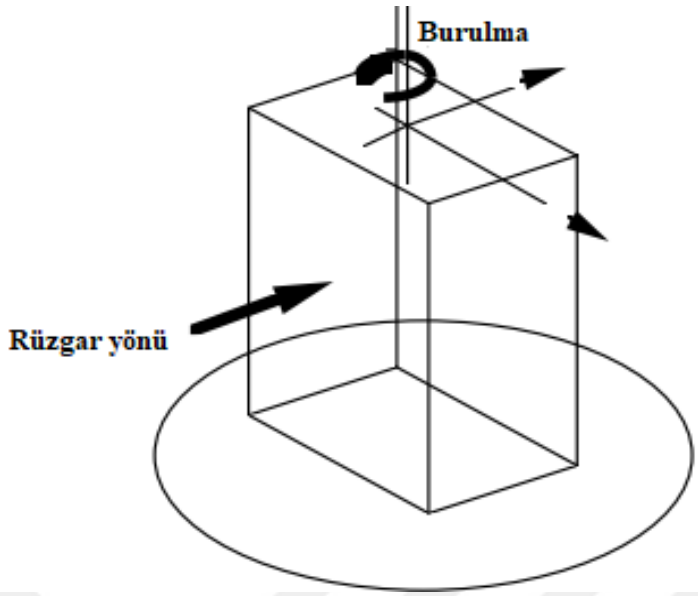
Oran	**Deformasyonun Görünürlüğü**	**Davranış**
<H/1000	Görünmez	Tuğla çatlaması
H/500	Görünmez	Bölme duvarların çatlaması
H/300	Görünür	Mimari hasar Duvarlarda çatlama Tavan ve döşemede hasar Cephe hasarı
H/200-H/300	Görünür	
H/100-H/200	Görünür	Bölmelerde, pencerelerde hasar

Çizelge 3.3. Uluslararası yönetmeliklerde deplasman limitleri (Smith, 2011)

Yönetmelik	**Yük Etkisi**	**Tür**	**Katlararası ötelenme oranı limiti**	**Maksimum tepe deplasmanı**
JGJ3-2002	Rüzgar ve deprem (H>250 m)	Betonarme/Çelik/Kompozit	1/500	Belirtilmemiş
Hong Kong-Betonarme teknik şartnamesi	Rüzgar	Betonarme	Belirtilmemiş	H/500
Eurocode 8 EN 1998-1-2004	Deprem	Çelik/Betonarme	1/500	Belirtilmemiş
BS 8110	Rüzgar	Betonarme	1/500	Belirtilmemiş

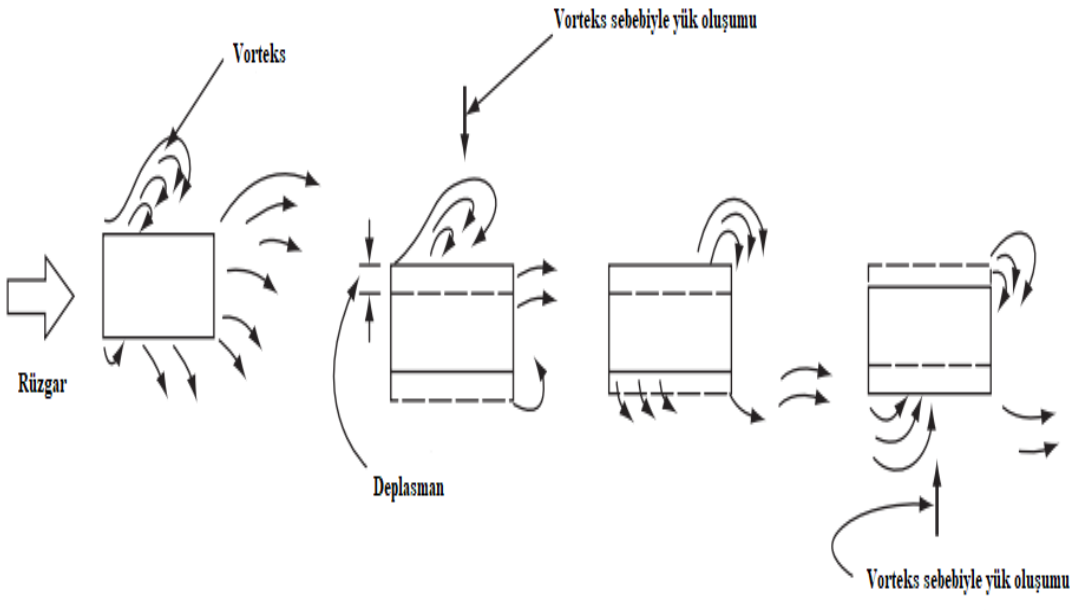
3.6. Yüksek Yapılarda Rüzgar Etkisi

Rüzgar etkisi yüksek yapılarda, deprem etkisine karşı daha baskındır. Yapıların kat seviyesi arttıkça rüzgar yükü daha önemli hale gelmektedir (Kurç vd., 2012). Şekil 3.15'de rüzgar etkisinin yüksek yapılarda oluşturacağı tepki yönleri gösterilmiştir. Rüzgar etkisi kat yüksekliği boyunca parabolik olarak arttığı varsayılmaktadır. Yüksek yapılar, narin yapılar olduğu için rüzgar etkisi tasarımda en önemli faktörlerden birisidir. Konsol bir kiriş olarak düşünülebilecek olan yüksek yapılar, rüzgar yüküne bağlı yapının yapabileceği maksimum tepe deplasmanı yaklaşık olarak genellikle yapı yüksekliğinin 1/400-1/500 olarak kabul edilmektedir (Günel&Ilgın,2014). Rüzgar etkisi narin yapılarda deplasman miktarının artmasına sebebebiyet vermektedir. Yapının rüzgar kaynaklı sallanmaması önemlidir.



Şekil 3.15. Rüzgar tepki yönleri (Gunawardena vd., 2017)

Vorteks saçıntıları rüzgar yönüne dik olmak suretiyle binaya ek yükler (kuvvetler) oluşturmaktadır. Vorteks (girdap) etkisi şekil 3.16'da yüksek yapılarda oluşturduğu etkiyi gösteren bir şema gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Yüksek yapılarda vorteks etkisi (Taranath, 2012)

Rüzgar hesapları için yönetmeliklerde bir takım formüller bulunmaktadır fakat prizmatik yapıya sahip olmayan yapılar için yönetmelikler yetersiz kalmaktadır. Prizmatik yapıya sahip olmayan yapılar için uygulamada rüzgar tüneli deneyleri veya CFD analizleri yapılarak yapıya etkiyecek rüzgar yükü için cephelere etkiyecek rüzgar dağılımları bulunur. Ölü ve hareketli yüklerin aksine rüzgar yüklerinin hızlı ve ani değişimi sebebiyle 40 kattan fazla kata sahip yüksek yapılar, yapı yüksekliğinin plan kesitindeki en dar genişliğe oranı (aspect ratio) 6'dan büyük yüksek yapılar, prizmatik olmayan forma sahip yüksek yapılarda dinamik etkinin belirlenebilmesi için rüzgar tünel testlerinin yapılması tavsiye edilmektedir (Günel&Ilgın, 2014).

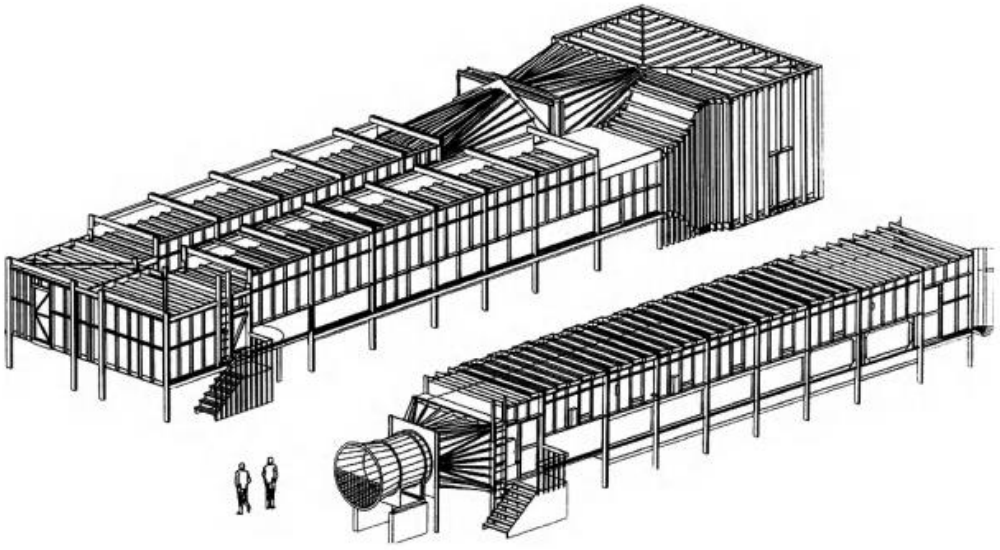
Prizmatik yapıya sahip olmayan yüksek yapılardaki dinamik rüzgar etkisinin bulunmasında rüzgar tünel testleri önemli bir yer tutmaktadır. Bu tür yapılarda rüzgar yükünün statik olarak etkitilmesi yetersiz kalabilmektedir. Rüzgarın bu dinamik etkisinin gözlenmesinde sınır tabaka rüzgar tüneli testleri uygulamada kullanılmaktadır. Sınır tabakası rüzgar tüneli çalışması, 1960'larda dünya ticaret merkezinin rüzgar etkisinin araştırılmasında dünyada ilk kez bir yüksek yapı için kullanılmıştır. Yüksek yapılar için rüzgar tünel testlerinde üç farklı yöntem kullanılmaktadır (Paltun vd., 2015):

- Senkron çoklu basınç tarama sistemi (SM-PSS)
- Yüksek frekans temel dengesi (H-FBB)
- Aerodinamik model testleri

Rüzgar tüneli testlerinin en büyük avantajlarından biri dinamik analizde, yapıda oluşacak girdap etkisinin rüzgar hesaplamalarında hesaba alınmasıdır. Bu etkinin görülebilmesi yapıda oluşan rüzgar etkisi için büyük önem taşımaktadır. Yüksek yapıların rüzgar tünel testlerinde çoğunlukla 1:300-1:500 ölçeği kullanılmaktadır. Şekil 3.17'de Taipei 101 yüksek yapısının 1:500 ölçeğinde hazırlanmış rüzgar tünel testi gösterilmiştir. Şekil 3.18'de bir rüzgar tüneli şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Taipei 101 Rüzgar tüneli testi (RWDI)



Şekil 3.18. Rüzgar tüneli şeması (Taranath, 2012)

Son yıllarda popülerlik kazanan yeni yapısal formlar sadece yapının mimari görüntüsünü değiştirmekle kalmamakla birlikte yapının aerodinamik etkisini de etkilemektedir. Yapıların üst kısımlarda oluşturulan açıklıklar ve daralan kesit alanı rüzgar etkisini azaltmaktadır (Paltun vd., 2015). Şekil 3.19'da geleneksel formlara sahip olmayan yapıların örnekleri verilmiştir. Sadece yükseklik boyunca değil plan kesit alanında da yapılan değişiklikler rüzgar etkisinin azaltılmasında büyük bir öneme sahiptir. Şekil 3.20'de rüzgar etkisinin azalması için kullanılan farklı kesit alanlı planlar sunulmuştur.

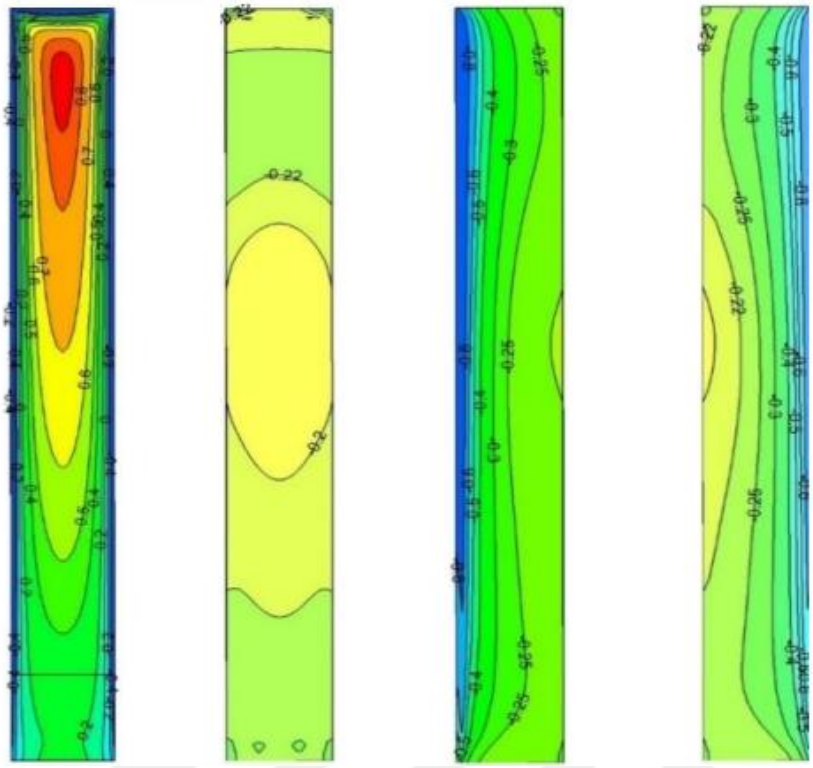


Şekil 3.19. Geleneksel olmayan yapı formları örnekleri (Alaghmandan vd, 2014)

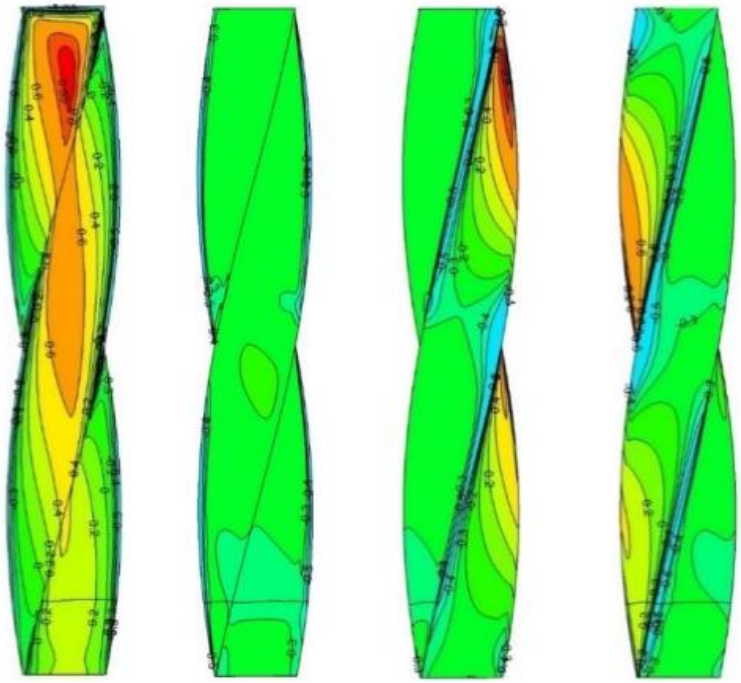


Şekil 3.20. Farklı kesite sahip yapı planları (Alaghmandan vd, 2014)

Rüzgar etkisinin gözlenmesinde kullanılan diğer bir yöntem hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizinin (CFD) kullanılmasıdır. Bu yöntem ile birlikte yüksek yapıların rüzgar yükleri altında nasıl bir davranış vereceği incelenmektedir. Analiz sonunda yapının cephelerine etkiyecek basınç katsayıları ve rüzgar hızları bulunabilmektedir. Literatürde burgulu yüksek yapıların CFD metodu ile dinamik rüzgar etkilerinin bulunması için yapılmış çalışmalar mevcuttur. Şekil 3.21'de analiz sonuçlarında ortaya çıkan basınç katsayıları prizmatik yapı için ve 180° burgu formuna sahip yapının farklı açılardan gösterimi yapılmıştır (Shabab vd., 2021).



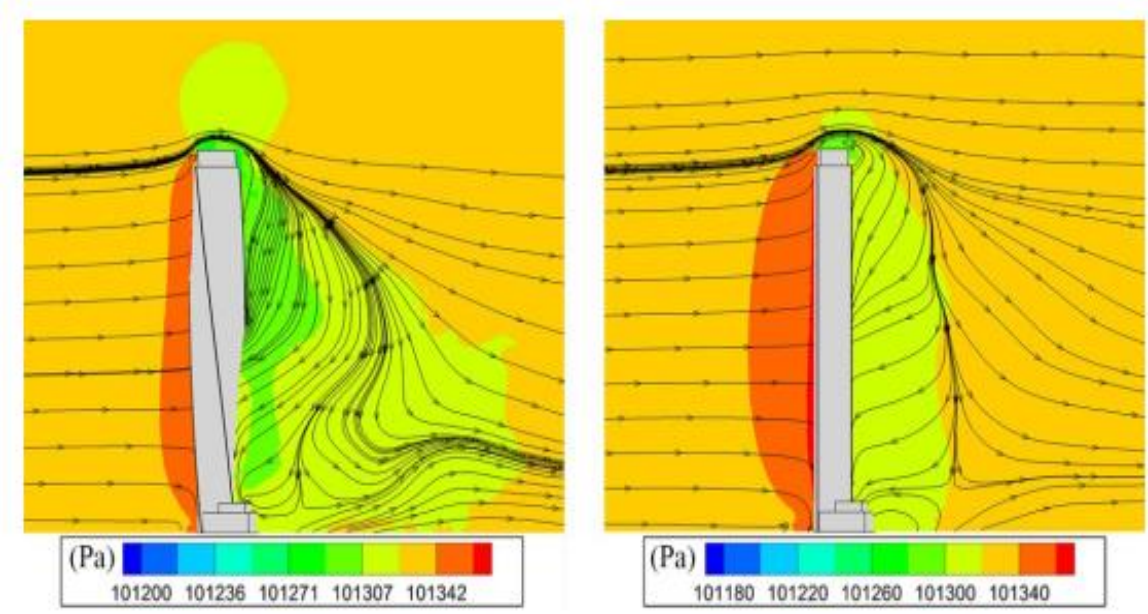
a. Prizmatik yapıda cephede görülen basınç katsayıları



b. Burgulu yapıda cephede görülen basınç katsayıları

Şekil 3.21. Basınç katsayıları (Shabab vd., 2020)

Yapılan bir diğer CFD çalışmasında burgulu ve prizmatik forma sahip yapılar için analizler yapılmıştır. 0° rüzgar etkisindeki akım diyagramı şekil 3.22'de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Rüzgar akımı diyagramı (Ay vd., 2018)

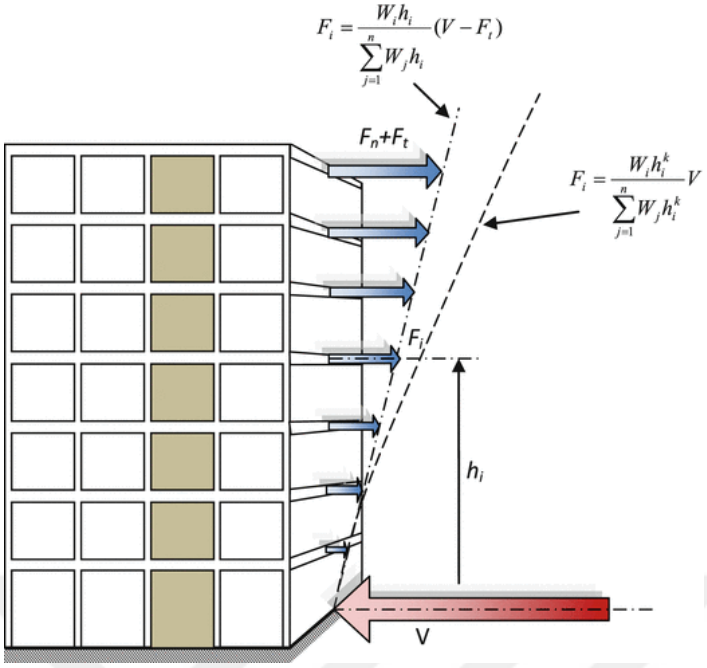
3.7. Yüksek Yapılarda Deprem Etkisi

Yüksek yapılara etki eden başlıca yanal yüklerden birisi de deprem yüküdür. Literatürde yapıların deprem kuvvetinin hesaplanmasında üç farklı yöntem vardır. Bu yöntemler şunlardır:

- Eşdeğer deprem yükü yöntemi (Statik Analiz)
- Mod birleştirme yöntemi (Spektrum Analizi)
- Zaman tanım alanında analiz yöntemi

3.7.1. Eşdeğer deprem yükü yöntemi

Eşdeğer deprem yükü yönteminde, deprem kuvvetinden kaynaklanan dinamik etkiye yakın büyüklükte yapı üzerine statik kuvvet uygulanmasıdır. Yöntemin amacı, hesaplanan deprem kuvvetinin yapı kat yüksekliğince artması suretiyle katlara etki ettirilmesidir. Katlara etki eden kuvvetler katların kütle merkezine etki ettirilerek doğrusal analiz yapılır. (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Eşdeğer deprem yükü yöntemi (Bourahla, 2015)

3.7.2. Mod birleştirme yöntemi (Tepki spektrum analizi)

Mod birleştirme yöntemi, tepki spektrum analizi olarak da isimlendirilir. Yapıların tasarımında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Mod birleştirme yöntemi, bir yapının oluşabilecek maksimum deprem tepkisini belirtmek için her doğal titreşim modundan gelen katkının alınması suretiyle doğrusal ve dinamik çözümlemedir. Belirli bir zaman geçmişi ve sönüm seviyesi için yapısal periyodun bir fonksiyonu olarak dinamik davranış hakkında bilgi sağlar. Her binanın deprem analizinde bu yöntem kullanılabilmektedir.

3.7.3. Zaman tanım alanında analiz yöntemi

Zaman tanım alanında analiz yönteminde, lineer elastik veya doğrusal non-lineeer deprem analizlerinde var olan kaydedilmiş ya da yapay yöntemlerle oluşturulması suretiyle benzeştirilmiş deprem hareketlerinin kullanılmasıyla yapıya deprem kuvvetinin etki ettirilme yöntemidir.

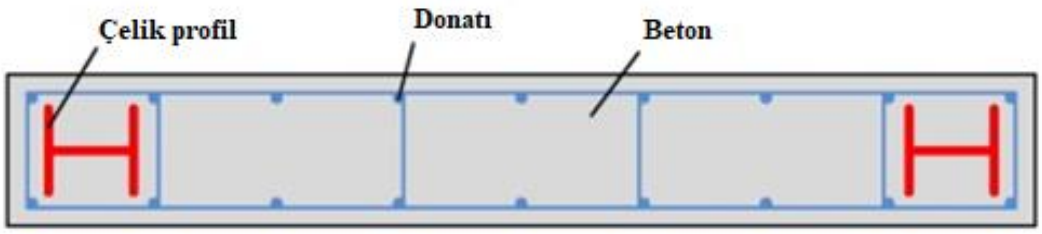
3.8. Kompozit Perde Duvarlar

Kompozit perde duvarların kullanımı son yıllarda artmaktadır. Betonarme perde duvarlar, yüksek yapıların yanal yüklere karşı koyabilmesi için dünyada yaygın olarak kullanılan bir yapı elemanıdır. Geçmiş yıllarda yaşanan şiddetli depremlerde betonarme perde duvarların istenilmeyen performans göstermesi sebebiyle kompozit perde duvarların popülerliği artmaktadır. Yapılan araştırmalarda, perde duvarların uç bölgelerinde ve plastik bölgede yanal kapasite açısından ani bir kayıp gösterdiği görülmüştür (Wang vd., 2012). Çelik plakalı perde duvarlarda ise dolgu plakaları uygulanan yanal bir yükte bükülme eğilimindedir. Yüksek katlı binalarda, alt katlardaki perde duvarlar büyük eksenel basınç kuvvetlerine ve eğilme momentine maruz kalmaktadır. Yeterli yük taşıma kapasitesini sağlamak için kalın perde duvarlar ve sınır elemanlarda yüksek miktarlarda donatı takviyesi gerekmektedir (Hu vd., 2016). Gösterilen bu sebeplerden ötürü kompozit perde duvarlar yüksek yapılarda tercih edilmektedir. Özellikle perde kalınlığının azaltılarak daha fazla yaşanılabilir alanın kullanılmak istenmesi mühendisleri ve mimarları bu perde türüne yaklaştırmıştır. Çelik plakalı perdelerin bir veya iki tarafından düzenli aralıklarla olacak şekilde cıvatalarla betonarme panellere bağlanmasıyla kompozit perde duvarlar oluşturulmaktadır. Çelik plakalı ve beton kompozit perde duvarlar, geleneksel betonarme perde duvarlardan daha iyi enerji dağıtma kapasitesi ile yeterli rijitlik ve mukavemet sağlamaktadır (Zhou vd., 2020). Kompozit perdeler yük taşıma kapasitesini ve sünekliği büyük ölçüde artırmaktadır.

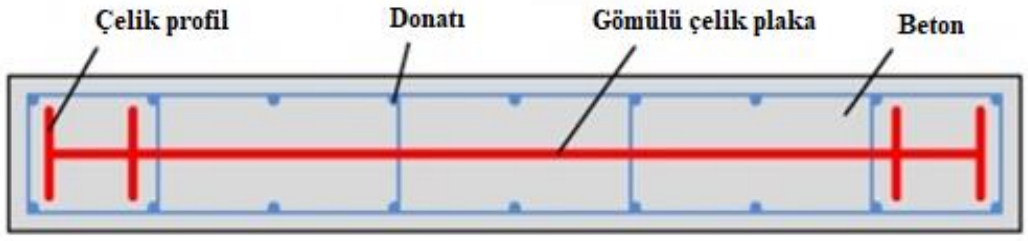
ANSI/AISC 341-16 yönetmeliğinde ve Çin JGJ 3 yönetmeliğinde kompozit perde duvarların sismik tasarımı ile ilgili önemli bilgiler yer almaktadır. Amerikan yönetmeliğinde dört çeşit kompozit perde duvar kullanımı mevcuttur.

Referans alınan Grove at Grand Bay güney binasında kompozit çelik plakalı betonarme perde duvar kullanılmıştır. Tez çalışmasında kapsamında referans alınan yapıda kompozit çelik plakalı betonarme perde duvar kullanıldığı için bu kompozit perde çeşidi üzerine araştırmalar sınırlandırılmıştır.

Literatürde kullanılan çeşitli kompozit perde çeşitleri bulunmaktadır. Çelik plakalı betonarme perde duvarlar dört kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar beton, çelik profil, çelik plaka ve enine-boyuna donatılardır. Beton dolgulu çift çelik plakalı perde sisteminde çelik plakalar perdenin dış bölgesinde olacak şekilde betonun plakalar içine dökülmesi suretiyle oluşturulmaktadır. Hu vd. tarafından yapılan çalışmada kompozit perde duvarların sınıflandırılması yapılmıştır. Bu sınıflandırma sırasıyla kompozit betonarme perde duvar, kompozit çelik plakalı betonarme perde duvar ve kompozit beton dolgulu çelik plakalı perde duvarın şematik çizimi şekil 3.24, şekil 3.25, şekil 3.26'da gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Kompozit betonarme perde duvar

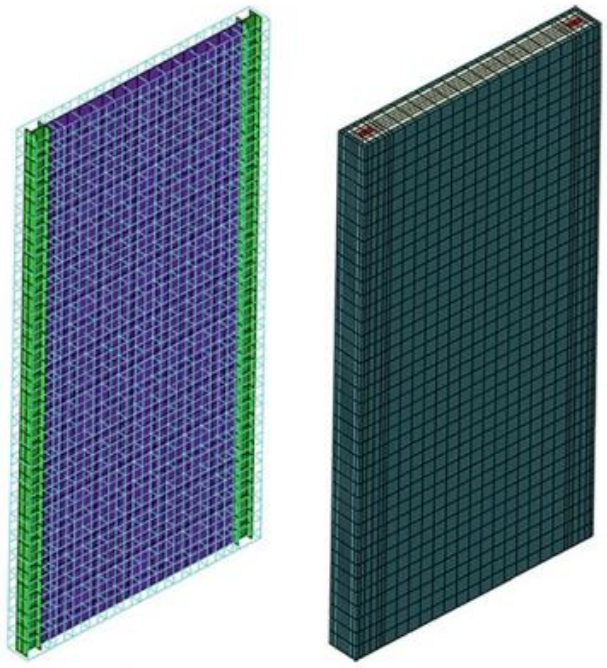


Şekil 3.25. Kompozit çelik plakalı betonarme perde duvar



Şekil 3.26. Kompozit beton dolgulu çelik plakalı perde duvar

Kompozit perde duvarlar, betonarme perde duvarlara kıyasla daha fazla yük taşıma ve deformasyon kapasitesi göstermektedir. Sayısal analitik sonuçlar geleneksel betonarme perde duvarlar ile karşılaştırma yapıldığında çelik plakalı betonarme perde duvarın yanal yük taşıma kapasitesi, süneklik, enerji yutma kapasitesinde belirgin bir iyileşmeye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca eksenel yük düzeyi ve çelik plaka alanı süneklik ve taşıma kapasitesinde önemli etkileri bulunmaktadır. Perde duvarın gövde donatı oranı performans için ihmal edilebilir fakat perde içindeki betona ve gömülü çelik levhaya yanal destek sağlaması bakımından önemlidir (Wang vd., 2012). Bunun yanı sıra, her iki taraftaki beton çelik levhaya yalıtım sağlar ve bu da yangına dayanıklılık maliyetlerinden tasarruf sağlar. Kompozit çelik plakalı betonarme perde duvarın yapılan deneysel çalışmalar sonucunda benzer eksenel sıkıştırma düzeyinde betonarme perde duvara göre %20-30 daha fazla yanal yük kapasitesi ve süneklik sağladığı belirtilmiştir (Xiao, 2012). Şekil 3.27'de kompozit çelik plakalı betonarme perde duvarın 3D modellenmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Kompozit çelik plakalı betonarme perde (Zhou vd., 2020)

3.8.1. Kompozit perde duvarların avantajları

Astaneh-Asl tarafından yapılan deneysel çalışmaların ardından kompozit perde duvarlarla ilgili aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Bir betonarme perde duvar ile karşılaştırıldığında, aynı kesme kapasitesine ve daha büyük kesme rijitliğine sahip bir kompozit duvar daha az kalınlığa ve daha az ağırlığa sahip olacaktır. Kompozit perde duvarın daha az yer kaplaması mimari açıdan avantajdır ve yüksek katlı yapılarda daha fazla yaşanılabilir kat alanı sağlayabilmektedir. Daha az ağırlığa sahip olan kompozit perde duvar, yapıya daha az sismik kuvvetin etki etmesine olanak sağlamaktadır.
- Bir çelik perde duvarda, kat kesme kuvveti diyagonel sıkıştırmanın burkulmasından sonra çelik plakanın çekme hareketi ile taşınır. Kompozit perde duvarda beton, çelik levhayı tutarak akmadan önce burkulmasını önler.
- Orta ve şiddetli depremlerin ardından, çelik perde duvarlarda burkulma gözlenirken betonarme perde duvarlarda çatlama görülebilmektedir. Her iki perde çeşidi de onarım gereksinimi duymaktadır. Bu tür onarımlar sadece inşaat maliyeti nedeniyle değil, aynı zamanda onarılacak alanın fonksiyonelliğinin bozulması sebebiyle maliyetli olabilmektedir. Kompozit perde duvarlar, beton bölümde neredeyse hiç çatlak olmadan ve sistemin diğer elemanlarına zarar vermeden çelik plakaların akmasını sınırlandırmaktadır. Bu tarz yaşanabilecek olayların ardından yapı fonksiyonelliğini sürdürebildiğinden dolayı, bu performansın görülmesi tasarımcı tarafından arzu edilir.

4. YÖNTEM

Bu bölümde referans alınan Grove at Grand Bay güney binasının statik, mimari ve bulunduğu konuma göre bilgiler verilerek kullanılan yöntemler belirtilmiştir. Tez kapsamında , modellenen yapıların realist ve gerçeğe en yakın bir ideal çalışması yapılmıştır.

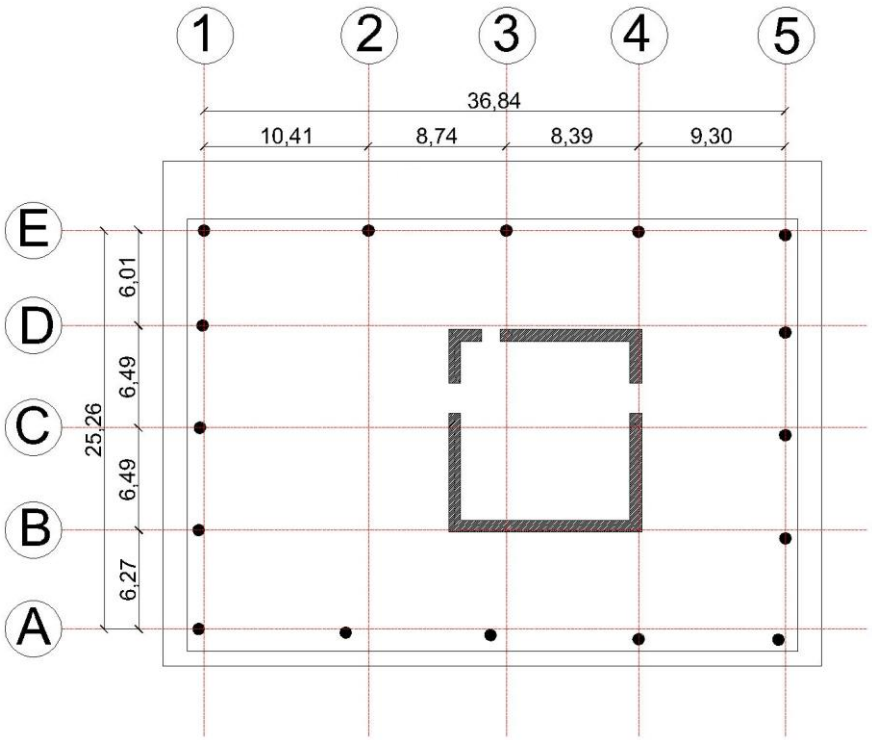
4.1. Grove at Grand Bay Güney Binasının Yapısal Bilgileri

Amerika Birleşik Devletleri'nin ilk burgulu yüksek yapı olma özelliğine sahip Grove at Grand Bay binaları Kuzey ve Güney olmak üzere iki adet binadan oluşmaktadır. Miami, Florida kentinde bulunan Grove at Grand Bay güney binası, her katı döşeme ve kolonlarıyla birlikte dönmek suretiyle 15. kata kadar yaklaşık olarak 3 derece saat yönünün tersinde dönüş açısı yaparak toplamda 39 derece dönmektedir. 21 kata sahip olan yapı 93,8 metre yüksekliğine sahiptir (Şekil 4.1). Yapıdaki her bir kat yüksekliği podyum kat ve çatı katları hariç 13'-8''dir (4,064 metre). Yapının 20. katına ait mimarisi şekil 4.2'de gösterilmiştir. Tez kapsamında modellemelerde bu mimari plan kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Grove at Grand Bay Binaları (archello.com)

a. Grove at Grand Bay Kuzey Binası
b. Grove at Grand Bay Güney Binası



Şekil 4.2. 20. kata ait mimari plan (metre)

Yapı on altı kolona sahip olup kolonlar betonarme olarak tasarlanmıştır (Şekil 4.3). 30 inches (762.2 mm) çapına sahip olan kolonlar ilk on kat için 12,000 psi (82,73 MPa) beton dayanımına sahiptir. Üst katlara doğru çıkıldıkça 10,000 psi (68.95 MPa) ve 8,000 psi (55.16 Mpa) dayanımına kadar düşmektedir. Kolonlarda kullanılan çelik, en fazla 75#11 özelliğine sahip donatı kullanılmıştır (DeSimone vd., 2015).

Yapıda dizayn edilen döşemeler ardgermeli olarak tasarlanmıştır. Döşemeler bu yöntemle tasarlanarak büyük açıklıklar rahatlıkla oluşturulmuştur. Döşemelerin kalınlığı 10 inches (254 mm) ve 12 inches (304.8) arasında değişmektedir. Döşemelerin beton dayanımı 12 ksi (82,73 MPa) geçmemektedir. Yapının kendi ölü yükü ve yanal yüklerin oluşturacağı yükler sebebiyle çekirdeğin betonarme olarak tasarlanması durumunda 6 feet (182.88 cm) kalınlığında bir çekirdeğe ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Bunun yerine tasarımcılar çekirdek bölgesini 30 inches (762 mm) kalınlığında oluşan kompozit perde duvar yapılmasını tercih etmiştir. Çekirdek bölgesi yapıda dikey olarak uzanmaktadır. Kompozit perdenin içinde 3,75 inch'e (95,25 mm) kadar varan çelik plaka, yapının 15. katına kadar uzanmaktadır (Şekil 4.4). Perdelerin köşe bölgelerinde I çelik profile sahip kısımlar vardır (DeSimone vd., 2015).



Şekil 4.3. Kuzey binası eğimli kolonlar (DeSimone vd., 2015)

Yapının kompozit perde duvarında kullanılan çelik plakalar yapıya etkiyecek tüm yükleri taşımada yetersiz kaldığı düşünülerek yapının tepe kısmına çatı desteği inşa edilmiştir. Bu destek, çekirdek kısmı ve kolonlara bağlanarak yapıda oluşacak yüklere karşı kompozit perde duvar ile birlikte daha etkin rol oynaması hedeflenmiştir. Çatı desteği ardgermeli beton kirişlerden oluşmuştur ve yapıya etkiyen ölü yükü ve hareketli yükü büyük ölçüde kolonlardan almaktadır. Ardgermeli olarak tasarlanan çatı desteğinin beton kiriş ölçüleri 4 feet (121.92 cm) genişliğine ve 7 feet (213.36 cm) derinliğine sahiptir. Bu yolla çekirdek bölgesindeki burulma kuvvetleri yaklaşık yüzde 30 oranında azaltılmıştır. Dönel yer değiştirmeyi karşılamak için döşemeler bir alttaki döşemeye göre 0,5 inch (12,7 mm) rotasyonel olarak bombelenmektedir (DeSimone vd., 2015).



Şekil 4.4. Kompozit perde duvar inşa hali (DeSimone vd., 2015)

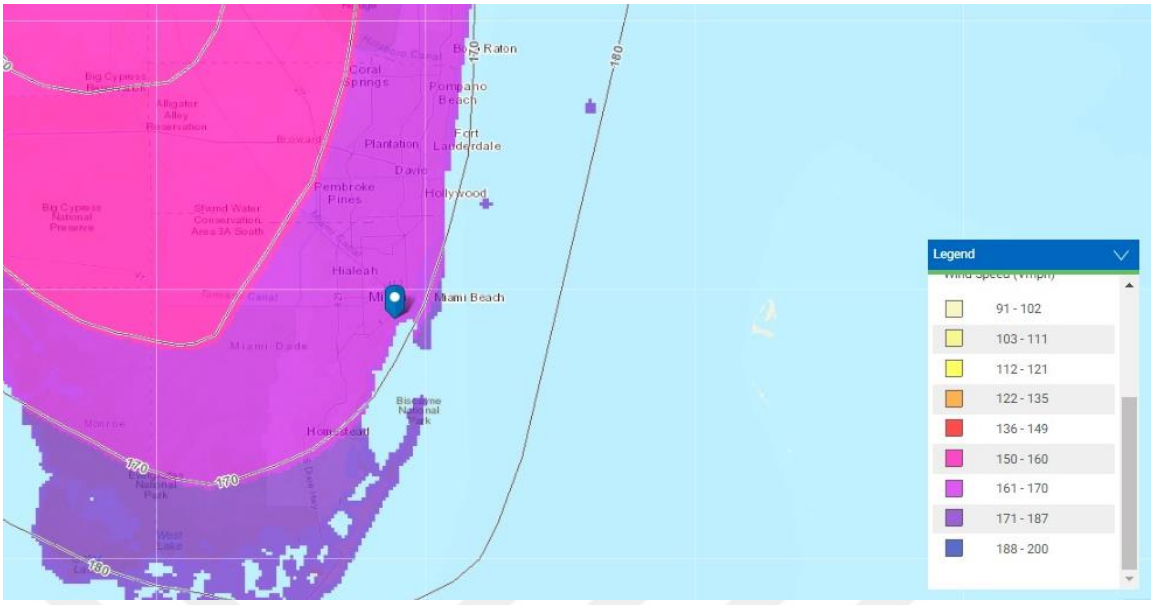
Yapının temelinde sahanın koşulları göz önüne alınarak 30 inch (762 mm) çapında 50 feet (15.24 m) ile 80 feet (24.38 m) arası uzunlukta değişen 800 ton basınç kapasiteli kazıklar kullanılmıştır. Çekirdek bölgesi kalın temele oturtulmuştur ve 80 adet kazık ile desteklenmiştir. Temel seviyesinde 100#11 donatı tipi kullanılmıştır. Sel felaketine karşı önlem olarak subasman kotu +13.0 ‘dan başlatılmıştır. 15 inch (381 mm) kalınlığında ardgermeli döşeme kullanılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Ardgermeli döşeme (DeSimone vd., 2015)

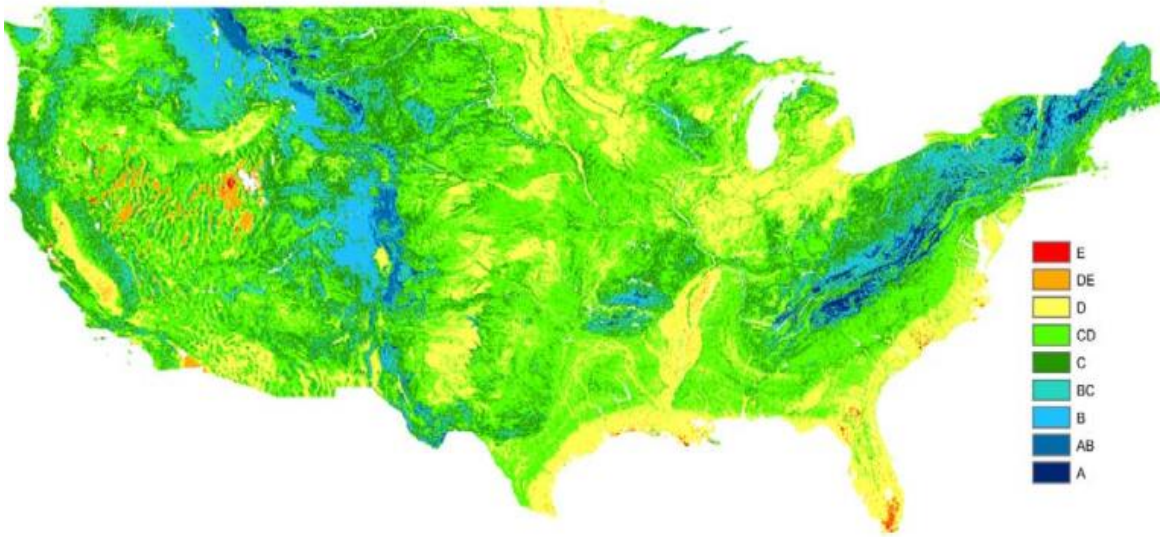
Yapıda kullanılan Güney Florida kaynaklı agrega ile üretilen beton, ACI kodunda belirtilen elastisite modülünü sağlamamıştır. Bu sebepten ötürü betonda kullanılacak agrega, Nova Scotia (Yeni İskoçya) bölgesinden ithal edilmiştir. Yapıya etkiyecek rüzgar yüklerinin analizi RWDI firması tarafından yapılmıştır. Grove at Grand Bay, narin bir yapıya sahip olduğu için rüzgarın dinamik etkisi göz önüne alınmıştır.

Miami, Florida kentinde bulunan Grove at Grand Bay güney binası bulunduğu konumu itibariyle deprem yükünden daha çok rüzgar yüküne maruz kalmaktadır. Deprem bölgesinde bulunmayan yapının rüzgar hız haritası şekil 4.6'da gösterilmiştir. Tez kapsamında, rüzgar yükü hesaplamalarında uygulanan rüzgar hızı 169 mph (76 m/s) olarak alınmıştır.



Şekil 4.6. Rüzgar hız haritası (asce7hazardtool.online)

Tez kapsamında, yapının bulunduğu konuma göre zemin tipi D olarak seçilmiştir. Zemin tipinin seçiminde Rong ve Thompson tarafından yapılan haritadan yararlanılmıştır (Şekil 4.7). Yapının risk kategorisi, çizelge 4.1'e göre göre II olarak seçilmiş olup bina önem katsayısı 1 olarak alınmıştır.



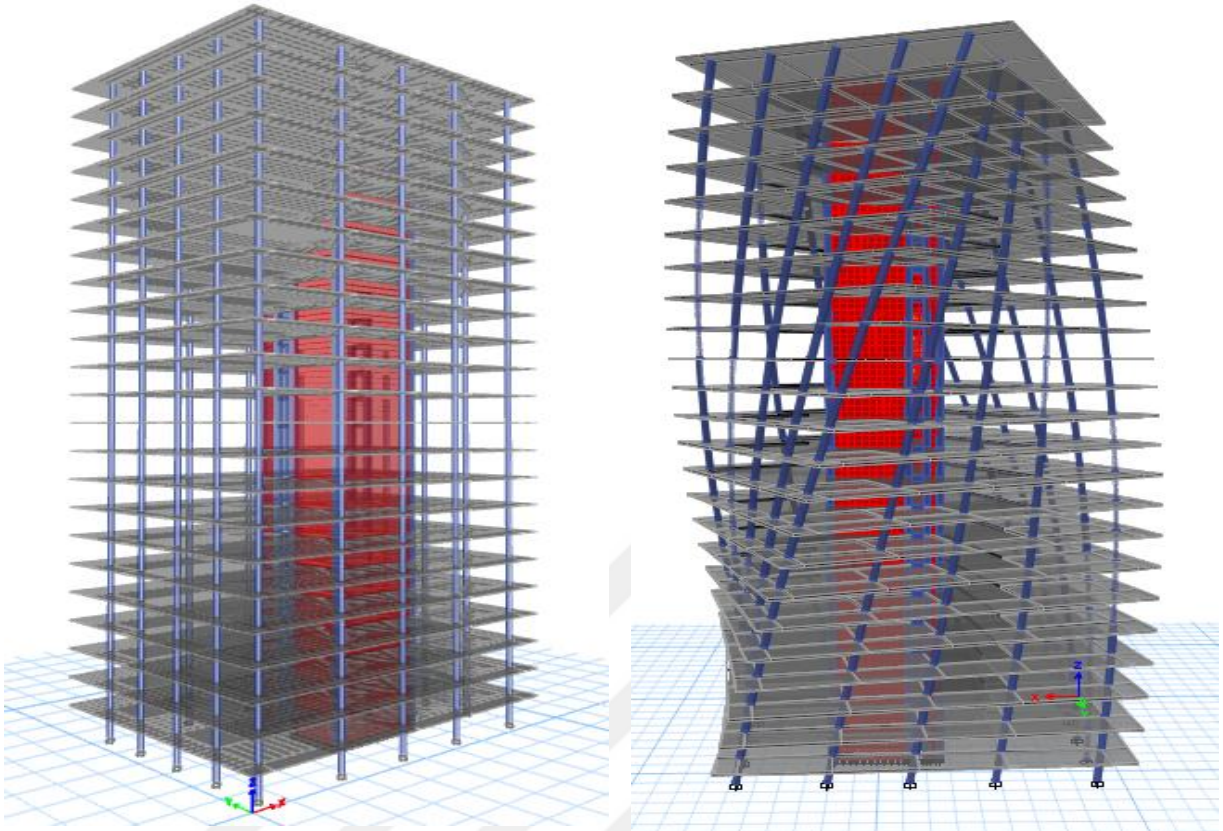
Şekil 4.7. ABD zemin sınıfı haritası (Rong ve Thomson, 2012)

Çizelge 4.1. Risk kategorileri ve bina önem katsayıları (ASCE 7-16)

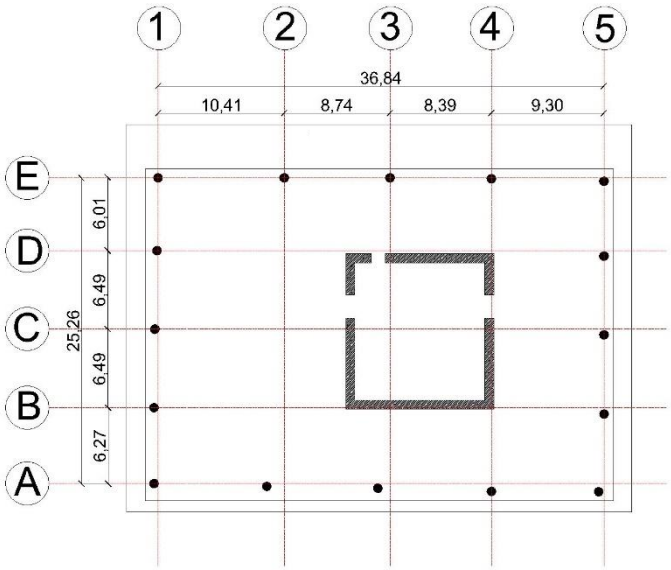
Risk Kategorisi	Tanım	Bina Önem Katsayısı (I_e)
IV	Temel binalar (Hastane, acil durum barınağı, polis merkezleri vb.)	1.5
III	Tehlike durumunda insan yaşamı için önem teşkil eden yapılar (Bir bölgede 300 kişilik binalar, 250 kişiden fazla kapasiteye sahip okullar vb.)	1.25
II	I, III ve IV'e kategorisine girmeyen yapılar	1.00
I	Tehlike anında insan yaşamı için düşük tehlike oluşturan yapılar (Tarım tesisleri, depolama alanları vb.)	1.00

4.2. Yöntem

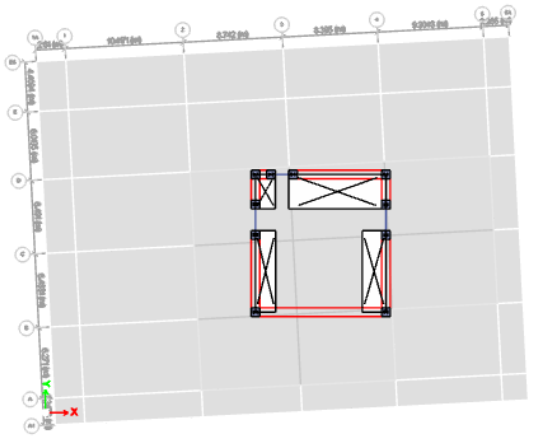
Yapı modellenmesinde üç boyutlu analiz programı ETABS (versiyon 18.1.1) kullanılmış olup lineer analiz yapılmıştır. Yapının en üst katında bulunan çatı makası modellemede göz önüne alınmamıştır. Tüm katların yüksekliği 4.064 metre olarak alınarak 23 kata sahip 93,472 metre yüksekliğe sahip yapı oluşturulmuştur. Prizmatik ve burgulu modellemeler şekil 4.8'de gösterilmiştir. Şekil 4.9'da prizmatik ve burgulu yüksek yapı modellemelerinde kullanılan mimari plan gösterilmiştir. Şekil 4.10'da her katı 3° derece dönüş açısı yapan burgulu yüksek yapının farklı katlarda plan kesitleri gösterilmiştir.



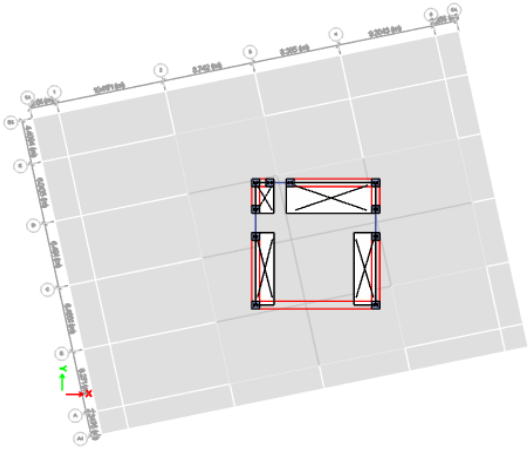
Şekil 4.8. Prizmatik ve burgulu yapı modelleri



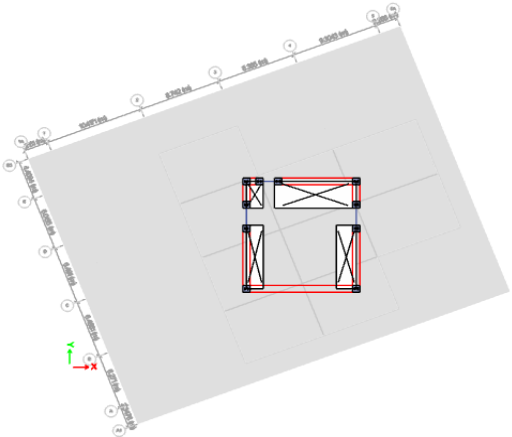
Şekil 4.9. Modellemelerde kullanılan mimari plan



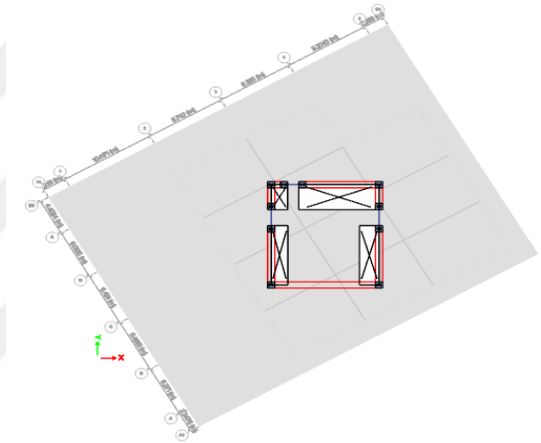
a. 1.Kat - 3° dönüş açısı



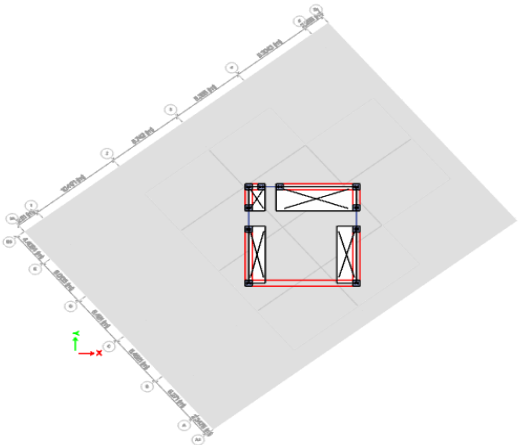
b. 4.Kat - 12° dönüş açısı



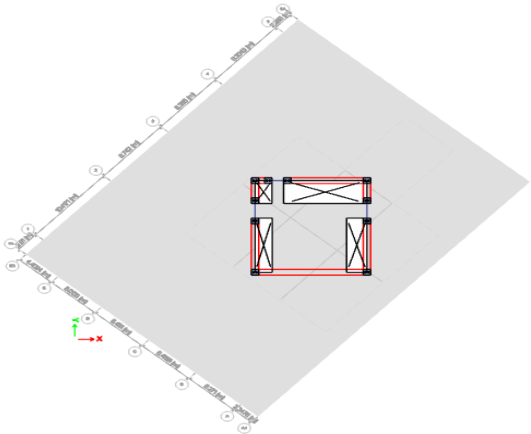
c. 7.Kat - 21° dönüş açısı



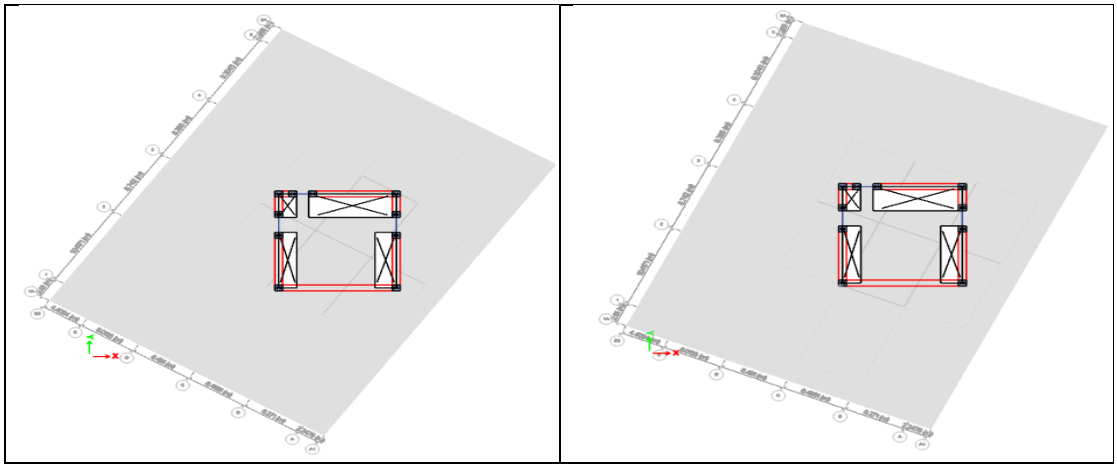
d. 10. Kat - 30° dönüş açısı



e. 13.Kat - 39° dönüş açısı



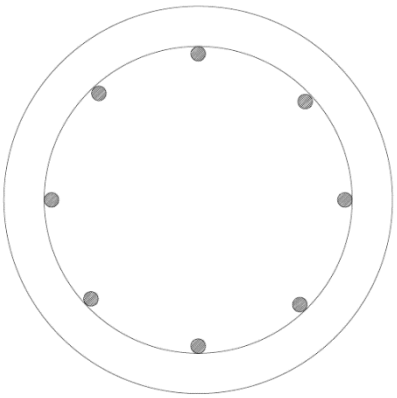
f. 16.Kat - 48° dönüş açısı



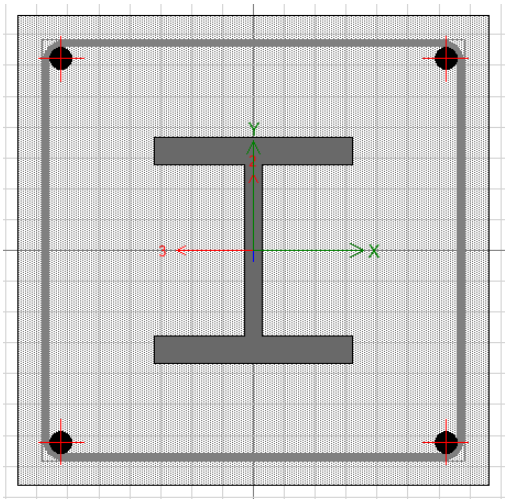
g. 19. Kat - 57° dönüş açısı	h. 22.Kat - 66° dönüş açısı

Şekil 4.10. Burgulu yapı plan kesitleri

Kompozit perde duvar prizmatik ve burgulu yapıda yapı yüksekliği boyunca modellenmiştir. Döşemelerde C80/95 betonu kullanılarak 11 inch (279.4 mm) kalınlığında modellenmiştir. Modellemelerde ilk 11 katında C80/95 beton, 12-17 katlar arasında C70/85 beton, 18-23 katlarda C55/67 betonu kolonlarda ve kompozit perde duvarlarda kullanılmıştır (Çizelge 4.2-Çizelge 4.3). Dairesel betonarme kolonların çapı ve kompozit perde duvarların kalınlığı 762 mm olarak modellenmiştir. Kolon ve perde duvarlarda kullanılan 11 numaralı donatı metrik sistemde Ø36 olarak alınmıştır (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12). Gerçek bina modelinde kullanılan Grade 75 donatı çeliği metrik sistemde B500C donatı olarak modellenmiştir (Çizelge 4.4). Mevcut binanın ilk 15 katında kullanılan gömülü çelik plaka, tüm katlar dönüş açısı yaptığından modellemede tüm duvar yüksekliğince olarak modellenmiştir ve gömülü çelik plakada kullanılan Grade 50 çeliği S355 olarak alınmıştır. Şekil 4.13'de modellenen burgulu yapının dikey kesiti verilmiştir.



Şekil 4.11. Çevre kolonları enkesiti



Şekil 4.12. Perde uç kolonları ve bağ kirişleri en kesiti

Çizelge 4.2. Taşıyıcı sistemde kullanılan malzemeler

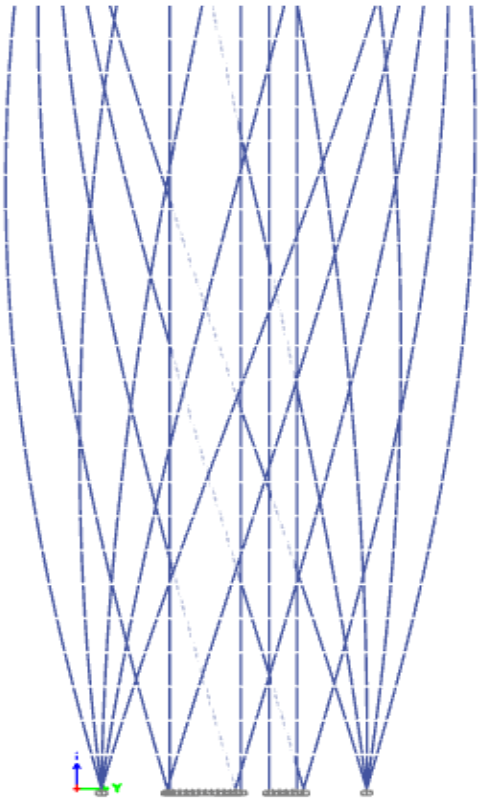
Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk (kg/m^3)
C55/67	38103	2400
C70/85	41191	2400
C80/95	43069	2400
S355	210000	7850
B500C	210000	7850

Çizelge 4.3. Taşıyıcı sistemde kullanılan beton sınıfları

	Kat 1-11	Kat 12-17	Kat 18-23
Kolon	C80/95	C70/85	C55/67
Perde	C80/95	C70/55	C55/67
Bağ Kirişi	C80/95	C70/85	C55/67

Çizelge 4.4. Taşıyıcı sistemde kullanılan donatı sınıfları ve net beton örtüsü

	Boyuna Donatı	Enine Donatı	Net Beton örtüsü (C_c)
Kolon	Ø36	Ø10	30 mm
Perde	Ø36	Ø10	30 mm
Bağ Kirişi	Ø36	Ø10	30 mm



Şekil 4.13. Modellenen burgulu yüksek yapının dikey kesiti

4.3. Rüzgar Yükünün Tanımlanması

Tez çalışması kapsamında modellemelerde rüzgar yükü tam rijit diyaframlara uygulanmıştır. Prizmatik yüksek yapıda ASCE 7-16'a göre rüzgar yükleri hesaplanmıştır. Tez kapsamında, burgulu yüksek yapıda Bilgen'in (2019) yapmış olduğu rüzgar tünel testlerinden bulunan değerlerden yararlanılarak modellenen burgulu yapı için rüzgar yüklerinde azalmalara gidilmiştir. Bu kapsamda, burgulu yüksek yapının rüzgar tanımlamalarında modellenen prizmatik yapıda elde edilen rüzgar yükleri x ve y doğrultusunda % 15 oranında azaltılarak uygulanmıştır. Denklem 4.1'de hız basıncı formülü verilmiştir. ASCE 7-16'a göre rüzgara maruz kalma kategorisi B olarak seçilmiştir. Fırtına etkisi faktörü (G_f) modellemede x yönünde 1.14, y yönünde 1.12 olarak hesaplanmıştır. K_{zt} faktörü modellemede 1 olarak alınmıştır. Ayrıca K_d, 0.85 olarak hesaba katılmıştır. Aşağıda prizmatik yapıda ETABS programına tanımlaması yapılan parametrelerin detaylıca incelemesi yapılmıştır.

$$q_z, q_h = 0.613.K_z.K_{zt}.K_d.K_e V^2 \quad (N/m^2) \quad (4.1)$$

4.3.1. Rüzgar doğrultu faktörü (K_d)

Yapı tipine bağlı olarak rüzgar hızı basıncının hesaplanmasında rüzgar doğrultu faktörü çizelge 4.5'deki katsayılar kullanılmaktadır.

Çizelge 4.5. Rüzgar doğrultu faktörü katsayısı (ASCE 7-16)

Yapı Tipi	**Rüzgar doğrultu faktörü katsayısı (K_d)**
Binalar:	
Rüzgara direnç sistemi	0.85
Kaplamalar ve elemanları	0.85
Kavisli çatılar	0.85
Dairesel kubbeler	1.00[a]
Baca, tank vb. yapılar:	
Kare	0.90
Altıgen	0.95
Sekizgen	1.00[a]
Daire	1.00[a]
Çatı üstü ekipmanlar, desteksiz duvarlar ve bağlı levhalar	0.85
Kafesli çerçeveler:	
Üçgen, kare ve dikdörtgen	0.85
Diğer tüm kesit alanları	0.95

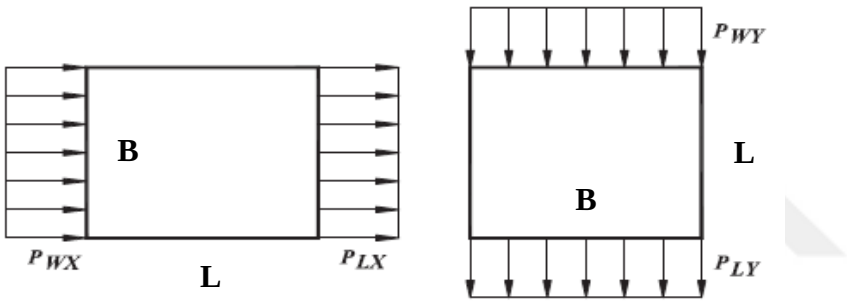
[a]Asimetrik olmayan yapısal sistemlere sahip dairesel veya sekizgen yapılar için K_d 0.95 alınabilmektedir.

4.3.2. Dış basınç katsayısı

Dış basınç katsayısı, yapıya etkiyecek rüzgarın yönüne ve yapının plan yatay uzunluklarına göre değişmektedir. Tez kapsamında modellenen prizmatik yapıda çizelge 4.6'e göre x yönünde uygulanan rüzgar yükü için rüzgar esme doğrultusunda (windward) C_p 0.8 ve rüzgarın çıktığı bölgede (leeward) 0.44 olarak alınmıştır. Y yönünde uygulanan rüzgar yükü için rüzgar esme doğrultusunda (windward) C_p 0.8 ve rüzgarın çıktığı bölgede (leeward) 0.5 olarak alınmıştır (Şekil 4.14).

Çizelge 4.6. Dış basınç katsayıları (ASCE 7-16)

Yüzey	**L/B**	**C_p**	
Rüzgara dik olan duvar	Tüm değerler	0.8	q_z
	0-1	-0.5	
Arka duvar	2	-0.3	q_h
	≥4	-0.2	
Yan duvar	Tüm değerler	-0.7	q_h



Şekil 4.14. Rüzgar doğrultusuna göre yatay uzunluklar

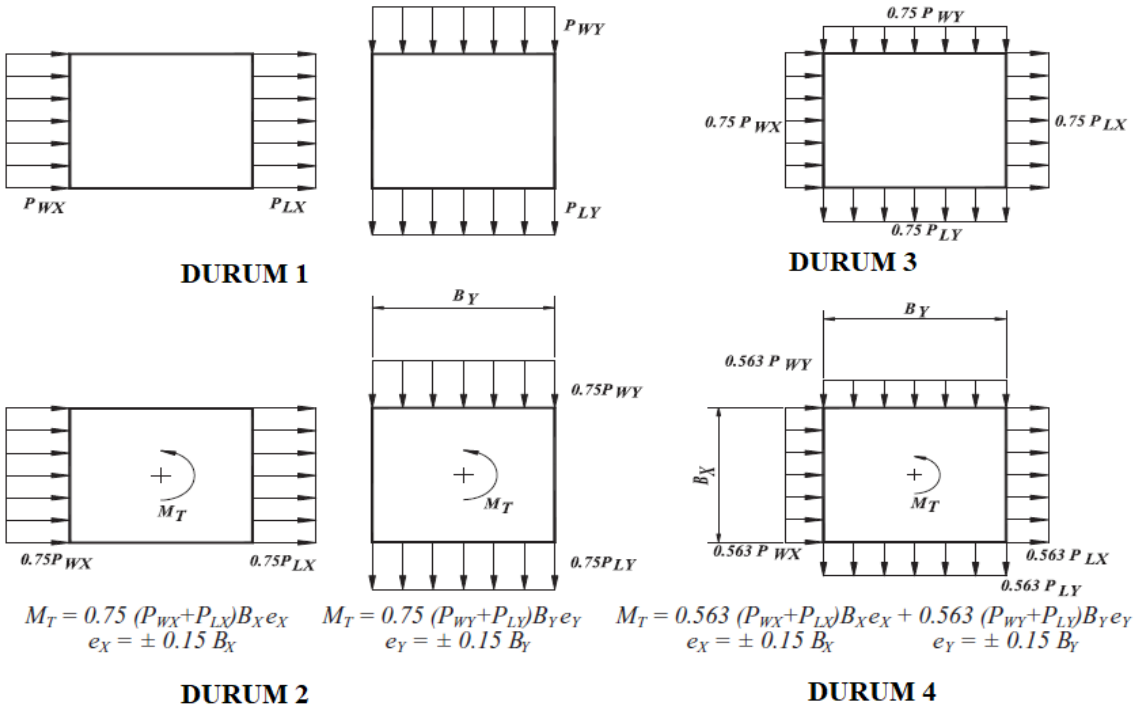
4.3.3. Rüzgara maruz kalma kategorileri

ASCE 7-16'da üç adet maruz kalma kategorisi yer almaktadır. Kategoriler yapının mevcut bulunduğu konuma göre değişmektedir. Maruz kalma kategorisi yapının arazi, bitki örtüsü ve yapılar tarafından belirlenen zemin yüzeyinin pürüzlülüğü ile tanımlanmaktadır. Aşağıda bu kategoriler açıklanmıştır.

- Kategori B: Şehir, ormanlık, engebesi sık olan alanlar için kullanılmaktadır.
- Kategori C: 9,14 metreden daha az yüksekliklikte dağınık engellerin olduğu açık arazi olarak tanımlanır. Bu kategori düz açık arazi ve çayır alanları içerir.
- Kategori D: Düz, engelsiz alanlar ve su yüzeyleri için kullanılmaktadır.

4.3.4. Rüzgar yükü yükleme kombinasyonları

ASCE 7-16'da belirtilen dört adet rüzgar yükü yükleme kombinasyonu bulunmaktadır. Tez çalışması kapsamında, durum 1 kombinasyonu analizde kullanılmıştır. Şekil 4.15'de bu kombinasyonlar gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Rüzgar yükü yükleme kombinasyonları (ASCE 7-16)

4.3.5. Zemin yükseklik faktörü(K_e)

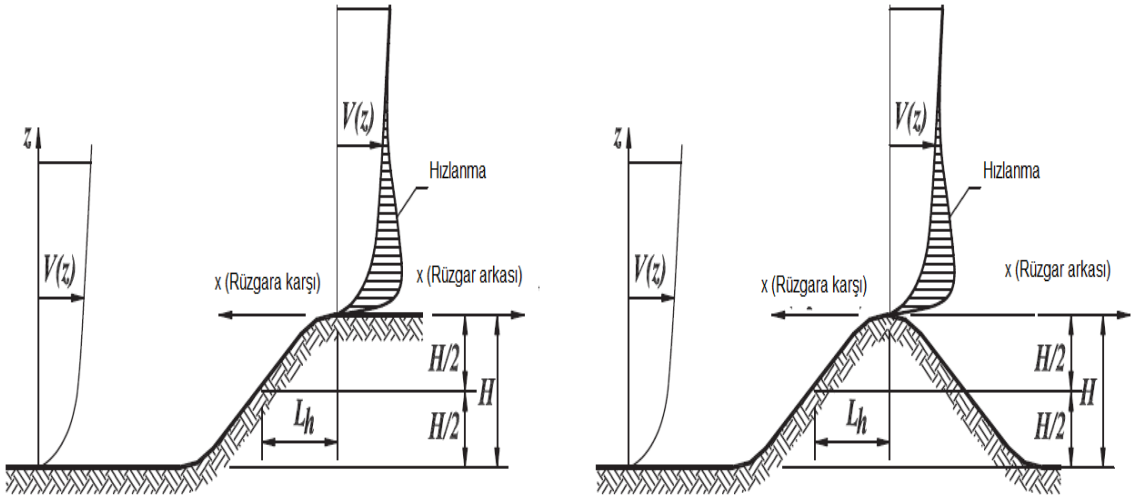
Zemin yükseklik faktörü, deniz seviyesinin üzerinine çıkarken havanın azalan kütle yoğunluğun sebebiyle hız basıncı değiştirmektedir. Yapının bulunduğu deniz seviyesinden yüksekliğine göre değişim göstermektedir (Çizelge 4.7). ASCE 7-16 yönetmeliğinde tüm yükseklikler için zemin yükseklik faktörünün 1 alınabileceği belirtilmiştir. Tez çalışması kapsamında zemin yükseklik faktörü 1 olarak alınmıştır.

Çizelge 4.7. Zemin yükseklik faktörü (ASCE 7-16)

Deniz seviyesinden yükseklik (metre)	Zemin yükseklik faktörü (K_e)
0	1.00
305	0.96
610	0.93
914	0.90
1219	0.86
1524	0.83
1829	0.80

4.3.6. Topoğrafik faktör (K_{zt})

Herhangi bir rüzgara maruz kalma kategorisinde yer alan, genel topografyada ani değişiklikler oluşturan tepeler, sırtlar ve dik yamaçlardaki rüzgar hızlanma etkileri, sahadaki rüzgar yüklerinin belirlenmesine dahil edilecektir. (Şekil 4.16). Tez çalışması kapsamında K_{zt} 1 olarak analizlere dahil edilmiştir.



Şekil 4.16. Topoğrafik etki (Özlek, 2015)

4.3.7. Fırtına etki faktörü (G_f)

Fırtına etki faktörü rijit yapılar için 0.85 olarak alınabilmektedir. Tez kapsamında modellenen yapılar, esnek ve narin bir yapıya sahip olduğu için fırtına faktörü hesaplanmıştır. Narin yapılar ve doğal frekansı 1 Hz'nin altında olan yapılar esnek yapılar olarak kabul edilmektedir. Fırtına etki faktörü yapının doğal frekansına ve yapı plan boyutlarına bağlıdır. ASCE 7-16 bölüm 26.11.5'ine göre hesaplanan fırtına etkisi faktörü (G_f) x yönünde 1.14, y yönünde 1.12 olarak hesaplanmıştır. ASCE 7-16'a göre fırtına etkisi faktörü hesaplamaları için denklem 4.2 ve denklem 4.14 arasındaki denklemler kullanılmaktadır. Çizelge 4.8'de fırtına etki faktörü hesaplamalarında kullanılan katsayılar verilmiştir.

$$G_f = 0.925\left(\frac{1 + 1.7I_{\bar{z}}\sqrt{g_Q{}^2Q^2 + g_R{}^2R^2}}{1 + 1.7g_vI_{\bar{z}}}\right) \tag{4.2}$$

g_Q ve g_v değerleri 3.4 olarak alınır.

$$g_R = \sqrt{2In(3{,}600n_1)} + \frac{0.577}{\sqrt{2In(3{,}600n_1)}} \tag{4.3}$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta}R_nR_hR_B(0.53 + 0.47R_L)} \tag{4.4}$$

$$R_n = \frac{7.47N_1}{(1 + 10.3N_1)^{5/3}} \tag{4.5}$$

$$N_1 = \frac{n_1L_{\bar{z}}}{\bar{V}_{\bar{z}}} \tag{4.6}$$

$$R_\ell = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2}(1 - e^{-2\eta}) \tag{4.7}$$

$$\eta = 4.6n_1h/\ \bar{V}_{\bar{z}} \tag{4.8}$$

$$\eta = 4.6n_1B/\ \bar{V}_{\bar{z}} \tag{4.9}$$

$$\eta = 15.4n_1L/\ \bar{V}_{\bar{z}} \tag{4.10}$$

$$\bar{V}_{\bar{z}} = \bar{b}\left(\frac{\bar{z}}{10}\right)^{\alpha} V \tag{4.11}$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.63\left(\frac{B+h}{L_{\bar{z}}}\right)^{0.63}}} \tag{4.12}$$

$$L_{\bar{z}} = \ell\left(\frac{\bar{z}}{10}\right)^{\bar{\varepsilon}} \tag{4.13}$$

$$I_{\bar{z}} = c\left(\frac{10}{z}\right)^{1/6} \tag{4.14}$$

Çizelge 4.8. Fırtına etkisi faktörü katsayıları (ASCE 7-16)

Maruz kalma kategorisi	**α**	**Z_g (m)**	$\hat{\alpha}$	$\hat{b}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{b}$	**c**	**ℓ(m)**	$\bar{\varepsilon}$	**z_{min}**
B	7.0	365.76	1/7	0.84	1/4	0.45	0.30	97.54	1/3	9.14
C	9.5	274.32	1/9.5	1.00	1/6.5	0.65	0.20	152.40	1/5	4.57
D	11.5	213.36	1/11.5	1.07	1/9	0.80	0.15	198.12	1/8	2.13

4.4. Etkin Kesit Rijitlikleri

Etkin kesit rijitliği betonarme kesitler için kullanılmaktadır. Etkin kesit rijitlikleri, betondaki çatlakların gelişimini ve çelik donatılar arasındaki sıyrılmaları hesaba katmak için doğrusal yapısal analiz programlarında kullanılır (Restrepo ve Rodriguez, 2021). Sismik tasarımda çatlama ve donatılar arasındaki kayma kuvveti ile oluşan göreceli rijitlik azalması, yapının tasarımında gerekli olan iç kuvvet dağılımını etkilemektedir (Godinez vd., 2021). Tez kapsamında, çizelge 4.9'de yer alan değerler, tüm yapı elemanlarına işlenmiştir. Etkin kesit rijitlikleri ACI 318-14 standardı tablo 6.6.3.1.1'e göre alınmıştır.

Çizelge 4.9. Etkin kesit rijitlikleri (ACI 318-14)

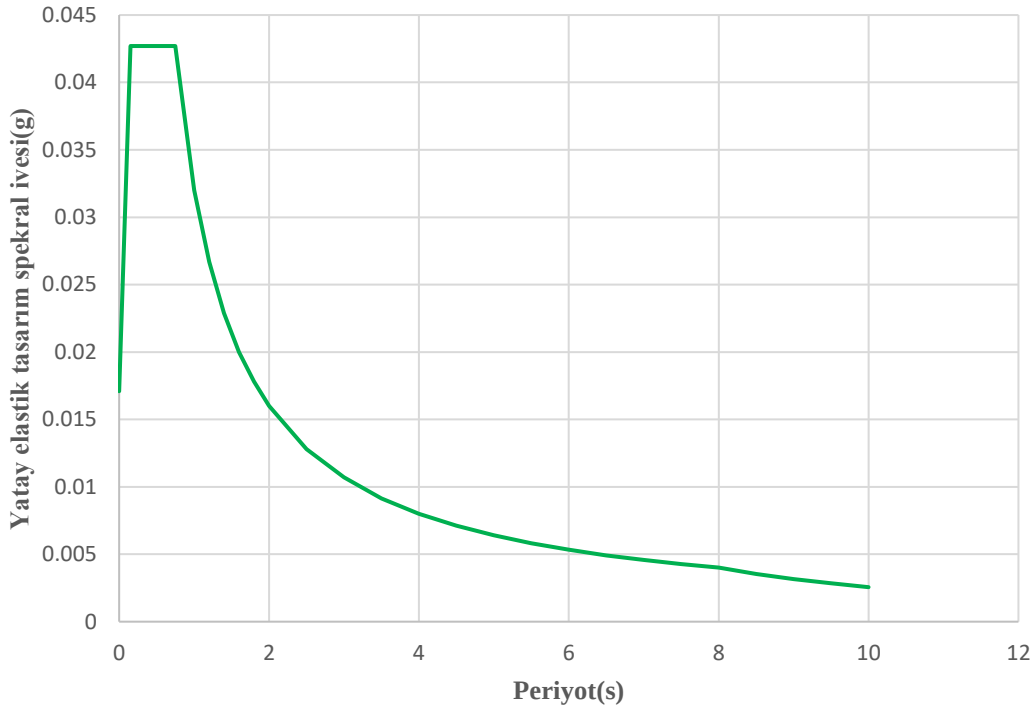
	Atalet Momenti	Kesme
Perde	$0.35I_g$	$1.0A_g$
Döşeme	$0.25I_g$	$1.0A_g$
Kolon	$0.70I_g$	$1.0A_g$
Bağ Kirişi	$0.35I_g$	$1.0A_g$

4.5. Deprem Yükünün Tanımlanması

Tez çalışması kapsamında dinamik mod birleştirme metodundan yararlanılarak ASCE 7-16 yönetmeliği kullanılmıştır (Şekil 4.17). Yapının mevcut bulunduğu konuma (Miami, Florida) göre S_s, S_1, T_L değerleri bulunmuştur (seismicmaps.org). R, Ω, ve C_d değerleri ASCE 7-16 tablo 12.2-1'de yer alan "Steel and concrete composite plate shear walls" kategorisi seçilerek alınmıştır. Mod birleştirme deprem yükü yöntemiyle elde edilen taban kesme kuvvetleri, eş değer deprem yükü yöntemi ile elde edilen taban kesme kuvvetlerine büyütme oranları kullanılarak eşitlenmiştir. Taban kesme kuvveti büyütme oranları prizmatik yapıda eşdeğer deprem yükü kuvvetine göre x doğrultusunda 6.47, y doğrultusunda 5.80 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.11). Burgulu yapıda taban kesme kuvveti büyütme oranları x yönünde 6.65, y yönünde 5.69 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.12).

Çizelge 4.10. Yapı parametreleri

S_S	0.04 g
S_1	0.02 g
T_L	8 sn
R	6.5
Ω	2.5
C_d	5.5



Şekil 4.17. ASCE 7-16'a göre deprem spektrumu (seismicmaps.org)

Mod katkılarının birleştirilmesinde tam karesel birleştirme (CQC) kullanılmıştır. Diyafram eksantirisitesi 0.05 olarak hesaba dahil edilmiştir. Tez kapsamında, başlangıç ölçek faktörü 1509.23 olarak hesaplanmıştır (Denklem 4.14).

$$\frac{g}{RI} = \frac{9.81}{6.5 * 1} * 1000 = 1509.23 \tag{4.14}$$

Çizelge 4.11. Prizmatik yapı taban kesme kuvveti büyütme oranı

	Büyütme oranı	Nihai ölçek faktörü
X Yönü Deprem Yükü	6.469	9763.84
Y Yönü Deprem Yükü	5.796	8747.32

Çizelge 4.12. Burgulu yapı taban kesme kuvveti büyütme oranı

	Büyütme oranı	Nihai ölçek faktörü
X Yönü Deprem Yükü	6.6485	10034.16
Y Yönü Deprem Yükü	5.6907	8588.53

Analiz sonuçlarında deprem yükleri altında doğrusal olmayan göreli yer değiştirmeler denklem 4.15 ‘e göre hesabı yapılmıştır. ETABS programından alınan göreli yer değiştirme değerleri C_d faktörü ile çarpılarak ve I_e faktörüne bölünerek doğrusal olmayan tepki yer değiştirmesi bulunmuştur. Çizelge 4.13’de ASCE 7-16 yönetmeliğinde yer alan izin verilen kat ötelenme değerleri gösterilmiştir.

$$\delta_M = \frac{C_d \delta_{max}}{I_e} \tag{4.15}$$

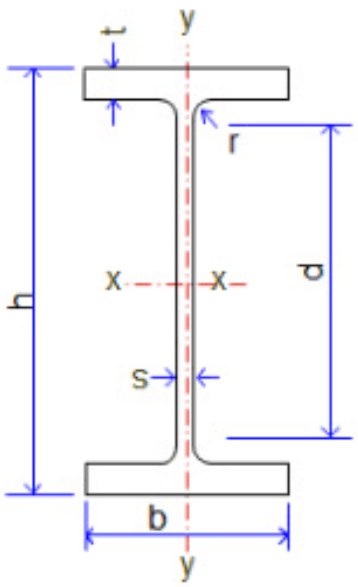
Çizelge 4.13. İzin verilen kat ötelenme değerleri, Δ (ASCE 7-16)

Yapı Türü	Risk Kategorisi		
	I veya II	III	IV
4 kattan az yığma perde duvarlı yapılar	$0.025*h_{sx}$	$0.020*h_{sx}$	$0.015*h_{sx}$
Yığma perde duvarlı yapılar	$0.010*h_{sx}$	$0.010*h_{sx}$	$0.010*h_{sx}$
Diğer yığma perde duvarlı yapılar	$0.007*h_{sx}$	$0.007*h_{sx}$	$0.007*h_{sx}$
Diğer yapılar	$0.020*h_{sx}$	$0.015*h_{sx}$	$0.010*h_{sx}$

4.6. Kompozit betonarme perde duvar modellemesi

Tez çalışma kapsamında, kompozit çelik plakalı betonarme perde duvar ETABS modelinde çok katmanlı kabuk özelliği kullanılarak oluşturulmuştur. Perde uçlarında var olan betona gömülü çelik profil kompozit kolonlar oluşturularak rijit linklerle perdelere bağlanmıştır. Perde aralarında bulunan bağ kirişler de kompozit olarak modellenerek perdelere rijit linklerle bağlanmıştır. Perdenin rijit linklerle bağlandığı köşe kompozit

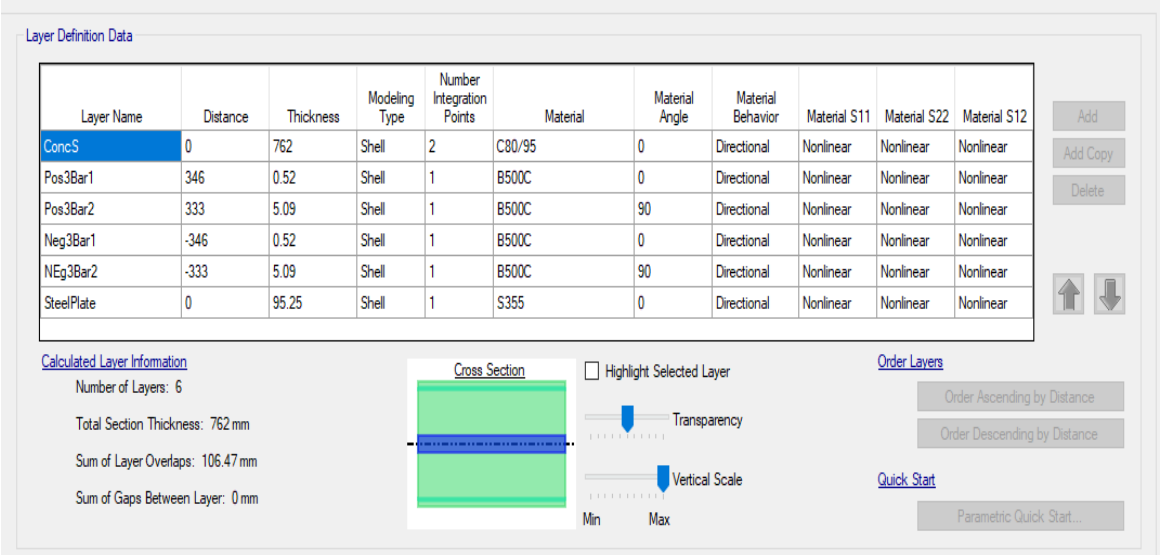
kolonlarda ve kompozit bağ kirişlerde W 310 x 310 x 283 çelik profili kullanılarak modellenmiştir (Şekil 4.18-Çizelge 4.14). Bağ kirişlerin eni ve yüksekliği 762 mm olarak boyutlandırılmıştır. Çok katmanlı perde modellemesinde yeterli ankrajın sağlandığı varsayılmıştır. Şekil 4.19'da çok katmanlı kabuk perde duvarların modellenme ayrıntısı gösterilmiştir. Şekil 4.20'de prizmatik yapının çekirdek bölgesi gösterilmiştir. Perde boyuna donatılarında Ø36, enine donatılarda Ø10 kullanılmıştır. Boyuna donatılar 200 mm aralıklarla ve enine donatılar 150 mm aralıklarla perde kesitlerine koyulmuştur. Gömülü çelik levha 95.25 mm, toplam perde kalınlığı 762 mm olarak modellenmiştir (Şekil 4.21).



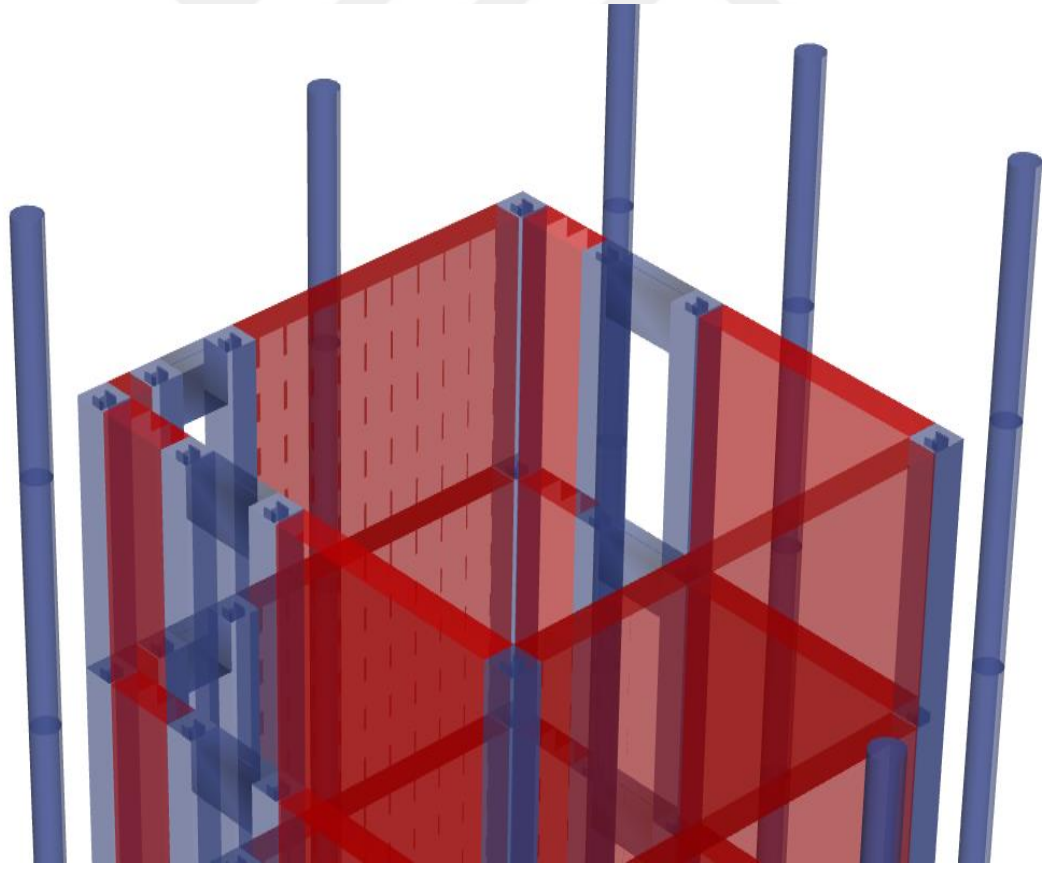
Şekil 4.18. Çelik profil kesit ölçüleri (steelsolutionscompany.com)

Çizelge 4.14. W 310 x 310 x 283 çelik profili kesit ölçüleri (stad.fr)

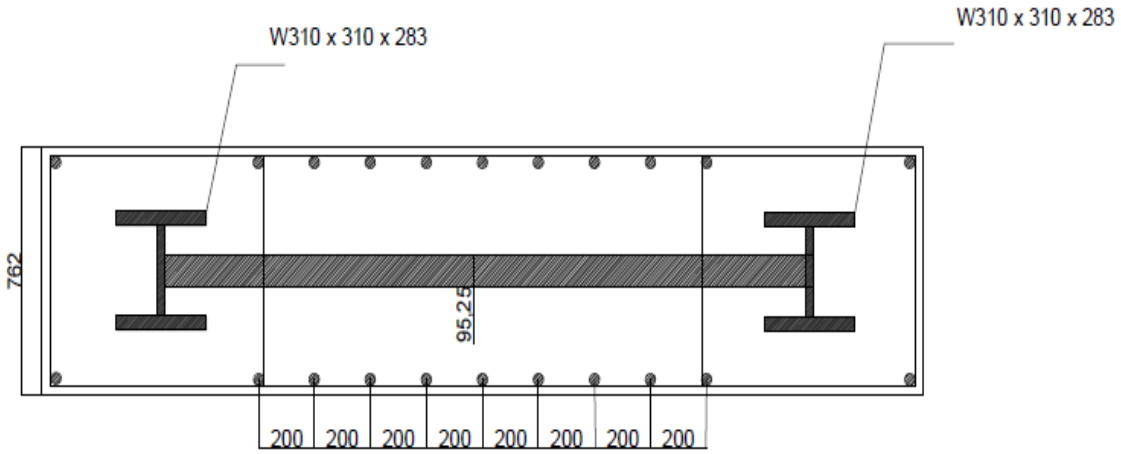
h (mm)	365
b (mm)	322
s (mm)	26.9
t (mm)	44.1



Şekil 4.19. ETABS'de çok katmanlı kabuk perde duvar tanımlaması



Şekil 4.20. Çekirdek bölgesi



Şekil 4.21. Çelik plakalı kompozit betonarme perde duvar kesiti (mm)

4.7. Uygulanan Diğer Yükler

Döşemelere hareketli yük olarak 2 kN/m^2, yapının kendi yükü haricinde diğer yük olarak 3.5 kN/m^2 yük atanmıştır. Çatı katında bu değerler azaltılarak hareketli yük olarak 1.5 kN/m^2, diğer ölü yük olarak 2 kN/m^2 yük atanmıştır. Diğer yük kapsamı içinde kaplama yükleri, mekanik yükler ve eşya yükleri düşünülebilir. Hareketli yük kütle katılım sayısı (n), mevcut yapı konut olduğu için 0.3 olarak alınmıştır.

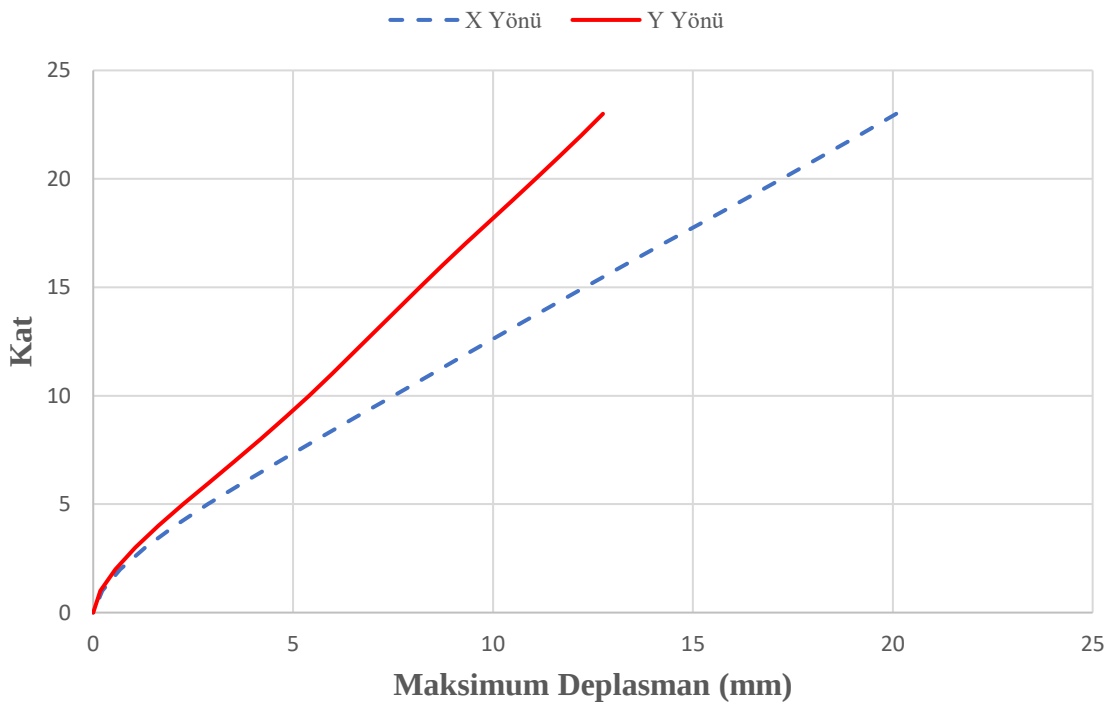
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde modellenen prizmatik ve burgulu yapıların analiz sonunda deprem ve rüzgar yükleri altında maksimum deplasman değerleri, göreli yer değiştirme, devrilme momentleri, taban kesme kuvvetleri, modal analiz sonuçları ve kesit tesirleri gösterilmiştir.

5.1. Prizmatik Yapıya Ait Analiz Sonuçları

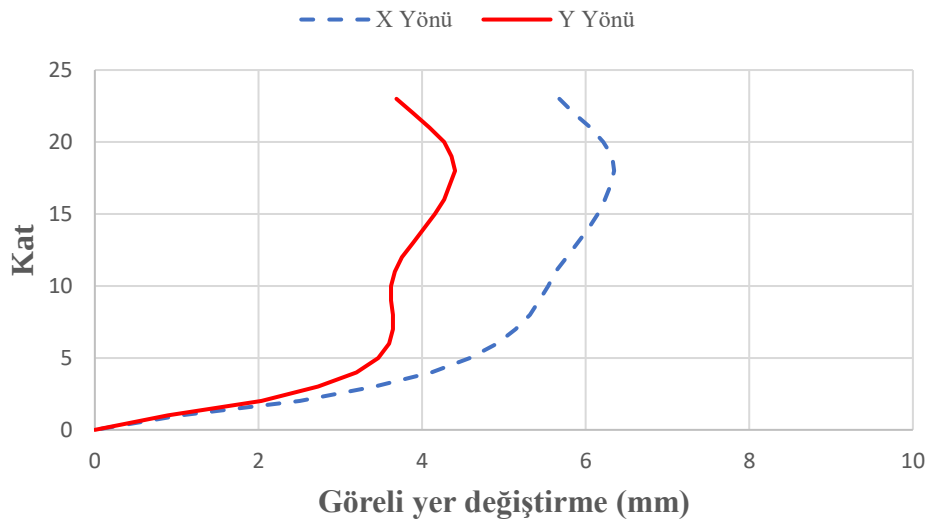
5.1.1. X yönünde uygulanan deprem kuvveti altında sonuçlar

Şekil 5.1'de x yönünde uygulanan dinamik deprem yükünün yapı kat yüksekliğince deplasman değerleri verilmiştir. Uygulanan deprem yüklemesi sonucu yapının x yönündeki maksimum deplasmanı 2.0 cm gelmektedir. Mod birleştirme yöntemine göre bu yönde uygulanan taban kesme kuvveti 4263 kN'dur.



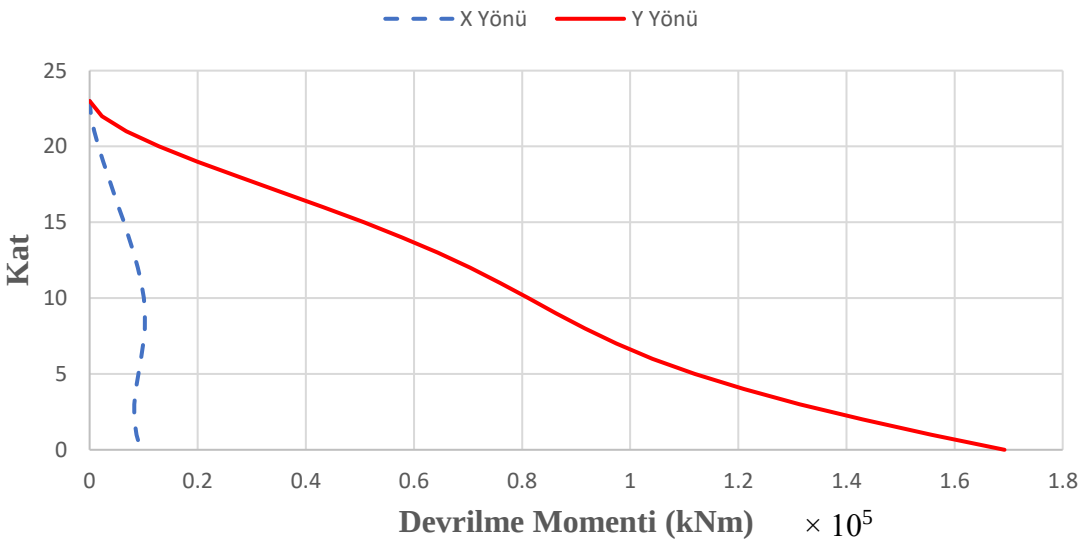
Şekil 5.1. X yönü deprem yüklemesi altında deplasman değerleri

X yönü uygulanan deprem yükü altında göreli yer değiştirme x doğrultusunda maksimum 6.3 mm olarak bulunmuştur (Şekil 5.2). ASCE 7-16 yönetmeliğine göre deprem kuvvetinde maksimum göreli yer değiştirme değeri 81.28 mm'dir. Bu değer 0.020*h_{sx} ile bulunmuştur.



Şekil 5.2. Göreli yer değiştirme grafiği

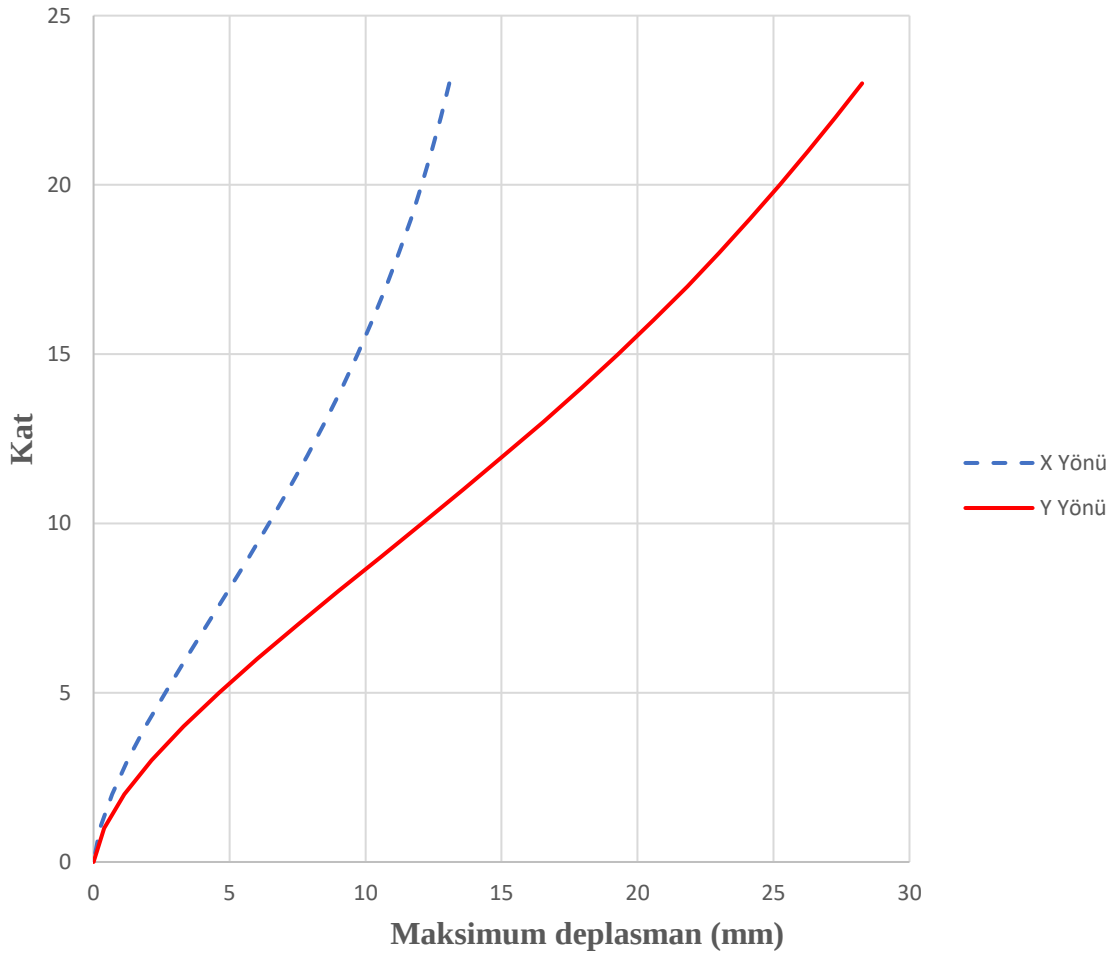
Deprem x yönünden yapıya uygulandığı için y ekseni etrafındaki moment kritik rol taşımaktadır. Şekil 5.3'de görüldüğü üzere maksimum devrilme momenti y yönünde 169238 kN.m olarak bulunmuştur.



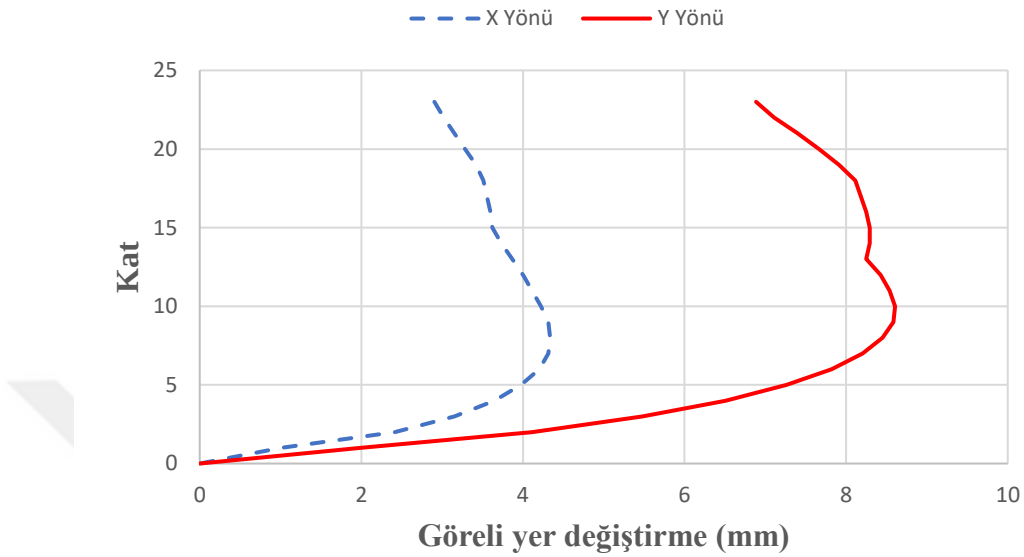
Şekil 5.3. Devrilme momenti diyagramı

5.1.2. Y yönünde uygulanan deprem kuvveti altında sonuçlar

Şekil 5.4'de y yönünde uygulanan dinamik deprem yükünün yapı kat yüksekliğince deplasman değerleri verilmiştir. Uygulanan deprem yüklemesi sebebiyle yapının y yönündeki maksimum deplasmanı 2.8 cm gelmektedir. Mod birleştirme yöntemine göre bu yönde uygulanan taban kesme kuvveti 4263 kN'dur.

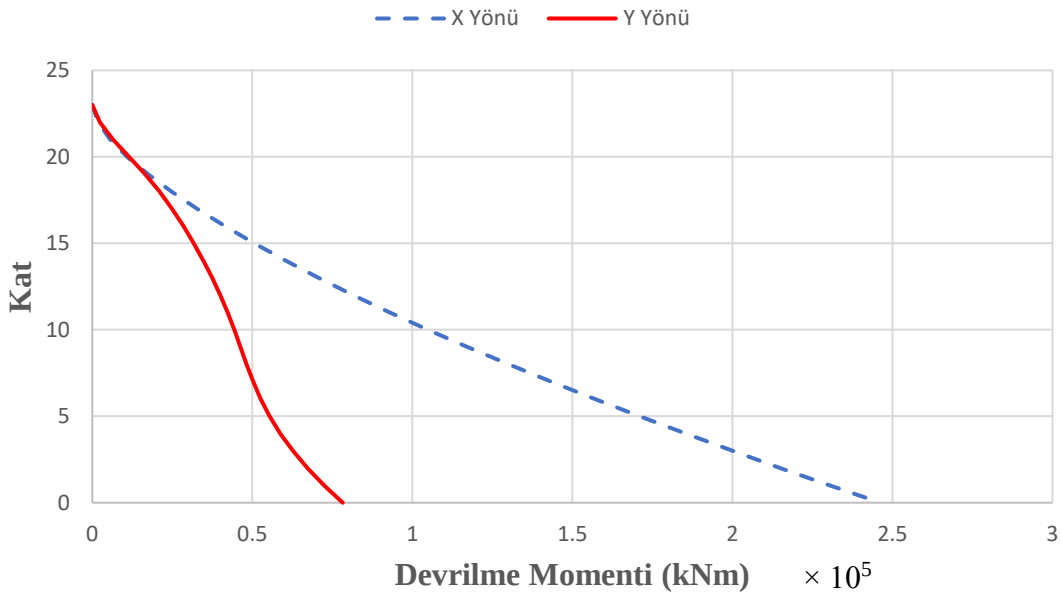


Y yönünde uygulanan deprem yükü altında göreli yer değiştirme y doğrultusunda maksimum 8.6 mm olarak bulunmuştur (Şekil 5.5). ASCE 7-16 yönetmeliğine göre maksimum göreli yer değiştirme değeri 81.28 mm'dir (0.020*h_{sx}).



Şekil 5.5. Göreli yer değiştirme grafiği

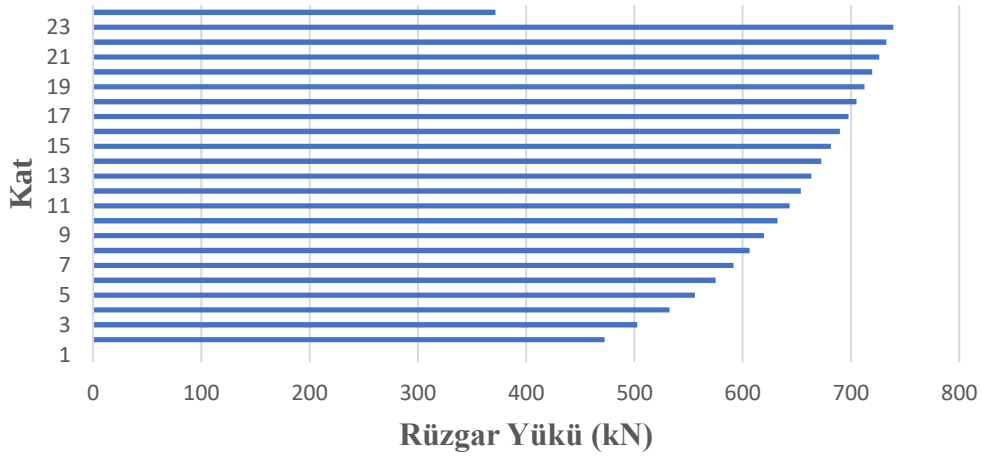
Deprem y yönünden yapıya uygulandığı için x ekseni etrafındaki moment kritik rol taşımaktadır. Şekil 5.6'de görüldüğü üzere maksimum devrilme momenti y yönünde 246244 kNm olarak bulunmuştur.



Şekil 5.6. Devrilme momenti diyagramı

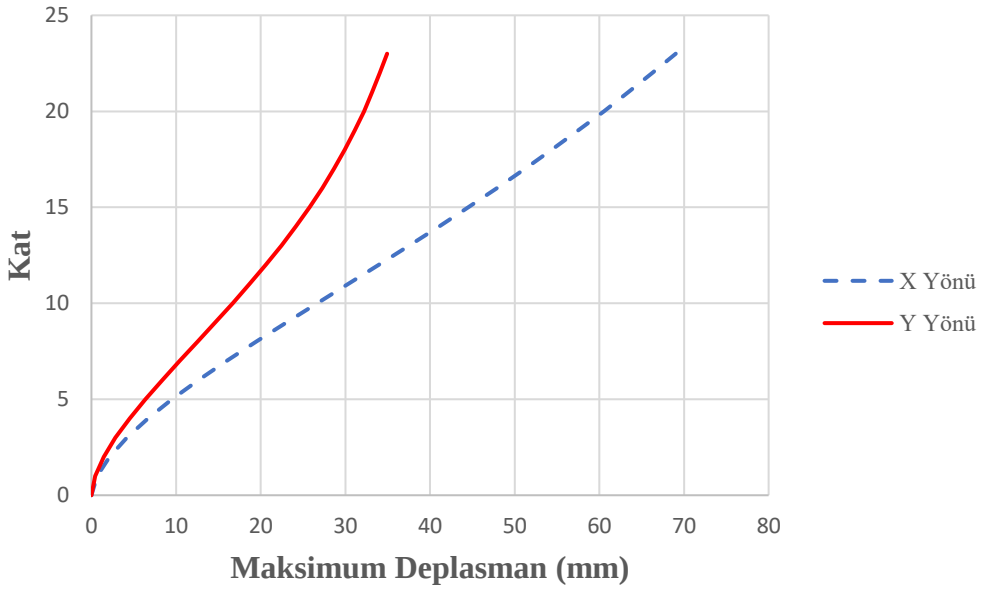
5.1.3. X yönünde uygulanan rüzgar kuvveti altında sonuçlar

Şekil 5.7'de ASCE 7-16 yönetmeliğine göre hesaplanarak x yönünde uygulanan rüzgar yüklerinin katlara göre dağılımı gösterilmiştir.



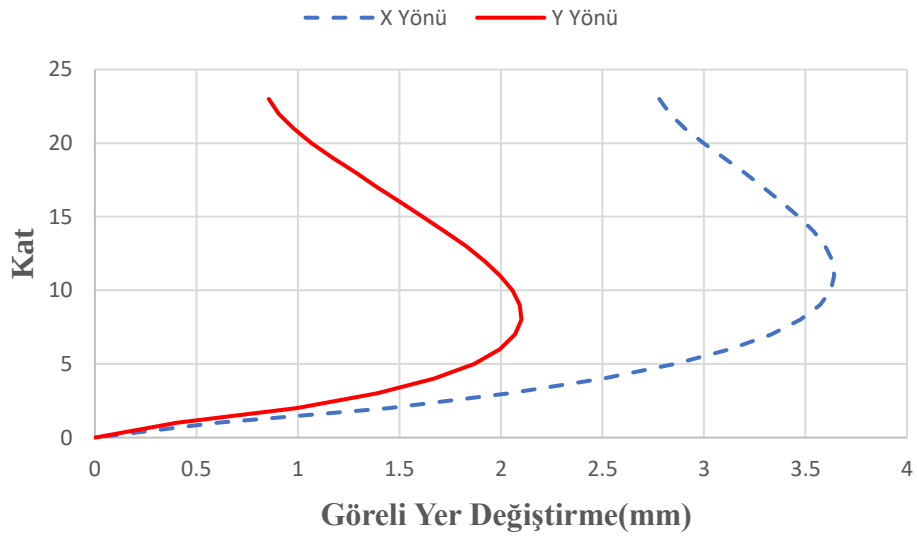
Şekil 5.7. X yönü uygulanan rüzgar yüklemesi

Şekil 5.8'de x yönünde uygulanan statik rüzgar yükünün yapı kat yüksekliğince deplasman değerleri verilmiştir. Uygulanan rüzgar yüklemesi sebebiyle yapının x yönündeki maksimum deplasmanı 6.9 cm gelmektedir. Bu yönde uygulanan rüzgar yükü altında taban kesme kuvveti 14497 kN bulunmuştur.



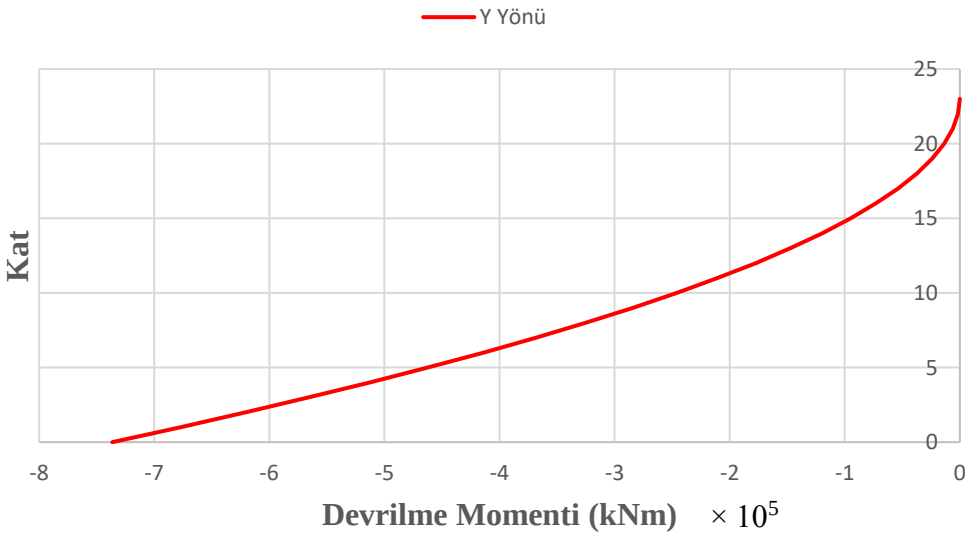
Şekil 5.8. X yönü rüzgar yüklemesi altında deplasman değerleri

X yönü uygulanan rüzgar yükü altında maksimum göreli yer değiştirmesi 3.64 mm olarak bulunmuştur (Şekil 5.9). Rüzgar yükü altında maksimum göreli yer değiştirme değeri kat yüksekliğinin 500'e bölünmesiyle bulunmuştur. Bu maksimum değer 8.128 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 5.9. Göreli yer değiştirme grafiği

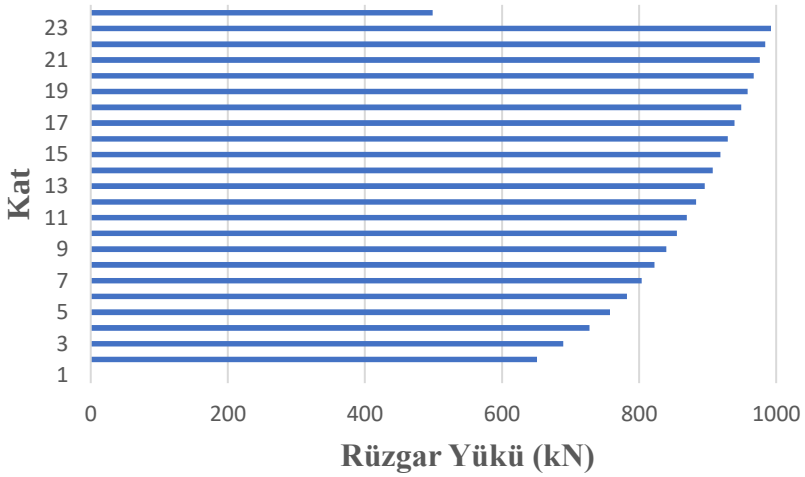
Rüzgar x yönünden yapıya uygulandığı için y ekseni etrafındaki moment kritik rol taşımaktadır. Şekil 5.10'da maksimum devrilme momenti y yönünde 736386 kNm olarak bulunmuştur.



Şekil 5.10. Devrilme momenti diyagramı

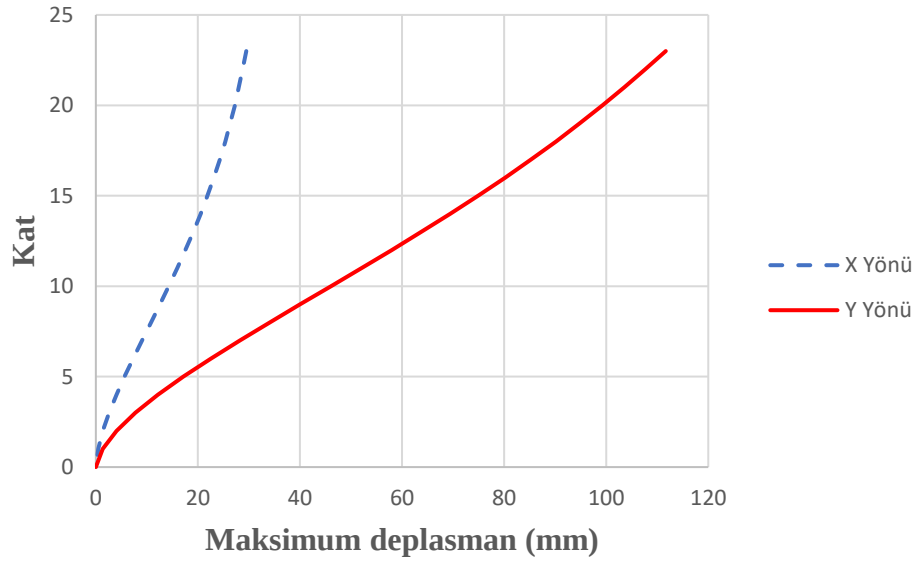
5.1.4. Y ekseni yönünde uygulanan rüzgar yükü altında sonuçlar

Şekil 5.11'de ASCE 7-16 yönetmeliğine göre hesaplanmış y yönünde uygulanan rüzgar yüklerinin katlara göre dağılımı gösterilmiştir.



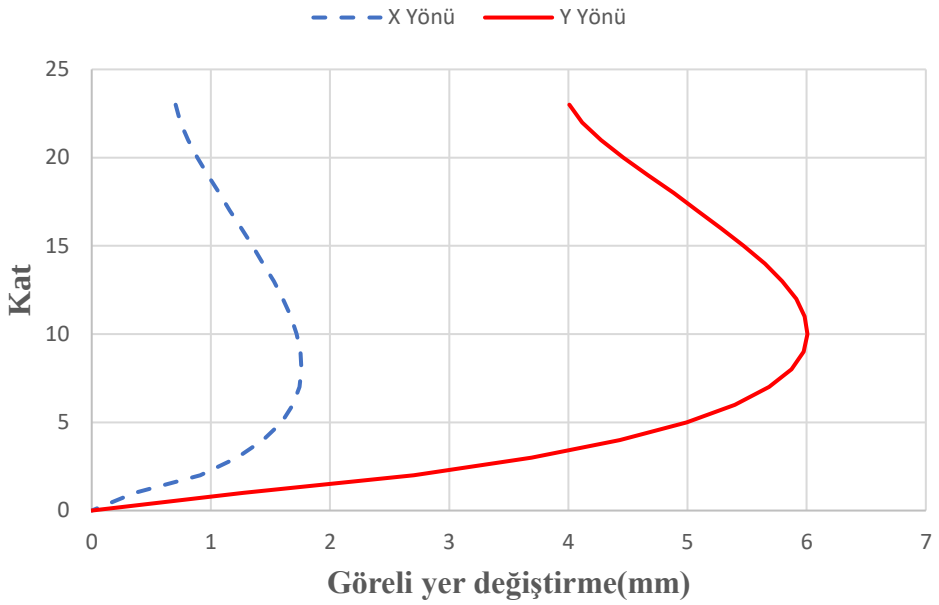
Şekil 5.11. Y yönü uygulanan rüzgar yüklemesi

Şekil 5.12'da y yönünde uygulanan statik rüzgar yükünün yapı kat yüksekliğince deplasman değerleri verilmiştir. Uygulanan rüzgar yüklemesi sebebiyle yapının y yönündeki maksimum deplasmanı 11.1 cm gelmektedir. Bu yönde uygulanan rüzgar yükü altında taban kesme kuvveti 19597 kN bulunmuştur.



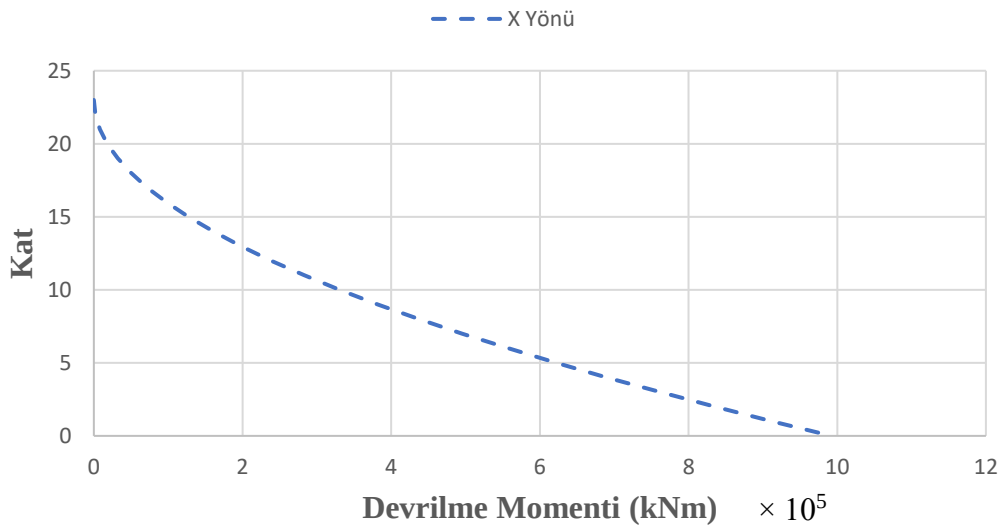
Şekil 5.12. Y yönü rüzgar yüklemesi altında deplasman değerleri

Y yönünde uygulanan rüzgar yükü altında maksimum göreli yer değiştirmesi y doğrultusunda 6 mm olarak bulunmuştur (Şekil 5.13). Maksimum göreli yer değiştirme limiti 8.128 mm'dir.



Şekil 5.13. Göreli yer değiştirme grafiği

Rüzgar y yönünden yapıya uygulandığı için x ekseni etrafındaki moment kritik rol taşımaktadır. Şekil 5.14'de maksimum devrilme momenti x yönünde 992324 kNm olarak bulunmuştur.



Şekil 5.14. Devrilme momenti diyagramı

5.1.5. Modal analiz sonuçları

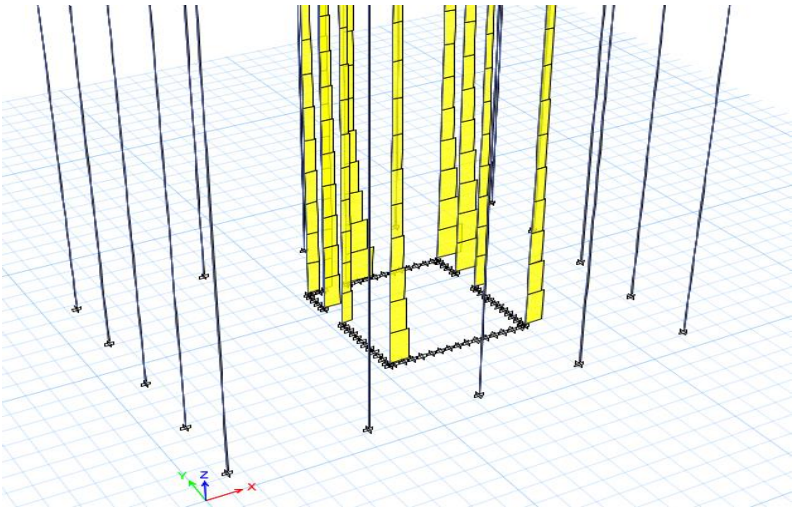
Prizmatik yapının modelleme aşamasında 11 adet mod göz önüne alınmıştır. Modellemede ASCE 7-16 yönetmeliğinin belirtmiş olduğu %90 mod katılım kütle oranı sağlanmaktadır. Çizelge 5.1.'de analiz sonucun mod katılım kütle oranı verileri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Prizmatik yapı modal analiz sonuçları

Mod	Periyot (s)	UX	UY	SumUX	SumUY
1	3.703	0.5835	0.0022	0.5835	0.0022
2	2.153	0.0014	0.5223	0.5848	0.5245
3	1.621	0.0019	0.1521	0.5867	0.6765
4	0.813	0.2244	0.0091	0.8111	0.6856
5	0.528	0.0123	0.0593	0.8234	0.7449
6	0.399	0.0045	0.0428	0.828	0.7877
7	0.367	0.651	0.0091	0.893	0.7968
8	0.247	0.0002	0.0793	0.8932	0.8762
9	0.219	0.027	0.0118	0.9202	0.888
10	0.191	0.0033	0.0074	0.9236	0.8954
11	0.158	0.0086	0.0134	0.9321	0.9087

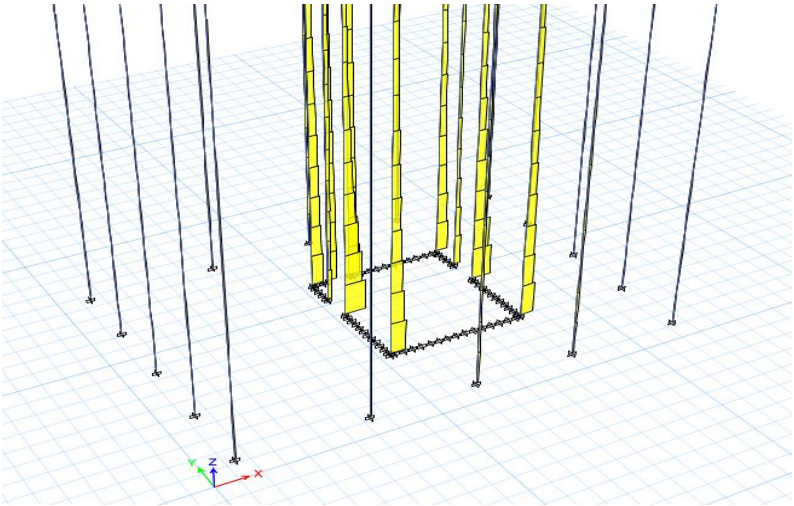
5.1.6. Yüklemeler altında oluşan kesit tesirleri

Tez kapsamında modellemesi yapılan prizmatik yüksek yapının yüklemeler altında oluşan kesit tesirleri gösterilmiştir. Şekil 5.15'de prizmatik yüksek yapının x doğrultusunda uygulanan deprem yükü altında eksenel kuvvet dağılımı gösterilmiştir. Beklenildiği üzere maksimum eksenel kuvvetler en alt seviyedeki kolonlarda oluşmuştur. Merkezi çekirdek bölgesinde oluşan maksimum eksenel kuvvet 1184 kN iken, çevre kolonlarda gözlemlenen maksimum eksenel kuvvet 58 kN'dur.



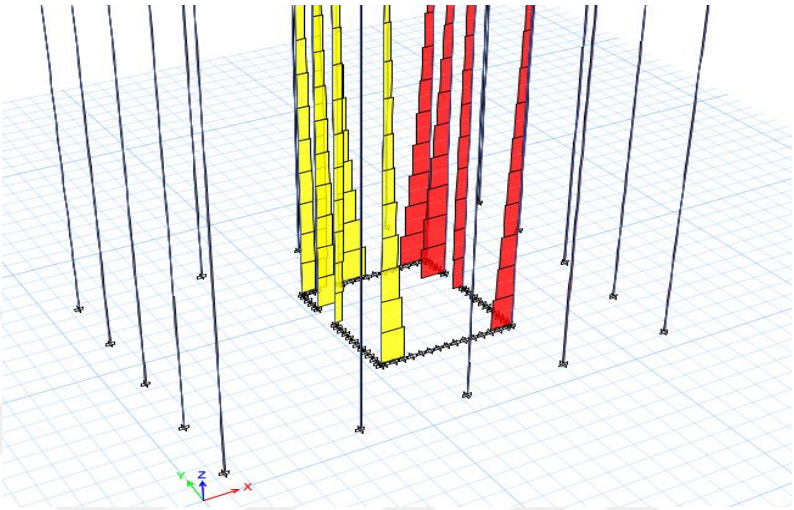
Şekil 5.15. X yönünde uygulanan deprem yükü altında eksenel kuvvet sonuçları

Şekil 5.16'da prizmatik yüksek yapının y doğrultusunda uygulanan deprem yükü altında eksenel kuvvet dağılımı gösterilmiştir. Merkezi çekirdek bölgesinde gözlemlenen maksimum eksenel kuvvet 1809 kN iken çevre kolonlarda maksimum eksenel kuvvet 190 kN'dur.



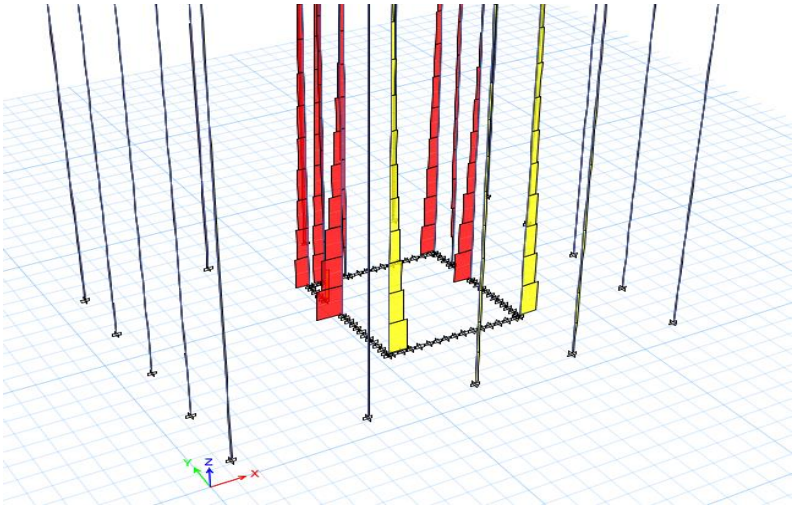
Şekil 5.16. Y yönünde uygulanan deprem yükü altında eksenel kuvvet sonuçları

Şekil 5.17'de prizmatik yüksek yapının x doğrultusunda uygulanan rüzgar yükü altında eksenel kuvvet dağılımı gösterilmiştir. Merkezi çekirdek bölgesinde gözlemlenen maksimum eksenel kuvvet 4108 kN iken çevre kolonlarda maksimum eksenel kuvvet 209 kN'dur.



Şekil 5.17. X yönünde uygulanan rüzgar yükü altında eksenel kuvvet sonuçları

Şekil 5.18'de prizmatik yüksek yapının y doğrultusunda uygulanan rüzgar yükü altında eksenel kuvvet dağılımı gösterilmiştir. Merkezi çekirdek bölgesinde gözlemlenen maksimum eksenel kuvvet 7424 kN iken çevre kolonlarda maksimum eksenel kuvvet 714 kN'dur.

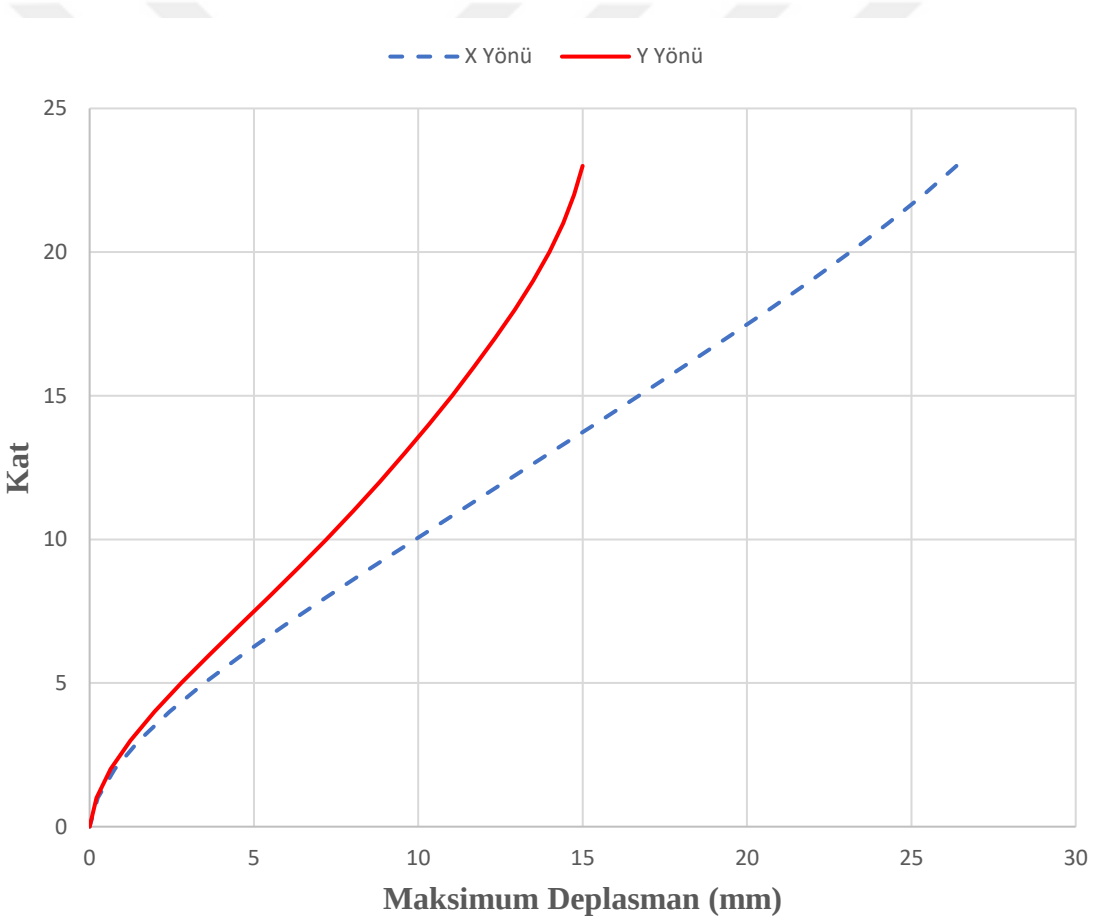


Şekil 5.18. Y yönünde uygulanan rüzgar yükü altında eksenel kuvvet sonuçları

5.2. Burgulu Yapıya Ait Analiz Sonuçları

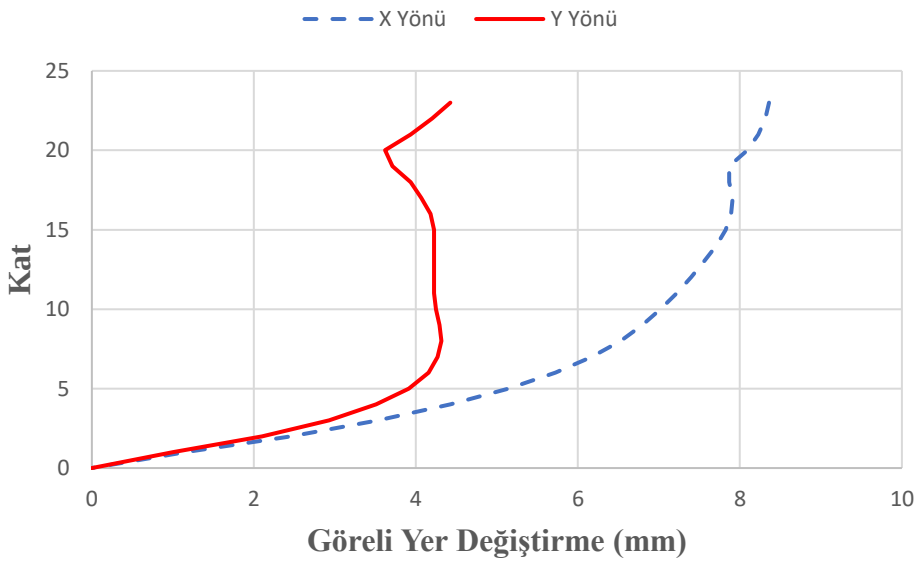
5.2.1. X yönünde uygulanan deprem kuvveti altında sonuçlar

Şekil 5.19'da x yönünde uygulanan dinamik deprem yükünün yapı kat yüksekliğince deplasman değerleri verilmiştir. Uygulanan deprem yüklemesi sebebiyle yapının x yönündeki maksimum deplasmanı 2.6 cm gelmektedir. Mod birleştirme yöntemine göre bu yönde uygulanan taban kesme kuvveti 4245 kN'dur.



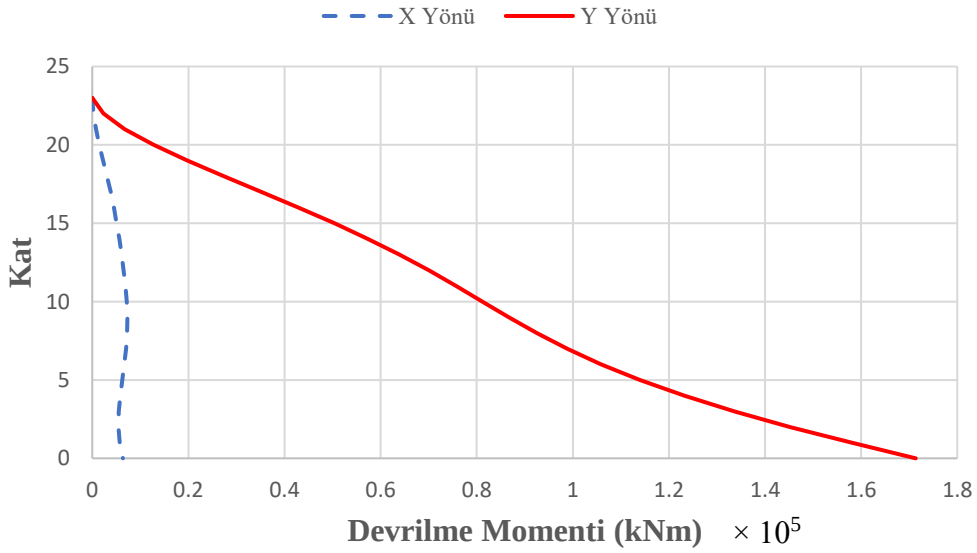
Şekil 5.19. X yönü deprem yüklemesi altında deplasman değerleri

X yönü uygulanan deprem yükü altında göreli yer değiştirme x doğrultusunda maksimum 8.36 mm olarak bulunmuştur (Şekil 5.20). ASCE 7-16 yönetmeliğine göre deprem kuvveti için maksimum göreli yer değiştirme değeri 81.28 mm'dir ($0.020*h_{sx}$).



Şekil 5.20. Göreli yer değiştirme grafiği

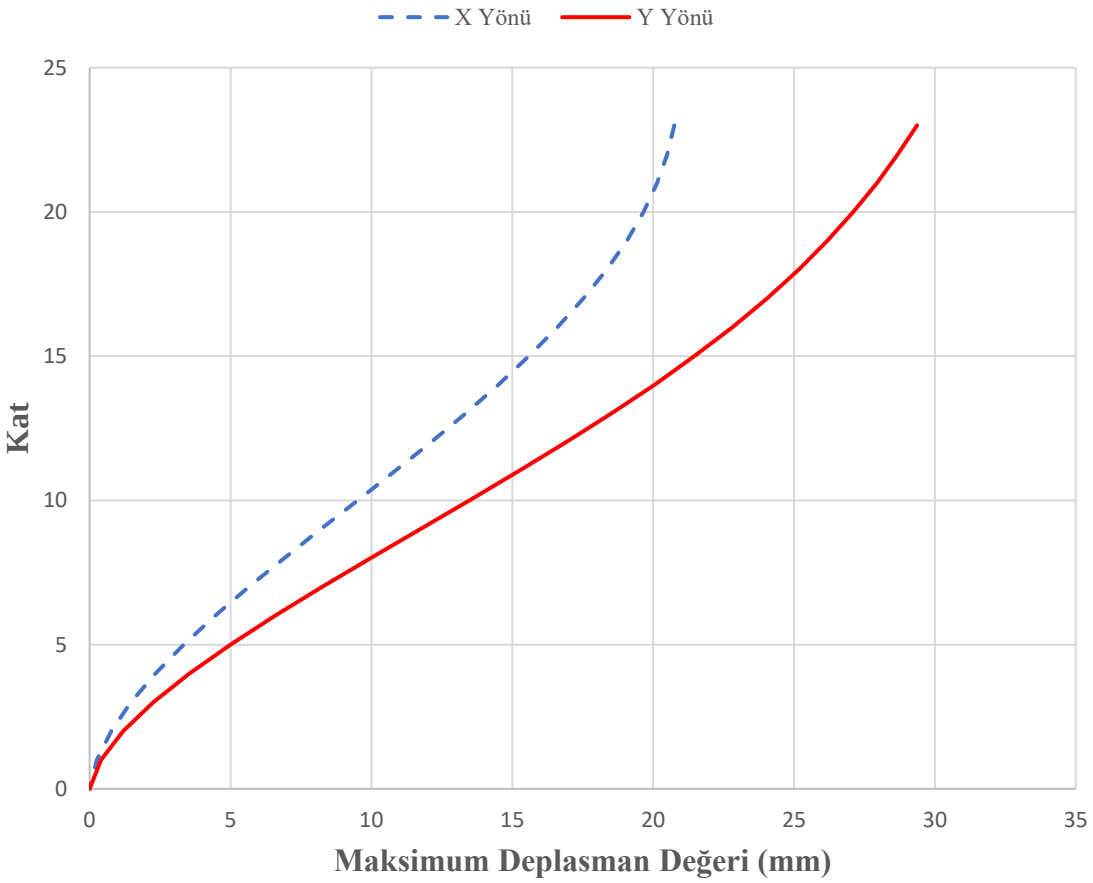
Deprem x yönünden yapıya uygulandığı için y ekseni etrafındaki moment kritik rol taşımaktadır. Şekil 5.21'de maksimum devrilme momenti y yönünde 171342 kNm olarak bulunmuştur.



Şekil 5.21. Devrilme momenti diyagramı

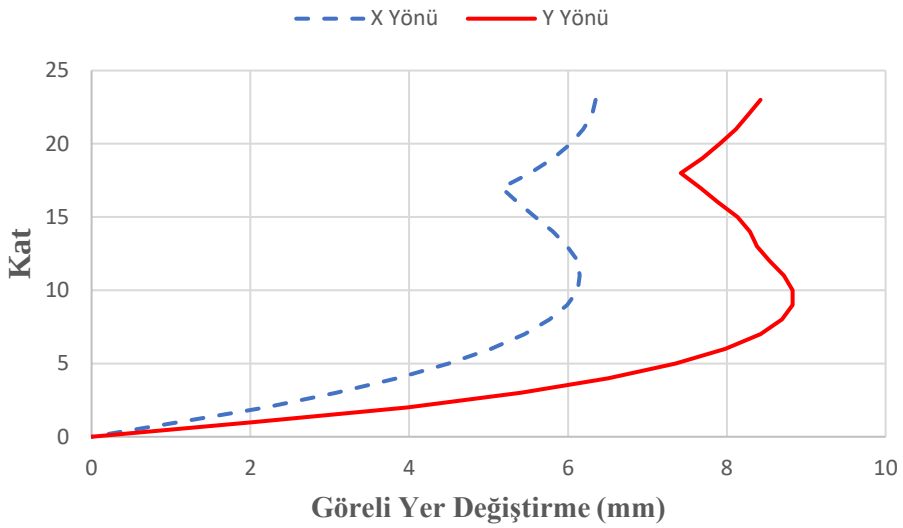
5.2.2. Y yönünde uygulanan deprem kuvveti altında sonuçlar

Şekil 5.22'de y yönünde uygulanan dinamik deprem yükünün yapı kat yüksekliğince deplasman değerleri verilmiştir. Uygulanan deprem yüklemesi sebebiyle yapının y yönündeki maksimum deplasmanı 2.9 cm gelmektedir. Mod birleştirme yöntemine göre bu yönde uygulanan taban kesme kuvveti 4245 kN'dur.



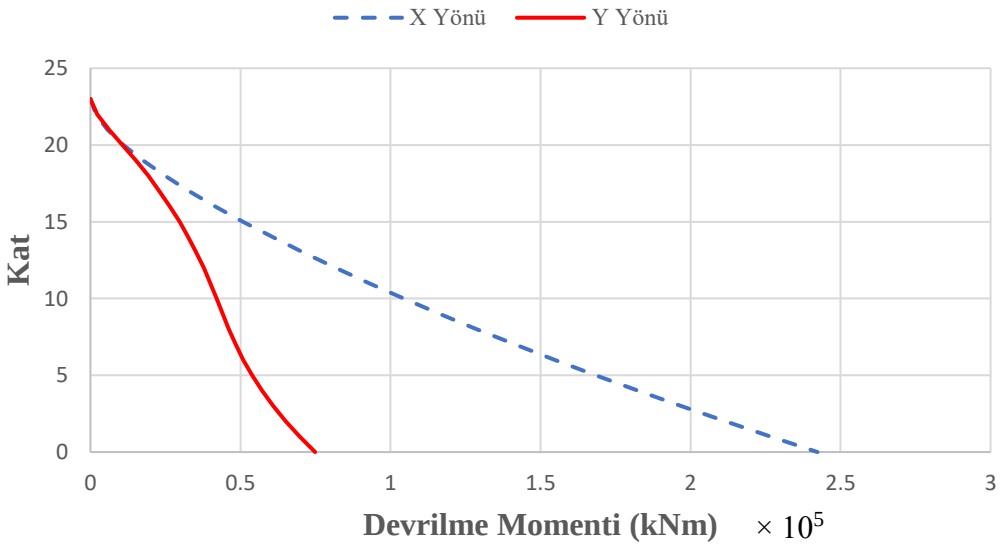
Şekil 5.22. Y yönü deprem yüklemesi altında deplasman değerleri

Y yönü uygulanan deprem yükü altında göreli yer değiştirme y doğrultusunda maksimum 8.8 mm olarak bulunmuştur (Şekil 5.23). ASCE 7-16 yönetmeliğine göre maksimum göreli yer değiştirme değeri 81.28 mm'dir ($0.020*h_{sx}$).



Şekil 5.23. Göreli yer değiştirme grafiği

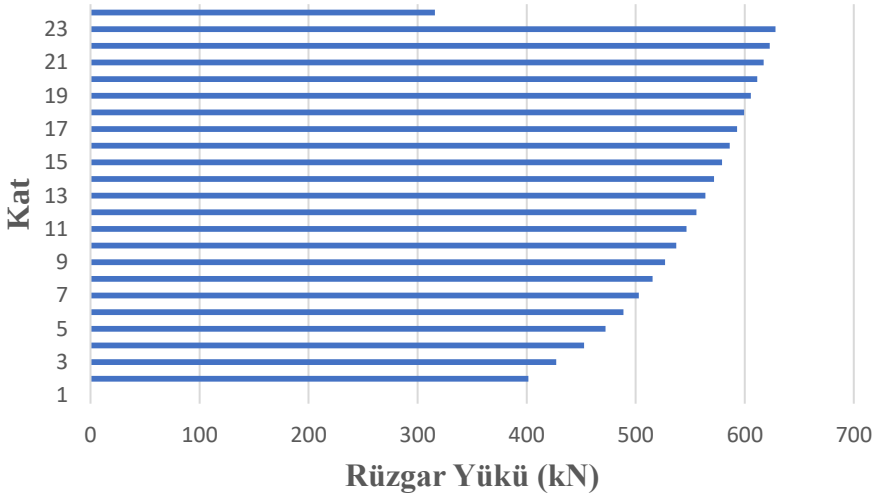
Deprem y yönünden yapıya uygulandığı için x ekseni etrafındaki moment kritik rol taşımaktadır. Şekil 5.24'de maksimum devrilme momenti y yönünde 242296 kNm olarak bulunmuştur.



Şekil 5.24. Devrilme momenti diyagramı

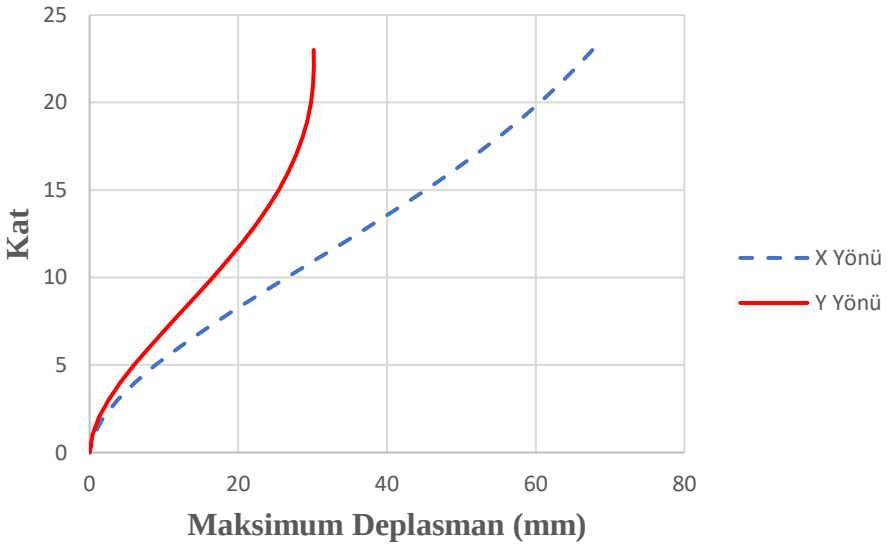
5.2.3. X yönünde uygulanan rüzgar kuvveti altında sonuçlar

Prizmatik yapıda elde edilen rüzgar kuvvetleri burgulu yapıda %15 azaltılarak uygulanmış ve x yönünde rüzgar yüklerinin katlara göre dağılımı gösterilmiştir (Şekil 5.25).



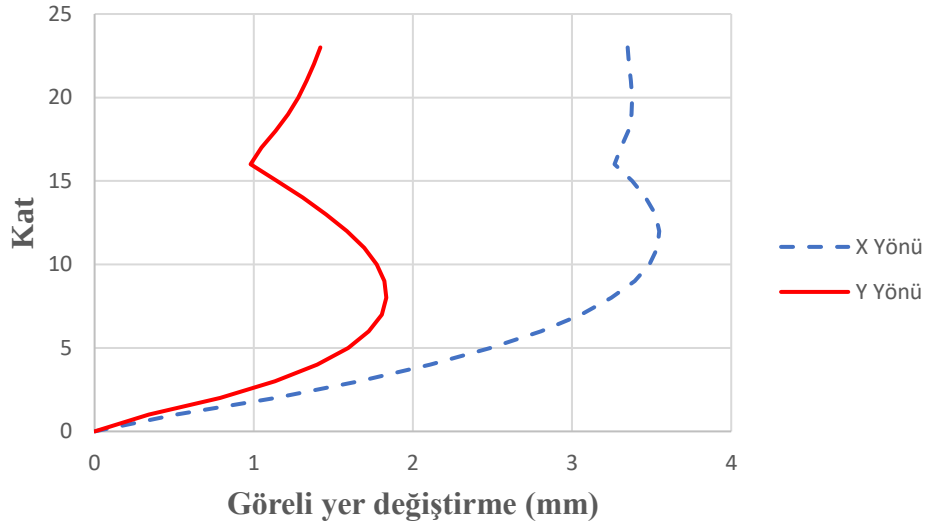
Şekil 5.25. X yönü uygulanan rüzgar yüklemesi

Şekil 5.26'da x yönünde uygulanan rüzgar yükünün yapı kat yüksekliğince deplasman değerleri verilmiştir. Uygulanan rüzgar yüklemesi sebebiyle yapının x yönündeki maksimum deplasmanı 6.8 cm gelmektedir. Bu yönde uygulanan rüzgar yükü altında taban kesme kuvveti 12323 kN bulunmuştur.



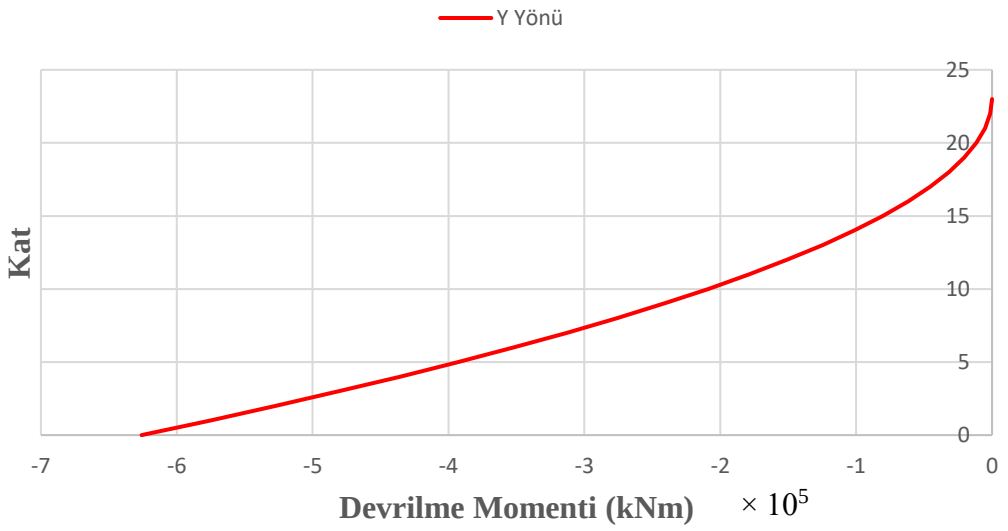
Şekil 5.26. X yönü rüzgar yüklemesi altında deplasman değerleri

X yönünde uygulanan rüzgar yükü altında göreli yer değiştirme x doğrultusunda maksimum 3.55 mm olarak bulunmuştur (Şekil 5.27). Kat yüksekliğinin 500'e oranına göre maksimum göreli yer değiştirme değeri 8.128 mm'dir.



Şekil 5.27. Göreli yer değiştirme grafiği

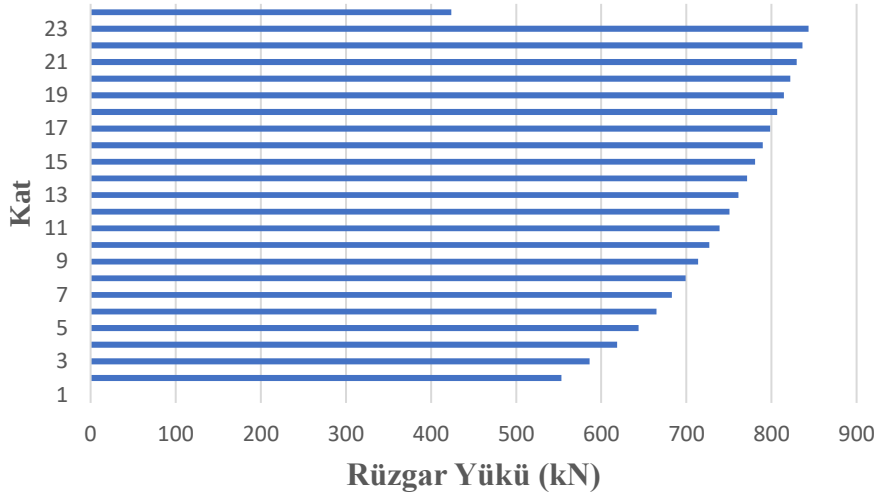
Rüzgar x yönünden yapıya uygulandığı için y ekseni etrafındaki moment kritik rol taşımaktadır. Şekil 5.28'de maksimum devrilme momenti y yönünde 625928 kNm olarak bulunmuştur.



Şekil 5.28. Devrilme momenti diyagramı

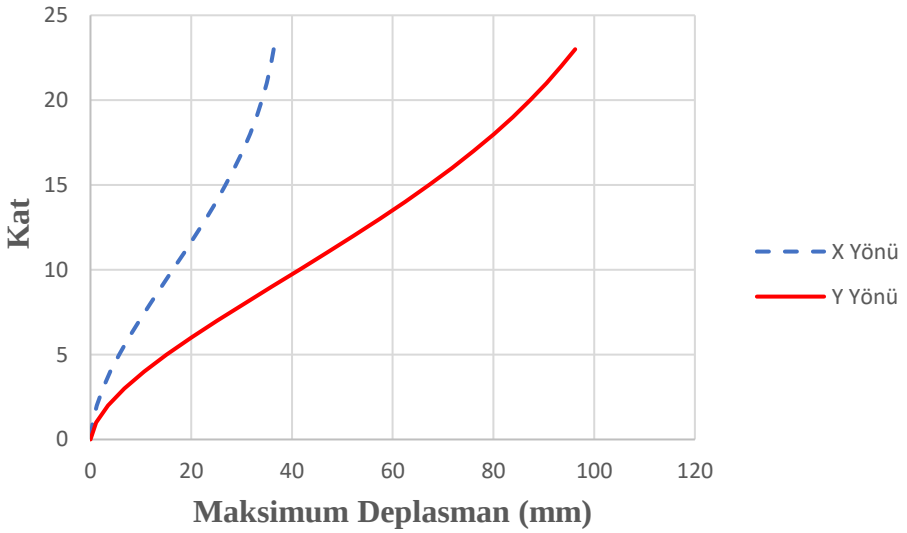
5.2.4. Y yönünde uygulanan rüzgar kuvveti altında sonuçlar

Prizmatik yapıda elde edilen rüzgar kuvvetleri %15 azaltılarak uygulanmış ve y yönünde rüzgar yüklerinin katlara göre dağılımı gösterilmiştir (Şekil 5.29).



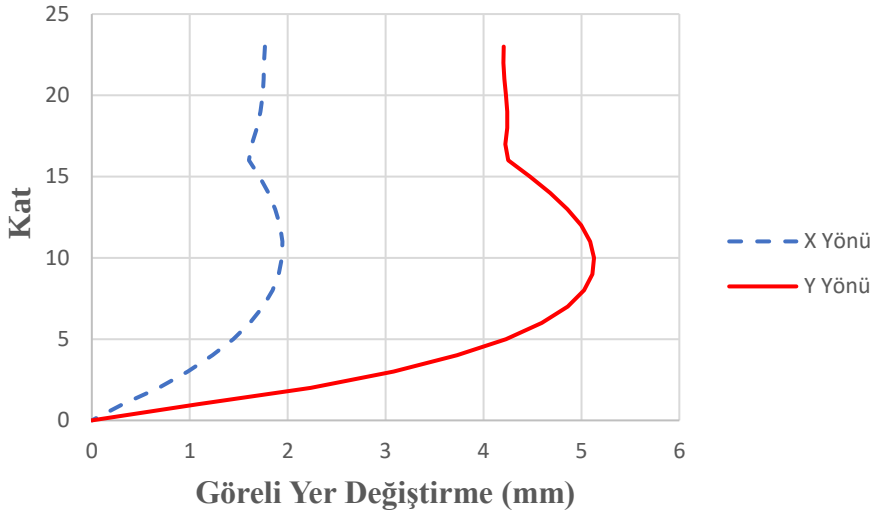
Şekil 5.29. Y yönü uygulanan rüzgar yüklemesi

Şekil 5.30'da y yönünde uygulanan rüzgar yükünün yapı kat yüksekliğince deplasman değerleri verilmiştir. Uygulanan rüzgar yüklemesi sebebiyle yapının y yönündeki maksimum deplasmanı 9.6 cm gelmektedir. Bu yönde uygulanan rüzgar yükü altında taban kesme kuvveti 16658 kN bulunmuştur.



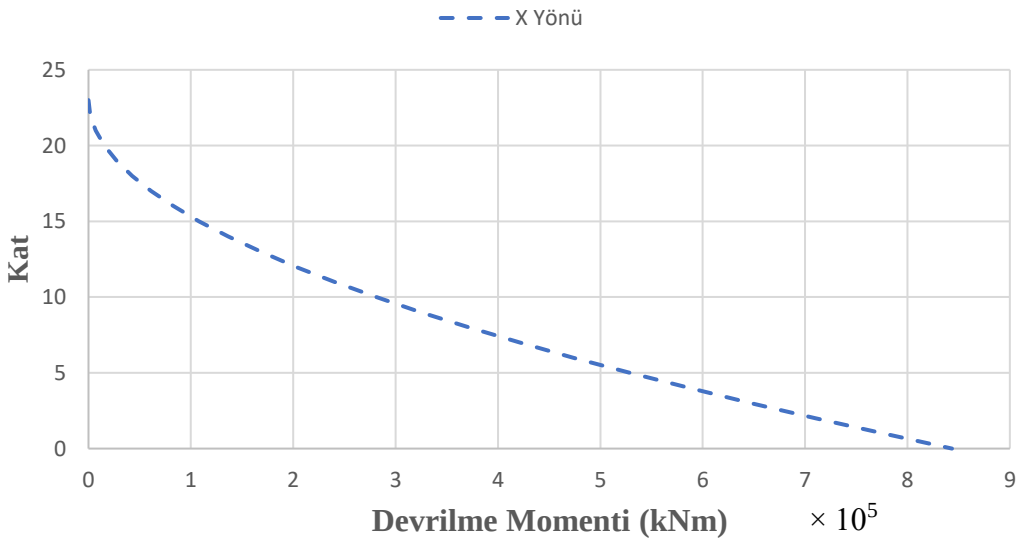
Şekil 5.30. Y yönü rüzgar yüklemesi altında deplasman değerleri

Y yönünde uygulanan rüzgar yükü altında göreli yer değiştirme y doğrultusunda maksimum 5.129 mm olarak bulunmuştur (Şekil 5.31). Kat yüksekliğinin 500'e oranına göre maksimum göreli yer değiştirme değeri 8.128 mm'dir.



Şekil 5.31. Göreli yer değiştirme grafiği

Rüzgar y yönünden yapıya uygulandığı için y ekseni etrafındaki moment kritik rol taşımaktadır. Şekil 5.32'de maksimum devrilme momenti y yönünde 843476 kNm olarak bulunmuştur.



Şekil 5.32. Devrilme momenti diyagramı

5.2.5. Modal analiz sonuçları

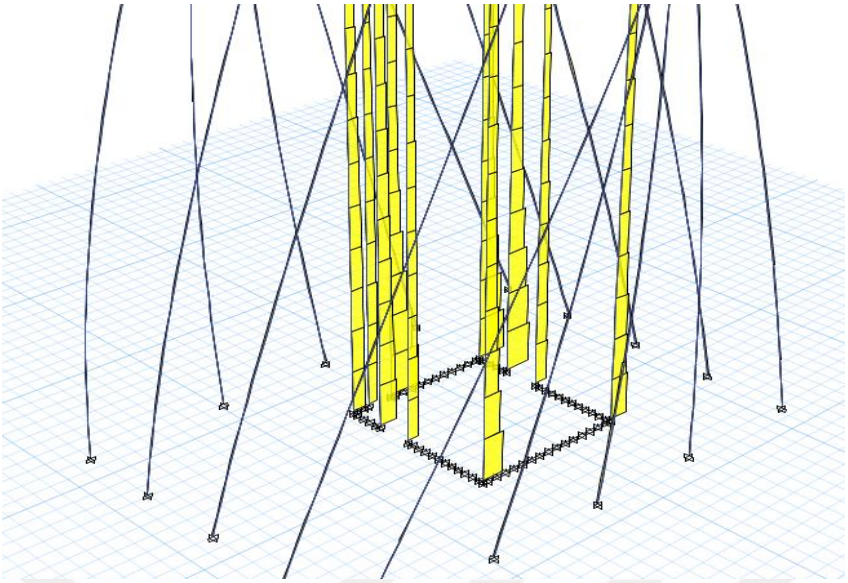
Burgulu yapının analitik aşamasında 17 mod göz önünde bulundurulmuştur. Modellemede ASCE 7-16 yönetmeliğinde belirtilen %90 mod katılım kütle oranı sağlanmıştır. Analiz sonucunda oluşturulan mod katılım kütle oranının tablosu çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Burgulu yapı modal analiz sonuçları

Mod	Periyot (s)	UX	UY	SumUX	SumUY
1	3.735	0.5862	0.0026	0.5862	0.0026
2	2,134	0.0006	0.4963	0.5868	0.499
3	1.631	0.0017	0.1495	0.5885	0.6485
4	0.823	0.2029	0.0071	0.7914	0.6556
5	0.528	0.0058	0.0702	0.7972	0.7257
6	0.416	0.0098	0.033	0.807	0.7587
7	0.374	0.0761	0.003	0.8831	0.7617
8	0.248	0.0002	0.0591	0.8832	0.8208
9	0.221	0.0349	0.0136	0.9182	0.8344
10	0.194	0.004	0.0098	0.9221	0.8442
11	0.161	0.0062	0.0129	0.9283	0.8571
12	0.141	0.0177	0.0078	0.946	0.8649
13	0.128	0.0007	0.0051	0.9467	0.87
14	0.117	0.005	0.0152	0.9517	0.8852
15	0.1	0.0081	0.0047	0.9598	0.8899
16	0.093	0.0033	0.0001	0.9631	0.89
17	0.087	0.0018	0.01	0.9649	0.9

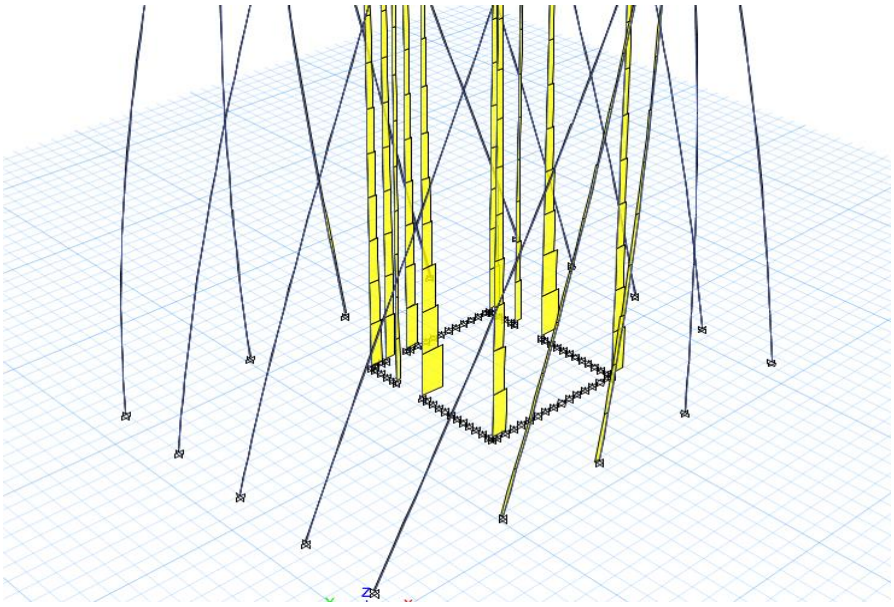
5.2.6. Yüklemeler altında oluşan kesit tesirleri

Şekil 5.33'de burgulu yüksek yapının x doğrultusunda uygulanan deprem yükü altında eksenel kuvvet dağılımı gösterilmiş olup yanal yüklere karşı gelmede merkezi çekirdek bölgesinin çevre kolonlara göre daha aktif bir rol oynadığı görülmektedir. Beklenildiği üzere maksimum eksenel kuvvetler en alt seviyedeki kolonlarda oluşmuştur. Merkezi çekirdek bölgesinde oluşan maksimum eksenel kuvvet 1228 kN iken çevre kolonlarda gözlemlenen maksimum eksenel kuvvet 99 kN'dur.



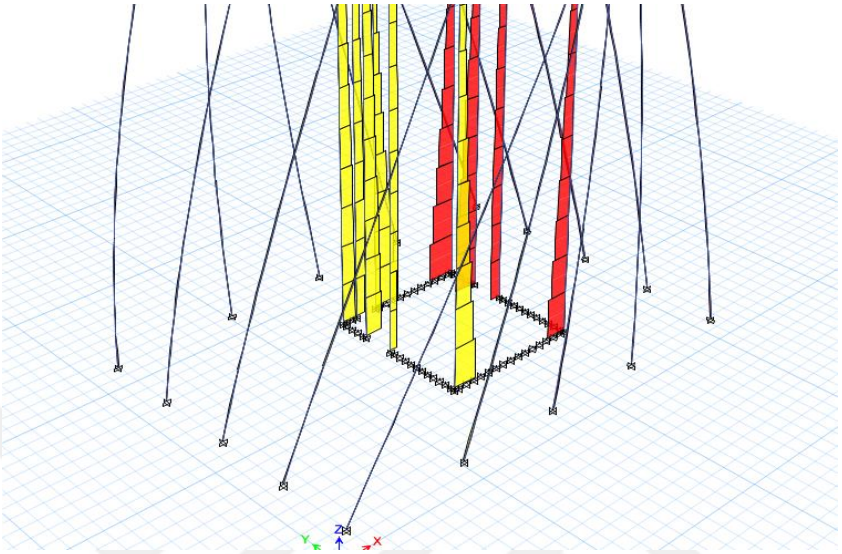
Şekil 5.33. X yönünde uygulanan deprem yükü altında eksenel kuvvet sonuçları

Şekil 5.34'de burgulu yüksek yapının y doğrultusunda uygulanan deprem yükü altında eksenel kuvvet dağılımı gösterilmiştir. Merkezi çekirdek bölgesinde gözlemlenen maksimum eksenel kuvvet 1808 kN iken çevre kolonlarda maksimum eksenel kuvvet 493 kN'dur.



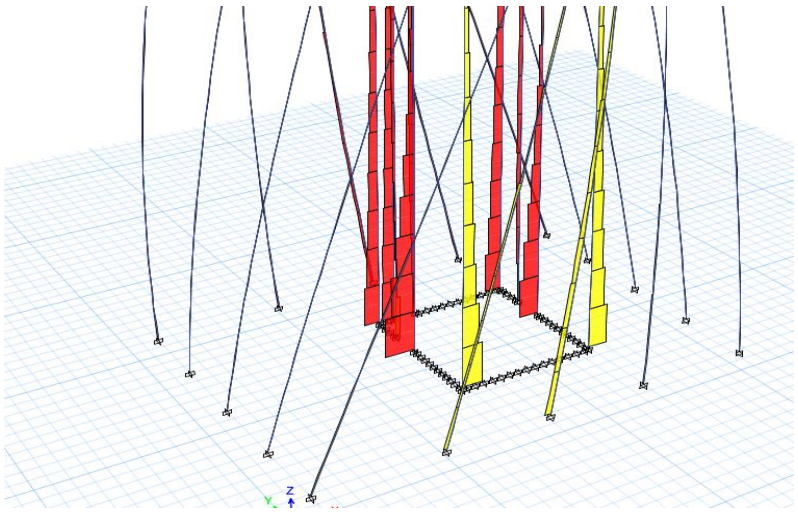
Şekil 5.34. Y yönünde uygulanan deprem yükü altında eksenel kuvvet sonuçları

Şekil 5.35’de burgulu yüksek yapının x doğrultusunda uygulanan rüzgar yükü altında eksenel kuvvet dağılımı gösterilmiştir. Merkezi çekirdek bölgesinde gözlemlenen maksimum eksenel kuvvet 3454 kN iken çevre kolonlarda maksimum eksenel kuvvet 273 kN’dur.



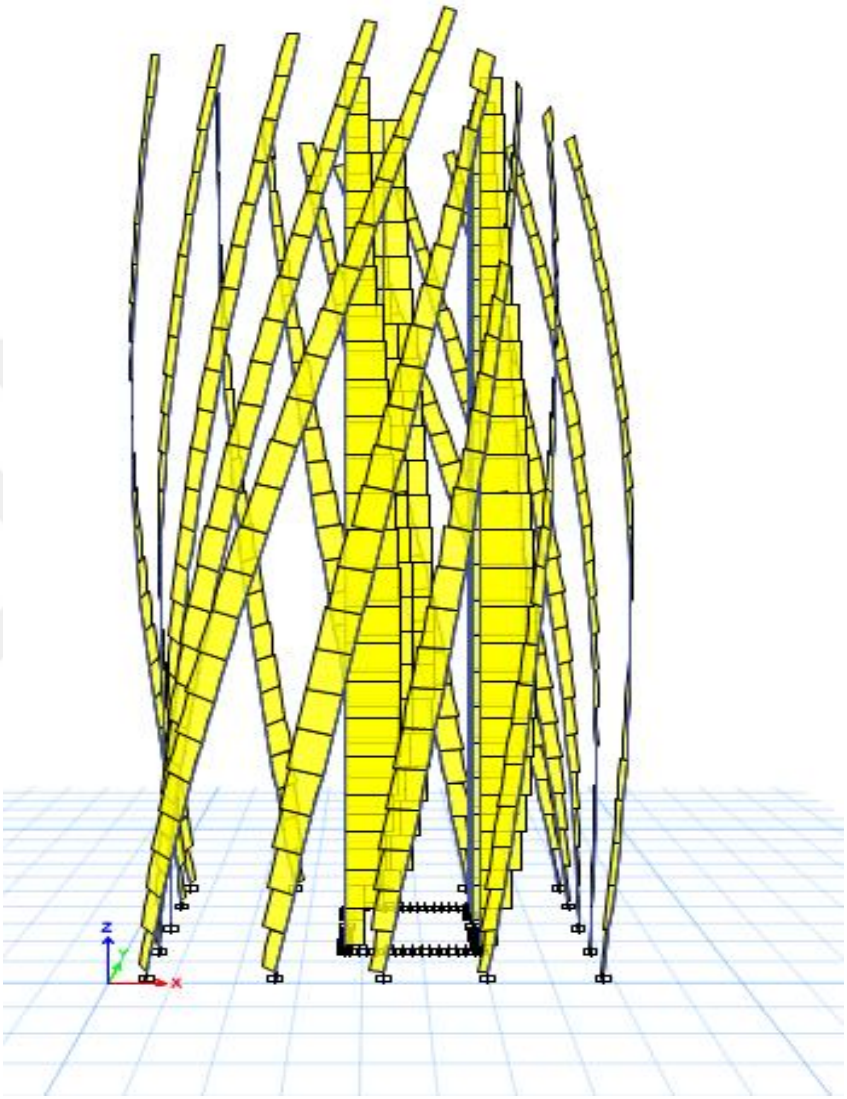
Şekil 5.35. X yönünde uygulanan rüzgar yükü altında eksenel kuvvet sonuçları

Şekil 5.36’da burgulu yüksek yapının y doğrultusunda uygulanan rüzgar yükü altında eksenel kuvvet dağılımı gösterilmiştir. Merkezi çekirdek bölgesinde gözlemlenen maksimum eksenel kuvvet 6264 kN iken çevre kolonlarda maksimum eksenel kuvvet 1336 kN’dur.



Şekil 5.36. Y yönünde uygulanan rüzgar yükü altında eksenel kuvvet sonuçları

Şekil 5.37’de modellenen burgulu yüksek yapıda, kendi yükü altında merkezi çekirdek bölgesinde ve çevre kolonlarda oluşan burulma diyagramı gösterilmiştir. Prizmatik yüksek yapıda kolonlarda burulma değerleri görülmemiştir.



Şekil 5.37. Burgulu yüksek yapının kendi yükü altında burulma diyagramı

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde yapılan tez çalışmasının kısa bir özeti verilmiştir. Gelecek araştırmalar için önerilerde bulunulmuştur.

6.1. Çalışmanın Özeti

Günümüzde popüler bir yapısal ve mimari form olan burgulu yapıların tanımı yapılarak mevcut var olan burgulu yapı örnekleri verilmiştir. Bu kapsamda, inşa edilmiş burgulu yüksek yapıların taşıyıcı sisteminde kullanılan eleman ve malzeme özellikleri çalışmada incelenmiştir.

Çalışmada, referans olarak Amerika Birleşik Devletleri'nin ilk burgulu yapısı olarak kabul edilen Grove at Grand Bay gökdelenlerinden Güney kısmında bulunan binası seçilmiştir. Bu binanın mimarisine ulaşıldığı için bu yapı tercih edilmiştir. Çalışmanın ana amacı ise, burgulu yüksek yapıların yanal yükler altındaki davranışının tespit edilerek prizmatik forma sahip bir yapıyla karşılaştırılmasının yapılmasıdır. Yapının inşasında kullanılan kompozit perde türü, yapının kat alanında daha fazla alan olmasına ve betonarme perde duvara nazaran perdenin daha ince kalınlıkta yapılmasına olanak sağlamıştır. Kompozit perde duvarların çeşitlerinden söz edilmiş ve özellikle yapının inşasında kullanılan çelik plakalı betonarme perde türünün literatürdeki yerinden söz edilmiştir. Yapılan tez çalışmasında kompozit perde türünün ETABS (V.18.1.1) programında modellemesi yapılmıştır. Rüzgar yükü rijit diyaframlara uygulanmıştır ve deprem yükü dinamik mod birleştirme yöntemiyle yapılmıştır. Tez kapsamında, burgulu yüksek yapının rüzgar tanımlamalarında modellenen eşdeğer prizmatik yapıda elde edilen rüzgar yükleri x ve y doğrultusunda %15 oranında azaltılarak uygulanmıştır. Mevcut yapı, 15. kata kadar burgu formunu almaktadır. Yapılan modellemede burgu hali tüm yapı yüksekliğince verilmiştir. Bunun sebebi, tam bir burgulu formda dönecek olan bir yapının davranışlarını incelemektir. Model analizleri sonunda taban kesme kuvveti, maksimum deplasman, göreli yer değiştirme ve devrilme moment sonuçları değerlendirilmiştir.

6.2. Sonuçlar

Bu bölümde modellemesi yapılan prizmatik ve burgulu yüksek yapıların yanal yükler altında davranışının incelenmesi amacıyla ASCE 7-16 yönetmeliğine göre analizi yapılmış ve sonuçlar hakkında değerlendirmede bulunulmuştur. Yapılan tez çalışmasının bulguları aşağıda sıralanmıştır:

- Rüzgar yükü altında prizmatik ve burgulu yapıda maksimum tepe deplasmanı ve devrilme momenti deprem yüküne göre daha fazla çıkmıştır. Mevcut yapının bulunduğu konum itibariyle S_s ve S_1 değerlerinin düşük olması sebebiyle deprem yükleri altında yapıların deplasman değerlerinin rüzgar yüklerine göre az deplasman seviyeleri görülmüştür.
- Modellemesi yapılmış olan yapılar, literatürde kabul edilen H/500 maksimum tepe deplasmanı kriterini sağlamaktadır. Modellenen yapılar için maksimum tepe deplasman değeri 18.7 cm'dir. Analizler sonrasında prizmatik yapıda maksimum tepe deplasman değeri 11.1 cm, burgulu yapıda 9.6 cm olarak bulunmuştur. Göreli yer değiştirme değerleri ASCE 7-16 koşullarını sağlamaktadır.
- Modellenen yüksek yapılarda rüzgar yükünün deprem yüküne göre daha kritik olduğu sonucuna varılmıştır.
- Burgulu yapıda, prizmatik forma sahip olan yapıya göre rijitliği daha azdır. Burgulu yapıda deprem yükü altında deplasman değerleri prizmatik yapıya göre daha fazla bulunurken, rüzgar yükü altında daha az bulunmuştur.
- Burgulu yapı düzensiz bir formda olduğu için 17 adet mod analizde göz önüne alındığında mod katılım oranı % 90 değerini aşmaktadır. Prizmatik yapıda 11 adet mod ile % 90 değeri geçilmiştir.
- Burgulu yapının deprem yükleri altında prizmatik yapıya göre tepe deplasman değerleri artmış ve yanal rijitliği azalmıştır. Prizmatik yapıda deprem kuvvetleri altında taban kesme kuvveti 4263 kN, burgulu yapıda 4245 kN olarak bulunmuştur. Prizmatik yapıda x yönünde uygulanan deprem altında 2 cm deplasman görülürken, burgulu yapıda 2.6 cm deplasman görülmüştür. Y yönünde uygulanan deprem yükü altında prizmatik yapıda 2.8 cm deplasman görülürken, burgulu yapıda 2.9 cm deplasman görülmüştür.

- Uluslararası yönetmelikler, prizmatik yapıya sahip olmayan yapılar için rüzgar yükü hesaplamalarında yetersiz kalmaktadır.
- Literatürde yapılan çalışmalarda, burgulu yüksek yapıların rüzgar yüklerini azaltmada etkin rol oynadığı görülmüştür. Tez kapsamında, rüzgar yüklerinin prizmatik yapıda hesap edilen rüzgar yüklerinin %15 azaltılarak uygulanması rüzgar yükleri altında hem deplasman da hem de taban kesme kuvvetlerinde azalmalara olanak sağlamıştır.
- Burgulu yapıda 16-23. kat arasında prizmatik yapıya göre bu katlarda göreli yer değiştirmelerinde artışlar gözlemlenmiştir. Bu katlarda görülen göreli yer değiştirme artışı, mevcut yapının bu katlarda rotasyon yaptırılmama sebebi olarak gösterilebilir.
- Burgulu yapıda x yönünde uygulanan rüzgar yükü altında 6.8 cm deplasman görülürken, prizmatik yapıda x yönünde uygulanan rüzgar yükü altında 6.9 cm deplasman görülmüştür.
- Periyot değerlerinde modellerde kütle ve taşıyıcı sistemin değişmemesi sebebiyle fazla bir değişiklik görülmemiştir.
- Burgulu yüksek yapının kolonları eğimli ve burgu halinde olması sebebiyle yapının kendi yükü altında prizmatik yüksek yapıya göre kolonlarda burulma artışı gözlemlenmiştir.
- Burgulu yüksek yapıda deprem yükü altında x yönünde maksimum 8.36 mm göreli yer değiştirme görülürken, prizmatik yüksek yapıda maksimum 6.3 mm göreli yer değiştirme görülmüştür.
- Merkezi çekirdek bölgesi yanal yükler altında çevre kolonlara göre daha etkin rol oynamaktadır.

6.3. Öneriler

Gelecek araştırmalarda mevcutta inşa edilmiş farklı ülkelerdeki burgulu yüksek yapıların analiz çalışması yapılabilir.

Tez çalışmasında deprem analizinde kullanılan dinamik mod birleştirme yöntemi yerine zaman tanım alanında dinamik analiz yapılarak burgulu forma sahip yüksek yapıların davranışı incelenebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Abdelrazaq, A., Travush, V., Shakhvorostov, A., Timofeevich, A., Desyatkin, M., Jung, H., 2020, The structural engineering design and construction of the tallest building in Europe Lakhta Center, St. Petensburg, Russia, International Journal of High-Rise Buildings, 9(3), 283-300.

ACI 318-14, 2014, Building code requirements for structural concrete, American Concrete Institute.

Alaghmandan, M., Bahrami, P., Elnimeiri, M., 2014, The future trend of architectural form and structural system in high-rise buildings, Architecture Research, 4(3), 55-62.

Anonim, 2022, Evolution Tower,https://www.emporis.com/buildings/265320/evolution-tower-moscow-russia, erişim tarihi: 23.11.2021.

Anonim, 2022, Steel beam according to EN-10025/S355J2, https://www.stad.fr/en/steel-beams-columns-stock-profile-w-310-x-310-x-283.html, erişim tarihi: 10.11.2021.

Anonim, 2021, Postmodernizm, https://tr.wikipedia.org/wiki/Postmodernizm, erişim tarihi: 24.10.2021.

Anonim, 2022, List of twisted buildings, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_twisted_buildings, erişim tarihi: 24.10.2021.

Anonim, 2019, Turning Torso, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Turning_Torso2.jpg, erişim tarihi: 24.10.2021.

Anonim, 2021, Cayan Tower, https://en.wikipedia.org/wiki/Cayan_Tower, erişim tarihi: 23.11.2021

Anonim, 2009, Al Bidda Tower, https://mapio.net/pic/p-120322324/, erişim tarihi: 23.11.2021.

Anonim, 2022, Shanghai Tower, https://structurae.net/en/structures/shanghai-tower, erişim tarihi: 23.11.2021.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Anonim, 2022, Regent Emirates Pearl, https://www.skyscrapercenter.com/building/regent-emirates-pearl/1001, erişim tarihi: 24.11.2021.

Anonim, 2018, Mode Gakuen Spiral Towers, https://en.wikipedia.org/wiki/Mode_Gakuen_Spiral_Towers, erişim tarihi: 27.11.2021

Anonim, 2015, Equivalent lateral forces, https://resources.scia.net/en/articles/analysis/15_2_equivalent_lateral_forces.htm, erişim tarihi: 12.11.2021.

Anonim, 2022, CTBUH Height Criteria for measuring & defining tall buildings, https://cloud.ctbuh.org/CTBUH_HeightCriteria.pdf, erişim tarihi: 23.11.2021.

Anonim, 2022, Grove At Grand Bay, https://luxlifemiamiblog.com/condos/grove-at-grand-bay/#!for-sale, erişim tarihi:11.11.2021.

Anonim, 2022, ASCE 7 Hazard Tool, https://asce7hazardtool.online/, erişim tarihi: 29.11.2021.

Anonim, 2022, U.S. Seismic Design Maps, http://seismicmaps.org/, erişim tarihi: 29.11.2021.

Anonim, 2022, American W Shapes, http://www.steelsolutionscompany.com/steel-sections-sale/american-w-shapes/, erişim tarihi: 26.01.2022.

ASCE/SEI 7-16, 2017, Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers.

Astaneh-Asl, A., 2002, Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls, Structural Steel Educational Council Technical Information& Product Service.

Ay, B.Ö., Sezer-Uzol, N., Bilgen, S., Orbay, E., 2018, Burgulu yüksek binaların taşıyıcı sistem ve aerodinamik özelliklerinin incelenmesi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Bilimsel araştırma projeleri koordinasyon ofisi.

Baldwin, E., 2020, Europe’s Tallest Tower Wins Emporis skyscraper of the Year, https://www.archdaily.com/951220/europes-tallest-tower-wins-emporis-skyscraper-of-the-year, erişim tarihi: 23.11.2021.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Bandi, E.K., Tanaka, H., Kim, Y.C., Ohtake, K., Yoshida, A., Tamura, Y., 2013, Peak pressures acting on tall buildings with various configurations, International Journal of High-Rise Buildings, 2(3), 229-244.

Belostotsky, A.M., Akimov, P.A., Kaytukov, T.B., Petryashev, N.O., Petryashev, S.O., Negrozov, O.A, 2016, Strength and stability analysis of load-bearing structures of Evolution Tower with allowance for actual positions of reinforced concrete structural members, Procedia Engineering, 153, 95-102.

Bilgen, S., 2019, Investigation of aerodynamic and structural features of twisting tall buildings, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 108 s.

Bourahla, N., 2015, Equivalent static analysis of structures subjected to seismic actions, Encyclopedia of earthquake engineering, Springer.

CTBUH, 2016, Tall buildings in numbers: Twisted tall buildings, CTBUH, 3, 46-47.

DeSimone V., Ramirez L., 2015, Mohammad, A., Structural challenges of twisting towers, CTBUH 2015 New York Conference, 478-484.

Dey, S., Bhowmick, A.K., 2016, Seismic performance of composite plate shear walls, Structures, 6, 59-72.

Elnimeiri, M., Almusharaf, A., 2010, Structure and architectural form of tall buildings, International Conference on Sustainable Building Asia, 54-61.

Ellingwood, B., Allen, D.E, Elnimeiri, M., Galambos, T.V., Iyengar, H., Robertson, L.E., Stockbridge, J., Turkstra C.J., 1986, Structural serviciability: A critical appraisal and research needs, Journal of Structural Engineering, 112(12), 2646-2664.

ETABS, V.18.1.1., 2020, Integrated analysis and design of building systems, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA.

Giuliani , M.E., 2018, Structures of the Generali Tower in Milano-A concrete challenge, Proceedings of Italian Concrete Days 2018, 42, 219-231.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Godinez, S.E., Richards, T.L., Restrepo, J.I., 2021, Stiffness modifiers for diagonally reinforced coupling beams, ACI Structural Journal, 118(6), 215-224.

Golasz-Szolomicka, H., Szolomicki, J., 2019, Architectural and structural analysis of selected twisted tall buildings, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 471.

Gunawardena, T., Fernando, S., Mendis, P., Waduge, B., Hettiarachchi, D., 2017, Wind analysis and desing of tall buildings, the state of the art, 8th International Conference on Structural Engineering and Construction Management.

Günel, M.H., Ilgın, H.E., 2014, Tall Buildings: Structural system and Aerodynamic Form, London, Routledge.

Hjortshoj, R., 2016, Grove At Grand Bay, https://archello.com/story/72945/attachments/photos-videos/2, erişim tarihi: 28.11.2021.

Hu, H.S., Nie, J.G., Fan, J.S., Tao, M.X., Wang, Y.H., Li, S.Y., 2016, Seismic behaviour of CFST-enhanced steel plate-reinforced concrete shear walls, Journal of constructional steel research, 119, 176-189.

Hverven, E., 2017, Conceptual structural design of high-rise buildings wind alterations, Yüksek Lisans Tezi, Norwegian University of Science and Technology, 182 pp.

Jackson, C., 2020, Five types of structural systems in high rise buildings, https://constructionexec.com/article/five-types-of-structural-systems-in-high-rise-buildings, erişim tarihi:28.11.2021.

Jithin, S., Chaithra, S., 2018, Analytical study on the effect of steel bracing in RC helical building, International Journal of Advance Engineering and Research Development, 5(5), 519-525.

Kim, J., Hong, S., 2011, Progressive collapse performance of irregular buildings, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 20:721-734.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kim, W., Yoshida, A., Tamura, Y., Yi, J.H., 2018, Experimental study of aerodynamic damping of a twisted supertall building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 176, 1-12.

Kurç, Ö., Kayışoğlu, B., Shojaee, S.M.N., Uzol, O., 2012, Yüksek binalarda rüzgar etkilerinin rüzgar tüneli deneyleriyle tespiti, IMO Teknik Dergi, 6163-6186.

Kwon, K., Kim, J., 2014, Progressive collapse and seismic performance of twisted diagrid buildings, International Journal of High-Rise Buildings, 3(3), 223-230.

Lee, D.H., Kim, H.S., Kang, J.W., 2021, Dynamic response analysis of twisted high-rise structures by plane rotation angle, Journal of Korean Association for Spatial Structures, 21(1), 105-112.

Lee, D.H., Kim, E.S., Kang, D.E., Kim, T., 2012, Seismic performance evaluation of twisted outtriger system, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, 13, 10340-10347.

Li, Y.G., Yan, J.H., Li, Y., Xiao, C.X., Ma, J.X., 2021, Wind tunnel study of wind effects on 90° helical and square tall buildings: A comparative study, Journal of Building Engineering, 42.

Mavruk, M., 2005, Boşluklu perdeli yapıların yeni deprem yönetmeliği'ne (TDY 98) göre incelenmesi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 139 pp.

Moon, K.S., 2012, Studies on various structural system design options for twisted tall buildings and their performances, The Structural Design of Tall and Special Buildings.

Moon, K.S., 2015, Structural design and construction of complex-shaped tall buildings, International Journal of Engineering and Technology, 7(1), 30-35.

Napier, J., 2014, Response-spectrum analysis, https://wiki.csiamerica.com/display/kb/Response-spectrum+analysis, erişim tarihi: 22.10.2021.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Navya, K.S., Vishal, B.V., Kavitha, S., Mamatha, P.G., 2021, Seismic behaviour of twisted tall building with different angle of rotation, Advances in Mechanical Engineering, Springer Nature, 65-75.

Nikandrov, P., 2016, Upward Spiral: The story of the evolution tower, CTBUH Journal, 3, 12-19.

Osman, A., 2013, The twisting regent emirates pearl hotel, https://www.structuremag.org/?p=172, erişim tarihi:23.11.2021

Özgen, A., Sev, A., 2000, Çok katlı yüksek yapılarda taşıyıcı sistemler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Paltun, S., Gültekin, A.B., Çelebi, G., 2015, Binaların Aerodinamik Biçimsel Yapısının İrdelenmesi: Bina Formu ve Rüzgar İlişkisi", 2nd International Sustanaible Buildings Symposium, 432-439.

Restrepo, J.I., Rodriguez, M.E., 2021, Stiffness modifiers to support the seismic design of reinforced concrete rectangular columns, Journal of structural engineering, 147(10).

Rong, Y., Thompson, E.M., 2012, "A Site Response Map of the Continental U.S.", 15 WCEE, Lizbon.

Saemundsson, A.F., 2007, Wind effects on high-rise buildings, Yüksek Lisans Tezi, Lund Universitesi, İsveç, 64 pp.

Scott, D., Farnsworh, D., Jackson, M., Clark, M., 2007, The effects of complex geometry on tall towers, The Structural Desing of Tall and Special Buildings, 16(4), 441-455.

Sev, A., Başarır, B., 2011, A recent trend in tall building design: twisted forms, E-journal of New World Sciences Academy, 6(4), 1603-1619.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Shabab, K., Irtaza, H., Agarwal, A., 2020, Comparison of aerodynamic loads on prismatic and twisted tall buildings using computational fluid dynamics, ICRAES-2020.

Shabab, K., Irtaza, H., Agarwal, A., 2021, Comparative study of aerodynamic coefficients of prismatic and twisted tall buildings with various cross sections using CFD, Journal of the Institution of Engineers(India), 102(3): 635-650.

Smith, R.J., 2011, Deflection limits in tall buildings -Are they useful?, Conference Paper.

Song, S., Zhang, C., 2020, Lateral stiffness and preliminary design methodology of twisted diagrid tube structures, The structural design of tall and special buildings, 29(18), 1809.

Su, J.Z., Xia, Y., Chen, L., Zhao, X., Zhang, Q,L., Xu, Y.L., Ding, J.M., Xiong H.B, Ma, R.J., Lv, X.L., Chen, A.R, 2013, Long-term structural performance monitoring system for the Shanghai Tower, Journal Civil Structural Health Monitoring, 3, 49-61.

Szolomicki, J., Golasz-Szolomicka, H., 2019, Technological advances and trends in modern high-rise building, Buildings, 9,193,1-32.

Tanaka, H., Tamura, Y., Ohtake, K., Nakai, M., Kim, Y.C., Bandi, E.K., 2013, Aerodynamic and flow characteristics of tall buildings with various unconventional configurations, International Journal High-Rise Buildings, 2(3): 213-228.

Taranath, B.S., 2012, Structural analysis and design of tall buildings: steel and composite construction, CRC Press, New York.

Taşkın, G.N., 2019, A comparative study in alternative structural system layouts of twisted tall buildings, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 127 s.

Vollers, K.J., 2005, High-rise buildings with twisted facades, 7th World Congress: Renewing the Urban Landscape, New York, 16-19 October.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Wang, B., Jiang, H., 2012, Seismic performance of steel plate-reinforced concrete composite shear wall, , 15 WCEE, Lizbon.

Xiao, C., Tian, C., Chen, T., Jiang, D., 2012, Compression-bending behaviour of steel plate reinforced concrete shear walls with high axial compression ratio, 15 WCEE, Lizbon.

Xiong, Y., Zhang, C., 2018, Mechanical performance of high-rise twisted diagrid tube structure system, 6th Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering, 175-181.

Zhao, Q., Astaneh-Asl, A., 2004, Cylic behaviour of traditional and innovative composite shear walls, Journal of Structural Engineering, 130, 271-284.

Zhou, Z., Qian, J., Huang, W., 2020, Shear strength of steel plate reinforced shear wall, Advances in Structural Engineering, 23(8), 1629-1643.