
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

PLAN DÜZENSİZLİĞİNİN YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞINA ETKİSİNİN YAPAY ZEKÂ SİSTEMLERİ İLE OPTİMİZASYONU VE MODELLENMESİ

Zakia SADAT

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

……..

Zakia SADAT

25/08/2021

PLAN DÜZENSİZLİĞİNİN YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞINA ETKİSİNİN YAPAY ZEKÂ SİSTEMLERİ İLE OPTİMİZASYONU VE MODELLENMESİ

(Doktora Tezi)

Zakia SADAT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2021

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, planda düzensiz olan betonarme binaların statik ve dinamik yükler etkisi altındaki performansı açısından optimum tasarımı elde etmektir. Betonarme düzensiz yapılar için her kat düzenindeki kütle merkezi ile rijitlik merkezleri arasında oluşan dışmerkezliği otomatik olarak minimuma indirmesi ve böylece burulma düzensizliği en aza getirilmesi amacıyla girişimlerde bulunulmuştur. Betonarme yapılarda burulma düzensizliği genellikle plan geometrisinin simetrik olmayan yapısından veya düşey elemanların rijitlik dağılımından kaynaklanır. Yapısal optimizasyon teknikleri, her kat düzeninde kütle merkezi ile rijitlik merkezi arasındaki dışmerkezliği ortadan kaldırmak için malzemeleri yapı boyunca verimli bir şekilde dağıtarak bu problemi çözer. Bu çalışmada farklı ayrık matematiksel yapı modellerine örnek olarak tek katlı iki boyutlu binalar ve 3 boyutlu çok katlı binalar kullanılmıştır. Ayrıca düzensiz yapıların sismik performansı üzerindeki deprem açı etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla rijit davranışı gösteren tek katlı çerçeve taşıyıcı sistem bina, 0'dan başlayarak 15'ar derece artımla 90 dereceye kadar 7 farklı deprem doğrultusuna göre analiz edilmiştir. Uygulanan boyutlandırma optimizasyonu ile sonuçların önemli ölçüde değiştiği açıkça görülmektedir. Yapının analizinde, taşıyıcı sistem 3 boyutlu olarak modellenmesinde ETABS® paket programı kullanılmıştır. MATLAB® programı kullanılarak Genetik Algoritma Yöntemi ile betonarme yapılarda boyutlandırma optimizasyon uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar, optimize edilmiş 8 katlı model binada yapılan deneysel sonuçlarla desteklenmiş ve performansı 15 derecelik bir artışla değerleri 0 ila 180 derece arasında değişen on üç yönde yatay yükler ile değerlendirilmiştir.

Bilim Kodu	:	91102
Anahtar Kelimeler	:	Burulma düzensizliği, betonarme binalar, depreme dayanıklı, genetik algoritma ve yapısal optimizasyonu
Sayfa Adedi	:	231
Danışman	:	Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

OPTIMIZATION AND MODELING OF THE EFFECT OF PLAN IRREGULARITY ON SEISMIC BEHAVIOR OF BUILDINGS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

(Ph. D. Thesis)

Zakia SADAT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2021

ABSTRACT

The purpose of this study is to obtain the optimum design of reinforced concrete buildings with plan irregularity in terms of their performance under static and dynamic loads. Attempts have been made to develop an automatic optimal eccentricity between the mass centre and the rigidity centre of each storey layout and thus minimizing the effect of torsion on the irregular RC structure. Torsional irregularity in reinforced concrete structures is usually caused by the unsymmetrical form of the plan geometry or the stiffness distribution of the vertical elements. Structural optimization methods solve this problem by efficiently distributing materials throughout the structure to eliminate the eccentricity between the centre of mass and the centre of rigidity in each floor layout. Different discrete mathematical models of structures such as 2D single-story and 3D multi-story buildings were used for this study. Furthermore, evaluation of the earthquake incidence angle influence on the seismic performance of irregular buildings is aimed. For this purpose, a single-story shear building is analysed revise this for oriented along with seven different earthquake angles, ranging from 0 to 90 degrees with 15 degrees increment. ETABS® program is used for analysis and design of the structural 3D model. The sizing optimization problem has been formulated and implemented utilizing MATLAB® by application of Genetic Algorithm method. The studies have been supported by experimental results carried out in 8 storey model optimized building, and the performance is evaluated through horizontal loads in thirteen directions ranging from 0 to 180 degrees in 15-degree increments.

Science Code	:	91102
Key Words	:	Torsional irregularity, reinforced concrete buildings, earthquake resistance, genetic algorithm and structural optimization
Page Number	:	231
Supervisor	:	Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın planlamasından sonuçlanmasına kadar geçen süreç boyunca değerli katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen ve araştırmayı yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Abdssamet ARSLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesi üyelerinden Prof. Dr. Afşin SARITAŞ ve Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneyde bana yardımcı oldukları için GAZİ-Yapı Mekanik Laboratuvarı'ndan doktora araştırmacıları Muhammed GÜMÜŞ ve Hüseyin KALKAN'a teşekkür ederim.

MATLAB® Programı konusunda önemli katkısı olan, araştırma yaparken kişisel görüşme yapabildiğim, bilgi ve fikirleri ile farklı bir bakış açısı kazanmamda yardımcı olan ve bilgileri ile yardımcı olan Dr. Mohammad Zia ZAHEDI'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onun onunla mühendislik optimizasyonu alanında çalışmayı bir onur olarak görüyorum. Onun denetimi ve sürekli yardımı olmasaydı bu tez mümkün olamazdı.

Aynı zamanda bu zorlu ve uzun süreçte her türlü maddi ve manevi destekleri ile daima yanımda olan canım eşim Sakhi SADAT'a ve canım çocuklarım Mir Muzamel SADAT, Mir Mudaser SADAT ve Mir Musawer SADAT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Nerede olursam olayım, ne yaparsam yapayım ilerlemem için güç kaynakları bunlar.

Son olarak annemle babama ve sevgili kardeşlerime, doktora programım boyunca sürekli cesaretlendirmeleri, destekleri ve sevgileri için içten şükranlarımı sunmak istiyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xiv

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xx

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR VE VERİ KAYNAKLARININ İNCELEMESİ 7

2.1. Yapı Sistemlerinde Genetik Algoritma ile Yapılan Optimizasyon Çalışma 7

2.2. Burulma Düzensizliğinin Yapı Sistemleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesine Yönelik Çalışmalar 10

3. PLANDA DÜZENSİZLİK DURUMLARI 13

3.1. A1 - Burulma Düzensizliği 13

3.2. A2 - Döşeme Süreksizlikleri 14

3.3. A3 - Planda Çıkıntılar Bulunması 16

3.4. A4 – Taşıyıcı Eleman Eksenlerinin Paralel Olmaması Durumu 18

3.5. Burulmaya Karşı Tasarım için Yönetmelik Hükümleri 19

4. PLANDA DÜZENSİZ YAPILARIN BURULMA TEPKİSİ 21

4.1. Tasarım Dışmerkezlik 23

4.2. Ek Dışmerkezlik Etkisi 25

4.3. Kütle Merkezi 25

4.4. Rijitlik Merkezi 26

5. DEPREM YÜKÜ HESAP YÖNTEMLERİ 29

5.1. Elastik Deprem Yüklerinin Tanımlanması 29

Sayfa

5.1.1. Spektral ivme katsayısının bulunması 29

5.1.2. Etkin yer ivmesi katsayısı (A_0) 30

5.1.3. Spektrum katsayısı S(T) 30

5.1.4. Bina önem katsayısı (I) 31

5.1.5. Elastik deprem yükü azaltma katsayısı R_a(T) 31

5.1.6. Özel tasarım ivme spektrumları 32

5.2. Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi 33

5.2.1. Toplam eşdeğer deprem yükünün belirlenmesi 33

5.2.2. Binanın deprem hesabına katılan toplam ağırlığının belirlenmesi 34

5.2.3. Katlara etkiye eşdeğer deprem yüklerinin belirlenmesi (F_i) 34

5.2.4. Gözönüne alınacak yerdeğiştirme bileşenleri ve deprem yüklerinin etkime noktaları 35

5.2.5. Binanın birinci doğal titreşim periyodunun belirlenmesi 37

5.3. Mod Birleştirme Yöntemi (Dinamik Analizi) 37

5.3.1. Tek katlı yapının dinamik tepkisi 37

5.3.2. Çok serbestlik dereceli sistemler 39

5.3.3. Mod şekilleri ve açısal frekanslar 40

5.3.4. Modların birleştirilmesi yöntemi 42

5.3.5. İvme spektrumu 44

5.3.7. Hesaba katılacak yeterli titreşim modu sayısı 45

5.3.8. Mod katkılarının birleştirilmesi 45

5.3.9. Hesaplanan büyüklüklere ilişkin alt sınır değerleri 46

5.4. Etkin Göreli Kat Ötelemelerinin Sınırlandırılması 46

5.5. Mod Birleştirme Yöntemine Göre Analiz Özellikleri 47

5.7. Rijit Diyafram Kabulü 52

5.8. Sayısal Örnekler 53

5.8.1. Yapı modelleri ve özellikler 53

Sayfa

5.8.2. Bilgisayar programı 55

5.8.3. Sonuçlar ve tartışmalar 83

6. OPTİMİZASYON ARAÇLARI İLE MÜMKÜN OLAN EN İYİ TASARIMA ULAŞMAK 85

6.1. Optimizasyonun Tarihsel Gelişimi 86

6.2. Optimizasyon Problemlerinin Tanıtımı 86

6.2.1. Amaç fonksiyonu 88

6.2.2. Tasarım değişkenleri 89

6.2.3. Kısıtlamalar 90

6.3. Optimum Tasarım Problemi Formülasyonu 91

6.4. Yapısal Optimizasyon Sınıflandırmaları 93

6.4.1. Boyutlandırma optimizasyonu 93

6.4.2. Şekil optimizasyonu 94

6.4.3. Topoloji optimizasyonu 94

6.5. Optimizasyon Kategorileri 96

6.6. Optimizasyon Yöntemleri 98

6.6.1. Matematiksel programlama 98

6.6.2. Stokastik süreç teknikleri 107

6.6.3. Modern optimizasyon yöntemleri 108

7. EVRİMSEL ALGORİTMALAR 109

7.1. Genetik Algoritma (GA) 110

7.2. Genetik Programlama (GP) 110

7.3. Evrim Stratejileri (ES) 111

7.4. Evrimsel Programlama (EP) 111

7.5. Diğer Evrimsel Algoritmalar 112

7.5.1. Tavlama Benzetimi 112

Sayfa

7.5.2. Karınca Koloni Algoritması 113
7.5.3. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu 114
7.5.4. Tabu Arama 114
8. GENETİK ALGORİTMA (GA) 115
8.1. Genetik Algoritmanın Tanımı 115
8.2. GA'nın Tarihsel Gelişimi 116
8.3. Genetik Algoritma Geleneksel Optimizasyon Teknikleri ile Karşılaştırılma 116
8.4. Genetik Algoritmanın Avantajları ve Sınırlamaları 117
8.4.1. Genetik algoritmanın avantajları 117
8.4.2. Genetik algoritmanın sınırlandırılması 118
8.5. Genetik Algoritma Uygulama Alanları 118
8.6. Genetik Algoritmanın Temel Kavramları 119
8.6.1. Gen 119
8.6.2. Jenerasyon 119
8.6.3. Kromozom 119
8.6.4. Popülasyon 120
8.6.5. Kodlama 121
8.6.6. Başlangıç popülasyonu 123
8.6.7. Uygunluk 123
8.7. Genetik İşlemciler 124
8.7.1. Seçilim/ Reprodüksiyon 124
8.7.2. Çaprazlama 126
8.7.3. Mutasyon Operatörü 129
8.7.4. Seçkinlik 131
8.7.5. Göç 131
8.8. Kısıtlama Parametreleri 131

Sayfa

8.8.1. Lineer olmayan kısıtlama çözücü algoritmaları 131

8.9. Bir Problem İçin Birden Çok Çalışma 133

8.10. Genetik Algoritmanın Çalışma Prensipleri 134

8.11. Optimizasyon için Bilgisayar Programları 135

8.11.1. Genetik algoritma ve doğrudan arama araç kutusu 135

9. GENETİK ALGORİTMA İLE BURULMA YAPAN BİNALARIN DIŞMERKEZLİK OPTİMİZASYONU 137

9.1. Optimizasyon Probleminin Formülasyonu 138

9.1.1. Boyutlandırma optimizasyonu 139

9.1.2. Boyut sınırlama kısıtlamaları 139

9.2. Minimum Dışmerkezliği için Algoritması 139

9.3. Planda Düzensiz Binaların Dışmerkezliğinin Minimize Edilmesi 140

9.3.1. Amaç fonksyonu 140

9.3.2. Tasarım değişkenleri 141

9.3.3. Tasarım kısıtlamalar 141

9.3.4. Kolon kısıtlamaları 142

9.4. Matlab ile Optimizasyon Problemlerinin Çözümü 143

9.5. Sismik Uygulamalar için Optimum Dışmerkezlik Tasarımı 144

9.5.1. Genetik algoritma parametrelerinin seçimi 145

9.5.2. Tek katlı binaların optimal dışmerkezliği tasarımı 146

9.5.3. Planda düzensiz yapılarda deprem etkime açılarının etkisi dışmerkezliğe tepkileri ve GA ile optimizasyon 157

9.5.4. Boyutlandırma optimizasyon ilgili genel sonuçlar ve öneriler 162

10. PLANDA DÜZENSİZ 3 BOYUTLU BETONARME BİNALARIN OPTİMUM GÖRELİ KAT ÖTELEME TASARIMI 163

10.1. Göreli Kat Ötelemelerin 164

10.1.1. Göreli kat ötelemelerinin hesaplanması ve sınırlandırılması 164

Sayfa

10.2. Optimal Göreli Kat Ötelemeleri İçin Algoritma 165

10.3. Optimal Göreli Kat Öteleme Tasarım Problemi 167

10.3.1. Amaç fonksyonu 167

10.3.2. Tasarım değişkenleri 167

10.3.3. Tasarım kısıtlamaları 167

10.3.4. Kolon kısıtlamaları 168

10.4. Üç Boyutlu Yapılar İçin Hazırlanan Bilgisayar Programı 169

10.5. Sayısal Örnekler 170

10.5.1. Tasarımda kullanılan yük kombinasyonları 172

10.5.2. Planda L tipi düzensizliklere sahip 3B betonarme binaların göreli kat öteleme performansının otomatik minimizasyonu 173

10.5.3. Planda A2 tipi düzensizliklere sahip 3B betonarme binaların göreli kat öteleme performansının otomatik minimizasyonu 180

10.5.4. Sonuç ve tartışmalar 189

11. OPTİMİZE EDİLMİŞ PLANDA DÜZENSİZ YAPILARIN SİSMİK PERFORMANSI ÜZERİNE DENEYSEL VE TEORİK ÇALIŞMA 191

11.1. Yer Hareketi Etkime Açısı 192

11.2. Malzemeler ve Yöntemler 194

11.2.1. 3B yazıcı yöntemler 194

11.2.2. Numunelerin malzeme özellikleri 195

11.2.3. Dijital görüntü korelasyon yöntemi 196

11.3. Laboratuvarda Yatay Yük ve Deplasman Hesaplama Yöntemi 201

11.3.1. Tasarımların hazırlanması 201

11.2.2. Yapının yükleri ve yük kombinasyonları 203

11.4. Tartışmalar ve Değerlendirmeler 207

11.4.1. Deneysel sonuçlar 207

11.4.2. Sonlu eleman modelleme sonuçları 209

Sayfa

11.4.3. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması 210
11.5. Sonuçlar..... 215
12. SONUÇ VE ÖNERİLER 217
12.1. Düzensizlikten Elde Edilen Sonuç ve Öneriler..... 218
12.1.1. Tek katlı L şekilli binalardan elde edilen sonuçlar 218
12.1.2. İki boyutlu çok katlı L şekilli binalardan elde edilen sonuçlar 218
12.1.3. Üç boyutlu 8 katlı L şeklinde binalardan elde edilen sonuçlar 219
12.1.4. Üç boyutlu altı katlı A2 düzensiz binalarda elde edilen sonuçlar..... 219
12.1.5. A2 ve A3 düzensizliği hakkında genel sonuçlar ve öneriler..... 219
12.2. Boyut Optimizasyonundan Elde Edilen Sonuç ve Öneriler..... 220
12.2.1. Tek katlı binaların optimizasyonundan elde edilen sonuçlar..... 220
12.2.2. Çok katlı 3B binaların optimizasyonundan elde edilen sonuçlar..... 221
12.2.3. Genetik Algoritma uygulamaları hakkında genel sonuçlar ve öneriler 222
12.2.4. Deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilen sonuçlar..... 223
12.3. Gelecekteki Araştırmalar için Öneriler 224
KAYNAKLAR 225
ÖZGEÇMİŞ 231

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.1. Etkin yer ivme katsayısı..... 30

Çizelge 5.2. Spektrum karakteristik periyotları 30

Çizelge 5.3. Bina önem katsayısı..... 31

Çizelge 5.4. Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) 32

Çizelge 5.5. Eşdeğer deprem yükü yönteminin uygulanabileceği binalar..... 33

Çizelge 5.6. Hareketli yük katılım katsayısını..... 34

Çizelge 5.7. Binalara ait ortak yapısal bilgiler..... 54

Çizelge 5.8. Kütle merkezinin hesabı 56

Çizelge 5.9. Deprem x doğrultusunda eşdeğer deprem yüklerinin belirlenmesi 58

Çizelge 5.10. Deprem x doğrultusunda eşdeğer deprem yüklerinin belirlenmesi 59

Çizelge 5.11. Maksimum kat ötelemelerin 60

Çizelge 5.12. Binaya depremin X ve Y doğrultusunda gelmesi halinde oluşan dış 61

Çizelge 5.13. Burulma momeni (±0,05 dış. hariç) sonucu çerçevelere gelen K. K..... 62

Çizelge 5.14. Burulma momenti (+0,05 dış. ilave) sonucu çerçevelere gelen K. K..... 63

Çizelge 5.15. Burulma momenti (-0,05 dış. ilave) sonucu çerçevelere gelen K. K..... 63

Çizelge 5.16. Her bir çerçeve aldığı kesme kuvveti ve burulma düzensizliğinin değ.... 63

Çizelge 5.17. X yönde kolon maksimum kesme kuvvetleri ve burulma düzensizliği.... 64

Çizelge 5.18. Y yönde kolon maksimum kesme kuvvetleri ve burulma düzensizliği.... 64

Çizelge 5.19. Her katta etkiyen burulma momentleri ve kat burulma rijitlikleri..... 65

Çizelge 5.20. Çerçevelere gelen maksimum kesme kuvvetleri ve A1 değerleri 65

Çizelge 5.21. X yönde her bir kolonda gelen maksimum kesme kuvvetleri ve A1..... 66

Çizelge 5.22. Y yönde her bir kolonda gelen maksimum kesme kuvvetleri ve A1..... 66

Çizelge 5.23. Kat rijitlik merkezi, kütle merkezi ve dışmerkezlik 67

Çizelge 5.24. Yatay deprem kuvvetlerin (SRSS, CQC ve ABSSUM) Karşılaştırma..... 82

Çizelge 5.25. Maksimum yatay deplasmanın hesaplanması ve karşılaştırılması 82

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.26. Etkin göreli kat ötelemelerinin kontrolü 83

Çizelge 9.1. Problemlerini çözmek için seçilen GA parametre seti 146

Çizelge 9.2. İlk ve optimize edilmiş kolon kesit boyutları ve dışmerkezlik değeri 148

Çizelge 9.3. İlk ve optimize edilmiş kesit boyutları ve dışmerkezlik değeri 152

Çizelge 9.4. İlk ve optimize edilmiş kesit boyutları ve dışmerkezlik değeri 155

Çizelge 9.5. İlk ve optimize edilmiş kolon kesit boyutları 161

Çizelge 9.6. İlk ve optimize edilmiş dışmerkezlik değerleri 162

Çizelge 10.1. Bütün binalara ait ortak yapısal bilgiler..... 171

Çizelge 10.2. Problemlerini çözmek için seçilen GA parametre seti 171

Çizelge 10.3. İlk ve optimum kolon boyutlarının karşılaştırılması 175

Çizelge 10.4. İlk ve optimal dışmerkezlik 175

Çizelge 10.5. İlk ve optimal burulma düzensizliği oranı (ηbi) 176

Çizelge 10.6. İlk ve optimum kolon boyutlarının karşılaştırılması 178

Çizelge 10.7. İlk ve optimal dışmerkezlik karşılaştırılması..... 178

Çizelge 10.8. İlk ve optimal burulma düzensizliği oranının (ηbi) karşılaştırılması 179

Çizelge 10.9. İlk ve optimal burulma düzensizliği oranının karşılaştırılması 183

Çizelge 10.10. İlk ve optimum kolon boyutlarının karşılaştırılması 184

Çizelge 10.11. İlk ve optimal burulma düzensizliği oranının karşılaştırılması 187

Çizelge 10.12. İlk ve optimum kolon boyutlarının karşılaştırılması 188

Çizelge 11.1. Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri [67, 68] 196

Çizelge 11.2. Binadaki kolonların boyutları 202

Çizelge 11.3. Her yatay yük açısı için üst kat deplasman değerlerin karşılaştırılma..... 212

Çizelge 11.4. X yönünde üst kattaki deplasmanlarının maksimum farklar 213

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. A1-Burulma düzensizliği durumları [31] 14

Şekil 3.2. A2 döşeme süreksizlik durumları [31] 15

Şekil 3.3. A3 türü düzensizlik [31] 16

Şekil 3.4. Plandaki çıkıntı yapan kısımların dezavantajları 17

Şekil 3.5. Önleme yöntemi olarak birkaç bölüme ayrılmıştır 17

Şekil 3.6. A4 – Türü düzensizlik durumu [31] 18

Şekil 4.1. L şeklindeki bina, köşelerde burulma ve gerilme birikimleri 22

Şekil 4.2. Yapılarda burulma etkileri yaratan durumları 22

Şekil 4.3. Kat planı üzerinde rijitlik ve kütle merkezi arasında dışmerkezlik [35] 24

Şekil 4.4. Yer hareketi altındaki 3B çerçeve atalet ve elastik kuvvetler [34] 26

Şekil 5.1. Elastik tasarım spektrumu (TDY-2007) 32

Şekil 5.2. Fiktif yükler ve yerdeğiştirmeler [40] 35

Şekil 5.3. Kaydırılmış kütle merkezi [31] 36

Şekil 5.4. Kaydırılmış kütle merkezi [31] 36

Şekil 5.5. Yer hareketi etkisindeki TSD sönümlü sistem [34] 38

Şekil 5.6. Çok serbestlik dereceli çerçeve sistem [40] 40

Şekil 5.7. Üç boyutlu iki katlı bina serbestlik derecesi 6 53

Şekil 5.8. Sayısal çalışma için kullanılan kat kalıp planı 55

Şekil 5.9. Normalize edilmiş elastik tasarım spektrumu 60

Şekil 5.10. Sayısal çalışma için kullanılan kat kalıp planı 68

Şekil 5.11. Altı serbestlik dereceli sistemde mod şekilleri 71

Şekil 5.12. TDY'e göre azaltılmış ivme spektrumu 74

Şekil 6.1. Minimum f (x), maksimum −f (x) ile aynıdır [43] 85

Şekil 6.2. Tasarım optimizasyon problemleri için formülasyon süreci 92

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.3. Üç yapısal optimizasyon stratejisi 95

Şekil 6.4. Optimizasyon algoritmalarının kategorileri [46] 96

Şekil 7.1. KKO'ununda gerçek karıncaların en kısa yolu bulma örneği 113

Şekil 8.1. Genotip ve fenotipin temsili [48]..... 120

Şekil 8.2. Genetik algoritmada popülasyon yapısı..... 121

Şekil 8.3. İkili kodlama için kromozom örneği 121

Şekil 8.4. Permütasyon kodlama için kromozom örneği 122

Şekil 8.5. Değer kodlama için birey örneği 122

Şekil 8.6. Ağaç kodlama için birey örneği..... 123

Şekil 8.7. Tek noktalı çaprazlama misali 127

Şekil 8.8. İki noktalı çaprazlama örneği 127

Şekil 8.9. Çok noktalı çaprazlama örneği 128

Şekil 8.10. Üniform çaprazlama örneği 128

Şekil 8.11. Dağınık çaprazlama örneği 129

Şekil 8.12. Mutasyonu tersine çevirme..... 130

Şekil 8.13. Genetik algoritmanın genel akış şeması 134

Şekil 8.14. MATLAB Genetik Algoritması ve doğrudan arama araç kutusu..... 136

Şekil 9.1. Tek katlı modelin kat kalıp planı 147

Şekil 9.2. Jenerasyon sayısı 148

Şekil 9.3. Bina kolonların boyutları, kütle ve rijitlik merkezinin konumları..... 149

Şekil 9.3. (devam) Bina kolonların boyutları, kütle ve rijitlik merkezinin konumu..... 150

Şekil 9.4. Tek katlı modelin kat kalıp planı 151

Şekil 9.5. Jenerasyon sayısı 151

Şekil 9.6. Bina kolonların boyutları, kütle ve rijitlik merkezinin konumları..... 152

Şekil 9.6. (devamı) Bina kolonların boyutları, kütle ve rijitlik merkezinin konumu..... 153

Şekil 9.7. Tek katlı modelin kat kalıp planı 154

Şekil **Sayfa**

Şekil 9.8. Jenerasyon sayısı 154

Şekil 9.9. Bina kolonların boyutları, kütle ve rijitlik merkezinin konumları..... 155

Şekil 9.9. (devam) Bina kolonların boyutları, kütle ve rijitlik merkezinin konumu..... 156

Şekil 9.10. Deprem etkime açıları θ = (0º- 90º)..... 158

Şekil 9.11. Koordinat sistemi..... 159

Şekil 9.12. Jenerasyon sayısı 160

Şekil 9.13. Optimizasyon önce farklı derecelerde dışmerkezliğin grafiği..... 161

Şekil 9.14. Optimizasyondan sonra farklı derecelerde dışmerkezliğin grafiği..... 161

Şekil 10.1. Katlar arası göre ötelemesi oranı hesaplaması için grafiksel temsili..... 165

Şekil 10.2. Analizlerde kullanılan Dizayn Tepki Spektrumu 173

Şekil 10.3. Tipik kat planı ve çerçeve modelinin 3 boyutlu görüntüsü 174

Şekil 10.4. Jenerasyon sayısı 174

Şekil 10.5. Tipik kat planı ve çerçeve modelinin 3 boyutlu görüntüsü 177

Şekil 10.6. Jenerasyon sayısı 177

Şekil 10.7. İlk ve optimal dışmerkezliğin karşılaştırılması..... 179

Şekil 10.8. İlk ve optimal burulma düzensizliği oranının karşılaştırılması 180

Şekil 10.9. A2 tipi düzensiz yapı tipik kat kalıp planı 182

Şekil 10.10. Çerçeve modelinin 3 boyutlu görüntüsü..... 182

Şekil 10.11. Jenerasyon sayısı 183

Şekil 10.12. A2 tipi düzensiz yapı tipik kat kalıp planı 185

Şekil 10.13. Perde-çerçeve modelinin 3 boyutlu görüntüsü 186

Şekil 10.14. Jenerasyon sayısı 186

Şekil 10.15. Her iki modeli için ilk ve optimal burulma karşılaştırılması..... 187

Şekil 11.1. Yer hareketi ivmesinin (a) ve yapının dönüşü (b) [59]..... 193

Şekil 11.2. Tasarlanan model ve 3B yazıcı ile yapılan prototipin görüntüleri 194

Şekil 11.3. Gazi laboratuvarında numunenin elastisite modülü testi..... 196

Şekil **Sayfa**

Şekil 11.4. Laboratuvardaki test modeli 197

Şekil 11.5. DIC analiz süreci 199

Şekil 11.5. (Devam) DIC analiz süreci 200

Şekil 11.6. Sonlu Eleman Modellemede plan ve 3B görünüm 204

Şekil 11.7. DIC ile ölçüm yapılırken kullanılan araçlar 204

Şekil 11.8. Laboratuvarda yükleme aparatı 205

Şekil 11.9. Laboratuvarda yükleme tipi ($0^o \leq \Theta \leq 180^o$) 205

Şekil 11.10. Laboratuvarda yükleme tipi ($0^o \leq \Theta \leq 180^o$) 206

Şekil 11.11. X yönündeki kat maksimum yatay deplasmanların değişimi 208

Şekil 11.12. Y yönündeki kat maksimum yatay deplasmanların değişimi 208

Şekil 11.13. X yönündeki kat maksimum yatay deplasmanların değişimi 209

Şekil 11.14. Y yönündeki kat maksimum yatay deplasmanların değişimi 210

Şekil 11.15. X yönünde en üst kat deplasman değerlerinin karşılaştırılması 211

Şekil 11.16. Y yönünde en üst kat deplasman değerlerinin karşılaştırılması 211

Şekil 11.17. Üst katlarda maksimum yatay deplasmanların değişimi 213

Şekil 11.18. Maksimum üst kattaki yatay deplasmanların değişimi 214

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A_b	Boşluk alanları toplamı
$A_{(T)}$	Spektral ivme katsayısı
A_0	Etkin yer ivmesi katsayısı
a_x	Binanın x yönünde çıkıntı yapan kısım uzunluğu
a_y	Binanın y yönünde çıkıntı yapan kısım uzunluğu
CM	Kütle merkezi
CR	Rijitlik merkezi
D	Kolonun eğilme rijitliği
D_i	i'nci katta ∓ %5 ek dışmerkezliğe uygulanan büyütme katsayısı
e	Dışmerkezlik
Ec, Es	Beton ve donatının elastisite modüleri
e_x	x yönünde artırılmış dış merkezlik
e_y	y yönünde artırılmış dış merkezlik
f(x)	Amaç fonksiyonu
F_{ck}	Beton karakteristik basınç dayanımı
F_{fi}	Birinci doğal titreşim periyodunun i'inci kata etkiyen fiktif yükü
F_i	Eşdeğer deprem yükü yöntemi'nde i'inci kata etkiyen deprem yükü
g	Yerçekimi ivmesi
$g_i(x)$	Sınırlayıcılar
H	Kat yüksekliği
h_i	Binanın i. katının kat yüksekliği
I	Yapı önem katsayısı
I_x, I_y	Kolonların x'e ve y'ye göre atalet momentleri
K	Rijitlik matrisi
L_x	Binanın x yönde toplam boyu
L_y	Binanın y yönde toplam boyu

Simgeler	Açıklamalar
N_d	Eksenel basınç kuvvetinin hesap değeri
Q	Hareketli yük etkisi
R	Yapı davranış katsayısı
Ra(T)	Deprem Yükü Azaltma Katsayısı
S(T)	Spektrum katsayısı
Spa(Tr)	r'inci doğal titreşim modu için ivme spektrumu ordinatı
T	Yapı doğal titreşim periyodu
T_A, T_B	Spektrum karakteristik periyotları
Vts	Binaya etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti)
Vt_B	Mod birleştirme yönteminde taban kesme kuvveti
V_{tx}	x yönü toplam kesme kuvveti
V_{ty}	y yönü toplam kesme kuvveti
W	Toplam bina ağırlığı
Wi	Binanın i'inci katının ağırlığı
β	Büyüklüklerin alt sınırlarının belirlenmesi için kullanılan katsayı
θ_i	i'inci katta tanımlanan İkinci Mertebe Gösterge Değeri
ξ	Sönüm
ω	Acısal hız
κ_{ij}	Çapraz korelasyon katsayısı
η_{bi}	Burulma düzensizliği katsayısı
η_{ci}	Binanın dayanım düzensizliği katsayısı
η_{ki}	Binanın rijitlik düzensizliği katsayısı
Δi	Binanın i'inci katındaki göreli kat ötelemesi
$(\delta i)_{max}$	Binanın i'inci katındaki maksimum etkin göreli kat ötelemesi
Δ_{FN}	Ek eşdeğer deprem yükü
kN	Kilonewton
m	Metre
m/sn	Metre/Saniye
m^2	Metrekare

Kısaltmalar	Açıklamalar
ABS	Mutlak değer
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
API	Application Programming Interface
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CQC	Tam Karesel Birleştirme
ÇSD	Çok Serbestlik Dereceli sistem
DIC	Dijital Görüntü Korelasyon
EDY	Eşdeğer Deprem Yükü Yöntem
FEM	Sonlu Eleman Modelleme
FDM	Fused Deposition Technology
MBY	Mod Birleştirme Yöntem
GA	Genetik Algortimalar
RSA	Tepki Spektrum Analiz
TDY	Türk Deprem Yönetmeliği
TS 500	Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları Standardı
TSD	Tek Serbestlik Dereceli sistem
SRSS	Karelerin Toplamının Karekökü

1. GİRİŞ

Bu günlerde insanların öncelik verdikleri konulardan biri de yaşam alanlarını ekonomik, estetik ve işlevli yapılar haline getirmektir. Mimari tasarımlardaki düzensizlikler, düzenli olmayan geometri özellikler, estetik kaygılardan dolayı yapılan hatalar yapının sismik yüklere karşı ciddi şekilde hasar görmesine veya çökmesine neden olur. Yapılarda düzensizliğin bulunması mümkün oldukça kaçınılması gereken bir durum olmakla beraber istenmeyen bir durumdur. Bazen uygulamada karşılaşılan düzensiz yapılardaki düzensizlikten kaynaklanan olumsuz etkileri minimize etmek amacıyla bazı önlemler gerekli olmaktadır. Betonarme yapılarda düzensiz taşıyıcı sistem kullanılması özellikle deprem etkileri altında yapının zayıf kısımlarında hasara sebep olmaktadır. O halde yapının ayakta kalmasını sağlamak için uyulması gereken ana ilkeleri barındıran yönetmeliklere göre analiz, tasarım ve imalat yapılması gerekmektedir.

Yapıya etkiyen deprem yükleri yapının kütle merkezine etki eder. Yapının kat kütle merkezi ile rijitlik merkezinin çakışmadığı senaryolarda kat kesme kuvvetinin oluşturduğu yatay ötelenmenin yanında kat burulma momentinden dolayı düşey eksen etrafında dönme de oluşmaktadır. Rijitlik merkezi ile kütle merkezi arasında dışmerkezlik olması ve yatay yüklerin etkimesi durumunda kat düzeyindeki burulma momenti kolonlarda ek kesme kuvvetleri oluşturur. Kat burulma momentini belirli bir sınıra getirmek veya mümkünse tümden kaldırmak için kütle merkezi ile rijitlik merkezinin çakışması ya da birbirine yaklaşması gerekli olmaktadır. Kütle merkezi neredeyse sabit olmak üzere, kütle merkezinin konumunu değiştirmek için kat içindeki kütle dağılımını değiştirmek gerekmektedir ki bu da oldukça zordur. Ancak rijitlik merkezi, kolon veya varsa perdeleri rijitlikleri ile oynanarak değiştirilebilir.

Planda düzensiz betonarme yapıların sismik yükler altındaki davranışının incelenmesinde deprem yüklerinin yapı geometrisine hangi açıdan uygulandığında en elverişsiz tesirin oluşacağı konusu, yapı tasarımında en yaygın sorunlardan bir tanesidir. Deprem etkime bileşeninin yönü yapı eksenlerinin ana yönlerinden biri olmayabilir ve ana bileşeni ana eksen yönü dışında bir yönde uygulamak yapının yapısal elemanlarında daha yüksek iç kuvvetlere ve gerilmelere yol açabilir. Bu nedenle yapının farklı depremlerin etkime açılarına dayanıklı olması gerekmektedir. Ayrıca deprem yükleri düzensiz yapılarda öngörülemeyen

deplasmanlar yaratabilir ve ilgili yapısal elemanlar değerlendirilenden daha fazla zorlanabilir. Geçmişte ve son dönemlerde meydana gelen deprem olayları planda düzensiz yapıların deprem hasarına karşı daha savunmasız olduğunu göstermektedir. Bu nedenle düzensizliğin etkisi yapı tasarımı sırasında dikkate alınması gereken çok önemli bir konudur.

Yapının planda ve düşeyde düzenli olmaması, döşemelerde büyük boşluklar bulunması, planda çıkıntıların bulunması ve taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının plandaki asal eksenlerinin dikkate alınan birbirine dik iki yatay deprem yönlerine paralel olmaması gibi durumlardan dolayı düzensiz yapılar meydana gelir ve burulma nedeniyle ek yükleme ile karşı karşıya kalırlar. Sismik yükleme şartları altında böyle bir yapısal sistemin tepkisi ve davranışı esas olarak kesit boyutuna ve kolonların ve perdelerinin topolojik düzenine bağlıdır. Yapının tasarımında yapının taşıyıcı sistemine ait elemanların geometrik boyutları genellikle kazanılmış tecrübelere ve mühendislik yeteneğine dayanılarak önceden tayin edilmektedir. Bu düzensizliklerden bazılarının yapı elemanlarının enkesitlerini boyutlandırılması sırasında ortadan kaldırılabilmesine rağmen ekonomik olmamaktadır ve hatta bazılarının ise düzeltilmesi veya ortadan kaldırılması mümkün olamamaktadır.

Betonarme yapıların inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılması nedeniyle betonarme yapıların optimum tasarımı oldukça önem kazanmaktadır. Yapı elemanlarının tasarımı için klasik yöntemler ampirik formülleri kullanarak sadece yapılabilirliğini esas alan çözümler içerirken optimizasyon yöntemleri gerçeğine uygun fiziksel modelleri esas alarak optimum sonuçları araştırmaktadır. Buna karşı optimizasyon yöntemleri gerçeğine uygun fiziksel modelleri temel alarak optimum sonuçları araştırmaktadır. Optimizasyon yöntemiyle yapılan hesaplamalarda genellikle mukavemeti yeterli en uygun tasarım aranırken ekonomisine de dikkat edilmesi noktasındaki gerekliliğine vurgu yapılmaktadır. Yapısal optimizasyon teknikleri katlardaki burulma düzensizliği katsayısını ortadan kaldırması için malzemeleri yapı boyunca verimli bir şekilde dağıtma problemini çözmelidir.

Bu çalışmada planda düzensizliğe sahip çerçeve ve perde-çerçeveye dayanan betonarme yapıların farklı modellerinde deprem etkisi altında meydana gelen burulma düzensizlikleri incelenmiş, Türk Deprem Yönetmeliğine göre tasarım ve analizi yapılarak bulunan sonuçların karşılaştırılması hedeflenmiştir. Yapay Zekâ sistemleri ile MATLAB® programı kullanılarak Genetik Algoritma (GA) Yöntemi ile betonarme yapılarda kütle merkezi ile

rijitlik merkezleri arasında oluşan dışmerkezliği minimuma getirilmesi ve burulma düzensizliği katsayısını belirli bir sınıra getirilmesi amacıyla düşey taşıyıcıların boyut ve doğrultularının optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir. Genetik Algoritma, "doğada güçlü olanların yaşamına devam etmesi, zayıfların ise elemine olması" şeklinde bilinmekte ve Darwin'in teorisini temel almaktadır. Ayrıca GA'ların başarımı konusunda belirleyici kriterler olan operatörler ve parametreler incelenmiş ve sunulmuştur. Optimizasyon problemlerinin çözümünde literatürde kullanılmakta olan Genetik Algoritmalar yönteminin performansı, onun başarısında doğrudan etkili olan operatör ve parametrelerin performansı karşılaştırılarak incelenmiştir. Genetik Algoritmaların yeniden üretme, mutasyon ve çaprazlama gibi üç temel operatörü için çeşitli operatörler önerilmiştir. Bu operatörlerin doğru bir şekilde seçilmesiyle popülasyon çeşitliliği ve seçilim baskısı arasında denge meydana getirerek yüksek kaliteli bir optimizasyon algoritması oluşturmuştur.

Optimizasyon probleminde kısıtlama veya bir sınırlama olarak betonarme yapıların davranış ve yönetmelik şartları TDY-2007'a ve TS 500'a uygun olarak dikkate alınmış ve değişik yapılarda genetik algoritma çalışması izlenmiştir. Her bir tasarım yaklaşımı da bir boyutlandırma optimizasyonu problemi olarak formüle edilmiştir.

Çalışmanın amacı ve kapsamı

Düzensiz binaların sismik yük altındaki performansları açısından optimum tasarımı yapı mühendisliğinin başlıca araştırma alanlarından biridir. Bu hedef yapı optimizasyon teknikleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Yapı tasarımı, tüm yapısal gereksinimler karşılanırken bir performans ölçüsünün optimize edileceği optimizasyon problemleri olarak formüle edilebilir. Bu çalışmanın temel amacı planda düzensiz betonarme binaların statik ve dinamik yükler altındaki performansları açısından optimum tasarımının elde edilmesidir. Betonarme çerçeve ve perde-çerçeve taşıyıcı sistemlerinin kolon ve perde kesit boyutları açısından optimum tasarımı elde edebilecek bir optimizasyon modeli geliştirmek için girişimlerde bulunulmuştur. Formüle edilen optimizasyon problemi, Ayrık Kısıtlı Doğrusal Olmayan minimalizasyon problemidir. Optimizasyon, Genetik Algoritma (GA) yaklaşımı ile gerçekleştirilirken çağdaş deprem yönetmeliklerinde betonarme yapılar için bina yönetmeliği gereksinimlerinin dayanım ve hizmete elverişlilik kısıtlamalarını da karşılamaktadır. Bu amaçla "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binaların Özellikleri" dayanım ve hizmete elverişlilik kısıtlamalarına göre betonarme çerçeve ve perde-çerçeve

sistemler tasarlayan bilgisayar modelleri geliştirmiştir. Betonarme binaların çeşitli sistemleri (tek katlı ve çok katlı, rijit diyafram ve esnek diyafram) statik ve dinamik yükleme sistemleri altında incelenmiş ve daha sonra optimum tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın başlıca hedefleri şu şekilde sıralanabilir:

- Çalışmanın ilk amacı, planda L şekline sahip düzensiz olan betonarme yapıların deprem etkileri altında belirtilen düzensizlik durumunun etkileri saptanmasıdır. Bu amaçla iki farklı çerçeve sistem incelenmiştir. Deprem hesaplamaları mod birleştirme yöntemi ile eşdeğer deprem yükü yöntemi baz alınarak yapılmıştır. Göreli kat ötelemeleri ile burulma düzensizlikleri kontrolü çağdaş deprem yönetmeliğinde belirtilen kurallar göz önüne alınarak ayrıntılı olarak incelenmiştir.
- Çalışmanın ikinci amacı, planda L şekline sahip düzensiz betonarme yapılarda kütle merkezi ile rijitlik merkezleri arasında oluşan dışmerkezliğinin azalması ve burulma düzensizliği katsayısına bir alt sınır getirilmesi amacıyla GA yöntemi kullanarak boyutlandırma optimizasyon uygulamaları gerçekleştirilmesidir.
- Çalışmanın üçüncü amacı, kuvvetli yer hareketi uygulama açısının tespiti, en kritik dışmerkezliğinin hangi açıda ortaya çıktığının belirlenmesi ve boyutlandırma optimizasyonu ile bu kritik dışmerkezliğinin indirilmesidir. Bu amaçla tek katlı çerçeve taşıyıcı sistem bina her birinde 0'dan başlayarak 15'er derece artımla 90 dereceye kadar 7 farklı deprem etkime açısına göre modeller MATLAB® programı kullanılarak geliştirilmiş ve dışmerkezliğe analiz ve GA uygulamaları ile boyutlandırma optimizasyonu yapılmıştır.
- Çalışmanın dördüncü amacı, deprem yükleri altında 3 boyutlu 6 ve 8 katlı binalar olmak üzere iki farklı yapı sistemi sismik göreli kat ötelemeye optimum performans tasarımı buna bağlı burulma düzensizliği katsayısına bir alt sınıra getirilmesi için etkili bir optimizasyon tekniği sunması hedeflemiştir.
- Çalışmanın beşinci amacı, burulma tepkilerini kontrol etmek için önerilen yöntemin binanın sismik performansı üzerindeki deprem doğrultusu ve etkime açısı etkileri deneysel ve teorik olarak incelenmesidir. Maksimum kat deplasmanlarının varyasyonu genetik algoritma uygulamasının sismik performans üzerindeki etkisini belirlemek için dikkate alınmıştır. Bu amaçla iki açıklıklı 8 katlı bir bina Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) filament kullanarak Zortrax M200 3 Boyutlu yazıcı ile 1/30 oranında modellenmiştir. Deney model, 15 derecelik artışlarla değerleri 0 ile 180 derece arasında

değişen on üç yöndeki yatay yüklere maruz bırakılmıştır. MATLAB® programı üzerine inşa edilen açık kaynaklı Ncorr kullanımında dijital görüntü korelasyon (DIC) tekniği kullanılarak yatay yükler altında kolonların yüzey deplasman alanı ölçülmüştür.

Bu tez kapsamında, sayısal ve deneysel sonuçları karşılaştırmak ve genetik algoritma uygulamasının sismik performans üzerindeki etkisini doğrulamaktır.

Tez on iki ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm tezin projesini tanıtan, çalışmanın amacı, kapsamı ve ana bölümlerini açıklayan bir giriş bölümüdür.

İkinci bölümde tez konusuyla ilgili geçmişte yapılan çalışmalar kısaca anlatılmıştır. Bu bölümde ilk olarak sismik şartlarda burulma düzensizliği ve tasarım dışmerkezliği hakkında kısa bir literatür taraması verilmiştir. İkinci olarak genetik algoritmaya dayalı yapı optimizasyonu hakkında kısa bir literatür incelemesi verilmiştir.

Üçüncü bölümde deprem yönetmeliğinde verilen planda düzensizlik durumları ile ilgili genel hatlardan bilgiler verilmiş ve bu binaların yapımı ile ilgili düzenlemeler ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Dördüncü bölümde TDY-2007'de burulma düzensizliği ve ek dışmerkezlik durumu incelenmiş ve burulma düzensizliğine sahip yapılar için öngörülen şatlar açıklanmıştır.

Beşinci bölümde bina sistemlerinin deprem yükünün hesabı için yönetmelikte belirtilen deprem yükü hesap yöntemleri irdelenmiş ve bu yöntemler ile ilgili bilgilendirme yapılmıştır. Ayrıca statik ve dinamik yükler altında iki tip yapı modeli ele alınmış ve iki ayrı modelleme yaklaşımında bulunularak deprem analizleri gerçekleştirilmiş ve yapıların deprem etkileri altında belirtilen düzensizlik durumunun etkileri saptanmıştır.

Altıncı bölümde optimizasyona bir giriş, optimizasyonun tarihsel gelişimi ve optimizasyon problemlerinin tanıtımına genel bir bakış sunulmuştur. Ayrıca optimizasyon probleminin formülasyonu, amaç fonksiyonu, tasarım değişkeni, tasarım kısıtlaması, yapısal optimizasyon sınıflandırmaları hakkında bilgiler verilmiştir. Seçilen bir sistemin tasarımını optimum bir tasarım problemine dönüştürme süreci ve yapı optimizasyon tekniklerinin kategorize edilmesi ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Yedinci bölümde evrimsel algoritmalar ve bu sınıftan optimizasyon yöntemleri olarak kullanılan bazı yöntemler açıklanmıştır. En önemli evrimsel algoritma yöntemleri; Genetik Algoritmalar (GA), Genetik Programlama (GP), Evrimsel Programlama (EP) ve Evrimsel Stratejiler (ES) anlatılacaktır. Bu bölümde, evrimsel algoritmalar çatısı altında yer alan diğer popüler optimizasyon yöntemlerine genel bir bakış sunulacaktır.

Sekizinci bölüm GA tekniğinin tartışılmasına ayrılmıştır. GA'nın tanımı ve tarihçesi, GA'nın geleneksel algoritma ile karşılaştırılması, GA'nın bazı biyolojik kavramları, GA'nın avantajları ve sınırlamaları, GA'nın uygulanması ve bir genetik algoritmanın prosedürü ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Bu bölüm, genetik algoritmaya ve MATLAB® ile doğrudan arama araç kutusuna genel bir bakışla sona ermiştir.

Dokuzuncu bölüm, GA kullanılarak sismik uygulamalar için en uygun dışmerkezlik tasarımı çalışmasına ayrılmıştır. Bu amaçla planda L şekline sahip olan betonarme yapıların dışmerkezlik analizi yapılmış ve GA uygulamaları ile boyutlandırma optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca betonarme yapıların sismik performansı üzerindeki deprem etkime açısı etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmış ve GA uygulamaları ile boyutlandırma optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Onuncu bölümde planda düzensiz olan 3 boyutlu betonarme binalar statik ve dinamik yüklerin etkisi altında sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve burulma düzensizliği katsayısını azaltmak için göreli kat ötelemenin optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir.

On birinci bölüm optimize edilmiş düzensiz yapıların sismik performansına ilişkin deneysel ve teorik çalışmanın ayrılmıştır. Yer hareketi etkime açısının düzensiz yapının tepkisine etkisi, deneysel çalışma materyalleri ve yöntemleri laboratuvarda yatay yük ve deplasman hesaplama yöntemi tartışılmıştır. Ayrıca analiz sonuçları, sonuçlandırılan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

On ikinci bölümde, son olarak sayısal ve deneysel çalışmalarda bulunan sonuçlar gösterilmiş ve bu sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Ayrıca kullanılan optimizasyon yöntemi ve çözülen problemlerle ilgili sonuçlar verilmiş, önerilen yöntemin verimliliği tartışılmıştır. Bu bölümün sonunda gelecekte bazı araştırma konuları yer almaktadır.

2. LİTERATÜR VE VERİ KAYNAKLARININ İNCELEMESİ

Bu bölümde önceki çalışmaların kısa bir özeti iki alt başlıkta sunulmaktadır. İlk olarak yapı sistemlerin hesabında Genetik Algoritma (GA) ile yapılan optimizasyon çalışmaları sunulmaktadır. Daha sonra düzensiz yapıların deprem sırasında burulma davranışını inceleyen çalışmalar aşağıda özet halinde sunulmaktadır.

2.1. Yapı Sistemlerinde Genetik Algoritma ile Yapılan Optimizasyon Çalışmaları

Goldberg [1] mühendislik optimizasyonu problemlerini çözmek için GA kullanan ilk araştırmacılardan biridir. Goldberg'in çalışmasına dayanarak diğer birçok araştırmacı Genetik Algoritmaları çeşitli yapısal tasarım problemlerine uygulamıştır. Betonarme yapıların yapısal optimizasyonu konusunda pek çok çalışma yapılmış ve bu çalışmaların çoğu yapıların maliyetine tahsis edilmiştir. Bu tezin kapsamı dışında olsa da konuyla ilgili kapsamlı bir literatür taraması ve bazı önemli yapısal optimizasyon çalışmaları burada kısaca belirtilmiştir. Örneğin, Turgut, Gürel ve Arslan [2], yayınladıkları çalışmalarında ayrık tasarım değişkenleri ile basit mesnetli betonarme kirişin optimum tasarımı için genetik algoritma kullanmışlardır.

Turgut ve Arslan [3], çalışmalarında sürekli ve altı açıklıklı bir kirişin maksimum açıklık ve mesnet momentlerini veren hareketli yük kombinezonlarının otomatik bir şekilde Genetik Algoritmalar ile düzenlenmesini incelemişlerdir.

Lee ve Ahn'ın [4] çalışmalarında yerçekimi ve yatay yüklerin kombinasyonlarına maruz kalan betonarme düzlem çerçevelerin ayrık optimizasyonunu gerçekleştirmek için bir genetik algoritma kullanılmıştır. Geliştirilen genetik algoritmanın betonarme düzlem çerçeveler için en uygun tasarımı elde ettiği gösterilmiştir.

Camp, Pezeshk ve Hansson [5] tarafından betonarme çerçevelerin ayrık optimizasyonu için genetik algoritma uygulayan bir tasarım prosedürü geliştirilmiştir. Çalışmasının amacı ACI yönetmeliği tarafından tanımlanan servis edilebilirlik ve mukavemet gereksinimlerine tabi olan betonarme yapı elemanlarının malzeme ve inşaat maliyetlerini en aza indirmektir. Basit mesnetli kirişlerin, tek eksenli kolonların ve çok katlı çerçevelerin eğilme tasarımı için GA prosedürünün verimliliğini gösteren örnekler sunmuşlardır.

Atabay ve Gülay'ın [6] çalışmalarında perdeli betonarme yapı sistemlerinin Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak perde boyutunun optimize edilmesi ile maliyet optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmasında yapısal sistemlerin minimum maliyet tasarımı için gerekli olan optimum perde boyutlarını belirleyen bir yazılım geliştirilmiştir.

Govindaraj ve Ramasamy [7], Hindistan standartlarına dayanarak betonarme sürekli kirişlerin optimum detaylı tasarımı için (GA)'ların uygulamasını sunmuşlardır. Üretilen optimum tasarım rasyonel, ekonomik, güvenilir ve pratik bir tasarım olarak tanımlanmıştır.

Guerra ve Kiousis [8], betonarme yapıların optimum tasarımına ulaşmayı amaçlayan bir formülasyon sunmuşlardır. Lineer Olmayan Programlama algoritmasını kullanarak çok açıklıklı ve çok katlı betonarme yapılarda, kiriş, kolon elemanları ve donatı için optimum boyutlandırma ve maliyet tasarrufu sağlanmıştır.

Kömür ve Altan [9] tarafından yapılan bu çalışmada ise optimizasyon yöntemi ile Genetik Algoritma, betonarme bir kiriş ve kolon üzerinden izah edilmeye çalışılmıştır. Genetik Algoritma ile çözüm sonucundan ve geleneksel yöntemler ile çözüm sonucuna oranla daha uygun ve daha ekonomik sonuçlar elde edildiği gösterilmişlerdir.

Sahab [10] tarafından yapılan çalışmasında İngiliz uygulama kurallarına göre düz döşeme binaların boyut optimizasyonu yapılmıştır. Betonarme elemanların optimum kesit boyutları Genetik Algoritmaya dayalı bir hibrit algoritma kullanılarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu, kat, kolon ve temellerin maliyeti dahil olmak üzere binanın toplam maliyetini en az indirmeye hedeflemiştir.

Amiri, Mohebi ve Maddah [11] betonarme çerçevelerin optimum tasarımında Genetik Algoritma uygulamıştır. Araştırmalarında hasar indeksi bir tasarım parametresi olarak kullanılmış ve hasar indeksi bir kısıtlama olarak minimize edilerek yapının toplam ağırlığı minimize edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre 4 katlı çerçevede beton ve donatı hacmi sırasıyla yüzde 41 ve 13 oranında azalmış ve 8 katlı çerçevede beton ve donatı hacmi sırasıyla yüzde 14 ve 22 oranında azaldığı açıklanmıştır.

Hatindera, Hardeep ve Jagbir [12] Genetik Algoritma kullanarak yalnızca düşey statik yükleri dikkate alarak IS 456: 2002'ye göre tek yönlü döşemenin maliyet optimizasyonunu

gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında tüm kolonların dikdörtgen olduğu ve maliyet optimizasyonunun IS: 456-2002'ye göre mukavemet ve servis edilebilirlik gereksinimini karşılayacak şekilde taşındığı varsayılmıştır.

Alex ve Kottalil [13] tarafından GA'nın betonarme konsol ve sürekli kirişlerin tasarımına uygulanmasını göstermek için bir girişimde bulunulmuştur. Çalışmalarında en ekonomik beton kesiti ve donatıları kullanıcı tanımlı aralıklarla elde etmek için maliyet optimizasyonu yapılmıştır. Sürekli kirişlerin Genetik Algoritmaya dayalı tasarımın tüm kısıtlamaları karşılayan makul sonuçlar verdiği açıklanmıştır.

Hashim Ajmal [14] tarafından kodal ve pratik kısıtlamalara tabi belirli bir yük için dikdörtgen betonarme kirişin optimum tasarımına GA'nın uygulanmasını göstermek için bir girişimde bulunulmuştur. Kirişin maliyeti; betonunun ve donatının miktarına, betonun derecesine ve kalıp boyutuna bağlılığı bir fonksiyon olarak ifade edilmiştir. Kiriş, optimizasyon problemi için kısıtlama görevi görecek olan IS 456 tasarım yönetmeliğine göre mukavemet ve hizmet için elverişlilik koşullarını karşılamalıdır. Optimizasyonun amacı kısıtlamalara bağlı olarak kirişin toplam maliyetini en aza indirmektir.

Samruddha ve Patel [15] tarafından genetik algoritma ve çeşitli deneme yanılma hatasına dayalı kalınlık kriterleri kullanılarak kirişsiz döşeme optimizasyonu gerçekleştirme girişiminde bulunulmuştur. Optimizasyon işlemi ile malzemede yaklaşık %20-30 oranında tasarruf sağlandığı açıklanmıştır.

Fayaz Basha ve Madhavi Latha [16], iki tip betonarme döşeme -konsol döşeme, tek yönlü döşeme- tasarım optimizasyonu için GA kullanarak gerçekleştirmiştir. Döşemenin açıklık uzunluğu değiştirilerek farklı yükleme koşulları için optimum maliyet ve optimum donatı oranı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca optimum değerlerdeki değişiklikler, jenerasyon sayısı, popülasyon boyutu ve mutasyon oranı gibi çeşitli kısıtlamaların varyasyonu ile incelenmişlerdir. Nesil sayısı ve popülasyon büyüklüğü küçüldüğünde her iki döşeme için GA kodlarının elde edilen değerinin çözümün optimum değerinden uzak olduğunu gösterdiği ve jenerasyon değerinin 100'e değiştirilmesiyle en iyi optimum değerin elde edildiği açıklamışlardır.

2.2. Burulma Düzensizliğinin Yapı Sistemleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesine Yönelik Çalışmalar

Deprem yönetmelikleri incelendiğinde yapısal düzensizlik durumlarından en çok göze çarpan düzensizlik durumu burulma düzensizliğidir. Aşağıdakiler de dahil olmak üzere burulma düzensizliğinin çeşitli yönlerini araştıran çok sayıda çalışma vardır.

Kan ve Chopra [17], burulma etkilerinin tasarım aşamasında hem elastik hem de elastik olmayan olarak dikkate alınması ve tek katlı yapıların deprem davranışı üzerindeki etkilerini tartışan ilk araştırmacılardı. Çalışmanın sonucu, burulmaya karşı binalarda burulma etkisinin genelde lineer elastik sistemlere kıyasla elastik olmayan sistemlerde daha büyük yerdeğiştirme etkisi ortaya çıkarmaktadır.

Özmen [18], Türk Deprem Yönetmeliğine göre burulma düzensizliğinin geometrik ve yapısal yönlerini araştırmıştır. Burulma düzensizliği katsayısının maksimum değerde olabilmesi için hem aks sayısının hem de kat sayısının düşük olması gerektiğini saptamıştır. Ayrıca çalışmada burulma düzensizliği değerinin perdelerin konumlarına göre değiştiğini de belirtmiştir. Çalışmada aşırı burulma yapan yapılar ile ilgili yönetmelik kuralları da irdelenmiştir.

Özmen, Girgin ve Durgun [19], çok katlı yapılarda burulma düzensizliğini araştırmıştır. Yayınladığı makalede farklı perde konumları, kat ve eksen numaralarına sahip altı tipik yapı grubu üzerinde parametrik bir inceleme yapılmıştır. Çalışmasında burulma düzensizliği katsayılarının kat sayıları azaldıkça arttığı ve tek kat yapıları için maksimum düzensizlik katsayılarının ortaya çıktığı gösterilmiştir. Ayrıca çalışmada burulma davranışı, asimetrik perdeleri kütle merkezlerine mümkün olduğunca yakın yerleştirildiğinde maksimum değerlere ulaştığını açıklanmışlardır.

Momen, Shehata, Mohamed ve Aly [20], L-Şeklindeki düzensiz olan çok katlı binaların temel performansına etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucu ciddi düzensizliğe sahip binaların burulma davranışından kaynaklanan düzenli konfigürasyona sahip binalara ve deprem girdisine dik yönde üretilen ek kesme kuvvetine göre daha savunmasız olduğunu kanıtlamışlardır.

Mary Williams ve Tripathi [21] tepki spektrumu ve statik itme analizi kullanarak asimetri kütle (farklı asimetri büyüklükleri ve farklı kütle büyüklükleri kullanarak) nedeniyle dışmerkezlik değişimin yapının doğrusal ve doğrusal olmayan davranışına etkisi üzerine çalıştılar. Çalışmalarında dışmerkezlik artışının esas olarak sismik kuvvetler nedeniyle burulmayı artırdığı ve yapının yanal yerdeğiştirmesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varmışlardır. Bu artış hem kütlenin büyüklüğüne hem de asimetrinin büyüklüğüne bağlıdır.

Naresh kumar, Punith, Bhyrav Raj and Arpitha [22] tarafından düşey düzensizliğin bir yapının sismik tepkisine etkisi incelenmiştir. Özellikle binalarda bir setback dikkate alınmış ve yapının kütle merkezi ve rijitlik merkezinin konumuna göre davranışı itme analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada düşey düzgün bir bina için kütle merkezi ve rijitlik merkezinin tam olarak binanın merkezinde olduğu açıklanmıştır. Düşey düzensizlikleri olan bir yapıda ise kütle merkezi ve rijitlik merkezinin konumu yoğunlaşmış bölgesine doğru hareket ettiğini açıklanmışlardır.

Birkaç araştırmacı çeşitli çalışmalarda sismik yer hareketlerinin yönleriyle ilişkili maksimum yapısal tepki alanındaki çalışmalarını sunmuşlardır. Örneğin, Lopez ve Torres [23] tarafından yapılan ve doğrusal–elastik davranışın esas alındığı çalışmada, herhangi bir rasgele doğrultuda uygulanan deprem yer hareketinin iki yatay ve bir düşey bileşenine maruz kalan yapıların kritik sismik etkime açısını ve karşılık gelen tepe tepkisini belirlemek için sismik yönetmeliklerde uygulanabilecek basit bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, her bir yatay bileşen için iki ve düşey bileşen için bir olmak üzere toplam beş sismik yükleme durumunun yapılması gerekmektedir. Yöntemin uygulaması ve doğruluğu, 3B bir betonarme çerçeve asimetrik tek katlı ve tek açıklıklı üzerinde gösterilmiş ve elde edilen sonuçlar SRSS yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, aynı şekle iki yatay spektrum ve keyfi bir düşey spektrum için belirlenen kritik açının, deprem yer hareketinin yatay bileşenleri arasındaki oranına ve düşey bileşene bağlı olmadığı belirlenmiştir.

Athanatopoulou [24], kritik sismik etkime açısının ve ilişkili üç sismik bileşene maruz kalan yapıların herhangi bir tepki miktarının karşılık gelen maksimum değerinin belirlenmesi için analitik formüller geliştirmiştir. Analiz sonuçları kullanılan deprem kayıtları için bir tepki miktarının kritik değerinin, sismik bileşenler yapısal eksenler boyunca uygulandığında üretilen olağan tepkiden %80'e kadar daha büyük olabileceğini göstermiştir.

Rigato ve Medina [25], uygulanan iki yönlü yer hareketlerinin sismik etkime açısının elastik olmayan yapılar için çeşitli parametreler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Modeller plan düzensizliklerini, çeşitli esneklik derecelerini, %5 sönümleme oranlarını ve (0,2 saniye ile 2,0 saniye) arasında değişen temel dönemleri dikkate alınmıştır. Çalışmalarında kritik sismik etkime açısının elastik olmayan derecesinde artışla değiştiğini gözlemlemiş.

Magliulo, Maddaloni ve Petrone [26] çalışmalarında planda L şekil betonarme yapıların deprem doğrultusunun sismik tepkisine etkisi incelenmiştir. Doğrusal olmayan dinamik analizler, on iki farklı deprem doğrultusu dikkate alınarak ve her iki ortogonal bileşenin yönü her bir analiz için 30° döndürülerek (0°-330°) gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, deprem doğrultusunun betonarme yapıların tepkisini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

Binaların deprem yükleri altında sismik performans sorununun üzerine aşağıdakiler dahil olmak üzere çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. Örnek olarak Maheri ve Bassett [27] tarafından tasarlanmış 4 katlı, eksantrik ve alüminyumdan yapılmış küçük bir modeli (96 cm uzunluğunda) titreyen bir masa üzerinde yapılan testi rapor etmiş ve sonuç olarak "Teori, birleşik yapısal tepkide olan temel burulma titreşim modunun önemini küçümsediği ve birinci yatay modun katkısının daha fazla olduğunu tahmin ettiği sonucuna varmıştır".

De la Llera ve arkadaşları [28], çalışmalarında sürtünmeli ve viskoelastik damperli tek katlı elastik yapıların zayıf burulma dengesi kavramını analitik ve deneysel olarak değerlendirilmişlerdir.

Zhou, Lu ve Yu [29] deneysel çalışmalarında, deprem spektrumunu ve şiddetini hibrit yapılar üzerine performans etkisini artımlı dinamik analiz kavramına göre incelenmiştir. Deney titreyen bir masa (1/15 ölçekli) üzerine yapılmıştır. Ayrıca yapısal dinamik özellikleri, ivme ve yerdeğiştirme gibi tepkileri ve göçmesi incelenmiştir. Sonucunda, daha yüksek mod etkisi nedeniyle yapının ortası ciddi şekilde hasar gördüğü açıklanmıştır.

Broderick ve McCrum [30] planda düzensiz olan çok katlı, çelik, çaprazlı ve çerçeveli yapıların sismik tepkisi sayısal modelleme ile birlikte tam ölçekli elastik olmayan dinamik testi kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, statik dış merkezlilik ve yanal burulma frekansı oranının düzensiz çaprazlı çerçeve yapıların planlanmasında yerdeğiştirme ve süneklik talebini etkileyen önemli parametreler olduğunu doğrulamıştır.

3. PLANDA DÜZENSİZLİK DURUMLARI

Deprem yüklerini taşıyan taşıyıcı sistemi ve yapısal bileşenlerinin deprem yüklerinin temel zeminine kadar güvenli ve sürekli bir biçimde aktarılmasını temin edecek kapasitede rijitlik, dayanım ve kararlılıkta olmak zorundadır. Deprem yüklerinin zemin seviyesine güvenli bir şekilde aktarılabilmesi için yapı elemanlarının sürekli olması gereklidir. Bundan dolayı yönetmeliklerde düzensiz binaların tasarımından ve yapımından uzak durulması gerektiği söylenirken, belirli kısıtlamlar içerisindeki düzensizliklere izin verilmiştir. Lakin düzensiz binaların davranışlarındaki belirsizliklerden ve olumsuzluklardan sebep bu binaların seçilmesi takdirinde bu binalara gelecek deprem kuvveti arttırılarak ve ek konstrüktif kurallar getirilerek binaların dayanımının arttırılması amaçlanmıştır.

Yönetmeliklerde planda düzensizlik durumları ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. TDY 2007'de (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik) [31] tanımlanan planda düzensizlikler; A1 olarak gösterilen burulma düzensizliği, A2 olarak döşeme süreksizlikleri, A3 olarak gösterilen planda çıkıntı bulunması düzensizliği ve A4 olarak gösterilen taşıyıcı eleman eksenlerinin paralel olmaması durumları ve bunlarla ilgili yaptırımlar aşağıda açıklanacaktır.

3.1. A1 - Burulma Düzensizliği

İki ortogonal deprem doğrultusundan herhangi biri için herhangi bir kattaki maksimum göreli kat ötelemesinin aynı yönde aynı kattaki ortalama göreli kat ötelemesine oranı olarak tanımlanan Burulma Düzensizlik Faktörü η_{bi}'nin 1,2'den büyük olması halinde burulma düzensizliğinin var olduğu kabul edilir [31-33].

$$\eta_{bi}=(\Delta_i)_{mak} / (\Delta_i)_{ort} >1,2 \quad (3.1)$$

$$(\Delta_i)_{mak} = (d_i)_{mak} - (d_{i-1})_{mak} \quad (3.2)$$

$$(\Delta_i)_{min} = (d_i)_{min} - (d_{i-1})_{min} \quad (3.3)$$

$$(\Delta_i)_{ort} = ((\Delta_i)_{mak}+(\Delta_i)_{min})/ 2 \quad (3.4)$$

Yukarıda;

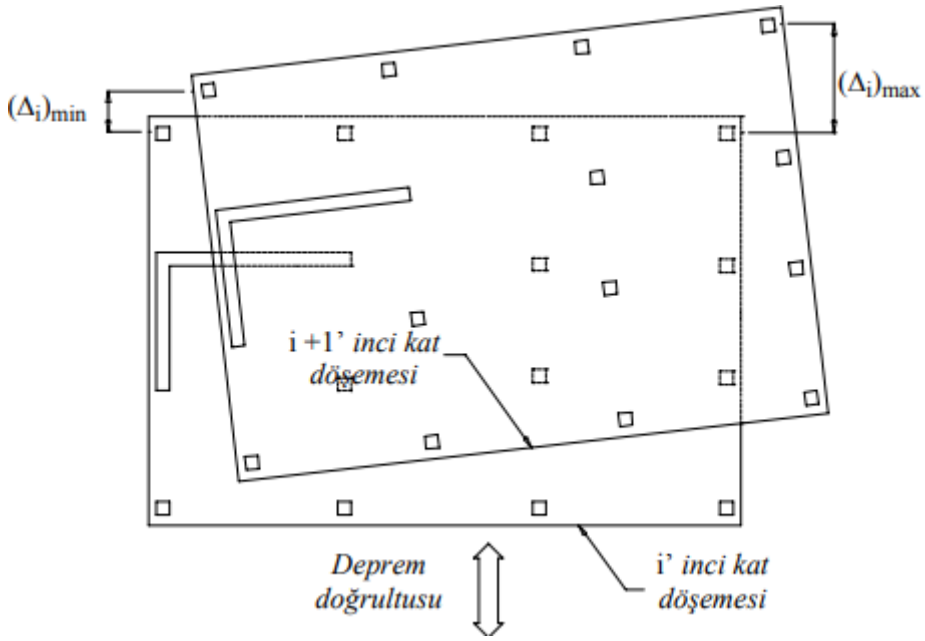
η_{bi} : burulma düzensizliği katsayısını,

$(\Delta_i)_{max}$: Herhangi bir i. katta en büyük göreli kat ötelemesini,

$(\Delta_i)_{ort}$: i. katta aynı doğrultudaki ortalama göreli ötelemeyi,

$(d_i)_{max}$: i. katta maximum kat deplasmanlarını,

$(d_i)_{min}$: i. katta minimum kat deplasmanlarını gösterir.



Şekil 3.1. A1-Burulma düzensizliği durumları [31]

Burulma düzensizliği katsayısı 1,2'den büyük olması halinde, yatay yükler hesaplanan arttırılmış ±%5 ek dışmerkezliklere göre bulunan kütle merkezlerine tatbik edilir ve elde edilen yeni iç kuvvetlerin tasarıma dikkate alınması öngörülür.

Sunulan tez çalışmasında burulma düzensizliğine sahip yapılar incelendiğinden, burulma düzensizliği ile ilgili sonraki bölümde geniş bir şekilde bilgi verilecektir.

3.2. A2 - Döşeme Süreksizlikleri

Döşeme süreksizliği bulunan binalarda kat döşemelerinin kendi düzlemleri içinde deprem yüklerini düşey taşıyıcı sistem elemanlarına (kolon ve perde-duvar gibi) güvenle dağıtılabildiği belirtilmelidir [31, 32]. Döşemelerde büyük boşluklar bulunması halinde rijit

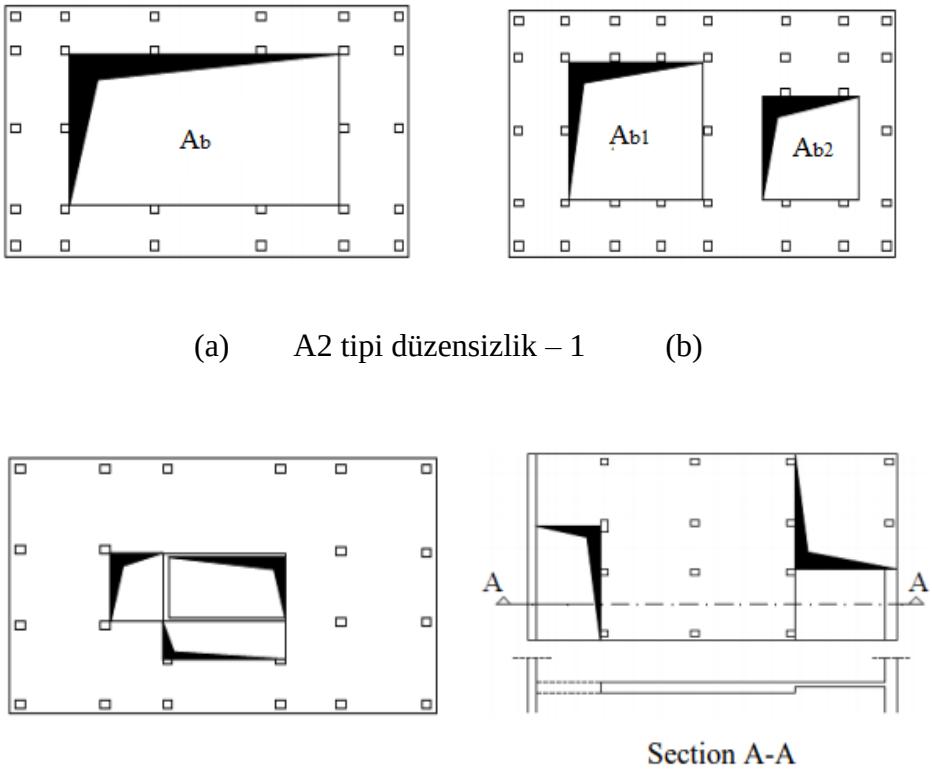
diyafram davranışı engellenir ve bu durum yönetmelikte öngörülen sistem rijitliğinin temin edilmesine engel olur.

Döşeme süreksizlikleri herhangi bir kattaki döşemede;

a- Merdiven ve asansör boşlukları dahil, boşluk alanları toplamının kat brüt alanının 1/3'ünden fazla olması durumu, (Şekil 3.2-a),
b- Deprem yüklerinin düşey taşıyıcı sistem elemanlarına güvenle aktarılabilmesini güçleştiren yerel döşeme boşluklarının bulunması durumu, (Şekil 3.2-b),
c- Döşemenin düzlem içi rijitlik ve dayanımında ani azalmaların olması durumlarının binada döşeme süreksizliğine sebep olduğu belirtilmiştir. (Şekil 3.2-c),

$A_b = A_{b1} + A_{b2}$ $A_b / A > 1/3$ (3.5)

Burada: A_b, boşluk alanları toplamı ve A, brüt kat alanını gösterir.



(a) A2 tipi düzensizlik – 1 (b)

(c) A2 tipi düzensizlik- 2 (d) A2 tipi düzensizlik - 2 ve 3

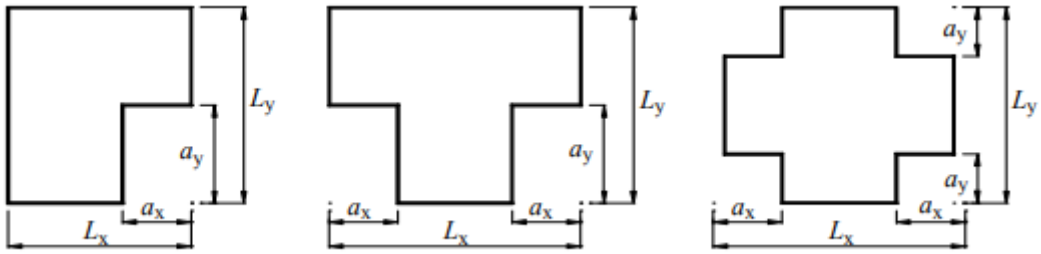
Şekil 3.2. A2 döşeme süreksizlik durumları [31]

Döşemenin rijit diyafram davranışı göstermesi açısından, boşluk oranının deprem yönetmeliğinde belirtilen 1/3 sınır değeri geçmesinin yanında simetrik olup olmaması da önem kazanmaktadır. Döşeme boşluklarının simetrik olmadığı ve bu bölgelerde kirişlerin sürekliliğinin temin edilmediği binalarda en büyük burulma etkileri meydana gelmekte ve yanal deplasmanlar artmaktadır. Döşeme boşluğunun her katta farklı yerlerde oluşması, A1 düzensizlik etkilerinin azaltılması bakımından olumlu etki vermektedir.

Bu tür düzensizliklerin oluşmasından kaçınılması önerilmektedir. Ancak bu tür düzensizliklerden kaçınılmazsa rijit diyafram kabulünü terk ederek döşemeyi küçük parçalara bölüp ve döşemenin kendi düzlemi içindeki eğilmesini de içeren bir çözüm bulunmalıdır. Kat yatay kuvvetinin de bu parçalara yayılı şeklide verilmesi halinde bu kuvvetin kolon ve perde-duvarlara aktarılması sırasında ortaya çıkabilecek olan ek gerilmeler belirlenir. Ayrıca döşeme süreksizlikleri gerektiğinde, döşemede kalınlığın arttırılması veya iki döşeme yüzüne donatı yerleştirilmesi vasıtasıyla giderilebilir [34].

3.3. A3 - Planda Çıkıntılar Bulunması

Bina kat planlarında çıkıntı yapan kısımların birbirine dik iki doğrultudaki boyutlarının her ikisinin de binanın o katının aynı doğrultulardaki toplam plan boyutlarının %20'sinden daha büyük olması durumu olarak ifade edilmiştir [31, 32](Şekil 3.3).

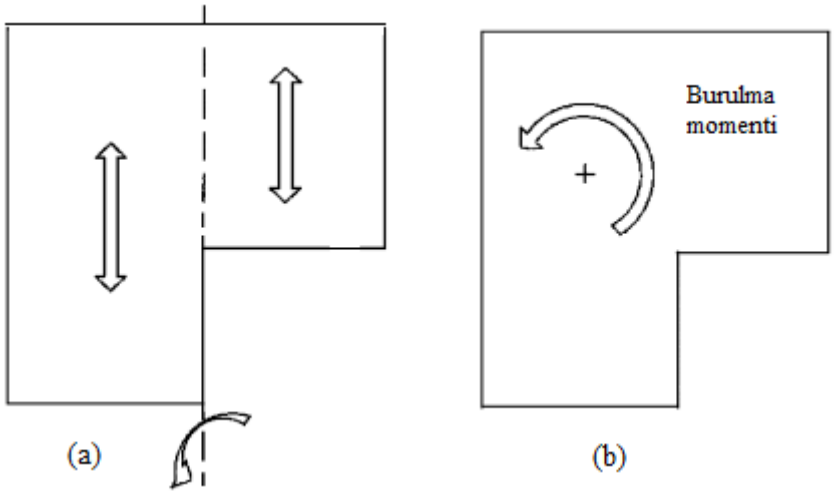


Ax > 0,2Lx ve aynı zamanda ay > 0,2 Ly

Şekil 3.3. A3 türü düzensizlik [31]

Şekil 3.3' te; L_x ve L_y, sırasıyla x, y-yönündeki binanın uzunluklarıdır. a_y ve a_x, sırasıyla x, y yönündeki yeniden giriş köşelerinin uzunluğudur.

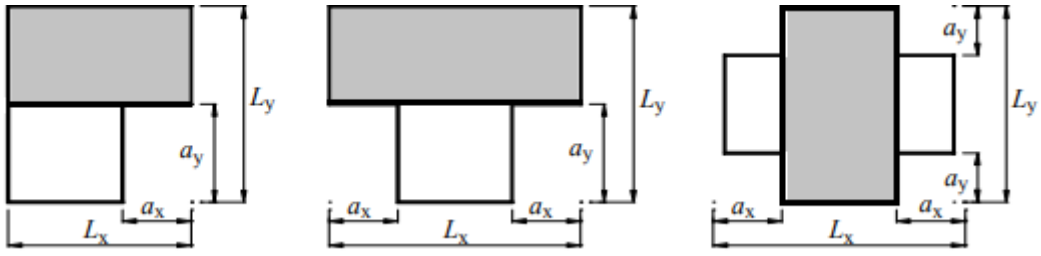
Mimari nedenlerden veya fonksiyonel gereksinimden dolayı hemen hemen tüm betonarme yapılar ve özellikle konut binaları planda çıkıntılar içerir. Çıkıntılar çok büyükse, yapı üzerinde ek gerilmelere neden olur. En kritik kesme kuvvetleri ve momentleri, Şekil (3.4)'de görüldüğü gibi, çıkıntı ve ana gövdenin kesişme çizgisinde meydana gelir. Ek olarak, binada burulma momentleri olacaktır.



Şekil 3.4. Plandaki çıkıntı yapan kısımların dezavantajları

Şekil 3.4' te (a)-momentler ve kesme kuvvetleri kontrol edilmelidir, (b)-burulma momentleri, kolonlarda ek kayma gerilmelerine neden olur.

Bu durumda; Şekil 3.5 'te gösterildiği gibi, "mümkünse, yapı, yapısal bağlantılarla birkaç bölüme bölünmelidir" [35]. Sonuç olarak, deprem derzleri bırakılması, burulma momentlerini azaltır ve düzensizliği önleyerek kolonlar üzerindeki ek kayma gerilmelerini önler.

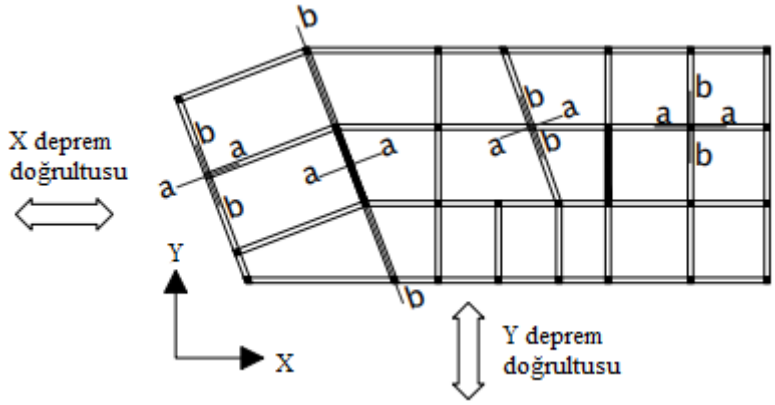


Şekil 3.5. Önleme yöntemi olarak birkaç bölüme ayrılmıştır

Planda çıkıntılar bulunması gerekirse yapı mühendisleri ek takviyeleri dikkate alınmalıdır. Ayrıca birçok depremde meydana gelen çarpmaların önlenmesi için kat ötelemelerinin miktarı sınırlandırılarak yapısal yönetmeliklerde verilen minimum gereksinimlerin karşılanması gerekmektedir.

3.4. A4 – Taşıyıcı Eleman Eksenlerinin Paralel Olmaması Durumu

A4 – Türü düzensizlik durumu; "Taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının plandaki asal eksenlerinin, göz önüne alınan birbirine dik yatay deprem doğrultularına paralel olmaması durumudur" [31, 33].



Şekil 3.6. A4 – Türü düzensizlik durumu [31]

Şekil 3.6' te gösterilen bu tür düzensizliklere sahip binalarda, taşıyıcı sistem elemanlarının asal eksen doğrultularındaki iç kuvvet büyüklüklerini elde etmek için mod birleştirme yöntemi kullanılacak olup bu kuvvetler aşağıda verilen bağıntılara göre bulunacaktır:

$$B_a = \pm B_{ax} \pm 0{,}30B_{ay} \quad \text{veya} \quad B_a = 0{,}3B_{ax} \pm B_{ay} \tag{3.6}$$

$$B_b = \pm B_{bx} \pm 0{,}30B_{by} \quad \text{veya} \quad B_b = 0{,}3B_{bx} \pm B_{by} \tag{3.7}$$

Denklem (3.6 ve 3,7)'de: B_a, taşıyıcı sistem elemanın (a) asal ekseni doğrultusunda tasarıma dikkate alan iç kuvvet büyüklüğünü; B_{ax}, taşıyıcı sistem elemanın (a) asal ekseni doğrultusunda, x ekseni doğrultusundaki depremden oluşan iç kuvvet büyüklüğünü; B_{ay}

taşıyıcı sistem elemanın (a) asal ekseni doğrultusunda, x eksenine dik y doğrultusundaki depremden oluşan iç kuvvet büyüklüğünü göstermektedir.
Bu tür bir düzensizlikle bir bina inşa etmek gerekirse ise, aşağıdaki gibi iki farklı çözüm yöntemi uygulanabilir:

1. Binanın sismik ayırma derzleri kullanılarak normal ve basit bölümlerine ayrılması.
2. Paralel olmayan yapı elemanlarında iç kuvvet değerlerinin arttırılması.

3.5. Burulmaya Karşı Tasarım için Yönetmelik Hükümleri

Modern sismik yönetmelikler [31-33, 36], düzensizlik derecesini ve bunlara karşılık gelen hükümler ve kısıtlamaları değerlendirmek için bazı tavsiyeler verse de bu tavsiyelerin cesaretini kırmak ve tasarımcıyı düzensizliklerin potansiyel olarak zararlı etkileri konusunda bilinçlendirmek olduğunu anlamak önemlidir.

Türk deprem yönetmeliklerde (TDY-2007) [31] tasarımcılar için temel tavsiye, mümkünse yapısal düzensizliklerden tamamen kaçınmaktır. Ayrıca yönetmelikler binalardaki çeşitli yapısal düzensizliklerin kullanımına, tasarım yükleri artış veya dinamik analiz gereksinimlerini gibi bazı sınırlamalar getirmektedir. Yönetmelik hükümlerine göre, tasarım çalışmasında burulma düzensizliği aşağıdaki şekilde dikkate alınır;

Burulma düzensizliği katsayısının 1,2’ den küçük çıkması durumunda burulma düzensizliğinin yapı davranışına önemli bir etkisinin olmadığı varsayılarak herhangi bir ilave işleme gerek duyulmaz.

Burulma düzensizliği katsayısı 1,2 ile 2 arasında olması halinde, yatay yükler hesaplanan arttırılmış ek dış merkezliklere göre bulunan kütle merkezlerine tatbik edilir ve elde edilen yeni iç kuvvetlerin tasarıma dikkate alınması öngörülür. Arttırılmış ek dış merkezlikler ±%5 (3.8) bağıntısı ile verilen büyütme katsayısı ile çarpılmasıyla bulunur [31-33].

$$D_i = \left(\frac{\eta_{bi}}{1,2}\right)^2 \qquad (3.8)$$

Yukarıda: D_i, i'inci katta ± %5 ek dışmerkezliğe uygulanan büyütme faktörünü göstermektedir.

Burulma düzensizliği katsayısı 2'den büyük olması yani üst sınır değerini aştığı durumlarda ise, birinci ve ikinci derece deprem bölgelerinde, burulmanın oluşturacağı yüksek modları göz önüne almak amacıyla, dinamik hesap yapılması zorunlu kılınmıştır. Ayrıca bu durumda yapısal sistem revize edilmeli veya değiştirilmeli ve analizler yeniden yapılmalıdır. Yönetmelik bu durum için birkaç sınır vermesine rağmen, burulma hareketlerinden kaçınmak daha iyidir.

Yapıda A2 ve A3 düzensizliği olarak adlandırılan döşeme süreksizliklerinin bulunması ve planda çıkıntıların bulunması durumunda rijit diyafram modeli yanlış sonuçlar verebilmektedir. Bu durumu engellemek için deprem bölgelerinde birinci ve ikinci derece, kat döşemelerinin kendi düzlemleri içinde deprem yüklerini düşey taşıyıcı elemanlarına aktardığı gösterilmelidir [31, 32].

Takip edilecek yol, "döşemenin yeterli sayıda üç boyutlu kabuk elemanlara bölünerek oluşturulacak sonlu elemanlar modelinin statik veya dinamik analizinin yapılmasıdır" [31]. Ayrıca modelde döşeme düğüm noktalarına kat kütlelerinin uygun bir şekilde dağıtılması gerekmektedir.

TDY-2007'de belirtilen planda düzensizlikler olduğunda yalnızca mekânsal 3 boyutlu modellemeye ve tasarıma izin verilmektedir. Ayrıca bazı simetri özelliklerinden yararlanılarak düzlemsel çerçeve şekilde incelemeye de izin verilir. Bu durumunda katlara etki eden yükler, rijitlik merkezinden geçmedi taktirde, 'kat kesme kuvvetinin oluşturduğu yatay öteleme yanında, kat burulma momentinden düşey eksen etrafında dönme de oluşur' [34].

4. PLANDA DÜZENSİZ YAPILARIN BURULMA TEPKİSİ

Yapıyı oluşturan elemanların kütlelerinin toplandığı ve yapıya gelen kuvvetlerin etkidiği nokta *kütle merkezi* olarak tanımlanmaktadır. Yatay yükler etkisinden bir yapının herhangi bir katındaki düşey taşıyıcılarda oluşan kesme kuvvetlerinin bileşkesinin geçtiği yer ise *"rijitlik merkezi"* olarak tanımlanmaktadır. Deprem kuvvetleri kat kütle merkezine etki etmektedir. Eğer rijitlik merkezi ile kütle merkezin üst üste olmaması veya aralarındaki mesafenin (dışmerkezlik) yönetmelikler tarafından belirlenen sınırları aşması halinde, katlar deprem etkisi altında x ve y doğrultularında öteleme yerdeğiştirmesi yanında yapı katlarının düşey eksen etrafında dönmeleri nedeniyle *burulma momentleri* oluşur [37]. 'Kat düzeyindeki bu burulma momenti kolonlarda ek kesme kuvveti oluşturur' [35].

Söylenmeli ki, basit bir plana sahip olan ancak kolonlarda veya duvarlarda simetri eksikliği olan bir bina (daha kısa yönde daha fazla bölme duvarı uzun yöne göre), veya yükseklikte bir düzensizlik, burulma etkileri üretir, düzgün bir şekilde değerlendirilmesi zor ve yıkıcı olabilir.

Deprem tasarım yönetmeliklerinin çoğunda tanınan burulma düzensizliği, farklı faktörlere bağlı olarak değişebilir. Elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, burulma katsayısının maksimum değerler almasında etkin olan faktörlerin sırasıyla,

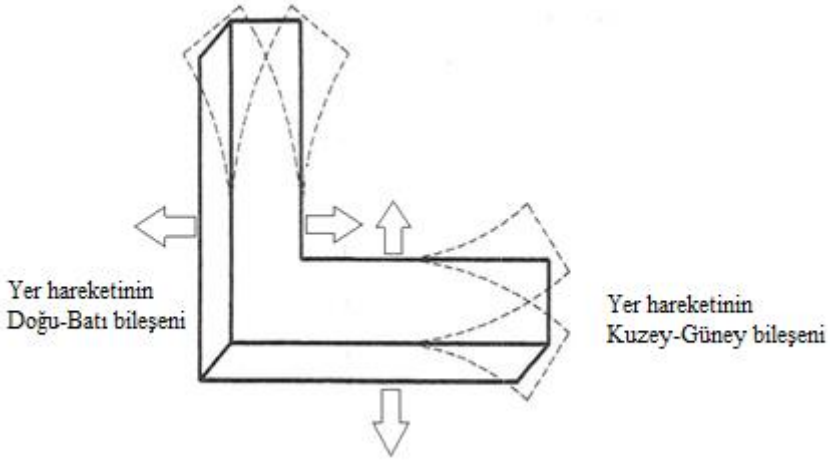
- Plan geometrisi,
- Kat sayısı,
- Düşey yapı elemanlarının boyutları ve konumları,
- Plandaki taşıyıcı olmayan duvarlar,

olduğu saptanmıştır.

Aşağıdakiler dahil olmak üzere burulma düzensizliğinin çeşitli yönlerini araştıran literatürde birçok çalışma vardır:

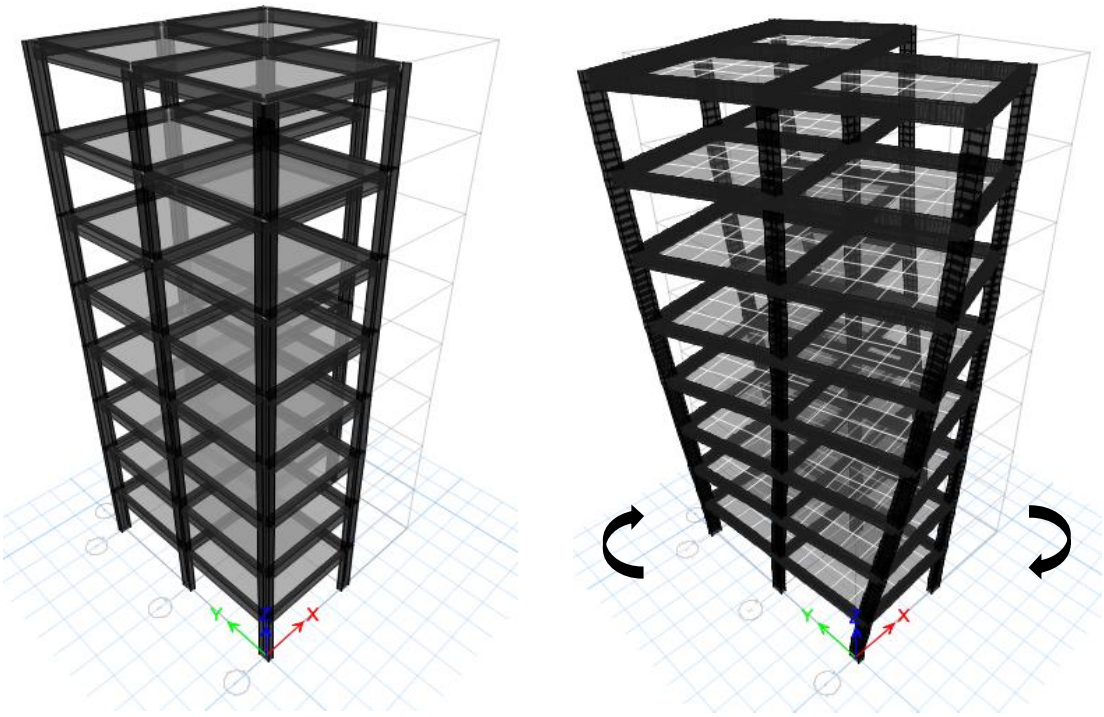
- Geometrik düzensizliği, [18-20]
- Rijitlik dağılımı, [19, 20]
- Yönetmelik hükümlerinin karşılaştırılması ve tartışılması, [19]
- Deneysel çalışmalar, [27-30]

Şekil 4.1'da görüldüğü gibi, planda L şeklindeki binaların büyük açıklıklar ile köşelerinde yatay kuvvet etkisi altında farklı yönlerde farklı hareketler yapmasından dolayı belirli bir eksene göre istenmeyen burulma ve stres yoğunlaşmasına meydana gelmektedir.



Şekil 4.1. L şeklindeki bina, köşelerde burulma ve gerilme birikimleri

Depremin etkisinde kalan bir binada burulma etkisinin ortaya çıkmaması için o binanın kütle merkezi ile depremin etkisindeki rijitlik merkezinin üst üste düşmesi gerekli olan şarttır. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi burulmaya bağlı dönme tamamen çökmeye neden olabilir.



Şekil 4.2. Yapılarda burulma etkileri yaratan durumları

"Kütle ve rijitlik merkezlerinin çakışmadığı bir bina (*dışmerkezlik bina*), zeminin tamamen ötelenme hareketiyle etkilediğinde bile birleştirilmiş burulma-öteleme hareketi yaşayacaktır" [35] (Bkz. Şekil 4.2). Geometriye bağlı olduğu için kütle merkezinin değiştirilmesi zordur. Bir tasarımcı, kolon ve perde gibi düşey yapısal elemanların kesit boyutlarını ve konumunu değiştirerek rijitlik merkezini değiştirebilir.

4.1. Tasarım Dışmerkezlik

Bir yapının herhangi bir kat planında plan düzleminden kütle merkezi ve düşey taşıyıcı elemanlarından rijitlik merkezi arasındaki uzaklığa *dışmerkezlik* denilmektedir. Bu uzaklık DBYBHY'de (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik) belirtildiği üzere o kat planındaki en uzun kenarın l/20'sini geçmemelidir. Eğer bu değer aşılırsa aradaki uzaklık kadar ek bir moment kolu oluşacağı için o kat yatay kuvveti etkisinde bir dönme hareketi yapar ve bu deplasman, yatay kuvvetinin büyüklüğüne bağlı olup, yapının yıkılmasına sebep olabilir.

Mevcut yapısal tasarım koşullarının çoğu, tasarımcının hem doğal hem de tesadüfi burulma kaynaklarını hesaba katan tasarım dışmerkezliğini kullanarak burulma davranışını dikkate almasını gerektirir [31, 33, 36]. *Doğal* dışmerkezlik, genel olarak, dikkate alınan kat seviyelerinde kütle merkezi (CM) ile rijitlik merkezi (CR) arasındaki mesafe olarak tanımlanırken, *tesadüfi* dışmerkezlik genellikle yer hareketinin düşey eksen etrafında dönme bileşeni gibi faktörleri hesaba katar.

En çok analiz edilen normlarda, tasarım dışmerkezliği, statik dışmerkezliğin muhtemelen bir katsayı ile çarpılmasıyla (esnek taraftaki elemanlar için yükseltme katsayısı ve rijit taraftaki elemanlar için bir azaltma katsayısı) ve deprem doğrultusuna dik binanın boyutunun bir yüzdesi olarak hesaplanan tesadüfi dışmerkezlik ile toplanmasıyla elde edilir [31], [35], [38]. Tasarım dışmerkezliğinin genel bir formülü aşağıdaki gibi yazılabilir:

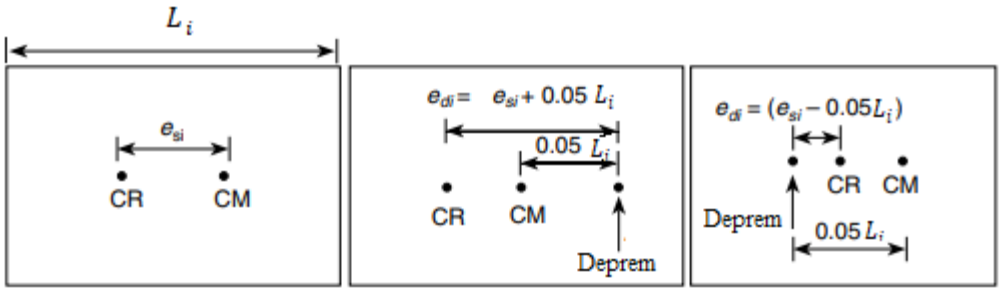
$$e_{di}^{+} = \alpha e_i + \beta L_i \ , \qquad e_{di}^{-} = \delta e_i - \beta L_i \tag{4.1}$$

Burada: e_{di}^{+} ve e_{di}^{-}, yanal sismik kuvvet için dikkate alınacak i katındaki iki tasarım dışmerkezliği; ei- katın kütle merkezi ile rijitlik merkezi arasındaki mesafe olarak tanımlanan i. kat için dışmerkezlik (doğal veya fiziksel dışmerkezlik); Li - binanın deprem

hareketi yönüne dik kat planı boyutu; α, β ve δ - çeşitli tasarım kodlarında belirtilen katsayılardır.

Farklı sismik kodlar, α, β ve δ için farklı bir değer kümesi belirtir. α (α ≥1) ve δ (δ ≤1) katsayıları, statik analizlerle dinamik etkilere yaklaşmayı amaçlayan doğal dışmerkezliğini artırır ve azaltır. Denklem (4.1)'in ilk bölümünün sadece eşdeğer statik analizlerle kullanılacağına dikkate alınır, dinamik analizler için ise sadece ikinci terim, tesadüfi dışmerkezlik olarak adlandırılan, β katsayısı genellikle 0,05 veya 0,10 değerlere sahip olup, tesadüfi dışmerkezlikler sırasıyla 0,05L veya 0,10L olur. TDY-2007'de bu katsayısılar α=1,0, β=0,05 ve δ=1,0 olarak belirtilmektedir.

Denklem (4.1) 'deki ilk terimin doğal burulmanın etkisini açıklarken, ikinci terimin tesadüfi burulmanın katkısını dikkate aldığı not edilebilir. Şekil 4.3, tasarımda dikkate alınması gereken tasarım dışmerkezliğinin açıklamasıyla birlikte bir binanın planını göstermektedir. Şekil 4.3'te 0,05 faktörü, tesadüfi dışmerkezliğinin kapsamını temsil eder.



(a) (b)

Şekil 4.3. Kat planı üzerinde rijitlik ve kütle merkezi arasında dışmerkezlik [35]

Şekil 4.3'te; (a) hesaplanan rijitlik merkezi (CR) ve kütle merkezi (CM) konumlarını gösteren bina kat planını, (b) maksimum dışmerkezliğin olası nedenleri, e_{di}. x ve y yönlerindeki statik dışmerkezlikler aşağıdaki denklemlerden formüle edilebilir;

$$e_x = |X_{CM} - X_{CR}|\ , \qquad e_y = |Y_{CM} - Y_{CR}| \tag{4.2}$$

Mutlak dışmerkezlik (e_s), kütle merkezleri ve rijitlik merkezi arasındaki mutlak mesafe olarak tanımlanabilir, aşağıdaki denkleme bakınız;

$$e_s = \sqrt{\left((e_x)^2 + \left(e_y\right)^2\right)} \tag{4.3}$$

Burada: e_x; x yönündeki dışmerkezlik, e_y; y yönündeki dışmerkezliktir. Bu çalışmada, sistemin mevcut dışmerkezliği (e_s) ile sembolize edilmiştir.

4.2. Ek Dışmerkezlik Etkisi

Kat kütlelerinin konumlarındaki yer hareketinin boyutsal değişimi ve belirsizliğini hesaba katabilmek amacıyla, her kat seviyesinde hesaplanmış kat kütleleri her iki doğrultuda tanımlanmış konumlarında ± %5 ek dışmerkezlik kullanılması öngörülmektedir.

Daha önce bölüm 3'te de belirtildiği gibi, yapılan analizlerde burulma düzensizlik katsayısı ($1{,}2 < \eta_{bi} < 2$) aralıkları içindeyse, bu durumda, her katta uygulanan ±%5 ek dış merkezlik, her iki deprem doğrultusu için D_i (Denklem 3.8) katsayısı ile çarpılarak büyütülür ve taşıyıcı sistemin daha fazla zorlanması temin edilir [31, 33].

$$e_{xi}=0{,}05Lxi\left[\frac{\eta_{bi}}{1{,}2}\right]^2 , \quad e_{yi}=0{,}05Lyi\left[\frac{\eta_{bi}}{1{,}2}\right]^2 \tag{4.5}$$

4.3. Kütle Merkezi

Kütle merkezi, sistemin tüm parçalarının kütlelerine göre ağırlıklandırılmış ortalama konumu olarak tanımlanan bir konumdur. Kütle dağılımı kütle merkezi etrafında dengelenir ve dağıtılmış kütlenin ağırlıklı konum koordinatlarının ortalaması olarak tanımlanır. Bir deprem sırasında, her kat seviyesinde ivme kaynaklı atalet kuvvetleri üretilecek ve tüm katın kütlesinin yoğunlaştığı varsayılabilecek bir noktada hareket edecektir. Simetrik bir kütle dağılımına sahip bir binada, zemin kütlelerinin merkezlerinin pozisyonları kattan kata farklılık göstermeyecektir. Bununla birlikte, bir binanın yüksekliği boyunca düzensiz kütle dağılımı, çeşitli katlarda kütle merkezlerinde değişikliklere neden olabilir. Kütle merkezinin konumları x ve y yönlerinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir [35];

$$X_{CM}= \frac{\sum_{i=1}^{n} m_{iy}\, e_{xi}}{\sum_{i=1}^{n} m_{iy}}, \qquad Y_{CM}=\frac{\sum_{i=1}^{n} m_{ix}\, e_{yi}}{\sum_{i=1}^{n} m_{ix}} \tag{4.6}$$

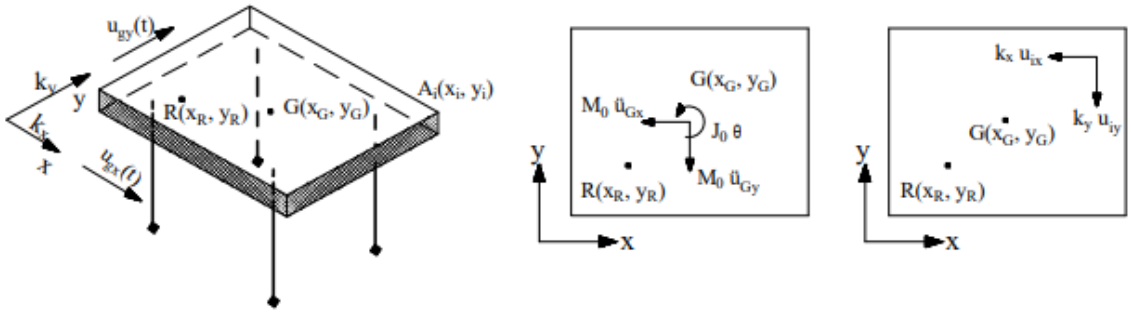
Burada: m_i, i'inci toplam kütle olduğunda; e_{xi} ve e_{yi}, x ve y yönlerinde karşılık gelen m_i kütlesinin yerleridir.

4.4. Rijitlik Merkezi

"Rijitlik merkezi, belirli bir kattaki bir noktadır, çünkü bu noktada yanal yükün uygulama konumu, o katın dönüşünü sağlamayacaktır" [39]. Bu tanım, döşeme rijit bir diyafram olarak modellendiğinde geçerlidir. Bir Diyafram Kısıtlaması, tüm kısıtlanmış bağlantılarının, membran deformasyonuna karşı rijit olan düzlemsel bir diyafram olarak birlikte hareket etmesine neden olur. Bu tanıma göre rijitlik merkezinin hesaplanması, sonlu elemanlar (FEM) analiz yazılımında (ETABS®, vb.) benimsenmiştir.

Tek katlı sistemlerde bu merkez çakışır. Ancak çok katlı binalar söz konusu olduğunda bu merkez çakışmaz ve etkileri geçmişte pek çok araştırmacının konusu olmuştur [39], [34].

Rijitlik merkezinin konumları x ve y yönlerinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir [34];



Şekil 4.4. Yer hareketi altındaki 3B çerçeve atalet ve elastik kuvvetler [34]

Yer hareketi altındaki üç boyutlu çerçevenin deplasman vektörü u_{gx} (t) ve u_{gy} (t) (Şekil 4.4), $R(x_R, y_R)$ noktasına iki doğrultuda ötelemesini ve bu nokta etrafında katın dönmesini olarak $(u_{Rx},\ u_{Ry},\ \theta_0)$ şeklinde kabul edilecektir. Burada $A_i(x_i,\ y_i)$ bir kolonun üst ucunu ve u_{ix} ve u_{iy} bu ucun yatay deplasmanlarını göstermektedir. Rijit diyaframın üç hareket denklemi, iki yöndeki hareket denklemi ile elastik kuvvetlerin ve atalet kuvvetlerinin $R(x_R, y_R)$ noktasına göre moment yazılarak üç adet denklem elde edilir:

$$M_0 \ddot{u}_{Gy} + \sum_i k_{iy}\, u_{iy} = - M_0\, \ddot{u}_{gy}$$

$$J_0\, \ddot{\theta} - M_0\, \ddot{u}_{Gx}(y_G - y_R) + M_0\, \ddot{u}_{Gy}\,(x_G - x_R) - \sum_i k_{ix}\,(y_i - y_R) + \sum_i k_{iy}\, u_{iy}\,(x_i - x_R) =$$

$$= M_0\, \ddot{u}_{gx}(y_G - y_R) + M_0\, \ddot{u}_{gy}\,(x_G - x_R) \qquad (4.7)$$

Burada: M_0 kat kütlesini, J_0 katın düşey eksen etrafındaki kütlesel atalet momentini ve G noktasına da kat kütle merkezini göstermektedir. kix ve kiy, i'inci kolonun x ve y yönündeki rijitliklerine karşı gelmektedir.

Rijit diyaframın, asal eksenleri seçilen (x, y) eksenleri ile uyuşan kolonlar tarafından mesnetlediği kabul edilmiştir. Rijit diyafram üzerinde bulunan herhangi bir $A_i(x_i,\ y_i)$ noktasında θ_0 dönmesi yanında iki doğrutuda aşağıdaki denklem (4.8)' göre yerdeğiştirmeler meydana gelir.

$$u_{Gx} = u_{Rx} - \theta_0(y_G - y_R)\ , \qquad u_{Gy} = u_{Ry} - \theta_0(x_G - x_R)$$

$$u_{ix} = u_{Rx} - \theta_0(y_i - y_R)\ , \qquad u_{iy} = u_{Ry} - \theta_0(x_i - x_R) \qquad (4.8)$$

Yukarıdaki deplasman denklem ifadeleri kullanılarak hareket denklemleri $R(x_R, y_R)$ noktasının $(u_{Rx},\ u_{Ry},\ \theta_0)$ deplasmanlarına bağlı olarak matris biçiminde ifade edilebilir.

$$m\ddot{u} + ku = -p(t) \qquad u^T = [u_{Rx} \quad u_{Ry} \quad u_\theta] \qquad (4.9)$$

$$m = \begin{bmatrix} M_0 & 0 & -M_0(y_G - y_R) \\ 0 & M_0 & -M_0(x_G - x_R) \\ -M_0\,(y_G - y_R) & M_0(x_G - x_R) & j_o + M_0\,(x_G - x_R)^2 + M_0(y_G - y_R)^2 \end{bmatrix}$$

$$k = \sum_{i=1}^{n} \begin{bmatrix} k_{ix} & 0 & -k_{ix}(y_i - y_R) \\ 0 & k_{iy} & k_{iy}(x_i - x_R) \\ -k_{ix}(y_i - y_R) & k_{iy}(x_i - x_R) & k_{iy}(x_i - x_R)^2 + k_{ix}(y_i - y_R)^2 \end{bmatrix} \qquad (4.10)$$

$$p = \begin{Bmatrix} -m\ddot{u}_{gx} \\ -m\ddot{u}_{gy} \\ -m(x_G - x_R)\,\ddot{u}_{gy} + m(y_G - y_R)\,\ddot{u}_{gx} \end{Bmatrix}$$

olarak yazılabilir.

Burada kolon asal rijitlik eksenlerinin x ve y yönünde olduğu kabul edilmiştir. Bu denklemlerin incelenmesinden rijitlik matrisinde dönme hareketinin yatay deplasmanlara rijitlik matrisinin $k_{xy} = k_{yx}$ elemanlarıyla etkili olduğu görülür. Statik yük durumunda bu etkileşim kaybolması şartından şekil planda rijitlik merkezine etki eden veya dışmerkez olarak etki eden kuvvet altında deplasman rijitlik merkezi olarak kabul edilen noktasının koordinatları X_{CR} ve Y_{CR} bulunur [34].

$$k_{xi} = \sum_{i=1}^{n} k_{xi}\ , \qquad k_{yi} = \sum_{i=1}^{n} k_{yi}\ , \qquad k_{\theta i} = \sum_{i=1}^{n} k_{\theta i}$$

$$k_{x\theta i} = k_{\theta xi} \sum_{i=1}^{n} k_{x\theta i}\ , \qquad k_{y\theta i} = k_{\theta yi} = \sum_{i=1}^{n} k_{y\theta i}\ , \qquad k_{xyi} = k_{yxi} = \sum_{i=1}^{n} k_{xyi}$$

$$X_{CR} = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_{iy}\, x_i}{\sum_{i=1}^{n} k_{iy}}\ , \qquad Y_{CR} = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_{ix}\, y_i}{\sum_{i=1}^{n} k_{ix}} \tag{4.11}$$

Burada: k_{ix} ve k_{iy} i'inci kolonun x ve y yönlerindeki rijitlikleri, n, i'inci kattaki toplam kolonlarını göstermektedir.

Taşıyıcı sistemde burulma momenti meydana getirecek ek etkilerin azaltılması için, ön projelendirme döneminden başlayarak planda rijitlik merkezi ile kütle merkezinin yaklaştırılması amacıyla çaba harcanmalıdır. Bu amaçla, gerekirse taşıyıcı sistem planda derzlerle düzgün dikdörtgen kısımlara ayrılabilir.

5. DEPREM YÜKÜ HESAP YÖNTEMLERİ

TDY-2007'ye göre depreme dayanıklı yapıların tasarımındaki önemli esaslar;

- Hafif şiddetteki depremlerde, yapısal ve yapısal olmayan elemanların hasar görmemesi,
- Orta şiddetteki depremlerde, yapısal ve yapısal olmayan elemanlardaki hasarın sınırlı ve onarılabilir düzeyde olması,
- Şiddetli depremlerde, can güvenliğini sağlamak amacıyla kalıcı yapısal hasar oluşumunun sınırlandırılması olarak ifade edilir [31].

Bu yönetmeliğe göre, yeni yapılacak binaların tasarımında dikkate alınacak tasarım depremi, şiddetli depreme karşılık gelmektedir ve bu deprem, bina önem katsayısı I = 1 olan binalar için 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %10 olan depremdir [31].

Bu tez çalışmasında binaların deprem hesabında kullanılacak yöntemler; Eşdeğer Deprem Yükü yöntemi (EDY) ve dinamik yöntemler ise Mod Birleştirme Yöntemi (MBY) kullanılmıştır. Bu yöntemlerin aşağıda detaylı şeklide açıklamıştır.

5.1. Elastik Deprem Yüklerinin Tanımlanması

5.1.1. Spektral ivme katsayısının bulunması

Deprem yüklerinin belirlenmesi için esas alınacak olan Spektral İvme Katsayısı, A(T), Denklem (5.1a) ile verilmiştir. %5 sönüm oranı için tanımlanan Elastik İvme Spektrumunun ordinatı olan Elastik Spektral İvme, $S_{ae}(T)$ (Denklem 5.1b), Spektral İvme Katsayısı, A(T) ile yerçekimi ivmesi g'nin çarpımına karşı gelmektedir**.**

$$A(T) = A_0 \, I \, S(T) \tag{5.1a}$$

$$S_{ae}(T) = A(T)g \tag{5.1b}$$

(5.1a) denkleminde, A_0 etkin yer ivmesi katsayısını, I bina önem katsayısını, S(T) spektrum katsayısını göstermektedir.

5.1.2. Etkin yer ivmesi katsayısı (A_0)

Etkin yer ivme katsayısı (A_0) Çizelge 5.1′de verilmiştir. Yapının bulunduğu deprem bölgesine bağlı olarak bulunur.

Çizelge 5.1. Etkin yer ivme katsayısı

Deprem Bölgesi	A_0
1	0,40
2	0,30
3	0,20
4	0,10

5.1.3. Spektrum katsayısı S(T)

Spektrum katsayısı S(T), yerel zemin koşulları ve binanın doğal titreşim periyodu T′ye bağlı olarak (5.2) denklemiyle hesaplanabilir. Spektrum karakteristik periyotları T_A ve T_B, yerel zemin sınıflarına göre Çizelge 5.2′te verilmiştir.

$$S(T_i)=1+1,5\,\frac{T_i}{T_A}\ , \qquad 0 \le T_i \le T_A \tag{5.2a}$$

$$S(T_i)=2,5\ , \qquad T_A \le T_i \le T_B \tag{5.2b}$$

$$S(T_i)=2,5\left(\frac{T_B}{T_i}\right)^{0,8}\ , \qquad T_i \ge T_B \tag{5.2c}$$

Çizelge 5.2. Spektrum karakteristik periyotları

Yerel zemin sınıfı	T_A (saniye)	T_B (saniye)
Z1	0.10	0.30
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90

5.1.4. Bina önem katsayısı (I)

Bina önem katsayısı, I, Çizelge 5.3′de tanımlanmıştır.

Çizelge 5.3. Bina önem katsayısı

Bina Kullanım Amacı veya Türü	Bina Önem Katsayısı (I)
1. Deprem sonrası kullanımı gereken binalar ve tehlikeli madde içeren binalar a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminalleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri; vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları) b) Toksit, patlayıcı, parlayıcı, vb özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar	1,5
2. İnsanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu ve değerli eşyanın saklandığı binalar a) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kışlalar, Penaltı evleri, vb. b) Müzeler	1,4
3. İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar Spor tesisleri, sinema, tiyatro ve konser salonları, vb.	1,2
4. Diğer binalar Yukarıdaki tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb)	1

5.1.5. Elastik deprem yükü azaltma katsayısı $R_a(T)$

Depremde taşıyıcı sistemin kendine özgü lineer elastik olmayan davranışını dikkate almak üzere spektral ivme katsayısına göre bulunacak elastik deprem yükleri, $R_a(T)$ deprem yükü azaltma katsayısına bölünecektir. $R_a(T)$, yapı davranış katsayısı R ve doğal titreşim periyodu T′ye bağlı olarak aşağıdaki (5.3 ve 5.4) denklemleri yardımıyla belirlenecektir.

Çizelge 5.4. Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R)

Bina Taşiyici Sistemi	Süneklik Düz. N. Sistemle	Süneklik Düz. Y. Sistemle
Yerinde dökme betonarme binalar		
1) Deprem yüklerinin tamamının çerçevelerle taşındığı binalar	4	8
2) Deprem yüklerinin tamamının bağ kirişli (boşluklu) perdelerle taşındığı binalar	4	7
3) Deprem yüklerinin tamamının boşluksuz perdelerle taşındığı binalar	4	6

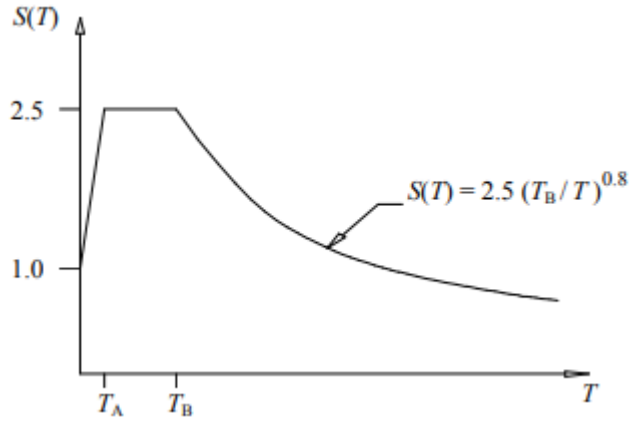
$$R_a(T) = 1{,}5 + (R - 1{,}5)\frac{T}{T_A}\ , \qquad 0 \le T \le T_A \tag{5.3}$$

$$R_a(T) = R \qquad T_A \le T \tag{5.4}$$

Tamamı TDY 2007'de [31] bulunan çizelgenin konu ile ilgili bölümü alınmıştır.

5.1.6. Özel tasarım ivme spektrumları

Gerekli durumlarda, elastik tasarım ivme spektrumu, yerel deprem ve zemin koşulları dikkate alınarak yapılacak özel incelemelerle da belirlenebilir.



Şekil 5.1. Elastik tasarım spektrumu (TDY-2007)

Ancak, bu şekilde elde edilen ivme spektrum koordinatlarına karşılık gelen spektral ivme katsayıları, Çizelge 5.2'de belirtilen ilgili karakteristik periyotlara dayalı olarak Denklem (5.1) ile belirlenenlerden hiçbir durumda daha düşük olmayacaktır.

5.2. Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi

Eşdeğer deprem yükü yönteminin uygulanabileceği binalar Çizelge 5.5' de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Eşdeğer deprem yükü yönteminin uygulanabileceği binalar

Deprem Bölgesi	Bina Türü	Toplam Yükseklik Sınırı
1, 2	Her bir katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \leq 1{,}2$ koşulunu sağladığı binalar.	$H_N \leq 25$ m
1, 2	Her bir katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \leq 1{,}2$ koşulunu sağladığı ve ayrıca B2 türü düzensizliğinin olmadığı binalar.	$H_N \leq 40$m
3, 4	Tüm binalar	$H_N \leq 40$ m

5.2.1. Toplam eşdeğer deprem yükünün belirlenmesi

Göz önüne alınan deprem doğrultusunda, binanın tümüne etkiyen Toplam Eşdeğer Deprem Yükü (taban kesme kuvveti) V_t, aşağıda verilen (5.5) denklem ile belirlenecektir.

$$V_t = \frac{W\, A(T_1)}{R_a(T_1)} \geq 0{,}1\, A_0\, I\, W \qquad (5.5)$$

Burada:

V_t: Taban kesme kuvveti,

W: binanın deprem hesabına katılan toplam ağırlığını,

$A(T_1)$: birinci doğal titreşim periyoduna karşı gelen spektral ivme katsayısını,

$R_a(T_1)$: deprem yükü azaltma katsayısını,

A_0: etkin yer ivmesi katsayısını,

I: bina önem katsayısını göstermektedir.

5.2.2. Binanın deprem hesabına katılan toplam ağırlığının (W) belirlenmesi

Binanın deprem yüklerinin hesaplanmasında kullanılacak olan toplam ağırlığı, aşağıda verilen denklemi kullanılarak belirlenecektir.

$$W=\sum_{i=1}^{N} W_i \quad , \qquad W_i = G_i + nQ_i \tag{5.6}$$

Burada:
N: kat sayısı,
W_i: binanın i. katının hareketli yük katılım katsayısı kullanılarak hesaplanan ağırlığı,
g: kat sabit yükleri toplamını,
Q_i: i. kat hareketli yükleri toplamını,
n: hareketli yük katılım katsayısını göstermektedir ve Çizelge 5.6 ′de verilmiştir.

Deprem yüklerinin belirlenmesinde kullanılacak çatı katı ağırlığının hesabında kar yüklerinin %30'u dikkatte alınacaktır.

Çizelge 5.6. Hareketli yük katılım katsayısını

Binanın Kullanım Amacı	n
Depo, antrepo, vb.	0,80
Okul, öğrenci yurdu, spor tesisi, sinema, tiyatro, konser salonu, garaj, lokanta, mağaza, vb.	0,60
Konut, işyeri, otel, hastane, vb.	0,30

5.2.3. Katlara etkiye eşdeğer deprem yüklerinin belirlenmesi (F_i)

Toplam eşdeğer deprem yükü bina katlarına aşağıda verilen (5.7) denklemi yardımıyla dağıtılabilir.

$$V_T = \Delta F_N + \sum_{I=1}^{N} F_I \tag{5.7}$$

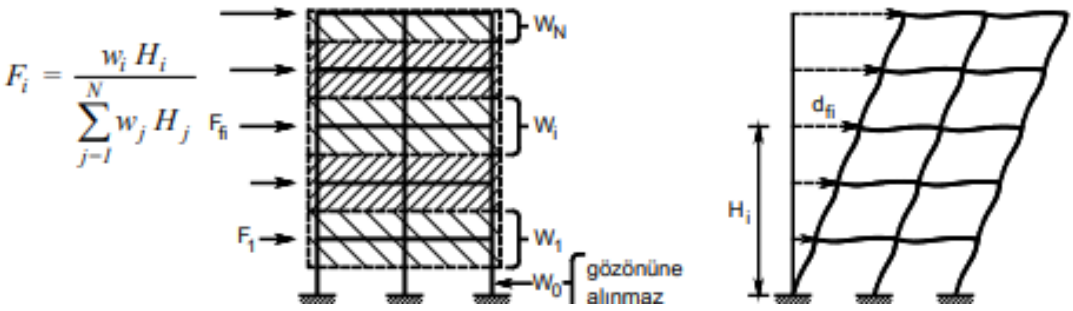
Bina tabanına gelen eşdeğer deprem yükü, bina katlarına dağıtılır. Binanın en üst katına diğer katlardan farklı olarak ek eşdeğer deprem yükü, ΔF_N, etkir.

Binanın N' inci katına (tepesine) etkiyen ek eşdeğer deprem yükü ΔF_N'in değeri, hesaplanan birinci doğal titreşim periyodu T_1 bağlı olarak, aşağıdaki ifade ile belirlenecektir.

$$\Delta F_N = 0{,}0075\ N\ V_t \tag{5.8}$$

$H_N \leq 25m$ için $\Delta F_N = 0$ alınacaktır. (5.7) denkleminde ΔF_N bina N' inci katına (tepesine) etki eden ek eşdeğer deprem yükünü, N binanın temel üstünden itibaren toplam kat sayısı (bodrum katlarında rijit çevre perdelerinin bulunduğu binalarda zemin kat döşemesi üstünden itibaren toplam kat sayısını) dır. Toplam eşdeğer deprem yükünün ΔF_N dışında geri kalan kısmı, N' inci kat dahil olmak üzere, bina katlarına Denklem (5.9) ile dağıtılacaktır. Şekil 5.2'de kat ağırlıklarının belirlenmesi, katlara etkiyen fiktif deprem yükleri ve yerdeğiştirmeleri gösterilmiştir.

$$F_i = (Vt\text{-}\Delta F_N)\frac{W_i H_i}{\sum_{j=1}^{n} W_j H_j} \tag{5.9}$$

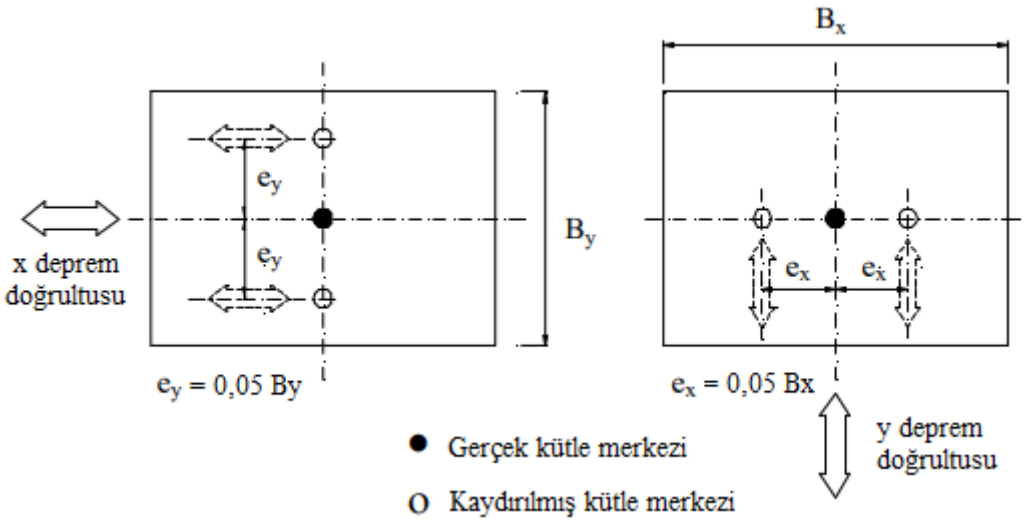


Şekil 5.2. Fiktif yükler ve yerdeğiştirmeler [40]

5.2.4. Gözönüne alınacak yerdeğiştirme bileşenleri ve deprem yüklerinin etkime noktaları

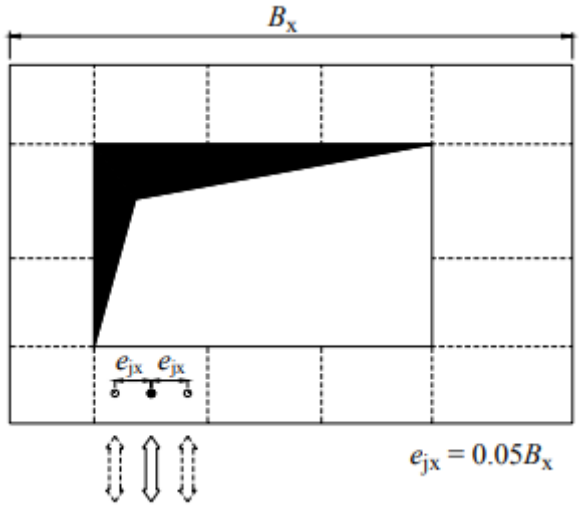
Döşemelerin yatay düzlemde rijit diyafram olarak çalıştığı binalarda, her katta iki yatay yerdeğiştirme bileşeni ile düşey eksen etrafındaki dönme, bağımsız yerdeğiştirme bileşenleri olarak dikkate alınacaktır [33]. Her katta belirlenen eşdeğer deprem yükleri kat kütle merkezine ve ayrıca ek dışmerkezlik etkisinin hesaba katılması için kaydırılmış kütle

merkezlerine tekil yatay yük olarak uygulanmalıdır. Yapılan analiz sonucunda kat deplasmanları ve iç kuvvetleri bulunur. Kaydırılmış kütle merkezleri, gerçek kütle merkezinin ±%5 kaydırılması ile belirlenen noktalardır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Kaydırılmış kütle merkezi [31]

Döşemelerin yatay düzlemde rijit diyafram olarak çalışmadığı yapılarda, döşemelerin yatay düzlemdeki deformasyonlarının dikkate alınmasını sağlayacak yeterlikte bağımsız statik yerdeğiştirme bileşeni hesapta dikkate alınacaktır [33].



Şekil 5.4. Kaydırılmış kütle merkezi [31]

Ek dışmerkezlik etkisinin hesaba katılabilmesi için her katta farklı noktalarda dağınık bulunan tekil kütlelere etki eden eşdeğer deprem yüklerinin her biri deprem doğrultusuna dik yöndeki kat boyutunun $\pm\%5$'i kadar kaydırılacaktır (Şekil 5.4).

5.2.5. Binanın birinci doğal titreşim periyodunun belirlenmesi

Binanın deprem doğrultusundaki hâkim doğal periyodu Rayleigh oranı adı verilen (5.10) denklemi ile hesaplanır.

$$T_1 = 2\pi \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} m_i \, d_{fi}^2}{\sum_{i=1}^{N} F_{fi} \, d_{fi}} \right)^{1/2} \tag{5.10}$$

Burada; F_{fi} i'inci kata etkiyen fiktif yükü, m_i binanın i'inci katının kütlesini, d_{fi} i'inci kattaki fiktif yerdeğiştirmeyi göstermektedir. Fiktif yükü gösteren F_{fi}, (5.9) denkleminde $(Vt - \Delta F_N)$ yerine herhangi bir değer (örneğin birim değer) konularak bulunulacaktır. Denklem (5.10)'dan bağımsız olarak bodrum katları hariç kat sayısı N > 13 olan binalarda doğal periyot 0,1N'den büyük alınamamaktadır.

Eşdeğer deprem yükü yöntemiyle örnek 5.1'deki yol izlenecektir.

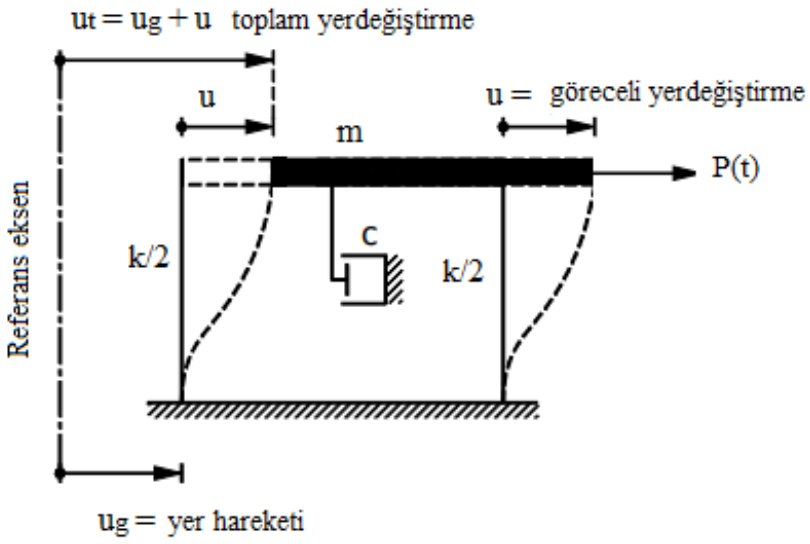
5.3. Mod Birleştirme Yöntemi (Dinamik Analizi)

Bu bölümde, dinamik çözüm yöntemlerinden biri olan Mod Birleştirme Yöntemi (MBY) anlatılmaktadır. Bu yöntemde "maksimum iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeler, binada yeterli sayıda doğal titreşim modunun her biri için hesaplanan maksimum katkıların istatistiksel olarak birleştirilmesi ile elde edilir" [31]. Bu yönteme aynı zamanda *modal yöntem* veya *mod süper pozisyon* yöntemi de denir. Yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi için yapı dinamiği konusuna ait bazı kavramlar özetlenmektedir.

5.3.1. Tek katlı yapının dinamik tepkisi

Bir yapının tüm kütlelerini orijinal konumlarına göre yer değiştirmiş konumunu tanımlamak için gereken bağımsız yerdeğiştirme sayısı dinamik analiz için *serbestlik derecesi sayısı* olarak adlandırılır [37]. 'Tek serbestlik dereceli (TSD) sistemler, bir sistemin hareket

halinde bulunduğu konum, tek bir parametrenin verilmesi ile belirlenebilen sistemlerdir' [34]. Tek katlı bir yapı, Tek serbestlik dereceli sistem olarak modellenebilir. Yapının her olası yerdeğiştirmesi, bir serbestlik derecesi olarak bilinir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Yer hareketi etkisindeki TSD sönümlü sistem [34]

Şekil 5.5'de görüldüğü gibi dış yükün etkimediği, yalnızca depremin neden olduğu yer hareketinin bulunduğu tek serbestlik dereceli sistemde yerdeğiştirme bileşeni u_g (t), hızı u(t) ve ivmesi $\ddot{u}_g$(t) olsun. Bu yer hareketi etkisinde zemin u_g(t) yerdeğiştirmesini yaparken yapının üst noktası zemine göre göreceli olarak u(t) yerdeğiştirmesini yapar.

Hareket denklemi

Bir sistemin dinamik davranışının belirlenebilmesi için sistemin hareket denkleminin yazılmasına ihtiyaç vardır. Hareket denklemi, sisteme etkiyen kuvvetler, atalet kuvvetinin de eklenmesiyle, kuvvet dengesi olarak da görülebilir. Yer hareketi etkisindeki tek serbestlik dereceli sistemin dinamik davranışı denklem (5.11) ile belirlenir [34, 37].

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \qquad (5.11)$$

Burada; m cismin kütlesini, üg(t) yer hareketini, u(t) yapısal yerdeğiştirme, k yatay rijitlik katsayısını ve c Sönüm katsayısı (titreşim sırasında tüketilen enerjinin bir ölçüsü) göstermektedir.

$k = m\omega^2$ ve $c = 2m\xi\omega$, denklem (5.11) şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2 u = -\ddot{u}_g \quad (5.12)$$

Denklem 5.12, deprem kaynaklı yer ivmesi nedeniyle bir sistemin tepkisinin yalnızca sistemin doğal frekansı ω_n ve kritik sönümleme oranına, ζ bağlı olduğunu gösterir. Bu denklemde $\ddot{u}_g$ yer ivmesi, k yatay rijitlik, $\omega = \sqrt{k / m}$ dairesel frekans, ξ sönüm oranı ve c yapının sönümleme katsayısıdır.

5.3.2. Çok serbestlik dereceli sistemler

Yapılar her zaman TSD sistemleri olarak modellenemez. Aslında yapılar sürekli sistemlerdir ve sonsuz serbestlik derecelerine sahiptir. Çok katlı binalar, çok serbestlik dereceli bir sistemin en uygun örneğidir. 'Çok serbestlik dereceli (ÇSD) sistemler, bir sistemin hareket halinde bulunduğu konum, birden fazla parametrenin verilmesi ile belirlenebilen sistemlerdir' [34, 37]. Çok serbestlik dereceli sistemlerin incelenmesinde de tek serbestlik dereceli sistemlerin ana kavramlar kullanılır. Sistemin serbestlik derecesi, hareket halindeki konumunu tam olarak belirmek için gerekli ve yeterli bağımsız parametre sayısına eşittir.

Hareket denklemi

Çok serbestlik dereceli sistemlerin davranışının tam olarak belirlenmesi için yazılacak denklem sayılarıdır. Sadece yer hareketi etkisindeki çok serbestlik dereceli sistemin dinamik davranışı denklem (5,13) ile belirlenir [37].

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = -[m]\{r\}\,\ddot{u}_g(t) \quad (5.13)$$

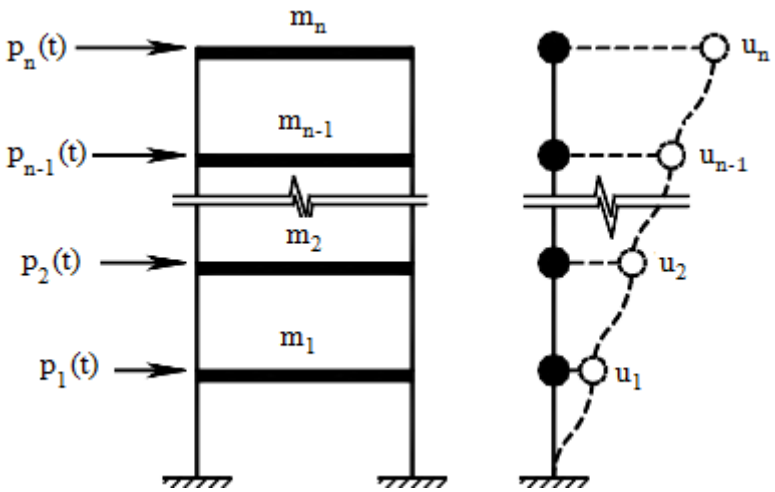
Burada; [M], [k], [c] sırasıyla kütle matrisi, rijitlik matrisi ve sönümleme matrisini ve {ü}, {u̇}, {u} ve {r} ivme vektörü, hız vektörü, yerdeğiştirme vektörü ve bir birim vektörünü göstermektedir.

Aşağıda geliştirilen hareket denklemi, Şekil (5.6) 'deki idealize edilmiş yapının u yerdeğiştirmesi içindir, doğrusal olarak elastik olduğu ve bir diş dinamik kuvvete p (t) maruz

kaldığı varsayılır. Bu nedenle yer hareketi, etkili deprem kuvveti ile değiştirilebilir. Bu kuvvet, ivmenin tersine etki ederek kütle çarpı ile yer ivmesine eşittir [37].

$$P(t) = -m\ddot{u}_g; \quad [m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = -p(t) \tag{5.14}$$

Şekil 5.6'de görüleceği gibi toplu kütle idealleştirmesi ile kütlelerin kat düzeyinde toplandığı ve bağımsız değişkenlerin yalnızca yatay yerdeğiştirmelerden oluştuğu bir yapı sistemi gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Çok serbestlik dereceli çerçeve sistem [40]

5.3.3. Mod şekilleri ve açısal frekanslar

Serbest titreşimde sönümlenmemiş ve dış yükün olmadığı çok serbestlik dereceli bir sistem için, hareket denklemi Denklem (5.15) ile belirlenir [40].

$$[m]\{\ddot{u}\} + [k](u) = \{0\} \tag{5.15}$$

Serbest titreşim hareketi basit harmonik bir harekettir ve yerdeğiştirmeler aşağıdaki denklem ile elde edilebilir.

$$\{u\} = \{A\} \sin\omega t \tag{5.16}$$

Denklem (5.16)'da $\{A\}$ hareketin genlik vektörünü ve ω açısal frekansı göstermektedir.

Denklem (5.16) ve zamana göre ikinci türevi Denklem (5.15)'de yerine yazılırsa bir öz değer problemi elde edilir.

$$[k]\{A\} - \omega^2[m]\{A\} = \{0\} \tag{5.17}$$

Elde edilen homojen lineer denklem sisteminin sıfırdan farklı bir çözümünün olması ancak katsayılar matrisinin determinantının sıfır olması ile mümkündür.

$$\left|[k] - \omega^2[m]\right| = 0 \tag{5.18}$$

Determinant (5.18), dairesel frekans ω ile ilgili olarak bir öz değer denklemi veya frekans denklemi olarak adlandırılır. Bu determinantın açılımı ile n. dereceden bir polinom elde edilir. Bu polinomun kökleri öz değerleri (ω^2) verir. Öz değerlerin denklemde yerine yazılması ile her bir mod için özvektörler bulunur $\{\phi\}$. Herhangi i modunda (5.19)'deki eşitlik sağlanmaktadır.

$$([k] - \omega^2[m])\{\phi_i\} = \{0\} \tag{5.19}$$

Sonuç olarak, n serbestlik derecesine sahip bir sistemde çözüm, serbestlik derecelerine ve karşılık gelen mod şekline $\{\phi_j\}$ eşit bir ω_j açısal frekansı elde edilir. Mod şekli, sistemin karşılık gelen frekansla titreşirken aldığı konumu gösterir.

Mod şekli vektörler, elastik sistemler için bir ortogonalite ilişkisine sahiptir. Bu ilişkiyi göstermek için j' inci modal şekil vektörü olan $\{\phi_j\}$' yi ele alalım. Denklem (5.19)'den aşağıdaki denklem elde edilebilir

$$\left([k] - \omega_j^2[m]\right)\{\phi_j\} = \{0\} \tag{5.20}$$

Denklem (5.20) mod-şekil vektörünün $\{\phi_j\}^T$ ile çarparak denklem (5.21) elde edilebilir

$$\{\phi_j\}^T[k]\{\phi_i\} - \omega_i^2\{\phi_j\}^T[m]\{\phi_i\} = \{0\} \tag{5.21}$$

(5.21) Denkleminde j ve i'nin değiştirilmesi

$$\{\phi_i\}^T[k]\{\phi_j\} - \omega_j^2\{\phi_i\}^T[m]\{\phi_j\} = \{0\} \quad (5.22)$$

[M] ve [k] matrislerinin simetrik özelliklerini göz önünde bulundurarak

$$\{\phi_j\}^T[k]\{\phi_i\} = \{\phi_i\}[k]\{\phi_j\} \quad (5.23)$$

$$\{\phi_j\}^T[m]\{\phi_i\} = \{\phi_i\}^T[m]\{\phi_j\} \quad (5.24)$$

Denklem (5.24)'den Denklem (5.23) 'yi çıkarırsa

$$(\omega_i^2 - \omega_j^2)\{\phi_i\}^T[m]\{\phi_j\} = 0, \qquad \left(\frac{1}{\omega_i^2} - \frac{1}{\omega_j^2}\right)\{\phi_i\}^T[k]\{\phi_j\} = 0 \quad (5.25)$$

Şu koşulla yol açar

$$\omega_i^2 - \omega_j^2 \neq 0, \quad (i \neq j) \quad (5.26)$$

ω_i ve ω_j gibi iki farklı titreşim frekansı için

$$\{\phi_i\}^T[m]\{\phi_j\} = 0\,, \qquad \{\phi_i\}^T[k]\{\phi_j\} = 0\,, \qquad i \neq j \quad (5.27)$$

Yukarıdaki denklemde, $\{\phi_i\}$ ve $\{\phi_j\}$ mod vektörlerinin hem kütle matrisi hem de rijitlik matrisine göre *"ortogonallik özelliği"* gösterdiği görülmektedir.

5.3.4. Modların birleştirilmesi yöntemi

Mod birleştirme yöntemi, bina sisteminin hareket denklemindeki u(t) yerdeğiştirmelerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir metodudur. Yer hareketi etkisindeki sistem (5.13) ile verilen hareket denklemi çözümü için modların birleştirilmesi yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemde, yerdeğiştirmelerin mod vektörlerinin uygun katsayılarla çarpılarak Denklem (5.28) eklenmesiyle oluşturulduğu varsayılmaktadır. Bu katsayılar mod şekillerinin yerdeğiştirmeye katkılarını göstermektedir ve genellikle bu katkıya karşı gelen

titreşim frekansı arttıkça azalmaktadır. Bu nedenle çözümlemede çoğu zaman ilk birkaç modu dikkate alınarak yeterli yaklaşımı sağlanır [34].

$$u(t)=\sum_{i=1}^{N} \{\phi_i\}\, Y_i\,(t) = [\phi]\ \{Y(t)\} \tag{5.28}$$

Burada; $[\phi]$ modal matris, zamana bağlı $\{Y(t)\}$ katsayıları da sistemin normal koordinatları olarak adlandırılmaktadır.

Denklem (5.28) soldan $\{\phi_i\}^T$ [m] ile çarpılırsa ve kütle matrisine göre ortogonal olma özelliği Denklem (5.27) kullanılarak denklem (5.29) olarak çok serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi elde edilir.

$$\{\phi_i\}^T[m]u(t) = \{\phi_i\}^T[m]\{\phi_i\}Y_i(t) \tag{5.29}$$

Buradan i nolu mod için sistemin normal koordinatı denklem (5.30) olarak elde edilir.

$$Y_i(t) = \frac{\{\phi_i\}^T[m]u(t)}{\{\phi_i\}^T[m]\{\phi_i\}}\ , \qquad (i=1, 2,\ldots\ldots,n) \tag{5.30}$$

Burada Denklem (5.27)'e benzer olarak

$$\{\phi_i\}^T[C]\{\phi_j\}= 0 \qquad i\neq j \tag{5.31}$$

Ortogonalik özelliğinin Denklem (5.31) kullanılarak sönüm matrisi için de geçerli olduğu varsayılmaktadır [34, 40].

$M_i = \{\phi_i\}^T[m]\{\phi_i\}$ i′inci mod için genelleştirilmiş kütle

$K_i = \{\phi_i\}^T[k]\{\phi_i\} = \omega_i^2\, M_i$ i′inci mod için genelleştirilmiş rijitlik

$C_i = \{\phi_i\}^T[c]\{\phi_i\} = 2\xi_i\omega_i\, M_i$ i′inci mod için genelleştirilmiş sönüm

$P_i = \{\phi_i\}^T \{p(T)\}$ i' inci mod için genelleştirilmiş yük

Y_i i' inci mod için genelleştirilmiş koordinat

olarak adlandırılmak üzere hareket denklemi

$$M_i \ddot{Y}_i + C_i \dot{Y}_i + K_i Y_i = P_i \quad (5.32)$$

Veya

$$\ddot{Y}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{Y}_i + \omega_i^2 Y_i = P_i / M_i \quad (5.33)$$

elde edilir.

Böylece sistemin dinamik davranışını gösteren matris formundaki (5.13) verilen çok serbestlik dereceli sistemin diferansiyel denklem sistemi, genelleştirilmiş kütle, rijitlik, sönüm, koordinat ve yük kullanılarak ayrıklaştırılmış olur.

Denklem (5.11)'deki gibi tek serbestlik dereceli bir sistemin hareket denklemi ile aynı duruma gelmekte ve Denklem (5.13)'de verilen çok serbestlik dereceli sistemin bağımlı hareket denklemin mod şekilleri ve normal koordinatlar kullanılarak bağımsız denklem takımına dönüştürülmüş olmaktadır.

5.3.5. İvme spektrumu

Herhangi bir n'inci titreşim modunda göz önüne alınacak azaltılmış ivme spektrumu ordinatı Denklem (5.34)'e göre belirlenmektedir [31].

$$S_{aR}(T_n) = \frac{S_{ae}(T_n)\, g}{R_a(T_n)} \quad (5.34)$$

Burada; $S_{aR}(T_n)$ n' inci doğal titreşim modu için azaltılmış ivme spektrumu ordinatını [m/s^2], $S_{ae}(T_n)$ bu mod için elastik spektral ivmeyi [m/s^2], g yerçekimi ivmesini, $R_a(T_n)$ ise n' inci

doğal titreşim moduna ait deprem yükü azaltma katsayısını gösterir. $R_a(T_n)$ eşdeğer deprem yükü yönteminde açıklanan kurallara göre hesaplanır.

5.3.7. Hesaba katılacak yeterli titreşim modu sayısı

Hesaba katılacak yeterli titreşim modu sayısı, Y, göz önüne alınan birbirine dik x ve y yatay deprem yönlerinin her birinde, her bir mod için hesaplanan etkin kütlelerin toplamının hiçbir zaman bina toplam kütlesinin %90'ından daha az olmaması kuralına göre belirlenecektir [31]. Denklem (5.35)'da yer alan L_{xn} ve L_{yn} ile modal kütle M_n' nin ifadeleri, kat döşemelerinin rijit diyafram olarak çalıştığı binalar için Denklem (5.36 ve 5.37)' de verilmiştir [31]:

$$\sum_{n=1}^{Y} M_{xn} = \sum_{n=1}^{Y} \frac{L_{xn}^2}{M_n} \geq 0{,}90 \sum_{i=1}^{N} m_i \qquad (5.35a)$$

$$\sum_{n=1}^{Y} M_{mn} = \sum_{n=1}^{Y} \frac{L_{yn}^2}{M_n} \geq 0{,}90 \sum_{i=1}^{N} m_i \qquad (5.35b)$$

$$L_{xn} = \sum_{i=1}^{N} m_i \phi_{xin}\,; \quad L_{yn} = \sum_{i=1}^{N} m_i \phi_{yin} \qquad (5.36)$$

$$M_n = \sum_{i=1}^{N} \left(m_i \phi_{xin}^2 + m_i \phi_{yin}^2 + m_{\theta i} \phi_{\theta in}^2 \right) \qquad (5.37)$$

Burada m_i, i' inci katın kütlesini ve ϕ modal matrisi temsil etmektedir.

5.3.8. Mod katkılarının birleştirilmesi

Mod katkılarının birleştirilmesinde, binaya etki eden toplam deprem yükü, kat kesme kuvveti, iç kuvvet bileşenleri, yerdeğiştirme ve göreli kat ötelemesi gibi büyüklükleri, her titreşim modu için hesaplanan ve eşzamanlı olmayan maksimum katkılarının istatiksel olarak birleştirilmesi için kurallar belirtilmiştir. Bu kurallar; $T_m < T_n$ olmak üzere, dikkate

alınan herhangi iki titreşim moduna ait doğal periyotların daima T_m / T_n <0.80 şartını temin etmesi halinde, maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için Karelerin Toplamının Kare Kökü Kuralı (SRSS) uygulanabilir. Şartın temin edilmemesi halinde, maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için Tam Karesel Birleştirme (CQC) Kuralı uygulaması kullanılacaktır [31]. Bu kural uygulanırken kullanılacak olan çapraz korelasyon katsayılarının hesabı yapılırken modal sönüm oranları bütün titreşim modları için %5 olarak kabul edilecektir.

5.3.9. Hesaplanan büyüklüklere ilişkin alt sınır değerleri

Dikkate alınan deprem doğrultusunda, mod katkılarının birleştirilmesi ile bulunan bina toplam deprem yükü V_{tB}' nin, Eşdeğer Deprem Yükü Yönteminde hesaplanan bina toplam deprem yükü Vt' ye oranının aşağıda tanımlanan β değerinden küçük olması halinde (V_{tB} <βVt), Mod Birleştirme Yöntemine göre elde edilen tüm iç kuvvet ve yerdeğiştirme büyüklükleri, Denklem (5.38)'ye göre büyütülecektir [31].

$$B_D = \frac{\beta V_t}{V_{tB}} B_B \qquad (5.38)$$

A1, B2 veya B3 türü düzensizliklerden en az birinin bulunduğu yapılarda Denklem (5.28)'de β=0,90 alınırken bu tür düzensizliklerden bulunmaması durumunda ise β=0,80 alınacaktır.

5.4. Etkin Göreli Kat Ötelemelerinin Sınırlandırılması

Herhangi bir kolon veya perdede ardışık iki kat arasındaki deplasman farkını gösteren azaltılmış göreli kat ötelemesi, Δi, Denklem (5.39) ile elde edilecektir. Denklem (5.39)'de d_i ve d_{i-1}, yapının i'inci ve $(i-1)$'inci katlarında herhangi bir kolon veya perdenin uçlarında, hesaptan elde edilen yatay deplasmanları göstermektedir [31].

$$\Delta_i = d_i - d_{i-1} \qquad (5.39)$$

Her bir deprem doğrultusunda yapının herhangi bir i'inci katındaki kolon veya perdelerde Denklem (5.39) ile hesaplanan göreli kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri $(\Delta_i)_{mak}$, Denklem (5.40)'de verilen şartların elverişsiz olanını temin edecektir:

$$\delta_i = R\,\Delta_i; \qquad \frac{(\delta_i)_{mak}}{h_i} \leq 0{,}02 \tag{5.40}$$

Göreli kat ötelemesinin taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) ile çarpılmasıyla azaltılmış göreli kat ötelemesi bulunur (Denk 5.39). Denklem (5.40)'de verilen şartın yapının herhangi bir katında temin edilmemesi halinde taşıyıcı sistemin rijitliği arttırılarak deprem hesabı tekrarlanacaktır. Ancak verilen şart temin edilse bile yapısal olmayan gevrek elemanların etkin göreli kat ötelemeleri altında kullanılabilirliği hesapla doğrulanmalıdır [31].

5.5. Mod Birleştirme Yöntemine Göre Analiz Özellikleri

1. Adım-Sistemin dinamik serbestlik derecesine göre dinamik (k) rijitlik matrisi ve (m) kütle matrisleri yazılır [37, 40].

$$[k] = \begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1i} & \dots & k_{1N} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2i} & \dots & k_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{i1} & k_{i2} & \dots & k_{ii} & \dots & k_{iN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{N1} & k_{N2} & \dots & k_{Ni} & \dots & k_{NN} \end{vmatrix} \tag{5.41}$$

$$[m] = \begin{vmatrix} m_1 & & & & & \\ & m_2 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & m_i & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & m_N \end{vmatrix} \tag{5.42}$$

$$W_i = G_i + nQ_i \ , \qquad m_i = \frac{W_i}{g}$$

Burada; mi, W_i, G_i ve Q_i: sırasıyla i. katın kütlesi, ağırlığı, kata gelen sabit yük, hareketli yük ve n ise hareketli yük katılım katsayısı olarak adlandırılır. Çizelge 5.6′ de hareketli yük katılım katsayısı verilmiştir.

2. Adım- Yapının doğal titreşim frekansı (ω_i), mod şekilleri $\{u_i\}$ ve karşı gelen periyotları T_i belirlenir.

$$[\omega_i] = \begin{vmatrix} \omega_1 & & & & & \\ & \omega_2 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \omega_i & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \omega_N \end{vmatrix} \qquad (5.43)$$

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}, \qquad T_i = \frac{2\Pi}{\omega_i}, \quad i = 1, \ldots\ldots, n$$

Burada $\{u\}_i$'lerin vektörün boyutuna göre normalleştirilmiş olduğu düşünülür ve $\{u\}_i$ ler ω_i'lerin artış sırasında dizilmelidir.

$$[u] = \begin{vmatrix} u_{11} & u_{12} & \ldots & u_{1i} & \ldots & u_{1N} \\ u_{21} & u_{22} & \ldots & u_{2i} & \ldots & u_{2N} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ u_{i1} & u_{i2} & \ldots & u_{ii} & \ldots & u_{iN} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ u_{N1} & u_{N2} & \ldots & u_{Ni} & \ldots & u_{NN} \end{vmatrix} \qquad (5.44)$$

3. Adım- Her bir mod için (örneğin j. mod); Katılım faktörü, Modal kütle, Etkin ağırlık, kütle katılım oranı sırasıyla aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$L_j = \sum_{i=1}^{N} \{\phi_{ij}\}^T [m]\{r\}, \qquad M_j = \sum_{i=1}^{N} m_i \phi_{ij}^2, \qquad W_j = \frac{L_j^2\, g}{M_j}, \qquad n_j = W_j / W_s$$

Yukarıda; $W_s = \sum_{i=1}^{N} w_i$ toplam yapı ağırlığını, w_i i nolu kat ağırlığını ϕ_{ij} j. Modda i. kat döşemesinin modal genliğini göstermektedir.

Dikkate alınacak yeterli mod sayısı belirlenir veya seçilen mod sayısının yeterli olup olmadığı kontrol edilir. Kütle katılım oranlarının toplamı en az toplam yapı kütlesinin %90'ı kadar olmalıdır. $\sum \eta_j = \sum W_i / W_s \geq 0{,}90$

4. Adım- Sistemin belli sönüm oranı (yönetmelikte spektrum eğrileri ξ = 0,05 oranı için yapılmıştır), yapının yer aldığı zeminin belli sınıfı Çizelge 5.2 ve yapının her bir i. Doğal titreşim periyodu (Ti)'ya bağlı spektrum katsayısı S(Ti), Madde (5.1.3)'e göre Denklem (5.2) ile belirlenecektir.

a) Deprem yüklerinin belirlenmesi için dikkate alınacak spektral ivme katsayısı, Madde (5.1.1)'e göre Denklem (5.1) ile belirlenecektir.
b) Deprem yükü azaltma katsayısı R_a (T_i), çeşitli yapı sistemleri için Çizelge 5.4'te tanımlanan yapısal sistem davranış katsayısı, R ve doğal titreşim periyodu T açısından Madde (5.1.5)'e göre Denklem (5.3 ve 5.4) ile belirlenecektir.
c) Doğal titreşim periyodu (T_i)'ya bağlı ivme spektrum ordinatı belirlenir. Modal deprem yükü katsayısı Denklem (5.45) ile belirlenir.

$$C_{sj} = S_{aej} / R_a(T) \quad (5.45)$$

$$S_{aej} = A_0 \, I \, S\,(T) \, g \quad (5.46)$$

Burada R_a(T) j. moda karşılık gelen yatay yük azaltma katsayısını göstermektedir.

5. Adım- j.mod şekli için modal taban kesme kuvvetleri V_j ve toplam taban kesme kuvveti belirlenir.

$$V_j = C_{sj} \frac{W_j}{g} \quad (5.47)$$

Herhangi iki titreşim moduna ait doğal periyotların daima $T_i / T_j < 0.80$ koşulunu sağlaması durumunda

$$V_{tB} = \sum \sqrt{V_{ij}^{\,2}} \quad (5.48)$$

Olarak hesaplanır. Koşul sağlanmıyorsa birleştirme işlemi Tam Karesel Birleştirme yöntemi kullanılarak yapılmalıdır.

6. Adım- İlgili doğrultudaki birinci doğal titreşim periyodu esas alınarak eşdeğer deprem yükü yönteminde hesaplanacak taban kesme kuvveti değeri hesaplanır (Madde 5.2.1 Denklem 5.5). Mod birleştirme yönteminde elde edilen taban kesme kuvveti ile karşılaştırmak amacıyla ölçeklendirme oranı (Madde 5.3.9 Denklemi 5.38)'göre hesaplanır.

7. Adım- j.mod şekli ile titreşimde i. kata ilgili doğrultudaki etkiyen modal sismik kuvveti bulunur. Her bir mod için yatay yükler etkisinde çözüm yapılır ve göz önüne alınan mod için iç kuvvetler belirlenir.

$$\mathrm{F_{ij}} = \mathrm{C_{ij}}\ \mathrm{V_i} \tag{5.49}$$

$$\mathrm{C_{ij}} = \frac{\phi_{ij} W_i}{\sum_{i=1}^{N} \phi_{ij} w_i} \tag{5.50}$$

8. Adım- j.mod şekli ile titreşimde i. kata etkiyen j. Modal kesme kuvveti;

$$V_{ij} = \sum_{i=j}^{N} F_{ij} \tag{5.51}$$

9. Adım- i. kata etkiyen tasarım kesme kuvveti;

$$V_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} {V_{ij}}^2} \tag{5.52}$$

10. Adım- j.mod şekli ile titreşimde i. katta j. Modal yerdeğiştirme;

$$\delta_{ij} = \frac{F_{ij}}{m_i \omega_j^2} \tag{5.53}$$

11. Adım- Her bir deprem doğrultusu için, binanın herhangi bir i. katındaki kolon veya perdelerde, göreli kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri $(\Delta_i)_{max}$ aşağıdaki koşullardan elverişsiz olanını sağlayacaktır;

$$\Delta_{ij} = \delta_{ij} - \delta_{(j-1)i}\ , \qquad \delta_i = R\ \Delta_i\ , \qquad \frac{(\delta_i)_{max}}{h_i} \leq\ 0{,}02 \tag{5.54}$$

Yukarıda, h_i i. katın yüksekliğidir, R taşıyıcı sistem davranış katsayısıdır.

12. Adım- j. mod şekli ile titreşimde i. kattaki devrilme momenti;

$$M_{ij} = \sum_{i=j}^{N} F_{ij}\left(Hi_{.} - H_j\right) \tag{5.55}$$

13. Adım- i. kata etkiyen kat kesme V_i kuvvetinin ve modal burulma momenti;

$$M_{tij} = V_{ij}\, e_i\,, \qquad V_{ij} = \sum_{i=j} F_{ij} \tag{5.56}$$

14. Adım – Her bir mod için elde edilen analiz sonuçları (iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeler) göz önüne alınan modlar için karelerinin toplamının karekökü (SRSS) veya tam karesel birleştirme (CQC) kuralı ile birleştirilir.

15. Mod katkılarının birleştirilmesi

a) $T_i < T_j$ olmak üzere, dikkate alınan herhangi iki titreşim moduna ait doğal periyotların daima $T_i/T_j < 0{,}8$ şartını temin etmesi halinde maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için karelerin toplamının karekökü (SRSS) kuralı uygulanabilir, sistemin j.mod şekli ile titreşiminde ve j. dinamik serbestlik derecesi doğrultusundaki tasarım sismik kuvvet için bu kural şöyle ifade edilir;

$$F_{i,\ \text{tasarım}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} F_{i,j}^2} \tag{5.57}$$

b) $T_i/T_j < 0{,}8$ şart temin edilmediğinde, maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için tam karesal birleştirme (CQC) kuralı uygulanacaktır. Bu kuralın uygulanmasında kullanılacak çapraz korelasyon katsayılarının hesabında, modal sönüm oranları bütün titreşim modları için %5 olarak alınacaktır ($\xi = 0$). Çapraz korelasyon katsayı κ_{ij} için, serbest titreşim frekanslarının oranı $\eta_{ij} = w_i/w_j$ olmak üzere, iki modda aynı sönüm oranına sahip olan sistem için $\xi i = \xi j = \xi$, denklem (5.60) ile hesaplanabilir [31].

$$F_{i,\ tasarım} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} \kappa_{ij} F_{im} F_{jm}} \tag{5.58}$$

$\eta_{ij} = w_i / w_j$, $\omega_j > \omega_i$ etkileşim ($\eta_{ij} \leq 1$ olması gerekir)

$$\kappa_{ij} = \frac{8\xi^2(1+\eta_{ij})\eta_{ij}^{\frac{3}{2}}}{\left(1-\eta_{ij}^2\right)^2 + 4\xi^2\eta_{ij}(1+\eta_{ij})^2} \tag{5.59}$$

[η]; modal korelasyon matrisi (tüm elemanları pozitif ve simetriktir).

Mod Birleştirme Yöntemiyle örnek 5.2'nin yolu izlenecektir.

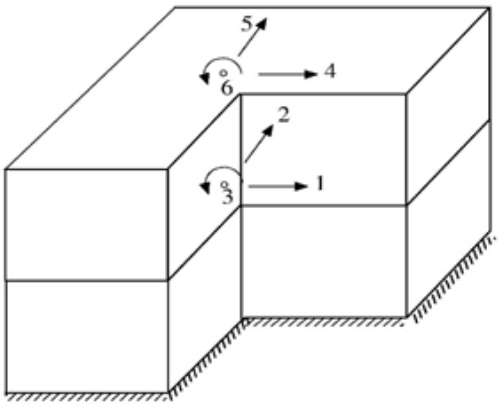
5.7. Rijit Diyafram Kabulü

Boşluksuz döşemelerin düşey doğrultudaki eğilme rijitliği düşük olmasına karşın, düzlem içi gerilmeler altında rijitliği çok büyüktür. Bu nedenle döşemeye mesnetlik yapan kirişlerde döşeme düzlemi içinde eğilme çok küçük kaldığı için göz ardı edilir. Bu tür düzlem içi rijitliği büyük olan ve düzlem için şekil değiştirmeleri küçük olduğu için göz ardı edilen döşemeler *Rijit Diyafram* olarak adlandırılır [35].

Rijit diyaframın yatay doğrultudaki yerdeğiştirmesi iki doğrultuda birer öteleme ve düşey eksen etrafında dönme olmak üzere üç serbestlik derecesi ile açıklanabilir.

Rijit döşeme kabulü yapılmadığı halde, her düğüm noktasının genel durumda 6 serbestlik derecesi ile açıklanabilir. "A2 düzensizliği bulunduğu yapılarda veya büyük çıkıntıların bulunduğu döşemelerde (A3) rijit diyafram kabulü geçerli olmaz ancak serbestlik derecesi sayısı artar" [34].

Rijit diyafram kabulü, serbestlik derecesi sayısını mühim düzeyde azaltır. Bunun yanında döşeme yatay yükler altında rijit cisim hareketi yaptığı için kat kütlesi veya kat deprem yükü döşeme kütle merkezinde tanımlanabilmektedir. Üç boyutlu iki katlı bina altı serbestlik derecesi ile Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Üç boyutlu iki katlı bina serbestlik derecesi 6

5.8. Sayısal Örnekler

5.8.1. Yapı modelleri ve özellikler

Bu bölümde planda L şeklinde düzensizliğine sahip 6 ve 8 katlı olmak kaydıyla birbirinden farklı iki model incelenmiştir. Deprem hesaplarında, eşdeğer deprem yükü yöntemi ve mod birleştirme yöntemine göre yapılmıştır. Zemin sınıfı Z2 ve deprem bölgesi birinci derece kabul edilmişken, bu zemin cinsine ve deprem bölgesine ait ivme spektrumu değerleri girilmiştir. Malzeme olarak beton, sınıf olarak C25 tercih edilmiştir. Malzemenin lineer elastik davrandığı kabul edilmiştir. Analiz yapılırken Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi kullanmamızdaki amaç, Mod Birleştirme Yöntemi ile elde ettiğimiz taban kesme kuvveti değerini, Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ile hesapladığımız taban kesme kuvveti değeri ile mukayese edebilmektir. Analiz sürecinde göreli kat ötelemelerinin hesabının, dikkate alınan deprem doğrultusuna dik yöndeki kat boyunun ±%5 kadar kaydırılması sonucu belirlenmiş olan noktalara ek dışmerkezlik etkisini de ilave edilerek deplasmanlar bulunmuştur. Sonrasında bulunan deplasmanlara göre, yönetmeliklerde istenilen burulma düzensizlik kontrolleri yapılmıştır. Analiz ve boyutlandırma hesaplarının ayrıntıları burada gösterilmemiştir. Her iki modeller için yapılan boyutlandırmalar kaynaklara uygun olarak yapılmıştır [31, 41].

Kat döşemesi ağırlığı, kirişlerin ağırlığı, kolonların ağırlığı, bölme duvarların ve diğer sabit yüklerin ve hareketli yükler tamamı hesaplanıp kolonun merkezine aktarılmaktadır. Duvar ağırlığı için; duvar yükü 12,0 kN/m kullanılacağından, her bir kolonun yük hesabında etkili

bölgedeki duvar ağırlıkları dikkate alınmıştır. Kat ağırlığı, deprem anındaki sabit yük ve hareketli yükün (TDY-2007'ye göre konutlar için) %30'undan oluşur. Bu ağırlıkları seçilen referans eksen takımına uzaklıkları ile çarpılarak, x ve y yönlerine göre sistemin ağırlık merkezi hesaplanmıştır. Bu uygulama için rijitlik hesabı yapılırken döşemenin rijit diyafram olarak çalıştığı kabul edilmektedir. Örnek modellerde düşey taşıyıcı eleman olarak sadece kolonlar bulunduğu için örnek modelin iki doğrultudaki toplam kat rijitliği, kolonlar için hesaplanan rijitliklerin toplamı olarak belirlenmiştir. Kat rijitlik merkezi ve kütle merkezinin hesabı yapılırken ilk önce göz önüne alınan referans eksen takımı seçilmiş ve her kolonun koordinatları belirlenmiştir. Daha sonra rijitlik merkezinin kontrolü için düşey taşıyıcı elemanlarda oluşan kesme kuvvetlerinin bileşkesinin etki ettiği nokta belirlenmiştir. Zira, rijitlik merkezi düşey taşıyıcı elemanlarda oluşan kesme kuvvetlerinin bileşkesinin oluştuğu nokta olarak da tanımlanmaktadır. Analiz neticesinde sonuçlar çizelgelerde sunulmuştur. En düşük burulma düzensizliği katsayısı eşdeğer deprem yükü analiz ile elde edilmesi gözlenmiştir.

Her iki örnekte de modellerin proje parametreleri ve yapıların deprem detayları Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Binalara ait ortak yapısal bilgiler

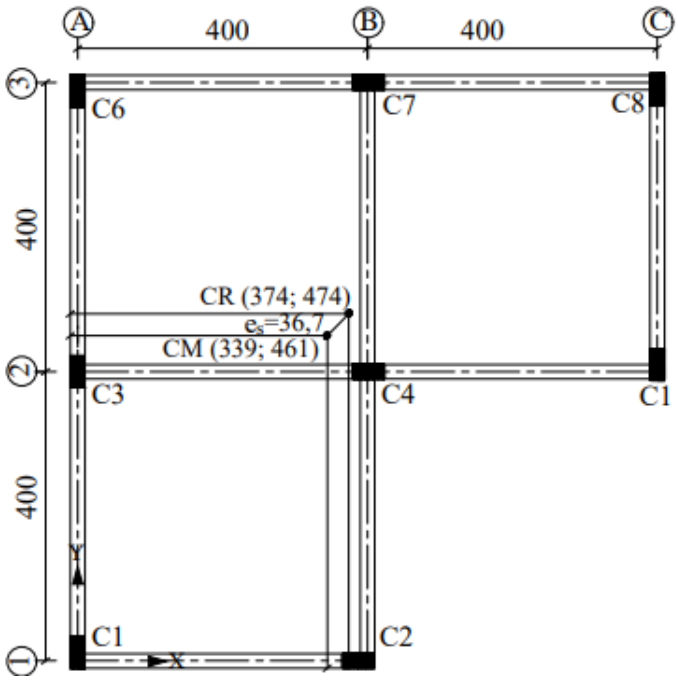
Seçilen binaların bazı yapısal ve analiz özellikleri.	
Kat yüksekliği: 3,0 m	Deprem bölgesi: 1. derece
Kolonlar:	Zemin sınıfı: Z2
1. Model'de :(30x50), (50x30)cm^2	Spektrum karakteristik periyotları: T,
2. Model'de: (50x50)cm^2	T_A = 0,15s; TB = 0,4s
Döşeme kalınlığı: 15cm	Etkin yer ivme katsayısı: A_0 = 0,4
Beton sınıfı: C25;	Bina önem katsayısı, I: 1
Karakteristik basınç dayanımı: f_{ck}=25MPa	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı, R: 8
Betonarme betonu, yoğunluk: 2500 kg/m^3	Sönüm oranı = 5%
Beton elastisite modülü: E_c=30000 MPa	Süneklik düzeyi: yüksek
Duvarlar: Tam tuğla birim ağırlığı sıva dahil: 4,2 kN/m^2	Hareketli yük değeri: q = 2,0 kN/m^2
	Hareketli yük katılım katsayısı: n=0,3

5.8.2. Bilgisayar programı

Bu çalışmada, yapısal sistemlerin statik ve dinamik yükler altında analizi için yönetmeliklerin ön gördüğü koşullara bağlı kalınarak boyutlandırılmış ve MATLAB® (R2018b Student Version) bilgisayar ortamında çözümlenmiştir. Hazırlanan bilgisayar programıyla öteleme ve burulma hesapları yapılmış, sonuçlar kıyaslanarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar çizelgelerle desteklenmiştir.

Örnek 5.1

Bu örnekte; 8 katlı, düşey taşıyıcı sistemi kolonlar ve kirişlerden oluşan, düzensiz bir taşıyıcı sisteme sahip betonarme yapı çözülmüştür. Çıkıntı yapan kısımların uzunluğu binanın toplam uzunluğunun X ve Y yönünde oranı %50'dir. Taşıyıcı sistemi simetri özelliklerinden yararlanılarak düzlem çerçeve olarak incelenmiştir. Şekil 5.8'deki C1, C3, C5, C6, C8 olarak işaretlenen kolonların boyutları 30×50cm, C2, C4, C7 olarak işaretlenmiş kalan kolonların boyutları 50×30cm ve kirişler 25/40cm seçilmiştir. TDY 2007' de tanımlanan Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi 'ne göre deprem hesapları yapılmıştır. Deprem analizi sonunda bulunan X ve Y doğrultularındaki katlara etkiye eşdeğer deprem yüklerinin Çizelge 5.9 ve 5.10'da belirlenmiştir.



Şekil 5.8. Sayısal çalışma için kullanılan kat kalıp planı

Kat ağırlıkları en alttaki yedi katın her biri için 1024,4 kN ve üst katlar için 764,0 kN hesaplanmıştır. Çizelge 5.13, 5.14 ve 5.15'da yapıya depremin X ve Y yönünde gelmesi halinde oluşan dışmerkezlikleri ve burulma momentlerinin hesaplamaları gösterilmiştir. Bina çerçevelere gelen kesme kuvvetlerinin maksimum olduğu durum için burulma düzensizliği kontrolü yapılmıştır. Bu kontrollerden elde edilen değerler Çizelge 5.20' de verilmiştir. Her kolon kendi kesit tesirlerine göre boyutlandırıldığından her bir kolonun aldığı kesme kuvveti ve A1 burulma düzensizliğinin kontrolü yapılmış elde edilen değerler Çizelge 5.21 ve Çizelge 5.22' de verilmiştir. Bu örneğe ait kat kalıp planı şekil 5.8'de gösterilmiştir.

Kat kütle merkezinin hesabı

Örnek modelin deprem yüklerinin hesaplanmasında kullanılacak olan toplam ağırlığı W ve kütlesi m, Denklem 5.6'e göre belirlenmiştir. Kat ağırlıklarının hesabında hareketli yük katılım katsayısı (Çizelge 5.6'den) n=0,3 olarak alınmıştır. Kolon yükleri hesaplanırken, kolon kendi ağırlıkları, kolona oturan kirişler, kirişlere oturan döşemeler ve kirişlerin üzerindeki duvar ağırlıkları alınmıştır. Kütle merkezini belirlemek için yapının sol köşesi olan başlangıç noktası çevresinde statik momentler alınmıştır (Şekil 5.8).

Çizelge 5.8. Kütle merkezinin hesabı

Eksen	Kolon No	$W_{xi} = W_{yi}$ kN	e_x m	$W_{xi}\ e_x$ kNm	e_y m	$W_{yi}\ e_y$ kNm
Eksen 1-1	C1	97,88	0,00	0,00	0,00	0,00
	C2	99,31	4,00	397,24	0,00	0,00
Eksen 2-2	C3	157,15	0,00	0,00	4,00	628,60
	C4	218,55	4,00	874,20	4,00	874,20
	C5	97,88	8,00	783,04	4,00	391,52
Eksen 3-3	C6	97,88	0,00	0,00	8,00	783,04
	C7	157,86	4,00	631,44	8,00	1262,88
	C8	97,88	8,00	783,04	8,00	783,04
	∑	1024,46		3468,96		4723,28

Yukarıdaki çizelgede; m_i, i' inci katın toplam kütlesi, e_{xi} ve e_{yi}, x- ve y- yönlerinde karşılık gelen m_i kütlesinin referans noktasına göre konumlarıdır.

X ve Y yönlerindeki kütle merkezleri sırasıyla X_{CM} ve Y_{CM} olarak belirtilir.

$$X_{CM} = \frac{(\sum W_{xi}\ e_{xi})}{\sum W_{xi}} = \frac{3468,96}{1024,46} = 3,386(\text{m})$$

$$Y_{CM} = \frac{(\sum W_{yi}\ e_{yi})}{\sum W_{yi}} = \frac{4722,28}{1024,46} = 4,610(\text{m})$$

Kat rijitliklerinin hesabı

i. kattaki tüm kolonlar aynı yatay yerdeğiştirmeyi yapacakları kabulüyle, δ_{fi} aşağıda verilen bağıntısı yardımıyla belirlenebilir. i. katta i+1 döşemesinin i. kat döşemesine göre yatay yerdeğiştirmesi δ_{fi}, kolonlara gelen yatay kesme kuvveti ile doğru orantılı, kolonun yatay rijitliği ile ters orantılıdır.

$$\sum_{i=1}^{N} k_{ij} = \frac{12E_c}{h_i^2} k_{ij}\ , \qquad \delta_{fi} = \frac{V_{ij}}{\sum_{i=1}^{N} k_{ij}}\ , \qquad df_i = \delta_{fi} + \delta_{fi+1}$$

Yukarıdaki bağıntısında, N j. kattaki toplam kolon sayısını, k_{ij} i. katta j. kolonun yatay rijitliğini göstermektedir. k_{ij} aşağıda verilmiş olan bağıntısı yardımıyla hesaplanabilir.

$k_{ij} = I_{ij}/h_i$

Bu bağıntısında; I_{ij} i. katta j. kolonun yatay ötelenme rijitliğini göstermektedir.

Kiriş rijitlikleri ihmal edildiğinde ve tüm kolonlar için E ve L olduğunda, $k_x = I_y$ olduğu ifade edilebilir. Benzer şekilde, $k_y = I_x$. Böylece, $k_{ij} = I_{ij}/h_i$, i' inci kattaki j' inci kolonun yatay öteleme rijitliğini temsil eder ve h_i, kat yüksekliğidir.

Örnek olarak C1 kolonunun rijitliği hesaplanmıştır;

$$C1 = \frac{12E_cI}{h^3} = \frac{12 \text{ x } 30 \text{ x} 10^6 \text{ x } (0,3^3 \text{x } 0,5/12)}{3^3} = 15000,0 \text{ kN/m}$$

$$k_x = \sum_{i=1}^{N} k_{ix} = 226666{,}67 \text{ kN/m}$$

Yukarıdaki bağıntısında k_x, x yönündeki toplam kat öteleme rijitliği ve N, kolon sayısını temsil edilmektedir.

Deprem Kuvvetlerinin Hesabı

Toplam eşdeğer deprem yükler, yapının toplam ağırlığının, ivme spektrumunda yapının birinci doğal titreşim periyoduna karşılık gelen değerle çarpılmasıyla bulunuştur. Binanın taban kesme kuvvetleri her kat seviyelerinde yatay yük olarak dağıtılmıştır.

Kabul edilen yatay deprem kuvvetinin (V_t =1) katlara dağılımı aşağıdaki Çizelge 5.9'da verilerine göre yapılmıştır. Ayrıca $m_i = W_i/g$ ile hesaplanmıştır.

Çizelge 5.9. Deprem x doğrultusunda eşdeğer deprem yüklerinin belirlenmesi

Kat Sayısı	H_i m	W_i kN	$W_i H_i$ kNm	F_i kN	V_i kN	k_x kN/m	δ_{fi} m	d_{fi} m	$F_i d_{fi}$ kNm	$m_i d_{fi}^2$ kNs^2 m
8	24	764,0	18336	175,57	175,6	226666,67	0,001	0,024	4,281	0,046
7	21	1025,0	21525	206,11	381,7	226666,67	0,002	0,024	4,866	0,058
6	18	1025,0	18450	176,66	558,3	226666,67	0,002	0,022	3,873	0,050
5	15	1025,0	15375	147,22	705,6	226666,67	0,003	0,019	2,865	0,040
4	12	1025,0	12300	117,78	823,3	226666,67	0,004	0,016	1,925	0,028
3	9	1025,0	9225	88,33	911,7	226666,67	0,004	0,013	1,123	0,017
2	6	1025,0	6150	58,89	970,6	226666,67	0,004	0,009	0,512	0,008
1	3	1025,0	3075	29,44	1000,0	226666,67	0,004	0,004	0,130	0,002
8		7939,0	104436	1000,00	5526,7		0,024	0,024	19,575	0,249

Binanın deprem doğrultusundaki hâkim doğal periyodu Rayleigh Oranı Denklem (5,10) ile hesaplanmıştır.

$$T_1 = 2\pi \left(\frac{\sum_{i=1}^{8} 0{,}249}{\sum_{i=1}^{8} 19{,}575} \right)^{1/2} = 0{,}708 \text{ (s)}$$

Bulunan periyot T_1'in ≥ T_B olduğu ve T_1 periyoduna bağlı olarak toplam Eşdeğer Deprem Yükü (taban kesme kuvveti), yapı toplam ağırlığı alınarak, hesaplanmıştır.

Çizelge 5.10. Deprem x doğrultusunda eşdeğer deprem yüklerinin belirlenmesi

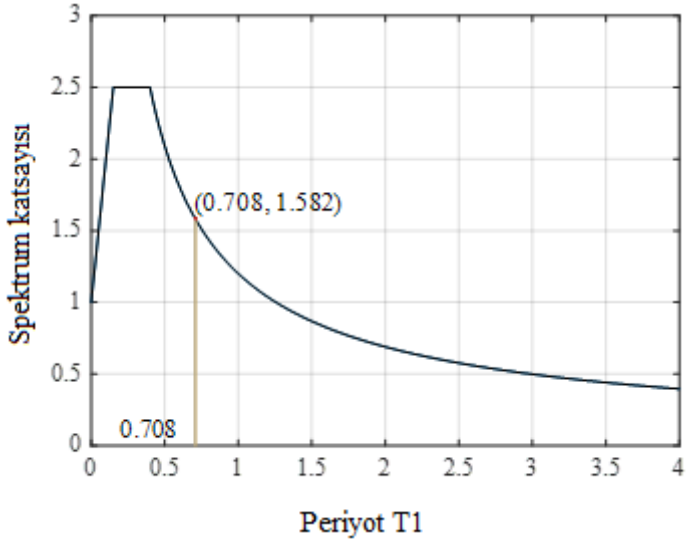
Kat Sayısı	H_i m	W_i kN	$W_i H_i$ kNm	F_i kN	V_i kN	k_x kN/m	δ_{fi} m	d_{fi} m	$F_i d_{fi}$ kNm	$m_i d_{fi}^2$ kNs^2 m
8	24	764,0	18336	141,371	141,37	226666,67	0,0006	0,016	2,224	0,019
7	21	1025,0	21525	121,710	263,08	226666,67	0,0012	0,015	1,838	0,024
6	18	1025,0	18450	104,323	367,40	226666,67	0,0016	0,014	1,455	0,020
5	15	1025,0	15375	86,936	454,34	226666,67	0,0020	0,012	1,071	0,016
4	12	1025,0	12300	69,549	523,89	226666,67	0,0023	0,010	0,718	0,011
3	9	1025,0	9225	52,162	576,05	226666,67	0,0025	0,008	0,418	0,007
2	6	1025,0	6150	34,774	610,82	226666,67	0,0027	0,005	0,190	0,003
1	3	1025,0	3075	17,387	628,21	226666,67	0,0028	0,003	0,048	0,001
		7939	104436	628,212			0,0028		7,9617	0,101

Yukarıda, mi binanın i. katının kütlesini, F_{fi} birinci doğal titreşim periyodu hesabında i. kata etkiyen fiktif (hayali) yükü, δ_{fi} katlar arası göreceli yerdeğiştirme, d_{fi} binanın i. katında F_{fi} fiktif yüklerine göre hesaplanan yerdeğiştirmeyi göstermektedir.

Bulunan periyot T_1'in ≥ T_B olduğu ve T_1 periyoduna bağlı olarak spektrum katsayısı $S(T_1)$, deprem yükü azaltma katsayısının (R_a), taban kesme kuvveti V_t, yapının en üst katına (tepesine) etkiyecek ek eşdeğer deprem yükü Δ_{FN} ve toplam eşdeğer deprem yükü bina katlarına etkiyen verilen (5.9) denklemi yardımıyla dağıtılmış ve yukarıda da sunulan çizelgeler yardımıyla belirlenmektedir.

$$T_1 = 2\,\pi \left(\frac{\sum_{i=1}^{8} 0{,}101}{\sum_{i=1}^{8} 7{,}9617} \right)^{1/2} = 0{,}7086 \text{ (s)}$$

İvme Spektrumu diyagramı İncelendiğinde, Bulunan periyot T_1'in ≥ T_B olduğu ve T_1 periyoduna bağlı olarak spektrum katsayısı $S(T_1)$' nin en büyük değerin 1,582 olduğu görülmektedir Şekil (5.9).



Şekil 5.9. Normalize edilmiş elastik tasarım spektrumu

Bina sistemi simetri olduğundan dolayı deprem hesabında her iki yönde aynı sonuçlar çıkarılmıştır.

Çizelge 5.11' inin incelenmesinden görüleceği gibi, katlarda maksimum kat ötelemelerin değeri 0,02'yi geçmemektedir.

Çizelge 5.11. Maksimum kat ötelemelerin

δfi_{max} R / $h_i \leq 0{,}02$ olmalı (deprem yönetmeliği madde 2.10.1 ve 2.10.2)
δfi_{max} X = 0,0028 x 8/3 = 0.0075 ≤ 0,02
δfi_{max} Y = 0,0028 x 8/3 = 0.0075 ≤ 0,02

Kat Rijitlik Merkezinin Hesabı

Kat rijitlik merkezinin belirlenmesi için, önce bütün kolonların iki doğrultudaki öteleme rijitlikleri hesap edilmelidir. Örneğin, i. Katındaki x_j ve y_j' koordinatlarında sahip j. Kolonun x ve y doğrultularındaki rijitlikleri sıra ile k_{ij}^x ve k_{ij}^y olsun. Bu kattaki kesme kuvveti, eğer kat rijitlik merkezinden geçiyorsa, dönme olmaksızın sadece öteleme yerdeğiştirmesi meydana gelir. Bu tanımdan hareket ederek rijitlik merkezinin seçilen herhangi bir x ve y koordinat sistemindeki yeri aşağıdaki denklemler ile bulunabilir.

$$kx = \sum_{i=1}^{8} k_{ix} \ , \qquad ky = \sum_{i=1}^{8} k_{iy} \ , \qquad k_\theta = \sum_{i=1}^{8} k_{ix}\, y_i^2 + \sum_{i=1}^{8} k_{iy}\, x_i^2$$

Yukarıdaki bağıntısında; k_x, k_y, x ve y yönündeki toplam öteleme rijitliği; kө, kat burulma rijitliği ve yi ve xi kolon merkezinde göz önüne alınan eksen takımı ile referans eksen takımı arasındaki mesafeleri göstermektedir.

Kat rijitlik merkezi koordinatları;

$$X_{CR} = \frac{\sum_{i=1}^{8} k_{iy}\, x_i}{\sum_{i=1}^{8} k_{iy}} = 3{,}74\text{m} \ , \qquad Y_{CR} = \frac{\sum_{i=1}^{8} k_{ix}\, y_i}{\sum_{i=1}^{8} k_{ix}} = 4{,}74\text{m}$$

olarak elde edilmiştir.

Bu örnekte burulma momentlerini hesaplamak için örnek olarak tek kat her iki doğrultudaki detaylı şekilde hesaplanması aşağıda verilmektedir. Başka katların sadece sonuçları çizelgelerde açıklanacaktır.

Çizelge 5.12. Binaya depremin X ve Y doğrultusunda gelmesi halinde oluşan dışmerkezlik

X DOĞ.	Kolon no	bc m	hc m	kx kN/m	∑kx kN/m	y m	y∑kx kN	y^2∑kx kNm	Y DOĞ.	Kolon no	ky kN/m	∑ky kN/m	x m	x∑ky kN	x^2∑ky kNm
Eksen 1-1	C 1	0,3	0,5	15000,0	56666,7	0,0	0,0	0,0	Eksen A-A	C 1	41666,7	98333,3	0,0	0,0	0,0
	C 2	0,5	0,3	41666,7						C 3	41666,7				
Eksen 2-2	C 3	0,3	0,5	15000,0	71666,7	4,0	286666,7	1146666,7		C 6	15000,0				
	C 4	0,5	0,3	41666,7					Eksen B-B	C 2	15000,0	45000,0	4,0	180000,0	720000,0
	C 5	0,3	0,5	15000,0						C 4	15000,0				
Eksen 3-3	C 6	0,5	0,3	41666,7	98333,3	8,0	786666,7	6293333,3		C 7	15000,0				
	C 7	0,5	0,3	41666,7					Eksen C-C	C 5	41666,7	83333,3	8,0	666666,7	5333333,3
	C 8	0,3	0,5	15000,0						C 8	41666,7				
∑					226666,7		1073333	7440000,0	∑			226666,7		846666,7	6053333,3
Rijitlik Merkezi Y_{CR}				4,74	Lx	8			Rijitlik Merkezi X_{CR}			3,74		Ly	8
Ağırlık Merkezi Y_{CM}				4,61	Dışmerkezlik oranı; e_y/L_y				Ağırlık Merkezi X_{CM}			3,39	Dışmerkezlik oranı; e_x/L_x		
Dışmerkezliği e_y				0,125	0,016 < 0,05 TDY-2007				Dışmerkezliği e_x			0,35	0,02 < 0,05 TDY-2007		
Burulma Momenti M_{ty}				219,17					Burulma Momenti M_{tx}			78,50			
Kat Burulma Rijitlik $k_\Theta = y^2 \sum kx + x^2 \sum ky = 13493333{,}3$															

Kat doğal dışmerkezliği ve kat tasarımı dışmerkezliği x ve y yönünde aşağıdaki denklemler ile elde edilmiştir.

$$e_y = Y_{CM} - Y_{CR} , \qquad e_{dy} = e_y \pm 0{,}05L_y$$

$$e_x = X_{CM} - X_{CR} , \qquad e_{dx} = e_x \pm 0{,}05L_x$$

Her katta etkiyen dış yüklerin belirli bir eksene göre burulma momenti (V_i e_i) olarak belirlenmiştir. Her katta bulunan, kat burulma momenti M_{ti} ise, sözkonusu kattaki rijitlik merkezi de esas alınarak aşağıdaki denklemler ile hesap edilmiştir.

$$M_{txi} = V_{xi}\, e_{dyi} \quad , \qquad M_{tyi} = V_{yi}\, e_{dxi}$$

Kat burulma momentinin katı, rijitlik merkezi etrafında dönmeye zorlaması sonucunda, kolonlarda ek kesme kuvveti oluşur. Bu durumda kolonlardaki kesme kuvveti, kat kesme kuvvetinden ve kat burulma momentinden oluşmak üzere iki bölümden meydana gelir. Kolonların kesme kuvvetleri x ve y yönünde etki eden bir yatay yük için ise aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$V_{ij}^{x} = V_i^{x} \left(\frac{k_{ij}^{x}}{\sum_j k_{ij}^{x}} \right) \pm M_{txi} \left(\frac{y_i k_{ij}^{x}}{k_{\theta i}} \right)$$

$$V_{ij}^{y} = V_i^{y} \left(\frac{k_{ij}^{y}}{\sum_j k_{ij}^{y}} \right) \pm M_{tyi} \left(\frac{x_i k_{ij}^{y}}{k_{\theta i}} \right)$$

Çizelge 5.13. Burulma momentleri (±0,05 dış. hariç) sonucu çerçevelere gelen kesme K.

X doğrultu için (±0,05 dışmerkezlik hariç)								**Y doğrultu için** (±0,05 dışmerkezlik. hariç)							
Eksen	∑ kx	y	y ∑ kx	kø	M_{tx}	Vx (+)	Vx (-)	Eksen	∑ ky	x	x ∑ ky	kø	M_{ty}	Vy (+)	Vy (-)
1-1	56666,7	-4,74	-268333,3			155,44	158,56	A-A	98333,3	-3,74	-367303,9			266,47	278,41
2-2	71666,7	-0,74	-52696,1	13493333,3	78,7	198,25	198,87	B-B	45000,0	0,26	11911,8	13493333,3	219,4	124,87	124,48
3-3	98333,3	3,26	321029,4			274,31	270,57	C-C	83333,3	4,26	355392,2			236,66	225,10
∑	226666,7					628,00	628,00	∑	226666,7					628,00	628,00

Yukarıda Çizelge 5.13'te verilen ilk (±0,05 dışmerkezlik hariç) çerçevelere gelen kesme kuvvetleri yukarıdaki denklemler ile hesaplanmıştır. Sonradan ilave ±0,05 dışmerkezlik olması halinde bulunan burulma momentleri dikkate alınarak çerçevelere gelen kesme kuvvetleri hesaplanmaktadır. Aşağıda ilave +0,05 dışmerkezlik olması halinde bulunan burulma momentleri çerçevelere rijitlikleri oranında dağıtılmıştır.

Çizelge 5.14. Burulma momentleri (+0,05 dış. ilave) sonucu çerçevelere gelen kesme K.

X doğrultu için (+0,05 dışmerkezlik ilave)								**Y doğrultu için** (+0,05 dışmerkezlik ilave)							
Eksen	∑ kx	y	y ∑ kx	kø	M_{tx}	Vx (+)	Vx (-)	Eksen	∑ ky	x	x ∑ ky	kø	M_{ty}	Vy (+)	Vy (-)
1-1	56666,7	-4,74	-268333,3	13493333	329,9	150,44	163,56	A-A	98333,3	-3,74	-367303,9	13493333	470,6	259,63	285,25
2-2	71666,7	-0,74	-52696,1			197,27	199,85	B-B	45000,0	0,26	11911,8			125,09	124,26
3-3	98333,3	3,26	321029,4			280,29	264,59	C-C	83333,3	4,26	355392,2			243,28	218,49
∑	226666,7					628,00	628,00	∑	226666,7					628,00	628,00

Aşağıda ilave -0,05 dışmerkezlik olması halinde;

Çizelge 5.15. Burulma momentleri (-0,05 dış. ilave) sonucu çerçevelere gelen kesme K.

X doğrultu için (-0,05 dışmerkezlik ilave)								**Y doğrultu için** (-0,05 dışmerkezlik ilave)							
Eksen	∑ kx	y	y ∑ kx	kø	M_{tx}	Vx (+)	Vx (-)	Eksen	∑ ky	x	x ∑ ky	kø	M_{ty}	Vy (+)	Vy (-)
1-1	56666,7	-4,74	-268333,3	13493333	-173	160,43	153,57	A-A	98333,3	-3,74	-367303,9	13493333	-31,8	273,31	271,57
2-2	71666,7	-0,74	-52696,1			199,23	197,89	B-B	45000,0	0,26	11911,8			124,65	124,70
3-3	98333,3	3,26	321029,4			268,34	276,55	C-C	83333,3	4,26	355392,2			230,04	231,72
∑	226666,7					628,00	628,00	∑	226666,7					628,00	628,00

Yukarıdaki 3 farklı durumdan bina çerçevelere gelen kesme kuvvetlerinin maksimum olduğu durum için burulma düzensizliği kontrolü yapılmaktadır.

Çizelge 5.16. Her bir çerçeve aldığı kesme kuvveti ve burulma düzensizliğinin değeri

X DOĞ.	∑kx kN/m	Vx (+) kN	Vx(-) kN	Δ1	(Δ1)ort	η_{bi}	Y DOĞ.	∑ky kN/m	Vy (+) kN	Vy(-) kN	Δ1	(Δ1)ort	η_{bi}
Eks. 1-1	56666,67	150,44	163,56	0,0029	0,0028	1,02	Eks. A-A	98333,33	259,63	285,25	0,0029	0,0028	1,03
Eks. 2-2	71666,67	197,27	199,85	0,0028			Eks. B-B	45000,00	125,09	124,26	0,0028		
Eks. 3-3	98333,33	280,29	264,59	0,0029			Eks. C-C	83333,33	243,28	218,49	0,0029		
∑	226666,7	628,00	628,00				∑	226666,7	628,00	628,00			

Her kolon kendi kesit tesirlerine göre boyutlandırıldığından herbir kolonun aldığı kesme kuvveti ve A1 burulma düzensizliğinin kontrolü hesabı yapılmıştır. Burulma düzensizliği çok az etkili olduğu görülmektedir.

$$V_{kolon}=V\left(\frac{k_{x\ kolon}}{\sum_1^8 k_{x\ kolon}}\right), \qquad \Delta_x=\frac{\sum V_x\ (mak\ \mp)}{\sum_1^8 k_x}$$

Burulma hesabı, x-x yönünde kolon maksimum kesme kuvvetleri alınarak alttaki şekilde yapılmıştır. Burulma düzensizliği çok az etkili olduğu görülmektedir. x-x yönüne benzer şekilde y-y yönü için burulma düzensizliği Çizelge 5.17 ve 5.18.'de hesabı yapılmıştır.

Çizelge 5.17. X yönde kolon maksimum kesme kuvvetleri ve burulma düzensizliği

X DOĞ.	Kolon no	kx kN/m	∑kx kN/m	Vx (+) kN	V k.(+) kN	Vx (-) kN	V k.(-) kN	Δ1=∑Vx(max ±)/ ∑kx	(Δ1)ort	η_{bi}	Δ1=∑Vx(min±) / ∑kx	(Δ1)ort	η_{bi}
Eks. 1-1	C1	15000,0	56666,7	160,4	42,5	153,6	40,7	0,00283	0,003	1,01	0,00271	0,0027	1,009
	C2	41666,7			118,0		112,9						
	C3	15000,0			41,7		41,4						
Eks. 2-2	C4	41666,7	71666,7	199,2	115,8	197,9	115,0	0,00278			0,00276		
	C5	15000,0			41,7		41,4						
	C6	41666,7			113,7		117,2						
Eks. 3-3	C7	41666,7	98333,3	268,3	113,7	276,5	117,2	0,00281			0,00273		
	C8	15000,0			40,9		42,2						
∑		226666,7	226666,7	628,0	628,0		628,0						

Çizelge 5.18. Y yönde kolon maksimum kesme kuvvetleri ve burulma düzensizliği

Y DOĞ.	Kolon no	ky kN/m	∑ky kN/m	Vy (+) kN	V_{kol}(+) kN	Vy (-) kN	V_{kol} (-) kN	Δ1=∑Vy(max ±)/ ∑ky	(Δ1)ort	η_{bi}	Δ1=∑Vy(min±) / ∑ky	(Δ1)ort	η_{bi}
Eks. A-A	C1	41666,7	98333,3	259,6	110,0	285,3	120,9	0,0029	0,003	1,024	0,0026	0,0027	1,026
	C3	41666,7			110,0		120,9						
	C6	15000,0			39,6		43,5						
Eks. B-B	C2	15000,0	45000,0	125,1	41,7	124,3	41,4	0,0028			0,0028		
	C4	15000,0			41,7		41,4						
	C7	15000,0			41,7		41,4						
Eks. C-C	C5	41666,7	83333,3	243,3	121,6	218,5	109,2	0,0029			0,0026		
	C8	41666,7			121,6		109,2						
∑		226666,7	226666,7	628,0	628,0		628,0						

Çizelge 5.17 ve 5.18'da görüleceği gibi burulma düzensizliği katsayılarının (η_{bi}) tüm kolonlarda her iki yönde 1.2' den küçük olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.19. Her katta etkiyen burulma momentleri ve kat burulma rijitlikleri

Kat sayısı	M_{tx} kNm	M_{tx} (+0,05) kNm	M_{tx} (-0,05) kNm	M_{ty} kNm	M_{ty} (+0,05) kNm	M_{ty} (-0,05) kNm	k_θ kNm
1	78,13	329,22	-172,96	219,02	470,1	-32,07	13493333,3
2	75,97	320,11	-168,17	212,95	457,09	-31,18	13493333,3
3	71,64	301,89	-158,60	200,83	431,07	-29,41	13493333,3
4	65,16	274,55	-144,24	182,65	392,04	-26,75	13493333,3
5	56,51	238,11	-125,10	158,40	340,01	-23,2	13493333,3
6	45,70	192,56	-101,16	128,10	274,96	-18,76	13493333,3
7	32,72	137,89	-72,44	91,73	196,9	-13,43	13493333,3
8	17,59	74,12	-38,94	49,31	105,83	-7,22	13493333,3

Burulma düzensizliği kontrolü, bina çerçevelere gelen kesme kuvvetlerinin maksimum olduğu durum için yapılır.

Çizelge 5.20. Çerçevelere gelen maksimum kesme kuvvetleri ve A1 değerleri

Kat sayısı	V_x 1-1 kN	V_x 2-2 kN	V_x 3-3 kN	(η_{bi})	V_y A-A kN	V_y B-B kN	V_y C-C kN	(η_{bi})
1	163,48	199,76	280,15	1,04	285,12	125,04	243,16	1,05
2	158,95	194,22	272,40	1,04	277,23	121,58	236,43	1,05
3	149,90	183,17	256,89	1,04	261,45	114,65	222,97	1,05
4	136,33	166,59	233,63	1,04	237,77	104,27	202,78	1,05
5	118,24	144,48	202,62	1,04	206,21	90,43	175,87	1,05
6	95,62	116,83	163,86	1,04	166,76	73,12	142,22	1,05
7	68,47	83,67	117,34	1,04	119,42	52,37	101,85	1,05
8	36,80	44,97	63,07	1,04	64,19	28,15	54,74	1,05

Her kolon kendi kesit tesirlerine göre boyutlandırılması nedeniyle her bir kolonun aldığı kesme kuvveti ve A1 düzensizliğinin kontrolü Çizelge 5. 21.'de hesaplanmıştır.

Çizelge 5.21. X yönde her bir kolonda gelen maksimum kesme kuvvetleri ve A1

Kat sayısı	C1 kN	C2 kN	C3 kN	C4 kN	C5 kN	C6 kN	C7 kN	C8 kN	η_{bi}
1	43,27	120,20	41,81	116,14	41,81	118,71	118,71	42,74	1,024
2	42,08	116,88	40,65	112,92	40,65	115,42	115,42	41,55	1,024
3	39,68	110,22	38,34	106,50	38,34	108,85	108,85	39,19	1,024
4	36,09	100,24	34,87	96,85	34,87	98,99	98,99	35,64	1,024
5	31,30	86,94	30,24	83,99	30,24	85,86	85,86	30,91	1,024
6	25,31	70,31	24,45	67,93	24,45	69,43	69,43	24,99	1,024
7	18,12	50,35	17,51	48,64	17,51	49,72	49,72	17,89	1,024
8	9,74	27,06	9,41	26,15	9,41	26,72	26,72	9,62	1,024

Çizelge 5.20, 5.21 ve 5.22'te görüldüğü gibi burulma düzensizliği katsayılarının (η_{bi}) tüm katlarda her iki yönde 1,2' den küçük olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.22. Y yönde her bir kolonda gelen maksimum kesme kuvvetleri ve A1

Kat sayısı	C1 kN	C2 kN	C3 kN	C4 kN	C5 kN	C6 kN	C7 kN	C8 kN	η_{bi}
1	120,81	41,68	120,81	41,68	121,58	43,49	41,68	121,58	1,03
2	117,47	40,53	117,47	40,53	118,22	42,29	40,53	118,22	1,03
3	110,78	38,22	110,78	38,22	111,48	39,88	38,22	111,48	1,03
4	100,75	34,76	100,75	34,76	101,39	36,27	34,76	101,39	1,03
5	87,38	30,14	87,38	30,14	87,94	31,46	30,14	87,94	1,03
6	70,66	24,38	70,66	24,38	71,11	25,44	24,38	71,11	1,03
7	50,60	17,46	50,60	17,46	50,92	18,22	17,46	50,92	1,03
8	27,20	9,38	27,20	9,38	27,37	9,79	9,38	27,37	1,03

Yapılan kontroller sonucu bina sistemlerinin deprem hesabında EDY 'nin kullanılması için gerekli şartları yerine getirdiği görülmektedir. Yapılan düzensizlik kontrolleri sonucunda A1- düzensizliği katsayılarının (η_{bi}) tüm katlarda 1,2' den küçük olduğu gözlemlenmiştir.

Rijitlik Merkezinin Kontrolü

Rijitlik merkezinin kontrolü için her iki yönde çerçevelere gelen maksimum kesme kuvvetlerinin bileşkesinin etkidiği nokta belirlenmiştir.

$$Y_r(i) = \frac{(V_{1x}(i) - V_{1x}(i-1))Y_1 + (V_{2x}(i) - V_{2x}(i-1))Y_2 + (V_{3x}(i) - V_{3x}(i-1))Y_3}{(V_{1x}(i) - V_{1x}(i-1)) + (V_{2x}(i) - V_{2x}(i-1)) + (V_{3x}(i) - V_{3x}(i-1))}$$

$$X_r(i) = \frac{(V_{1y}(i) - V_{1y}(i-1))X_1 + (V_{2y}(i) - V_{2y}(i-1))X_2 + (V_{3y}(i) - V_{3y}(i-1))X_3}{(V_{1y}(i) - V_{1y}(i-1)) + (V_{2y}(i) - V_{2y}(i-1)) + (V_{3y}(i) - V_{3y}(i-1))}$$

Binanın her kat düzeyindeki rijitlik merkezi, kütle merkezi ve dışmerkezliğini Çizelge 5.23'te gösterilmiştir.

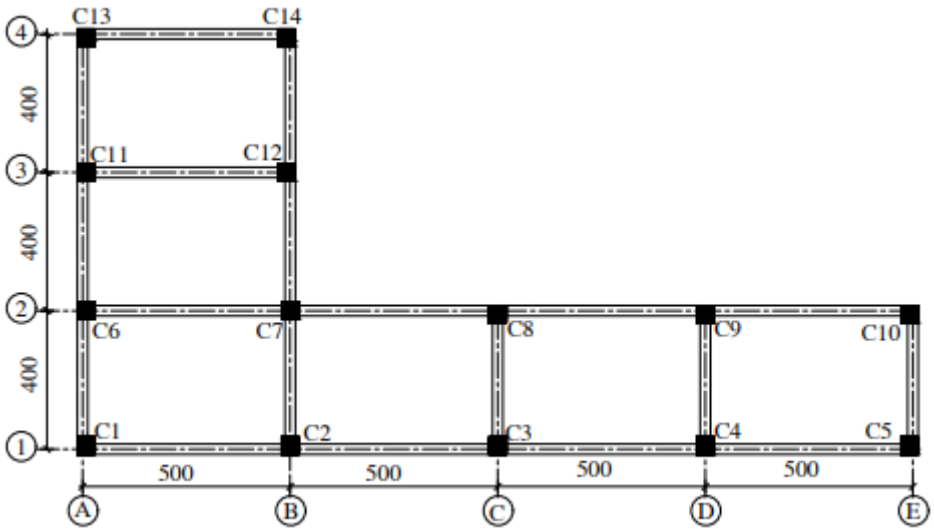
Çizelge 5.23. Kat rijitlik merkezi, kütle merkezi ve dışmerkezlik

Kat sayısı	1	2	3	4	5	6	7	8
X_{CR} (m)	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74
Y_{CR} (m)	4,74	4,74	4,74	4,74	4,74	4,74	4,74	4,74
X_{CM} (m)	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39
Y_{CM} (m)	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61
Dışmerkezlik (m)	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37

Örnek 5.2

Bu örnekte, çok serbestlik dereceli yapısının deprem analizi, mod birleştirme yöntemine dayalı doğrusal olarak geliştirilmiştir. İncelenecek bina; 6 katlı, düşey taşıyıcı sistemi kolonlar ve kirişlerden oluşan, düzensiz bir taşıyıcı sisteme sahip, betonarme yapı tasarlanmıştır. Toplu kütle idealleştirmesi ile kütlelerin kat düzeyinde toplandığı ve bağımsız değişkenlerin yalnızca yatay yerdeğiştirmelerden oluştuğu bir yapı sistemi tasarlanmıştır. Binanın kategorisine karşılık gelen sönümleme oranı varsayılmıştır. Ayrıca tepki spektrumları, modal doğal frekansı ve modal kütlesine dayalı olarak her mod şeklinin tepe tepkisini belirlemek için MATLAB®' da geliştirilmiştir. Çıkıntı yapan kısımların uzunluğu binanın toplam uzunluğunun oran X yönünde %75 ve Y yönünde %67 dir. Tüm katlardaki kirişler 30/50cm boyutunda, kolonlar ise 50x50cm boyutundadır. Analiz ve boyutlandırma

hesaplarının ve kat kütle merkezlerinin hesabı ayrıntıları burada gösterilmemiştir. Deprem hesapları TDY-2007' de belirtilen Mod Birleştirme Yöntemine göre yapılmıştır. Eşdeğer Deprem Yükü Yönteminin analizde kullanılmasındaki amaç, MBY ile bulunan taban kesme kuvveti değerini EDY yöntemiyle hesaplanan taban kesme kuvveti değeri ile karşılaştırmaktır. Binanın sismik performansı (SRSS, CQC ve ABS) kurallarını göz önüne alınarak kontrolleri yapılmıştır. Basitleştirilmiş olarak, incelemeler sadece y yönündeki yüklemeler için yapılacaktır. Yapılan kontroller sonucu bina sistemlerinin deprem hesabında MBY 'nin kullanılması için gerekli koşulları sağladığı görülmüştür. Bu örneğe ait kat kalıp planı şekil 5.10'de gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Sayısal çalışma için kullanılan kat kalıp planı

Yapının deprem analizinin MBY' ne göre aşağıdaki adamları izleyerek hesap edilmiştir:

1. Sistemin kütle matrisi, çerçevenin her katının kütlesi ve rijitlikleri hesaplanarak oluşturulur. $W_i = G_i + nQ_i$, $m_i = \frac{W_i}{g}$

$$m=\begin{bmatrix} 250,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 250,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 250,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 250,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 250,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 250,2 \end{bmatrix} (kNs^2/m)$$

Yapının kat rijitlik merkezi ve kütle merkezi konumunlarının birinci örneğe benzer şeklide hesaplanmıştır. “Döşemeleri sonsuz rijit olduğu düşünüldüğünden, herhangi bir katın öteleme rijitliği o kattaki kolonların öteleme rijitlikleri toplamına eşittir” [34].

2. Sistemin dinamik serbestlik derecesine göre (k) rijitlik matrisi ve (m) kütle matrisleri yazılır. Kesme çerçevelerinin rijitlik matrisi, katlara birim yüklemeler yapılarak i’ inci katın altındaki ve üstündeki kolon rijitlikleri aşağıdaki şekilde düzenlenmesi sonucu elde edilir.

$$k = \begin{bmatrix} \sum k_1 + k_2 & -\sum k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sum k_2 & \sum k_2 + k_3 & -\sum k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sum k_3 & \sum k_3 + k_4 & -\sum k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sum k_4 & \sum k_4 + k_5 & -\sum k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sum k_5 & \sum k_5 + k_6 & -\sum k_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sum k_6 & \sum k_6 \end{bmatrix} \text{(kN/m)}$$

$$k = \begin{bmatrix} 1944444,4 & -972222,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -972222,2 & 1944444,4 & -972222,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -972222,2 & 1944444,4 & -972222,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -972222,2 & 1944444,4 & -972222,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -972222,2 & 1944444,4 & -972222,2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -972222,2 & 972222,2 \end{bmatrix} \text{(kN/m)}$$

3. Yapının doğal titreşim frekansı ($\boldsymbol{\omega_i}$) ve mod şekilleri $\{\boldsymbol{u_i}\}$ hesaplanır. Kesme çerçevesinin det[[K]- ω[M]] =0 oluşturur ve açısal hızların ($\boldsymbol{\omega_i}$) bulunur.

[Eigenvectors Eigenvalues] = eig ($m^{-0,5}$ k $m^{-0.5}$);

$$\omega_i^2 = \begin{bmatrix} 225,805 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1954,27 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5015,24 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8707,46 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12185,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 14651,5 \end{bmatrix} \text{(rad/s)}$$

u_1 = Eigenvectors, ω_i = Eigenvalues

$$u_1 = \begin{bmatrix} -0{,}1327 & 0{,}3678 & -0{,}5187 & 0{,}5507 & 0{,}4565 & -0{,}2578 \\ -0{,}2578 & 0{,}5507 & -0{,}3678 & -0{,}1327 & -0{,}5187 & 0{,}4565 \\ -0{,}3678 & 0{,}4565 & 0{,}2578 & -0{,}5187 & 0{,}1327 & -0{,}5507 \\ -0{,}4565 & 0{,}1327 & 0{,}5507 & 0{,}2578 & 0{,}3678 & 0{,}5187 \\ -0{,}5187 & -0{,}2578 & 0{,}1327 & 0{,}4565 & -0{,}5507 & -0{,}3678 \\ -0{,}5507 & -0{,}5187 & -0{,}4565 & -0{,}3678 & 0{,}2578 & 0{,}1327 \end{bmatrix}$$

$$\omega_i = diag\,[15{,}027 \quad 44{,}207 \quad 70{,}818 \quad 93{,}314 \quad 110{,}386 \quad 121{,}043](rad/s)$$

Yukarıda ω_i, ω_i^2'nın kısaltması yapılmıştır. Açısal hızların giderek $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \ldots < \omega_n$ arttığının aşikârdır. Buna göre yapının periyodu ve frekansını bulunur.

$$T_y = 2\pi/\omega_i = [0{,}418 \quad 0{,}142 \quad 0{,}089 \quad 0{,}067 \quad 0{,}057 \quad 0{,}052](s)$$

Yapının periyodunun giderek $T_1 > T_2 > T_3 > \ldots > T_n$ şeklinde azaldığı gözlemlenmiştir.

$$f_i = \omega_i/(2\pi) = [2{,}39 \quad 7{,}04 \quad 11{,}27 \quad 14{,}85 \quad 17{,}56 \quad 19{,}26](Hz)$$

Yapının frekansını giderek $f_1 < f_2 < f_3 < \ldots < f_n$ şeklinde azaldığı gözlemlenmiştir.

4. Açısal hıza (ω_i) karşı gelen normal $\{\phi_i\}$ ($_i$ = 1, 2, · · ·, n) ve normalize mod sonuçları aşağıda verilmiştir.

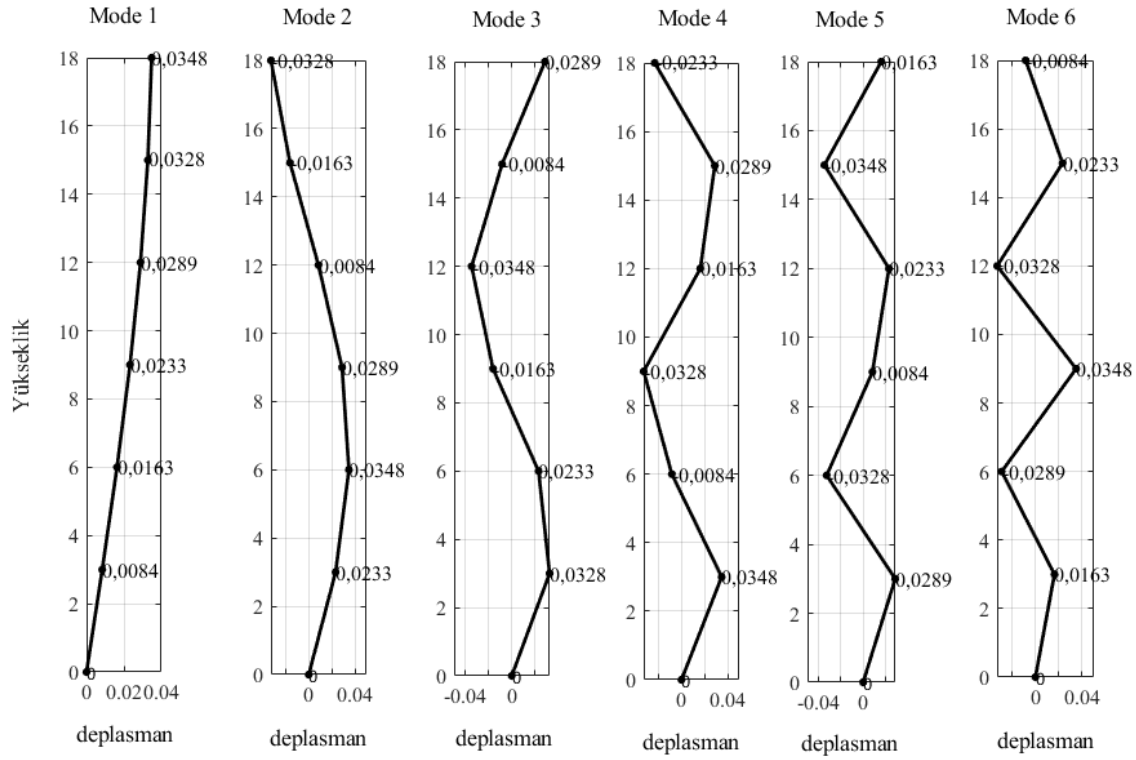
$$\phi = \begin{bmatrix} 1{,}0000 & 1{,}0000 & 1{,}0000 & 1{,}0000 & 1{,}0000 & 1{,}0000 \\ 1{,}9419 & 1{,}4970 & 0{,}7092 & -0{,}2411 & -1{,}1361 & -1{,}7709 \\ 2{,}7709 & 1{,}2411 & -0{,}4970 & -0{,}9419 & 0{,}2908 & 2{,}1361 \\ 3{,}4389 & 0{,}3609 & -1{,}0617 & 0{,}4681 & 0{,}8058 & -2{,}0120 \\ 3{,}9070 & -0{,}7008 & -0{,}2559 & 0{,}8290 & -1{,}2062 & 1{,}4269 \\ 4{,}1481 & -1{,}4100 & 0{,}8802 & -0{,}6680 & 0{,}5647 & -0{,}5150 \end{bmatrix}$$

ϕ = Modşekilleri = $m^{-0,5}$ x Eigenvectors;

$$\phi = \begin{bmatrix} 0{,}0084 & 0{,}0233 & 0{,}0328 & 0{,}0348 & 0{,}0289 & 0{,}0163 \\ 0{,}0163 & 0{,}0348 & 0{,}0233 & -0{,}0084 & -0{,}0328 & -0{,}0289 \\ 0{,}0233 & 0{,}0289 & -0{,}0163 & -0{,}0328 & 0{,}0084 & 0{,}0348 \\ 0{,}0289 & 0{,}0084 & -0{,}0348 & 0{,}0163 & 0{,}0233 & -0{,}0328 \\ 0{,}0328 & -0{,}0163 & -0{,}0084 & 0{,}0289 & -0{,}0348 & 0{,}0233 \\ 0{,}0348 & -0{,}0328 & 0{,}0289 & -0{,}0233 & 0{,}0163 & -0{,}0084 \end{bmatrix}$$

Sonuç olarak çözüm sonucu serbestlik derecesi kadar açısal frekans ω ve karşı gelen mod şekli {ϕ} elde edilmiştir. Mod şekli sistemin ilgili frekansla titreşimi sırasında aldığı konumu göstermektedir. Her modda yapı tek dereceli bir sistem gibi analiz edilir.

Deprem sırasında bu modlar ayrı ayrı veya düzenli sıra ile oluşmamaktadır. Zira kısa bir süre içinde farklı yönlerden farklı karakterde hareketler aynı anda yapıya etki eder. Mühim olan deprem anında zemin periyodu ile yapı dinamik davranışına büyük etkisi olan modların titreşim periyotlarının çakışmamasıdır. Çünkü bu durumda rezonansın yapıya verdiği zarar depreme kıyasla daha büyük olabilir. Bulunan modlar ile bazı kontroller yapılabilir. Şekil 5.11'de görüleceği gibi altı katlı bir düzlem sistem için mod şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 5.11. Altı serbestlik dereceli sistemde mod şekilleri

Normal modların kontrolü

Yapıya etkin modların oranlarının toplamı eşit 1 olması koşulu kontrol edilmektedir. Hesaplanan modların konrolü aşağıdaki şekilde kontrol edilmektedir,

$$\sum_{i=1}^{N} q_i = \frac{\{\phi_j\}^T [m]\{r\}}{\{\phi_j\}^T [m]\{\phi_j\}}$$

$$\{r\} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

$$q_i = [0{,}3032 \quad 0{,}2690 \quad 0{,}2084 \quad 0{,}1353 \quad 0{,}0665 \quad 0{,}0176] = 1$$

Modların etki oranları incelendiğinde yapıya etkin modların oranlarının toplamı eşit 1 olduğu ve hesaplamaların kontrolün sağladığı görülmektedir.

5. Modal Katılım Faktörü

Normalize modlar ile hesaba katılacak mod sayısının belirlenmesi sonuçları aşağıda verilmiştir.

$$L_{ij} = \left[\sum_{i=1}^{N} [m_i \phi_{ij}]\right]^2$$

L_{ij}= [1305,5 133,8 40,4 15,1 5,3 1,2](kNs^2/m)

$$0{,}90 \sum_{i=1}^{N} m_i = 250{,}2 \text{ x } 6 \text{ x } 0{,}9 = 1351{,}2 \text{ kN}$$

$$M_i = \sum_{i=1}^{N} m_i \phi_i^2 = \{\phi_i\}^T [m]\{\phi_i\}$$

$M_i = [1{,}00 \quad 1{,}00 \quad 1{,}00 \quad 1{,}00 \quad 1{,}00 \quad 1{,}00](kNs^2/m)$ 1 olması gerekir.

$L_{ij}/M_i = [1305{,}5 \quad 133{,}8 \quad 40{,}4 \quad 15{,}1 \quad 5{,}3 \quad 1{,}2](kN)$

$1351{,}2 \text{ kN} < 1305{,}5 + 133{,}8 = 1439{,}3 \text{ kN}$

Yukarıda görüldüğü gibi ilk iki mod çözüm için yeterlidir.

Etkin Ağırlıkların Hesabı

$$L_i = \sum_{i=1}^{N} \{\phi_i\}^T [m]\{r\}$$

$L_i = [36{,}132 \quad 11{,}568 \quad 6{,}356 \quad 3{,}887 \quad 2{,}303 \quad 1{,}081](kNs^2/m)$

$W_i = L_i^2 \, 9{,}81/M_i = [12807{,}398 \quad 1312{,}82 \quad 396{,}32 \quad 148{,}199 \quad 52{,}01 \quad 11{,}47](kN)$

Kontrol

Tüm modlar dikkate alındığında etkin ağırlıkların yapı ağırlığına eşit olması koşulu kontrol edilmektedir. Yapının etkin ağırlığı ile başlangıçtaki ağırlığının eşit olması hesaplamaların doğruluğunu göstermektedir.

$W_s = 14728{,}216 \text{ (kN)} = \sum W_i = 14728{,}216 \text{ (kN)}$

Yapının etkin ağırlığı ile başlangıçtaki ağırlığının eşit olması hesaplamaların kontrolünün doğruluğunu göstermektedir.

Hesaba katılan modlar sonucu bulunan modal kütlelerin toplamı yaklaşık yapının kütlesinin %90'ı civarında olması gerekir.

$n_i = W_i/W_s = [0{,}8695 \quad 0{,}0891 \quad 0{,}0269 \quad 0{,}0101 \quad 0{,}0035 \quad 0{,}0008] = 1$

$n_1 + n_2 = 0{,}8695 + 0{,}0891 = 0{,}9586 > 0{,}90$ İlk iki mod çözüm için yeterlidir.

6. Deprem yüklerinin belirlenmesi için esas alınacak olan Spektral İvme Katsayısı.

$$A\,(T) = A_0\, I\, S(T) = [0{,}965 \quad 0{,}968 \quad 0{,}755 \quad 0{,}669 \quad 0{,}627 \quad 0{,}607]$$

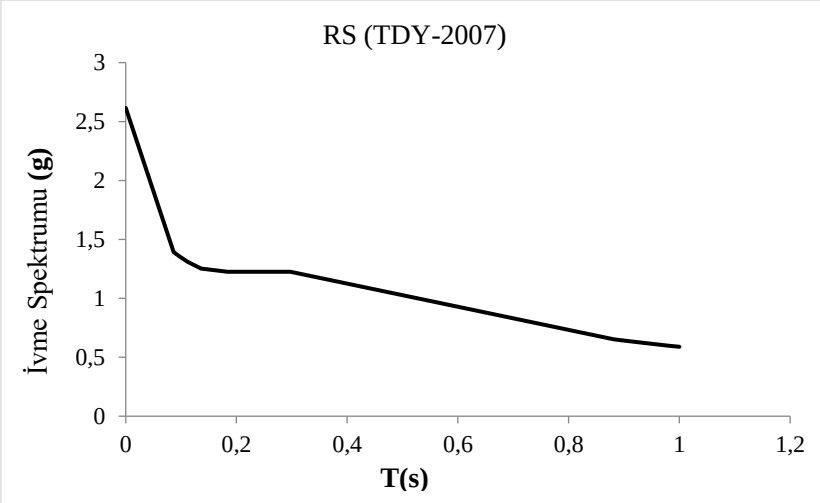
C_s: j. Titreşim modunda dikkate alınan ivme spektrumu ordinatı belirlenir:

$$C_{sj} = [0{,}121 \quad 0{,}126 \quad 0{,}141 \quad 0{,}151 \quad 0{,}158 \quad 0{,}162]$$

Doğal titreşim periyodu (T_i)'ya bağlı ivme spektrum katsayısı (S_{aRi}) hesaplanır.

$$S_{ae} = A(T)\, g / R_a(T) = [1{,}184 \quad 1{,}241 \quad 1{,}386 \quad 1{,}486 \quad 1{,}552 \quad 1{,}589]$$

Mod birleştirme yöntemi uygulanırken kullanılan deprem parametrelerine dayanılarak ortaya konulan azaltılmış ivme spektrumu Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 12. TDY'e göre azaltılmış ivme spektrumu

7. Modal taban kesme kuvvetleri V_{ji} ve toplam taban kesme kuvveti belirlenir.

$$V_{ji} = C_{sj}\, W_i = 1{,}0e + 03[1{,}545 \quad 0{,}166 \quad 0{,}056 \quad 0{,}023 \quad 0{,}008 \quad 0{,}002](kN)$$

Herhangi iki titreşim moduna ait doğal periyotların daima $T_j / T_i < 0{,}80$ koşulunu sağlaması halinde V_{tB} olarak hesaplanır. Koşul sağlanmıyorsa birleştirme işlemi Tam Karesel Birleştirme yöntemi kullanılarak yapılmalıdır.

$$V_{tB} = \sum \left(V_{j1}^2\right)^{1/2} = 1555{,}23\ (kN)$$

İlgili doğrultudaki birinci doğal titreşim periyodu temel alınarak eşdeğer deprem yükü yönteminde hesaplanacak taban kesme kuvveti değeri hesaplanır ve mod birleştirme yönteminde bulunan taban kesme kuvveti ile mukayese edilir. Mod birleştirme yönteminden bulunan taban kesme kuvveti V_{tB}'nin, eşdeğer deprem yükü yöntemine göre hesabı yapılmış taban kesme kuvveti V_{ts}'nin %9' ünden küçük olması halinde kuvvetler 0,9 ile çarpılarak büyütülür.

$$V_{ts} = \frac{W_s\ \mathrm{A_0\ I\ S(T)}}{R} = 1841{,}027(kN)$$

$V_{tB} > \beta\ V_{ts}$ Mod birleştirme yöntemi sonuçları ölçeklenir,

$$MBY = \beta\ \frac{V_{ts}}{V_{tB}} =\ 1{,}065$$

$$V_{j2} = 1{,}0e + 03[1{,}6462 \quad 0{,}1769 \quad 0{,}0596 \quad 0{,}0239 \quad 0{,}0088 \quad 0{,}0020](kN)$$

$$V_{tB} = \sum \left(V_{j2}^2\right)^{1/2} = 1656{,}92\ (kN)$$

8. Her bir mod için hesabı yapılan taban kesme kuvveti katlara dağıtılır.

$$F_{dinamik} = [89{,}79 \quad 174{,}38 \quad 248{,}82 \quad 308{,}80 \quad 350{,}84 \quad 372{,}49](kN)$$

$$V_i = [89{,}80 \quad 264{,}20 \quad 513{,}0 \quad 821{,}8 \quad 1172{,}7 \quad 1545{,}1](kN)$$

9. Deplasmanlarına her moddan gelen maksimum katkı hesabı yapılabilir. Her moddan gelen maksimum katkı aynı anda oluşmadığı için bu katkıların üst üste eklenmesi uygun olmamaktadır. Dolaysıyla bu katkıların tam karesel birleştirme (CQC) veya karelerinin toplamının karekökü (SRSS) yöntemlerinden uygun olanı ile birleştirilmesi gerekmektedir. Aşağıda $[\mathrm{Y_i}]_{\mathrm{max}}$ maksimum deplasmanlar ve $\mathrm{S_{aR}(T)}$ azaltılmış ivme spektrumunu göstermektedir.

$$[Y_i]_{max}=\frac{L_i\ S_{aR}}{\omega_i^2}, \qquad S_{aR}(T)=\frac{S_{ae}(T)}{R_a(T)}$$

$$Y_{mak} = [0{,}1894 \quad 0{,}0073 \quad 0{,}0018 \quad 0{,}0007 \quad 0{,}0003 \quad 0{,}0001]$$

Deplasmanların etkisiyle mod seviyelerinde oluşan [x] deplasmanları;

$$[X]_i = [Y]_{mak}\ [\phi]_i$$

$$X_i = \begin{bmatrix} 0{,}00158 & 0{,}00017 & 5{,}757e\text{-}05 & 2{,}309e\text{-}05 & 8{,}465e\text{-}06 & 1{,}912e\text{-}06 \\ 0{,}00308 & 0{,}00025 & 4{,}083e\text{-}05 & -5{,}567e\text{-}06 & -9{,}618e\text{-}06 & -3{,}386e\text{-}06 \\ 0{,}00440 & 0{,}00021 & -2{,}861e\text{-}05 & -2{,}175e\text{-}05 & 2{,}461e\text{-}06 & 4{,}084e\text{-}06 \\ 0{,}00546 & 6{,}162e\text{-}05 & -6{,}113e\text{-}05 & 1{,}081e\text{-}05 & 6{,}821e\text{-}06 & -3{,}847e\text{-}06 \\ 0{,}00620 & -0{,}00011 & -1{,}473e\text{-}05 & 1{,}914e\text{-}05 & -1{,}021e\text{-}05 & 2{,}728e\text{-}06 \\ 0{,}00659 & -0{,}00024 & 5{,}067e\text{-}05 & -1{,}542e\text{-}05 & 4{,}780e\text{-}06 & -9{,}847e\text{-}07 \end{bmatrix}$$

MBY'inde modal analizde elde edilen yapının her modunun ayrı ayrı hesaplanıp ve daha sonra bu modların istatistiksel olarak analize katılarak hesaplanmaktadır. Bu sebeple modal analizin nasıl olduğu ve hesabı bu örnek üzerinde açıklanacaktır.

Yapıların deprem hesaplarında temel olan ivme değerleri Karelerin toplamının karekökü (SRSS**)** yöntemine göre aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır. Bu yöntemde modal sönümlemenin hesaba katılmadığı için sönüm değeri sıfır olmaktadır. $\xi = 0$;

$$[X]_{mak} = [X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2]^{0,5}$$

$$[X]_{s\ mak} = [0{,}00158 \quad 0{,}00308 \quad 0{,}0044 \quad 0{,}0054 \quad 0{,}0062 \quad 0{,}0065]\ (m)$$

Kontrol

$-\omega_2^2\ [M]\ \{X\} + [k]\ \{X\} = 0$, $Kontrol = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$ Kontrolün sağlamıştır.

10. Tüm modlar hesaba katılması sonucu oluşan deprem kuvvetleri aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır.

$$F_{i\,mod} = \omega_i^2\, m_i\, X_i$$

$$F_{i\,mod} = \begin{bmatrix} 89,79 & 83,50 & 72,25 & 50,32 & 25,81 & 7,01 \\ 174,37 & 125,00 & 51,24 & -12,13 & -29,33 & -12,42 \\ 248,82 & 103,63 & -35,91 & -47,39 & 7,51 & 14,98 \\ 308,81 & 30,14 & -76,71 & 23,57 & 20,79 & -14,11 \\ 350,85 & -58,52 & -18,49 & 41,72 & -31,14 & 10,00 \\ 372,49 & -117,74 & 63,59 & -33,61 & 14,58 & -3,61 \end{bmatrix} \text{(kN)}$$

Her kata etkiyen yatay deprem kuvvetleri aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır.

$$F_{i\,kat} = [F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + F_4^2 + F_5^2 + F_6^2]^{0,5}$$

$$F_{i\,kat} = [89,79 \quad 214,55 \quad 271,92 \quad 320,48 \quad 359,96 \quad 397,51] \text{ (kN)}$$

11. Bulunan yatay deprem yüklerinden dolayı oluşan kesme kuvveti hesaplanır.

$V_{i.mod} = [1]_{\text{üst üçgen}} [F_{ji}]$

$$V_{i\,mod} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 89,79 & 83,50 & 72,25 & 50,32 & 25,81 & 7,01 \\ 174,37 & 125,00 & 51,24 & -12,13 & -29,33 & -12,42 \\ 248,82 & 103,63 & -35,91 & -47,39 & 7,51 & 14,98 \\ 308,81 & 30,14 & -76,71 & 23,57 & 20,79 & -14,11 \\ 350,85 & -58,52 & -18,49 & 41,72 & -31,14 & 10,00 \\ 372,49 & -117,74 & 63,59 & -33,61 & 14,58 & -3,61 \end{bmatrix} \text{(kN)}$$

$$V_{i\,mod} = \begin{bmatrix} 1545,14 & 166,01 & 55,97 & 22,45 & 8,23 & 1,89 \\ 1455,34 & 82,51 & -16,27 & -27,89 & -17,58 & -5,15 \\ 1281,96 & -42,49 & -67,52 & -15,74 & 11,74 & 7,26 \\ 1032,14 & -146,12 & -31,61 & 31,66 & 4,24 & -7,71 \\ 723,34 & -176,26 & 45,10 & 8,10 & -16,56 & 6,39 \\ 372,49 & -117,74 & 63,59 & -33,61 & 14,58 & -3,61 \end{bmatrix} \text{(kN)}$$

$$V_{i\,kat} = [V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + V_6^2]^{0,5}$$

$$V_{i\,kat} = [1545,1 \quad 1457,7 \quad 1283,4 \quad 1043,4 \quad 746,1 \quad 397,5] \text{ (kN)}$$

12. Bulunan yatay deprem yüklerinden dolayı oluşan devrilme momenti hesaplanır.

$M_{i.mod} = [h]_{\text{üst üçgen}} [F_{ji}]$

$$M_{i\,mod} = \begin{bmatrix} 3 & 6 & 9 & 12 & 15 & 18 \\ 0 & 3 & 6 & 9 & 12 & 15 \\ 0 & 0 & 3 & 6 & 9 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 6 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 89,79 & 83,50 & 72,25 & 50,32 & 25,81 & 7,01 \\ 174,37 & 125,00 & 51,24 & -12,13 & -29,33 & -12,42 \\ 248,82 & 103,63 & -35,91 & -47,39 & 7,51 & 14,98 \\ 308,81 & 30,14 & -76,71 & 23,57 & 20,79 & -14,11 \\ 350,85 & -58,52 & -18,49 & 41,72 & -31,14 & 10,00 \\ 372,49 & -117,74 & 63,59 & -33,61 & 14,58 & -3,61 \end{bmatrix} \text{ (kNm)}$$

$$M_{i\,mod} = \begin{bmatrix} 19228,29 & -702,24 & 147,81 & -44,99 & 13,94 & -2,87 \\ 14592,86 & -1200,28 & -20,12 & -112,35 & -10,75 & -8,45 \\ 10226,83 & -1447,82 & 28,71 & -28,75 & 41,99 & 7.00 \\ 6383,92 & -1320,35 & 231,27 & 18,45 & 6,76 & -14,78 \\ 3287,49 & -881,98 & 326,10 & -76,53 & -5,95 & 8,35 \\ 1117,48 & -353,21 & 190,79 & -100,84 & 43,73 & -10.83 \end{bmatrix} \text{ (kNm)}$$

$$M_{i\,mod} = [M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 + M + M_5^2 + M_6^2]^{0,5}$$

$$M_{i\,mod} = [19228,29 \quad 14642,14 \quad 10328,84 \quad 6523,16 \quad 3420,19 \quad 1192,53] \text{ (kNm)}$$

13. Herhangi iki titreşim moduna ait doğal periyotların daima, $[(T_i / T_j) < 0,8 \quad (T_i < T_j)]$ şartını temin etmesi halinde, maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için *Karelerin Toplamının Kare Kökü Kuralı* (SRSS) uygulanabilir.

$$T_i = [0,418 \quad 0,142 \quad 0,089 \quad 0,067 \quad 0,057 \quad 0,052] \text{ (s)}$$

$[T_i/T_j] = [0,34 \quad 0,624 \quad 0,759 \quad 0,845 \quad 0,912]$ (s) Koşulu sağlanmamıştır.

Yukarıda belirtilen şartın temin edilmemesi neticesinde, maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için *Tam Karesel Birleştirme* (CQC) Kuralı kullanılması gerektiği deprem yönetmeliğinde [31] belirtilmektedir. Bu kural uygulanırken kullanılacak çapraz korelasyon katsayılarının hesabında, modal sönüm oranları bütün titreşim modları için %5 olarak alınacaktır.

İki modda aynı sönüm oranına sahip olan sistem için $\xi_i = \xi_j = \xi$, aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir. Burada ξ_i ve ξ_j, sırasıyla i' nci ve j'ninci titreşim modlarında sönümleme oranlarıdır ve $\eta_{ij} = \omega_i/\omega_j = 1$'a eşit veya daha küçük olmalıdır.

$$\xi = 0{,}05, \qquad \eta_{ij} = \omega_i/\omega_j \ , \qquad \omega_j > \omega_i$$

$$\kappa_{ij} = \frac{8\xi^2(1+\eta_{ij})\eta_{ij}^{\frac{3}{2}}}{\left(1-\eta_{ij}^2\right)^2 + 4\xi^2\eta_{ij}(1+\eta_{ij})^2}$$

Yukarıda κ_{ij} çapraz korelasyon katsayı, η_{ij} serbest titreşim frekanslarının oranını ve ξ sönüm oranını göstermekte olup, %5 olarak kabul edilebilir.

$$\eta_{ij} = \begin{bmatrix} 1{,}0000 & 0{,}3399 & 0{,}2122 & 0{,}1610 & 0{,}1361 & 0{,}1241 \\ 2{,}9419 & 1{,}0000 & 0{,}6242 & 0{,}4737 & 0{,}4005 & 0{,}3652 \\ 4{,}7128 & 1{,}6020 & 1{,}0000 & 0{,}7589 & 0{,}6416 & 0{,}5851 \\ 6{,}2098 & 2{,}1108 & 1{,}3177 & 1{,}0000 & 0{,}8453 & 0{,}7709 \\ 7{,}3459 & 2{,}4970 & 1{,}5587 & 1{,}1830 & 1{,}0000 & 0{,}9120 \\ 8{,}0552 & 2{,}7381 & 1{,}7092 & 1{,}2972 & 1{,}0965 & 1{,}0000 \end{bmatrix} \quad i \neq j$$

$$\kappa_{ij} = \begin{bmatrix} 1{,}0000 & 0{,}0067 & 0{,}0026 & 0{,}0016 & 0{,}0012 & 0{,}0010 \\ 0{,}0067 & 1{,}0000 & 0{,}0412 & 0{,}0157 & 0{,}0100 & 0{,}0080 \\ 0{,}0026 & 0{,}0412 & 1{,}0000 & 0{,}1144 & 0{,}0464 & 0{,}0317 \\ 0{,}0016 & 0{,}0157 & 0{,}1144 & 1{,}0000 & 0{,}2602 & 0{,}1270 \\ 0{,}0012 & 0{,}0100 & 0{,}0464 & 0{,}2602 & 1{,}0000 & 0{,}5400 \\ 0{,}0010 & 0{,}0080 & 0{,}0317 & 0{,}1270 & 0{,}5400 & 1{,}0000 \end{bmatrix} \quad i \neq j$$

En genel mod birleştirme kuralı olarak Tam Karesel Birleştirme (CQC) Kuralı aşağıdaki denklemlere göre hesaplanacaktır. Yerdeğiştirmelerin etkisiyle mod seviyelerinde oluşan x deplasmanları (i ≠j):

$$X_{CQC} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} X_{im}\kappa_{ij}X_{jm}}$$

X_{CQC} = [0,00155 0,0033 0,0044 0,0055 0,0062 0,0066] (m)

Kuvvet

$$F_{CQC} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} F_{im}\kappa_{ij}F_{jm}}$$

F_{CQC} = [162,294 225,419 276,424 320,268 358,307 395,344] (kN)

Kesme

$$V_{CQC} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} V_{im}\kappa_{ij}V_{jm}}$$

V_{CQC} = [1557,0 1458,7 1283,3 1042,4 744,5 395,3] (kN)

Moment

$$M_{CQC} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} M_{im}\kappa_{ij}M_{jm}}$$

M_{CQC} = [19237 14635 10319 6513 3411 1186] (kNm)

Bütün modların eş zamanlı olduğu kabul edilerek bu anda oluşan yatay kuvvet, deplasman ve kesme kuvveti her mod için bulunanların toplamı olarak alınır ve buna *mutlak değerlerin toplamı* (ABS) denir. Bir yapıdaki kuvvet veya deplasmanın pik değerini tahmin etmek için kullanılan en gerçeğe yakın (güvenli tarafta kalan) yöntem, modal davranış büyüklüklerinin mutlak değerlerinin toplamını kullanmaktır. Lakin bu değerler çok büyük çıkmasından dolayı ekonomik olmayacak bu değerler boyutlandırmada kullanılmaz. ABS yöntemine göre maksimum deplasmanlar, Kuvvet, Kesme ve Moment sırasıyla aşağıdaki denklemlerle hesaplanacaktır.

$$X_{ABS} = \sum_{i=1}^{N} X_1 + X_2 + \cdots + X_N$$

X_{ABS} = [0,00159 0,00334 0,00458 0,00547 0,00609 0,0064] (m)

Kuvvet

$$F_{ABS} = \sum_{i=1}^{N} F_1 + F_2 + \cdots + F_N$$

F_{ABS}=[89,798 299,380 388,375 439,212 500,709 605,627] (kN)

Kesme

$$V_{ABS} = \sum_{i=1}^{N} V_1 + V_2 + \cdots + V_N$$

V_{ABS}=[1545,14 1537,9 1391,00 1241,5 969,5 605,6] (kN)

Moment

$$M_{ABS} = \sum_{i=1}^{N} M_1 + M_2 + \cdots + M_N$$

M_{ABS}=[19228,3 15793,1 11703,4 7954,0 4578,1 1816,9] (kNm)

Çizelge 5.24. Yatay deprem kuvvetlerin (SRSS, CQC ve ABSSUM) Karşılaştırma

Kat sayısı	ABS			SRSS			CQC		
	F(D.Y) (kN)	V (K.Y) (kN)	Moment (kNm)	F(D.Y) (kN)	V (K.Y) (kN)	Moment (kNm)	F(D.Y) (kN)	V (K.Y) (kN)	Moment (kNm)
6	605,6	605,6	1816,9	397,5	397,5	1192,0	395,3	395,3	1186,0
5	500,7	969,4	4578,1	360,0	746,1	3420,0	358,3	744,5	3411,0
4	439,2	1241,5	7954,0	320,5	1043,4	6523,0	320,3	1042,4	6513,0
3	388,4	1391,0	11703,4	271,9	1283,4	10329,0	276,4	1283,3	10319,0
2	299,4	1537,9	15793,1	214,6	1457,7	14642,0	225,4	1458,7	14635,0
1	89,8	1545,1	19228,3	89,8	1545,1	19228,0	162,3	1557,0	19237,0

Çizelge 5.24'ye görüldüğü gibi yapının yatay deprem kuvvetlerin ABS yöntemine göre maksimum değerlerle karşılaşmaktadır.

14. Plan düzensizliği olan binaların yatay olarak deplasmanı, depremler sırasında binanın dinamik özellikleriyle ilgili olan bina tasarımındaki en ciddi konulardan biridir.

Çizelge 5.25. Maksimum yatay deplasmanın hesaplanması ve karşılaştırılması

Kat sayısı	ABS	SRSS	CQC
	Mak. Deplasman (mm)	Mak. Deplasman (mm)	Mak. Deplasman (mm)
6	6,40	6,58	6,58
5	6,09	6,20	6,20
4	5,47	5,45	5,45
3	4,58	4,40	4,40
2	3,34	3,07	3,07
1	1,59	1,58	1,58

Çizelge 5.25, (SRSS, CQC ve ABS) analiz yöntemleri için yapı yüksekliği ile birlikte kat yerdeğiştirmesindeki artışı göstermektedir. Sonuç olarak deprem kuvvetlerin (SRSS, CQC ve ABS) yöntemleri ile hesaplanarak ve sonuçlarını Çizelge 5.24'te karşılaştırmıştır.

Modların katkıları CQC ile birleştirilerek analiz yapılması durumunda binanın zaman tanım alanında dinamik analiz yapılmasına gerek kalmaz.

15. Etkin göreli kat ötelemelerinin hesaplanması ve sınırlandırılması

$$\Delta_i = d_i - d_{i-1}, \qquad \delta_i = R\Delta_i\ , \qquad \frac{(\delta_i)_{mak}}{h_i} \leq 0{,}02$$

Çizelge 5.26. Etkin göreli kat ötelemelerinin kontrolü

Kat sayısı	$(d_i)_{mak}$ (mm)	d_i-d_{i-1} (mm)	h_i (mm)	$(\delta_i)_{mak}$ ≤ 0,02
6	6,58	0,38	3000	0,001
5	6,20	0,75	3000	0,002
4	5,45	1,05	3000	0,003
3	4,40	1,33	3000	0,004
2	3,07	1,49	3000	0,004
1	1,58	1,58	3000	0,004

$(\delta_i)_{mak}$ değerinin 0,02'den küçük olduğu, etkin göreli kat ötelemeleri ile ilgili koşulu yerine getirmiş olup bu açıdan hiçbir problemin olmadığı görülmektedir.

5.8.3. Sonuçlar ve tartışmalar

Bu örneklerde ESLM ve RSM'ye göre yapıların deprem performansını olumsuz etkileyen ve L şeklindeki plan düzensizliğine neden olan A1 ve A3 tipi düzensizliklerin TDY-2007'de belirtilen şartlar doğrultusunda analizleri incelenmiştir. Analiz sonuçları üzerinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

<u>Örnek 5.1'den çıkan sonuçlar ve tartışmalar</u>

Örnek model ±%5 ek dışmerkezlik ile deprem yük altında analiz edilmiştir. Ek dışmerkezlik kat burulma etkisini içeren deprem yüklerin x ve y doğrultularında hesabı yapılmıştır. Binanın deprem doğrultusundaki birinci titreşim periyodu Rayleigh Yöntemi ile hesabında

burulma (η_{bi}) etkileri dikkate alınmıştır. Binanın her açıklıktaki kesme kuvvetleri ve burulma düzensizliği hesaplanmış çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır (Çizelge 5.13-5.16). Çizelge 5.20, 5.21 ve 5.22'de en düşük kat burulma düzensizlik katsayısının eşdeğer deprem yükü analizi ile elde edildiği görülmüştür. Çizelgelerinin incelenmesinden görüldüğü gibi burulma düzensizliği katsayılarının tüm katlar için her iki yönde 1,2'den az olduğu görülmüştür.

Örnek 5.2'den çıkan sonuçlar ve tartışmalar

Bu örnekte ilk önce bütün modların eş zamanlı olduğu kabul edilmiş ve bu anda oluşan deplasman, kesme kuvvet ve yatay kuvveti her mod için elde edilenlerin toplamı olarak alınmıştır. Daha sonra modal sönümleme hesaba katıldığında oluşan deplasman, kesme kuvvet ve yatay kuvveti her mod için bulunanların toplamı olarak alınmıştır.

Çizelge 5.24'te görüldüğü gibi mutlak değerlerin toplamı (ABS) yöntemine göre binanın deprem kuvvetleri maksimum değerlerle karşılaşmaktadır. Ayrıca modlar iyi ayrıldığında kij'in $i \neq j$ terimleri çok küçük hale gelmiş ve tam karesel birleştirme (CQC) kuralı, karelerin toplamının kare kökü (SRSS) kuralına çok yakın değerler verilmiştir.

Yapıda planda düzensizliğin bulunduğu durumlar, Çizelge 5.24 ve 5.25 'da gösterildiği gibi, kat deprem kuvvetleri, kat kesme kuvveti ve kat moment talebi açısından yapının sismik tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca Çizelge 5.26'de görüldüğü gibi elastik dinamik analizden elde edilen maksimum katlar arası göreli kat ötelemelerin oranları TDY-2007 tarafından önerilen izin verilebilir göreli kat ötelemeleri oranlarını aşmamaktadır.

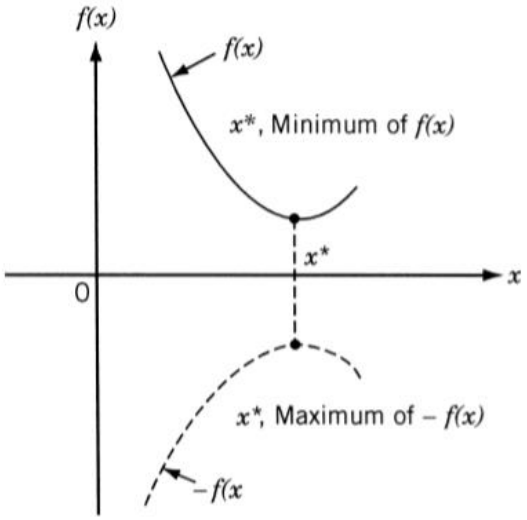
Genel sonuçlar

Yukarıda yapılan analizlere göre MBY'nin, EDYY'ne göre daha kesin bir yöntem olduğu saptanmıştır. EDYY, birinci doğal titreşim periyodu etkilerinin önemli olmadığı düzenli, düzensizliği yüksek olmayan ve kat sayısı yüksek olmayan binalar için uygundur.

Bu bölüm, EDYY ve MBY yönteminin hesaplama ve sınırlamalarına bağlı olarak iki farklı yapı sistem örnekle beraber bir tartışma ile sona ermiştir.

6. OPTİMİZASYON ARAÇLARI İLE MÜMKÜN OLAN EN İYİ TASARIMA ULAŞMAK

Yapısal analiz ve tasarımın temel amacı, kullanım ömrü boyunca uygulanan tüm yüklere kusursuz şeklide dayanabilecek bir yapı üretmektir. Bu hedef, yapı optimizasyon teknikleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. "*Optimizasyon,* en iyi sonucu belli koşullar altında alma eylemidir" [42]. Herhangi bir mühendislik sisteminin tasarım, yapım ve bakımında mühendisler bazı aşamalarda birçok teknolojik ve yönetimsel karar almak zorundadır. Gereken çabayı en aza indirgemek ya da istenen faydayı en üst seviyeye çıkarmak tüm bu kararların nihai amacı olduğu söylenebilir. Herhangi bir pratik durumda istenen fayda veya gereken çaba belirli karar değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanabildiğinden, "optimizasyon, bir fonksiyonun maksimum veya minimum değerini veren şartları belirleme süreci olarak tanımlanabilir" [43]. Şekil 7.1'den görülebilir ki, eğer bir x * noktası f (x) fonksiyonunun minimum değerine karşılık gelirse, aynı nokta, -f (x) fonksiyonunun negatifinin maksimum değerine de karşılık gelir. Bu nedenle, bir fonksiyonun maksimumunun, aynı fonksiyonun negatifinin minimumunu arayarak bulunabileceği için optimizasyon, minimize etmek için alınabilir.



Şekil 6.1. Minimum f (x), maksimum −f (x) ile aynıdır [43]

Sunulan bölümde, optimizasyonun temellerini tanıtmak için yapı optimizasyonunun ana kavramlarını, tarihsel gelişmelere, yapısal optimizasyonun ilkelerini ve olasılıklarını ve çeşitli optimizasyon tekniklerini hakkında bahsedilmiştir.

6.1. Optimizasyonun Tarihsel Gelişimi

Optimizasyon uygarlık kadar eskidir. Ancak asıl gelişme 17. ve 18. yüzyılında Newton ve Gottfried Leibnitz (Diferansiyel hesaplama optimizasyon), Lagrange (Değişkenler hesabı, fonksiyonallerin minimizasyonu, sınırlı problemler için optimizasyon yöntemi) ve Cauchy (Doğrudan ikame ile çözüm, sınırsız optimizasyon için en dik iniş yöntemi) geliştirilmiştir. Bu çalışmalar optimizasyon teorisinin gelişiminde dönüm noktası olmuşlardır.

20. yüzyılın ortalarında, yüksek hızlı dijital bilgisayarlar yapıldığında, optimizasyon metodolojisi hızla ilerlemiş. 20. yy'ın ikinci yarısında önemli gelişmeler, 1947 yılında Dantzig, lineer programlama problemlerinin çözümü için Simplex metodunu sunmuş, Von Neumann LP-problemleri için duallik teoremini (theory of duality) vermiş ve 1951 yılında Kuhn ve Tucker [44] tarafından optimallik koşullarında araştırma yapılmıştır. 1960 yılında, Lucien Scmmit matematiksel programlama teorilerini yapısal tasarıma tanıtmıştır. Schmit, sonlu eleman analizini lineer olmayan sayısal optimizasyon yöntemleriyle birleştirerek "Yapısal Sentez" adını verdi. Bilgisayarların 1980'li yıllarda daha verimli duruma gelmeye başlamasıyla birlikte evrensel optimizasyon için geniş ölçekli problemler ve sezgisel algoritmalar daha popüler hale gelmeye başlamıştır. O zamandan beri, optimizasyon şeması, bir ürünün geliştirme döngüsünü kısaltmak için doğal olarak mühendislik tasarım uygulamalarına dahil edilmiştir.

Bazen geleneksel olmayan optimizasyon yöntemleri olarak da tanımlanan modern optimizasyon yöntemleri, son zamanlarda karmaşık mühendislik optimizasyon problemlerini çözmek için güçlü ve popüler yöntemler olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntemler arasında Genetik Algoritma (Bölüm 8'de ele alınan) yapısal optimizasyonda popüler olmuştur, tavlama benzetimi, karınca kolonisi optimizasyonu, parçacık sürüsü optimizasyonu, bulanık optimizasyon ve sinir ağı tabanlı optimizasyon bulunur. Bilgisayarların kısa bir süre içinde çok büyük miktarlarda hesaplama yapabilme yeteneği, onları standartlaştırılmış yinelemeli süreçler için yararlı kılar.

6.2. Optimizasyon Problemlerinin Tanıtımı

Genel olarak, yapısal optimizasyon probleminde bir dizi fonksiyon ve değişken sunulur. Tasarım değişkenlerine göre yapısal optimizasyon problemlerinin matematiksel

formülasyonu, amaç ve kısıtlama fonksiyonu, uygulamanın türüne bağlıdır. Bir optimizasyon veya matematiksel programlama problemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [42, 43].

$$\text{bul } X = \begin{Bmatrix} x1 \\ x2 \\ \vdots \\ xn \end{Bmatrix} \quad Amaç\ (minimize)\ f(X) \tag{6.1}$$

Kısıtlamalar

$$\begin{aligned} &g_j(X) \le 0, && j=1, 2, ..., m \\ &h_j(X) = 0, && j=1, 2, ..., p \\ &x_j^L \le x_j \le x_j^U && j=1, 2, …., n \end{aligned} \tag{6.2}$$

Burada; f(X) amaç fonksiyonunu temsil eder ve problemin gereksinimlerine bağlı olarak maksimize edilmesi veya en aza indirilmesi gerekir. $g_j(X)$, $h_j(X)$ sırasıyla eşitsizlik ve eşitlik kısıtlamalarının vektörünü temsil eder. Davranışsal kısıtlamalar olarak da adlandırılırlar. m ve/veya p sınırlarının sayısı ve n değişkenlerinin sayısı hiçbir şekilde ilişkilendirilmemelidir. x_j tasarım değişkeni olarak adlandırılan n boyutlu bir vektördür ve x^L ve x^U sırasıyla alt ve üst sınırlarını temsil eder ve geometrik veya yan kısıtlama olarak adlandırılır. Bu kısıtlamalar, tasarımı uygulanabilir kılar. Denklem (6.1)'de belirtilen problem, *kısıtlamalı bir optimizasyon problemi* olarak adlandırılır. Yukarıdaki matematiksel formülasyon sadece eşitsizlik kısıtlamalarını içerir, çünkü eşitlik kısıtlamaları genellikle yapısal optimizasyonlarda bulunmaz.

Bazı optimizasyon problemleri herhangi bir kısıtlama içermez ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir [43]:

$$\text{bul } X = \begin{Bmatrix} x1 \\ x2 \\ \vdots \\ xn \end{Bmatrix} \quad Amaç\ (minimize)\ f(X) \tag{6.3}$$

Bu tür problemlere *kısıtlamasız optimizasyon* problemlerini denir.

Sadece bir değişken varsa, optimizasyon tek boyutlu iken birden fazla değişkene sahip bir problem çok boyutlu optimizasyon gerektirir. Boyut sayısı arttıkça optimizasyon giderek zorlaşmaktadır. Birçok çok boyutlu optimizasyon yaklaşımı bir dizi tek boyutlu yaklaşımı genellemektedir. Bir optimizasyon probleminin matematiksel tanımının üç temel unsuru vardır: tasarım değişkenleri, bir amaç fonksiyonu ve kısıtlamalar [43]. Bunlar aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

6.2.1. Amaç fonksiyonu

Amaç fonksiyonu, optimizasyon problemlerinde istenen sonucun matematiksel ifadesidir. İdeal bir çözüm için amaç fonksiyonu bazen minimum, bazen de maksimum değerde olabilmelidir. Bu tamamen optimize edilmek istenen problemde neyin amaçlandığına bağlıdır. Örneğin, yapısal tasarımda, minimum ağırlık tasarımı minimum stres tasarımına karşılık gelmeyebilir ve yine minimum stres tasarımı maksimum frekans tasarımına karşılık gelmeyebilir. Dolayısıyla, amaç fonksiyonunun seçimi, tüm optimum tasarım sürecinde en önemli kararlardan biri olabilir. Yapı mühendisliğinde amaç fonksiyonu, yapının maliyeti, ağırlığı ya da diğer bazı şartları belirtir. Amaç fonksiyonunu formüle etmek bazı durumlarda kolaydır. Örneğin, Yapı maliyetinin ağırlığı minimizasyonun, literatürde en yaygın olarak kullanılan amaç fonksiyonu olmasının nedeni kolayca formüle edilebilir olmasından kaynaklıdır [3, 5, 10, 11, 14, 15].

Minimize edilecek Amaç fonksiyonların sayısına bağlı olarak, optimizasyon problemleri, aşağıda kısaca anlatılan tek ve çok amaçlı programlama problemleri olarak sınıflandırılabilir.

Çok amaçlı optimizasyon

Bazı uygulamalarda, iki veya daha fazla amaç fonksiyonu aynı anda optimize edilmesi gerekir. Bunlara *çok amaçlı optimizasyon* problemleri denir. Örneğin, bir yapının ağırlığını en aza indirmek ve aynı zamanda belirli bir noktada deformasyonu veya gerilimi en aza indirmek isteyebiliriz. Bunlar çok amaçlı tasarım optimizasyon problemleri olarak adlandırılır. Çok amaçlı bir programlama problemi şu şekilde ifade edilebilir [43];

$$\text{bul } X=\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} \tag{6.4}$$

$$\text{Amaç (minimize)} \quad f_1(X), f_2(X), ..., f_k(X) \tag{6.5}$$

$$\text{kısıtlamalar} \qquad g_j(X) \leq 0, \qquad j=1, 2, \ldots, m \tag{6.6}$$

Burada; k minimize edilecek objektif fonksiyonların sayısıdır.

Tek amaçlı optimizasyonu

Bazı uygulamalarda, bir amaç fonksiyonunun optimize edilmesi gerekir. Bunlara *tek amaçlı optimizasyon* problemleri denir. Pratikte, çok amaçlı bir problem, tek bir amaç gibi görünmesi için dönüştürülebilir.

6.2.2. Tasarım değişkenleri

Optimizasyon işlemi uygulanırken, yapı sistemini oluşturan bazı parametreler ilk başta belirlenmelidir. Bu parametreler, optimizasyon algoritmasıyla değişmezler ve sistem düzenlenirken, önceden belirlenen parametreler olarak adlandırılırlar. Daha önceden belirsiz kalan parametreler ise*, tasarım değişkenleri* olarak adlandırılır. Tasarım değişkenleri, davranışını iyileştirmek için tasarımcı tarafından serbestçe değiştirilebilen miktarlardır. Optimizasyon problemi formülasyonunun ilk aşamasında, tasarım değişkenlerinin belirleme için tüm parametreler araştırılmalıdır. Çünkü bir problem için uygun tasarım değişkenleri seçilmezse, formülasyon yanlış olacaktır veya mümkün olmayacaktır. Değişkenler için farklı değerler, farklı tasarımlar üretir. Tasarım değişkenleri olabildiğince birbirinden bağımsız olmalıdır. Bağımlı ise, aralarında kısıtlamalar olduğu için değerleri bağımsız olarak belirlenemez. Bağımsız tasarım değişkenlerinin sayısı, problem için *tasarım serbestlik derecelerini* verir.

Problemin türüne bağlı olarak, tasarım değişkenlerinin değerleri tamsayı olabileceği gibi, belirli bir aralığa ölçeklenmiş reel sayılar da olabilir.

Reel sayı tasarım değişkenleri, çoğu durumda kesirli çözümlere sahip olmak tamamen uygundur ve mümkündür. Örneğin, bir kazan gövdesi yapımında 2,50 mm kalınlığında bir levha kullanmak mümkündür.

Tamsayı tasarım değişkenleri, adından da anlaşılacağı gibi tamsayı değişkeni bir tamsayı değerine sahip olmalıdır. Örneğin, yapısal elemanların bir beton elemandaki kesitlerinin boyutları genellikle belirli bir boyutta, sayısı bir tam sayı olmalıdır, vb.

Karışık değişkenler, bu durumda, bazı tasarım değişkenleri sürekli değerler alırken, diğerlerinin tamsayı değerler almasına izin verilir.

Tasarım değişken tipine göre optimizasyon problemleri sürekli ve ayrık problemler olmak üzere iki ayrı şekilde ifade edilebilir.

Sürekli tasarım değişkenleri, "Tasarım değişkenleri izin verilebilir aralıkları içinde herhangi bir sayısal değere sahip olabildiğinde, probleme sürekli değişken optimizasyon problemi denir." [42].

Ayrık tasarım değişkenleri "Bir tasarım değişkenine, değerinin belirli bir sonlu değerler kümesinden seçilmesi gerekiyorsa, ayrık denir" [42]. Yapısal optimizasyon problemlerinde çözümü ifade eden tasarım değişkenleri ayrık değerler alabilirler. Örneğin donatı çapı, ağırlığı, alanı, yapıyı oluşturan elemanların enkesit boyutları ve alanları gibi değişkenler ayrık değerler alabilirler.

6.2.3. Kısıtlamalar

Yapısal optimizasyon günümüzde geniş bir kavramdır ve yapısal optimizasyonun sonucu, çeşitli olası kısıtlamalar nedeniyle genellikle büyük ölçüde değişir. Yapıların tasarımı, yapının davranışını veya performansını iyileştirmek için uygulama kurallarında belirtildiği gibi malzeme seçimi, yapı elemanların boyutlarında sınırlamalar, yükler, gerekli mukavemet, yerdeğiştirmeler ve gereksinimlere ulaşma gibi bazı kısıtlamalarla sınırlıdır. Bir tasarım tüm kısıtlamaları karşılıyorsa, uygulanabilir bir tasarım olarak kabul edilir. Fonksiyonlar ve / veya değişkenler belirli değerlerle sınırlandırılabilir, bu sınırlamalara

kısıtlamalar denir ve kısıtlamaları içeren problemlere de *kısıtlamalı optimizasyon problemleri* denmektedir. Yapı optimizasyonu probleminde üç tür kısıtlama belirtilmiştir;

Tasarım kısıtlamaları

Malzemenin enkesit büyüklükleri veya boyutları ile ilgili olan sınırlamalarına *tasarım kısıtlamaları* olarak adlandırılır. Kabul edilebilir bir tasarım üretmek için karşılanması gereken kısıtlamalardır. Bir kolonun minimum boyutları veya bir döşemenin minimum kalınlığı, tasarım kısıtlamalarının önemli örnekleridir.

Geometrik kısıtlamalar

Kullanılabilirlik, üretilebilirlik ve taşınabilirlik gibi tasarım değişkenleri üzerindeki fiziksel sınırlamaları temsil eden kısıtlamalar, *geometrik veya yan kısıtlamalar* olarak bilinir. Geometrik sınırlamalar, yapının elemanlarının boyutlarına ve şekline karşılık gelir.

Davranış veya fonksiyonel kısıtlamalar

Yapısal sistemin davranışı veya performansı üzerindeki sınırlamaları temsil eden kısıtlamalar, *davranış veya fonksiyonel kısıtlamalar* olarak adlandırılır. Genellikle, $g(X) \leq 0$ olarak yazılırlar, burada g, örneğin belirli bir yöndeki bir yerdeğiştirmeyi temsil eden bir fonksiyondur. Maksimum deplasman, gerilme veya burulma sınırlamaları davranış kısıtlamalarının önemli örneklerinden bazılarıdır.

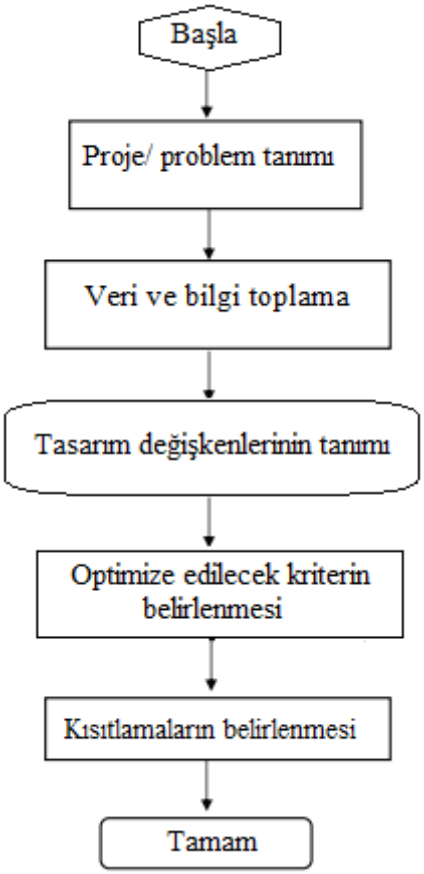
6.3. Optimum Tasarım Problemi Formülasyonu

Problemin açıklayıcı bir ifadesinin iyi tanımlanmış bir matematiksel ifadeye dönüştürülmesini içeren tasarım optimizasyon problemleri için formülasyon sürecidir. Çoğu tasarım optimizasyon problemi için, aşağıdaki beş aşamalı formülasyon süreci gereklidir [42]:

Adım 1: Proje / problem tanımı: Formülasyon süreci, genellikle tasarımcı tarafından yapılan proje / problem için açıklayıcı bir ifade geliştirerek başlar. Açıklama, projenin genel hedefleri ve karşılanması gereken gereksinimlerini açıklar.

Adım 2: Veri ve bilgi toplama: Problemin matematiksel bir formülasyonunu geliştirmek için malzeme özelliklerini, performans gereksinimlerini, kaynak sınırlarını ve diğer ilgili bilgileri toplamaları gerekir. Ek olarak, bu aşamada analiz prosedürleri ve analiz araçları belirlenmelidir. Örneğin, sonlu elemanlar yöntemi genellikle yapıların analizi için kullanılır, bu nedenle böyle bir analiz için mevcut olan yazılım aracının tanımlanması gerekir.

Adım 3: Tasarım değişkenlerinin tanımı: Bu adımda, sistemi tanımlayan, tasarım değişkenleri adı verilen bir dizi değişkeni tanımlanması gerekir. Tasarım değişkenleri olabildiğince birbirinden bağımsız olmalıdır.



Şekil 6.2. Tasarım optimizasyon problemleri için formülasyon süreci

Adım 4: Optimizasyon kriteri: Bir sistem için birçok uygulanabilecek tasarım olabilir ve bazıları diğerlerinden daha iyidir. Farklı tasarımları karşılaştırmak için bir kriteri olması gerekir. Kriter, sayısal değeri bir tasarım belirtildiğinde elde edilebilen bir skaler fonksiyon olmalıdır. Böyle bir kritere genellikle, problem gereksinimlerine bağlı olarak maksimize

edilmesi veya en aza indirilmesi gereken optimum tasarım problemi için objektif bir fonksiyon denir.

Adım 5: Kısıtlamaların formülasyonu: Son adım, tüm kısıtlamaları tanımlamak ve bunlar için ifadeler geliştirmektir. Bu adımda, verilen kaynaklarla tasarlanmalı ve üretilmeli ve performans gereksinimlerini karşılamalıdır. Örneğin, yapısal elemanlar normal çalışma yükleri altında başarısız olmamalıdır. Tüm kısıtlamalar tasarım değişkenlerine bağlı olmalıdır.

Problem uygun şekilde formüle edildikten sonra, genellikle problemi çözmek için iyi bir yazılım mevcuttur. Herhangi bir optimizasyon prosedürü için genel bir akış şeması Şekil 6.2'de gösterilmektedir.

6.4. Yapısal Optimizasyon Sınıflandırmaları

Yapısal optimizasyon, genel olarak, kullanılan tasarım değişkenlerinin tipine bağlı olarak, dört ana strateji olarak sınıflandırılabilir [43]. Bu stratejiler çoğunlukla optimizasyon hedefi, girdiği değişkenlerinin türü ve çıktığı bilgileri açısından farklılık gösterir. İşlem zamanlama tekniğinin matematiksel kısmı, çeşitli algoritmalara göre hala çözülebilir. Uygulanan stratejiye bağlı olarak, çeşitli nedenlerle belirli algoritmalar diğerlerine göre tercih edilir. İlk üç stratejisi, yapısal optimizasyonun tipini gösteren bir program sağlayan şekil 6.4'de gösterilmiştir. Malzeme optimizasyonu genellikle bu stratejilerden biri ile ilgilidir. Her malzeme için ayrı bir optimizasyon işlemini yapmak ve sonuçları karşılaştırmak ve uygun malzemenin az sayıda olması oldukça verimli ve hızlı olacaktır. Bu stratejilerin her birinin optimize edilmesi gereken farklı bir tasarım hedefi vardır. Bunlar aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

6.4.1. Boyutlandırma optimizasyonu

Yapıların boyutlandırma optimizasyonunun amacı, genellikle, yapının münferit elemanları için en uygun kesitleri bulmaktır. Boyutlandırma optimizasyon probleminde, tasarım değişkenleri genellikle optimize edilen elemanın boyutlarının uzunluğu, genişliği, kalınlığı gibi geometrik parametreler veya malzemelerdir. Değişik elemanlar arasındaki bağlantılar ve koordinatlarının düğüm noktaları değişmemektedir. Bundandır ki boyutlandırma

optimizasyon problemi sadece önceden belirlenmiş standart kesitlerden alınarak eleman kesit alanlarının sınırlandırılmasıyla uygulamada verimlidir. Amaç fonksiyonu optimizasyonun hedefidir, genellikle kütle, rijitlik veya maliyettir, ancak diğer hedefler kolayca tanımlanabilir. Geometri ve sınır koşulları (yükler ve kısıtlamalar gibi) zaten bilindiğinden, bunlar geometri, mukavemet, deformasyon vb. açısından kolon, kiriş ve perde kısıtlamalarını tanımlamak için kullanılabilir. Boyutlandırma optimizasyonu probleminde tasarım değişkenlerinin alabileceği değerler ayrık veya sürekli olabilir. Bu durumlarda tasarım değişkenleri olarak yalnızca uygun ayrık değerlerin bulunduğu bir popülasyonun hazırlanması gerekmektedir. Tasarım değişkenlerinin değerlerinin sıfıra küçültülmesine izin verilmez. Boyut optimizasyonu sırasında yapı sistem elemanların hiçbir öğe eklenmez veya kaldırılmaz. Şekil 6.3 (a,d)' de görüldüğü gibi boyutlandırma optimizasyonu göstermektedir.

Sivakumar ve arkadaşları (2004) [45], Hint hükümleriyle izleyen kısıtlamalar altında bir kafes kirişli kulenin boyut optimizasyonunu sunulmuşlardır.

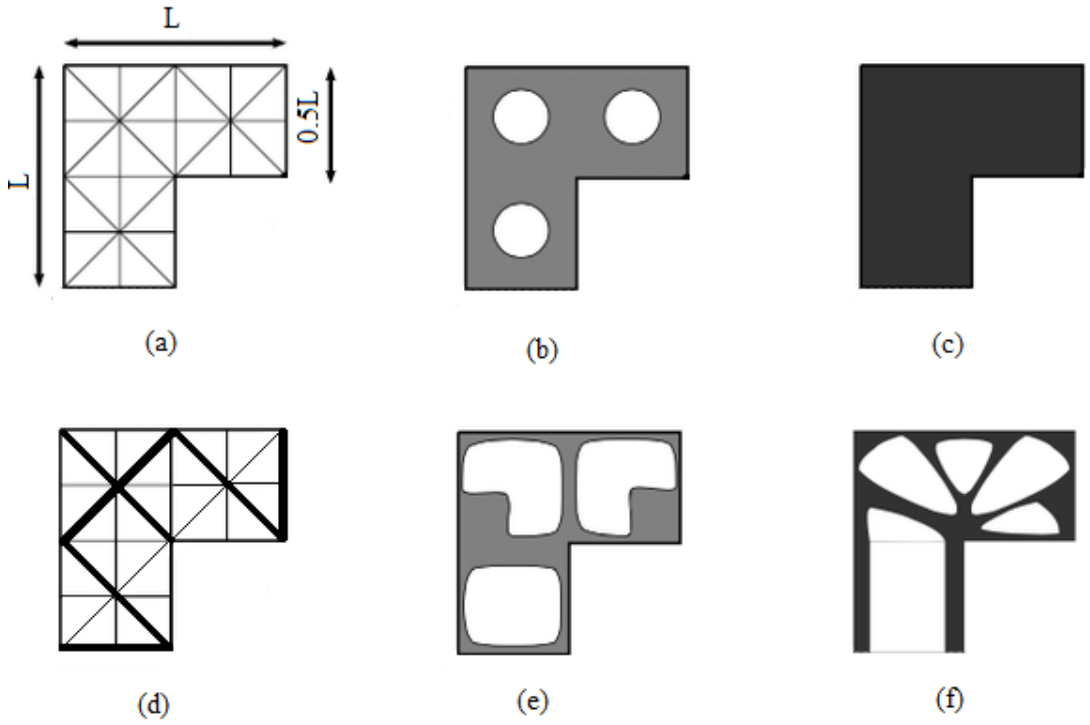
6.4.2. Şekil optimizasyonu

Yapısal şekil optimizasyonu problemlerinde amaç, şeklini değiştirerek yapının performansını artırmaktır. Ayrıca daha hafif bir yapı oluşturmak için malzemeyi çıkarmak olabilir. Tasarım değişkenleri, yapının orijinal geometrisini koordinatlarından bazıları veya yapının şeklini etkileyen diğer bazı parametrelerdir. Kısıtlamalar, boyutlandırılma optimizasyonuna benzer. Tek fark, tanımlarının tasarım değişkenlerine göre ayarlanmasıdır. Geometrik kısıtlamalar, maksimum dönüşümler olarak tanımlanmaktadır. Yapının bağlanabilirliği şekil optimizasyonu ile değiştirilmez ve yeni sınırlar oluşmaz. Bir şekil optimizasyon problemi Şekil 6.3 (b, e) 'de gösterilmektedir.

6.4.3. Topoloji optimizasyonu

Yapısal topoloji optimizasyonları, ihtiyaç duyulmadığında malzemenin çıkarılması ilkesine dayanır [42]. Topoloji optimizasyonu, mümkün olabilecek bütün konfigürasyonları içeren ve tasarımcı tarafından tanımlanan konfigürasyon seti arasından, uygulanan sınır koşulları dahilinde en uygun konfigürasyona sahip yapıyı yaratmayı amaçlamaktadır. Tam sayılı topoloji değişken, bir çevredeki açıklıkların sayısı, bir çatı sistemine mesnetlenmiş kolon veya perde sayısı ile örneklenebilir. Topoloji optimizasyonunda, sabit bir sonlu eleman ağı

kullanılır ve her elemana bir tasarım değişkeni bağlanır. Tasarım değişkenlerinin değerlerinin sıfıra indirilmesine izin verilir. Yapısal elemanların sayısı ve üyeler arasındaki bağlantı, optimize edilecek bir tasarım hedefi olarak kabul edilir. Topoloji optimizasyonu, boyut ve şekil optimizasyonu ile karşılaştırıldığında, başlangıç yapısı gerekmediğinden daha fazla özgürlük sağlar. Ancak kısıtlamalar hala boyutlandırma ve şekil optimizasyonuna benzer. Verilen kısıtlamayı karşılayan optimize edilmiş bir yapı bulmak için yalnızca tasarım alanı, yükler ve sınır koşulları gereklidir. Topoloji optimizasyonuna ilişkin ilk çalışma, kafes kirişlerin en az ağırlık düzeni için optimallik kriterlerini türeten Avustralyalı mucit Michell (1904) tarafından yayınlandı. Bir topoloji optimizasyon problemi Şekil 6.3 (c, f) 'de gösterilmektedir.

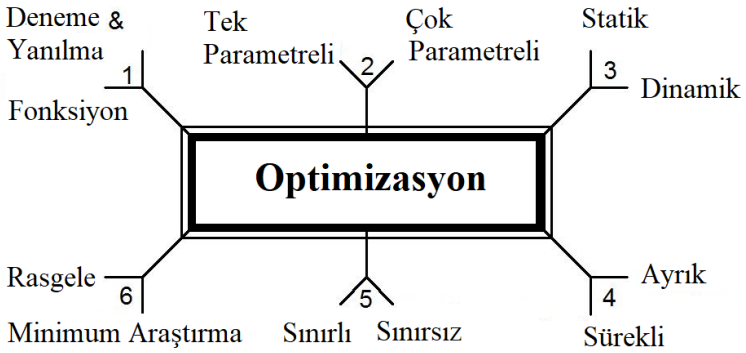


Şekil 6.3. Üç yapısal optimizasyon stratejisi

Şematik olarak üç yapısal optimizasyon stratejisi Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Şekil 6.3'de; a boyutlandırma, b şekil ve c topoloji optimizasyonu gösterilmektedir. Nihai çözümler sırasıyla d, e ve f resimlerinde gösterilmektedir.

6.5. Optimizasyon Kategorileri

Genel olarak, optimizasyon şekil 6.4'te gösterildiği gibi altı ana kategoride sınıflandırılabilir. Ancak kesin biçimiyle altı gruba ayrıldığını söylemek pek mümkün değildir. Örneğin; dinamik optimizasyon problemi sınırlı veya sınırsız olabilir. Bazı parametreler ayrık veya sürekli olarak tanımlanabilir. Bu kategoriler aşağıda tartışılmaktadır [46].



Şekil 6.4. Optimizasyon algoritmalarının kategorileri [46]

Deneme-yanılma optimizasyonu: çıktıyı üreten süreç hakkında fazla bir şey bilmeden çıktıyı etkileyen değişkenleri ayarlama sürecini ifade eder. Buna karşılık, matematiksel bir formül, fonksiyon optimizasyonundaki amaç fonksiyonunu tanımlar. Fonksiyonun çeşitli matematiksel manipülasyonları, en uygun çözüme götürür.

Tek ve çok parametreli optimizasyon: Yalnızca bir değişken varsa, optimizasyon tek boyutludur. Birden fazla değişkeni olan bir problem, çok boyutlu optimizasyonu gerektirir. Boyutların sayısı arttıkça optimizasyon giderek zorlaşır. Pek çok boyutlu optimizasyon yaklaşımı, bir dizi tek boyutlu yaklaşımı genelleştirir.

Statik ve dinamik optimizasyon: Dinamik optimizasyon, çıktının bir zaman fonksiyonu olduğu, statik ise çıktının zamandan bağımsız olduğu anlamına gelir. Statik problemin en iyi çözüm için çözülmesi zordur, ancak zamanın eklenen boyutu, dinamik problemi çözme zorluğunu artırır.

Sürekli ve ayrık parametreli optimizasyon: Ayrık değişkenler yalnızca sınırlı sayıda olası değere sahipken, sürekli değişkenler sonsuz sayıda olası değere sahiptir. Bazı optimizasyon problemlerinde, ayrık ve tamsayı değişkenler, tasarım problemine ek kısıtlamalar getirir. Bu problemlerde, sürekli değişkenlerle çözülen problemin aynısı ile karşılaştırıldığında amaç fonksiyonunun optimum değeri bu değişkenlerle artar. Daha önce belirtildiği gibi, optimizasyon sürecinin amacı "en iyi'yi bulmak" ile açıklanmaktadır. Bu nedenle, önerilen ilk prosedür, mümkünse, sürekli tasarım değişkenleri varsayarak problemi çözmektir. Daha sonra değişkenlere en yakın ayrık / tamsayı değerleri atanır ve tasarımın uygulanabilirliği kontrol edilir.

Kısıtlamalı ve kısıtlamasız: Problemde kısıtlamaların bulunup bulunmadığına bağlı olarak, optimizasyon problemi kısıtlamalı veya kısıtlamasız olarak sınıflandırılabilir. Diğer bir deyişle, optimizasyon probleminin kısıtlamaları olduğunda, buna kısıtlamalı optimizasyon problemi denir. Hiçbir kısıtlama olmadığında, sorun kısıtlamasız bir optimizasyon problemidir.

Kısıtlamalı optimizasyon, değişken eşitlikleri ve eşitsizlikleri amaç fonksiyona dahil eder. Kısıtlamalı bir değişken, genellikle değişkenlerin dönüşümü yoluyla kısıtlanmamış bir değişkene dönüşür. Kısıtlanmamış optimizasyon, değişkenlerin herhangi bir değer almasına izin verir.

Rastgele ve minimum arama: Bazı algoritmalar, başlangıçtaki değişkenler kümesinden başlayarak amaç fonksiyonunu en aza indirmeye çalışır. Bu minimum arayanlar, yerel minimumlar içinde kolayca sıkışıp kalırlar, ancak hızlı olma eğilimindedirler. Geleneksel optimizasyon algoritmalarıdır ve genellikle hesaplama yöntemlerine dayanır. Rastgele yöntemler, bazı değişkenlerin olasılık dağılımları ile tanımlandığı optimizasyon problemlerinin çözümü ile ilgilenir. Küresel minimum bulmada daha büyük başarıları var.

Deterministik optimizasyon metotları, lokal maksimum veya minimuma yakınsayan algoritmalardır. Türevsel hesaplamalar veya türevsel yaklaşımlar deterministik metotlara örnek verilebilir.

6.6. Optimizasyon Yöntemleri

6.6.1. Matematiksel programlama

Farklı optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılabilen çeşitli teknikler, matematiksel programlama tekniği başlığı altında verilmiştir. Bu teknik, hesaplama açısından son derece kullanışlıdır çünkü belirli bir problem sınıfını verimli bir şekilde çözmek için birçok spesifik yöntem vardır. Matematiksel olarak optimizasyon işlemi, bir amaç fonksiyonunu minimum ya da maksimum yapan ve kısıtlayıcıları sağlayan tasarım değişkenleri vektörünün bulunması şeklinde ifade edilir. Reel ya da tamsayı değerlerinin tanımlı bir aralıkta seçip fonksiyona yerleştirerek sistematik olarak bir problemin çözümünü ortaya koymaktadır. Bu tekniğe göre optimizasyon problemleri lineer, lineer olmayan, ayrık, tam sayılı programlama problemleri olarak sınıflandırılabilir. Burada matematiksel optimizasyon problemlerinin türlerine genel bir bakış sunulmuştur.

Lineer programlama yöntemleri

Lineer programlama (LP), bilinmeyenlerde amaç fonksiyonunun lineer olduğu ve kısıtlamalarının lineer eşitlikleri veya bilinmeyenlerdeki lineer eşitsizliklerin olduğu bir optimizasyon yöntemidir [42, 43].

Genel lineer programlama problemi aşağıdaki standart formda ifade edilebilir [42, 43].

Matris formunda:

$$\text{Minimize } f(X) = C^T X \tag{6.7}$$

$$\text{Kısıtlamalar } \quad Ax = b, \quad b \geq 0 \quad \text{ve} \quad x \geq 0$$

Yukarıdaki denklemlerde x, bir n boyutlu kolon vektörüdür; c^T, n boyutlu satır vektörüdür; A, bir m x n matrisi ve b, bir m-boyutlu kolon vektörüdür. Vektör eşitsizliği $x \geq 0$, x' in her bir bileşeninin negatif olmadığı anlamına gelir. f(x) optimize edilmeye çalışılan amaç fonksiyonu temsil edilir.

Standart biçimde belirtilen lineer programlama probleminin özellikleri:

1. Amaç fonksiyonu en aza indirme tipindedir.
2. Tüm kısıtlamalar eşitlik türündedir.
3. Tüm karar değişkenleri negatif olmayan değildir.

Lineer programlama modelleri en yaygın olarak kullanılan optimizasyon modelleridir ve bilimsel, endüstriyel ve ekonomik problemlerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılmıştır.

LP problemlerini çözmek için yıllar içinde başka yöntemler de geliştirilmiş olmasına rağmen, simpleks metodu genel LP problemlerini çözmek için en etkili ve popüler yöntem olmaya devam etmektedir. Diğer yöntemlerin yanı sıra, 1984 yılında geliştirilen Karmarkar yönteminin, George B. Dantzig'in simpleks algoritmasının 50 katı kadar hızlı olduğu gösterilmiştir.

Simplex Yöntemi

Standart formülasyonun eşitsizlik kısıtlamaları içermez. Standart LP probleminin uygulanabilir bölgesi dışbükey bir konveks poligondur. LP probleminin en uygun çözümü, poligonun köşelerinden birinde yatmaktadır. Simplex yönteminde çözüm süreci, poligonun bir köşesinden diğerine, uygulanabilir bölgenin sınırı boyunca hareket eder [47]. George B. Dantzig, 1947'de genel lineer programlama problemini formüle etmiş ve simpleks çözüm yöntemini tasarlamıştır. Simplex yöntemi LP probleminin bir matris gösteriminde standart formülasyonu aşağıdaki gibi yazılabilir [47].

$$\text{minimize } f(X) = C^T X \qquad (6.8)$$

Kısıtlamalar $Ax = b, \quad x \geq 0$

Burada: $c = [c_1, c_2, \dots, c_n]$, amaç fonksiyonu için maliyet katsayılarının vektörüdür; A, lineer eşitlik kısıtlamaları için katsayıların bir m × n matrisidir ve b, sağ taraftaki değerlerin m × 1 vektörüdür.

Karmarkar Yöntemi

Karmarkar, 1984'te büyük ölçekli lineer programlama problemlerini çok verimli bir şekilde çözmek için yeni bir yöntem önermiştir. Yöntem, kesinlikle uygulanabilir alanın iç kısmında geliştirilmiş arama yönleri bulduğu için bir iç yöntem olarak bilinir. Bu yöntem, mümkün olan bir tepe noktasından bitişik bir noktaya optimum nokta bulunana kadar hareket ederek uygun alanın sınırı boyunca arama yapan simpleks yönteminin tersidir [43].

Grafik Çözüm Yaklaşımı

Yalnızca iki değişkenli bir lineer programlama problemi, çözümün oldukça basit bir grafik yöntem kullanılarak elde edilebileceği basit bir durum sunar [43]. Çözümün yanı sıra, grafik yöntem lineer programlama problemlerinin belirli geometrik özelliklerinin fiziksel bir resmini verir. Grafiksel bir çözüm, çok sayıda tasarım değişkenine sahip karmaşık problemler için uygun bir seçenek olmadığı için uygulamada pek fazla yer verilmemektedir. Daha fazla ayrıntı ve örnek [43]'da sağlanmıştır.

Lineer olmayan programlama yöntemleri

Problemin bazı veya tüm fonksiyonları (maliyet fonksiyonu ve / veya kısıtlama fonksiyonları) bir optimizasyon problemi için lineer olmadığında, buna lineer olmayan programlama (NLP) problemi denir [42].

Genel *kısıtlanmış lineer olmayan* problemler aşağıdaki standart formda ifade edilebilir.

$$\text{Minimize } z = f(x) \tag{6.9}$$

Kısıtlamalar

$$g(x) \leq 0 \quad \text{ve} \quad x \geq 0 \tag{6.10}$$

Burada; f(x) ve g(x) fonksiyonlarından en azından biri lineer değildir ve tüm fonksiyonlar sürekli ve türevlenebilir özelliğe sahiptir. Negatif olmama koşulları $x \geq 0$, verilen kısıtlamaların parçasıdır.

Lineer olmayan programlamaya gereği optimize edilmesinin ana nedenleri aşağıda açıklanmıştır.

1 - Tasarım probleminin fonksiyonları yüksek düzeyde lineer olmayan içerebilir. Bu nedenle problemin boyutu küçük olsa bile de gerekli koşullar oldukça lineer olmayan bir yapıda bulunabilmektedir.
2 - Tasarım değişkenlerinin ve kasıtlamaların sayısının yüksek olması halinde, oldukça yüksek sayıda denklem oluşabilir ve bu nedenle gerekli koşulların çözülmesi çok zor olabilir. Bu durum özellikle kısatlamalı optimizasyon problemlerinde ortaya çıkar.
3 - Çoğu mühendislik uygulamasında, fonksiyonlar tasarım değişkenleri açısından net olmayabilir, bu nedenle korelasyonlar açıkça kurulamayabilir.

Yukarıdaki nedenlerden dolayı mühendislik sistemlerinin optimum tasarımı için sistematik sayısal yöntemler geliştirilmiştir.

Ceza yöntemleri

Ceza yöntemleri, kısıtlanmış problemi çözmeye çalışmak yerine, orijinal amaç fonksiyonu f(x)' e kısıtlamaları ifade eden bir *Ceza terimi* eklemektir. Böylece ceza yöntemleri, yöntemlerin eşitsizlik sınırlamalarını nasıl eklediğine bağlı olarak iki gruba ayrılır [47]:

a) bir uygulanabilir nokta dizisi oluşturan *iç nokta* yöntemleri,
b) bir dizi uygun olmayan nokta üreten *dış nokta* yöntemleri.

Ceza yöntemleri, kısıtlanmış optimizasyon problemini kısıtlanmamış optimizasyon problemine dönüştürür. Kısıtlanmamış probleminin iki kısmı vardır:

Orijinal problemin amaç fonksiyonu ve ceza terimi [47].

$$P(x, R) = f(x) + \Omega\,(R, g(x), h(x)) \qquad (6.11)$$

Denklem 6.11' de, Ω R, g (x) ve h (x) birer ceza terimidir. R'nin ve kısıtlamalarının bir fonksiyonudur. Bu fonksiyonda R ceza parametresi olarak adlandırılır. Birden fazla

numaraya sahip olabilir. Ceza parametresi ve kısıtlama fonksiyonu farklı biçimlerde olabilir. Ceza parametresi farklı kurallar kullanılarak güncellenebilir.

P (x, R) sabit bir nokta olanaksız değilse, bir dış nokta yöntemi kullanılır. Güncellenen R parametresi, sabit noktanın uygulanabilir bölgeye daha yakın olmasını zorlar. Buna karşılık, form şekli Ω sınırlandırılmamış P (x, R) fonksiyonunun sabit noktasını uygulanabilir olmaya zorlarsa, bir iç nokta yöntemi kullanılır. İç nokta yöntemine *bariyer yöntemi* de denir, çünkü ceza terimi uygulanabilir bölgenin sınırları boyunca bir bariyer oluşturur.

Karush-Kuhn-Tucker koşulları

Kısıtlamalı Lineer olmayan optimizasyon için, Lagrangian fonksiyonu ve Lagrange çarpanı, kısıtlamalara tabi bir fonksiyonun optimumunu bulma ve doğrulama stratejisi sağlamak için kullanılır. Kısıtlamaları eşitsizlik formunda olan bir Lineer olmayan optimizasyonu aşağıdaki şekilde verilmektedir [47]:

minimize f(x) (6.12)

kısıtlamalar $h_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, ...,n$

Lagrangian fonksiyonu sınırlı problemi sınırsız bir probleme dönüştürür, (6.10) verildiği gibi

$$L(x, v) = f(x) + \sum_{j=1}^{n} v_j h_j(x) \qquad (6.13)$$

Belirtilmemiş sabitler, v_j, Lagrange çarpanlarıdır. v_j'nin değerlerinde işaret kısıtlaması yoktur. Kısıtlanmamış L (x, v) problemi için minimumun x* olduğunu ve x* 'nin hj(x)=0 sağladığını varsayalım. hj (x) = 0 sağlayan tüm x değerleri için minimum L (x, v), hj (x) =0'a bağlı olarak f (x) minimumdur. Daha sonra x* sınırlı optimizasyon problemini en aza indirir.

Kuadratik programlama

Kuadratik programlama problemi, kuadratik amaç fonksiyonu ve lineer kısıtlamaları olan Lineer olmayan bir programlama problemidir. Genellikle şu şekilde formüle edilir [43]:

$$F(X) = c + \sum_{i=1}^{n} q_i x_i + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} Q_{ij} x_i x_j \qquad (6.14)$$

$$\text{Kısıtlayıcılar} \quad \sum_{i=1}^{n} a_{ij} x_i = b_j , \quad j = 1, 2, \dots, m \qquad (6.15)$$

$x_i \geq 0, \qquad i = 1, 2, ..., n$

Burada: c, q_i, Q_{ij}, aij ve b_j sabittir.

Geometrik programlama

Geometrik programlama, lineer olmayan bir programlama problemlerinin çözümünde nispeten yeni bir yöntemdir. Duffin, Peterson ve Zener tarafından (1961) geliştirilmiştir. Amaç fonksiyonu ve kısıtlamaların posynomial şeklinde olması gerekir. İlk önce amaç fonksiyonunun optimum değeri bulunur. Daha sonra tasarım değişkenleri hesaplanır. Daha fazla ayrıntı ve örnek [43]'da sağlanmıştır.

Posynomial

Bir mühendislik tasarımı durumunda, amaç fonksiyonu (örneğin toplam maliyet) f (X), h(X) gibi çeşitli bileşen maliyetlerinin toplamı olarak verilmektedir. h(x) fonksiyonu bir 'posynomial' dır [43].

$c_i \; x_1^{a1i} \; x_2^{a2i} \; \dots \; x_n^{ani}$

Burada; C_i ve a_{ij} katsayıları $C_i > 0$ ve $x > 0$ ile pozitif sabitlerdir. Böylece, N terimli bir posynom şu şekilde ifade edilebilir;

$$h(X) = c_i \; x_1^{a1i} \; x_2^{a2i} \; \dots \; x_n^{ani} + \dots + c_N \; x_1^{aN1} \; x_2^{aN2} \; \dots \; x_n^{aNn} \qquad (6.16)$$

Burada; C_i pozitif sabit, a_{ij} gerçel sabit (+, 0, -) ve $x_1, x_2, \dots, x_n$ pozitif.

Geometrik programlama problemi, amaç fonksiyonunun ve kısıtlamaların X'de *posynomlar* olarak ifade edildiği bir problemdir ve aşağıdaki gibi yazılır;

$$\text{minimize} \quad f(X)=\sum_{i=1}^{N0} c_i \left(\prod_{j=1}^{n} x_i^{aij} \right), \qquad c_i > 0 , \quad \text{and} \quad x_j > 0 \tag{6.17}$$

$$\text{kısıtlamalar} \quad g_k(X) = \sum_{i=1}^{Nk} a_{ik} \left(\prod_{j=1}^{n} a_i^{aijk} \right) > 0, \tag{6.18}$$

$$a_{ik} > 0, \qquad x_j > 0, \qquad i = 1, 2, \ldots, m$$

Burada; $c_i > 0$, $xi > 0$ ve a_{ij} gerçek sabitlerdir. Bu problemin çözümü çeşitli prosedürlerle elde edilebilir. Problem geometrik eşitsizlik veya diferansiyel hesap yöntemlerinden biri ile çözülebilir.

Ayrık programlama yöntemi

Gerçek hayattaki mühendislik tasarım problemleri genellikle ayrık seçimler içerir. Örneğin, bir yapı sistemin elemanlarının sayısı pozitif bir tamsayı olmak zorundadır. Bu durumda, karşılık gelen tasarım değişkenleri, verilen ayrık sayılar kümesiyle sınırlandırılmalıdır. Bu tür bir optimizasyon problemine *ayrık optimizasyon problemi* denir. Ayrık problemler lineer (lineer kısıtlamalar ve lineer amaç fonksiyonu ile) veya lineer olmayan problemler (lineer olmayan kısıtlamalar ve / veya lineer olmayan amaç fonksiyonu ile) olabilir. Lineer olmayan ayrık problemler lineer ayrık problemlerden çok daha karmaşık bir çözüme sahiptir.

Lineer olmayan problemlerin çözümü ile ilgili, amaç fonksiyonunun ve kısıtlamaların f (x_1, x_2,..., x_n) fonksiyonu, $f_1(x_1)$, $f_2(x_2)$,…, $f_n(x_n)$ şeklindeki tek değişkenli n fonksiyonun toplamı olarak ifade ediliyorsa ayrıktır. Ayrık optimizasyon problemi genel olarak aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [47]:

$$\text{minimize } f(x, y, z) \tag{6.19}$$

$$x, y, z$$

kısıtlamalar $g(x, y, z) \leq 0$, $h(x, y, z) = 0$

$x \in z^m$, $y \in R^n$, $z \in A$

Yukarıda:
F (x) amaç fonksiyonu,
g (x), h (x) sırasıyla eşitsizlik ve eşitlik kısıtlamaları,
x, y ve z tasarım değişken vektörleri,
Z^m, verilen uygulanabilir tam sayılar kümesidir,
R^n, bir gerçek sayılar kümesi ve
A, verilen uygulanabilir ayrık değerlerden kaynaklanan bir birleşimsel kümedir.

Genel olarak ayrık optimizasyon problemlerinin ana sınıfları [47];

1. *Saf-tamsayılı programlama problemleri:* Bir problemde tüm değişkenlerin tamsayı olması isteniyorsa bu problem saf tamsayılı programlama problemi olarak adlandırılır.
2. *Karışık-tamsayılı programlama problemleri:* Sadece bazı değişkenlerin tamsayı olması diğerlerinin ise reel sayı olması gerektiği problemlere denir.
3. *Ayrık tamsayılı olmayan optimizasyon problemleri:* İzin verilen tasarım değişkenlerinin yalnızca belirli bir ayrık setinin değer alacağını varsayan, zorunlu tam sayı değeri olmayan problemlere denir. Örnek olarak, Standart ölçülerde makine parçaları.
4. *Sıfır-bir programlama problemleri:* Tüm değişkenlerin 0 ya da 1 e eşit olmasının istendiği bir tamsayılı programlama problemine denir.
5. *Kombinatoryal optimizasyon problemleri:* Olası uygulanabilir çözümler setinin, tasarım değişkenlerinin verilen uygulanabilir ayrık değerlerinden kaynaklanan bir kombinasyon seti ile tanımlanmaktadır.

Tam sayılı programlama

Değişkenlerin tamsayı değerleri alması gereken optimizasyon problemleri, tamsayı programlama (TP) problemleri olarak adlandırılır. Bazı değişkenler yalnızca tamsayı ayrık değerler almak üzere sınırlandırıldığında, optimizasyon problemine karma tamsayı ayrık programlama (KTP) problemi denir. Denklem (6.14) 'teki tüm fonksiyonlar lineer ise, bir tamsayı lineer programlama (TLP) problemi elde edilir; aksi takdirde lineer değildir.

$$\text{bul} \quad X = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} \quad \text{Amaç (minimize)} \ f(X) \tag{6.14}$$

Kısıtlamalar

$g_j(X) \leq 0, \quad j=1, 2, ..., m ; \quad x_i \geq 0 \quad i=1, 2, \ldots, n$

x_i değişkenlerinin yalnızca tamsayı değerleri alındığı yerde.

Tam sayılı lineer programlama

Lineer programlama problemlerinin tipine bağlı olarak bir kısım değişkenlerin veya bütün değişkenlerin tam sayılı değerler alması hallerinde tam sayılı lineer programlama ortaya çıkmaktadır. Lineer programlama sınırlayıcı koşulları arasında değişkenlerin tam sayılı değerler olmasını ifade eden bir sınırlayıcı koşul daha bulunur. Bu ise amaç fonksiyonunda bulunan değişkenlerin 0, 1, 2, 3,... gibi tam sayılı değerler almasını ifade eder ve lineer programlama sürekli fonksiyonlarla ilgili olurken tam sayılı programlama ayrık fonksiyonla ilgilidir. Daha fazla detay ve örnekler [42] 'de sağlanmıştır.

Tam sayılı lineer olmayan programlama

Bu modeller amaç fonksiyonunda ve/veya kısıtlamalarda lineer olmayan ifadeleri ve tam sayılı değişkenleri kapsamaktadır. Tamsayı lineer olmayan programlama problemlerinde eniyi çözümün hem Karush-Kuhn-Tucker şartlarına uyması hem de tam sayılı kısıtlamaları yerine getirmesi gereklidir. Daha fazla detay ve örnekler [42] 'de anlatılmıştır.

Optimal kontrol problemi

Bir optimal kontrol (OK) problemi, her bir kademenin bir önceki aşamadan öngörülen şekilde geliştiği birkaç aşamayı içeren bir matematiksel programlama problemidir. Genellikle iki tip değişken ile tanımlanır: kontrol (tasarım) ve durum değişkenleri. Kontrol değişkenleri sistemi tanımlar ve sistemin bir aşamadan diğerine evrimini yönetir ve durum değişkenleri sistemin herhangi bir aşamadaki davranışını veya durumunu tanımlar. Problem,

tüm aşamalar boyunca toplam amaç fonksiyonunun (aynı zamanda *performans indeksi, PI* olarak da bilinir) kontrol ve durum değişkenleri üzerindeki bir seti kısıtlamaya tabi tutulacağı şekilde bir kontrol veya tasarım değişkenleri bulmaktır. Bir (OK) problemi şöyle ifade edilebilir [43]:

$$f(X) = \sum_{i=1}^{l} f_i\,(x_i\,, y_i)$$

Kısıtlamalara

$$q_i(x_i, y_i) + y_i = y_{i+1}, \quad i = 1,2, \dots, l$$

$$g_j = \left(x_j\right) \leq 0, \qquad j = 1, 2, \dots, l$$

$$h_k = (y_k) \leq 0, \qquad k = 1, 2, \dots, l$$

Burada: x_i, i'inci kontrol değişkeni; y_i,i'inci durum değişkeni ve f_i, bu aşamadaki toplam amaç fonksiyonuna katkısıdır. g_j, h_k ve q_i, sırasıyla x_j, y_k ve x_i ve y_i'nin fonksiyonlarıdır ve l, toplam aşama sayısıdır. Kontrol değişkenleri x_i ve y_i bazı durumlarda vektörler olabilir. Daha fazla detay ve örnek [43]'da sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, mühendislik tasarım problemlerinin çözümüne uygun matematiksel programlama tekniklerinin teorisi ve uygulamasını ele almaktadır.

6.6.2. Stokastik süreç teknikleri

Stokastik süreç teknikleri, bilinen olasılık dağılımlarına sahip bir dizi rastgele değişken tarafından tanımlanan problemleri analiz etmek için kullanılabilir. Bu yöntemin bazıları aşağıda sıralanmıştır [43].

- İstatistiksel Karar Teorisi
- Markow Süreçleri
- Yenilenme Teorisi
- Benzetim Metodu

- Güvenilirlik Teorisi

6.6.3. Modern optimizasyon yöntemleri

Bazen geleneksel olmayan optimizasyon yöntemleri olarak da adlandırılan modern optimizasyon yöntemleri, son yıllarda karmaşık mühendislik optimizasyon problemlerini çözmek için güçlü ve popüler yöntemler olarak ortaya çıkmıştır [43]. Bu yöntemler arasında;

- Genetik Algoritmalar (Genetic algorithms - Holland, 1975), doğal genetik ve doğal seçilim mekaniğine dayanan bilgisayarlı arama ve optimizasyon algoritmalardır. Bu yöntem Bölüm 8'de daha detaylı olarak bahsedilecektir.
- Tavlama Benzetimi (Simulated annealing - Metropolis 1953, Kirkpatrick ve Coworkers 1983), erimiş metallerin tavlama yoluyla soğutma işleminin mekaniğine dayanmaktadır.
- Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle swarm optimization - Kenedy ve Eberhart 1995), bir böcek kolonisi veya sürüsü (örneğin, karıncalar, termitler, arılar ve eşek arıları), bir kuş sürüsü ve bir balık sürüsü gibi sosyal organizmaların davranışını taklit eder.
- Karınca Koloni Optimizasyonu (Ant colony optimization - Dorigo ve Blum, 1992), yuvalarından bir besin kaynağına giden en kısa yolu bulabilen karınca kolonilerinin işbirliği davranışına dayanır.
- Sinir ağı tabanlı optimizasyon yöntemleri (Neural network), paralel işleme kabiliyeti aracılığıyla büyük miktarda duyusal verinin varlığında algısal problemleri çözmek için sinir sisteminin muazzam hesaplama gücüne dayanmaktadır. Yöntem, 1985 yılında Hopfield ve Tank tarafından optimizasyon için kullanılmıştır.
- Bulanık optimizasyon yöntemleri (fuzzy optimization), tasarım verileri, amaç fonksiyonu ve belirsiz ve dilbilimsel açıklamaları içeren kesin olmayan biçimde belirtilen kısıtlamaları içeren optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilmiştir. Mühendislik tasarımında tek ve çok amaçlı optimizasyon için bulanık yaklaşımlar ilk olarak 1986'da Rao tarafından sunuldu.

bulunur.

Optimizasyon, en geniş anlamıyla herhangi bir mühendislik problemini çözmek için uygulanabilir. Modern optimizasyon için daha gelişmiş yaklaşımlar, Evrimsel Algoritmalar başlıklı Bölüm 7'de sunulmuştur.

7. EVRİMSEL ALGORİTMALAR

Evrimsel algoritmalar, en iyinin hayatta kalma kuralına dayanarak, Darwin'in (1859) evrim teorisi düşüncesini temel alarak oluşturulan algoritmalardır [48]. Potansiyel çözüm popülasyonları oluşturarak (tekli çözümler yerine) ve doğada bulunan evrim sürecini taklit ederek en uygun çözüme doğru araştırmaya rehberlik ederek mühendislik tasarımları geliştirme kavramı, *evrimsel algoritmalara* (EA) en üst düzey tanımıdır. Bu özellikler, yapısal optimizasyon problemlerine uygulandığında EA'yi matematiksel hesaplamadan ayıran nedenleridir. Evrimsel algoritmalar, klasik matematik tabanlı optimizasyon algoritmalarında bulunmayan stokastik bileşenleri içerir. Bilgisayar bilimindeki evrimsel süreçleri taklit eden ilk deneyler, evrimsel süreçlerin optimizasyonun mühendislik problemlerine uygulanabileceği düşüncesiyle 1950 ve 1960 yıllarında gerçekleştirilmiştir.

Evrim Teorisi ile kabul edilen "iyi olanın hayatta kalması ve zayıf olanın yok edilmesi" kuralına dayanarak, algoritma sürekli iyileşen çözümler üretir ve kötü olan çözümler ise yok edilir. Ayrıca evrimsel algoritmalar, tipik olarak rastgele seçimler içeren stokastik yöntemler olduğundan, aynı evrimsel algoritma kodunun farklı çalıştırılması, farklı optimal çözümler sağlayabilir. Evrimsel algoritmada, alanın faaliyetlerinin çoğunun temelini oluşturan dört tarihsel paradigma vardır [48]:

- Genetik Algoritmalar (GA),
- Evrimsel Programlama (EP),
- Evrim Stratejileri (ES),
- Genetik Programlama (GP).

Paradigmalar arasındaki temel farklar, gösterim şemalarının, seçim yöntemlerinin ve yeniden üretim operatörlerinin doğasında yatmaktadır.

Yapay zekanın zamanla genişlemekteki bir dalı olan evrimsel algoritmaların çatısı altına giren popüler tekniklerden Genetik Algoritmalar (GA), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO), Benzetilmiş Tavlama (TB), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Tabu Araştırması (TA) bunların bazılarıdır. Bu yöntemlerin temel özelliklerinin bazıları bu bölümde, Diğer Evrimsel Algoritmalar başlık altında kısaca bahsedilecektir.

7.1. Genetik Algoritma (GA)

Genetik Algoritmalar (GA), bazı doğal olayları modelleyen stokastik bir arama yöntemidir. Darwin'in en iyi olan yaşar (*survival of the fittest*) prensibine dayalı olarak bir popülasyonu oluşturan bireylerin rekabet etmelerini sağlayan, evrimsel süreci taklit eden genetik algoritmalar ilk olarak John Holland (1975) tarafından ortaya atılmıştır [49]. Genetik algoritmalar, fonksiyonların nasıl değerlendirildiğine bakılmaksızın bir çözüme doğru ilerlemek için yalnızca arama sürecindeki fonksiyon değerlerini kullanır. Problem fonksiyonlarının sürekliliği veya ayrıklılaşabilirliği ne gerekli ne de algoritmaların hesaplanmasında kullanılır. Bu nedenle, algoritmalar çok geneldir ve her türlü probleme uygulanabilir (ayrık, sürekli, türevlenemeyen vb.). Genetik araştırma prosedüründe doğal genetiğin temel unsurları (yeniden üretim, çaprazlama ve mutasyon) kullanılır. GA, doğal evrimsel işlemlerin bir bilgisayar sistemine en açık şekilde eşleştirilmesidir.

Tasarım optimizasyon yapısında kullanılan en popüler evrimsel algoritmalar olan Genetik Algoritmanın kavramları ve uygulamaları Bölüm 8'de daha ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

7.2. Genetik Programlama (GP)

Genetik Programlama (GP), Koza [50] tarafından 1992 yılında önerilen, kullanıcı tanımlı bir işlemi gerçekleştiren bilgisayar programlarının otomatik olarak oluşturulması için evrimsel algoritma tekniklerinin bir koleksiyonudur. GP, üst düzey bir problem tanımından başlayarak, tatmin edici bir çözüm bulunana kadar varyasyon ve seçim yoluyla aşamalı olarak rafine edilen rastgele programlar topluluğu oluşturur. GP "sabit uzunluklu gösterimler kullanmadığı için, GA'nın bir uzantısı olarak düşünülebilir" [50]. Genetik programlama, popülasyondaki bireylerin bit dizileri yerine programlar olduğu genetik bir algoritmadır. Darwin'in çözüm tekniği "en iyi olanın hayatta kalması" ilkesine dayanmaktadır ve genetik algoritmalar alanıyla yakından ilgilidir. GA'lar ve genetik programlama, yeniden üretme (reprodüksiyon) operatörlerinin bir ağaç temsiline göre uyarlanması dışında, diğer birçok açıdan benzerdir. Buna rağmen, GA'lar ve GP arasında üç önemli fark vardır [48]:

- Yapı: GP genellikle ağaç yapılarını geliştirirken, GA'lar ikili veya gerçek sayı dizilerini geliştirir.

- Aktif ve Pasif: GP genellikle bilgisayar programlarını geliştirdiğinden, çözümleri sonradan işlemeye gerek kalmadan yürütülebilir, yani aktif yapılar, GA'lar tipik olarak kodlanmış ikili dizelerde, yani sonradan işleme gerektiren pasif yapılar üzerinde çalışır.
- Değişken - sabit uzunluk: Geleneksel GA'larda, ikili dizinin uzunluğu çözüm prosedürü başlamadan önce sabitlenir. Ancak GP ayrıştırma ağacının uzunluğu çalışma boyunca değişebilir.

GP'nın ana uygulama alanları bilgisayar bilimi, bilim, mühendislik, sanat ve eğlencedir. GP'nın inşaat mühendisliğinde uygulama alanları, derin betonarme kirişlerin kayma mukavemeti tahmini ve atık su arıtma tesislerinin modellenmesini örnek olarak verilebilir.

7.3. Evrim Stratejileri (ES)

Evrim stratejileri (ES), Rechenberg (1971) ve Schwefel (1975) [51] tarafından önerilen, mühendislik problemleri motive edilen ve bu nedenle çoğunlukla gerçek değerli gösterimi kullanılmıştır. (1 + 1) -ES veya iki üyeli evrim stratejisi olarak adlandırılan mutasyon seçme şeması kullanılan algoritma, yalnızca bir ebeveyn ve bir yavru kullanır. ES'lerinde ana üreme operatörü *Gauss mutasyon*, yeni bir yavru oluşturmak için bir bireyin vektörünün her bir elemanına bir Gauss dağılımından rastgele bir değer ekler. GA'lardan temel fark, ES yönteminin bir bireyin fenotipini vurgulaması ve herhangi bir ek kodlamayı atlamasıdır.

Evrimsel strateji ile evrimsel tasarımı, ilk uygulamalarından olan, bir bağlantı plakasının sürtünmesinin en aza indirilmesi, bükülmüş bir borunun şekil optimizasyonunu ve nozüllerinin yapı optimizasyonunu içermektedir. Daha fazla ayrıntı [51] 'da verilmektedir.

7.4. Evrimsel Programlama (EP)

Evrimsel Programlama (EP), 1965 yılında Lawrence Fogel tarafından tanıtılan ve oğlu David Fogel [52] tarafından 1992 geliştirilmiş, sonlu otomatı geliştirmeyi ve daha sonra sayısal optimizasyon problemlerini çözmeyi amaçlayan EA'nın bir çeşididir. "Evrimsel Programlama (EP), Evrimsel Stratejilere benzer, ancak bağımsız olarak geliştirilmiştir ve veri türleriyle ilgili hemen hemen hiçbir kısıtlaması yoktur" [52]. EP'da evrim süreci, tek tek bireylere değil, tüm türlerin düzeyine odaklanır. Evrimsel programlama ile önceki yaklaşımlar arasındaki temel fark, popülasyondaki bireyler arasında materyal değiş tokuşun

yapılmamasıdır. Bu nedenle, yalnızca mutasyon operatörleri kullanılır. GA probleminde, algoritma tarafından işlenen bir dizi bit dizisinde kodlanır. GA'nın aksine, EP'da karar değişkenleri ve problem fonksiyonları doğrudan kullanılır. Ayrıca tipik olarak turnuva seçimi, sürekli değişkenler kullanır ve çaprazlama kullanmaz.

7.5. Diğer Evrimsel Algoritmalar

Evrimsel algoritmalar çatısı altında yer alan popüler optimizasyon tekniklerden bazıları Simüle Tavlama (ST), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Tabu Arama'dır (TA). Bu algoritmalar genellikle dışbükey olmayan, süreksiz veya çok modlu kriter fonksiyonlarını içeren oldukça doğrusal olmayan optimizasyon problemlerini çözmeyi amaçlamaktadır. Bu popüler stokastik optimizasyon tekniklerinin kısa bir tanıtımı aşağıda verilmiştir.

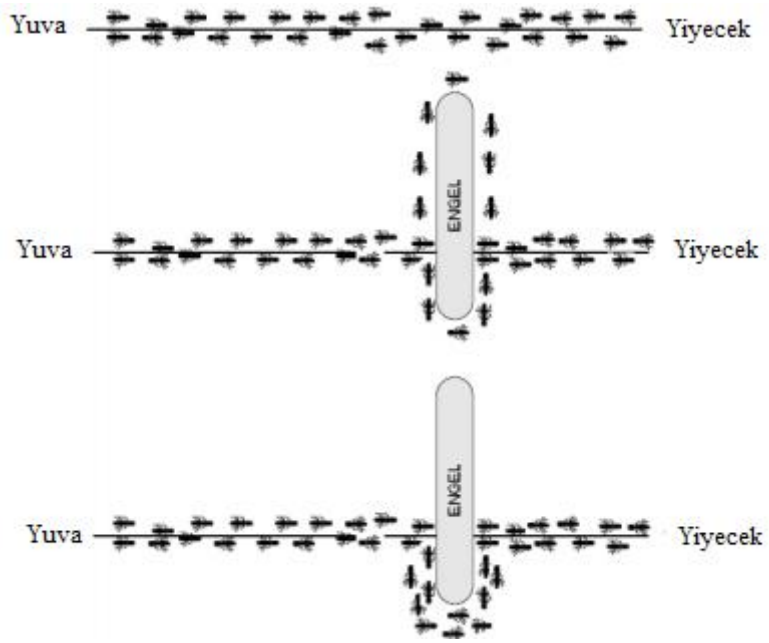
7.5.1. Tavlama Benzetimi

Tavlama Benzetimi, Metropolis tarafından (1953) yılında geliştirilmiştir. Kirkpatrick ve Coworkers [53] tarafından (1983) yılında optimizasyon problemleri için önerilmiştir. Katıları ısıtmaya ve ardından yavaşça soğutmaya dayanır. Bu yöntem, malzemeyi belli bir süre (tavlama sıcaklığına kadar) ısıtmanın ardından yavaş yavaş soğutmaktır. Bir katının sıcaklığının belirli bir maksimum dereceye kadar artırılarak tekrar azaltılması işlemine ısıl işlem denir. Kristalin tüm molekülleri maksimum sıcaklıkta kendilerini rastgele olarak sıvı faza ayarlar. Sonra erimiş olan kristalin sıcaklığı kristal yapı soğutuluncaya kadar düşürülür [53]. Tavlama Benzetiminde, amaç fonksiyonunda artıma sebep olabilecek komşu hareketler, bazı durumlarda kabul edilerek yerel optimizasyon noktalarından kurtulmak imkân dahilindedir. Amaç fonksiyonunda artıma sebep olabilecek bu komşu hareketin ise kabul edilip edilmeyeceği rastgele olarak belirlenmektedir. Daha fazla ayrıntı [42, 48]'de verilmiştir.

Yapısal optimizasyona, özellikle yapıların şekil optimizasyonuna benzetilmiş tavlama uygulamaları son derece nadirdir. Bu alandaki uygulamalar, plakalardaki delikler, çatlak içeren plakalar, kabuk yapılar, termal yüzgeçler, eksenel simetrik yapılar vb. gibi 2D yapıların optimum şekil tasarımlarını içerir. Ayrıca betonarme döşeme, ön gerilmeli beton kirişler ve benzerlerinin maliyet optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılmaktadır.

7.5.2. Karınca Koloni Algoritması

Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO), gerçek karınca kolonilerinin feromon iz bırakma davranışından esinlenen, zor kombinatoryal problemlerin çözümü için popülasyon tabanlı, genel bir arama tekniğidir. Karınca Koloni algoritması (KKO), karıncaların doğadaki davranışlarına, özellikle de 'yiyecek arama davranışlarına' dayanan, Marco Dorigo tarafından 1992 yılında tanıtılmıştır [54]. Karınca koloni optimizasyonunda, yapay karıncalar adı verilen bir dizi yazılım aracı, belirli bir optimizasyon problemine iyi çözümler arar. Bu optimizasyonu uygulamak için optimizasyon problemi, ağırlıklı bir grafikte en iyi yolu bulma problemine dönüştürülür. Yapay karıncalar grafik üzerinde ilerleyerek aşamalı olarak çözümler oluşturur. KKO algoritmaları stokastik arama prosedürleridir. Bunların merkezi bileşenleri, olasılıksal olarak arama alanını örneklemek için kullanılan feromon modelidir. KKO algoritması, gerçek karıncaların yiyecek noktaları ile yuvaları arasındaki en kısa yolu bulma yeteneklerinden ilham alınarak geliştirilmiştir.



Şekil 7.1. KKO'ununda gerçek karıncaların en kısa yolu bulma örneği

Şekil 7.1'de görülebileceği gibi, karıncalar başlangıçta düz bir çizgiyi izlerken yol güzergahına feromon adı verilen bir madde bırakırlar, böylece kendilerinden hemen sonra gelen karıncalar için yolları bulmalarını kolaylaştırırlar. KKO, çeşitli kombinatoryal optimizasyon çözümleri, gezgin satıcı problemi (travelling salesman problem- TSP), ve kuadratik atama (QAP) gibi zor optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılmaktadır.

7.5.3. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO), Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından geliştirilen, kuş sürülerinin ya da balıkların okullaşmasının sosyal davranışından örnek alınarak geliştirilen popülasyon temelli bir stokastik optimizasyon tekniğidir [55]. PSO, Genetik Algoritmalar (GA) gibi evrimsel hesaplama teknikleriyle birden çok benzerliği paylaşır. Sistem bir rastgele çözüm popülasyonu ile başlatılır ve nesilleri güncelleyerek optima için arama yapar. Arama işlemi jenerasyon sayısınca- genetik algoritmalarda olduğu gibi- yapılır. Her birey parçacık ile tanımlanırken iken parçacıklardan oluşan popülasyon da sürü (swarm) şeklinde tanımlanır. Her bir parçacık önceki tecrübesinden yararlanarak kendi pozisyonunu sürüdeki en iyi pozisyona doğru ayarlar. GA'nın aksine, PSO'nun mutasyon ve çaprazlama gibi evrim operatörleri bulunmamaktadır. PSO'da, parçacık ile adlandırılan potansiyel çözümler, varolan optimum parçacıkları takip ederek problem uzayında uçar. Ayrıca GA'lardan farklı olarak, algoritma ikili sayı kodlama veya kod çözme gerektirmez ve bu nedenle bilgisayarda uygulanması daha kolaydır.

PSO, mekanik ve yapısal optimizasyon ve çok amaçlı optimizasyon, yapay sinir ağı eğitimi ve bulanık sistem kontrolü gibi birçok problem sınıfına başarıyla uygulanmıştır. Ayrıca betonarme yapı sistemlerinde, Gharehbaghia ve Fadaee [56] çalışmaları, deprem yükleri altında üç açıklıklı on sekiz katlı betonarme çerçeve tasarım optimizasyonu için gerçek değerli bir PSO algoritması kullanıldığı örnek verilebilir.

7.5.4. Tabu Arama

Tabu Arama (TA) olarak adlandırılan meta-sezgisel yaklaşım, yerel arama teknikleri sınıfına ait matematiksel bir optimizasyon yöntemidir. Tabu Arama Algoritması, optimizasyon problemlerini çözmek için 1986 yılında Fred Glover [57] tarafından geliştirilen iteratif bir araştırma algoritmasıdır. Tabu listesi esnek bir hafıza yapısı kullanmakla beraber kronolojik bir yapıya sahiptir. Tabu Arama, hafıza yapılarını kullanarak yerel bir arama yönteminin performansını artırır: potansiyel bir çözüm belirlendikten sonra, algoritmanın bu olasılığı tekrar tekrar ziyaret etmemesi için "tabu" olarak işaretlenir. Tabu arama uygulamalarından bazıları mantık ve yapay zekâ, tasarım, grafik optimizasyonu, yönlendirme, kaynak tahsisi, yatırım planlaması, telekomünikasyon vesaire. Bu yöntem özelliklerin ve uygulamalarından ayrıntılı açıklaması, Fred Glover [57] tarafından yayınlanan kitabında bulunabilir.

8. GENETİK ALGORİTMA (GA)

Önce de belirtildiği gibi, Genetik Algoritmalar Yapay Zekanın zaman içerisinde genişlemekteki bir dalı olan evrimsel algoritma tekniğinin bir parçasını oluşturmaktadır. Özellikle son senelerde mühendislik optimizasyon problemlerini çözmek için popüler ve güçlü yöntemler olarak öne çıkmışlardır.

Bu bölümde genetik algoritmanın tanım ve tarihçesini, GA'nın geleneksel optimizasyon teknikleri ile karşılaştırılmasını, GA'nın avantajları ve sınırlamalarına, GA'nın uygulama alanlarını, GA'larının temel kavramlarına, bir problemin genetik algoritma ile çözüm aşamalarına yönelik bilgiler verilmektedir.

8.1. Genetik Algoritmanın Tanımı

Genetik Algoritmalar (GA), "en uygun olanın hayatta kalması" ve adaptasyon ilkelerine dayanan bir optimizasyon ve arama stratejisidir. "Genetik Algoritmalar, genetik bilimindeki kromozomal prosesleri ve evrim prensiplerini bilgisayar ortamında taklit ederek çalışmakta olan optimizasyon metodudur" [46]. Ayrıca Genetik Algoritmalar iteratif optimizasyon yöntemi olmakla beraber her bir iterasyonda yalnızca tek bir çözümle değil, optimum tasarım değişkenlerinin seti ile de çalışır. Diğer optimizasyon yöntemlerinden farklı olarak amaç fonksiyonun türevlerinin değil, kendisini kullanılması GA'ların en önemli özelliklerinden birisidir [48]. GA'lar ayrık, sürekli, tek veya çok modlu gibi birçok fonksiyonun optimizasyonu için ideal bir yöntem olarak gözükmektedir.

Genetik algoritmalar, yeniden üretme, çaprazlama ve mutasyon gibi üç operatör tarafından optimizasyon ve arama problemlerine yüksek kaliteli çözümler üretmek için yapı optimizasyonunda yaygın olarak kullanılır. Yeniden üretme operatörü yeni popülasyona iyi dizeler (tasarımlar) seçer, çaprazlama operatörü dizeler (yeni nesil popülasyon) oluşturmak için yeni popülasyonun iyi dizilerinin alt dizilerini yeniden birleştirir ve mutasyon operatörü dizeyi yerel olarak değiştirir. Bu operatörlerin doğru bir şekilde seçilmesiyle popülasyon çeşitliliği ve seçilim baskısı arasında denge meydana getirerek yüksek kaliteli bir optimizasyon algoritması oluşturulabilir.

GA, tüm çalışması boyunca bir dizi çözümü defalarca değiştirir. Her nesilde, genetik algoritma bir sonraki popülasyonu oluşturmak için mevcut nesildeki bireyleri kullanır. Bu prosedür, bir durdurma kriteri karşılanıncaya veya nesil sayısı belirli bir limite ulaşıncaya kadar sürdürülür. Sonuç olarak daha iyi uygunluk değerine sahip bu neslin üyesi optimum nokta olarak alınır. Genetik algoritmanın performansına birkaç faktör etkileyebilir. Bu faktörler, popülasyonun boyutunu, tasarım değişkenlerinin uygunluk değerlendirmesini, yeniden üretme için seçim stratejilerini ve tasarım değişkenlerini değiştirmek için genetik operatörleri içerir.

8.2. GA'nın Tarihsel Gelişimi

Evrimsel Optimizasyon yöntemi (ayrıca Genetik Algoritma), Charles Darwin'in (1859) evrim teorisine dayanmaktadır. John Holland 1975 bu fikri "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*" [49] kitabında geliştirmiştir. Doğal evrim prensiplerinin optimizasyon problemlerine nasıl uygulanacağını ve ilk Genetik Algoritmaları nasıl oluşturduğunu anlattı. Holland'ın iki amacı vardı: doğal adaptasyon sürecinin anlaşılmasını geliştirmek ve doğal sistemlere benzer özelliklere sahip sanatsal sistemler tasarlamak. Holland, GA'yı "en güçlü olanın hayatta kalması" kuralına dayanan sezgisel bir yöntem olarak önerdi. GA, arama ve optimizasyon problemleri için kullanışlı bir araç olarak keşfedildi. Daha sonra genetik algoritmalar ile ilgili Goldberg gibi araştırmacılar önemli çalışmalar yapmıştır. David Edward Goldberg 1989 yılında, Genetik Algoritma Uygulamaları sahasında klasik eser olarak kabul edilen kitabını yayınlamıştır [1]. David E. Goldberg tezinde; gaz boru hattının kontrolünü içeren bir problemin çözümünü genetik algoritma ile gerçekleştirdi. Daha sonra yine Goldberg mühendislik sistemlerinin optimum boyutlandırılmasında genetik algoritma tekniğinin nasıl kullanılacağını temel prensipleriyle açıklamıştır. (1992) yılında ise John R. Koza, Genetik Algoritmayı kullanarak çeşitli görevleri yerine getiren programlar geliştirmiş ve bu yönteme Genetik Programlama adını vermiştir. Son yıllarda PC'lerin hızının artması, bu algoritmaların uygulama alanında sıklıkla görülmesine neden olmuştur.

8.3. Genetik Algoritmanın Geleneksel Optimizasyon Teknikleri ile Karşılaştırılması

Genetik algoritma, geleneksel optimizasyon tekniklerinden aşağıdaki şekillerde farklılık gösterir [47, 48]:

1. GA'lar, parametrelerin kendileri yerine problem parametrelerinin kodlanmış versiyonlarıyla çalışırlar, yani GA, çözümün kendisiyle değil, çözüm kümesinin kodlanmasıyla çalışır.
2. Neredeyse tüm geleneksel optimizasyon teknikleri tek bir noktadan araştırılır ancak GA'lar her zaman tüm popülasyonundaki noktalarinda (karakter dizileri) çalışırlar, yani GA, arama için tek bir çözüm yerine çözüm popülasyonunu kullanır. Bu, genetik algoritmaların sağlamlığında önemli bir rol oynar. Global optimuma ulaşma şansını arttırır ve aynı zamanda yerel sabit noktadan kaçınmaya yardımcı olur.
3. GA'lar sadece objektif fonksiyonun değerlerini kullanır. Arama prosedüründe türevler kullanılmaz. Sonuç olarak, herhangi bir sürekli veya ayrık optimizasyon problemine uygulanabilirler. Burada gerçekleştirilecek kilit nokta, anlamlı bir kod çözme fonksiyonun tanımlanması ve belirtilmesidir.
4. GA'lar olasılıklı geçiş işlemlerini kullanırken sürekli optimizasyon için geleneksel yöntemler, deterministik geçiş işlemlerini uygular, yani GA'lar deterministik kuralları kullanmaz.

Bunlar, Genetik Algoritma ile geleneksel optimizasyon teknikleri arasındaki ana farklardır.

8.4. Genetik Algoritmanın Avantajları ve Sınırlamaları

8.4.1. Genetik algoritmanın avantajları

1. Paralel hesaplamalara çok uygundur
2. Çözüm alanı daha geniştir
3. Türevsel bilgiler gerektirmemesi
4. Paralel PC'ler kullanılarak çalıştırılabilmesi
5. Sürekli ve ayrık parametreleri optimize etmesi
6. Çok sayıda parametrelerle çalışma imkânı olması
7. Çok çeşitli optimizasyon problemleri için kullanılabilir
8. Amaç fonksiyonun değerlendirilmesindeki zorluklara karşı çok sağlam.
9. Karmaşık amaç fonksiyonu parametrelerini, lokal minimum veya maksimumlara takılmadan optimize edebilmesi
10. Sadece tek çözüm değil, birden fazla parametrelerin optimum çözümlerini elde edebilmesi olarak sıralanabilir.

8.4.2. Genetik algoritmanın sınırlandırılması

1. Uygunluk fonksiyonunu belirleme sorunu.
2. Yapılandırma basit değildir.
3. Çok sayıda yanıt (uygunluk) fonksiyonu değerlendirmesi gerektirir
4. Yerel optimumu tanımlamakta iyi değil.
5. Yerel bir arama tekniği ile eşleştirilmesi gerekiyor.
6. Kullanılan konfigürasyon basit değildir.
7. Nesiller arasında iyi özelliklerin kaybolma ihtimali vardır.
8. GA'larda belirsizlik yöntemleri kullanılır ve algoritmanın işleyişinde belirginlik yoktur.
9. Bunun sonucunda genetik algoritma modeli değişik defalarca kullanılınca birbirinden biraz farklı olan sonuçlar verebilir.
10. Kesin global optimumu bulmakta sorun yaşanması.
11. Erken yakınsama oluşur.

8.5. Genetik Algoritma Uygulama Alanları

Genetik algoritmalar zor problemler (NP-zor problemler gibi), makine öğrenmesi ve ayrıca basit programlar geliştirmek için kullanılmıştır. Yapısal tasarım için, betonarme yapıların optimum tasarımı için bazı uygulamalar literatürde [1-16] ele alınmıştır. Genetik algoritmaların genel uygulama alanları aşağıdaki gibi verilebilir [48]:

1. Optimizasyon: Sayısal optimizasyon ve kombinetoral optimizasyon problemleri olan devre tasarımı, lineer olmayan denklem sistemlerinin çözümünde ve fabrika-üretim planlamasında kullanılır.
2. Mekanik öğrenmesi: Robot sensörlerinde, yapay sinir ağlarında, VLSI yonga tasarımı ve protein yapısal analizinde kullanır.
3. Sosyal sistemler (Böcek kolonileri, Çok etmenli sistemlerde iş birliği).
4. Çizelgeleme problemi: GA'ların çizelgeleme problemine ilk uygulama çalışması, Davis tarafından 1985 yılında yapılmıştır.
5. Otomatik programlama ve bilgi sistemleri: Bilgisayar programları yardımıyla network sıralamasında, ders programı hazırlanmasında kullanılır.
6. Ekonomik ve sosyal sistem modelleri: Ekonomik modellerin geliştirilmesinde ve işlemesinde kullanılır.

7. Evrim ve öğrenme: GA'lar kişisel öğrenmenin ve nesilden nesile öğrenmenin birbirlerini nasıl etkilediğini araştırmakta kullanılmaktadır.
8. Montaj Hattı Dengeleme Problemi
9. Gezgin Satıcı Problemi
10. Görüntü işleme
11. Sistem Güvenilirliği Problemi
12. Finans

Son yıllarda PC'lerin hızlarındaki artışı genetik algoritmalar, farklı uygulama alanlarında gelişmiş yapısal performans için çok çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır.

8.6. Genetik Algoritmanın Temel Kavramları

8.6.1. Gen

Canlıların karakterlerini belirleyen ve anlamlı bilgi içeren en küçük birimlerdir. Bir gen A, B gibi bir karakter olabileceği gibi 0 veya 1 ile ifade edilen bir bit veya bit dizisi olabilir. Her gen, alternatif aday çözümleri gösterirler. Bir genin yapısında sadece ikili tabandaki (binary) sayıları içerebileceği gibi, gray, tam sayı, gerçel sayı veya ağaç şeklini ve farklı sembolik ifadeleri de içerebilir.

8.6.2. Jenerasyon

Genetik algoritmanın yinelemesine *Jenerasyon* denir. "Bir jenerasyon (nesil), genetik algoritmada manipüle edilen N_p boyutunda bir popülasyona sahiptir" [42]. Genetik Algoritmalar, nesilden nesle iyileşen bir çözüm kümesi sayesinde en iyi çözüme ulaşma mantığıyla çalışmaktadırlar.

8.6.3. Kromozom

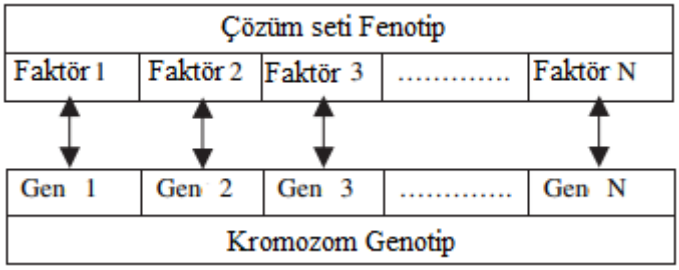
Birden fazla genin bir araya gelerek oluşturduğu diziye *kromozom (birey)* denir. Sistemin tüm tasarım değişkenleri için değerler içerir. Örneğin kromozom bir problemde açı, boyut ve koordinat değişkenlerinden veya bir dikdörtgen prizmasının ölçülerinden (yükseklik, genişlik, derinlik) oluşabilir. Dolayısıyla, bir kromozom, uygulanabilir veya

gerçekleştirilemez olsun, sistemin bir tasarımını temsil eder. GA, optimize edilecek olan bir kromozom veya değişken değerler dizisi tanımlayarak başlar. Kromozom, N_{var} adet değişkene sahip ise optimizasyon problemi N_{var} boyutlu olur.

Kromozom = $[P_1, P_2, \ldots, P_{Nvar}]$

olarak tanımlanır.

Kromozomların tümüne *genom* adı verilir. Genomdaki gen setlerine de *genotip* adı verilir. Kromozomun model açısından ifadesi olan fenotip. Şekil 8.1'de gösteren Genetik algoritmada genotip ve fenotipin temsili gösterilmiştir.



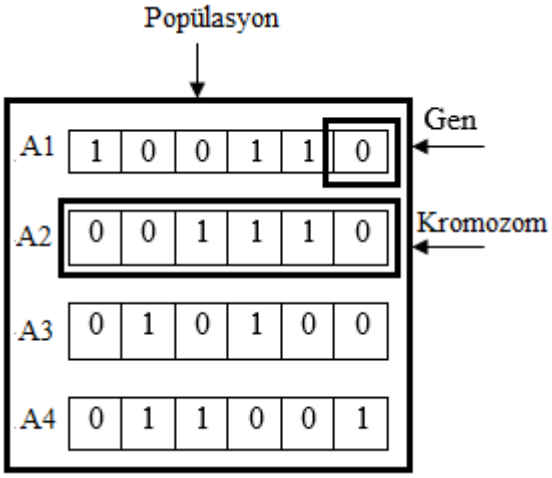
Şekil 8.1. Genotip ve fenotipin temsili [48]

8.6.4. Popülasyon

Popülasyon, bireylerden (tasarım değişkenler kümesi) oluşan bir topluluktur. GA, bireyleri kromozomlar şeklinde temsil edilen bir çözüm popülasyonu kullanır. Aynı anda bir popülasyondaki birey sayısı sabit ve probleme göre kullanıcı tarafından belirlenir. Popülasyon nesilden nesille geliştikçe kötü çözümler yok olma, iyi çözümler ise daha iyi çözümler oluşturmak için kullanılma eğilimindedirler. Şekil 8.2'de gösteren Genetik algoritmada popülasyon yapısını gösterilmiştir. Burada; A1, A2, A3, A4 bireyler ya da kromozomlardır.

Genetik Algoritmalarda kullanılan popülasyonun iki önemli yönü şunlardır:

1. İlk popülasyon oluşumu
2. Popülasyon büyüklüğü



Şekil 8.2. Genetik algoritmada popülasyon yapısı

8.6.5. Kodlama

Genetik Algoritmanın önemli bir aşamasını kodlama planı teşkil eder. Zira bu plan bilginin çerçevesini şiddetle kısıtlayabilir. Kodlama, evrimsel algoritmalarda kromozomsal çözümlerini temsil eden bir yöntemdir [47]. Bütün genetik algoritma işlemleri (çaprazlama, mutasyon, vb.) bu kodlanmış kromozomlar üstünde yapılır. Kodlama şekli, GA'nın performansını oldukça önemli ölçüde etkiler; fakat kodlama şekli programa bağlı olduğundan bütün problemler için geçerli en uygun kodlama şeklini söylemek mümkün değildir. Genellikle en çok ikili kodlama, tamsayı kodlama ve permütasyon kodlama kullanılmaktadır. Literatürde farklı kodlama teknikleri vardır bunları kısaca aşağıda açıklamıştır.

<u>İkili kodlama</u>

Kodlamanın en yaygın yolu, aşağıdaki örnek gibi temsil edilecek olan bir ikili dizedir. Her bir kromozom, bir ikili (bit) diziyi kodlar. Dizideki her bit, çözümün bazı özelliklerini temsil edebilir. 0 ve 1'lerden oluşan her bir kromozom bit dizisidir ve bu ikili dizi olarak ifade edilir. İki Kodlama için kromozom örneği Şekil 8.3 gibi tanımlanır.

Kromozom A_1	10101001
Kromozom A_2	11001011

Şekil 8. 3. İkili kodlama için kromozom örneği

Örnek olarak; bir ikili sayı, 10001, ondalık sayı 17'yi temsil eder. İkili sayıdan ondalık sayıya dönüşüm aşağıdaki gibi tanımlanır.

$1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 16 + 1 = 17.$

Permütasyon kodlama (Gerçek sayı kodlaması)

Her kromozom, sayıyı sırayla temsil eden bir sayı dizisidir. Bazen genetik işlem tamamlandıktan sonra düzeltmeler yapılması gerekebilir. Sıralamaya veya düzenlemeye yönelik problemler için uygundur. Permütasyon kodlaması, her kromozom, bir dizideki sayıyı temsil eden bir tamsayı / gerçek değerler dizisidir. Gezgin satıcı problemi ve proje çizelgeleme gibi problemlerin çözümü için kullanılır. Permütasyon kodlama türünde, kromozomun uzunluğu tasarım değişkenlerinin sayısına eşittir. Permütasyon kodlama için kromozom örneği şekil 8.4 gibi tanımlanır.

Kromozom A_1	357426891
Kromozom A_2	672589412

Şekil 8.4. Permütasyon kodlama için kromozom örneği

Değer kodlama

Bu kodlama reel gibi kompleks sayıların yer aldığı problemlerde kullanılır.

Kromozom A_1	1,2324 5,3243 0,4556 2,3293 2,4545
Kromozom A_2	ABDJEIFJDHDIERJFDLDFLFEGT
Kromozom A_3	(back), (back), (right), (forward), (left)

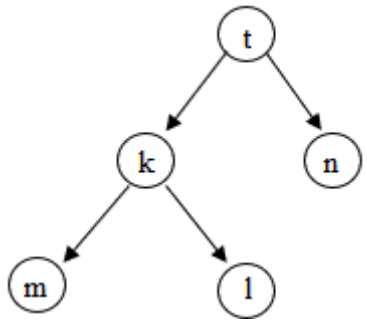
Şekil 8.5. Değer kodlama için birey örneği

İkili (binarey) kodlama çok boyutlu ve yüksek hassasiyetli lineer olmayan problemlerin çözümünde yetersiz kalmaktadır. Çünkü bu durumda diziler, çok uzun haneli gelmekte ve gösterim alanı genetik operatörlerin etkili olarak yapılamayacağı kadar uzamış olmaktadır.

Bu durumda değer kodlama kullanılması daha iyi sonuçlar vermektedir. Şekil 8.5.'de görüldüğü gibi değer kodlama için kromozom örneği tanımlanmaktadır.

Ağaç kodlama

Ağaç kodlama, genetik kodlama gibi gelişen ve değişen programlar veya ifadeler için Kullanılır. Ağaç kodlamada her birey bazı nesnelerin, örneğin fonksiyonlar ya da programlama dilindeki komutlar gibi, bir ağacıdır.



Şekil 8.6. Ağaç kodlama için birey örneği

8.6.6. Başlangıç popülasyonu

Başlangıçta belirli kriterlere göre rastgele bireylerden oluşan bir popülasyon oluşturulur. Popülasyon başlatılmadan önce, tasarımcı her popülasyondaki birey sayısını ve kodlama işlemindeki bit sayısını seçmelidir. Bu kararların her ikisi de GA tabanlı optimizasyonun başarısını arttırmada son derece önemlidir. Örneğin, çok büyük bir popülasyon istenmeyen bir hesaplama masrafına yol açabilirken, çok küçük bir popülasyon yerel olarak optimum veya düşük bir noktaya erken yakınlaşmaya yol açabilir. Başlangıç popülasyonu bir kez oluşturduktan sonra evrim başlar. GA bireylerin uygunluk ve iyiliklerine göre ayrılıp fark edilmesine gerek duyar. Bu özelliklerin ve GA'ların konularının ayrıntılı açıklaması, Goldberg [1] tarafından yayınlanan GA kitabında bulunabilir.

8.6.7. Uygunluk

Uygunluk fonksiyonu, tasarımın göreceli önemini tanımlar. Bir tasarım vektörüne (tasarım değişkenine) karşılık gelen amaç fonksiyonu değeri, GA'da uygunluk için önemli rol oynar.

Her tasarım vektörü, uygunluk değerini bulmak için değerlendirilir. Daha yüksek bir uygunluk değeri daha iyi bir tasarım anlamına gelir. Tasarım değişkeninin kalitesi uygunluk değerlerine göre ölçülür. Tasarım değişkenlerin "uygunluk değerlerine göre reprodüksiyon, mutasyon ya da çaprazlama işlemleri uygulanmaktadır" [42]. Çünkü uygunluk değerlerine göre tasarım değişkenlerin kalitesi ölçülmektedir. Bazı problemler için tasarım değişkenin uygunluğu, tasarım değişkeninden bulunan sonuç ile tahmin edilen sonuç arasındaki hatadan bulunabilmektedir. Bu hata daha iyi tasarım değişkenlerinde sıfıra yakın olmakta ve genellikle girişin tekrar sunulacak kombinasyonlarının ortalaması veya toplamıyla hesaplanmaktadır. Beklenen ve üretilen değer arasındaki korelasyon etkeni, uygunluk değerini hesaplamak için kullanılabilir. Fonksiyon girdi olarak kodu çözülmüş şekilde tasarım değişken alır ve tasarım değişkenin performansına bir ölçü olarak bir amaç değer üretilir. Bu, diğer tasarım değişkenler için de yapıldıktan sonra bu değerler kullanılarak, uygun değerler uygunluk fonksiyonuyla hesaplanıp belli bir düzende planlanır. Bu planlamayı sağlayan ve uygunluk teknikleri olarak bilinen birçok yöntem vardır. Ortak kullanılan bu yöntemler genetik işlemcilerinin başlık altında aşağıda açıklanmıştır.

8.7. Genetik İşlemciler

Genetik algoritmanın temel prensibi, popülasyonun ortalama uygunluğunun iyileştirilmesi için mevcut setten yeni bir tasarım seti (popülasyon) oluşturmaktır. Süreç, bir durdurma kriteri karşılanana kadar veya yineleme sayısı belirli bir sınırı aşana kadar devam eder. Bu görevi gerçekleştirmek için üç genetik operatör kullanılır: yeniden üretme, çaprazlama ve mutasyon.

8.7.1. Seçilim/ Reprodüksiyon

Reprodüksiyon operatörü, hazır popülasyondan uygun olan bireylerin seçilmesi ve bunların sonraki popülasyona kopyalanarak hayatta kalmalarıyla ilgilidir. Seçim modeli, tabiatın hayatta kalabilmek için uygunluk mekanizması modelidir. Popülasyon uzayındaki her bir bireyin uygunlukları baz alınarak ne kadar sayıda kopyasının olacağına karar verilir. En iyi bireylerden daha fazla kopya alınır, en kötü bireylerden kopya alınmaz. En bilinen seçilim yöntemleri, Rulet tekerleği, Turnuva, Üniforma, Sıralama ve Stokastik seçim işlemi için kullanılabilir. Herhangi bir seçim yönteminin diğerine karşı bariz bir üstünlüğünün

olmadığını söylemektedir. Seçilim işleminden sonra popülasyon daha iyi bireylerle zenginleştirilir. Seçim “tamsayı problemi ile göz ardı edilir” [58].

Rulet tekeri seçilim

Popülasyondaki tüm bireylerin uygunluk değerleri toplanır ve her bireyin seçilme olasılığı, uygunluk değerinin bu toplam değere oranı kadardır. Bu mekanizma eğer bireyler arasındaki uygunluk değeri fazla ise problem çıkarabilir. Yüksek uygunluk değerine sahip bireyler daha sık seçilerek algoritmanın yerel optimuma takılması olası bir durumdur. Bu durumun engellemek için turnuva veya sıralama yöntemi kullanılır. Rulet tekerleği seçimi çözümlerin uygunluk değerlerinin pozitif olması gerekmektedir. Çünkü olasılıkların negatif olması, çözümün seçilme şansının olmadığını göstermektedir.

Turnuva seçilim

Popülasyondan belirli sayıda birey rastgele seçilir. Turnuva genelde iki birey arasında yapılır. Bu iki bireyden, dinçlik derecesi küçük olan birey çaprazlama ve mutasyon işlemleri için saklanır. Bu bireylerin içerisinden uygunluk değeri en iyi olan birey seçilir.

Kalan seçilim

Kalan seçim, ebeveynleri belirleyici olarak her bireyin ölçeklenmiş değerinin tam sayı kısmından atar ve ardından kalan kesirli kısımda rulet seçimini kullanır. Örneğin, bir bireyin ölçeklenmiş değeri 2,3 ise, bu kişi ebeveyn olarak iki kez listelenir çünkü tamsayı kısmı 2'dir. Ebeveynler, ölçeklenen değerlerin tam sayı kısımlarına göre atandıktan sonra, ebeveynlerin geri kalanı stokastik olarak seçilir. Bu adımda bir ebeveynin seçilme olasılığı, ölçeklenmiş değerinin kesirli kısmı ile orantılıdır.

Sıralı seçilim

Sırlama yönteminde bireyler uygunluk değerleriyle ters orantılı olarak sıralanır.
En kötü uygunlukta olan kromozoma 1 değeri verilir, ondan daha iyi olana 2, daha iyisine 3 değeri verilerek devam edilir. Seçilme olasılığı 1. sıradan sonra sıraya doğru azaltılarak kötü

bireylere avantaj sağlanır ancak bu yöntem çözümün yakınsayacağı jenerasyon sayısını artırabilir.

Üniforma seçilim

Üniforma seçimi, beklentileri ve birey sayısını kullanarak bireyleri seçer. Üniforma seçim, hata ayıklama ve test etmek için yararlıdır, ancak çok etkili bir arama stratejisi değildir.

Elit sayım

Elit sayım- Mevcut nesilde en iyi uygunluk değerlerine sahip olan ve bir sonraki nesle hayatta kalabileceği garanti edilen bireylerin sayısı. Bu bireylere seçkin çocuklar denir. Elit sayımın varsayılan değeri, yuvarlanmış popülasyon boyutunun%5'idir [58].

Çaprazlama fraksiyonu

Çaprazlama Fraksiyonu çaprazlama tarafından üretilen elit çocuklar dışındaki sonraki neslin fraksiyonunu belirtir. Çaprazlama fraksiyonu değerini 0 ile 1 arasında bir kesir olacak şekilde ayarlanır. Varsayılan değer 0,8'dir [58].

8.7.2. Çaprazlama

Çaprazlama, popülasyonda bulunan iki rastgele bireyin birleştirilmesi ile yeni bireylerin oluşturulması işlemi olmakla beraber bu işlem ikili dizilerin parçalarının karşılıklı olarak birbirleriyle değişmesi ile gerçekleştirilir. Problem türü doğrultusunda çaprazlama operatörleri seçilen farklı kodlama sistemleriyle uyumlu olacak biçimde geliştirilmiştir.

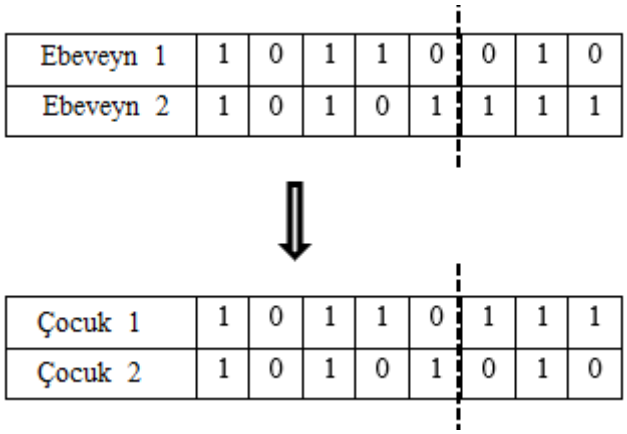
İkili kodlamada çaprazlama

Ebeveyn 1	10010010010
Ebeveyn 2	11000110101

İkili kodlamadaki çaprazlama uygulamasında tüm çaprazlamalar kullanılabilir. İkili kod çaprazlama yöntemlerinin açıklanmasında yukarıdaki şekil seçilmiştir.

Tek noktalı çaprazlama

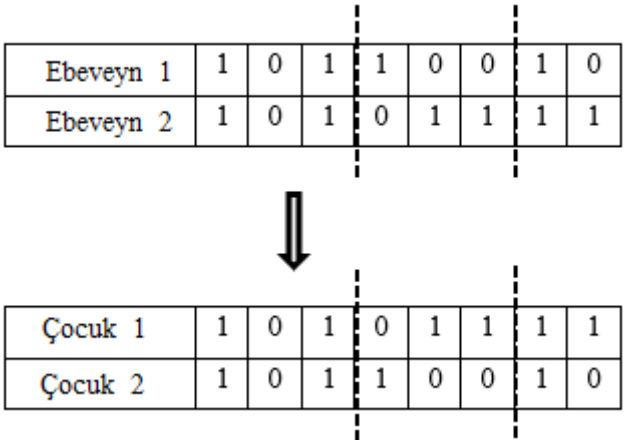
Rastgele bir nokta çaprazlama için seçilir. Çaprazlamaya girecek iki birey bu noktadan koparılır ve 2 yeni çocuk kopma noktasından sonraki genlerin yerdeğiştirmesi sonucunda elde edilir. Rastgele seçilen bu noktanın 3 olduğu farz edilirse çocuklar çaprazlamadan sonra aşağıdaki gibi olacaktır.



Şekil 8.7. Tek noktalı çaprazlama misali

İki noktalı çaprazlama

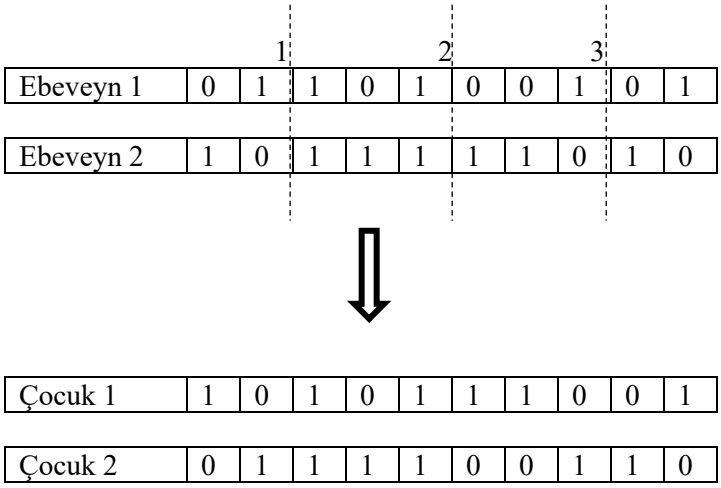
İki farklı çaprazlama noktası seçilir ve eşleşen iki ebeveynin bu iki nokta arasında kalan kısımları birbiri ile değiştirilir (Şekil 8.8). Eğer popülasyonda erken yakınsama sorunu varsa (seçilim baskısı yüksek) popülasyondaki çeşitliliği arttıramamakta, küçük popülasyonlu, büyük ölçekli optimizasyon problemlerinde kötü sonuçlar vermektedir.



Şekil 8.8. İki noktalı çaprazlama örneği

Çok noktalı çaprazlama

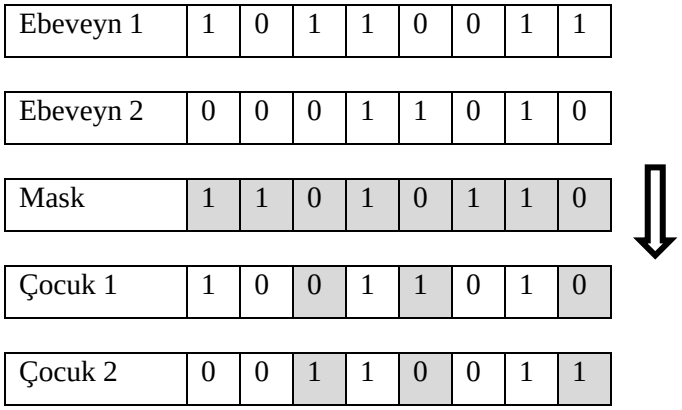
X tane rastgele nokta çaprazlama için belirlenir. Yeni çocuk çaprazlamaya giren bireylerin bu noktalar arasında kalan genleri yer değiştirilerek elde edilir. Arama alanını bu yöntem çeşitliliğini daha çok çoğaltarak genişletir ve başlangıçta en iyi çözüm gibi görünen bir noktayı yakınsama olasılığını azaltır. Şekil 8.9'e görüleceği gibi aşağıdaki çocuklar çaprazlama sonrası oluşacaktır.



Şekil 8.9. Çok noktalı çaprazlama örneği

Düzgün çaprazlama

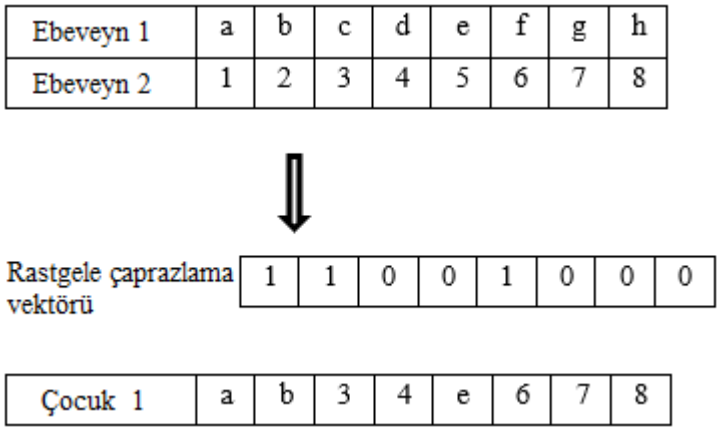
0 ve 1 değerlerinin rastgele alınmasıyla oluşturulan çaprazlamada birey uzunluğunda maskeler kullanılır. Çocukların hangi genlerin hangi ebeveynlerden geleceğini maskeler belirler. Üniform çaprazlama örneği şekil 8.10 gibi tanımlanır.



Şekil 8.10. Üniform çaprazlama örneği

Dağınık çaprazlama

Kısıtlamaların lineer olmayan problemler için varsayılan çaprazlama fonksiyonu, rastgele bir ikili vektör oluşturur ve vektörün ilk ebeveynden 1 olduğu genleri seçer ve vektörün ikinci ebeveynden 0 olduğu genler ve çocuğu oluşturmak için genleri birleştirir. Lineer kısıtlamalar varken ' *dağınık çaprazlama* ' kullanmayın. Aksi takdirde, popülasyon mutlaka kısıtlamaları karşılamayacaktır. Dağınık çaprazlama örneğin, şekil 8.11'da gösterilmiştir.



Şekil 8.11. Dağınık çaprazlama örneği

Aritmetik çaprazlama

Aritmetik çaprazlama, iki ebeveynin ağırlıklı aritmetik ortalaması olan çocukları yaratır. Çocuklar lineer kısıtlamalara ve sınırlara göre daima uygundurlar.

8.7.3. Mutasyon Operatörü

Çaprazlama yöntemi, genlerin mevcut potansiyellerini incelemek için kullanılır. Fakat kodlanmış bütün bilgiyi popülasyon içermez ise, çaprazlama yöntemi beklenilen çözümü üretemez. Bundan dolayı, mevcut kromozom ailesinden yeni kromozomlar üretme imkânına sahip bir operatör gerekmektedir. Bu olayı mutasyon gerçekleştirir. Mutasyon operatörü, 'çözümün kaybına karşı koruma sağlamaktadır' [1]. Mutasyon ile bireydeki bitler "1" ise "0", "0" ise "1" yapılır. N_{pop} x N_{bit}'lik bir popülasyon matrisinde, mutasyon noktaları rasgele seçilir. Mutasyonun % değeri artırılırsa, algoritma daha geniş parametre uzayını tarama yapar. Mutasyonda gerçek kodlu ve ikili kodlu GA' da farklı etkilere sahiptir. Mutasyon

operatörleri, genetik algoritmanın, mutasyon çocukları oluşturmak için popülasyondaki bireylerde rastgele küçük değişiklikler yapmasını belirtir. Mutasyon genetik çeşitlilik sağlar ve genetik algoritmanın daha geniş bir alan aramasını sağlar. Tam sayılı problemlerle mutasyon kullanmamaktadır. Şekil 8.12'e görüleceği gibi mutasyon işlemi göstermektedir.

Mevcut birey	1	1	0	1	1	1	1	0	0
Yeni birey	1	1	0	0	1	1	1	0	0

Şekil 8.12. Mutasyonu tersine çevirme

Gaussian mutasyon

Sınırlandırılmamış problemler için varsayılan mutasyon fonksiyonu olan Gaussian, Gaussian dağılımından alınan rastgele bir sayıyı ana vektörün her girişine ortalama 0 olarak ekler. Bu dağılımın standart sapması ölçek ve büzültme parametreleri ile belirlenir. Gaussian'ı seçtiğinizde ve popülasyon operatörlerinde ilk aralık ayarıyla görüntülenir. Sınırlar veya lineer kısıtlamaları olduğunda mutasyon Gaussian kullanmaz. Aksi takdirde, popülasyon mutlaka kısıtlamaları karşılamayacaktır.

Düzgün mutasyon

Düzgün mutasyon iki aşamalı bir işlemdir. İlk olarak, algoritma mutasyon için bir bireyin vektör girişlerinin bir kesir seçer, burada her girişin mutasyona uğrama olasılığı vardır. Varsayılan oran değeri 0,01'dir. İkinci adımda, algoritma seçilen her girişi, o giriş için aralıktan eşit olarak seçilen rasgele bir sayı ile değiştirir. Sınırlar veya lineer kısıtlar varken düzgün mutasyon kullanmaz. Aksi takdirde, popülasyon mutlaka kısıtlamaları karşılamayacaktır.

Adaptif Fizibil

Adaptif Fizibil, kısıtlamalar olduğunda varsayılan mutasyon fonksiyonu, son başarılı veya başarısız nesille göre uyarlanabilir yönleri rastgele oluşturur. Mutasyon, sınırları ve lineer kısıtlamaları sağlayan bir yön ve adım uzunluğu seçer.

8.7.4. Seçkinlik

Popülasyonda şu an en uyumlu üyenin izi vardır ve popülasyonda bu daima saklanacaktır. Bu sebeple, bu, eğer gurup içinde yerdeğiştirmek için seçilirse ve popülasyon sokulmakta olan hiçbir çocuk eşit veya daha iyi uyuma sahip değilse, bu saklanır ve çocukların biri atılır. Mutasyon ve çaprazlama ile yeni popülasyon üretildiğinde, en iyi birey kaybedilecektir. Seçkinlik, yeni popülasyonu oluşturmak için önce en iyi birey ya da birkaç en iyi bireyi kopyalanır ve daha sonra geri kalanı diğer yöntemlerle devam ettirilir. Seçkinlik, GA'nın performansı en iyi sonucun kaybı önlendiğinde hızlı bir şekilde artmasını sağlar.

8.7.5. Göç

Göç seçenekleri, bireylerin alt popülasyonları arasında nasıl hareket ettiğini belirler. Popülasyon boyutu 1'den büyük bir vektör olarak ayarlanılırsa, göç gerçekleşir [58]. Göç gerçekleştiğinde bir alt popülasyondaki en iyi bireyler başka bir alt popülasyondaki en kötü bireylerin yerini alır. Bir alt popülasyondan diğerine göç eden bireyler kopyalanır ve kaynak alt popülasyondan kaldırılmazlar. Göç bir veya iki yönde gerçekleşebilir. Yönü İleri (Forward), geçiş son alt popülasyona doğru gerçekleşir. Yani, n'inci alt popülasyon (n+1)' inci alt popülasyona göç eder. Yönü Her İkisine de (Both), n'inci alt popülasyon hem (n–1) hem de (n+1)' inci popülasyona geçer.

8.8. Kısıtlama Parametreleri

Kısıtlama parametreleri lineer olmayan kısıtlama çözücüsünü ifade eder. Bu durumda, kısıtlamalı bir optimizasyon problemi, ceza veya Genişletilmiş Lagrangian yaklaşımı kullanılarak bir dizi kısıtlanmamış problemlere dönüştürülebilir. Bu gibi durumlarda, değişkenler üzerindeki alt ve üst kısıtlamaları sayısal algoritmada açıkça ele almak daha etkilidir.

8.8.1. Lineer olmayan kısıtlama çözücü algoritmaları

Genişletilmiş Lagrange Genetik Algoritması

Varsayılan olarak GA, lineer olmayan kısıtlama problemlerini tamsayı kısıtlamaları olmadan çözmek için genişletilmiş Lagrange Genetik Algoritmasını (ALGA) kullanır [58].

ALGA algoritmasıyla çözülen optimizasyon problem aşağıda verilmiştir.

$$\min_{x} f(x) \tag{8.1}$$

$$C_i(x) \leq 0, \qquad i = 1, 2, \dots, m \tag{8.2}$$

$$C_{eqi}(x) = 0, \qquad i = m+1, \dots, mt \tag{8.3}$$

$$A_x \leq b, \tag{8.4}$$

$$A_{eq}x = b_{eq} \tag{8.5}$$

$$b^L \leq x \leq b^U$$

Burada; c (x) lineer olmayan eşitsizlik kısıtlamalarını, ceq (x) eşitlik kısıtlamalarını, m ise lineer olmayan eşitsizlik kısıtlamalarını ve m ise lineer olmayan kısıtlamaların toplamını gösterir.

Genişletilmiş Lagrangian Genetik Algoritması (ALGA), lineer olmayan kısıtlamalar, lineer kısıtlamalar ve sınırlarla lineer olmayan bir optimizasyon problemini çözmeye çalışır. Bu yaklaşımda sınırlar ve lineer kısıtlamalar lineer olmayan kısıtlamalardan ayrı olarak ele alınır. Amaç fonksiyonu ve lineer olmayan kısıtlama fonksiyonu Lagrangian ve ceza parametreleri kullanılıp birleştirilerek bir alt problem oluşturulur.

Bu tür optimizasyon problemlerinin bir dizisi lineer kısıtlamaların ve sınırların karşılanacağı şekilde genetik algoritma kullanılarak yaklaşık olarak en aza indirilir. Bir alt problem formülasyonu aşağıdaki fonksiyon ile tanımlanır [58].

$$\Theta(x, \lambda, s, \rho) = f(x) - \sum_{i=1}^{m} \lambda_i s_i \log\left(s_i - c_i(x)\right) + \sum_{i=m+1}^{mt} \lambda_i \, ceq_i(x) + \frac{\rho}{2} \sum_{i=m+1}^{mt} ceq_i(x)^2 \tag{8.6}$$

Burada; λ vektörünün bileşenleri -λi negatif değildir- Lagrange çarpanı tahminleri olarak bilinir. Vektör (s) 'in elementleri (s_i) negatif olmayan kaymalardır. P pozitif ceza parametresidir.

Algoritma, ceza parametresi için bir ilk değer kullanarak başlar (*Giriş cezası*). Genetik algoritma bir dizi alt problemi minimize eder ki her biri orijinal problemin bir yaklaşımıdır. Her alt problemin sabit bir λ, s ve ρ değeri vardır. Alt problem gerekli bir doğrulukta en aza indirildiğinde ve fizibilite koşullarını sağladığında, Lagrange tahminleri güncellenir. Aksi takdirde ceza parametresi bir ceza faktörü ile artırılır (*Penalty Factor*). Bu yeni bir alt problem formülasyonu ve minimize etme problemi ile sonuçlanır. Bu adımlar durdurma kriterleri yerine getirilinceye kadar tekrarlanır.

Giriş cezası

Lineer olmayan kısıtlama algoritması tarafından kullanılan ceza parametresinin başlangıç değerini belirtir. 1 veya daha büyük olması gerekir ve varsayılan değeri 10'dur.

Ceza faktörü

Problem istenen doğrulukta çözülmediğinde ve kısıtlamalar sağlanmadığında ceza parametresini arttırır. Ceza faktörü 1'den büyük olmalı ve varsayılan 100' dür [58].

Ceza Algoritması

Ceza algoritması varsayılan olarak GA oluşturma lineer olmayan uygun oluşturma fonksiyonunu kullanır. Ceza algoritması tamsayı GA ile aynıdır. Bir bireyin uygunluğunu değerlendirmesinde GA bir ceza değerini aşağıdaki gibi hesaplar:

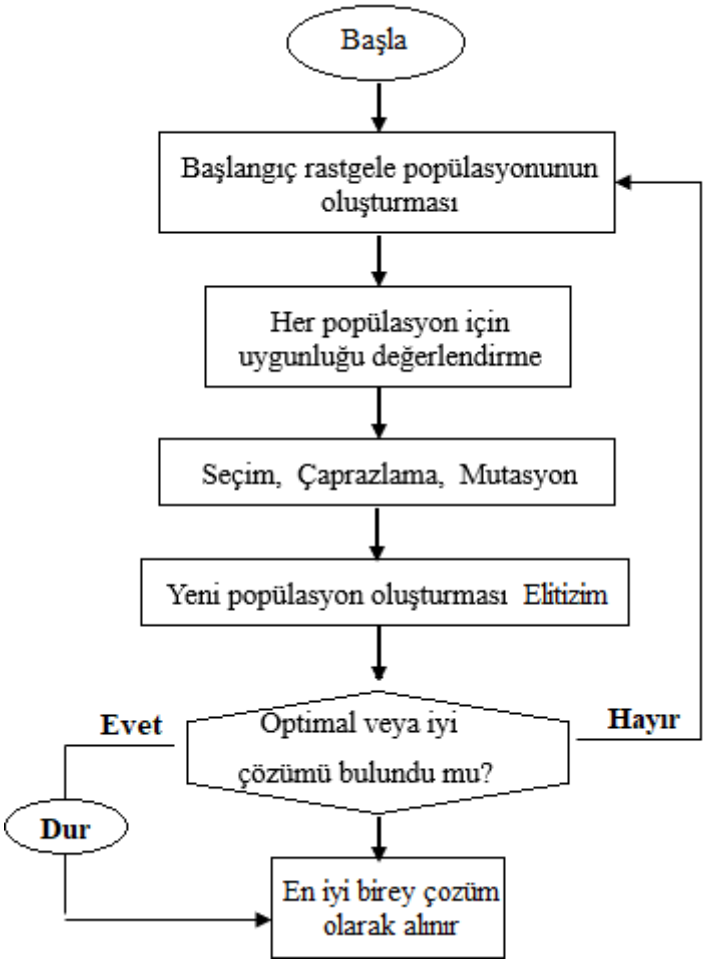
1. Bireyin uygun olması *(feasible)* durumunda ceza fonksiyonu uygunluk fonksiyonudur.
2. Bireyin uygun olmaması *(infeasible)* durumunda ceza fonkisyonu, popülasyon uygulanabilir üyeleri arasındaki maksimum uygunluk fonksiyonu ve artı (olanaksız) bireyin kısıtlama ihlallerinin toplamıdır.

8.9. Bir Problem İçin Birden Çok Çalışma

GA, tipik olarak rastgele seçimler içeren stokastik yöntemlerdir. Bu nedenle, aynı GA kodunun farklı çalıştırılması, farklı optimal çözümler sağlayabilir. ‘Mümkün olan en iyi çözümün elde edilmesini sağlamak için problemin birkaç kez çalıştırılması önerilir’ [42].

8.10. Genetik Algoritmanın Çalışma Prensipleri

Genetik algoritmalar oldukça genel prensipler ile Şekil 8.13'de akış şemasında görüleceği gibi çalışmaktadır.



Şekil 8.13. Genetik algoritmanın genel akış şeması

Genetik Algoritma süreci aşağıdaki aşamalara ayrılabilir;

1. Başlangıç popülasyonunun: İlk adım herhangi bir genetik algoritmanın uygulanmasında, bir başlangıç popülasyonunun üretilmesidir. Çoğu durumda başlangıç popülasyonu, popülasyon boyutuna göre rasgele üretilir.
2. Uygunluk değerlendirme: Bir başlangıç popülasyonu oluşturduktan sonra, popülasyonun her bir üyesi, uygunluk fonksiyonunu hesaplayarak değerlendirilir.
3. Yeni popülasyon için yeni bireyler (Seçilim, Çaprazlama, Mutasyon, Elitizm) operatörünün uygulanmasıyla oluşturur.

4. Adım 2 ve 3'ü belirlenen iterasyona ulaşılıncaya kadar ya da uygun bir çözüm bulununcaya kadar tekrarlanacaktır.
5. Algoritmanın durdurma kriterleri: Durdurma kriterlerinin örnekleri arasında nesil sayısı, hesaplama süresi sınırı ve fonksiyon toleransı yer alır.
6. Global optimum, sonlandırma kriterlerinden tatmin edilirse, en iyi bireyi (tasarım değişkeni) optimal veya iyi bir çözüm olarak alınır.

Genetik algoritmanın performansını etkileyen bazı önemli faktörler aşağıda açıklanmıştır:

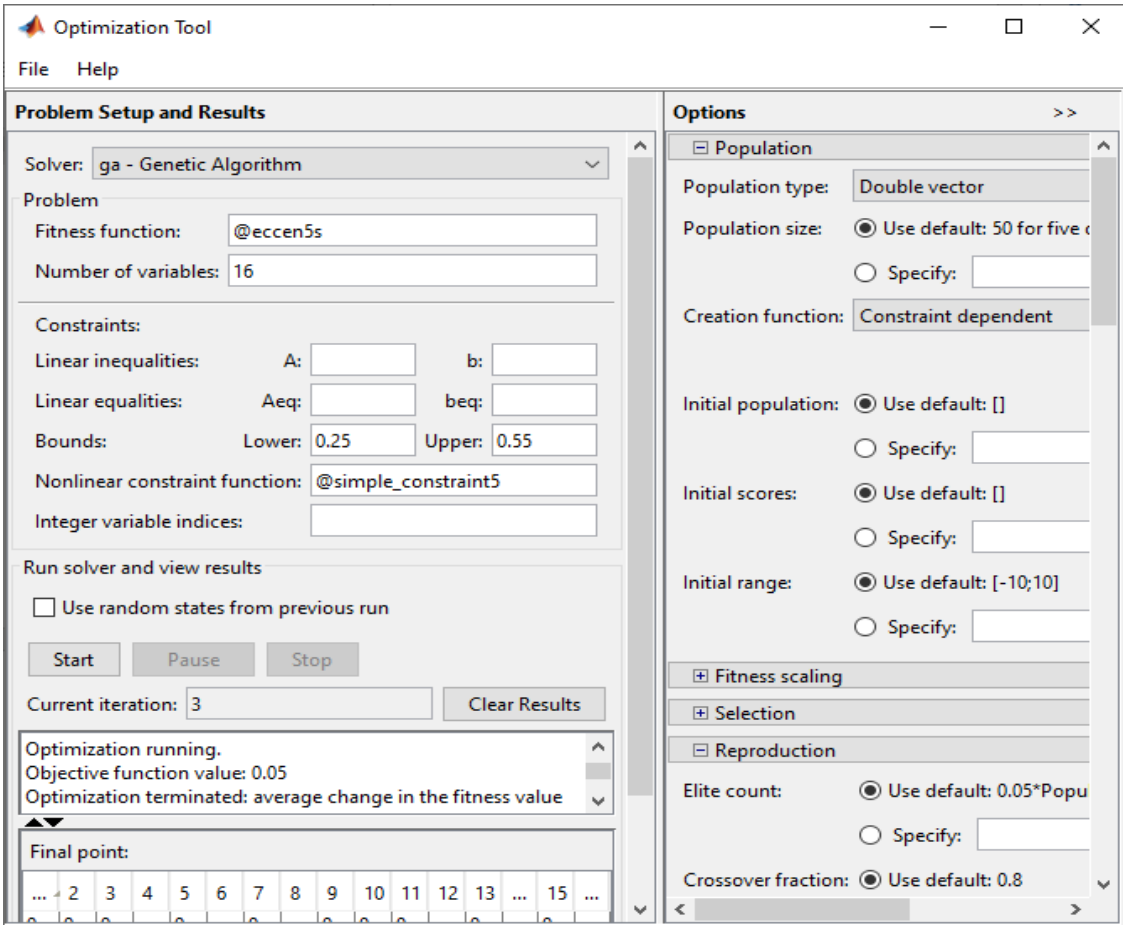
- Birey sayısını arttırmak çalışma süresini azaltır iken birey sayısını azaltmak birey çeşitliliğini ortadan kaldırır. Birey uzunluğuna bağlı bir popülasyon büyüklüğü hesaplama yöntemi Golberg tarafından 1985 yılında önerilmiştir.
- Bireyler birbirine benzemeye başladığında hala uygun çözüm bulunamadıysa GA'nın sıkıştığı yerden kurtulması için tek yol olarak mutasyon işlemi kalmaktadır. Ancak yüksek bir değer vermek GA'nın kararlı bir noktaya ulaşmasını engeller.
- Yapılan araştırmaların neticesinde bazı problemlerde çok noktalı çaprazlamanın faydalı olduğu gösterilmekle beraber normal olarak çaprazlama tek noktada gerçekleştirilir.
- Bulunan iki bireyin birden kullanılıp kullanılamayacağı bazen önemli olmaktadır.
- Çalışma süresinin uzaması hatta çözüme hiçbir zaman ulaşılamamasının nedeni probleme tam uygun olarak oluşturulmamış bir değerlendirme fonksiyonu olabilmektedir.

8.11. Optimizasyon için Bilgisayar Programları

8.11.1. Genetik algoritma ve doğrudan arama araç kutusu

Genetik algoritma ve doğrudan arama araç kutusu MATLAB® ile kullanılabilir. Araç kutusunun genetik algoritması, amaç veya kısıtlama fonksiyonu gibi fonksiyon süreksiz, son derece doğrusal olmayan, stokastik olduğunda veya tanımlanmamış türevlere sahip olduğunda kullanılabilir. Elbette, araç kutusunda başlangıç popülasyonu, uygunluk ölçeklendirme, seçilim, çaprazlama, mutasyon ve geçiş oluşturma seçenekleri mevcuttur. Ayrıca bu araç kutusunda, problemlerin hızlı bir şekilde kurulması, algoritmik seçeneklerin seçilmesi ve ilerlemenin izlenmesi için grafik kullanıcı ara yüzleri (GUI) mevcuttur. Matlab

optimizasyon programları (doğrudan arama yöntemlerini kullanarak) genetik algoritma ile entegre edilebilir (Bkz. Şekil 8.14).



Şekil 8.14. MATLAB Genetik Algoritması ve doğrudan arama araç kutusu

Bu çalışmada, optimizasyon yöntemlerinden genetik algoritma yöntemi kullanılmıştır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların sonucunda ikili kodlama daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. En iyi seçme operatörünün tornament seçme yöntemi, popülasyon büyüklüğü 200, en iyi çaprazlama operatörünün dağınık ve her problemde farklı jenerasyon süresi seçilmiştir. Bu operasyonlar, daha önceden verilmiş jenerasyon sayısı tamamlanıncaya kadar devam etmektedir.

9. GENETİK ALGORİTMA İLE BURULMA YAPAN BİNALARIN DIŞMERKEZLİK OPTİMİZASYONU

Daha önce belirttiğim gibi burulma düzensizliği; mimari tasarımlardaki düzensizlikler, düzenli olmayan geometrik özellikler ve estetik kaygılardan dolayı yapılan hatalar binanın sismik yüklere karşı ciddi şekilde hasar görmesine veya çökmesine neden olmaktadır. Yatay kuvvetlerin etkimesi ve kat rijitlik merkezi ile kütle merkezi arasında dışmerkezlik olması durumunda kat düzeyinde burulma momenti oluşmaktadır. Kat burulma momenti kolonlarda ek kesme kuvvetleri oluşturur. Bu durum yapıyı deprem karşısında büyük riske sokmaktadır. Kat burulma momentini mümkünse tamamen yok etmek ya da en aza indirmek için kütle merkezi ile rijitlik merkezinin birbirine çakışması gerekir. Kat kütle merkezi sabit olmakla beraber kütle merkezinin konumunu değiştirmek için kat içindeki kütle dağılımını değiştirmek gerekir ki bu da oldukça zordur. Ancak kat rijitlik merkezinde düşey taşıyıcı elemanların rijitlikleri ile oynanması sonucunda değişim meydana gelebilir. Deprem yükü koşulları altında böyle bir yapısal sistemin tepkisi ve davranışı temel olarak kesit boyutuna ve kolonların ve perdelerin topolojik düzenine bağlıdır. Bu amaca optimizasyon algoritmaları ve özellikle de evrimsel optimizasyon algoritmaları ailesi ile ulaşılmaktadır. Evrimsel optimizasyon algoritmaları (EOA) boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu yapma kabiliyetinin olması nedeniyle kullanması tercih edilmektedir. Optimizasyon yöntemi olarak evrimsel esaslı GA yöntemi kullanılarak ve GA parametrelerinin dışmerkezlik probleminin optimum çözümü üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Bu problem, boyutlandırma optimizasyon problemi olarak kabul edilir. Boyutlandırma optimizasyonunun amacı, yapıyı oluşturan düşey taşıyıcı elemanlarının optimum boyutlarını elde etmektir. Boyutlandırmada göz önünde bulundurulan şartlar TS-500 ve TDY 2007 betonarme yapıların analiz ve tasarım kuralları şartnamesine uygun biçimde belirlenmiştir.

Bu bölümde, TDY-2007 'de belirtilen planda L şekline sahip olan betonarme yapılar, tek katlı çerçeve ve perde-çerçeve sistemi olmak üzere farklı modellerin (deprem açısı etkisinin göz önüne aldığı ve almadığı durumlarda) dışmerkezlik analizini yapmak üzere MATLAB® programı kullanılmış ve sonuçlar belirtilmiştir. Daha sonra Genetik Algoritma (GA) uygulamaları ile boyutlandırma optimizasyonu yine MATLAB® ortamda yazılmış ve geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçların kıyaslanarak incelenmiştir.

9.1. Optimizasyon Probleminin Formülasyonu

Optimum tasarım probleminin formülasyonu, problemin sözlü bir tanımının iyi tanımlanmış bir matematiksel ifadeye dönüştürülmesini içerir. Formülasyonda, tasarımın tanımlanması için tasarım değişkenleri adı verilen bir değişkenler seti verilmiştir. Tüm tasarımlar, sistemin boyutları, güçlü yönleri ve tepkisi ile ilgili sınırlamalar içeren belirli bir dizi kısıtlamayı yerine getirmek zorundadır. Bir tasarım tüm kısıtlamaları yerine getiriyorsa, uygulanabilir bir tasarım olarak kabul edilir. Bir tasarımın diğerinden daha iyi olup olmadığına karar vermek için amaç fonksiyonu adı verilen, bir kriter, gereklidir. Tasarım optimizasyonu problemi çözümü için matematiksel bir formülasyon geliştirmek amacıyla (altıncı ana bölüm altındaki Madde 6.3 Bak.) belirtilen beş adımın her birinde gerçekleştirilecek işlemler tarif edilmiştir.

Dışmerkezlik problemlerinin optimizasyonunda GA, lineer olmayan fonksiyonu tamsayı ve ayrık kısıtlamalarla en aza indirmek için kullanılır. Ayrı bir yapısal optimizasyon problemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$find\ X = [x_1\ x_2, \dots, x_n] \quad which\ minimizes\ f(X) \tag{9.1}$$

Kısıtlamalara tabi;

$$g_j(X) \leq 0 \qquad j = 1, 2, \dots, m \tag{9.2}$$

$$x_i \in D_i, \quad D_i = \left(d_{i1},\ d_{i1}, \dots, d_{iqi}\right), \quad i = 1, 2, \dots, n_d$$

$$x^{iL} \leq x_i \leq x^{iU}$$

Burada: x, tasarım vektörü olarak adlandırılan n boyutlu bir vektördür; f (X), amaç fonksiyon olarak adlandırılır ve g_j (X), eşitsizlik kısıtlamaları olarak bilinir. n, değişkenlerinin sayısı ve m kısıtlamalarının sayısı herhangi bir şekilde ilişkili olmak zorunda değildir. n_d, ayrık tasarım değişkenlerinin sayısıdır; D_i, i'inci değişken için ayrık değerler setidir. x^L ve x^U, sırasıyla tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını içeren n uzunluğuna sahip iki vektördür.

9.1.1. Boyutlandırma optimizasyonu

Önerilen yapıların boyutlandırma optimizasyonunun amacı, yapının taşıyıcı elemanları için en uygun kesitleri bulmaktır. Boyutlandırma optimizasyon probleminde, tasarım değişkenleri genellikle optimize edilen taşıyıcı elemanların uzunluğu, genişliği veya kalınlığı gibi geometrik parametrelerdir. Ayrık parametre sistemlerinin boyut optimizasyonunda önceden tanımlanmış yapısal elemanların boyutları, optimum tasarımı bulmak için değiştirilir. Böyle bir optimizasyon yapılmadan önce analiz edilecek yapının tanımlanması gerektiği anlamına gelir.

9.1.2. Boyut sınırlama kısıtlamaları

Boyut kısıtlamaları, mimari ve / veya geometrik kriterlere göre kolon ve perde boyutlarına uygulanan üst ve alt sınırlardır. Bu tür kısıtlamaların literatürde yan kısıtlamalar, geometrik kısıtlamalar ve basit sınırlar gibi birçok farklı adı vardır. Tüm bu isimler, bu tür kısıtlamanın doğasını matematiksel olarak açık bir şekilde açıklamaktadır. Yukarıdaki tüm kısıtlamaların, modelin kolon ve perde için optimum boyutlara ulaşması için kısıtlı olarak kullanıldığını belirtmek gerekir.

9.2. Minimum Dışmerkezliği için Algoritması

Genetik Algoritmaların amacı, her adımda bir önceki tasarım setten yeni bir tasarım seti oluşturarak amaç fonksiyonunun uygunluk derecesini artırmak ve sonuç olarak belli kısıtlamaları sağlayacak şekilde amaç fonksiyonunun sağlayan optimum değerini elde etmektir. Problemlerde optimizasyon için birçok farklı algoritma geliştirilmiştir. Maalesef, tüm problemler için en iyi seçenek tek bir algoritma değildir. Genellikle, problemin türü, amaç fonksiyonunun formülasyonu, değişkenlerin miktarı ve karmaşıklığı ve mevcut hesaplama gücü, bir problem için hangi algoritmanın en iyi olduğuna karar verir. Aşağıda önerilen algoritmanın açıklaması sunulacaktır.

1. Başlangiç popülasyon: Öncelikle ele alınan problem için bir rastgele tasarım değişkenleri (popülasyon üyeleri) oluşturulur.
2. Değerlendirme: başlangıç popülasyon oluşturduktan sonra popülasyondaki her bir tasarım değişken için uygunluk (fitness) hesabı yapılır. uygunluk, amaç fonksiyonunun

sonucuna göre belirlenir. Aramada kullanılacak değerlendirme fonksiyonu önceden belirtilmelidir. Yeni bir popülasyon meydana gelinceye kadar aşağıdaki adımlar tekrar edilir:

3. Uygunluk ölçeklendirme seçeneği: orantılı (Proportional) dayalı bir uygunluk atamasında, bir tasarım değişkenin ölçeklenmiş değerini işlenmemiş uygunluk sayısıyla orantılı hale getirir.
4. Elite sayısı, bir sonraki jenerasyona kadar hayatta kalması garanti edilen tasarım değişkenlerin sayısını belirtir. Elite sayısı popülasyon boyutundan küçük veya ona eşit pozitif bir tam sayı olacak şekilde ayarlanacaktır. Varsayılan değer, tamsayı problemler için 0.05 * (varsayılan popülasyon boyutu) şeklindedir.
5. Optimizasyon kriterleri: Algoritmanın durdurma kriterleri jenerasyon sayısı, hesaplama süresi sınırı ve fonksiyon toleransı yer alır. Algoritma, bu koşullardan herhangi biri karşılanır karşılanmaz durur.
6. Sonlandırma kriteri: Bu çalışmada, maksimum yineleme sayısı sonlandırma ölçütüdür. Ayrıca, her örnek için sonlandırma kriteri için farklı sabit sayıda yineleme dikkate alınır.
7. Bir Problem İçin Birden Fazla Çalıştırma: Mümkün olan en iyi çözümün elde edildiğinden emin olmak için problemin birkaç kez çalıştırılması dikkate alınır.

9.3. Planda Düzensiz Binaların Dışmerkezliğinin Minimize Edilmesi

9.3.1. Amaç fonksyonu

Amaç fonksiyonu, optimizasyonun amacını ifade eden, değeri en aza indirilecek olan gerçek değerli fonksiyondur. Betonarme yapılarda kütle merkezi ile rijitlik merkezleri arasındaki dışmerkezliği minimum yapan amaç fonksiyonu denklem (9.3)'de verilmektedir.

$$Amaç\ (minimize)\ e_s = ((\mathrm{X_{CM}} - \mathrm{X_{CR}})^2 + (\mathrm{Y_{CM}} - \mathrm{Y_{CR}})^2)^{0.5} \qquad (9.3)$$

Kısıtlamalara tabi

$$\mathrm{g}_j(x) \leq 0, \qquad j = 1,2,\dots,m(davranış)$$

$$\mathrm{x^{iL}} \leq \mathrm{x} \leq \mathrm{x^{iU}}, \qquad \mathrm{i} = 1, 2, \dots, \mathrm{n}$$

Yukarıdaki denklem 9.3'te: (X_{CM}, Y_{CM}) ve (X_{CR}, Y_{CR}), sırasıyla kütle merkezi ve rijitlik Merkezi'nin koordinatlarıdır; g(x), eşitsizlik sınırlayıcılar; n uzunluğunda bir vektör, sismik ve betonarme yapı tasarım kodlarının uyguladığı davranışsal kısıtlamalardır. x^{iL} ve x^{iU}, tasarım kodu tarafından belirlenen boyutlandırma tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını oluşturur.

9.3.2. Tasarım değişkenleri

Betonarme çerçeve ve perde çerçeve yapı sistemlerinin boyut optimizasyon uygulamalarında elemanların kesit alanları tasarım değişkeni olarak düşünülür. Farklı elemanlar arasındaki bağlantılar ve düğüm noktalarının koordinatları sabit olarak alınır. Bundandır ki boyutlandırma optimizasyon problemi sadece önceden belirlenmiş kesitlerden alınarak eleman kesit alanlarının sınırlandırılmasıyla uygulamayabilir. Tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınırları ile değişkenlerin başlangıç değerleri tanımlanır.

Kolon kesiti için tasarım değişkenleri, kolonların x ve y yönündeki boyutları olarak, perdeler için tasarım değişkenleri ise perdelerin kalınlığı olarak seçilmiştir. Değişkenlerin sayısı, kolonlar ve perdelerin kalınlıkları dahil olmak üzere eleman sayısına eşittir. Kolonlar $b_c \times h_c$ boyutlarında kare ve /veya dikdörtgendir. Daha pratik bir sonuç elde etmek için, boyut değişkenlerinin santimetreye yuvarlanmış ayrık değerler almasına sağlanmıştır.

9.3.3. Tasarım kısıtlamalar

Tasarım değişkenleri için düşünülen kısıtlamalar iki ana başlık altında toplanabilir: İlk tip yapısal kısıtlamalar kesitlerin yük taşıma kapasitelerindir. İkinci tip ise mimari gereklilikleri belirleyen kısıtlamalardan, uyumluluk kısıtlamalarınından oluşur. Bunlar, (TDY-2007 ve TS 500) [31, 41] gereksinimlerine göre değişkenlerin minimum ve maksimum boyutlarını içerir. Yapısal optimizasyon probleminde tipik bir tasarım kısıtlaması aşağıdaki denklem ile gösterir.

$$g_j(x) = \left|q_j(x)\right| - q_{allow,j} \tag{9.4}$$

Denklem (9.4)'te: $q_j(x)$, x tasarımı için bir yanıt ölçüsüdür ve $q_{allow,j}$, izin verilen maksimum mutlak değeridir. Kısıtlamalar probleme bir q_{allow} katsayısı olarak dahil edilmiş.

Kapasite kısıtlaması

Standartlarda izin verilen dikdörtgen kesitli kolonların en küçük boyutu 25x30 cm'den ve enkesit alanı 750 cm^2 den daha az olmayacaktır. Kolonun enkesit alanı, N_d düşey yükler ve deprem yüklerinin ortak etkisi altında hesaplanan eksenl basınç kuvvetlerinin en büyük olmak üzere aşağıdaki koşulunu sağlayacaktır.

$$A_{ci} \geq \sum \frac{N_{dmax}}{0.5 \text{ x } F_{ck}} \qquad (TDY-2007) \qquad i = 1,2,\dots,nm \tag{9.5}$$

Burada: $N_{d,}$ tasarım eksenel kuvveti; Ac, kolonlarda tüm kesit beton alanı; $F_{ck,}$ beton karakteristik basınç dayanımı.

9.3.4. Kolon kısıtlamaları

Geometrik kısıtlama

Mevcut formülasyon için, kolonlar kare veya dikdörtgen olabilir. Kolon genişliğinin (b_c) derinliğini (h_c) için verilen minimum boyut sınır değerinden az olmamalıdır. Denklem (9.6 & 9.7) kolon boyutlarının aşağıdaki şekillerle sınırlandırıldığını göstermektedir:

$$\frac{b_{min,i}}{b_i} - 1 \leq 0 \qquad i = 1,2,\dots,n_{columu} \tag{9.6}$$

$$\frac{h_{min,i}}{h_i} - 1 \leq 0 \qquad i = 1,2,\dots,n_{columu} \tag{9.7}$$

Burada: i, kolonların sayısını temsil eden bir indeks ve (n_{kolon}) toplam kolon sayısıdır. Minimum derinlik (b_{min}) ve genişlik (h_{min}) mimari gereksinimlerine göre her problem için ayrı ayrı tanımlanmalıdır.

Uyumluluk kısıtlaması

Kiriş takviye çelik çubuklarının kolonlar boyunca devam etmesine izin vermek için belirli bir kattaki kolonların (b_c) derinliğinin karşılık gelen kiriş genişliğinden (b_w) daha az olmamasını sağlamak için uyumluluk kısıtlaması uygulanır. Normalleştirilmiş formda bu kısıtlama şu şekilde yazılabilir:

$$1 - \frac{b_c}{b_w} \leq 0 \qquad (9.8)$$

9.4. Matlab ile Optimizasyon Problemlerinin Çözümü

Genetik algoritmalar arama yöntemleri olduğundan, optimizasyon problemlerinin çözümü bilgisayar kullanımını gerektirir. Ayrıca yapısal optimizasyon problemlerini çözmek, özellikle doğrusal olmayan ayrık bir problemin çözümü, yüksek hızlı bir dijital bilgisayar gerektirir. MATLAB®, mühendisliğin tüm alanlarında yararlı olan mükemmel bir sayısal hesaplama ortamı ve programlama dilidir. MATLAB® hem basit hem de karmaşık yapısal sistemleri veya tasarımları verimli bir şekilde optimize etmeyi sağlar. GA komutunu kullanarak MATLAB® hesaplama ortamında optimizasyon problemini kurmak için üç M-dosyası (M-files) oluşturulur; ana dosya, bir amaç fonksiyon dosyası ve bir kısıtlama fonksiyonu dosyası. Bu çalışmada planda L şekline sahip olan betonarme yapıların genetik algoritma yöntemi ile boyutlandırma optimizasyonunun yapılabilmesi amacıyla tek katlı çerçeve ve perde-çerçeve yapı sistemlerine yönelik olmak üzere MATLAB® kullanılarak program hazırlanılmış ve test edilmiştir. Çözüm prosedürü optimizasyon problemini formüle etmek için (MATLAB® formatında) dört adım içermektedir.

1. İlk adım, problem için açıklayıcı bir ifade geliştirmeyi ve problemin matematiksel formülasyonunu içerir.
2. İkinci adım, sistemi tanımlayan değişkenler kümesini tanımlamayı içerir.
3. Üçüncü adım, en aza indirilmesi gereken optimum tasarım problemi için amaç fonksiyonunu belirlemektir.
4. Dördüncü adım, tüm kısıtlamaları belirlemek ve bunlar için ifadeler geliştirmektir. Tüm kısıtlamalar tasarım değişkenlerine bağlı olmalıdır.

Böylece, kolon kesit boyutları ve perde boyutları için veri tabanları MATLAB® yazılımı kullanılarak oluşturulur. Geliştirilen optimizasyon algoritması, 8GB RAM'a sahip 1.90 GHz Intel® Core ™ i5-8250U CPU özellikli bilgisayar tarafından çalıştırılan MATLAB® (R2018b Student Version) ile uygulanmıştır.

9.5. Sismik Uygulamalar için Optimum Dışmerkezlik Tasarımı

Bu bölümde çerçeve ve perde çerçeve taşıyıcı sistem olmak üzere çeşitli tek katlı yapı sistemi seçilmiştir. Tek katlı bir binada dışmerkezliği artması her zaman kat planındaki düşey taşıyıcı elemanlarının (kolon ve perde) konumuna ve boyutuna bağlı olarak yeterli ve gerekli bir durum olduğundan kolaylık için gözönüne alınmıştır. Tek katlı binalar iki metot ile dışmerkezliği analizi ve GA uygulamaları ile boyutlandırma optimizasyonu yapılmıştır.

1. Planda düzensiz binaların deprem etkisi altında dışmerkezlik incelenmiş ve genetik algoritma ile boyutlandırma optimizasyonu yapılmıştır. İlk yaklaşım, yapı eksenlerinin ana yönlerine göre dışmerkezliği analiz ve GA uygulamaları ile boyutlandırma optimizasyon problemi çözmülmüştür.
2. Planda düzensiz binaların kritik deprem doğrultularının etkisi altında dışmerkezlik incelenmiş ve genetik algoritma ile boyutlandırma optimizasyonu yapılmıştır.

Çalışmada ilk olarak tek katlı çerçeve ve perde-çerçeve sistemi olmak üzere farklı modellerinin kütle merkezi ile rijitlik merkezleri arasındaki oluşan dışmerkezlik analizini yapmak üzere MATLAB® kullanılarak program geliştirilmiş ve test edilmiştir. İkinci aşamada boyutlandırma optimizasyonu için GA yöntemi kullanılarak optimizasyon programı yine MATLAB® ortamında yazılmış ve geliştirilmiştir.

Tüm örnek modellerde aşağıdaki malzeme özellikleri ve proje parametreleri dikkate alınmıştır: Malzeme olarak beton sınıf C25 tercih edilmiştir. Betonun karakteristik basınç dayanımı f_{ck} = 25 kN/m^3 ve Beton yoğunluğu F_c=25kN/m^3 alınmıştır. Betonun elastisite modülü C25'e uygun olarak E_c=30000 MPa alınmıştır. Malzemenin lineer elastik davrandığı kabul edilmiştir. Tüm örnek modeller tek katlı olup, kat yükseklikleri 3,0m'dir. Kat döşemesi ağırlığı, kirişlerin ağırlığı, kolonların ağırlığı, bölme duvarların ve diğer sabit yüklerin (G) ve %30 hareketli yük (Q) tamamı hesaplanıp kolonun merkezine aktarılmıştır. Betonarme ön hesaplar sonucunda döşeme kalınlığı 15cm olarak bulunmuştur.

Döşemeler'deki hesap yükleri bulunurken TDY'de verilen düşey yük kullanılacak olan yük birleşimi $P_d = 1.4G+1.6Q$ hesap yükü kullanılmıştır. Tüm döşemelerde, konut odası olduğu için, 2,0 kN/m^2 hareketli yük kullanılmıştır. Duvarlar tam tuğla birim ağırlığı (sıva dahil) 4,2 kN/m^2 ve dolgu duvarlarının kalınlığı 25cm dir. Birinci kat kolon ve perde zemine ankastre bağlandığı kabul edilmiştir. Tüm kat kalıp planlarda, CM kütle merkezini ve CR rijitlik merkezini belirtir.

Plandaki A3 düzensizliği TDY-2007'de belirtilen her iki yönde yapının toplam plan boyutlarını %20'den fazla aştığı durumlar olarak tanımlanmaktadır. Tüm örnek modeller için A3 oranı her iki yönde de hesaplanmış sonuç olarak her iki eksene dayalı A3 düzensizliği vardır. Analiz ve boyutlandırma hesaplarının ayrıntıları burada gösterilmemiştir. Tüm örnek modeller için yapılan ön boyutlandırmalar kaynaklara uygun olarak yapılmıştır [31, 41]. Rijitlik ve kütle merkezlerinin hesabı ilgili metotları detaylı şekilde bölüm 5'te açıklanmıştır. Rijitlik hesabında bu uygulama için döşemenin rijit diyafram olarak çalıştığı kabul edilmektedir. Klasik analiz ve boyutlandırma optimizasyonu sonuçları karşılaştırılarak çizelge halinde sunulmuştur.

9.5.1. Genetik algoritma parametrelerinin seçimi

Tam sayılı kısıtlamalarla lineer olmayan bir fonksiyonu en aza indirmek amacıyla GA kullanılmıştır. Bir problemin tamsayı kısıtlamaları varsa, GA bunu dahili olarak yeniden biçimlendirir. Özellikle, problemdeki uygunluk fonksiyonu, kısıtlamaları ele alan bir ceza fonksiyona değiştirilir. "Uygulanabilir popülasyon üyeleri için ceza fonksiyonu, uygunluk fonksiyonu ile aynıdır" [43]. Bu uygulama GA'ya en küçük arama alanını vererek GA'nın en etkili şekilde arama yapmasını sağlar. Tüm örneklerde tasarım değişkenleri cm olarak verilmiştir. Kolonların kesit boyutları sırasıyla x ve y eksenine karşılık gelen derinlik (b_c) ve genişlik (h_c) tasarım değişkenleri olarak verilmiştir. GA popülasyonu '200' ve 200 nesil evrime izin verir. Veri tipleri 'ikili vektör', elit sayımın varsayılan değeri yuvarlanmış popülasyon boyutunun %5'i ve göç yönü 'ileri' seçilmiştir. Tasarım değişkenlerinin ayrık olması durumunu ele alan çok az algoritma geliştirilmiştir. Kısıtlamalı problemler için ceza fonksiyonu yaklaşımı kullanılmadığında sadece uygulanabilir dizeler kabul edilir.

Program başlatıldığında seçilen tasarım değişken değerleri daha önce hazırlanmış olan sistemde bulunan kolon kesit boyutlarını atanmakta, sistem çözülerek dışmerkezlik hesabı

yapılmakta ve amaç fonksiyonu hesaplanmaktadır. Genetik algoritma işlemleri, her jenerasyon tamamlandığında uygulanmaktadır. Jenerasyondaki değişkenlerin en az %90-95 oranında benzer olması durumunda dönüş işlemlerine son verilebilir. Bu değişkenlerin benzerliği en uygun çözümü göstermektedir. Her bir jenerasyonda kolon boyutları ve dışmerkezlik değeri bir çıktı dosyasına yazdırılmaktadır. Daha önce belirlenmiş olan jenerasyon sayısı tamamlanıncaya kadar sürecek olan evrim devam edecektir. Topluluktaki değişkenlerin başarısı her bir jenerasyonda artmaktadır.

Çizelge 9.1'de Problemlerini çözmek için seçilen GA parametre setini verilmiştir. Analiz neticesinde sonuçlar kıyaslanarak incelenmiş ve çizelgelerde sunulmuştur.

Çizelge 9.1. Problemlerini çözmek için seçilen GA parametre seti

Popülasyon Tipi	İkili vektör
Göç Yönü	İleri
Popülasyon Boyutu	200
Uygunluk Ölçekleme Fonksiyonu	Orantılı
Elit Sayısı	10
Fonksiyon Toleransı	1e-6
Hibrit fonksiyonu	Yok

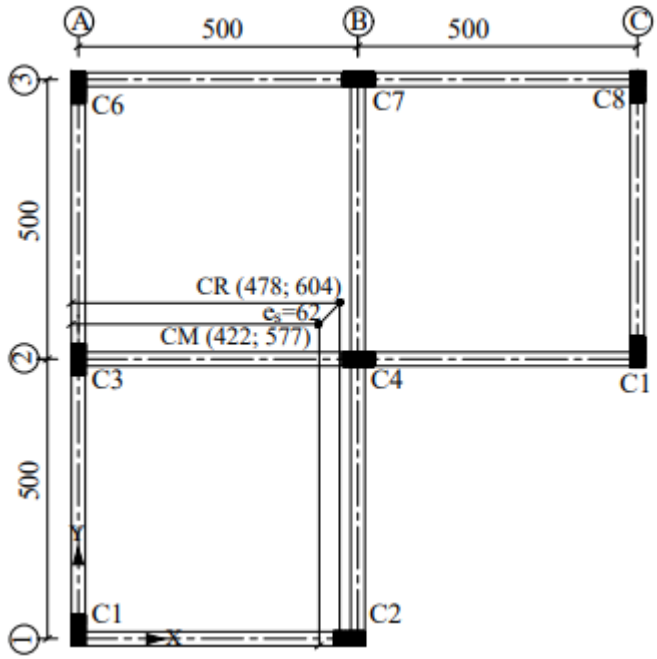
9.5.2. Tek katlı binaların optimal dışmerkezliği tasarımı

Çerçeve ve perde çerçeve taşıyıcı sistem olmak üzere 3 farklı tek katlı yapı sistemi seçilmiştir. İlk yaklaşım, yapıların dışmerkezliği analiz edilmiştir. Daha sonra GA uygulamaları ile boyutlandırma optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hazırlanan çözüm algoritması diğer taşıyıcı elemanların boyutları sabit alınarak çeşitli iki boyutlu yapı sistemlerine uygulanmış ve planda iki doğrultuda yerleştirilen perde ve kolonların optimum boyutlandırma tasarımı yapılmıştır.

Tüm optimize edilmiş kat kalıp planlarda, eksenler 1/50 ölçekte çizilmiş ve ardından eksenlerin kesişme noktasında 1/20 ölçekte kolonlar çizilmiştir.

Örnek 9.1

Bu örnekte; tek katlı, düşey taşıyıcı sistemi kolonlardan oluşan, düzensiz bir taşıyıcı sisteme sahip, betonarme yapı analiz ve optimizasyonu çözülmüştür. Modelin x ve y yönünde aks açıklıkları eşit 5m olarak belirlenmiştir. Çıkıntı yapan kısımların uzunluğu binanın toplam uzunluğunun oranı x yönünde %50 ve y yönünde %50'dir. Binanın kütlesi (1398,0 kN) hesaplanmıştır. Şekil 9.1'deki C1, C3, C5, C6, C8 olarak işaretlenen kolonların ön boyutlandırması 25cm × 55 cm ($b_c \times h_c$, bundan sonra da benzer şekilde), C2, C4, C7 olarak işaretlenmiş kalan kolonların boyutları 55cm × 25cm ve kirişler 25/50 cm hesaplanmıştır. Bu örnekte her yatay yönde tasarım optimizasyonu 8 elementten oluşmaktadır ve kolonlar dahil olmak üzere toplam 16 tasarım değişkenleri kullanılmıştır. Kolonlar için kesit boyutlar alt sınırları 30cm genişlik ve üst sınırları ise 50cm derinlik ayarlanmıştır. Şekil 9.1 ve 9.3'te, CM kütle merkezini ve CR rijitlik merkezini belirtir. Bu örneğe ait kat kalıp planı Şekil 9.1'de gösterilmiştir.

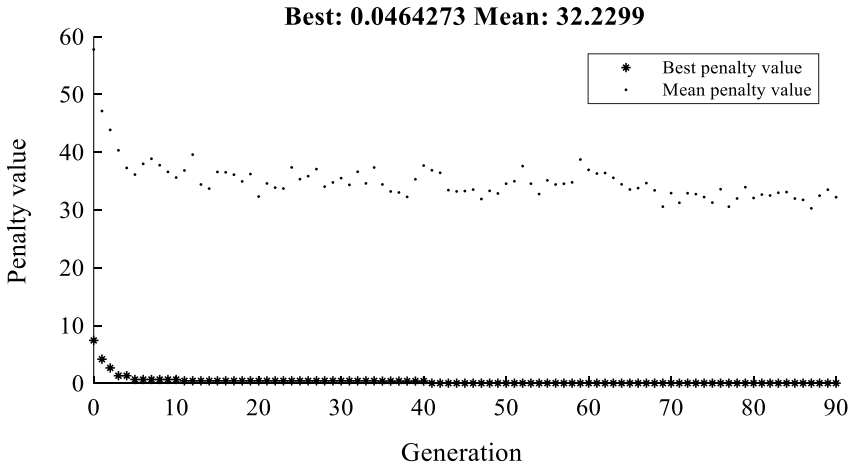


Şekil 9.1. Tek katlı modelin kat kalıp planı

Optimizasyon sonuçları aşağıda gösterilmiştir;

Şekil 9.2'de, boyutlandırma optimizasyonu uygulamaları 90 jenerasyon içinde elde edildiğini gösteren genetik algoritma yakınsama grafiğini göstermektedir. Şekil 9.2'e dikkatle incelendiğinde amaç fonksiyonu değeri nesiller ilerledikçe algoritmik olarak

azalmaktadır. İlk örnek problemin çözümününde maksimum 18000 fonksiyon değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 9.2' de, rijitlik merkezi ile kat kütle merkezi arasındaki mesafenin 62,0cm'den 0,046cm'ye düştüğü görülmektedir ve bu çizelgede her iki çözüm için kolonların kesitleri verilmiştir. Çizelge 9.2' de, Optimize edilmiş kolonlarının boyutları ve yönleri optimizasyon öncesi çözümünden farklı olduğu açıktır. Çizelge 9.2'de optimum tasarım ilk tasarımla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma neticesinde, optimize edilmiş tasarımın dışmerkezliğinin ilk tasarımdan elde edilenden çok daha küçük olduğu görülmektedir.

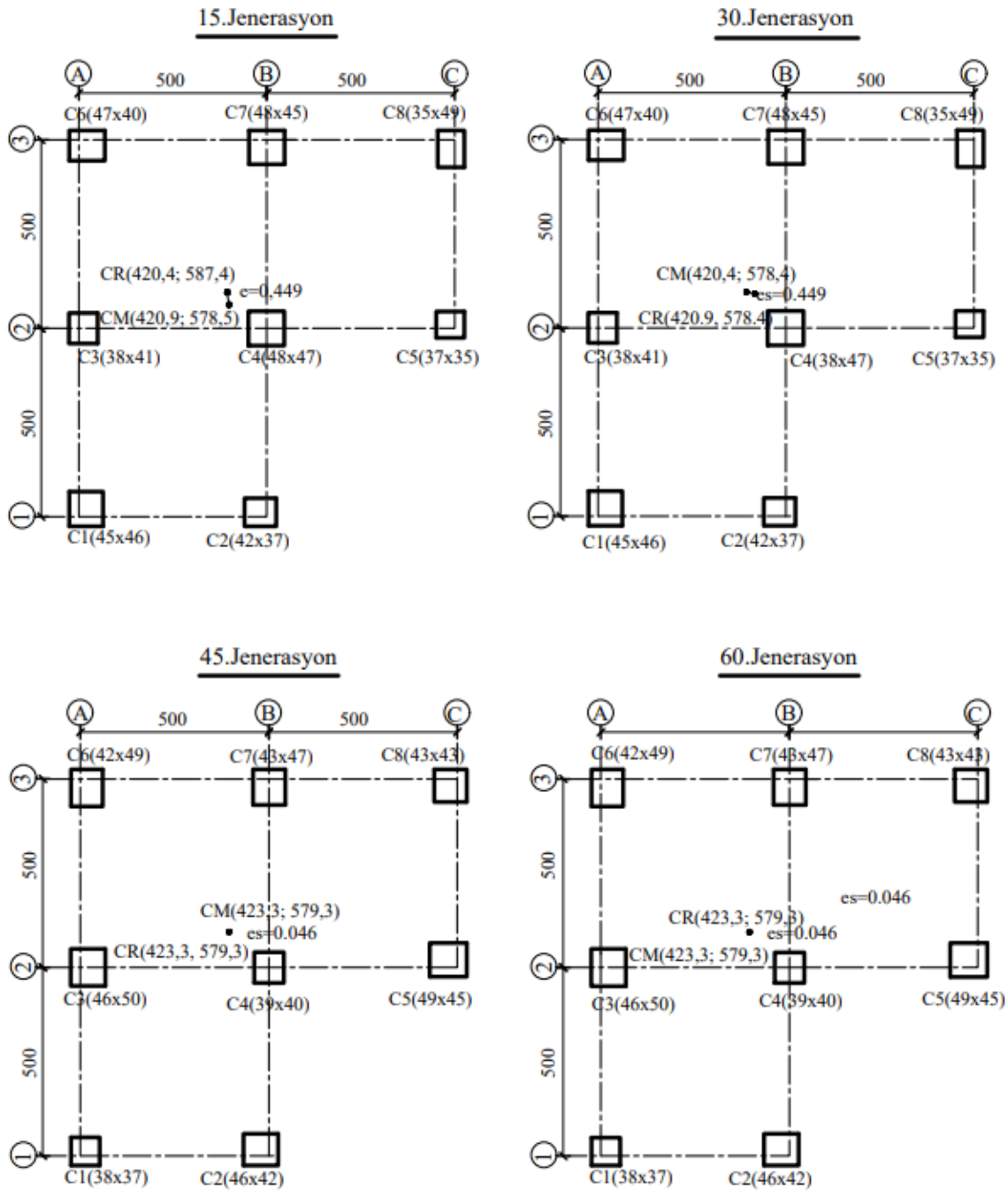


Şekil 9.2. Jenerasyon sayısı

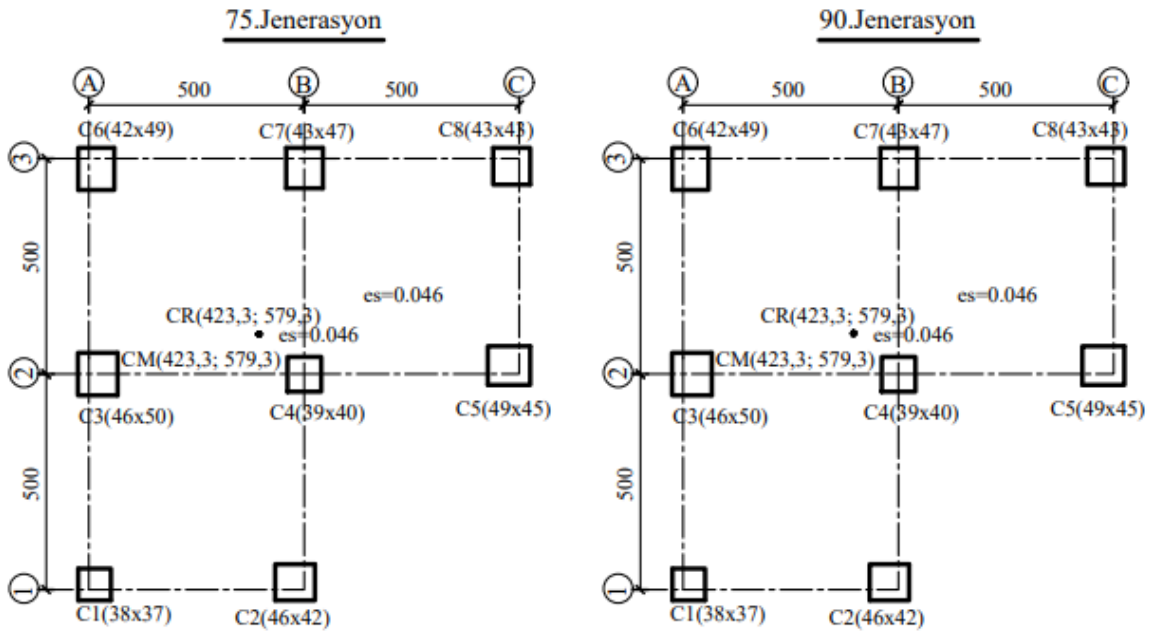
Çizelge 9.2. İlk ve optimize edilmiş kolon kesit boyutları ve dışmerkezlik değeri

Kolon sayısı	İlk çözüm		Optimum çözüm	
	Derinlik (b_c)	Genişlik (h_c)	Derinlik (b_c)	Genişlik (h_c)
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
C1	25	55	38	37
C2	55	25	46	42
C3	25	55	46	50
C4	55	25	39	40
C5	25	55	49	45
C6	55	25	42	49
C7	25	55	43	47
C8	55	25	43	43
Dışmerkezlik	62,0 (cm)		0,046 (cm)	

Kolonların kesit boyutları sırasıyla x ve y eksenine karşılık gelen derinlik (b_c) ve genişlik (h_c) olarak gösterilmiştir. Şekil 9.3'de görüleceği gibi optimizasyon problemini çözme sırasında farklı jenerasyonlarda; x ve y yönündeki kolonların kesit boyutları gösterilmiştir. Ayrıca plandaki kütle ve rijitlik merkezinin konumları sıfıra yaklaştığı gözlemlenmiştir. Düzensiz yapıya dayanarak, kütle merkezinin rijitlik merkezi ile çakıştığı optimize edilmiş, sonucunda düzenli bir yapı oluşturulduğu Şekil 9.3'teki jenerasyonda (45-90) gösterilmiştir.



Şekil 9.3. Bina kolonların boyutları, kütle ve rijitlik merkezinin konumları



Şekil 9.3. (devam) Bina kolonların boyutları, kütle ve rijitlik merkezinin konumları

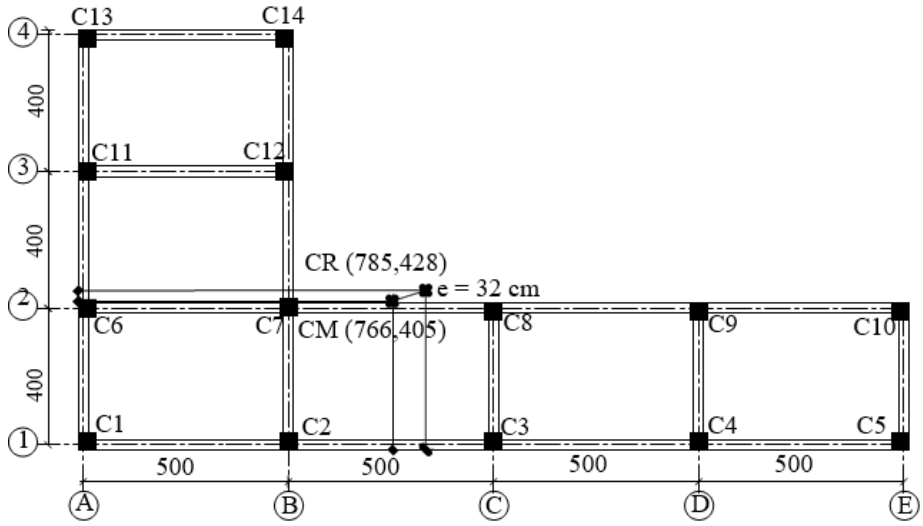
Çizelge 9.3'teki sonuçlar karşılaştırıldığında, rijitlik merkezi ile kat kütle merkezi arasındaki mesafenin 62,0cm'den 0,046cm'ye düştüğü ve %99,93 azalmayı sağladığı görülmektedir.

Örnek 9.2

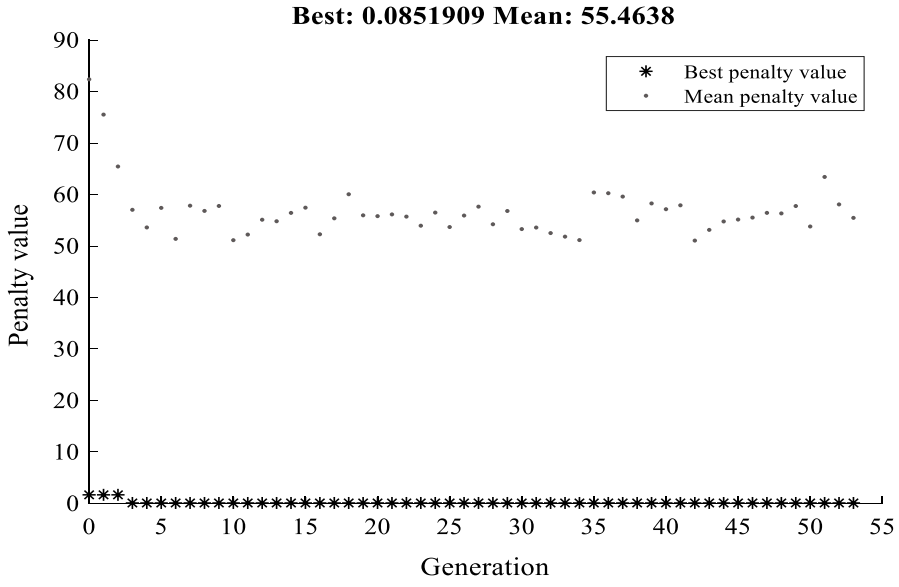
İkinci örnekte; Sistemin x yönündeki aks açıklıkları 5m ve y yönündeki aks açıklıkları 4m olarak belirlenmiştir. Çıkıntı yapan kısımların uzunluğu binanın toplam uzunluğunun oranı x yönünde %75 ve y yönünde %67'dir. Binanın kütlesi (2365,8 kN)'dir. İlk önce kolonların ön boyutlandırması 50x50cm ve kirişler 25/50cm hesaplanmıştır. Bu örnekte her yatay yönde tasarım optimizasyonu 14 elementten oluşmaktadır ve kolonlar dahil olmak üzere toplam 28 tasarım değişkenleri kullanılmıştır. Kolonlar için kesit boyutlar alt sınırları 30 cm derinlik ve üst sınırları ise 60cm genişlik ayarlanmıştır. İkinci örneğe ait kat kalıp planı Şekil 9.4'te gösterilmiştir.

İkinci örneğe ait optimizasyon sonuçları Çizelge 9.3 ve Şekil 9.5 & 9.6'da verilmiştir;
Şekil 9.5'de, boyutlandırma optimizasyonu uygulamaları 53 jenerasyon içinde elde edildiğini gösteren genetik algoritma yakınsama grafiğini verilmiştir. Bu şekil dikkatle incelendiğinde amaç fonksiyonun değeri, jenerasyonular ilerledikçe algoritmik olarak azalmaktadır. Boyut optimizasyon problemin çözümünü maksimum 10600 fonksiyon değerlendirilmiştir. Çizelge 9.3'teki sonuçlar karşılaştırıldığında, rijitlik merkezi ile kat

kütle merkezi arasındaki mesafenin 32,0cm'den 0,085cm'ye düştüğü ve %99,74 azalmayı sağladığı görülmektedir. Çizelgede her iki çözüm için kolonların kesitleri verilmiştir ve optimize edilmiş kolonlarının boyutları ve yönleri optimizasyon öncesi çözümünden farklı olduğu aşikardır. Kolonların boyutları sırasıyla x ve y eksenine karşılık gelen derinlik (b_c) ve genişlik (h_c) olarak gösterilmiştir. Şekil 9.3'de görüleceği gibi optimizasyon probleminin çözümü sırasında farklı jenerasyonlarda; x ve y yönündeki kolonların kesit boyutları değişmi, plandaki kütle ve rijitlik merkezinin konumları sıfıra yaklaştığı, gözlemlenmiştir.



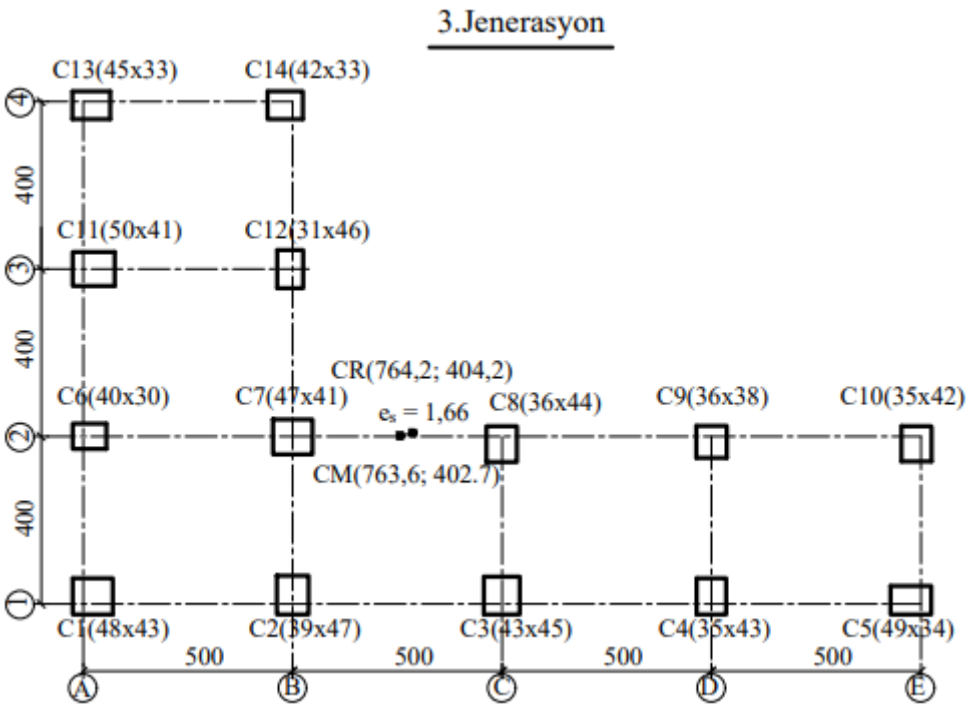
Şekil 9.4. Tek katlı modelin kat kalıp planı



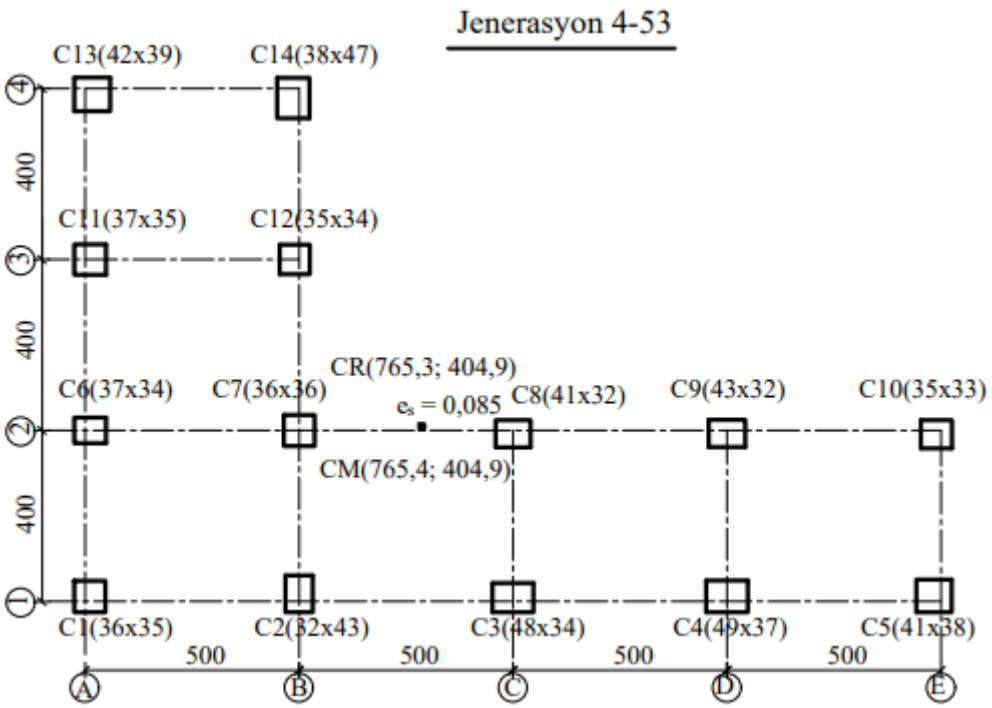
Şekil 9.5. Jenerasyon sayısı

Çizelge 9.3. İlk ve optimize edilmiş kesit boyutları ve dışmerkezlik değeri

Kolon sayısı	İlk çözüm		Optimum çözüm	
	Derinlik (b_c)	Genişlik (h_c)	Derinlik (b_c)	Genişlik (h_c)
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
1	50	50	36	35
2	50	50	32	43
3	50	50	48	34
4	50	50	49	37
5	50	50	41	38
6	50	50	37	34
7	50	50	36	36
8	50	50	41	32
9	50	50	43	32
10	50	50	35	33
11	50	50	37	35
12	50	50	35	34
13	50	50	42	39
14	50	50	38	47
Dışmerkezlik	32,0 (cm)		0,085 (cm)	



Şekil 9.6. Bina kolonların boyutları, kütle ve rijitlik merkezinin konumları



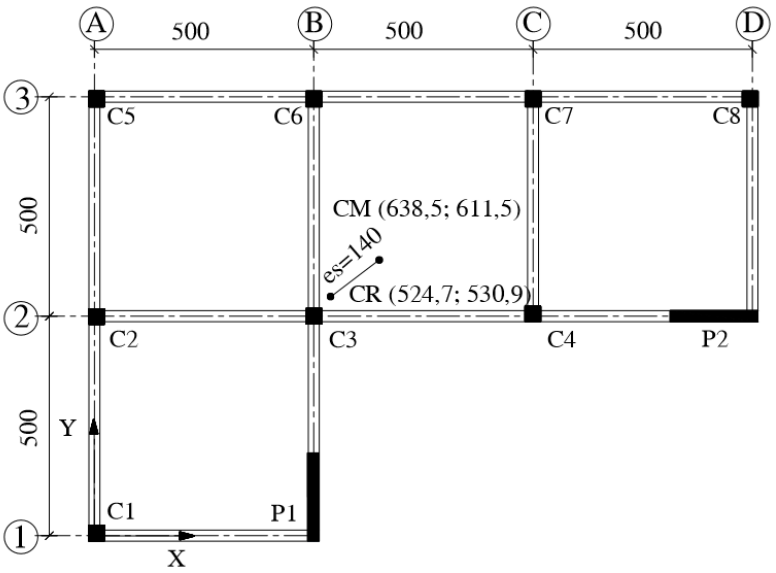
Şekil 9.6. (devamı) Bina kolonların boyutları, kütle ve rijitlik merkezinin konumları

Düzensiz yapıya dayanarak, kütle merkezinin rijitlik merkezi ile çakıştığı optimize edilmiş sonucunda düzenli bir yapı oluşturulduğu Şekil 9.6'te jenerasyonunu (4-53) gösterilmiştir. Şekil 9.6'da görüldüğü gibi optimizasyon problemi çözülürken değişik jenerasyonlarda; x ve y yönündeki kolonların kesit boyutları değiştiği ve her jenerasyonda dışmerkezliğin sıfıra yaklaştırdığı gösterilmiştir.

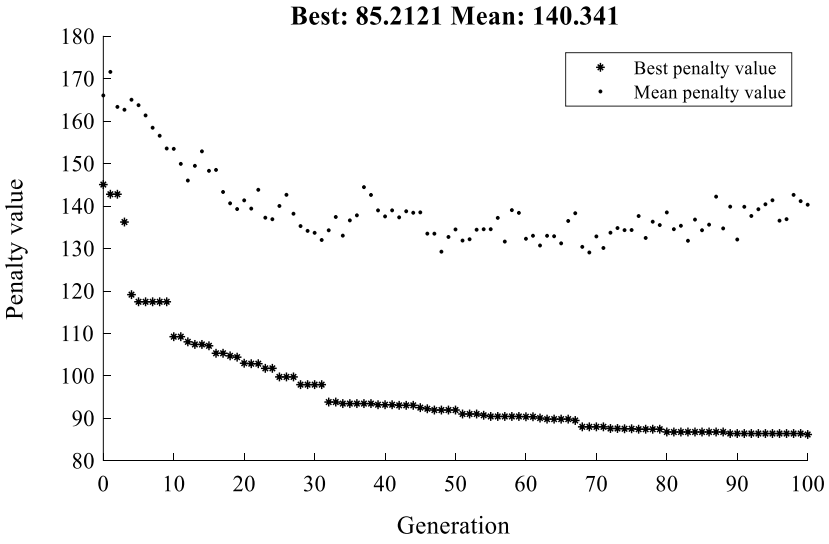
Örnek 9.3

Üçüncü örnekte; tek katlı, düşey taşıyıcı sistemi kolonlar ve perdelerden oluşan, düzensiz bir taşıyıcı sisteme sahip, betonarme yapı analiz ve optimizasyonu çözülmüştür. Çıkıntı yapan kısımların uzunluğu binanın toplam uzunluğunun oran x yönünde %67 ve y yönünde %50'dir. Binanın kütlesi (2365,8 kN) ve yüksekliği 3m'dir. Her iki yatay yönde tasarım optimizasyonu 10 elemandan oluşmaktadır. Bu elemanlar 2 perde grubuna ve 8 kolon grubuna ayrılmıştır. Sonuç olarak, 20 tasarım değişkeni kullanılmış olup, perdelerin kalınlıkları ve kolonların kesitleri tasarım değişkenleri olarak kabul edilmiştir. Perde uzunlukları 200cm sabittir ve yalnızca kalınlıkları tasarım değişkendir. Perde kalınlığının alt ve üst sınırları 20cm & 30cm olarak belirlenmiştir. Kolon boyutlarının alt sınırları 30cm üst sınırları ise 60cm olarak ayarlanmıştır. Kolonların kesiti ön boyutlandırmada 50x50cm ve

perdeler 25x200cm hesaplanmıştır. Üçüncü örneğe ait kat kalıp planı Şekil 9.7'de gösterilmiştir.



Şekil 9.7. Tek katlı modelin kat kalıp planı



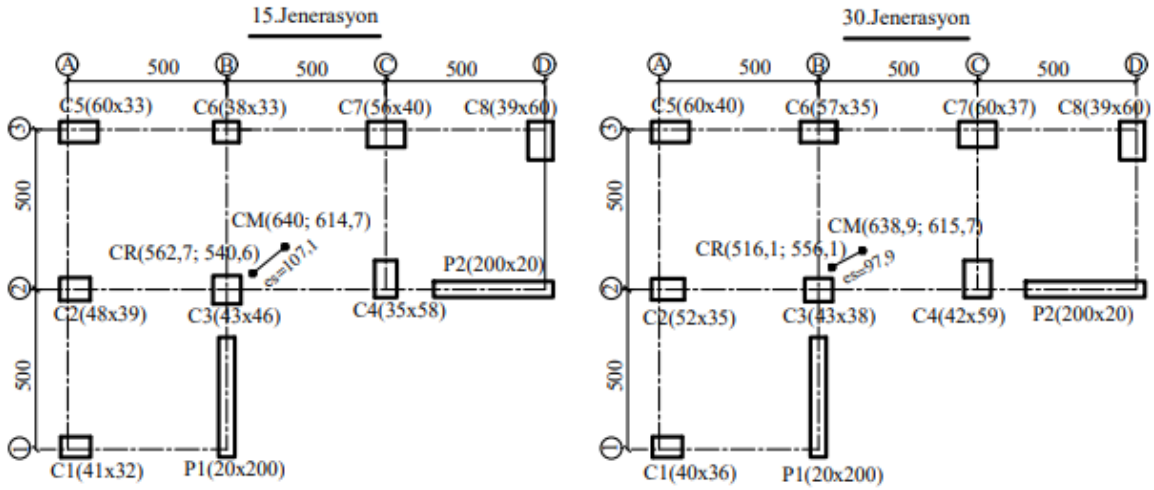
Şekil 9.8. Jenerasyon sayısı

Bu örneğe ait optimizasyon sonuçları aşağıda Çizelge 9.4 ve Şekil 9.8 & 9.9'da verilmiştir; Şekil 9.8'de, boyutlandırma optimizasyonu uygulamaları 100 jenerasyon içinde elde edildiğini gösteren genetik algoritma yakınsama grafiğini göstermektedir. Üçüncü örnekte GA probleminin çözümünü maksimum 20000 fonksiyon değerlendirme sonrası bulunmuştur.

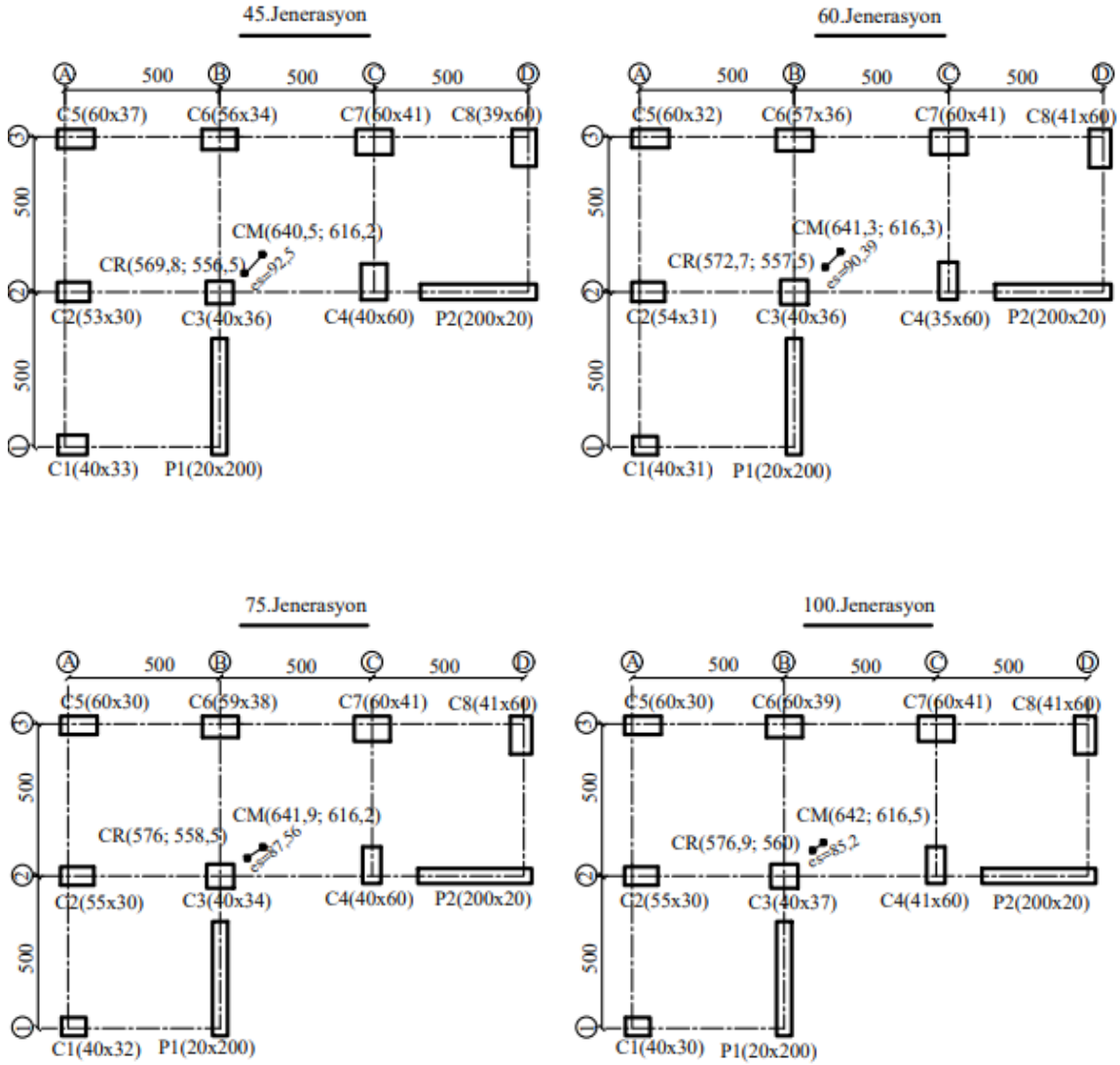
Çizelge 9.4' de, görüleceği gibi dışmerkezliğinin 140,0cm'den 85,21cm'ye düştüğü ve %39,14 azalmayı sağladığı izlenmektedir. Ayrıca bu çizelgede her iki çözüm için kolonların ve perdelerin kesitleri verilmiştir. Çizelge 9.4, kolonların boyutları sırasıyla x ve y eksenine karşılık gelen genişlik ve derinlik olarak belirtilmiştir. İlk çözümden elde edilen sonuçlar rijitlik merkezi ile kat kütle merkezi arasındaki mesafenin dışmerkezlik değerinin birinci ve ikinci örneklere karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 9.4. İlk ve optimize edilmiş kesit boyutları ve dışmerkezlik değeri

Kolon sayısı	İlk çözüm		Optimum çözüm	
	Derinlik (b_c)	Genişlik (h_c)	Derinlik (b_c)	Genişlik (h_c)
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
C1	50	50	40	30
P1	25	200	20	200
C2	50	50	55	30
C3	50	50	40	37
C4	50	50	41	60
P2	200	25	200	20
C5	50	50	60	30
C6	50	50	60	39
C7	50	50	60	41
C8	50	50	41	60
Dışmerkezlik	140,0 (cm)		85,21 (cm)	



Şekil 9.9. Bina kolonların boyutları, kütle ve rijitlik merkezinin konumları



Şekil 9.9. (devam) Bina kolonların boyutları, kütle ve rijitlik merkezinin konumları

Optimize edilmiş çözüm için boyutların ve yönlerin ilk çözümünden farklı olduğu görülmektedir. Şekil 9.9'da taşıyıcı sistem modeline ait kolon ve perde numaraları kalıp planından takip edilebilir. Optimize edilmiş kat kalıp planlarda, eksenler 1/50 ölçekte çizilmiş ve eksenlerin kesişme noktasında 1/20 ölçekte kolonlar ve perdeler çizilmiştir.

Sonuçlar ve tartışmalar

Bu çalışma, kütle ve rijitlik merkezleri arasındaki dışmerkezliği en aza indirmek için Genetik Algoritma tabanlı bir model geliştirmiş ve böylece planda L şekline sahip betonarme yapıların üzerinde sismik performansının artmasına sağlamaya amaçlamıştır.

Sonuç olarak çerçeve ve perde-çerçeveden oluşan taşıyıcı sistem analizi karşılaştırıldığında çerçeveden oluşan taşıyıcı sistemin kat kütle merkezi ile rijitlik merkezi arasında daha düşük dışmerkezliğe sahip olduğunu göstermektedir. Buna bağlı olarak planda düzensiz yapıların dışmerkezlik mesafelerine rijitlik düzensizlikleri, geometrik düzensizliklere göre daha fazla etki etmektedir. Düzensiz yapıya dayanarak, kütle merkezinin rijitlik merkezi ile çakıştığı optimize edilmiş düzenli bir yapı oluşturulduğu gösterilmiştir.

Yukarıdaki üç düzensiz bina modelinde, boyut optimizasyon sonucundan binaların kat kütle ve rijitlik merkezlerinin arasındaki mesafenin dışmerkezlik değerinin çok daha azaldığı ve dolayısıyla bina modellerin sismik performansının artmasına neden olduğu gösterilmiştir.

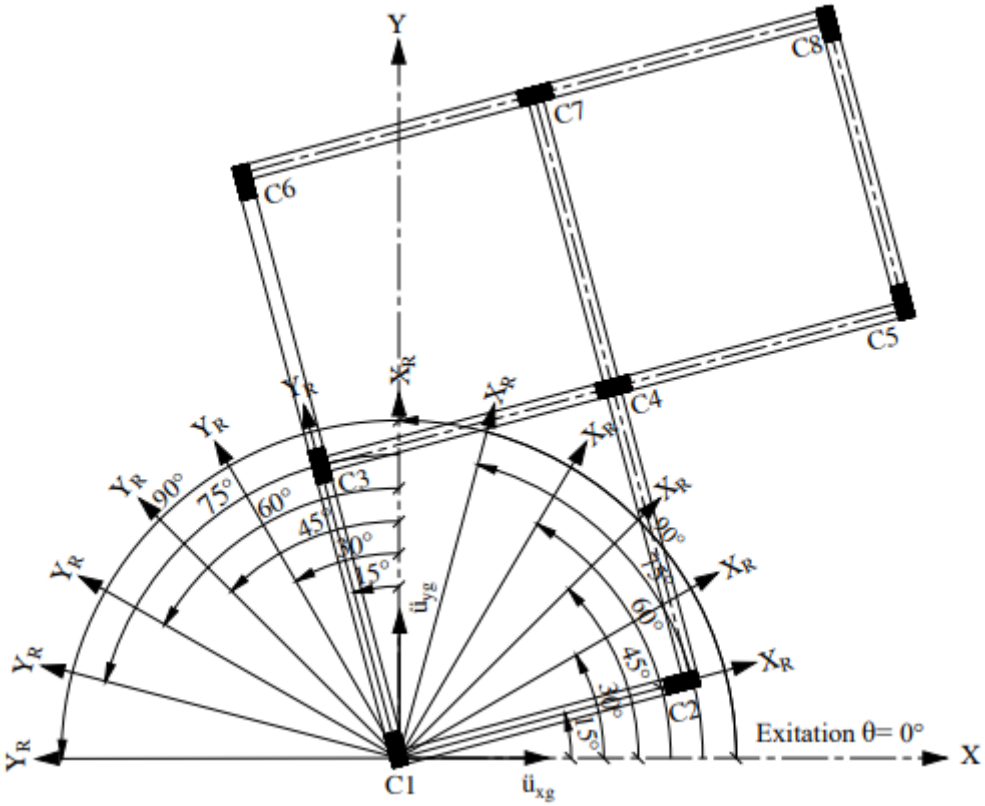
9.5.2. Planda düzensiz yapılarda deprem etkime açılarının etkisi dışmerkezliğe tepkileri ve GA ile optimizasyon

Yapıların sismik yükler altındaki davranışının incelenmesinde deprem yüklerinin yapı geometrisine hangi açıdan uygulandığında en elverişsiz tesirin oluşacağı yapı tasarımında sık karşılaşılan sorunlardan birisidir. Bu etkileri araştırmak için, literatürde [23-26] pek çok farklı çalışma mevcut olup incelemeler yapılmıştır ve Karekök Toplamı (SRSS), Tam Karesel Kombinasyon (CQC3) kuralları önerilmiştir. Bu yaklaşımlar, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemi uygulanabilir ve Tepki Spektrum Analizi (RSA) veya Zaman Tanım Alanında (RHA) analiz yöntemlerinde kullanılır.

Planda düzensiz binaların kritik deprem yükleri altındaki en elverişsiz tesirleri elde etmek için, binanın tipine göre ‘düşük ve yüksek dışmerkezlik’ nasıl farklılık göstereceği de analizlerde ayırt edici bir özellik olarak karşılaşılmaktadır. Böyle yapısal binaların kritik deprem yükleri altındaki dışmerkezlik esaslı davranış taleplerinin belirlenebilmesi ve optimum dışmerkezlik tasarımı amacıyla, literatürde henüz herhangi bir yaklaşıma veya analiz yöntemine rastlanamamıştır. Bu nedeniyle, çeşitli açılardan veya yönlerden deprem uygulamaları için en uygun statik dışmerkezlik tasarımı için Genetik Algoritma tabanlı bir optimizasyon prosedürü sunarız. Formüle edilmiş optimizasyon problemi; Kısıtlı Lineer Olmayan bir minimizasyon problemidir. Kolonların kesit boyutları tasarım değişkenleri olarak alınmıştır. Buna bağlı olarak, kritik dışmerkezliği en büyük sismik istemi yaratan kuvvetli deprem etkime açılarının tayini için rijit davranışı gösteren tek katlı çerçeve taşıyıcı sistem bina üzerinde birçok duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bina için 0

dereceden başlayarak 15’ar derece artımla 90 dereceye kadar 7 farklı deprem etkime açısına göre model MATLAB® platformda oluşturulmuş, modele deprem etkime açıların 0’dan başlayarak 15’er derece artımla 90 dereceye kadar 7 farklı açı ile yük uygulanmıştır. Bu analizler 7 farklı kuvvetli deprem yükleri için tekrarlanmıştır. Sonuç olarak binanın dışmerkezliği ile eğrilik dereceleri inceleyerek deprem yüklerindeki açı değişikliğinin etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Daha sonra boyutlandırma optimizasyonu GA uygulamaları ile optimum dışmerkezlik tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Yer hareketi etkime açısını incelemek için yapıyı döndürerek ve orijinal yer hareketi bileşenlerini döndürülmüş yapısal serbestlik derecelerine dönüştürerek elde edilir [59]. Denklem 9.9'da gösterilen ve Denklem 9.10'da genişletilmiş dönüşüm matrisi T, bu işlemi gerçekleştirmek için kullanılır. Ayrıca T, sabit bir yapıya göre yer hareketinin saat yönünde dönüşü olarak da düşünülebilir.



Şekil 9.10. Deprem etkime açıları θ = (0º- 90º)

Statik dışmerkezliğini analiz yapmak için yer hareketinin iki yatay bileşeni $ü_{xg}$ ve $ü_{yg}$ binaya Şekil 9.10’e göre ‘X’ ve ‘Y’ yönlerinde uygulanmaktadır ve yapısal serbestlik derecelerine göre çözümlenecektir. Bu sebeple θ (saat yönünün tersine dönüşü) açısı ile ‘X_R’ ve ‘Y_R’

yönlerinde uygulanması istenen verinin Denklem (9.10)'de verilen dönüştürme matrisi ile binanın global yönleri olan 'X' ve 'Y' yönlerine dönüştürülmesi gereklidir [59]. Bu durumda deprem yer hareketinin düşey bileşeni ihmal edilmiştir.

$$\ddot{u}_s = T\,\ddot{u}_g \tag{9.9}$$

$$\begin{bmatrix}\ddot{u}_{s1}(t)\\ \ddot{u}_{s2}(t)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix} x \begin{bmatrix}\ddot{u}_{xg}(t)\\ \ddot{u}_{yg}(t)\end{bmatrix} \tag{9.10}$$

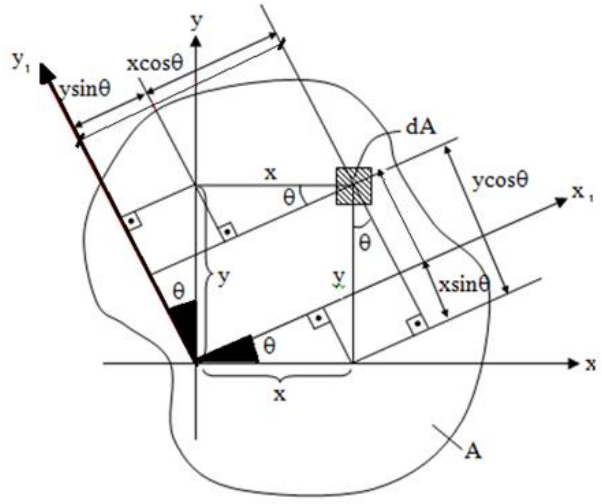
Eğik eksen takımına göre kolonların atalet momentlerini aşağıdaki denklemlerle hesaplamak gerekir.

$$I_{x1} = \frac{I_x + I_y}{2} + \frac{I_x - I_y}{2}\cos 2\theta - I_{xy}\sin 2\theta \tag{9.11}$$

$$I_{y1} = \frac{I_x + I_y}{2} - \frac{I_x - I_y}{2}\cos 2\theta + I_{xy}\sin 2\theta \tag{9.12}$$

$$I_{x1y1} = \frac{I_x - I_y}{2}\sin 2\theta + I_{xy}\cos 2\theta \tag{9.13}$$

Yukarıda: Ix ve Iy, kolonların referans eksenler etrafındaki atalet momentidir ve Ix_1 ve Iy_1, kolonun eğik eksen takımına göre atalet momentidir.



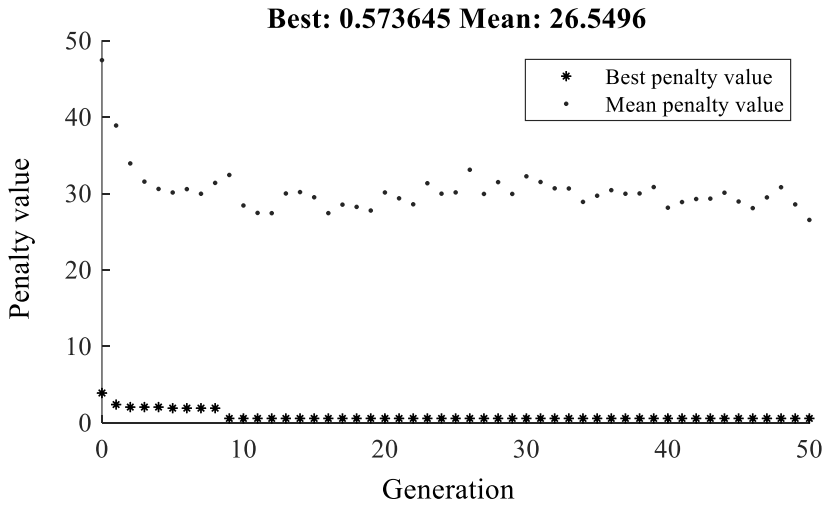
Şekil 9.11. Koordinat sistemi

Örnek 9.4

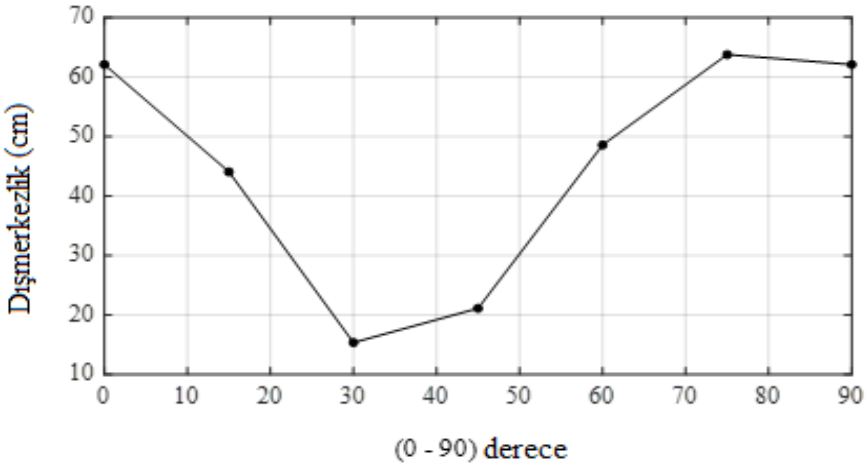
Bu örnekte 9.1 örneğin modeli seçilmiştir. Bu örneğe ait kat kalıp planı Şekil 9.10'da da gösterilmiştir. Şekil 9.10' da 0˚ dereceden başlayarak 15'ar derece artımla 90˚ dereceye kadar 7 farklı etkime açısına göre model döndürülmüştür. Klasik analizinden elde edilen sonuçlar Şekil 9.12' de görüldüğü gibi bina 75 derecede deprem yükü maruz kaldığında rijitlik merkezi ile kat kütle merkezi arasındaki mesafe en yüksek değere ve en düşük değere 30 derecede saptanmıştır. Kolonların boyutları sırasıyla x ve y eksenine karşılık gelen genişlik ve derinlik b_c ve h_c olarak gösterilmiştir.

Optimizasyon sonuçları aşağıda gösterilmektedir;

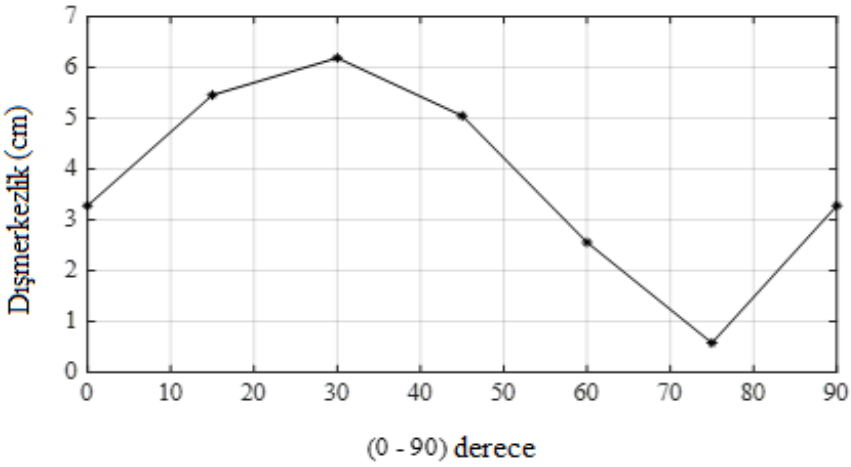
Şekil 9.12'te, 0˚ dereceden başlayarak 15'ar derece artımla 90 dereceye kadar 7 farklı deprem etkime açısına göre boyutlandırma optimizasyonu uygulamaları 50 jenerasyon içinde elde edildiğini gösteren genetik algoritma yakınsama grafiğini göstermektedir. İlk çözüm için ve optimizasyon problemi çözüldükten sonra maksimum dışmerkezlik değerleri ve deprem etkime açısı ile değişim değerleri sırasıyla Şekil 9.13, 9.14 ve Çizelge 9.6'da gösterilmektedir. Bina 75 derece deprem yükü maruz kaldığında elde edilen maksimum dışmerkezlik değeri Şekil 9.14'te görülmektedir. Çizelge 9.6'da ve Şekil 9.14'de, rijitlik merkezi ile kat kütle merkezi arasındaki mesafenin önemli ölçüde azaldığı görülebilir. Çizelge 9.5'te sunulan optimizasyon problemi çözüldükten sonra ve optimizasyondan önce kolonların x, y yönündeki boyutlarını gösterilmiştir ve sonuçları farklı olduğu aşikardır.



Şekil 9.12. Jenerasyon sayısı



Şekil 9.13. Optimizasyon önce farklı derecelerde dışmerkezliğin grafiği



Şekil 9.14. Optimizasyondan sonra farklı derecelerde dışmerkezliğin grafiği

Çizelge 9.5. İlk ve optimize edilmiş kolon kesit boyutları

Kolon sayısı	İlk çözüm		Optimum çözüm	
	Derinlik (b_c) (cm)	Genişlik (h_c) (cm)	Derinlik (b_c) (cm)	Genişlik (h_c) (cm)
C1	25	55	34	37
C2	55	25	36	36
C3	25	55	32	36
C4	55	25	35	37
C5	25	55	31	38
C6	55	25	35	39
C7	25	55	39	39
C8	55	25	31	36

Çizelge 9.5’i incelenirse optimum çözümde, değişik jenerasyonlarda kolonların kesitlerinin x ve y yönündeki değiştiği görülmektedir. Çizelge 9.6.' de, görüleceği gibi rijitlik merkezi ile kat kütle merkezi arasındaki mesafe, açı 0’dan 90 dereceye kadar artarken dışmerkezliğin azaldığı saptanmıştır.

Çizelge 9.6. İlk ve optimize edilmiş dışmerkezlik değerleri

Dönme derecesi	İlk çözüm Dışmerkezlik	Optimum çözüm Dışmerkezlik	Azaltılmış Dışmerkezlik
(θ)	(cm)	(cm)	(%)
0˚	62,09	3,27	94,73
15˚	44,06	5,45	87,63
30˚	15,36	6,18	59,74
45˚	21,1	5,04	76,11
60˚	48,58	2,55	94,75
75˚	63,75	0,57	99,11
90˚	62,09	3,27	94,73

Dışmerkezlik parametresi olarak analizlerden elde edilen kolon güçlü ve zayıf yönü atalet momentleri ve binanın değişik elemanlar arasındaki bağlantıları ile eğrilik dereceleri karşılaştırılarak dışmerkezlik açı değişikliğinin etkileri tespit edilmiştir. Bina deprem etkime açısına göre en elverişsiz tesirlerin oluştuğu dışmerkezlik değerinde değişkenlik göstermektedir.

9.5.3. Boyutlandırma optimizasyon ilgili genel sonuçlar ve öneriler

Bu araştırmanın bulgularına dayanarak, genetik algoritmanın, optimum dışmerkezlik elde etmek için kolonların ve perdelerin enkesit boyutlarındaki varyasyonları dikkate alan pratik tasarım problemlerini modellemeye uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Tasarım değişkenlerine ayrık değerler atandığında optimum amaç fonksiyon değerinin artması sağlanmıştır. Bu nedenle önerilen ilk prosedür, mümkünse sürekli tasarım değişkenlerini varsayarak problemi çözmektir. Daha sonra en yakın ayrık / tamsayı değerleri değişkenlere atanır ve tasarımın fizibilitesi kontrol edilir. Birkaç denemeyle sürekli optimuma yakın en iyi uygulanabilir tasarım elde edilebilir.

10. PLANDA DÜZENSİZ 3 BOYUTLU BETONARME BİNALARIN OPTİMUM GÖRELİ KAT ÖTELEME TASARIMI

Depremler, insan hayatını çeşitli şekillerde etkiledikleri için en ciddi sorunlardan, yıkıcı ve öngörülemeyen doğal tehlikelerden biridir. Planda düzensiz betonarme binaların sismik yükler altındaki performansı açısından optimum tasarımı, yapı mühendisliğinin temel konuları arasında yer almaktadır. Özellikle göreli kat öteleme performansının kontrolü bina tasarımındaki en zorlu görevlerden biridir. Yapının yatayda ve düşeyde düzenli olmaması, döşemelerde büyük boşluklar bulunması, çıkıntıların bulunması ve taşıyıcı sistemin düşey elemanların plandaki asal eksenlerinin dikkate alınan birbirine dik iki yatay deprem yönlerine paralel olmaması gibi durumlardan dolayı düzensiz yapılar meydana gelir ve burulma nedeniyle ek yükleme ile karşı karşıya kalırlar. Statik ve dinamik yükleme koşulları altında böyle bir yapısal sistemin tepkisi ve davranışı esas olarak kesit boyutuna ve kolonların ve perdelerin topolojik düzenine bağlıdır. Bu etkilerin üstesinden gelmek ve yapısal elemanları güçlendirmek için uygulanabilecek çeşitli çözümler bu tezde kısaca açıklanmıştır. Ancak, binaların deprem yükleri altındaki gerçek tepkisi, genel olarak, yapısal elemanların optimum tasarımını elde etmek için genetik bir algoritma uygulanarak etkilenebilir. Bu tür yapısal optimizasyon problemlerinin çözümü için evrimsel optimizasyon algoritmaları ve özellikle bir genetik algoritmaya dayalı özel olarak tasarlanmış bir algoritma uygulanmaktadır. Yapısal optimizasyon teknikleri, her kat düzeninde burulma düzensizliği sınırlandırmak için malzemeleri yapı boyunca verimli bir şekilde dağıtma problemini çözmelidir. Ayrıca yapısal optimizasyonun amacı yapının ilgili tasarım kodu hükümlerini yerine getirirken kiriş, kolon ve perde gibi en uygun kesitleri elde ederek yapının toplam maliyetini en aza indirecek şekilde tasarlamaktır.

Deprem yükü altındaki büyük ölçekli bina yapılarının hassas analizi için sonlu eleman yazılımları artık mevcut olsa da binaların çeşitli statik-dinamik ve elastik-elastik olmayan tepkilerini kontrol edebilen etkili bir tasarıma dayalı optimizasyon yöntemi hala eksiktir. Çalışmanın bu aşamasında statik ve dinamik yükler altında planda düzensiz binaların sismik göreli kat öteleme tasarım performansı için etkili bir optimizasyon tekniği sunmaktadır. Genetik Algoritma yöntemi (GA) kullanılarak 3B betonarme yapılarda kütle merkezi ile rijitlik merkezleri arasındaki oluşan dışmerkezliği minimuma getirilmesi ve burulma düzensizliği katsayısını azaltması veya eğer mümkünse, tümden yok etmesi amacıyla göreli kat ötelemeye optimum tasarımı gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla farklı ayrık

matematiksel yapı modellerin örnek olarak 3 boyutlu 8 ve 6 katlı binalar elde alınmıştır. Yapıların performansı, modern sismik yönetmelik dillerinde öngörülen prosedüre göre değerlendirilmiştir. Yapının analizinde, taşıyıcı sistem 3B olarak modellinde sonlu eleman modelleme (FEM) programı kullanılmıştır.

10.1. Göreli Kat Ötelemelerin

Göreli Kat Ötelemelerinin oranı, yatay yükler etkisinde her katın maksimum göreli yerdeğiştirmesinin (deplasmanının) aynı katın yüksekliğine bölünmesi ile değerlendirilen önemli bir parametredir. Depreme dayanıklı yapı tasarımında deplasmanların sınırlandırılması ve yeterli rijitliğe sahip olarak oluşacak deplasmanların verilen sınır değerlerden küçük olması mühim tasarım şartlarından biri haline gelmektedir.

Bir binanın göreli kat ötelemelerinin performansı, Kareler Toplamı (SRSS) ve Tam Karesel Kombinasyon (CQC) kuralları kullanılarak en yüksek modal yanıtın birleştirilmesiyle elde edilir ve 0,02'den aşmayacaktır. Literatürde [17-20] bu etkileri araştırmak için mevcut olan ve Tepki spektrum analiz (Response Spektrum Analiz -RSA) yöntemi ve Zaman Tanım Alanı (THA) analiz yöntemi önerilmiş olan çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

10.1.1. Göreli kat ötelemelerinin hesaplanması ve sınırlandırılması

Herhangi bir kolon veya perde için ardışık iki kat arasındaki yerdeğiştirme farkını ifade eden *azaltılmış göreli kat ötelemesi*, Δi, Denklem (10.1) ile elde edilecektir [31].

$$\Delta_i = d_i - d_{i-1} \tag{10.1}$$

Burada: d_i ve d_{i-1}, binanın i'inci ve $(i-1)$'inci katlarında herhangi bir kolon veya perdenin uçlarında hesaptan elde edilen yatay yerdeğiştirmeleri göstermektedir.

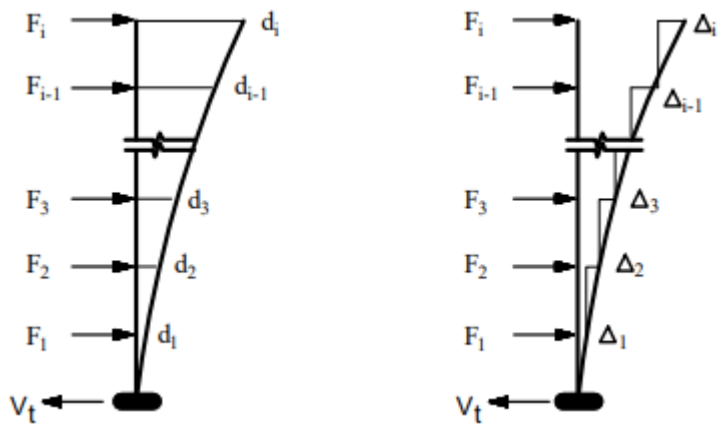
Her bir deprem doğrultusu için, binanın herhangi bir i'inci katındaki kolon veya perdeler için *etkin göreli ötelemesi* aşağıdaki denklem ile elde edilecektir.

$$\delta_i = R\,\Delta_i \tag{10.2}$$

Her bir deprem doğrultusu için, binanın herhangi bir i'nci katındaki kolon veya perdelerde, Denklem (10.2) ile hesaplanan δ_i etkin göreli kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri $\delta_{i\,mak}$, aşaıdaki denklemda verilen koşulların elverişsiz olanını sağlayacaktır:

$$\frac{(\delta_i)_{\text{mak}}}{h_i} \leq 0{,}02 \qquad (10.3)$$

Denklem 10.3.'de verilen koşulun binanın herhangi bir katında sağlanamaması durumunda, taşıyıcı sistemin rijitliği arttırılarak deprem hesabı tekrarlanacaktır. Ancak verilen koşul sağlansa bile, yapısal olmayan gevrek elemanların (cephe elemanları vb.) etkin göreli kat ötelemeleri altında kullanılabilirliği hesapla doğrulanmalıdır [31]. Katlar arası göre ötelemesi oranı hesaplaması için grafiksel temsili şekil 10.1'de gösterilmiştir.



Şekil 10.1. Katlar arası göre ötelemesi oranı hesaplaması için grafiksel temsili

10.2. Optimal Göreli Kat Ötelemeleri İçin Algoritma

Optimum göreli kat ötelemelerin tasarım performansını elde etmek için önerilen algoritma aşağıda açıklanmıştır:

- Başlangıç popülasyon: Başlangıçta belirli kriterlere göre rastgele tasarım değişkenlerden oluşan bir tasarım değişkenlerinin seti (popülasyon) oluşturulur. Popülasyon başlatılmadan önce her popülasyondaki tasarım değişkenlerinin sayısını seçilmesi gerekmektedir. Bu kararların GA tabanlı optimizasyonun başarısını artırmada son derece önemlidir.

- Değerlendirme: Herhangi bir tasarım değişikliğinin değerlendirilmesi, sistemin simülasyonunu gerektirir, süreç oldukça sıkıcı ve zaman alıcı olabilir. Aramada kullanılacak değerlendirme fonksiyonu önceden belirtilmelidir.
- Uygunluk ölçeklendirme seçeneği: Orantıya (Proportional) dayalı bir uygunluk atamasında bir tasarım değişkeninin ölçeklenmiş değerini işlenmemiş uygunluk sayısıyla orantılı hale getirir.
- Reprodüksiyon: Genetik algoritmada yeni bir jenerasyon önceki jenerasyondan reprodüksiyon yoluyla oluşturulur.
- Seçilim: En iyi tasarım değişkenleri elde etmek için turnuva seçim yöntemi seçilmiştir. Turnuva seçiminin avantajı, popülâsyondaki zayıf olan tasarım değişkenleri seçilmeyerek diğer jenerasyona aktarılmamasını sağlayacak kötü tasarım değişkenlerin popülâsyonun genetik yapısını etkilenmesine engel olmaktadır.
- Çaprazlama: Dağınık çaprazlama, kısıtlamaları lineer olmayan problemler için varsayılan çaprazlama fonksiyonu, rastgele bir ikili vektör oluşturur ve vektörün ilk ebeveynden 1 olduğu genleri ve vektörün ikinci ebeveynden 0 olduğu genleri seçer ve çocuğu oluşturmak için genleri birleştirir.
- Mutasyon Operatörü: Adaptif fizibil, kısıtlamalar olduğunda varsayılan mutasyon fonksiyonu, son başarılı veya başarısız nesil ile ilgili olarak rasgele uyarlanabilir yönler üretir. Mutasyon, sınırları ve doğrusal kısıtlamaları karşılayan bir yön seçer ve uzunluğu adım adım atar.
- Elit sayım: Mevcut jenerasyonda en iyi fitness değerlerine sahip tasarım değişkenlerin gelecek jenerasyonda hayatta kalmaları garanti edilmektedir. Elit sayımın varsayılan değeri yuvarlanmış popülasyon boyutunun %5'idir.
- Optimizasyon kriterleri: Algoritmanın durdurma kriterleri, jenerasyon sayısını, hesaplama zaman limitini ve fonksiyon toleransını içerir. Algoritma, bu koşullardan herhangi biri karşılanır karşılanmaz durur.
- Sonlandırma kriteri: Maksimum yineleme sayısı, sonlandırma kriteridir. Ayrıca her örneğe bağlı sonlandırma kriteri için farklı sabit sayıda yineleme dikkate alınmıştır.
- Bir Problem İçin Birden Fazla Çalıştırma: dokuzuncu bölümde bahsedildiği gibi genetik algoritmalar, rastgele sayı jenerasyonuna dayanarak birçok yerde karar aldığı görülmektedir. Dolayısıyla aynı problem farklı zamanlarda çalıştırıldığında farklı nihai tasarımlar verebilir.

10.3. Optimal Göreli Kat Öteleme Tasarım Problemi

10.3.1. Amaç fonksyonu

Betonarme yapılarda Göreli Kat Ötelemeye yapılan optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu denklemi 10.4.'de verilmiştir:

$$Amaç\,(\text{minimize})\;\; \text{drift} = (\text{Drift(X)}^2 + \text{Drift(Y)}^2)^{0.5} \qquad (10.4)$$

Sınırlayıcılar $\quad g_j(x) \leq 0, \quad j = 1,2,\dots,m(\text{davranış})$

$x^{iL} \leq x \leq x^{iU} \qquad i = 1, 2, \dots, n$

Burada: Drift(X) ve Drift(Y), sırasıyla x ve y deprem doğrultusu için göreli kat ötelemesi; g(x), eşitsizlik ve sınırlayıcılar; n, uzunluğunda bir vektör döndürür; g, sismik ve betonarme yapı tasarım kodlarının uyguladığı davranışsal kısıtlamalardır. x^{iL} ve x^{iu}, tasarım kodu tarafından belirlenen boyutlandırma tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını oluşturur.

10.3.2. Tasarım değişkenleri

Daha önce bölüm 9'da belirtildiği gibi bu bölümde benzer şekilde değişkenlerin sayısı, kolonlar ve perdeler dahil olmak üzere üye sayısına eşittir. Uygulamada, perde uzunluklar sabit ve sadece kalınlıklar tasarım değişkenidir.

10.3.3. Tasarım kısıtlamaları

Bu bölümdeki tasarım kısıtlamaları 9'üncü bölümün tasarım kısıtlamaları gibi belirtilmiştir. TS 500-2000 ve TDY 2007'den yararlanılarak düzenlenen tasarım problemindeki g(x) kısıtlamaları ve bu kısıtlamaların normalleştirilmiş formları aşağıda açıklanacaktır.

<u>Kapasite kısıtlaması</u>

Kolonun enkesit alanı, N_d düşey yükler ve deprem yüklerinin ortak etkisi altında hesaplanan eksenel basınç kuvvetlerinin en büyük olmak üzere aşağıdaki koşulunu sağlayacaktır.

$$A_{ci} \geq \sum \frac{N_{dmax}}{0.5 \text{ x } F_{ck}} \qquad \text{(TDY 2007)} \qquad i = 1,2, \dots, nm \qquad (10.5)$$

Burada: N_d tasarım eksenel kuvveti, A_c kolonlarda tüm kesit beton alanı, F_{ck} beton karakteristik basınç dayanımı.

10.3.4. Kolon kısıtlamaları

Geometrik kısıtlama

Mevcut formülasyon için, kolonlar kare veya dikdörtgen olabilir. Kolonların en küçük boyutu (25x30)cm^2'den ve enkesit alanı 750cm^2 den daha az olmayacaktır. Kolon genişliği (b_c) ve derinliği (h_c) için verilen minimum boyut sınır değerinden az olmamalıdır. Denklem (10.6) ve (10.7) kolon boyutlarının aşağıdakilerle sınırlandırıldığını göstermektedir:

$$\frac{b_{min,i}}{b_i} - 1 \leq 0, \qquad i = 1,2, \dots., n_{kolon} \qquad (10.6)$$

$$\frac{h_{min,i}}{h_i} - 1 \leq 0, \qquad i = 1,2, \dots., n_{kolon} \qquad (10.7)$$

Burada: i, kolon sayısını ve n toplam kolon sayısını gösteren bir dizindir. Minimum genişlik b_{min} ve yükseklik h_{min}, mimari gereksinimlerine göre her problem için ayrı ayrı tanımlanmalıdır.

Uyumluluk Kısıtlaması

Belirli bir kattaki kolonların genişliği (b_c), kiriş donatı çubuklarının kolonlar boyunca devam etmesini sağlamak için karşılık gelen kiriş genişliğinden (b_w) daha az olmamasını sağlamak için uyumluluk kısıtlaması getirilmiştir. Normalleştirilmiş formda, bu kısıtlama şöyle yazılabilir:

$$1 - \frac{b_c}{b_w} \leq 0 \qquad (10.8)$$

Bir taşıyıcı sistemde en önemli yer kolon ve kirişlerin birleştiği düğüm noktasıdır. Çünkü deprem kuvvetleri kütlelerin topaklandığı birleşim bölgelerinde oluşur. Dolayısıyla kolon kiriş birleşim bölgesinin dayanımı önemlidir.

10.4. Üç Boyutlu Yapılar İçin Hazırlanan Bilgisayar Programı

Bu araştırmanın sonucu, betonarme bina yapılarının performansa dayalı sismik tasarımına doğrudan uygulanabilen gelişmiş bir bilgisayar tabanlı optimal tasarım tekniği olacaktır. Yapısal modelin analizi ve tasarımı daha gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilmesi için sonlu eleman modelleme (FEM) programı ve optimize edici bir çözüm olarak MATLAB® (R2018b Student Version) programlaması kullanılmıştır. Optimum çözümde aşağıdaki uygulamalar yerine getirilmiştir:

1. Üç boyutlu betonarme yapıların statik ve dinamik analizlerinin yapılabilmesi ve düzensizlik durumlarının incelenmesi amacıyla çok katlı çerçeve ve perde-çerçeve yapı sistemlerine yönelik olmak üzere ETABS® ver 17. [60] yapı analiz bilgisayar programı kullanılmıştır. Sayısal çalışmada deprem etkisi altında meydana gelen düzensizlikler incelenmiş ve buna bağlı olarak burulma düzensizliği katsayısına bir üst sınır getirilmesi amacıyla göreli kat ötelemeye optimum performans tasarımı hedeflenmiştir.
2. Betonarme yapların genetik algoritma yöntemi ile boyutlandırma optimizasyonunun yapılabilmesi için MATLAB® bilgisayar programı hazırlanmıştır. Gerekli kodları doğru şekilde dahil edildiğine programı çalıştırmak mümkündür.
3. Burulma dengeli yapılar üretebilmek için MATLAB® programı ve ETABS® programı birbirine bağlanarak Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface - API) aracılığıyla optimum boyutladırma genetik algoritma uygulamaları ile gerçekleştirilmiştir.
4. Geliştirilen bilgisayar tasarım optimizasyon modeli birkaç kez kullanılarak doğrulanmıştır.

Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface-API) aracılığıyla yapılan boyutlandırma optimizasyonu için kullanılan ve ASUS i5-8250U CPU, 1.80 GHz, RAM 8 GB, 64 bit SSD, Windows 10 standart özelliklerine sahip bilgisayar, her bir örnek için her bir jenerasyonu yaklaşık 1,5 saat içinde tamamlamıştır.

10.5. Sayısal Örnekler

Bu bölümdeki örneklerde; 3 boyutlu 8 katlı ve 6 katlı çerçeve ve perde çerçeve taşıyıcı sistem olmak üzere 2 farklı yapı sistemi tasarlanmıştır. Taşıyıcı sistem elemanlarının ön boyutlandırılmasında yürürlükte bulunan TS-500 ve standartları ile yürürlükte bulunan Deprem Yönetmeliği 2007 kullanılmıştır. Binaların analizi sırasında ETABS® ver 17. [60] paket programına statik ve dinamik yüklerin etkisi için 65 adet farklı yük kombinasyonu kullanılmıştır. Bu yük kombinasyonlarından seçilen belirli yüklemeler etkisindeki burulma düzensizliği durumu incelenmiş ve sonuçlar çıkarılmıştır. Rijit diyafram tanımı yapılmadan eigen vektörleriyle hesap yapılmış, elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Ele alınan modellerde kat döşemeleri esnek diyafram ve rijit diyafram olarak ayrı ayrı incelenmiş ve sonuçlar kıyaslamıştır. Her iki yöntemden elde edilen sonuçlar büyük bir fark gösterdiğinden esnek diyafram kabulü yapılması kararı alınmıştır. Kolaylık sağlamak için her yönden ankastre mesnet kullanılmıştır. Her bir binanın düşey taşıyıcı sistem kesitleri, bina yüksekliği boyunca sabit kabul edilmiştir. Döşeme yüklerini ölü yük (G) ve %30 hareketli yük (Q) oluşturmaktadır. Mod birleştirme metodundan elde edilen tüm iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeler, TDY-2007 “2.8.5. Hesaplanan Büyüklüklere ilişkin Alt sınır Değerleri” [31] maddesi koşuluna uygun olarak büyütülmüştür.

GA Parametrelerinin Seçimi: Gerçek sayılı kısıtlamalarla lineer olmayan bir fonksiyonu en aza indirmek amacıyla GA kullanılmıştır. GA popülasyonu ‘200’ ve 200 nesil evrime izin verir. Veri tipleri ‘ikili vektör’, elit sayımın varsayılan değeri yuvarlanmış popülasyon boyutunun %5'i ve göç yönü ‘ileri’ seçilmiştir. Değişkenlerin sayısı, perdelerin kalınlığı ve kolonlar dahil olmak üzere üye sayısına eşittir. Program başlatıldığında seçilen tasarım değişken değerleri daha önce hazırlanmış olan sistemde bulunan kolon kesit boyutlarını atanmakta, sistemde çözülerek göreli kat öteleme hesabı yapılmakta, buna bağlı olarak amaç fonksiyonu hesaplanmaktadır. Çerçeveler üç kez çözüldü ve her set için elde edilen optimum çözümler arasında en iyisi optimum tasarım olarak alınmıştır. Hiçbir ihlal tespit edilmediği sürece f(x) amaç fonksiyonuna hiçbir ceza (penalty) uygulanmamıştır. Başlangıç verileri girildikten sonra Genetik Algoritma farklı jenerasyondan oluşacak olan evrim sürecine başlamaktadır. Popülasyon içerisindeki değişkenler başarı sırasına göre sıralanmakta ve popülasyondaki başarı düzeyini artırmak için başarılı olan değişkenler başarısız olan değişkenlerin yerine kopya edilmektedir. Popülasyondaki değişkenlerin başarısı her bir jenerasyonda artmaktadır. Evrim önceden belirlenmiş olan jenerasyon sayısı

tamamlanıncaya kadar devam edecektir. Jenerasyondaki değişkenlerin en az %90-95 oranında benzer olması durumunda dönüş işlemlerine son verilebilir. Bu değişkenlerin benzerliği en uygun çözümü göstermektedir.

Çizelge 10.1. Bütün binalara ait ortak yapısal bilgiler

Seçilen binaların bazı yapısal ve analiz özellikleri.	
Kat yüksekliği: 3,0 m	Deprem bölgesi: 1. derece
Döşeme kalınlığı: 15 cm	Zemin sınıfı: Z2
Beton sınıfı: C25;	Spektrum karakteristik periyotları: T,
Betonarme betonu, yoğunluk: 2500 kg/m^3	T_A = 0,15; TB = 0,4
Beton elastisite modülü: E_c = 30000 MPa	Etkin yer ivme katsayısı: A_0 = 0,4
Çelik sınıfı: S420	Bina önem katsayısı: I = 1
Çelik elastisite modülü: E_s = 200000MPa	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı: R
Akma dayanımı f_{yk} = 420 MPa	Çerçeve model'de R=8
Çekme dayanımı f_{su} = 500MPa	Perde-Çerçeve model'de R = 7
Hareketli yük değeri: q = 2,0 kN/m^2	Sönüm oranı = 5%
Duvarlar: Tam tuğla birim ağırlığı	Süneklik düzeyi: yüksek
(Sıva dahil): 4,2 kN/m^2	Hareketli yük katılım katsayısı: n = 0,3

Çizelge 10.2. Problemlerini çözmek için seçilen GA parametre seti

Genetik Algoritma parametre seti	
Popülasyon Tipi	İkili vektör
Göç Yönü	İleri
Popülasyon Büyüklüğü	200
Uygunluk Ölçekleme Fonksiyonu	Sıralama
Seçilim Fonksiyonu	Turnuva
Elit Sayısı	10
Çaprazlama Fonksiyonu	0,8
Çaprazlama Fonksiyonu	Dağınık çaprazlama
Mutasyon Fonksiyonu	Adaptif Fizibil
Fonksiyon Toleransı	1e-6
Hibrit Fonksiyonu	Yok

Analiz neticesinde sonuçlar kıyaslanarak incelenmiş ve çizelgelerde sunulmuştur. Analiz neticesinde sonuçlar kıyaslanarak incelenmiş ve çizelgelerde sunulmuştur. Tüm bina modellerine ait yapısal bilgiler ve karakteristikler Çizelge 10.1'de verilmiştir. Çizelge 10.2'de Problemlerini çözmek için seçilen Genetik Algoritma parametre setini verilmiştir.

Çalışma TDY-2007 yönetmeliğine göre yapılmıştır ancak belirtilen yönetmelik TBDY-2018'den [32] sonra yayından kaldırılmıştır. Bu durumda, sunulan çalışmanın TBDY-2018'den önce yapıldığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Bir Genetik Algoritma uygulaması olduğundan eski veya yeni yönetmeliğin kullanılması önemsizdir. Ancak çalışma içerisinde eski yönetmeliğin kullanıldığı belirtilmelidir.

10.5.1. Tasarımda kullanılan yük kombinasyonları

Türk yönetmeliklerine göre tasarımda ETABS® programı kullanırken aşağıdaki 65 Adet yük kombinasyonları kullanılmıştır [31];

1,4G +1,6Q

$G + Q \pm E_{xp} \mp 0{,}30E_{yp}$ 4 Adet Yük birleşimi

$G + Q \pm E_{xp} \mp 0{,}30E_{yn}$ 4 Adet Yük birleşimi

$G + Q \pm E_{xn} \mp 0{,}30E_{yp}$ 4 Adet Yük birleşimi

$G + Q \pm E_{xn} \mp 0{,}30E_{yn}$ 4 Adet Yük birleşimi

$0{,}9G \pm E_{xp} \mp 0{,}30E_{yp}$ 4 Adet Yük birleşimi

$0{,}9G \pm E_{xp} \mp 0{,}30E_{yn}$ 4 Adet Yük birleşimi

$0{,}9G \pm E_{xn} \mp 0{,}30E_{yp}$ 4 Adet Yük birleşimi

$0{,}9G \pm E_{xn} \mp 0{,}30E_{yn}$ 4 Adet Yük birleşimi

$G + Q \pm RS_{xp} \mp 0{,}30RS_{yp}$ 4 Adet Yük birleşimi

$G + Q \pm RS_{xp} \mp 0{,}30RS_{yn}$ 4 Adet Yük birleşimi

$G + Q \pm RS_{xn} \mp 0{,}30RS_{yp}$ 4 Adet Yük birleşimi

$G + Q \mp RS_{xn} \mp 0{,}30RS_{yn}$ 4 Adet Yük birleşimi

$0{,}9G \pm RS_{xp} \mp 0{,}30RS_{yp}$ 4 Adet Yük birleşimi

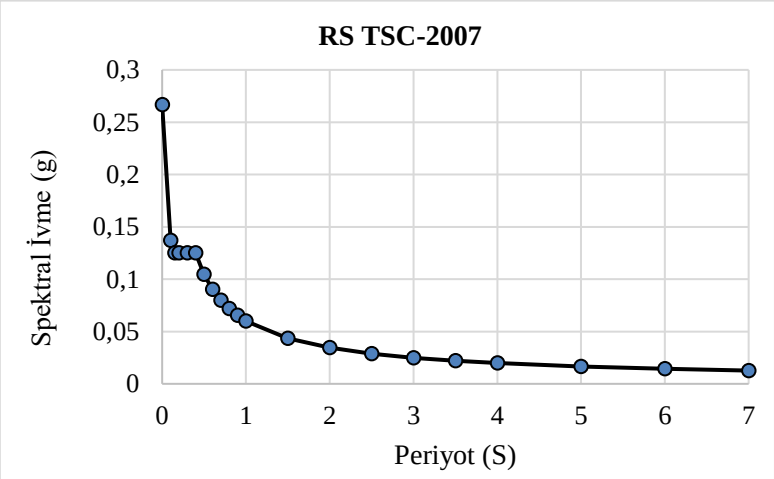
$0{,}9G \pm RS_{xp} \mp 0{,}30RS_{yn}$ 4 Adet Yük birleşimi

$0{,}9G \pm RS_{xn} \mp 0{,}30RS_{yp}$ 4 Adet Yük birleşimi

$0{,}9G \pm RS_{xn} \mp 0{,}30RS_{yn}$ 4 Adet Yük birleşimi

Yukarıda; G ölü yükü, Q hareketli yükü, E_{xp} X doğrultusunda +5%, E_{xn} X doğrultusunda -5%, E_{yp} Y doğrultusunda +5%, E_{yn} Y doğrultusunda -5% ek dışmerkezliğin hesaba katıldığı deprem etkisini sırasıyla göstermektedir. Aynı şekilde RS_{xp} X doğrultusunda +5%, RS_{xn} X doğrultusunda -5%, RS_{yp} Y doğrultusunda +5%, RS_{yn} Y doğrultusunda -5% ek dışmerkezliğin hesaba katıldığı deprem etkisini sırasıyla göstermektedir. İç kuvvet değerleri bulunurken, E_{xp}, E_{xn}, E_{yp}, E_{yn} yüklemeleri Eşdeğer Deprem Yükü (EDY) için, RS_{xp}, RS_{xn}, RS_{yp}, RS_{yn} yüklemeleri Mod Birleştirme Yükü (MBY) için temel alınmıştır.

Tepki Spektrum Fonksiyonu - TDY-2007							
Periyot	İvme	Sönümleme	Deprem bölgesi	Ao	I	Yerel Zemin sınıfı	R
sec		%5	1	0,4	1	Z2	8
0	0,267						
0,1	0,137						
0,2	0,125						
0,3	0,125						
0,4	0,125						
0,5	0,105						
0,6	0,091						
0.7	0,080						
0,8	0,072						
0,9	0,065						
1	0,060						
2	0,034						
3	0,025						
4	0,020						
5	0,017						
6	0,014						
7	0,013						



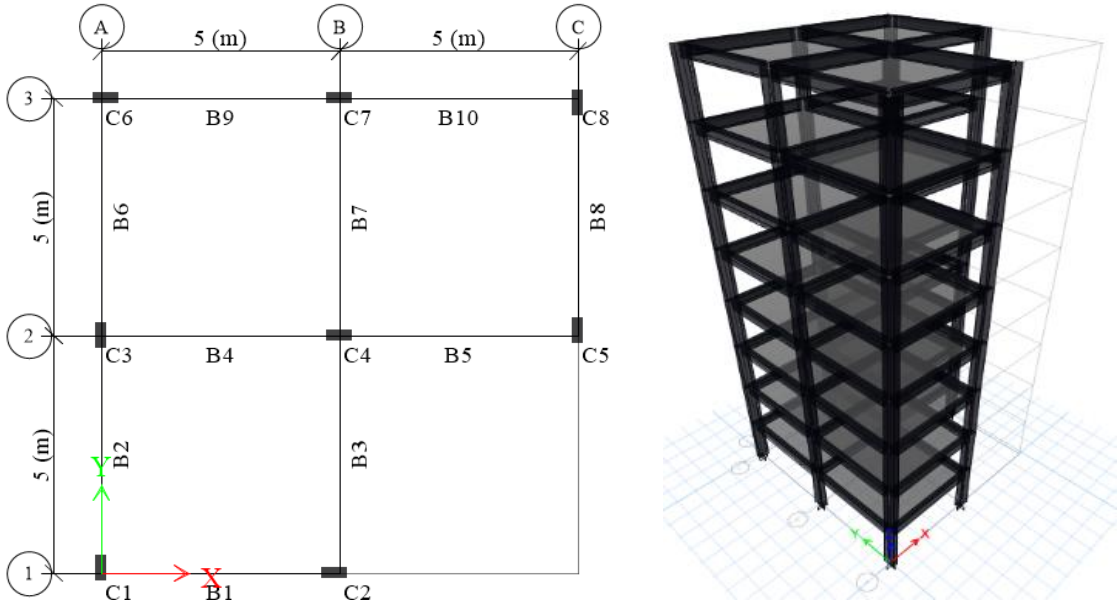
Şekil 10.2. Analizlerde kullanılan Dizayn Tepki Spektrumu

10.5.2. Planda L tipi düzensizliklere sahip 3B betonarme binaların göreli kat öteleme performansının otomatik minimizasyonu

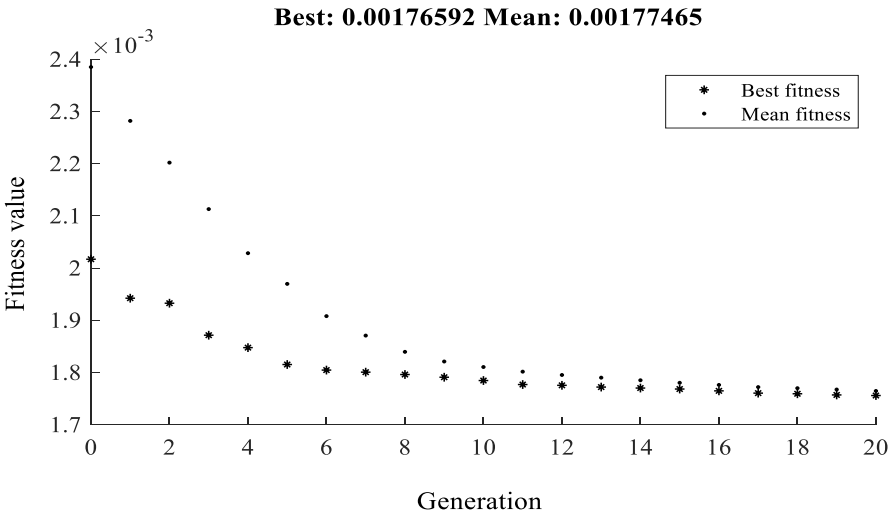
Örnek 10.1

İlk model olarak çerçeve yapılara dayanan 8 katlı üç boyutlu model geliştirilmiştir. Kolonların plan düzeni tüm katlarda aynı olduğu için yalnızca bir kat grubu vardır ve

elemanlar 8 kolon grubuna ayrılmıştır. Her popülasyonda toplam 16 değişken vardır. Sonuç olarak kolonlar için problemde 128 tasarım değişkeni bulunmaktadır. Şekil 10.3'deki C1, C3, C5, C6, C8 olarak işaretlenen kolonların boyutları 25×55cm, C2, C4, C7 olarak işaretlenmiş kalan kolonların boyutları 55×25cm. Kolonlar için genişlik-yükseklik ve alt-üst sınırları sırasıyla 35cm ve 55cm olarak ayarlanmıştır. Tüm kirişler 25/50cm seçilmiştir. Bu örnekte çevre kirişlerin üzerine dolgu duvarların katkısı ihmal edilmiştir. Ele alınan modelde kat döşemeleri rijit diyafram kabulü yapılması kararı alınmıştır. Bu örneğe ait tipik kat planı ve çerçeve modelinin 3 boyutlu görüntüsü şekil 10.3'de gösterilmiştir.



Şekil 10.3. Tipik kat planı ve çerçeve modelinin 3 boyutlu görüntüsü



Şekil 10.4. Jenerasyon sayısı

Optimizasyon sonuçları aşağıda gösterilmiştir; Şekil 10.4'te optimum tasarım sürecinde ve 30 jenerasyon içinde optimum tasarımın elde edildiğini gösteren genetik algoritma yakınsama grafiğini göstermektedir. İşlem, uygulamada sonlandırma kriteri olarak tanımlanan 20 iterasyondan sonra ve yaklaşık 20 saatlik bir CPU süresi 4000 fonksiyon değerlendirme sayısı ile yapılmıştır. Boyutlandırma optimizasyon sonuçları Çizelge (10.3-10.5)'de gösterilmektedir. Çizelge 10.3'de görüldüğü gibi optimize edilmiş bina kolonların boyutları ve yönlerinin, ilk çözümüne göre belirgin farklar verdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 10.3. İlk ve optimum kolon boyutlarının karşılaştırılması

Kolon Sayısı	İlk çözüm		Optimum çözüm	
	Derinlik (b_c) (cm)	Genişlik (h_c) (cm)	Derinlik (b_c) (cm)	Genişlik (h_c) (cm)
C1	25,0	55,0	41,91	48,20
C2	55,0	25,0	39,39	43,74
C3	25,0	55,0	49,09	38,35
C4	55,0	25,0	51,54	50,16
C5	25,0	55,0	51,80	40,09
C6	55,0	25,0	51,23	41,26
C7	25.0	55,0	38,89	46,64
C8	55,0	25,0	39,26	48,25

Çizelge 10.4. İlk ve optimal dışmerkezlik

Kat sayısı	İlk çözüm	Optimum çözüm	Azaltılmış
	Dışmerkezlik (cm)	Dışmerkezlik (cm)	Dışmerkezlik %
8	42,70	4,51	89,4
7	40,97	4,68	88,6
6	38,45	4,64	87,9
5	36,44	5,52	84,8
4	34,96	7,12	79,6
3	34,33	9,52	72,2
2	36,02	13,58	62,3
1	46,26	20,83	55,0

Kolonların boyutları sırasıyla x ve y eksenine karşılık gelen genişlik ve derinlik olarak gösterilmiştir. Çizelge 10.4 ve 10.5'te Genetik algoritma ile elde edilen optimum çözümlerde kütle merkezi (CM) ile rijitlik merkezi (CR) arasındaki dışmerkezlik ve her kat için kritik yükleme durumundaki maksimum burulma düzensizliği katsayısını göstermektedir. Çizelge 10.4'de 'Optimum Çözümü' ile 'İlk Çözüm' kıyaslandığında 'Optimum Çözümü' sonucunun, dışmerkezlik değerini daha küçük verdiği gözlemlenmiştir. Çizelge 10.4 incelenirse üst katlarda bu değerin %90'a yakın azaldığı görülmektedir. Çizelge 10.5 incelenirse optimum çözümün burulma düzensizliği katsayısı değerlerini daha küçük verdiği aşikardır.

Çizelge 10.5. İlk ve optimal burulma düzensizliği oranı (η_{bi})

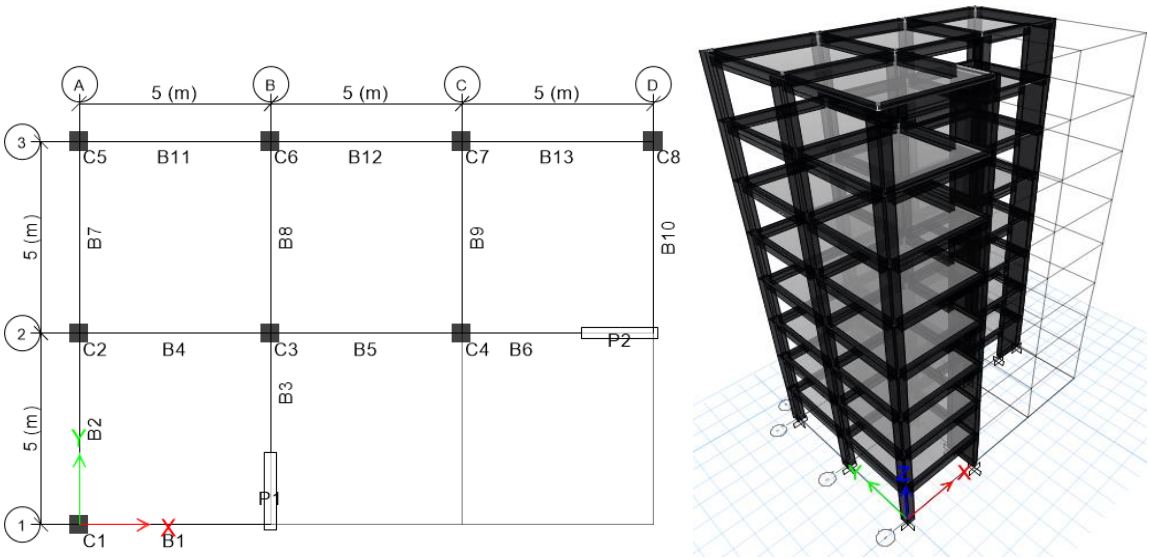
Kat Sayısı	İlk çözüm		Optimum çözüm	
	Burulma düzensizliği (η_{bi})		Burulma düzensizliği (η_{bi})	
	X - yönü	Y - yönü	X - yönü	Y - yönü
8	1,15	1,09	1,05	1,04
7	1,14	1,06	1,05	1,04
6	1,14	1,05	1,05	1,03
5	1,13	1,05	1,05	1,03
4	1,13	1,05	1,05	1,03
3	1,13	1,05	1,05	1,04
2	1,13	1,04	1,04	1,04
1	1,12	1,03	1,04	1,05

Örnek 10.2

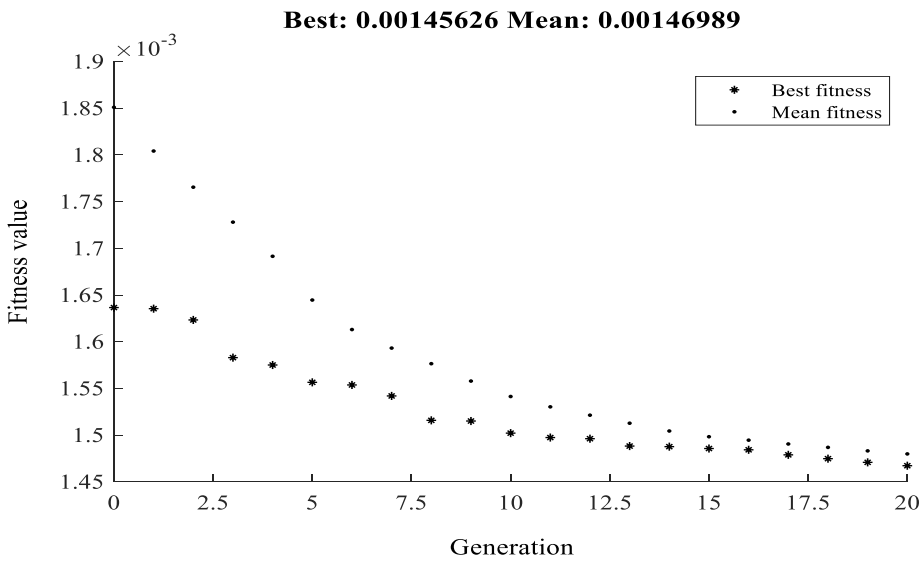
İkinci model olarak çerçeve ve perde-çerçeve yapılara dayanan 8 katlı üç boyutlu model geliştirilmiştir. Kolonlar ve perdeler plan düzeni tüm katlarda aynı olduğu için yalnızca bir kat grubu vardır ve elemanlar 8 kolon ve 2 perde grubuna ayrılmıştır. Her popülasyonda toplam 18 tasarım değişkeni vardır. Sonuç olarak problemde kolonlar için 128 ve perde-duvarlar için 16 tasarım değişkeni olmak üzere toplam 144 tasarım değişkeni bulunmaktadır. İlk önce kolonların ön boyutlandırması 50x50cm ve kirişler 30/50cm hesaplanmıştır. Kolonlar için genişlik-yükseklik ve alt-üst sınırları sırasıyla 30cm ve 60cm olarak ayarlanmıştır. Perde uzunlukları 200cm sabittir ve yalnızca kalınlıkları tasarım değişkeni olup alt-üst sınırları sırasıyla 20cm ve 30cm olarak ayarlanmıştır. Deprem yüklerinin tamamı

çerçeve ve perde-çerçevelerle taşındığı binalara bağlı olarak taşıyıcı sistem davranış katsayısı R = 7'dir. Modelde kirişlerin üzerine dolgu duvarların katkısı dikkate alınmıştır. Kat döşemeleri rijit diyafram kabulü yapılması kararı alınmıştır. Bu örneğe ait tipik kat planı ve modelinin 3B görüntüsü şekil 10.5.'de gösterilmiştir.

Optimizasyon sonuçları aşağıda gösterilmiştir; Şekil 10.6, optimum tasarımın 20 jenerasyon içinde elde edildiğini gösteren genetik algoritma yakınsama grafiğini göstermektedir. Şekil 10.6'e görüleceği gibi veriler girildikten sonra Genetik Algoritma 20 jenerasyondan oluşacak olan evrim sürecini tamamlamaktadır.



Şekil 10.5. Tipik kat planı ve çerçeve modelinin 3 boyutlu görüntüsü



Şekil 10.6. Jenerasyon sayısı

Ayrıca 20 iterasyondan sonra ve yaklaşık 25 saatlik bir CPU süresi 4000 fonksiyon değerlendirme sayısı ile optimum çözüm elde edilmiştir. Çizelge 10.6'da optimize edilmiş bina perde-duvarların ve kolonlarının boyutları ve yönleri optimizasyon öncesi çözümünden farklı olduğu ve büyük bir değişim meydana geldiği gösterilmiştir. Ayrıca bu çizelgede kolonların boyutları sırasıyla x ve y eksenine karşılık gelen genişlik ve derinlik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 10.6. İlk ve optimum kolon boyutlarının karşılaştırılması

Kolon sayısı	İlk çözüm		Optimum çözüm	
	Derinlik (b_c)	Genişlik (h_c)	Derinlik (b_c)	Genişlik (h_c)
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
C1	50,0	50,0	54,90	35,19
P1	30,0	200,0	23,99	200,0
C2	50,0	50,0	56,06	33,98
C3	50,0	50,0	41,27	58,80
C4	50,0	50,0	35,44	59,46
P2	200,0	30,0	200,0	24,86
C5	50,0	50,0	59,44	31,99
C6	50,0	50,0	59,24	35,77
C7	50,0	50,0	34,28	60,00
C8	50,0	50,0	33,69	59,92

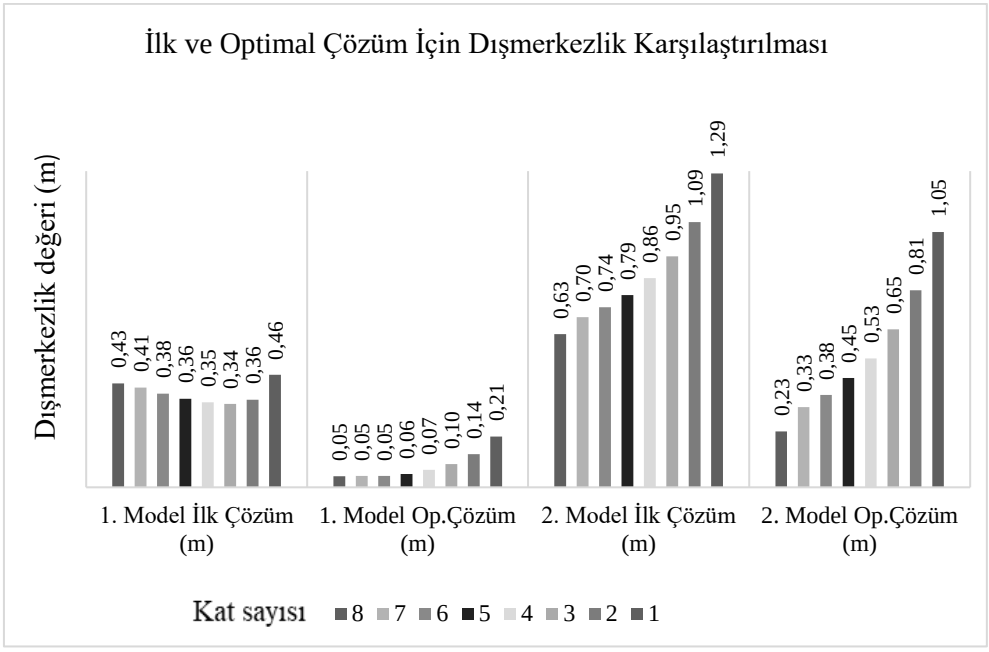
Çizelge 10.7. İlk ve optimal dışmerkezlik karşılaştırılması

Kat sayısı	İlk çözüm	Optimum çözüm	Azaltılmış
	Dışmerkezlik	Dışmerkezlik	Dışmerkezlik
	(cm)	(cm)	%
8	63,2	23,4	63,01
7	70,4	33,1	52,96
6	74,3	38,9	47,59
5	79,1	45,5	42,48
4	85,6	53,9	37,00
3	95,2	65,5	31,19
2	108,9	81,8	24,90
1	128,7	105,9	17,70

Çizelge 10.7 ve 10.8'de 'Optimum Çözümü' ile 'İlk Çözümü' kıyaslandığında 'Optimum Çözümü' sonucunun, dışmerkezlik ve burulma düzensizliği oranını daha küçük verdiği gözlemlenmiştir. Deprem yüklemesi x yönü için 2'inci yapıda katlar arası A1 burulma düzensizliği oranının'da değişiklik gözlenmemiştir. Deprem yüklemesi y yönü için A1 burulma değerleri daha büyüktür. Ayrıca boyutlandırma optimizasyon neticesinde bu binada burulma düzensizliği değeri 1,33'ten 1,12'e ; 1,23'ten 1,09'e düştüğü açıkça görülmektedir.

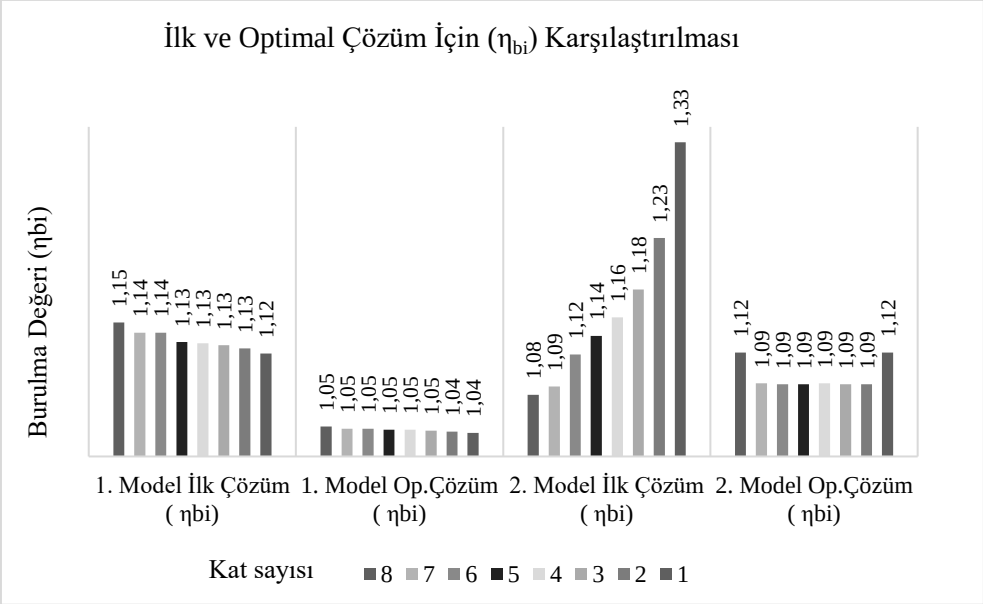
Çizelge 10.8. İlk ve optimal burulma düzensizliği oranının (η_{bi}) karşılaştırılması

Kat Sayısı	İlk çözüm		Optimum çözüm	
	Burulma düzensizliği (η_{bi})		Burulma düzensizliği (η_{bi})	
	X - yönü	Y - yönü	X - yönü	Y - yönü
8	1,13	1,08	1,14	1,12
7	1,11	1,09	1,12	1,09
6	1,10	1,12	1,11	1,09
5	1,09	1,14	1,10	1,09
4	1,09	1,16	1,10	1,09
3	1,08	1,18	1,09	1,09
2	1,07	1,23	1,08	1,09
1	1,07	1,33	1,08	1,12



Şekil 10.7. İlk ve optimal dışmerkezliğin karşılaştırılması

Şekil 10.7 ve 10.8'de akış diyagrama görüldüğü gibi planda L şekline düzensiz çerçeve ve perde-çerçeveye dayanan yapı sistemlerde göreli kat ötelemeye optimum tasarım neticesinde sonuçlar kıyaslanarak incelenmiştir. Bu durumda katlarda etkin burulma düzensizliği katsayısında ve dışmerkezliğinde büyük bir düşüş meydana gelebildiği gözlenmektedir.



Şekil 10.8. İlk ve optimal burulma düzensizliği oranının karşılaştırılması

Planda düzensiz binalarda burulma düzensizliği açısından yapısal rijitlik dağılımının geometrik asimetriden daha etkili olduğunu göstermektedir. Çerçeve yapılara ve perde-çerçeve yapılara dayanan betonarme yapılar kıyaslandığında perde-çerçeve yapılara dayanan betonarme yapılar, kütle merkezi (CM) ile rijitlik merkezi (CR) arasında çok büyük bir dış merkezlilikten ve burulma düzensizliği katsayısından geçmektedir.

10.5.3. Planda A2 tipi düzensizliklere sahip 3B betonarme binaların göreli kat öteleme performansının otomatik minimizasyonu

Çalışmanın bu aşamasında optimizasyon problemlerinde daha büyük yapı modellerin oluşturulması ve test edilmesi için girişimler yapılmıştır. Genetik Algoritma yöntemi ile boyutlandırma optimizasyon neticesinde elde edilen binaların deprem yüklerin altındaki davranışı tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla Döşemede Süreksizlik Düzensizliği (A2) olan 3 boyutlu betonarme binaların göreli kat ötelemeye optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir. TDY-2007'de, kat brüt alanının 1/3'ünden büyük döşeme boşluklarından kaçınılması öngörülmüştür. A2 Döşemede Süreksizlik Düzensizliğini

incelemek için 2 adet model ele alınmıştır. İncelenen yapı sistemlerin 6 katlı olmak üzere çerçeve taşıyıcı sistemden ve perde-çerçeve taşıyıcı sistemden oluşmaktadır.

Brüt kat alanı, A = 17x14 = 238m^2
Kattaki boşluk alanı, Ab= 10x8 = 80m^2'dir.

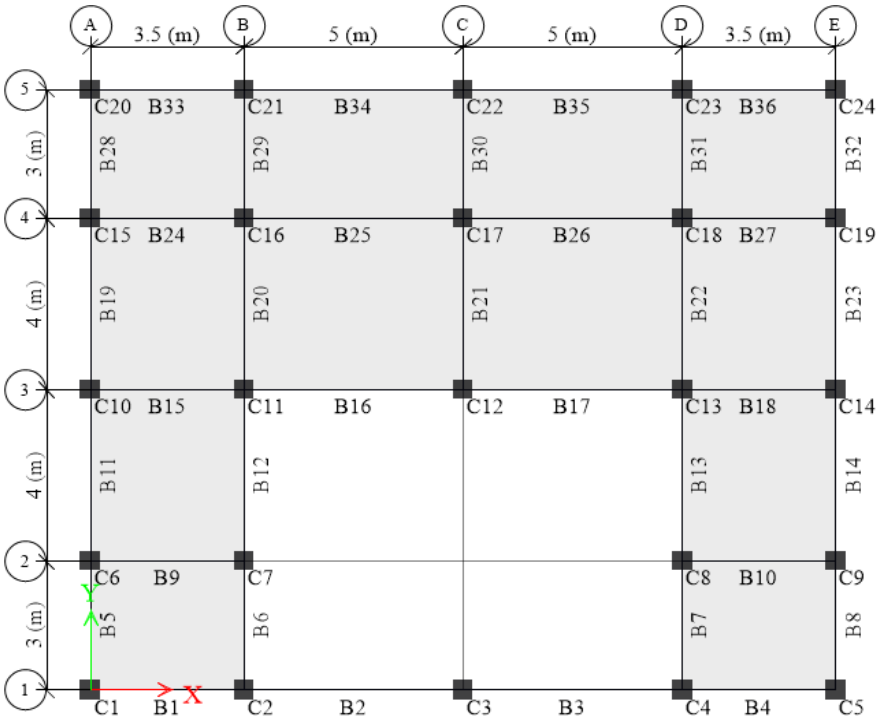
$$\frac{A_b}{A} = \frac{80}{238} = 0{,}3361 > 0{,}333$$

olduğu için yapıda A2 düzensizlik durumu mevcuttur.

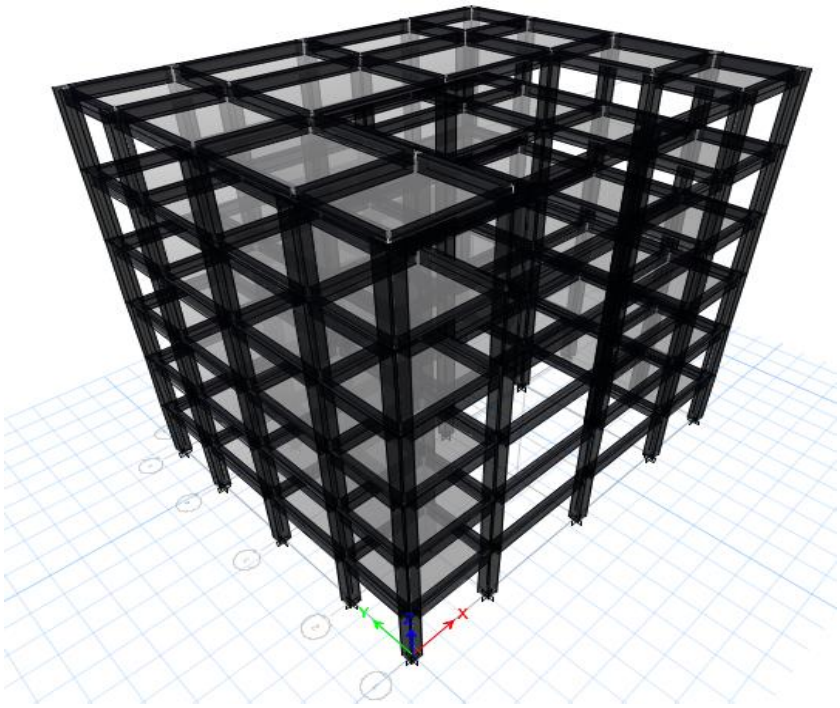
Binaların analizi sırasında ETABS® ver. 17 [60] paket programına statik ve dinamik yüklerin etkisi için 65 adet farklı yük kombinasyonu kullanılmıştır. Bu yük kombinasyonlarından seçilen belirli yüklemeler etkisindeki burulma düzensizliği durumu incelemiştir. Kolaylık sağlamak için her yönden ankastre mesnet kullanılmıştır. Her bir binanın düşey taşıyıcı sistem kesitleri, bina yüksekliği boyunca sabit kabul edilmiştir. Duvarlar, sistemde taşıyıcı eleman olarak kabul edilmemiş ve duvarların kütleleri hesap modelinde düğüm noktalarında toplanmış olarak göz önüne alınmıştır. Bu kütleler belirlenirken kat ortasında bir bölme işlemi uygulanacak, öyle ki katın üst yarısında kalan bölüm üst katın kütlesine katılırken; alt yarısı alt katın kütlesine katılacaktır. Döşeme yüklerini ölü yük (G) ve %30 hareketli yük (Q) oluşturmaktadır. Mod birleştirme metodundan elde edilen tüm iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeler, TDY 2007 "2.8.5. Hesaplanan Büyüklüklere İlişkin Alt Sınır Değerleri" [31] maddesi koşuluna uygun olarak büyütülmüştür. Her iki deprem doğrultusunda da ±%5 dışmerkezlik ile yüklemeler yapılarak deprem analizi gerçekleştirilmiştir. Ele alınan modeller, kat döşemelerinin esnek diyafram ve rijit diyafram davranışı gösterdiği kabul edilerek sonuçlar kıyaslanmıştır. Bulunan sonuçlarda büyük bir fark gözlemlendiğinden esnek diyafram kabulü yapılması kararı verilmiştir. Döşeme ve perdeleri, kabuk elemanlarıyla modellenmiştir. Döşeme boşluğun bir kenara daha yakın olduğu ve perde simetrik olarak yerleştirilmemiş modelin A1 Burulma Düzensizliği çok daha büyük değerler aldığı ortaya çıkmıştır. A1 Burulma Düzensizliğinin giderilebilmesi için göreli kat ötelemesinin optimum tasarımı, optimum boyutlandırma GA uygulamaları ile gerçekleştirilmiştir. Her iki yapıya ait yapısal bilgiler ve karakteristikler Çizelge 10.1'de verilmiştir. Çizelge 10.2'de problemleri çözmek için seçilen GA parametre seti verilmiştir.

Örnek 10.3

Bu örnekte boyut optimizasyonu çerçeve taşıyıcı sistemler üzerine gerçekleştirilmiştir.



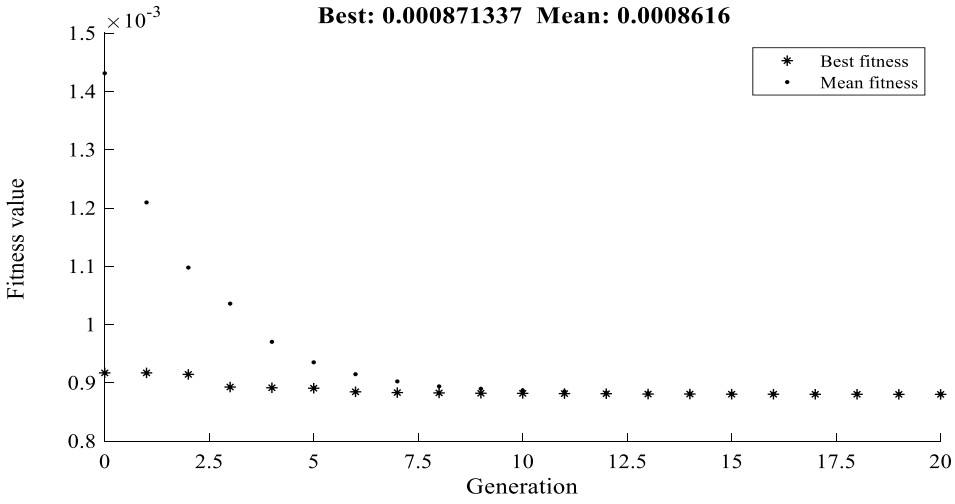
Şekil 10.9. A2 tipi düzensiz yapı tipik kat kalıp planı



Şekil 10.10. Çerçeve modelinin 3 boyutlu görüntüsü

Kolonlar plan düzeninde tüm katlarda aynı olduğu için sadece tek kat grubu vardır ve değişkenler 24 kolon grubuna ayrılmıştır. Her popülasyonda toplam 48 tasarım değişkeni vardır. Bu uygulamada kolonlar için 144 değişken olmak üzere toplam 288 tasarım değişkeni bulunmaktadır. Kolonlar için genişlik-yükseklik ve alt-üst sınırları sırasıyla 30cm ve 60cm olarak ayarlanmıştır. Bu modelde tüm kirişler 30/50cm boyutlarında ve tüm kolonlar 50x50cm boyutlarında seçilmiştir. Optimizasyon uygulamaları için kullanılan modelin tipik kat kalıp planı ve çerçeve modelinin 3 boyutlu görüntüsü şekil 10.9 ve 10.10'da verilmiştir.

Optimizasyon sonuçları aşağıda gösterilmiştir; Şekil 10.11'deki akış diyagramında açıkça görülebileceği gibi başlangıç verileri girildikten sonra Genetik Algoritma 20 jenerasyonda evrim sürecini tamamlamaktadır.



Şekil 10.11. Jenerasyon sayısı

Çizelge 10.9. İlk ve optimal burulma düzensizliği oranının karşılaştırılması

Kat Sayısı	İlk çözümü		Optimum çözüm	
	Burulma düzensizliği (η_{bi})		Burulma düzensizliği (η_{bi})	
	X - yönü	Y - yönü	X - yönü	Y - yönü
6	1,08	1,30	1,03	1,20
5	1,09	1,17	1,04	1,09
4	1,10	1,13	1,05	1,08
3	1,11	1,11	1,05	1,10
2	1,11	1,10	1,05	1,08
1	1,11	1,12	1,06	1,13

Optimum çözüm 20 iterasyondan sonra ve yaklaşık 30 saatlik bir CPU süresi 4000 fonksiyon değerlendirme sayısı ile elde edilmiştir.

Çizelge 10.10. İlk ve optimum kolon boyutlarının karşılaştırılması

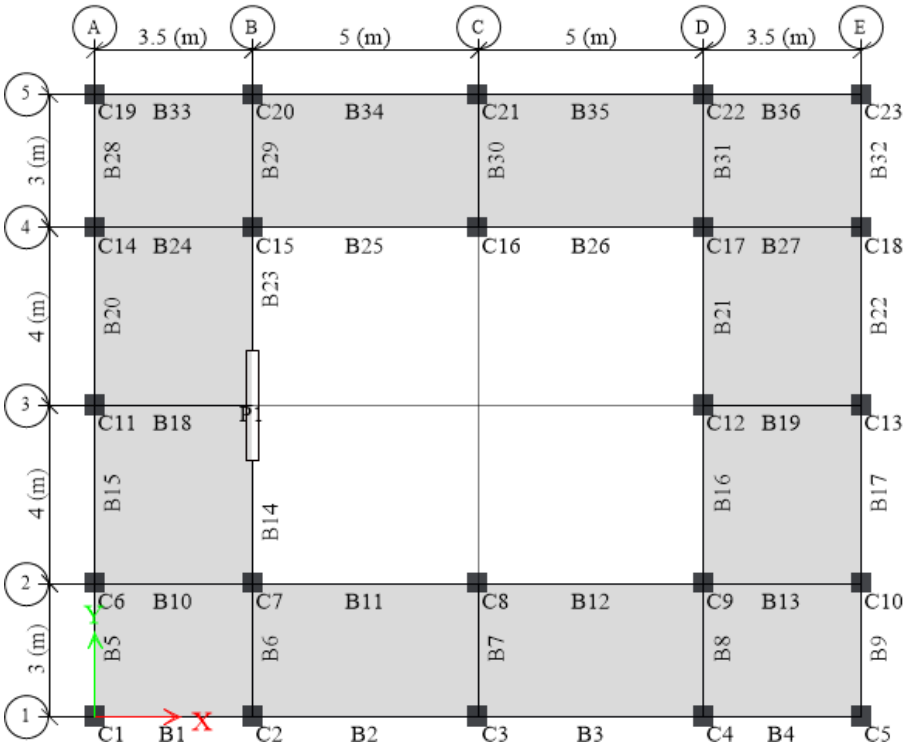
Kolon Sayısı	İlk çözümü		Optimum çözüm	
	Derinlik (b_c)	Genişlik (h_c)	Derinlik (b_c)	Genişlik (h_c)
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
C1	50,0	50,0	55,71	35,61
C2	50,0	50,0	47,24	39,91
C3	50,0	50,0	51,41	41,16
C4	50,0	50,0	46,35	40,80
C5	50,0	50,0	59,40	31,58
C6	50,0	50,0	50,18	39,14
C7	50,0	50,0	46,22	40,96
C8	50,0	50,0	54,90	35,05
C9	50,0	50,0	48,93	40,70
C10	50,0	50,0	47,31	41,80
C11	50,0	50,0	56,15	36,55
C12	50,0	50,0	59,12	35,20
C13	50,0	50,0	45,11	39,99
C14	50,0	50,0	49,41	39,08
C15	50,0	50,0	52,75	34,95
C16	50,0	50,0	59,24	34,44
C17	50,0	50,0	59,10	41,49
C18	50,0	50,0	57,52	36,52
C19	50,0	50,0	52,27	35,83
C20	50,0	50,0	45,68	40,31
C21	50,0	50,0	59,08	31,62
C22	50,0	50,0	59,42	30,80
C23	50,0	50,0	50,88	39,08
C24	50,0	50,0	49,77	35,07

Çizelge 10.9 incelenirse optimum çözümde burulma düzensizliği katsayısının sınır değere oldukça yaklaştığı görülmektedir. Çizelge 10.9, optimum çözümde, y doğrultusunda buruma düzensizliği katsayılarının sınır değeri (1,2) geçmediği için burulma düzensizliği yaratmamaktadır. Ayrıca sadece çerçevelerden oluşan taşıyıcı sistemde kat sayısının artması

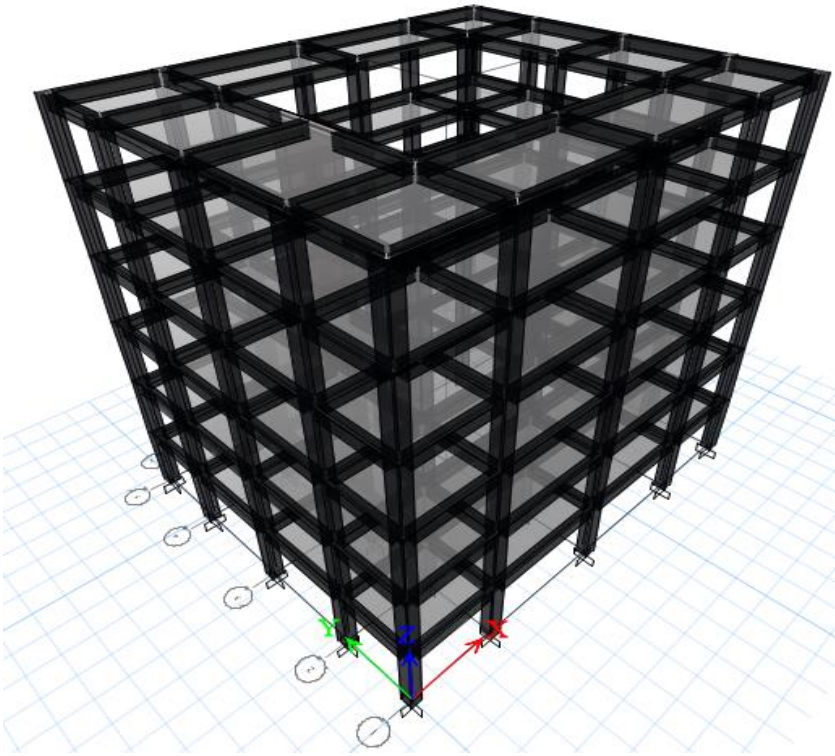
bütün katlarda maksimum azaltılmış burulma düzensizliği artışa neden olmuştur. Genetik Algoritma ile çözüm neticesinde Çizelge 10.10'da görüldüğü gibi optimize edilmiş bina kolonların boyutları ve yönleri optimizasyon öncesi çözümünden çok büyük bir fark göstermiştir.

Örnek 10.4

Bu örnekte optimum boyutlandırma genetik algoritma uygulamaları ile perde- çerçeve taşıyıcı sistem üzerine gerçekleştirilmiştir. Kolonlar ve perdeler plan düzeni tüm katlarda aynı olduğu için sadece tek kat grubu vardır ve değişkenler 23 kolon ve bir perde grubuna ayrılmıştır. Her popülasyonda toplam 47 tasarım değişkeni vardır. Bu uygulamada kolonlar için 138 ve perde-duvarlar için 6 tasarım değişkeni olmak üzere toplam 282 tasarım değişkeni bulunmaktadır. Kolonlar için genişlik-yükseklik ve alt-üst sınırları sırasıyla 30cm ve 60cm olarak ayarlanmıştır. Perde uzunlukları 250cm olmak üzere sabittir ve yalnızca kalınlıkları tasarım değişkeni olup alt-üst sınırları sırasıyla 20cm ve 30cm olarak ayarlanmıştır. Bu modelde tüm kirişler 30/50cm boyutlarında ve tüm kolonlar 45x45cm boyutlarında seçilmiştir. Optimizasyon uygulamaları için kullanılan modelin tipik kat kalıp planı ve perde-çerçeve modelinin 3 boyutlu görüntüsü şekil 10.12 ve 10.13'te verilmiştir.

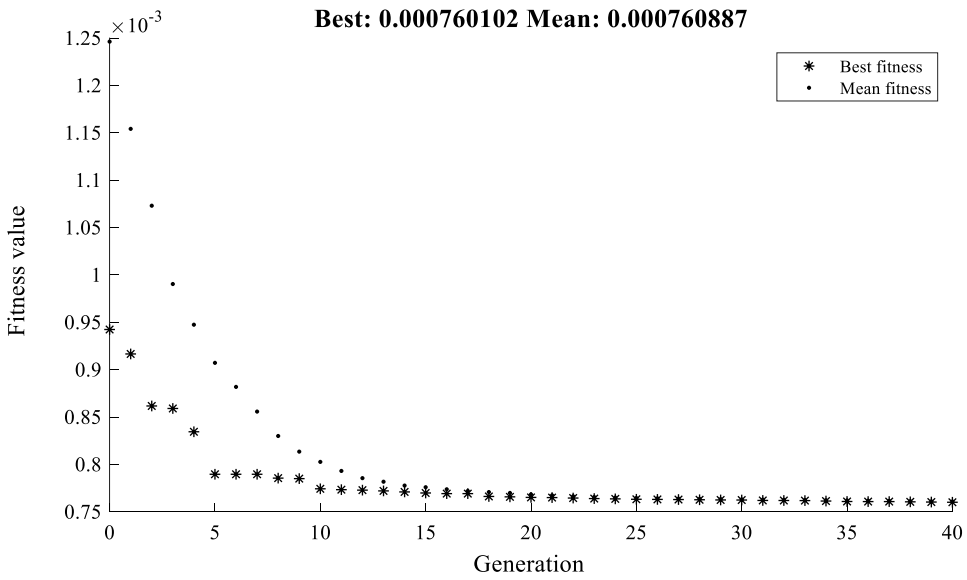


Şekil 10.12. A2 tipi düzensiz yapı tipik kat kalıp planı



Şekil 10.13. Perde-çerçeve modelinin 3 boyutlu görüntüsü

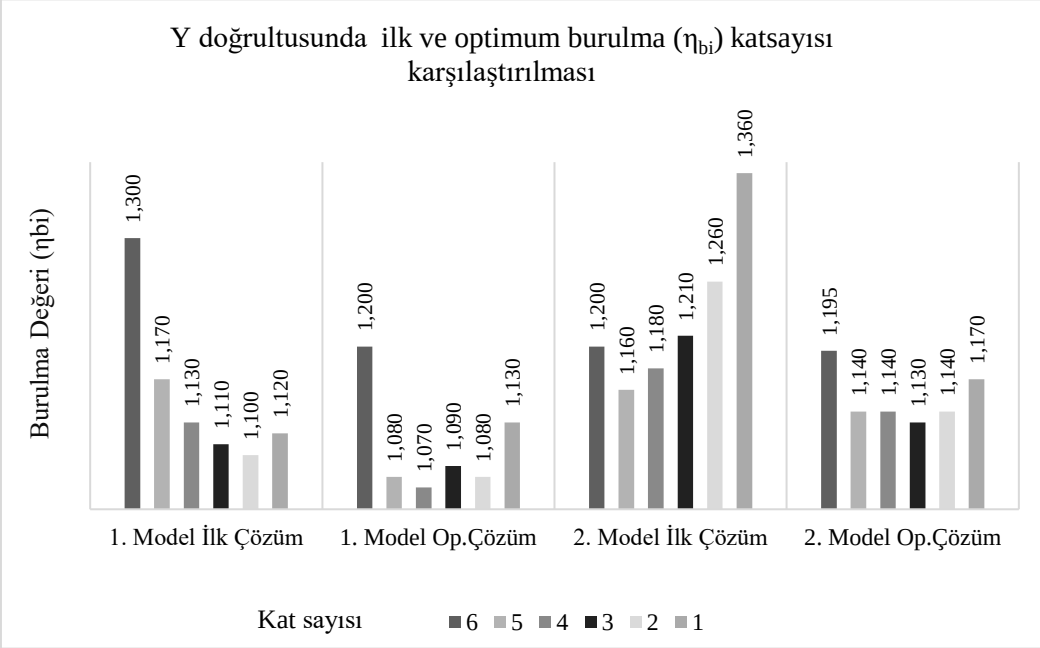
Optimizasyon sonuçları burada detaylı şeklide açıklanmıştır; bu örnekte optimum çözüm 40 iterasyondan sonra ve yaklaşık 40 saatlik bir CPU süresi 8000 fonksiyon değerlendirme sayısı ile elde edilmiştir. Şekil 10.14'de görüldüğü gibi Genetik Algoritma 40 jenerasyonda evrim sürecini tamamlamakta ve boyutlandırma optimizasyon sonucu elde etmektedir.



Şekil 10.14. Jenerasyon sayısı

Çizelge 10.11. İlk ve optimal burulma düzensizliği oranının karşılaştırılması

Kat Sayısı	İlk çözüm		Optimum çözüm	
	Burulma düzensizliği (η_{bi})		Burulma düzensizliği (η_{bi})	
	X - yönü	Y - yönü	X - yönü	Y - yönü
6	1,02	1,20	1,07	1,19
5	1,02	1,16	1,07	1,14
4	1,02	1,18	1,06	1,14
3	1,02	1,21	1,06	1,13
2	1,02	1,26	1,06	1,14
1	1,02	1,36	1,07	1,17



Şekil 10.15. Her iki modeli için ilk ve optimal burulma karşılaştırılması

Çizelge 10.11 ve Şekil 10.15'te her iki model için 'Optimum Çözümü' ile 'İlk Çözümü' kıyaslanarak incelenmiştir. Akış diyagramından görüldüğü üzere boyutlandırma optimizasyon neticesinde her iki model burulma düzensizliği bakımından yönetmeliğin öngördüğü sınırlar aşılmamaktadır. Akış diyagramına bakıldığında çerçevelerden oluşan taşıyıcı sistemli yapılarda burulma değerlerinin üst katlara doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. Boyut optimizasyonu neticesinde bu değerin 1,30'dan 1,20'a düştüğü aşikardır. Yukarıdaki analizlerin sonuçlarına bakarak perde-çerçevelerden oluşan taşıyıcı sistemli yapılarda burulma değerlerinin üst katlara doğru gidildikçe azaldığı saptanmaktadır.

Yani maksimum burulma düzensizliği değeri alt katlarda meydana gelmektedir. Ayrıca boyutlandırma optimizasyon neticesinde bu binada burulma düzensizliği değeri 1,36'dan 1,17'e ; 1,25'ten 1,14'e ve 1,21'dan 1,13'e düştüğü açıkça görülmektedir.

Çizelge 10.12. İlk ve optimum kolon boyutlarının karşılaştırılması

Kolon Sayısı	İlk çözümü		Optimum çözüm	
	Derinlik (b_c) (cm)	Genişlik (h_c) (cm)	Derinlik (b_c) (cm)	Genişlik (h_c) (cm)
C1	45,0	45,0	41,85	48,83
C2	45,0	45,0	41,47	54,96
C3	45,0	45,0	50,75	45,18
C4	45,0	45,0	44,77	55,45
C5	45,0	45,0	49,97	56,69
C6	45,0	45,0	58,71	33,30
C7	45,0	45,0	59,95	46,59
C8	45,0	45,0	41,90	54,92
C9	45,0	45,0	46,95	59,43
C10	45,0	45,0	45,98	59,36
C11	45,0	45,0	57,74	44,39
C12	45,0	45,0	54,97	51,80
C13	45,0	45,0	46,52	55,63
C14	45,0	45,0	39,84	46,39
C15	45,0	45,0	34,46	56,85
C16	45,0	45,0	55,61	57,72
C17	45,0	45,0	47,43	59,30
C18	45,0	45,0	49,10	57,84
C19	45,0	45,0	58,18	47,26
C20	45,0	45,0	39,71	44,02
C21	45,0	45,0	34,17	58,54
C22	45,0	45,0	34,15	54,12
C23	45,0	45,0	49,02	50,26
P1	30,0	250,0	25,02	250,00

Çizelge 10.12'den de anlaşılacağı üzere Genetik Algoritma ile çözüm sonucunda optimize edilmiş bina kolonların boyutları ve yönleri, ilk çözümüne göre büyük bir fark göstermiştir.

Genetik Algoritmaya dayalı optimum tasarım algoritmasının, ayrık değişkenler kullanarak problemleri çözmek için oldukça uygun olduğu görülmüştür.

10.5.4. Sonuç ve tartışmalar

Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak 3B betonarme yapılarda burulma düzensizliği katsayısını azaltması veya eğer mümkünse, tümden yok etmesi amacıyla göreli kat ötelemeye optimum tasarımı gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Kısıtlama olarak da betonarme yapıların tasarım koşulları yönetmelik TDY-2007'e uygun olarak göz önüne alınmış ve değişik binalarda genetik algoritma çalışması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda detaylı şeklide açıklanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları aşağıda açıklanmış ve uygulama ile ilgili öneriler sunulmuştur.

Düzensizlikten elde edilen sonuçlar

Planda L şekil düzensizliğe sahip bina sistemlerin kolon ve perdelerinin planda boyut ve yönlerinin değiştirilmesi dışmerkezlik mesafelerini önemli ölçüde etkilemiş olur. Bunun yanında burulma düzensizliği katsayısının ortadan kaldırılması veya deprem yönetmeliklerince en alt sınıra getirilmesi iyi bir çözümdür.

Yapı katlarındaki burulma düzensizliği sonuçları incelendiğinde rijitlik düzensizliğin geometrik düzensizliğe göre burulma düzensizliği katsayısını ηbi'yi daha fazla etkilediği görülmektedir. Ayrıca sadece çerçevelerden oluşan taşıyıcı sistemli yapılarda burulma değerlerinin üst katlara doğru gidildikçe arttığı görülmektedir (Şekil 10.8 ve 10.15).

Çerçeve ve perde- çerçeve taşıyıcı sistemli binaların burulma düzensizliği sonuçları kıyaslandığında perde-çerçeve taşıyıcı sistemli binaların burulma düzensizliği katsayısı değerini daha büyük verdiği görülmüştür. Maksimum burulma düzensizliği değeri alt katlarda meydana gelmektedir. Ayrıca maksimum burulma düzensizliği değeri üst katlara gidildikçe azaldığı görülmüştür (Şekil 10.8 ve 10.15).

Yapılan araştırma neticesinde A2 düzensizliğinin olduğu durumlarda çözümlerin daha doğru şekilde elde edilebilmesi için tüm bina modellerinde döşemelerin esnek diyafram kabulünün yapılması önerilmektedir.

Boyutlandırma optimizasyonundan elde edilen sonuçlar

Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak 3B betonarme yapılarda kütle merkezi ile rijitlik merkezleri arasındaki oluşan dışmerkezliği minimuma getirilmesi ve burulma düzensizliği katsayısını azaltması amacıyla göreli kat ötelemeye optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Planda L şekline sahip binaların boyutlandırma optimizasyon sonucunda düşey taşıyıcıların (kolon ve perde) enkesit boyutları ve doğrultularının değiştiği ve dışmerkezliğinin çok azaldığı görülmektedir (Çizelge 10.4, 10.7 ve Şekil 10.7).

Yukarıda bahsedildiği her iki tip düzensiz binalarda, tüm katların burulma düzensizliği katsayısı boyutlandırma optimizasyon uygulamalarından önce ve sonra kıyaslanmış, kıyaslanma sonucunda büyük bir düşüş meydana gelebildiği gözlemlenmiştir (Çizelge 10.5, 10.8, 10.9, 10.11 ve Şekil 10.8 ve 10.15). Elde edilen sonuçlarda burulma düzensizliği katsayısının göreli kat ötelenmelerinden ötelenmelere bağlı olarak tanımlanmasının daha doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Genel olarak Genetik Algoritma ayrık tasarım değişkenleri kullanarak optimum çözüm belirlediğinden inşaat mühendisliği problemlerinin çözümü için uygun olduğu gözlemlenmiştir. Sismik dayanıklı betonarme 3B yapıların tasarım optimizasyonunun ekonomik, sağlam ve etkili bir araç olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca MATLAB® programı ve ETABS® programını birbirine bağlayarak Application Programming Interface (API) aracılığıyla betonarme yapıların Genetik Algoritma ile boyutlandırma optimizasyonu, daha büyük modellerin oluşturulmasının ve test edilmesinin kullanılabilirliği gösterilmiştir.

GA'nın kullanımı için problemin yapısal formu ile ilgili yeterince bilgili olmak gerekmektedir. Problemin çözüm seti olabilen tasarım değişkeni değerleri tasarımcı tarafından doğru bir şekilde tahmin edilmeli ve araştırma uzayına yerleştirilmelidir. Var olan tasarım değişken sayısı, araştırma alanının eleman sayısı ve sistem boyutu çözüme erişme hızı ile ters orantılıdır. Sistemin karmaşık ve geniş olması, tasarım değişkenleri ve araştırma uzayı elemanlarının fazla olması çözüme yavaş ulaşılmasına neden olur. Araştırma uzayının eleman sayısının azaltılması çözümü hızlandırmak için uygulanabilecek metotlardan biridir.

11. OPTİMİZE EDİLMİŞ PLANDA DÜZENSİZ YAPILARIN SİSMİK PERFORMANSI ÜZERİNE DENEYSEL VE TEORİK ÇALIŞMA

Bir binanın deprem sırasındaki davranışı önemli ölçüde çeşitli faktörlerin geometrisine, şekline, boyutuna ve deprem kuvvetlerinin zemini nasıl salladığına bağlıdır. Deprem yüklerinin yapıların plandaki asal eksenlerinin yansıra ara doğrultularda da etkimesi ve yapısal davranış taleplerinin en elverişsiz tepkisinin oluşacağı konusu yapı tasarımında sık karşılaşılan sorunlardan birisidir. Deprem yükleri, düzensiz binalarda öngörülemeyen deplasmanlar yaratabilir ve ilgili yapısal elemanlar değerlendirilenden daha fazla zorlanabilir. Geçmiş ve son dönemlerde meydana gelen deprem olayları, planda düzensiz yapıların deprem hasarına karşı daha savunmasız olduğunu göstermektedir. Bu nedenle düzensizliğin etkisi, bina tasarımı sırasında dikkate alınması gereken çok önemli bir konudur.

Literatürde, deprem etkime açılarının etkisi nedeniyle yapılarda oluşacak en elverişsiz davranış büyüklüklerini tasarım aşamasında kontrol edebilmek için çeşitli birleştirme kuralları (%30, %40, SRSS, CQC3, vb.) önerilmiştir [23–26]. Marinilli ve Lopez [61], çalışmalarında, RSA'nin, tasarım amaçları için kritik tepkileri ve etkime açılarını tahmin etmek adına yeterli olduğunu göstermişlerdir. Burulma problemi üzerindeki deneysel çalışmalar az sayıda olmasına rağmen yine de mevcuttur ve sayısal çalışmalarla karşılaştırma için bazı yararlı veriler sağlamaktadır. Literatürde deprem yükleri altında binaların sismik performansını deneysel olarak araştıran bazı çalışmalar mevcuttur [27-30].

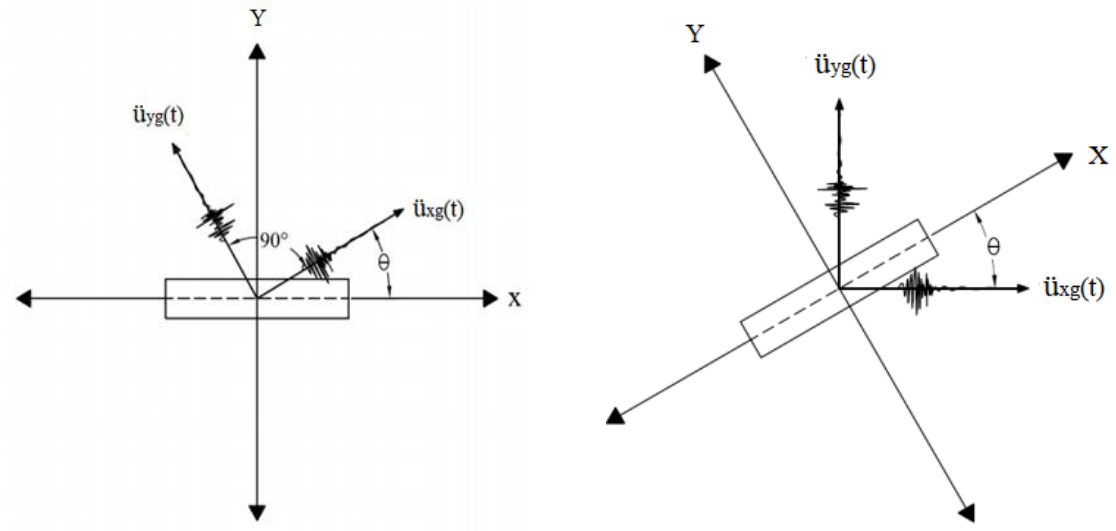
Son yıllarda malzeme davranışın incelenmek için dijital görüntü korelasyon (Digital Image Correlation- DIC) tekniklerinin kullanımı önemli ölçüde artmaktadır. Bu sistem temassız bir şekilde incelenecek tüm alan üzerindeki deplasman ve birim deformasyonların ölçümlerini kolay ve hızlı bir şekilde analize imkân sağlamaktadır. Santos, Pitangueira, Ribeiro, Caldas'ın [62] çalışmalarında, deneysel alanda kirişlerin yüzeyindeki yerdeğiştirmelerini ölçmek için DIC tekniği kullanılmış ve deformasyon ölçümü için güçlü ve vazgeçilmez bir araç olduğunu kanıtlamışlardır. Çalışmalarında orta açıklıkta bir çentik bulunan üç farklı boyuttaki beton kiriş üzerinde üç noktalı eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, boyut etkisinin daha iyi anlaşılmasına olanak tanımış ve yerdeğiştirmelerin ölçümlerini elde etmek için dijital görüntü korelasyonunun etkinliğini göstermiştir.

Ghorbani, Matta, Sutton'un [63] çalışmalarında, tam ölçekli donatılı yığma duvarlarında yüzey deformasyon alanlarını ölçmek için temassız bir yöntem olarak üç boyutlu dijital görüntü korelasyonunu kullanılmış ve temassız 3 boyutlu-DIC ölçümlerinin, beton ve yığma yapıların davranışının anlaşılmasını ilerletmek için güçlü ve erişilebilir bir araç olduğu belirtilmiştir.

Bu bölümde, planda düzensiz betonarme yapıların sismik performansı üzerindeki deprem doğrultusu ve etkime açısı etkilerinin incelenmesi için deneysel ve teorik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu binada burulma etkisini azaltmak için kolon kesit boyutları genetik algoritma yöntemi ile elde edilmiştir. Bina, 15 derecelik artışlarla değerleri 0 ile 180 derece arasında değişen on üç (13) yöndeki yatay yüklere maruz bırakılmıştır. Maksimum kat deplasmanın değişimi, sismik performans üzerindeki bu etkiyi belirlemek için on üç (13) yön dikkate alınmıştır. Deney modeli 3 boyutlu 8 katlı bir bina AutoCAD yazılımı ile modellenmiş ve ABS filament kullanarak Zortrax M200 3 boyutlu yazıcı (3D printer) ile 1/30 oranında tasarımı ve prototipi yapılmıştır. MATLAB® platformu üzerine inşa edilen açık kaynaklı Ncorr [64] kullanımında dijital görüntü korelasyon (DIC) tekniğini kullanarak yatay yükler altında kolonların yüzey deplasman alanını ölçülmüştür. Dijital kamera ile çekilen her resim farklı bir yükleme adımına karşılık gelir. Teorik analiz için 3B sekiz katlı bina, FEM analiz yazılımı kullanılarak 15 derecelik artışlarla değerleri 0 ile 180 derece arasında değişen on üç yöndeki yatay yükler altında modellenmiş ve analiz edilmiştir.

11.1. Yer Hareketi Etkime Açısı

Yer hareketi rotasyonunun etkilerini incelemek için yer ivmesinin iki yatay bileşeni (boyuna ve enine) $\ddot{u}_{xg}(t)$ ve $\ddot{u}_{yg}(t)$ dikkate alınan derece ile döndürülecek ve Şekil 11.1a'de gösterildiği gibi yapısal serbestlik derecelerine göre çözümlenecektir. Burada $\ddot{u}_{xg}(t)$ ve $\ddot{u}_{yg}(t)$ 'nin başlangıçta sırasıyla X ve Y yönlerine yönlendirildiği kabul edilmektedir. Yer hareketi bileşenlerinin saat yönünün tersine dönüşü (θ), yapısal serbestlik derecelerinin eksenleri ($\ddot{u}_{s1}(t)$ ve $\ddot{u}_{s2}(t)$) boyunca eşdeğer yer hareketi bileşenlerine çözümlenebilir. Denklem 11.1'de gösterilen ve Denklem 11.2'de genişletilmiş dönüşüm matrisi (T) bu işlemi gerçekleştirmek için kullanılır ve yalnızca geometriye dayanır [59]. Denklem 11.2'de, $\ddot{u}_{s3}(t)$ ve $\ddot{u}_{zg}(t)$ düzlemsel dönüşten etkilenmeyen düşey hareketi temsil eder. Bu dönüşümler, aşağıda Şekil 11. 1'de gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 11.1. Yer hareketi ivmesinin (a) ve yapının dönüşü (b) [59]

$$\ddot{u}_s = T\,\ddot{u}_g \tag{11.1}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{u}_{s1}(t) \\ \ddot{u}_{s2}(t) \\ \ddot{u}_{s3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_{xg}(t) \\ \ddot{u}_{yg}(t) \\ \ddot{u}_{zg}(t) \end{bmatrix} \tag{11.2}$$

Yer hareketi etkime açısını incelemek için literatürdeki [65] benzer bir yaklaşım, yapıyı döndürmekte ve orijinal yer hareketi bileşenlerini Şekil 11.1b'de gösterildiği gibi döndürülmüş yapısal serbestlik derecelerine dönüştürmektedir.

Denklem (11.3 ve 11.4)' te gösterilen T_t dönüşümünü kullanılır. Dönüşüm matrisi T_t, T'nin tersidir ve sabit bir yapı açısından yer hareketinin saat yönünde dönüşü olarak da düşünülebilir [59].

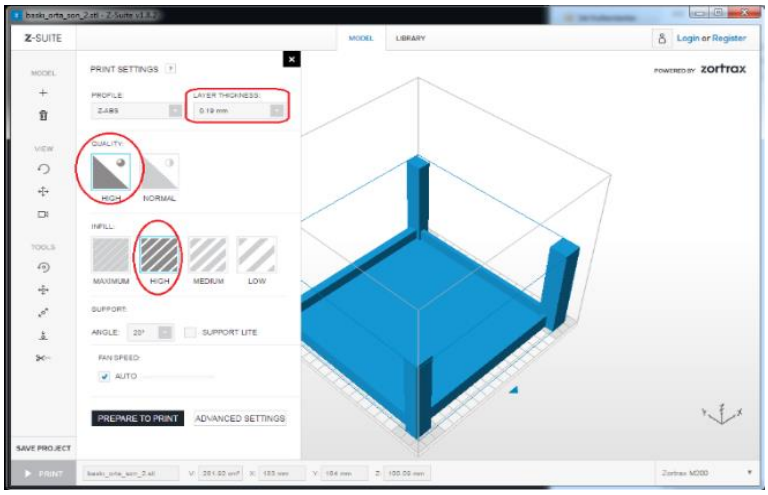
$$\ddot{u}_s = T_t\,\ddot{u}_g \tag{11.3}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{u}_{s1}(t) \\ \ddot{u}_{s2}(t) \\ \ddot{u}_{s3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_{xg}(t) \\ \ddot{u}_{yg}(t) \\ \ddot{u}_{zg}(t) \end{bmatrix} \tag{11.4}$$

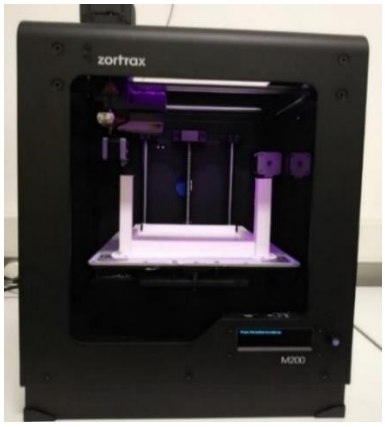
11.2. Malzemeler ve Yöntemler

Betonarme yapılarda, deplasman ve birim uzama önemli parametrelerdir. Aynı anda bu parametrelerin laboratuvar ortamında ölçülmesi, geleneksel teknikler kullanılmaya çalışıldığında zor bir süreçle karşılaşılır; çünkü doğruluk, basitlik ve maliyet dikkate alınarak ortak bir çözüm bulunması gerekmektedir. Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) filamenti, mukavemeti yüksek, ağırlığı hafif, işlevsel 3B modelleri dayanıklı ve sağlam bir malzemedir. Bunların yanında ABS'nin işlenmesi daha kolaydır. Bu yüzden ABS filamentin avantajları göz önüne alınmış ve böylece deneyde kullanılması tercih edilmiştir.

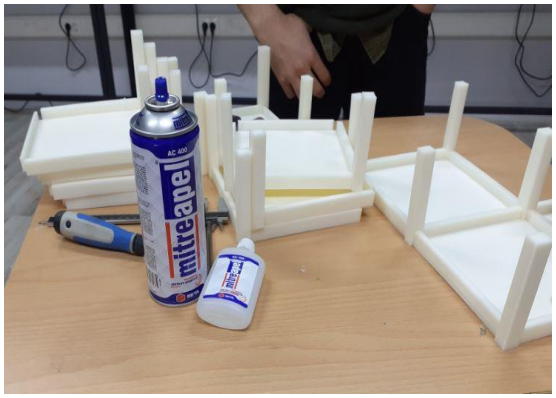
11.2.1. 3B yazıcı yöntemler



(a) Z-Suite dosyası



(b) Zortrax M200 3D yazıcı



(c) Numune parçaları



(d) Önden görünüm



(e) Yandan görünümü

Şekil 11.2. Tasarlanan model ve 3B yazıcı ile yapılan prototipin görüntüleri

1983 yılında Charless Hull [66] tarafından ilk 3B yazıcı teknolojisi ortaya çıkarılmıştır. 1986'da Hull, 3 boyutlu yazıcılar için CAD yazılım verilerinin çevrilmesini sağlayan STL (STereoLithography) dosya formatı da dahil olmak üzere teknolojisini ticarileştirmek için 3B sistemini kurmuştur. 3B yazıcıların çalışabilmeleri için 3 boyutlu model tasarımına ihtiyacı vardır. Bilgisayar ortamında AutoCAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) programı ile tasarlanmış çizimler STL dosyası formatına dönüştürülür. Bu formata dönüştürülen dosya daha sonra Z-Suite olarak isimlendirilen Zortrax'ın dilimleme yazılımı yani makine yazılımına aktarılır. Bunun sonunda 3B yazıcının uç yolları ve üretim kodları yardımıyla prototip üretilmiştir. Böylece 3 boyutlu prototipin doluluk oranı, dolgu geometrisi, katman yüksekliği gibi yazdırma parametreleri kullanıcı tarafından belirlenmiş olur. Baskı çıktıktan sonra eğer halen sıcaksa soğuması beklenir ve spatula yardımıyla tablanın elektronik elemanlarına zarar vermeden çıkartılır. Baskı süresi, üretilen modelin boyutuna bağlıdır. Küçük modeller hızlı yazdırılırken, daha büyük, geometrik olarak daha karmaşık modellerin yazdırılması daha uzun sürer. Şekil 11.2'de tasarlanan model ve 3B yazıcı ile yapılan prototipin görüntüleri bulunmaktadır.

11.2.2. Numunelerin malzeme özellikleri

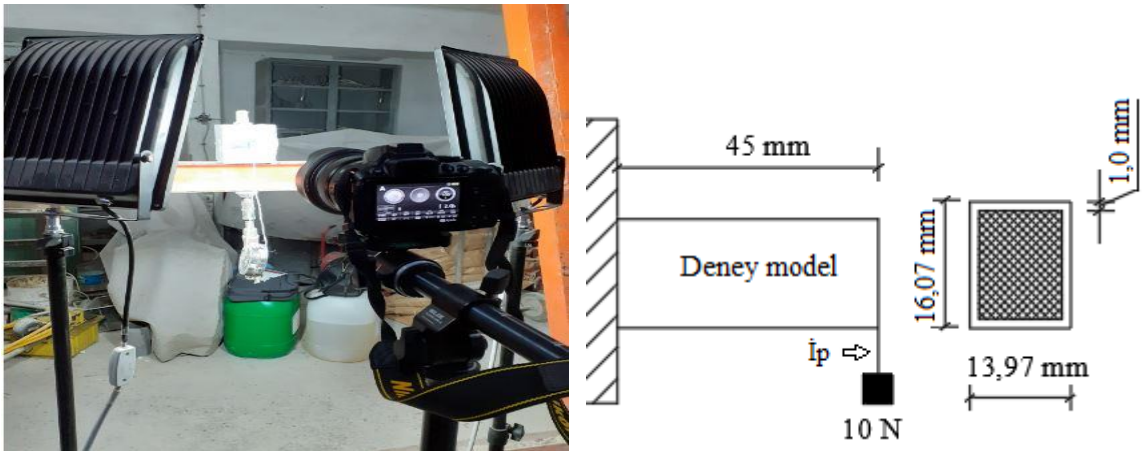
FDM 3D yazıcılar için uygun filament seçimi -özellikle üretilmesi düşünülen modellerin işlevsel bir kullanımı varsa- modelin özelliklerinin oluşabilmesi adına önemlidir [66]. Deneyde, ABS filamentin avantajları dikkate alınmış ve kullanılması uygun görülmüştür. ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), son yıllarda 3 boyutlu modeller basmak için kullanılan en popüler malzeme olmakla beraber mukavemeti yüksek bir termoplastik polimerdir. Eriyik biriktirme modelleme (Fused Deposition Modelling-FDM) teknolojisi ile model; istenilen boyut, kalite ve dayanıklılığa ulaşabilmektedir. ABS filament, işlevsel 3B modellerin sağlam ve dayanıklı olması istendiğinden, mukavemeti yüksek bir malzeme olduğu için tercih edilebilmektedir [67]. Nitekim aynı zamanda ABS'yi işlemek daha kolaydır. Üretilen 3B modeller kesilebilir, taşlanabilir, törpülenebilir, boyanabilir ve güçlü yapıştırıcılar ile yapıştırılabilir.

Elastisite modülü performans testi, modelin bir parçasından yapılan konsol kirişin (16,07/13,97)mm boyutundaki serbest ucuna 10,0N noktasal yük uygulanarak doğrudan gerçekleştirilmiştir. Konsol kirişinin uzunluğu 45mm çevre kalınlığı 1,5mm. Çizgi tipi duvar

deseni ve dolgu desenleri 45º ve 135º'dir. Elde edilen veriler yazarlar tarafından test edilen verilere benzerdir [67, 68].

Çizelge 11.1. Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri [67, 68]

Çekme Dayanımı	Maksimum Basma Mukavemeti	Elastikiyet Modülü	Kopma Uzaması	Akma Dayanımı	Yoğunluk
MPa	MPa	MPa	%	MPa	g/cm^3
41-45	49	2250	45	42,5	1,05



Şekil 11.3. Gazi laboratuvarında numunenin elastisite modülü testi

Eriyik biriktirme modelleme (FDM) yöntemi ile kullanıma uygun olan %80 doluluk oranına sahip ABS filamente ait mekanik özellikler Çizelge 11.1'de verilmiştir. Şekil 11.3'te Gazi üniversitesi yapı makine laboratuvarında yapılan elastisite modülü testi gösterilmiştir.

11.2.3. Dijital görüntü korelasyon yöntemi

Dijital Görüntü Korelasyonu (Digital Image Correlation-DIC) [69], bir nesnenin bir yüzeyinin dijital görüntülerini yakalayan ardından tam alan deformasyonu ve ölçümleri elde etmek için görüntü analizini gerçekleştiren temassız, optik bir yöntemdir. Bu teknik, bir referans görüntü (yüklemeden önce) ve ardından deformasyon sırasında çekilen bir dizi resim ile başlar. Deforme edilmiş görüntüler, deforme olmamış ilk referans resme göre farklı bir nokta deseni gösterir. Bu desen farkı, referans görüntünün pikselleri ile herhangi bir deforme olmuş görüntünün korelasyonu yapılarak hesaplanabilir ve böylece bir tam alan deplasman ölçümü hesaplanabilir. DIC'yi deplasman ölçmek için kullanılan diğer deneysel

tekniklerden ayıran şey ise bir dijital kamera kullanılmasıdır. Sonuçların nitelikleri temel olarak iki faktöre bağlıdır: kameranın çözünürlüğü ve numunedeki benek deseninin kalitesi. Bu çalışmanın amacı, laboratuvarda yatay yük uygularken, hava ve uzay kaynaklı optik ölçümlerden elde edilecek ölçümleri ve bilgileri taklit ederek tam alan deplasman ölçümleri elde etmektir.

Görüntü ve DIC parametrelerini ayarlama

Numuneler, yüzeye görüntü eşleştirme ve karakteristik özellikleri sağlamak için benek deseniyle boyanır. Benek desenleri genellikle boyaların numuneye rastgele pozisyonda ancak boyut olarak tekdüze püskürtülmesiyle oluşturulur. Deneyi gerçekleştirmek için numunelerin görüntüleri 24 Mega piksel çözünürlüklü Nikon D5300 kamera ile yüklenmeden önce ve sonra çekilmiştir.



Şekil 11.4. Laboratuvardaki test modeli

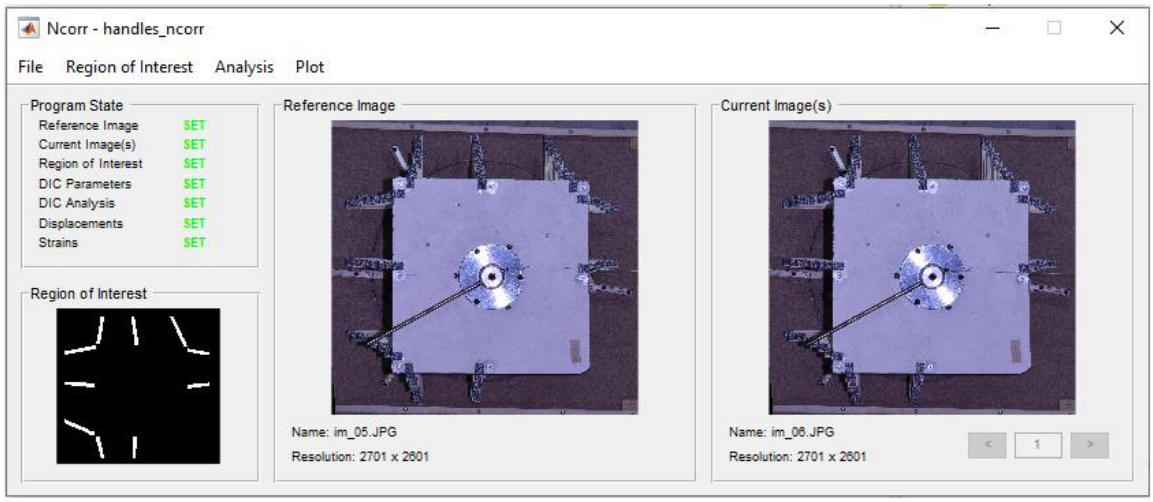
İşlenecek DIC parametrelerinin ayarlanması, önce referans görüntünün, güncel görüntülerin ve İlgi Bölgesinin (Region of Interest- ROI) ayarlanmasını gerektirir. Referans görüntü olarak görüntü tüm deney kurulduktan sonra yüksüz şekilde alınmıştır. Güncel görüntüler, deney için kullanılan yatay yüklemeye göre alınmıştır (Şekil 11.5a ve 11.5b). Kullanıcı, bir ilgi bölgesi (ROI) tanımlayarak görüntünün hangi bölümünün analiz edileceğini belirler. Algoritma daha sonra ROI'yi alt kümeler olarak adlandırılan bölgelere ayırır (Şekil 11.5c). 10 nolu alt küme yarıçapının ve 4'lük alt küme aralığının rastgele seçilmiş değerleri için benek modeli daha yüksek çözünürlüklü sonuçlar elde etmek için kullanılmıştır (Şekil 11.5d & e).

Sonraki adım, çalıştırılacak DIC analizini seçmektir. Bu adım, işlenecek bölgenin seçilmesini (işlenmek üzere seçmek için bölgedeki herhangi bir yere yerleştirmeyi) ve çekirdek yerleştirmeyi (çekirdekler deformasyon sırasında görüş alanı dışına çıkmayacak şekilde yerleştirilmelidir) içerir. Çekirdek yerleştirme yapıldıktan sonra bir ön izleme görünecektir.

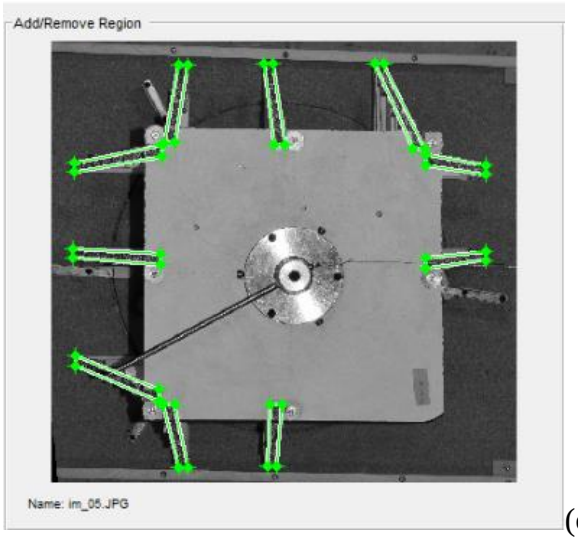
DIC analizi adımından sonra, deplasman biçimlendirmesi yapılır. Deplasmanları formatlamak için ortaya çıkan Grafik Kullanıcı Ara yüzü (GUI) Şekil 11.5 (f) ve 11.5 (h) gibi görünmelidir. Bu noktada minimum ve maksimum deplasman değerlerinin konumları bu analizde elde edilebilir.

Son olarak, deplasmanlar, referans görüntüdeki deforme olmamış alt kümeler ile sonraki görüntülerde deforme olmuş alt kümelerin karşılaştırılmasıyla hesaplanır. Yukarıda belirtilen tüm adımları uyguladıktan sonra kesin sonuca ulaşmak için birkaç deney yapılacaktır. Sonuçların nitelikleri temel olarak kameranın çözünürlüğüne ve numunedeki benek deseninin kalitesine bağlıdır.

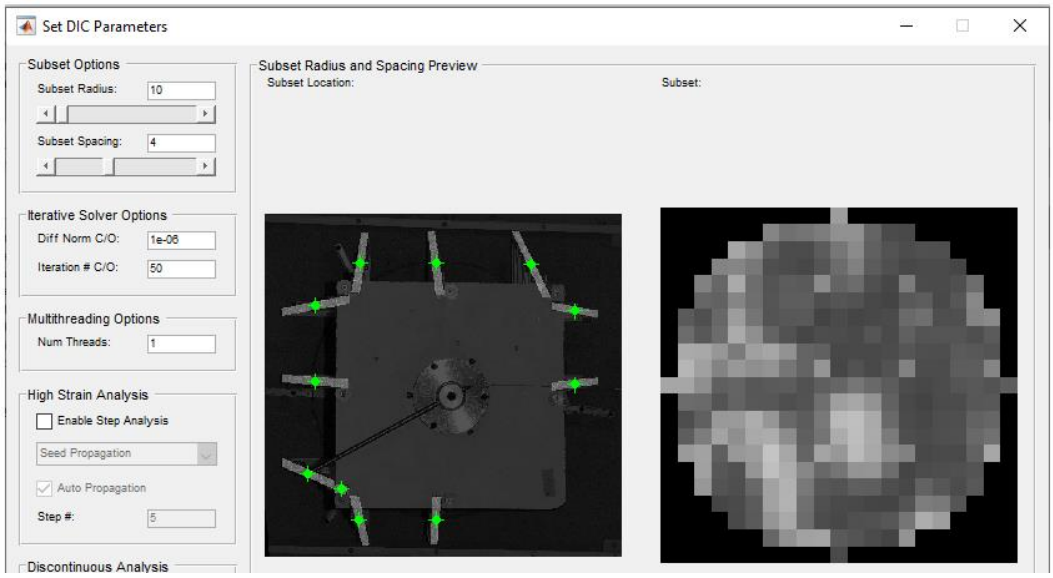
Şekil 11.4’teki görüntüler, 24 Mega piksel Nikon D5300 kamera ile çekilen laboratuvardaki test modelini göstermektedir. Şekil 11.5, MATLAB® platformunda Ncorr tarafından kullanılan DIC sürecinin iş akışını göstermektedir. Bu şekilde, (a) örnek bir referans görüntüdür, (b) daha sonra deforme olmuş belirli bir alanda çekilen örnek bir görüntüdür, (c) 'deki yeşil dikdörtgenler seçilen ilgi bölgesini (ROI) temsil eder, (e) çekirdek yerleştirme, (d) DIC parametrelerinin ayarlanması, (f) ve (h) yatay yükleme yönüne dik bir örnek deplasman alanıdır.



(a) (b)

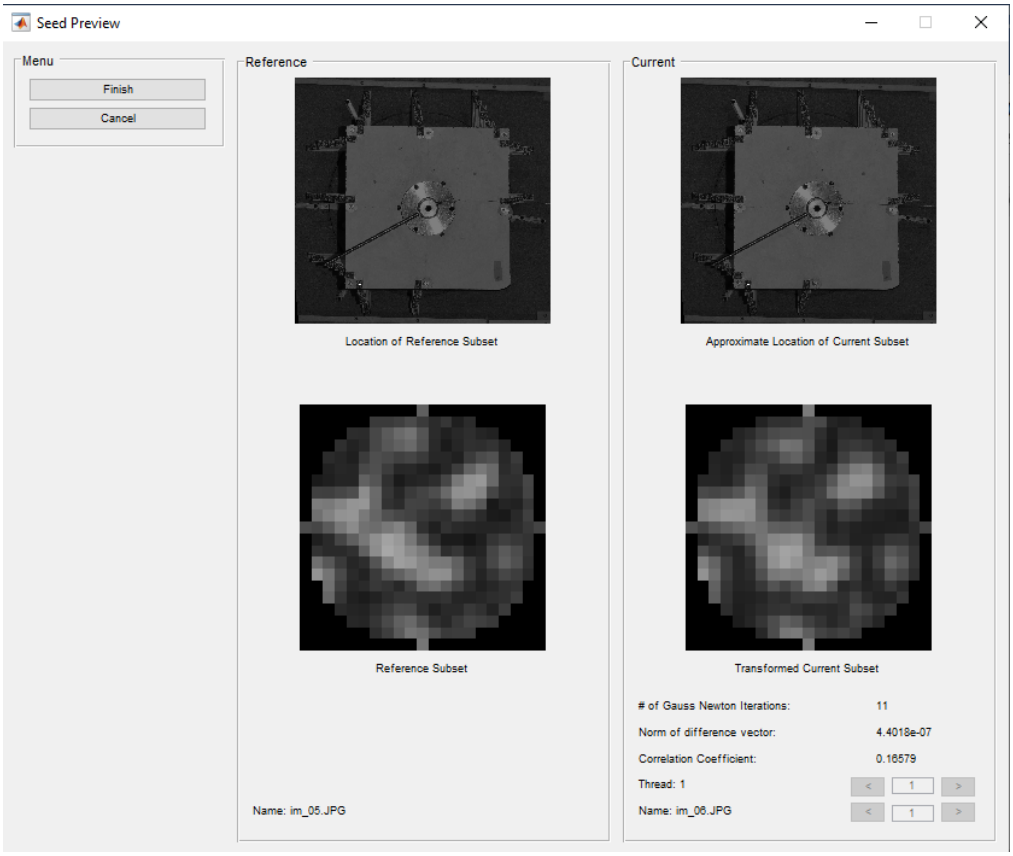


(c)

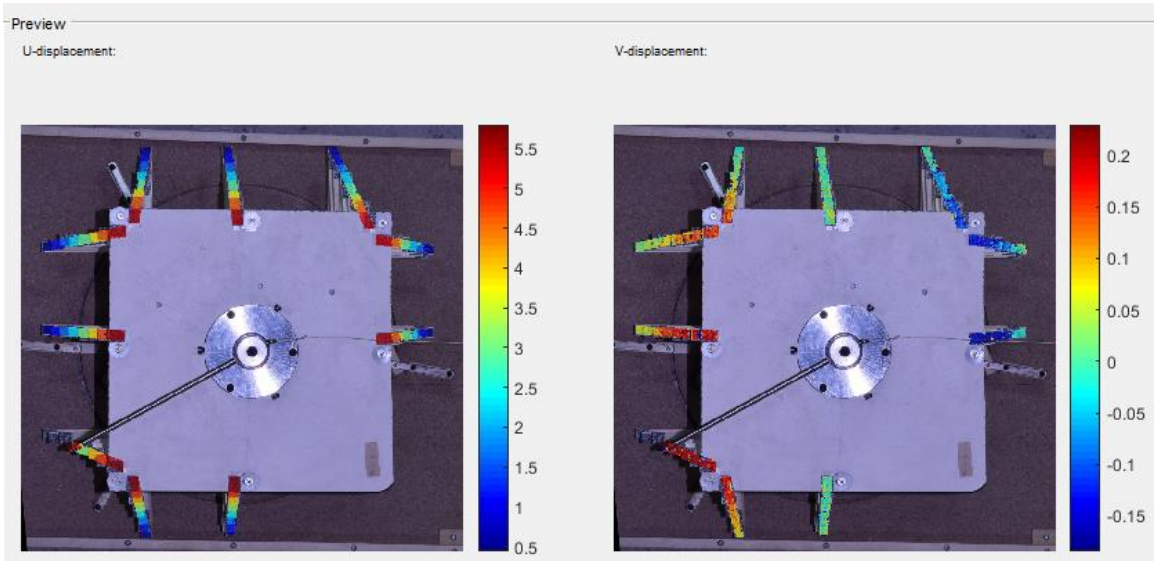


(d)

Şekil 11.5. DIC analiz süreci



(e)



(f) (h)

Şekil 11.5. (Devam) DIC analiz süreci

DIC algoritmalarının ayrıntıları aşağıdaki adreste mevcuttur:
http://www. ncorr.com/index.php/dic-algorithms [64, 70].

11.3. Laboratuvarda Yatay Yük ve Deplasman Hesaplama Yöntemi

11.3.1. Tasarımların hazırlanması

Bu çalışmada, planda düzensiz olan betonarme binaların deprem performanslarının belirlenmesi amacıyla deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deney modeli, temel olarak onuncu bölümdeki birinci örnek optimizasyon uygulamalarının neticesinden elde edilen üç boyutlu, iki açıklıklı, 8 katlı çerçeveden oluşan yapı sistemidir. Deney numunelerin 1/30 oranında modellenmiş ve bu modele raylı bir sistemle birlikte farklı noktalardan ve farklı açılardan yatay yük uygulanmıştır. Yatay yük modele 0'dan başlayarak 15'er derece artımla 180 dereceye kadar on üç (13) farklı açı ile uygulanmıştır.

Numuneler, 3 boyutlu yazıcı ile Akrilonitril Bütadien Stirene (ABS) esaslı eriyik biriktirme modelleme (FDM) teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Deney numunelerin 3B yazıcıda yazdırılabilmesi için 3B modeli AutoCAD 2020 çizim programında tasarlanmış çizimler STL dosya formatına dönüştürülmüştür. Bu formata dönüştürülen dosya daha sonra Z-Suite olarak isimlendirilen Zortrax'ın dilimleme yazılımı yani makine yazılımına aktarılmıştır. Kalitesi yüksek, dolgusu yüksek, dikişi normal seçilmiştir. Uygun fleksibiliteyi ve rijitliği yakalamak için doluluk oranının %80, dolgu kalınlığının da 0,19mm olması uygun görülmüştür. Yazıcıların boyutları (200x200x185)mm^3 olmasından ötürü bina üç parçaya bölünmüş ve her parça tek tek şekilde basılmıştır. Her bir parçanın ağırlığı 150 ila 200 gram arasında değişmektedir. Baskı almadan önce tablanın asetonlanması son derece önemlidir. Tabla sıcaklığı 90 °C – 110 °C arasında olup kullanılan toplam malzeme 58,84N civarındadır. Her bir baskı 16-19 saat civarında tamamlanmıştır. Son olarak, ABS filament kullanılarak 3B yazıcıdan toplam 24 parça basılmıştır. Sonrasında çıkan parçalar MITREAPEL hızlı yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Şekil 11.2'de detaylı olarak gösterilmiş olan deney modelin genel boyutları; her kat kirişi üst kotuna kadar olan mesafe yani her kat yüksekliği 100mm, kiriş kesitleri (8,3/16,7)mm olarak tasarlanmıştır. Yapının plan geometrisi, toplam yüksekliği 800mm olan L şeklinde çerçeve sistemi olarak tasarlanmıştır. Tüm katlar için kat yüksekliği 100mm olarak tutulmuştur. Deney modelin plan geometrisi, her iki eksende (x ve y yönünde) 334mm olup aynı izdüşüm boyutlarına sahiptir. Deney modelin temeli üzerinde bir ölçüm yapılmayacağından, temel rijitliği yüksek tutulmuş, çapı 500mm ve kalınlığı 10mm olacak şekilde üretilmiştir. Her bir kiriş açıklığı 167mm uzunluğa sahiptir ve tüm kiriş boyutlarının (8,3/16,7)mm olduğu varsayılmıştır. Döşeme kalınlığı

5mm'dir. Deney modeli, üstten ekstra kare rijit plakaya monolitik olarak birleştirildi ve boyutları 334mm x 334mm x 10mm olarak üretildi. Üst döşeme ayrıca modele yatay yüklerin uygulandığı elemanlar olarak tasarlanmıştır. Kasayı destekleyen ipten gelen yatay yük 40,0N'a eşittir. Laboratuvar modelinin tekerlekleri ile en üst katı arasındaki mesafe 1m'ye eşittir. Yatay yük, üst kata yerleştirilen 25mm'lik yükleme kollu ile sağlanan X yönünde farklı açılardan en üst kata uygulanmıştır. Döşeme, her kattaki tüm düğümleri sınırlayarak eşit düzlemde yerdeğiştirmeyi kolaylaştırmak için rijit bir diyafram olarak modellenmiştir. Ayrıca planda A3 düzensizliği TDY-2007'de “Bina kat planlarında çıkıntı yapan kısımların birbirine dik iki doğrultudaki boyutlarının her ikisinin de binanın o katının aynı doğrultulardaki toplam plan boyutlarının %20'sinden daha büyük olması durumu” [31] olarak tanımlanmaktadır. Böylece modelde A3 düzensizliği oranı her iki yönde %50 olarak hesaplanmıştır.

Teorik uygulamalarda yer alan model, deney modelin benzer olacak şekilde sonlu eleman analiz (FEM) programda modellenmiş ve bu modele yatay yük 0’dan başlayarak 15’er derece artımla 180 dereceye kadar on üç (13) farklı açı ile uygulanmıştır. Bina yüksekliği boyunca binanın düşey taşıyıcı sistem kesitleri sabit kabul edilmiş ve ankastre olarak mesnetlendirilmiştir. Tüm elemanların verimli bir şekilde birbirine geçmesini sağlayan otomatik bir ağ oluşturma kullanılmış ve ağlar modelin doğruluğunu karşılamak için uygun şekilde seçilmiştir.

Çizelge 11.2. Binadaki kolonların boyutları

Kolon sayısı	1/1 ölçekli kolonlar		1/30 ölçekli kolonlar	
	Derinlik	Genişlik	Derinlik	Genişlik
	b_c (mm)	h_c (mm)	b_c (mm)	h_c (mm)
C1	419,1	482,0	13,97	16,07
C2	393,9	437,4	13,13	14,58
C3	490,9	383,5	16,36	12,78
C4	515,4	501,6	17,18	16,72
C5	518,0	400,9	17,27	13,36
C6	512,3	412,6	17,07	13,75
C7	388,9	466,4	12,96	15,55
C8	392,6	482,5	13,09	16,08

Deney modelinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 11.1'de verilmiştir. Düşey yapı elemanlarının (kolonlar) enkesit boyutları Çizelge 11.2'de verilen boyutlandırılma optimizasyon yöntemleri ile elde edilmiştir.

Şekil 11.6'da ETABS®'daki plan ve 3 boyutlu görünümü ve Şekil 11.7-11.10'da ise laboratuvardaki yatay yükleme sisteminin genel görünümünü göstermektedir. Deneysel ve teorik sonuçlar kıyaslanarak incelenmiş ve çizelgelerde sunulmuştur.

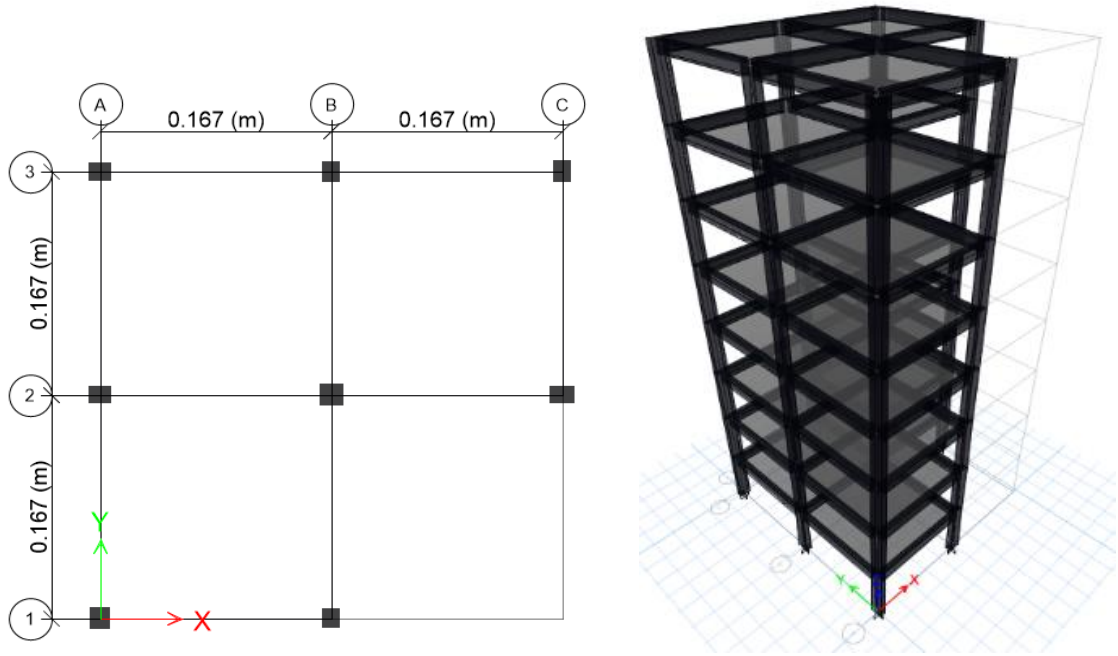
11.2.2. Yapının yükleri ve yük kombinasyonları

Sonlu eleman yöntemi (FEM)'de her kat için döşemede varsayılan ölü yük 5,15kN/mm^2'dir. Yapı, dikkate alınan statik denge koşulu ile yatay olarak 40,0N yüke maruz bırakılmıştır. Yatay yükler herhangi bir açıdan meydana gelebileceğinden, kullanıcıya, rijit bir diyaframdaki yatay yükü deneyin elemanlarına dağıtmak için yatay yükün uygulandığı açıları tanımlama yeteneği sağlanmıştır. Yatay yükler diyaframa yukarıdan aşağıya doğru uygulanmıştır. Her yatay yükleme açısında yerdeğiştirme hesaplamalarında %5 dış merkezlik dikkate alınmıştır. Deprem etkime açısı, Şekil 11.7'de gösterildiği gibi saat yönünün tersine pozitif olarak artar. Her iki yöntemde dolgu duvarların katkısı ihmal edilmektedir.

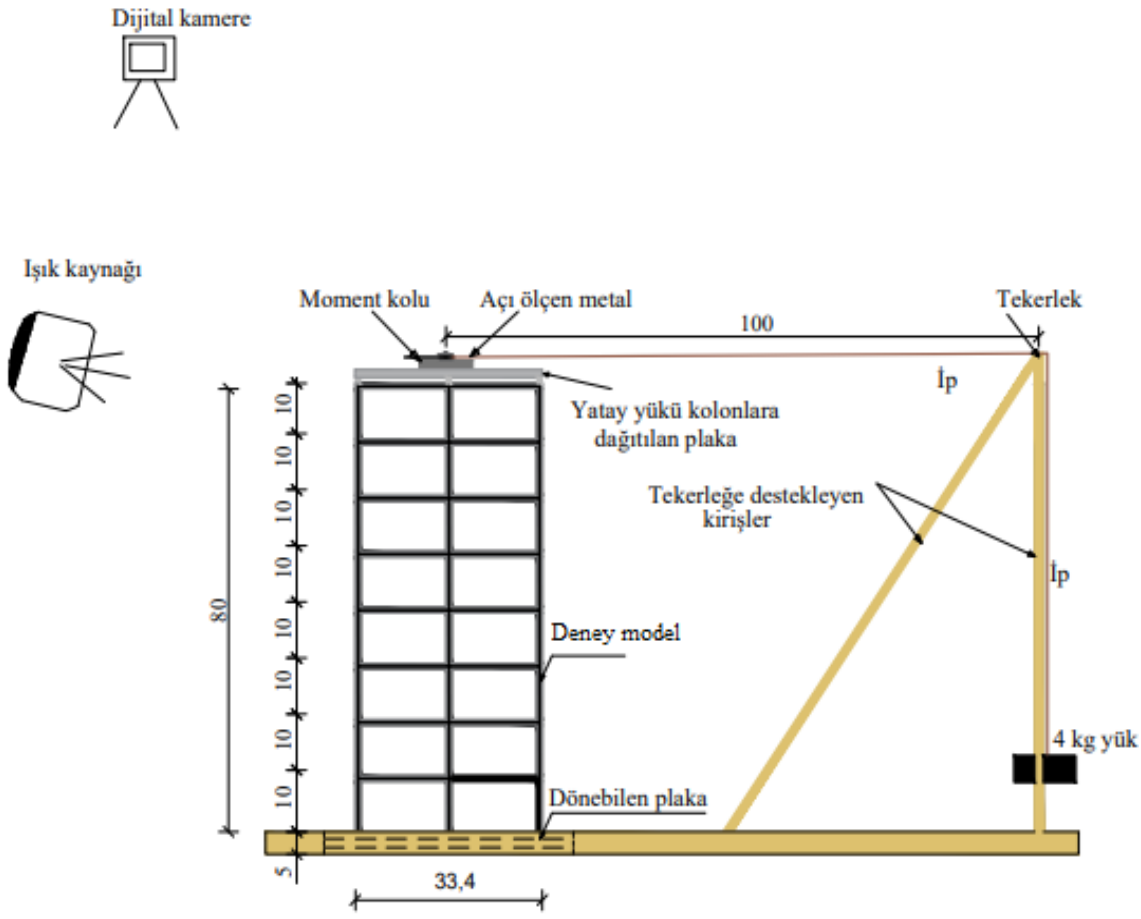
Türk yönetmeliklerine [31] uygun tasarımda ETABS® programı kullanılırken aşağıdaki yük kombinasyonları kullanılmıştır.

$F_d = 1,4G + 1,6Q$
$F_d = G + Q \pm E$
$F_d = 0,9G \pm E$

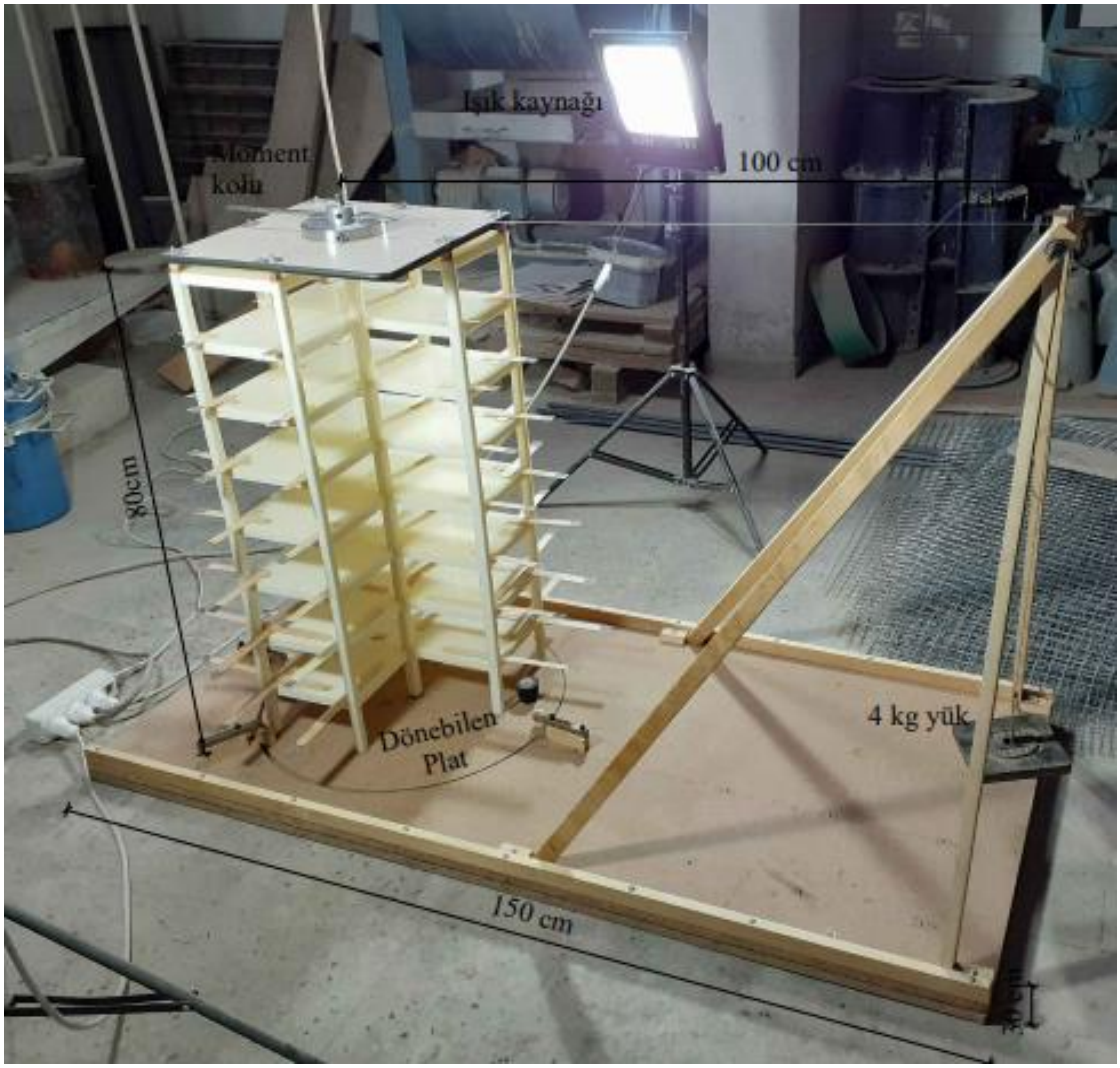
Yukarıdaki denklemlerde (G) sabit yük, (Q) hareketli yük ve (E) deprem yükü gösterilmektedir. Analizde dolgu duvar yüklerinin kirişlere katkısı ve hareketli yükün katkısı ihmal edilmiştir.



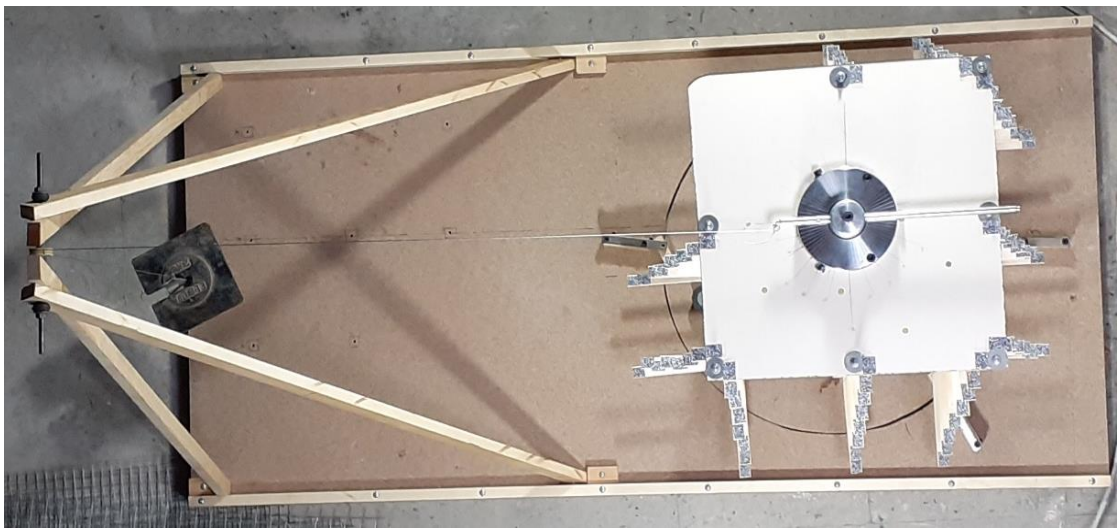
Şekil 11.6. Sonlu Eleman Modellemede plan ve 3B görünüm



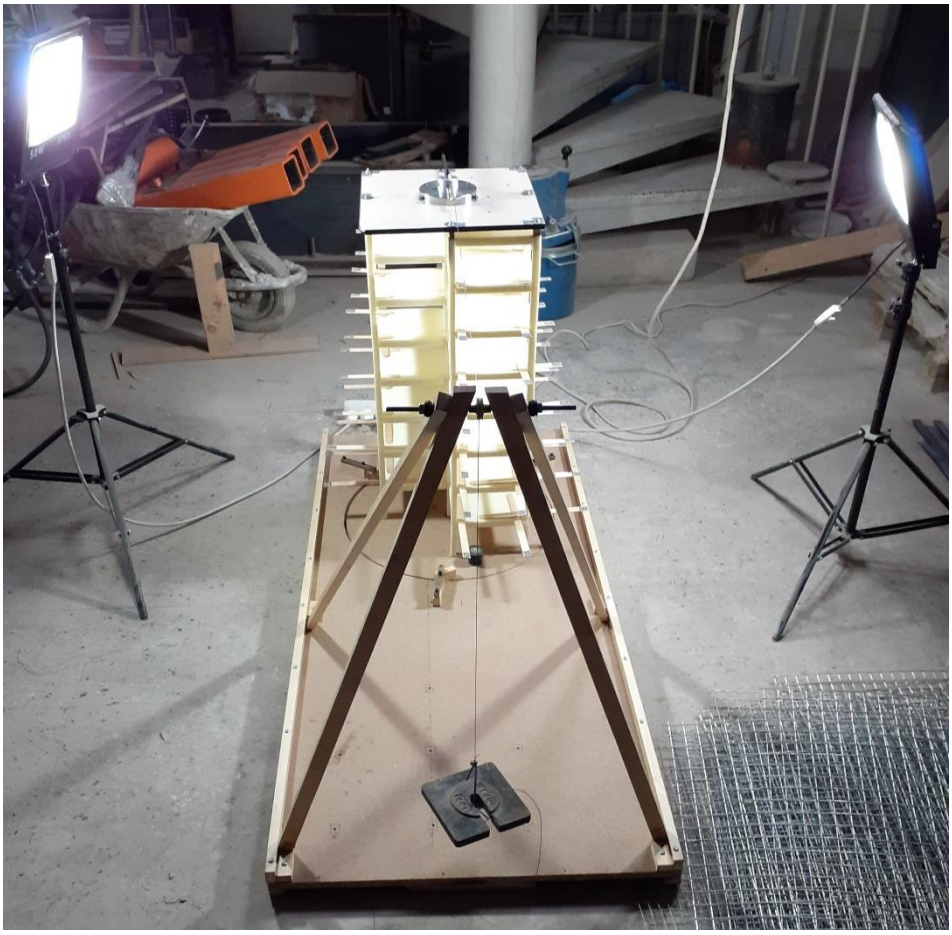
Şekil 11.7. DIC ile ölçüm yapılırken kullanılan araçlar

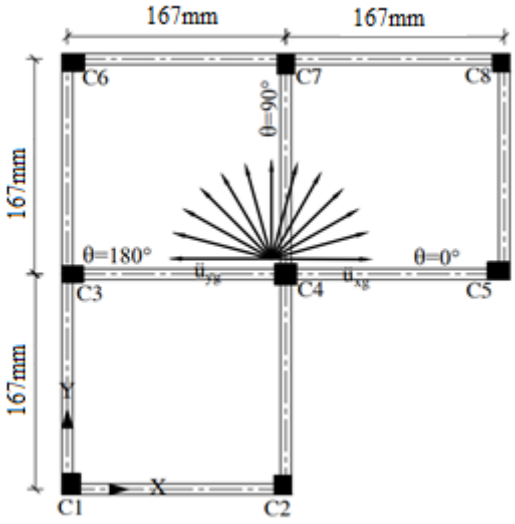


Şekil 11.8. Laboratuvarda yükleme aparatı



Şekil 11.9. Laboratuvarda yükleme tipi ($0^o \leq \Theta \leq 180^o$)







Şekil 11.10. Laboratuvarda yükleme tipi ($0^o \leq \Theta \leq 180^o$)

Şekil (11.7-11.10)'da görüldüğü gibi laboratuvarda, x doğrultusunda raylı bir sistem yardımıyla deney modelin en üst katına 40,0N'luk yatay yük uygulanmıştır.

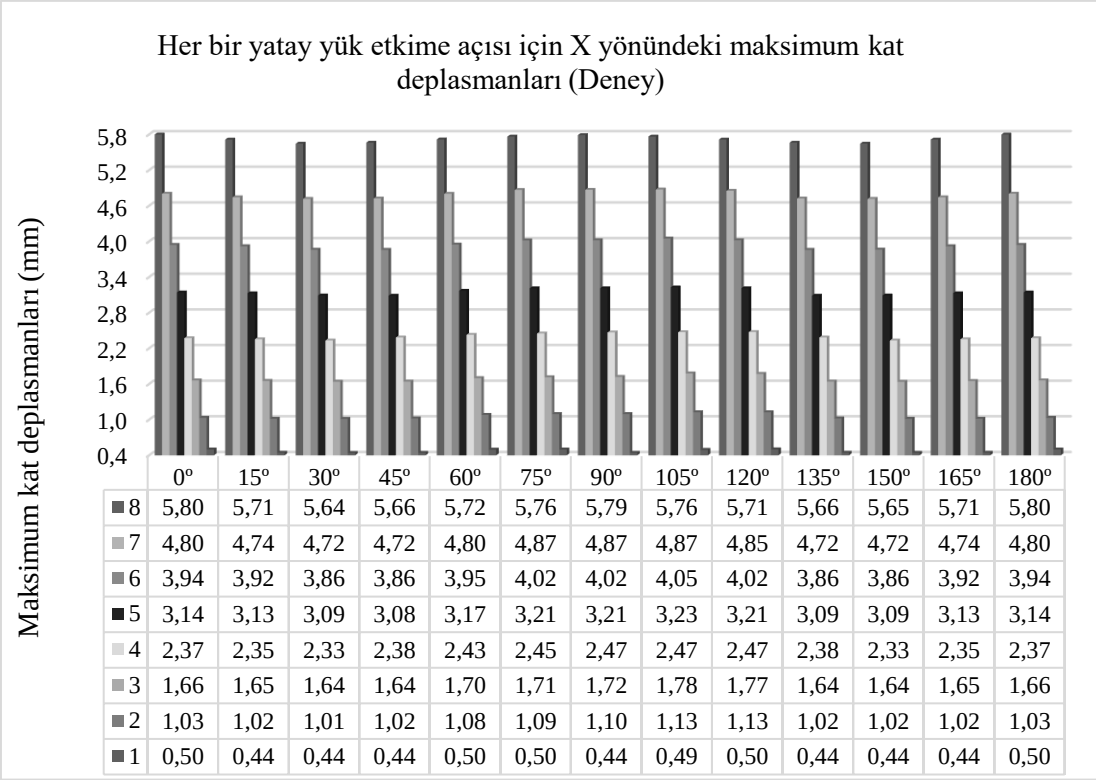
11.4. Tartışmalar ve Değerlendirmeler

Yatay yüklerin farklı yönleri altında planda düzensizliğe sahip betonarme binaların sismik davranışlarını değerlendirmek için kritik deprem etkime açısını ve buna karşılık gelen yapısal talebini araştırmak amacıyla doğrusal statik analiz yapılmıştır. Önerilen metodolojinin değerlendirilmesi için gerçek yapılara karşılık gelen 3 boyutlu sekiz katlı bina düşünülmüştür. İncelenen binanın $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ derece arasında 15°'er derecelik yükleme açıları için analizler yapılmış ve bina deformasyonunun deprem doğrultusuna bağlı değişimi belirlenmiştir. Deplasman tepkisi, modelin üst katına X yönünde farklı açılardan 4kg yatay yük uygulanarak elde edilmiştir. Yapının sismik davranışı yalnızca X yönündeki yatay yükleme için incelenmiştir. Bu nedenle, modelin çoğu deformasyonu X yönünde aşağı doğru bir deplasman olarak meydana gelirken, Y yönünde daha az deformasyona sahiptir.

Kuvvetli deprem etkime açısını belirlemek için değerleri 15 derecelik artışlarla 0 ile 180 derece arasında değişen on üç (13) deprem etkime açısı dikkate alınarak maksimum yatay deplasmanların değişimi Çizelge 11.3 ve 11.4 'te verilmiştir. Çizelgelerde görüleceği gibi yatay yükün açılarına bağlı olarak deplasmanların değiştiği görülmektedir. Yatay deplasmanlar, tüm analizler için binanın yüksekliği ile artar. Çizelge 11.3, deprem etkime açısı etkisini daha doğru değerlendirmek için her bir açıda toplam fark değerlerini göstermektedir. Bu deplasmanların pozitif yönleri Şekil (11.11- 11.14)'te gösterilmektedir. Sonlu eleman modelleme (FEM) analizi ve deneysel (DIC) sonuçları aşağıda karşılaştırılmıştır;

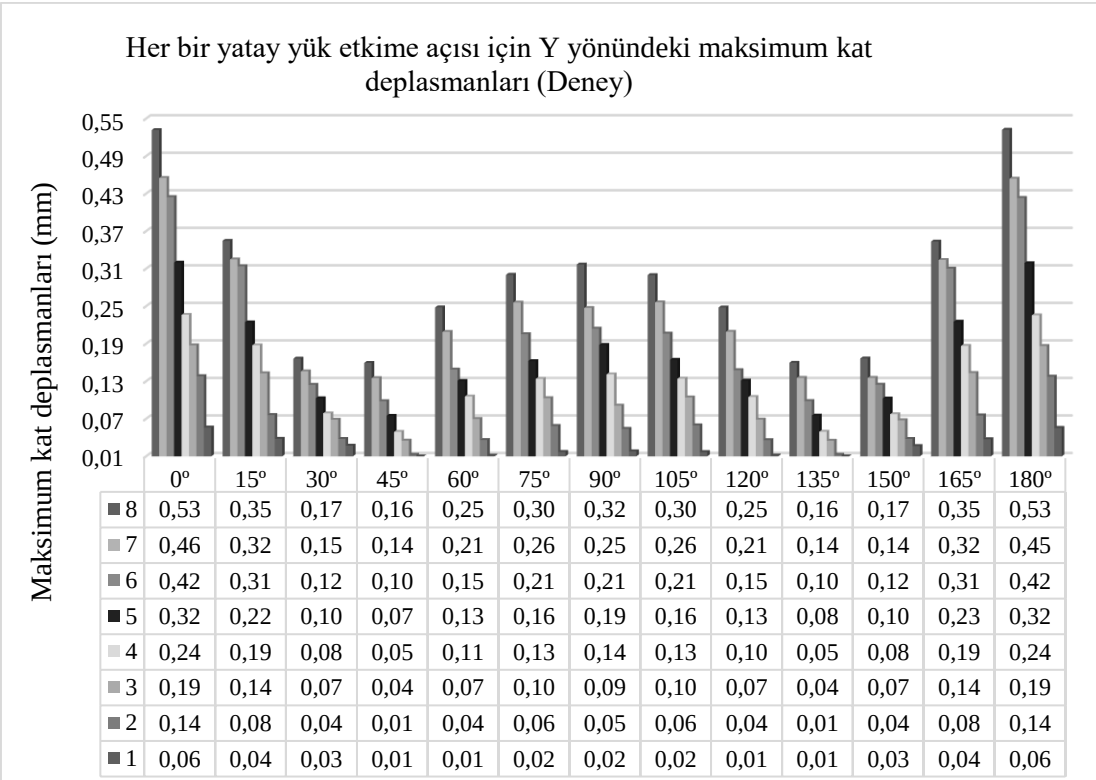
11.4.1. Deneysel sonuçlar

24 Mega piksel çözünürlüklü Nikon D5300 kamera ile deney modelinden yatay olarak yüklenmeden önce ve sonra toplam 26 görüntüsü alınmıştır. Deplasman talepleri, referans görüntüdeki deforme olmamış alt kümeler ile sonraki görüntülerde deforme olmuş alt kümelerin karşılaştırılmasıyla hesaplanmıştır. Deneysel analiz sonuçları, her iki eksende yatay yükün açısına bağlı maksimum kat deplasman talebi önemli orandaki değişimi, Çizelge 11.3 ve 11.4 'te ve Şekil (11.11, 11.12 ve 11.15- 11.18) 'de gösterilmiştir:



	0º	15º	30º	45º	60º	75º	90º	105º	120º	135º	150º	165º	180º
8	5,80	5,71	5,64	5,66	5,72	5,76	5,79	5,76	5,71	5,66	5,65	5,71	5,80
7	4,80	4,74	4,72	4,72	4,80	4,87	4,87	4,87	4,85	4,72	4,72	4,74	4,80
6	3,94	3,92	3,86	3,86	3,95	4,02	4,02	4,05	4,02	3,86	3,86	3,92	3,94
5	3,14	3,13	3,09	3,08	3,17	3,21	3,21	3,23	3,21	3,09	3,09	3,13	3,14
4	2,37	2,35	2,33	2,38	2,43	2,45	2,47	2,47	2,47	2,38	2,33	2,35	2,37
3	1,66	1,65	1,64	1,64	1,70	1,71	1,72	1,78	1,77	1,64	1,64	1,65	1,66
2	1,03	1,02	1,01	1,02	1,08	1,09	1,10	1,13	1,13	1,02	1,02	1,02	1,03
1	0,50	0,44	0,44	0,44	0,50	0,50	0,44	0,49	0,50	0,44	0,44	0,44	0,50

Şekil 11.11. X yönündeki kat maksimum yatay deplasmanların değişimi



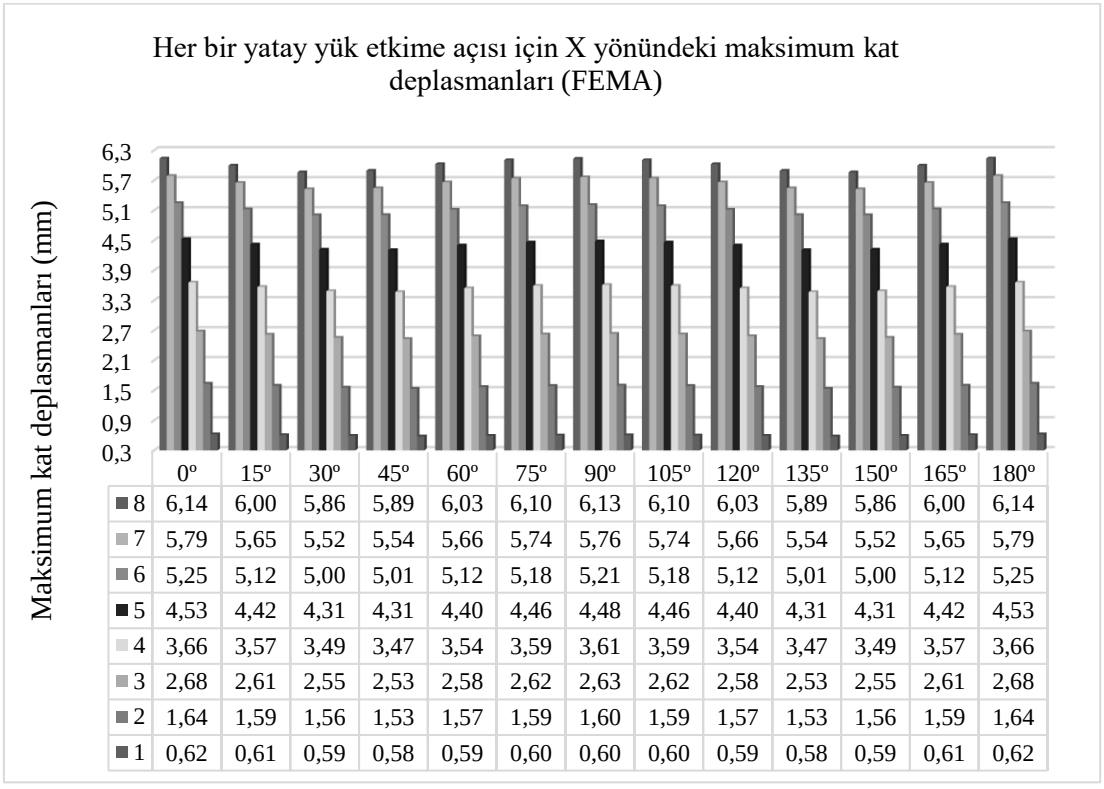
	0º	15º	30º	45º	60º	75º	90º	105º	120º	135º	150º	165º	180º
8	0,53	0,35	0,17	0,16	0,25	0,30	0,32	0,30	0,25	0,16	0,17	0,35	0,53
7	0,46	0,32	0,15	0,14	0,21	0,26	0,25	0,26	0,21	0,14	0,14	0,32	0,45
6	0,42	0,31	0,12	0,10	0,15	0,21	0,21	0,21	0,15	0,10	0,12	0,31	0,42
5	0,32	0,22	0,10	0,07	0,13	0,16	0,19	0,16	0,13	0,08	0,10	0,23	0,32
4	0,24	0,19	0,08	0,05	0,11	0,13	0,14	0,13	0,10	0,05	0,08	0,19	0,24
3	0,19	0,14	0,07	0,04	0,07	0,10	0,09	0,10	0,07	0,04	0,07	0,14	0,19
2	0,14	0,08	0,04	0,01	0,04	0,06	0,05	0,06	0,04	0,01	0,04	0,08	0,14
1	0,06	0,04	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,04	0,06

Şekil 11.12. Y yönündeki kat maksimum yatay deplasmanların değişimi

Yukarıda belirtilen çizelge ve şekillerden de anlaşılacağı üzere deplasman değerleri yatay yükün farklı açıları ile değişmektedir. X yönünde maksimum ve minimum üst kat deplasmanları 0° ve 30° için 5,798 mm ve 5,644 mm, Y yönünde 0° ve 45° mm için 0,153mm olarak elde edilmiştir. Etkili kat deplasmanı, Y yönünde daha düşük değerler göstermiştir. Yapının davranışı sadece X yönündeki yatay yükleme için incelendiğinden, deformasyonun çoğu modelin X yönünde aşağı doğru bir deplasman olarak meydana gelmiştir. X ve Y yönündeki maksimum kat deplasmanlarındaki değişiklikler Şekil (11. 11 ve 11. 12) 'da gösterilmektedir.

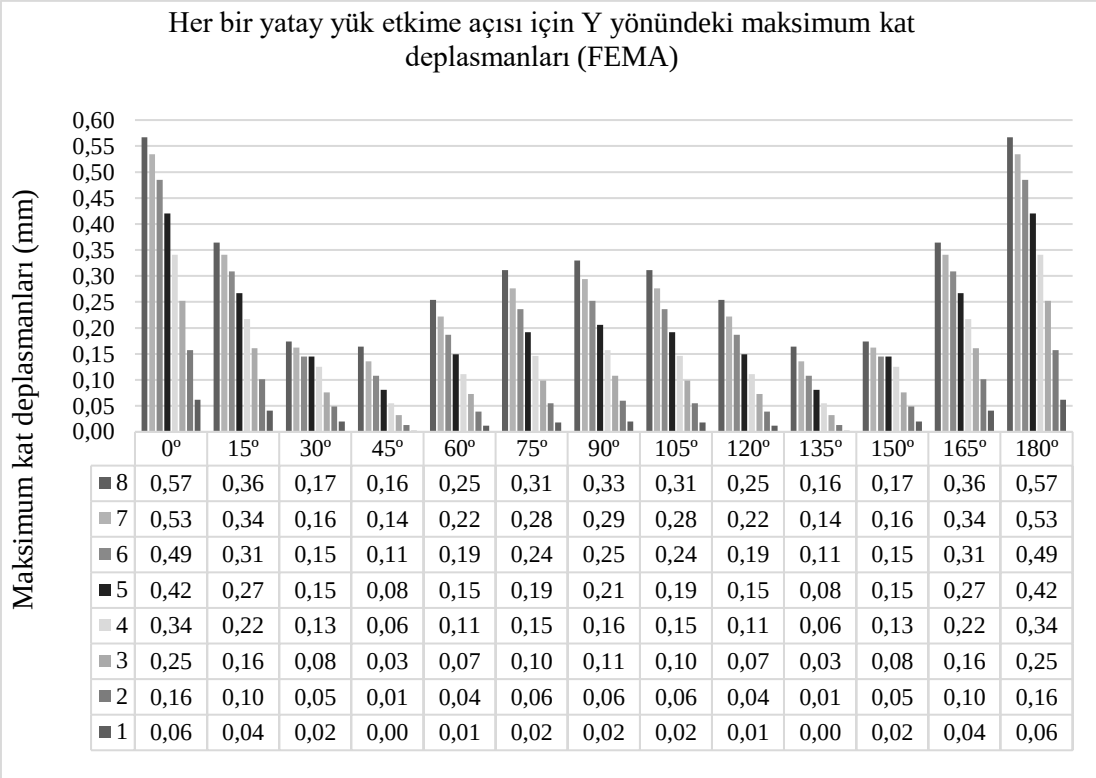
11.4.2. Sonlu eleman modelleme sonuçları

Kuvvetli deprem etkime açısını belirlemek için değerleri 15 derecelik artışlarla 0 ile 180 derece arasında değişen on üç (13) deprem açısı dikkate alınarak maksimum yatay deplasmanların değişimi Şekil (11.13 ve 11.14) 'de verilmiştir. Maksimum deplasmanların deprem yükü açısı ile farklı bir yönde değiştiği görülmektedir. Maksimum ve minimum üst kat deplasmanlar X yönünde 0° ve 30° için 6,137 mm ve 5,86 mm ve Y yönünde 0º ve 45° için 0,56 mm ve 0,164 mm olarak elde edilmiştir.



	0º	15º	30º	45º	60º	75º	90º	105º	120º	135º	150º	165º	180º
8	6,14	6,00	5,86	5,89	6,03	6,10	6,13	6,10	6,03	5,89	5,86	6,00	6,14
7	5,79	5,65	5,52	5,54	5,66	5,74	5,76	5,74	5,66	5,54	5,52	5,65	5,79
6	5,25	5,12	5,00	5,01	5,12	5,18	5,21	5,18	5,12	5,01	5,00	5,12	5,25
5	4,53	4,42	4,31	4,31	4,40	4,46	4,48	4,46	4,40	4,31	4,31	4,42	4,53
4	3,66	3,57	3,49	3,47	3,54	3,59	3,61	3,59	3,54	3,47	3,49	3,57	3,66
3	2,68	2,61	2,55	2,53	2,58	2,62	2,63	2,62	2,58	2,53	2,55	2,61	2,68
2	1,64	1,59	1,56	1,53	1,57	1,59	1,60	1,59	1,57	1,53	1,56	1,59	1,64
1	0,62	0,61	0,59	0,58	0,59	0,60	0,60	0,60	0,59	0,58	0,59	0,61	0,62

Şekil 11.13. X yönündeki kat maksimum yatay deplasmanların değişimi

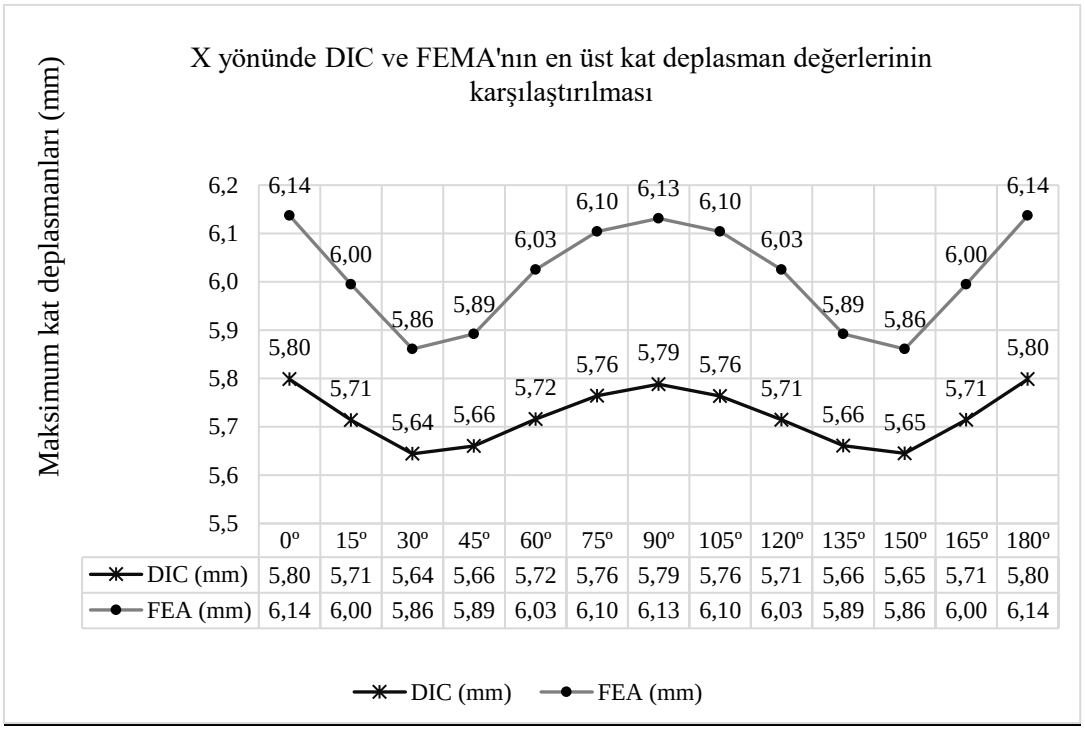


	0º	15º	30º	45º	60º	75º	90º	105º	120º	135º	150º	165º	180º
8	0,57	0,36	0,17	0,16	0,25	0,31	0,33	0,31	0,25	0,16	0,17	0,36	0,57
7	0,53	0,34	0,16	0,14	0,22	0,28	0,29	0,28	0,22	0,14	0,16	0,34	0,53
6	0,49	0,31	0,15	0,11	0,19	0,24	0,25	0,24	0,19	0,11	0,15	0,31	0,49
5	0,42	0,27	0,15	0,08	0,15	0,19	0,21	0,19	0,15	0,08	0,15	0,27	0,42
4	0,34	0,22	0,13	0,06	0,11	0,15	0,16	0,15	0,11	0,06	0,13	0,22	0,34
3	0,25	0,16	0,08	0,03	0,07	0,10	0,11	0,10	0,07	0,03	0,08	0,16	0,25
2	0,16	0,10	0,05	0,01	0,04	0,06	0,06	0,06	0,04	0,01	0,05	0,10	0,16
1	0,06	0,04	0,02	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,02	0,04	0,06

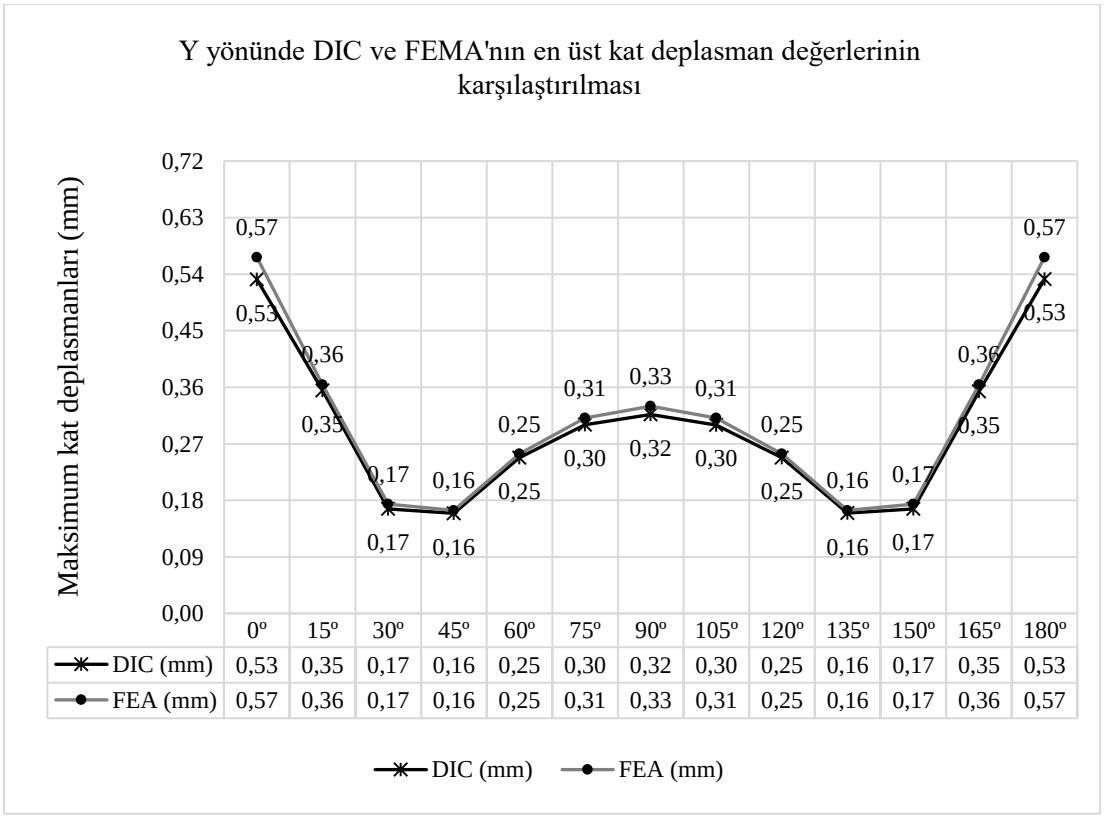
Şekil 11.14. Y yönündeki kat maksimum yatay deplasmanların değişimi

11.4.3. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Deneysel sonuçların ve sonlu eleman analizi sonuçlarının karşılaştırılması daha detaylı olarak Çizelge 11.3 & 11.4 ve Şekil 11.15 & 11.16' da gösterilmektedir. Bu karşılaştırma neticesinde her iki analiz yöntemi için de yatay yükün etkime açısını artıran benzersiz bir özel açının olmadığı görülmüştür. Deprem etkime açısına karşı maksimum kat deplasman değerleri Çizelge 11.3'te gösterilmektedir. Çizelge 11.4, deprem etkime açısı etkisini daha doğru değerlendirmek için her açıdaki maksimum farkları ve toplam fark değerlerini sunmaktadır. Çizelge 11.4'te görüleceği gibi sonlu eleman modelleme analizinde maksimum kat deplasmanı, yatay yük 0° ve 180° derece uygulandığında meydana gelmiş ve değer önceki açı değişikliğine göre bir sonraki açıya göre %2,37 artmıştır. Aynı zamanda deneysel sonuçlarında maksimum kat deplasmanı, yatay yük 0° ve 180° derece uygulandığında meydana gelmiş ve değer önceki açı değişikliğine göre bir sonraki açıya göre %1,47 artmıştır. Yani hem deneysel sonuçlar hem de sonlu eleman analizi sonuçları için depremin benzersiz bir açısı yoktur.



Şekil 11.15. X yönünde en üst kat deplasman değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 11.16. Y yönünde en üst kat deplasman değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 11.3. Her yatay yük açısı için üst kat deplasman değerlerinin karşılaştırılması

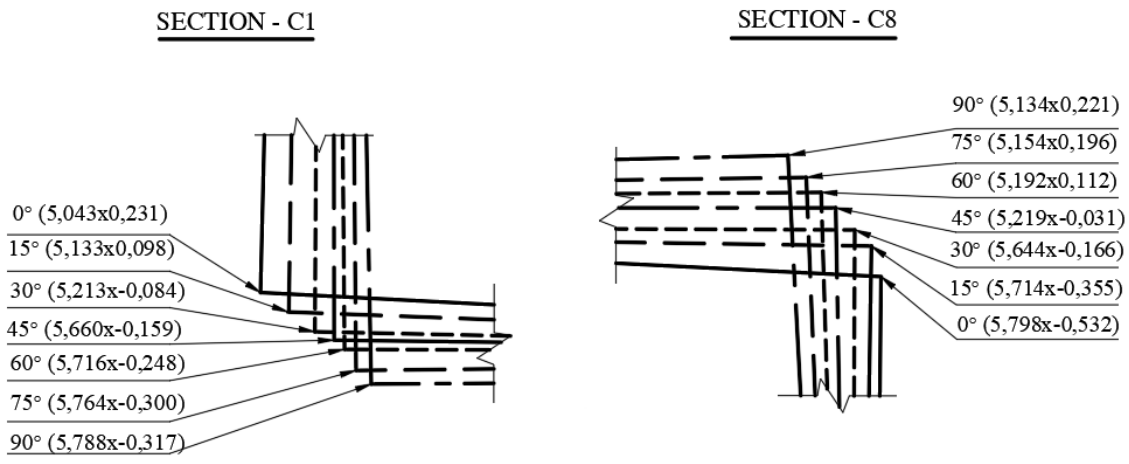
Her yatay yük açısı için FEMA ve DIC yöntemlerinin en üst kat deplasman değerlerinin karşılaştırılması						
Yatay yük açısı (Derece)	X yönünde maksimum deplasman (mm)			Y yönünde maksimum deplasman (mm)		
	FEMA	DIC	Error (%)	FEMA	DIC	Error (%)
0º	6,137	5,798	5,5	0,567	0,532	6,2
15º	5,995	5,714	4,7	0,364	0,355	2,6
30º	5,861	5,644	3,7	0,174	0,166	4,5
45º	5,892	5,660	3,9	0,164	0,159	2,9
60º	6,025	5,716	5,1	0,254	0,248	2,3
75º	6,104	5,764	5,6	0,311	0,300	3,5
90º	6,131	5,788	5,6	0,33	0,317	4,0
105º	6,104	5,763	5,6	0,311	0,300	3,6
120º	6,025	5,714	5,2	0,254	0,248	2,4
135º	5,892	5,661	3,9	0,164	0,160	2,7
150º	5,861	5,645	3,7	0,174	0,166	4,4
165º	5,995	5,715	4,7	0,364	0,353	2,9
180º	6,137	5,798	5,5	0,567	0,532	6,2

Deney çalışmalarındaki sonuçların hepsinin Şekil 11.17 ve 11.18' de görülebilenleri desteklediği belirtilmelidir. Daha fazla ayrıntı için, C1 ve C8 kolonlarında üst katlardaki her bir yatay yük açısı için yerdeğiştirmelerdeki maksimum farklılıklar Şekil 11.17' de gösterilmiştir.

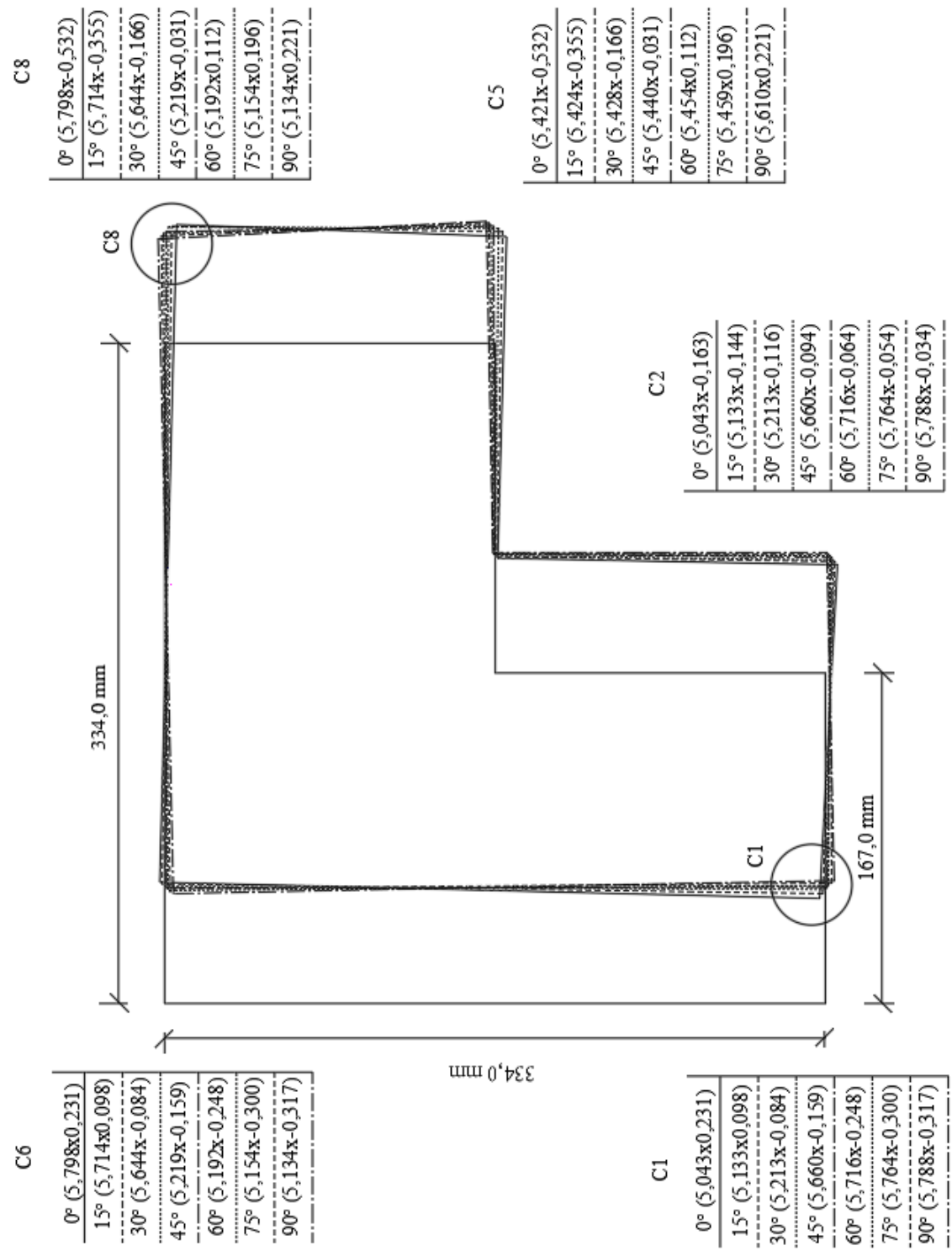
Şekil 11.18, üst katlardaki her bir deprem yükü açısı için deplasmanların maksimum farklılıklarını göstermektedir. Şekil 11.18'de görüleceği gibi maksimum deplasmanların deprem etkime açıları ile değiştiği görülmektedir. Ayrıca yatay deplasmanın tüm yükleme yönlerinde birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 11.4. X yönünde üst kattaki deplasmanlarının maksimum farklar

Her yatay yük açısı için üst kattaki deplasmanlarının maksimum farklar				
Yatay yük açısı (Derece)	X yönünde maksimum deplasman			
	FEMA (mm)	Varyasyonu (%)	DIC (mm)	Varyasyonu %
0º	6,137		5,798	
15º	5,995	2,31	5,714	1,45
30º	5,861	2,24	5,644	1,23
45º	5,892	-0,53	5,660	-0,29
60º	6,025	-2,26	5,716	-0,99
75º	6,104	-1,31	5,764	-0,84
90º	6,131	-0,44	5,788	-0,42
105º	6,104	0,44	5,763	0,43
120º	6,025	1,29	5,714	0,85
135º	5,892	2,21	5,661	0,93
150º	5,861	0,53	5,645	0,28
165º	5,995	-2,29	5,715	-1,23
180º	6,137	-2,37	5,798	-1,47



Şekil 11.17. Üst katlarda maksimum yatay deplasmanların değişimi



Şekil 11.18. Maksimum üst kattaki yatay deplasmanların değişimi

Her yatay yük etkisi altında binada meydana gelen yatay deplasmanların 0º- 90º ile 90º- 180º derecedeki sonuçları birbirine yakın çıktığından dolayı şekil 11.17 ve 11.18'de görünüş kolaylığı sağlamak için bina köşelerine sadece 0º- 90º derecedeki deplasmanlar çizilmiştir.

11.5. Sonuçlar

Bu bölümde, deprem etkime açısının optimize edilmiş planda düzensiz olan betonarme binaların sismik performansı üzerindeki etkisi hakkında teorik ve deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Boyutlandırma optimizasyonu sonucunda elde edilen bina üzerinden deprem yüklerindeki açı değişikliğinin etkileri davranışı tespit edilmeye çalışılmıştır. Maksimum kat deplasmanlarının varyasyonu, genetik algoritma uygulamalarının düzensiz yapıların sismik performans üzerindeki etkisini belirlemek için dikkate alınmıştır.

Deneyde incelenen model, çeşitli mühendislik uygulamaları için uygun olan Akrilonitril Bütadien Stirene (ABS) esaslı eriyik biriktirme modelleme (FDM) teknolojisi ile Zortrax M200 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Deney modelin, kolon boyutları genetik algoritma yöntemi ile belirlenmiş olmakla beraber 3 boyutlu 8 katlı bir bina 1/30 oranında modellenmiş ve bu modele raylı bir sistemle birlikte farklı açılardan yatay yük uygulanmıştır. İncelenen modelin plandaki asal eksenleri ile 0˚ ~ 180˚ arasında 15˚'lik yükleme açıları için analizleri yapılmış ve katlardaki deplasmanların yatay yükü doğrultusuna bağlı değişimi belirlenmiştir. Deplasman değerleri Dijital Görüntü Korelasyon (DIC) tekniği kullanılarak hesaplanmıştır. Yatay yükleme darbe testinin 26 görüntüsünden (13 yüklemeden önce ve 13 yüklemeden sonra) görüntü korelasyonu ile deplasman türetmek mümkün olmuştur.

Bu çalışmanın en önemli bulguları şu şekilde özetlenebilir:

Yukarıda bahsedildiği üzere deprem etkime açısı etkisini belirlemek için, değerleri 0° ile 180° derece arasında değişen ve 15 derecelik artışlarla on üç (13) deprem etkime açısı dikkate alınarak maksimum yatay deplasmanların varyasyonu Çizelge 11.3 ve 11.4 'te verilmiştir. Deneysel sonuçlarda, üst katlarda maksimum ve minimum yatay deplasmanlar X yönünde 0º ve 30º için 5,798 mm ve 5,644 mm, Y yönünde 0º ve 45º için ise 0,532 mm ve 0,159mm olarak elde edilmiştir. Ayrıca FEM analizinde, üst katlarda maksimum ve minimum yatay deplasmanlar X yönünde 0º ve 30º için 6,137 mm ve 5,85 mm, Y yönünde 0º ve 45º için ise 0,567 mm ve 0,164mm olarak elde edilmiştir. İki komşu açıya göre maksimum farklar X yönleri için FEMA'da %2,37 ve deneyde %1,47 olarak hesaplanmıştır.

Varyasyonlar, önceki açı değişikliğine göre bir sonraki açı değişikliğinin yüzde artışı olarak hesaplanmıştır.

Deneysel sonuçların ve sonlu eleman analizi sonuçlarının karşılaştırılması daha detaylı olarak Şekil 11.15 ve 11.16'da gösterilmiştir. Bahsedilen şekillerden de anlaşılacağı üzere deplasman değerleri yatay yükün farklı açıları ile değişmektedir.

Yukarıda bahsedilen çizelgeler ve şekillerin incelenmesinde görüldüğü gibi deneysel ve sonlu eleman analizi çalışmalarının sonuçları karşılaştırıldığında, aralarında iyi bir uyumun olduğu görülmüştür. Ayrıca yatay deplasmanlar tüm yükleme yönlerinde birbirine çok yakın bulunmuştur.

Çalışmanın sonu; deneysel ve teorik analizlerin sonuçlarında, optimize edilmiş planda düzensizliğe sahip bina, yatay yük etkime açılarına maruz kaldığında sismik performansını yükselttiği açıktır. Ayrıca her iki yöntem için deprem etkime açısını artıran benzersiz bir özel açısının olduğu söylenemez. Bu iki yöntem istatiksel olarak karşılaştırıldığında aradaki maksimum farkın %2,37 civarında olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak deneysel çalışmalar doğrultusunda geliştirilen genetik algoritma yönteminin tatmin edici sonuçlar verdiği ispatlanmıştır.

Deney, Türkiye'de Gazi Üniversitesi Yapısal Mekanik Laboratuvarı'nda öğrenci tarafından maliyeti karşılanarak gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının sonunda da belirtildiği üzere çalışma TDY-2007 yönetmeliğine göre yapılmıştır ancak belirtilen yönetmelik TBDY-2018’den sonra yayından kaldırılmıştır. Bu durumda sunulan çalışmanın TBDY-2018’den önce yapıldığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Bir Genetik Algoritma uygulaması olduğundan eski veya yeni yönetmeliğin kullanılması önemsizdir. Ancak çalışma içerisinde eski yönetmeliğin kullanıldığı belirtilmelidir.

12. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı, planda düzensiz olan betonarme binaların statik ve dinamik yükler etkisi altındaki performansı açısından optimum tasarımı elde etmektir. Yapay Zekanın gittikçe genişleyen bir kolu olan Genetik Algoritma (GA) yöntemi ile planda düzensiz yapıların kütle merkezi ve rijitlik merkezleri arasında oluşan dışmerkezliğinin yok edilmesi, optimum sismik göreli kat öteleme performans tasarımı ve bunlara bağlı olarak burulma dengeli yapılar üretilebilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefleri gerçekleştirmek için çerçeve ve perde-çerçeveye dayanan taşıyıcı sistemleri kolon ve perdelerinin kesit boyutları açısından optimum tasarımını elde edebilecek MATLAB® programında optimizasyon modelleri geliştirilmiştir. Bu amaçla betonarme bina modelleri çeşitli sistemleri; tek katlı binalar (rijit diyafram kabulü L şekline sahip) ve çok katlı binalar (rijit diyafram kabulü L şekline olan ve esnek diyafram kabulü döşeme süreksizliği olan) statik ve dinamik yükleme sistemleri altındaki yapısal davranışı (dışmerkezlik değeri ve burulma düzensizliği katsayısı) incelenmiş ve daha sonra optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon problemi gerçekleştirilirken, yine de betonarme yapılar için Türk Deprem Yönetmeliği gerekliliklerinin mukavemet ve hizmete elverişlilik kısıtlamaları karşılanmaktadır. Ayrıca uygulanmış GA performansının etkinliği deneysel olarak geçerliliği kanıtlanmış olan bir bina model üzerine çalışma yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada yatay yükler altındaki 8 katlı iskelet sistem deplasman durumları belirlenmiştir.

Boyutlandırma optimizasyon amacıyla tek katlı düzensiz binalarının statik dışmerkezliğini belirlemek için matematiksel modeller MATLAB® kullanılarak geliştirilmiştir. Benzer şekilde çok katlı düzensiz binalarının sismik tepki davranışlarının belirlemek için matematiksel modeller, FEM yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Modeller, Eşdeğer Statik Yük yöntemi (ESLM) ve Tepki Spektrum Analiz (RSA) Yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Analizde toplam 65 tip yük kombinasyonu dikkate alınmıştır. Bu çalışmanın sonuçları aşağıda açıklanmış ve uygulamaya yönelik öneriler sunulmuştur.

Yukarıdaki bölümlerin her birinin sonunda, o bölümle ilgili sonuçlar açıklanmış bulunmaktadır. Burada çeşitli bölümlerde elde edilen sonuçların en önemli olanları sıralanacak ve uygulama ile ilgili öneriler sunulacaktır.

12.1. Düzensizlikten Elde Edilen Sonuç ve Öneriler

12.1.1. Tek katlı L şekilli binalardan elde edilen sonuçlar

Yapıların her katında oluşan dışmerkezlik mesafelerinin rijitlik düzensizlikleri, geometrik düzensizliklere göre dışmerkezlik değerlerini daha fazla etkilemiştir. Özellikle perde-çerçeve taşıyıcı sistemli binalarda dışmerkezlik mesafesi, çerçeve taşıyıcı sistemli binalara göre daha yüksek değer almıştır. Ayrıca bu bölümde, kritik deprem yükleri altındaki en elverişsiz tesirleri elde etmek için, binanın tipine göre 'düşük ve yüksek dışmerkezliğin nasıl farklılık göstereceği de araştırılmıştır. Bu amaçla rijit davranışı gösteren tek katlı her iki yönde iki açıklık çerçeve taşıyıcı sistem modeli MATLAB®'da oluşturulmuştur. Modele, deprem etkime açıların 0'dan başlayarak 15'er derecelik artımlarla 90 dereceye kadar 7 farklı açı ile yük uygulanarak birçok duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak bina, deprem etkime açısına göre en elverişsiz tesirlerin oluştuğu dışmerkezlik değerinde değişkenlik gösterdiği ispatlanmıştır.

12.1.2. İki boyutlu çok katlı L şekilli binalardan elde edilen sonuçlar

Binaların L şeklindeki plan düzensizliğine neden olan A1 ve A3 tipi düzensizliklerin deprem performansına olumsuz etkileyen ve TDY-2007'de belirtilen şartlar doğrultusunda EDYY ve MBY'ye göre analizleri incelenmiştir.

Örnek 5.1'de bina ± %5 ek dışmerkezlik ile kat burulma momenti etkisini içeren sismik yüklerin x ve y doğrultularında analizi yapılmıştır. Binanın deprem doğrultusundaki birinci titreşim periyodu Rayleigh Yöntemi ile hesabında burulma (η_{bi}) etkileri dikkate alınmıştır. Binanın her açıklıkta kesme kuvvetleri ve burulma düzensizliği hesaplanmış, çözüm sonuçlarını karşılaştırılmıştır (Çizelge 5.13- 5.22). Çizelgelerin incelenmesinde görüldüğü gibi burulma düzensizliği katsayılarının tüm katlar için her iki yönde 1,2'den az olduğu görülmüştür.

Örnek 5.2'de ilk önce bütün modların eşzamanlı olduğu kabul edilerek ve bu esnada oluşan deplasman, yatay kuvvet ve kesme kuvveti her mod için bulunanların toplamı olarak alınmıştır. Daha sonra modal sönümlemenin hesaba katıldığında oluşan deplasman, yatay kuvvet ve kesme kuvveti her mod için bulunanların toplamı olarak alınmıştır. Sonuçta

yapının plan düzensizlik bulunduğu durumlarda, Çizelge (5.24- 5.26) 'da gösterildiği gibi, kat deprem kuvvetleri, kat kesme kuvveti ve kat moment talebi açısından yapının sismik tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu bölümdeki yapılan analizlere göre MBY, EDYY'ne göre daha kesin bir yöntem olduğu saptanmıştır.

12.1.3. Üç boyutlu 8 katlı L şeklinde binalardan elde edilen sonuçlar

Üç boyutlu 8 katlı binaların katlarındaki burulma düzensizliği sonuçları incelediğinde rijitlik düzensizliğin geometrik düzensizliğe göre burulma düzensizliği katsayısı η_{bi}'yi daha fazla etkilediği görülmektedir. Çerçeve ve perde-çerçeve taşıyıcı sistemli binaların burulma düzensizliği sonuçları kıyaslandığında perde-çerçeve taşıyıcı sistemli binaların burulma düzensizliği değerini daha büyük verdiği görülmüştür. Ayrıca örnek binaların her katında oluşan dışmerkezlik mesafelerinin rijitlik düzensizlikleri geometrik düzensizliklere göre dışmerkezlik mesafelerini daha fazla etkilemiştir. Özellikle perde-çerçeve taşıyıcı sistemli binalarda dışmerkezlik mesafelerin değeri -özellikle en üst katında- diğer katlara göre en yüksek değeri almıştır.

12.1.4. Üç boyutlu altı katlı A2 düzensiz binalarda elde edilen sonuçlar

Planda (A2) düzensizliği durumunda, incelenen örnek binalarda boşluk oranı yönetmelikte belirtilen sınır değerden büyüktür (0,336), elde edilen sonuçlarda boşluk oranının burulma düzensizliği değeri üzerinde çok büyük etkisi olduğu gözlemlenmiştir. İncelenen örneklerin modellenmesinde esnek diyafram modeli ve rijit diyafram modeli ayrı ayrı incelemiştir. Döşeme rijit bir cisim gibi davranamayacağı için esnek diyafram modeli ile elde edilen sonuçların daha güvenli olduğu saptanmıştır. Ayrıca çerçeve ve perde-çerçeve taşıyıcı sistemli binaların burulma düzensizliği sonuçları kıyaslandığında perde-çerçeve taşıyıcı sistemli binaların burulma düzensizliği değerini daha büyük verdiği görülmüştür.

12.1.5. A2 ve A3 düzensizliği hakkında genel sonuçlar ve öneriler

Sonuç olarak burulma düzensizliğinin, düzensiz binaların geometrik planından çok rijitlik dağılımı ile ilişkili olduğu sonucuna varılabilir. Planda perde bulunduğu durumlarda kütle merkezi ile rijitlik merkezi arasındaki dışmerkezlik daha büyük bir değere sahiptir. Bu nedenle bir yapının yük taşıma sisteminin belirlenmesi projenin planlama aşamasında en

önemli konudur. Burulma düzensizliğini önlemek için perde konumlarının ve kesit alanlarının doğru seçilmesi esastır. Yapılan araştırma neticesinde planda düzensiz olan bina sistemlerinin kolon ve perdelerin planda boyut ve yönlerinin değiştirilmesi, dışmerkezlik mesafelerini önemli ölçüde etkilemiş olur. Bunun yanında burulma düzensizliği katsayısını ortadan kaldırılması veya deprem yönetmeliklerce en alt sınıra getirilmesi iyi bir çözümdür.

Genel olarak deprem durumunda karşılaşılabilecek olumsuzlukları azaltması ve hesap kolaylığı ile ekonomiklik getirmesi amacıyla, yönetmeliklerde belirtilen minimum şartlara uyulmak kaydıyla planda, düzensizliğin bulunması durumlarında deprem derzlerin bırakılması; yapının birbirinden bağımsız bölümler halinde çalışmasını temin edip, düzensizliği ortadan kaldıracak iyi bir uygulama olacaktır.

12.2. Boyut Optimizasyonundan Elde Edilen Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada Genetik Algoritma yöntemi ile betonarme yapılarda kütle merkezi ile rijitlik merkezleri arasında oluşan dışmerkezlik mesafesinin tümden yok edilmesi veya minimuma getirilmesi, optimum sismik göreli kat öteleme performans tasarımı ve bunlara bağlı olarak burulma dengeli yapılar üretilebilmesi amacıyla düşey taşıyıcıların boyut ve doğrultularının optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kısıtlama olarak da betonarme yapıların yönetmelik ve davranış şartlar TDY- 2007’ e uygun olarak göz önüne alınmış ve değişik binalarda boyut optimizasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, binaların modellenmesi halinde, düşey taşıyıcıların (kolon ve perde) enkesit boyutları ve doğrultularının değiştiğinde dışmerkezliğinin sıfıra ulaştığı ve burulma düzensizliği belirli sınırı aşmamasını sağladığı görülmüştür.

12.2.1. Tek katlı binaların optimizasyonundan elde edilen sonuçlar

Optimum dışmerkezlik tasarımı, çok değişkenli bir optimizasyon problemi olarak gerçekleştirilmiş ve daha genişçe uygulanabilirliği nedeniyle problemi çözmek için ayrık tamsayı kısıtlama yöntemi benimsenmiştir. Daha pratik bir sonuç elde etmek için boyut değişkenlerinin santimetreye yuvarlanmış tamsayı değerler almasına çalışılmıştır. Ayrıca her örnekte optimum dışmerkezlik çözümlerini elde etmek için program kaç kere çalıştırmıştır. İncelenen üç düzensiz bina modelinde, boyut optimizasyon sonucundan, binaların kat kütle ve rijitlik merkezleri arasındaki mesafenin dışmerkezlik değerinin çok

daha azaldığı ve dolayısıyla bina modellerin sismik performansının artmasının sağlandığı gösterilmiştir (Çizelge 9.2- 9.4). Ayrıca bina, deprem etkime açılarına maruz kaldığında, en elverişsiz tesirlerin oluştuğu ve dışmerkezlik değerinde değişkenlik gösterdiği açıklanmıştır. Boyut optimizasyonu sonucunda, bina dışmerkezliğinin %70- %99'e kadar azaldığı ve sismik performansın artmasını sağladığı açıklanmıştır (Çizelge 9.2- 9.4, 9.6).

Tasarım değişkenlerine ayrık değerler atanarak optimum amaç fonksiyonu değerinin artması sağlamıştır. Bu nedenle, önerilen ilk prosedür, mümkünse sürekli tasarım değişkenlerini varsayarak problemi çözmektir. Daha sonra en yakın ayrık / tamsayı değerleri değişkenlere atanmakta ve tasarımın fizibilitesi kontrol edilmektedir. Birkaç denemeyle sürekli optimuma yakın en iyi uygulanabilir tasarım elde edilebilir.

12.2.2. Çok katlı 3B binaların optimizasyonundan elde edilen sonuçlar

Optimum göreli kat öteleme tasarımı, gerçek sayılı çok değişkenli bir optimizasyon problemi olarak gerçekleştirilmiş ve problemde ayrık kısıtlamaların dikkate alınması nedeniyle problemi çözmek için ayrık gerçek sayılı kısıtlamalı yöntemi benimsenmiştir.

Genetik Algoritma uygulamaları ile 3B 6 katlı çerçeve ve perde- çerçeveye dayanan planda A2 düzensizliğe sahip olan yapı sistemlerinde göreli kat ötelemeye optimum tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu durumda bina katlardaki etkin burulma düzensizliği değerine büyük bir değişimin meydana gelebildiği (çok azaldığı) gözlenmektedir. Elde edilen sonuçlarda burulma düzensizliği katsayısının göreli kat ötelemelerinden ötelemelere bağlı olarak tanımlanmasının daha doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Yapılardaki tüm katların burulma düzensizliği katsayısı ilk çözümden elde edilen sonuçlar ile boyutlandırma optimizasyon uygulamalarından elde edilen sonuçlar kıyaslanarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler ve çizelgeler ile açıklanmış ve bunun sonucunda belirgin farklar verdiği gösterilmiştir (Çizelge 10.9 – 10.12 ve Şekil 10.15).

Aynı şekilde Genetik Algoritma uygulamaları ile 3B 8 katlı çerçeve ve perde- çerçeveye dayanan planda düzensiz L şekline sahip olan yapı sistemlerde göreli kat ötelemeye optimum tasarım neticesindeki sonuçlar kıyaslanarak incelenmiştir. Yapılardaki tüm katların dışmerkezlik değeri ve burulma düzensizliği katsayısı boyutlandırma optimizasyon uygulamalarından önce ve sonra kıyaslanmış, elde edilen sonuçlar grafikler ve çizelgeler ile

desteklenmiş ve bunun sonucunda belirgin farklar verdiği açıklanmıştır (Çizelge; 10.3-10.8 ve Şekil; 10.7, 10.8). Elde edilen sonuçlarda; burulma düzensizliği değerinin göreli kat ötelemelerinden ötelemelere bağlı olarak tanımlanmasının daha doğru sonuçlar verdiği ispatlanmıştır. Burulma düzensizliği değerinin göreli kat ötelemelerine bağlı olarak tanımlanmasında en çok kat dışmerkezliğe ilişkilendirilerek tanımlanması gerekmektedir.

12.2.3. Genetik Algoritma uygulamaları hakkında genel sonuçlar ve öneriler

Genetik Algoritmanın, kütle merkezi ile rijitlik merkezi arasındaki optimum dışmerkezliği ve göreli kat ötelemelerinin optimum tasarımı elde etmek için kolonların ve perdelerin enkesit boyutlarındaki varyasyonları dikkate alan pratik tasarım problemlerini modellemeye uygun olduğu kanıtlanmıştır.

Genel olarak Genetik Algoritma, ayrık tasarım değişkenlerini kullanarak optimum çözüm belirlediğinden inşaat mühendisliği problemlerinin çözümü için uygun olduğu gözlemlenmiştir. Sismik dayanıklı betonarme tek katlı ve çok katlı yapıların ekonomik tasarım optimizasyonu için sağlam ve etkili bir araç olduğunu kanıtlanmıştır. Ayrıca MATLAB® programı ve ETABS® programını birbirine bağlayarak Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface-API) aracılığıyla yapıların optimum boyutlandırması için Genetik Algoritma ile MATLAB® programının kullanılabilirliği gösterilmiştir. Ancak bu yöntemin prosedür açısından zor olduğu ve bilgisayarda önemli süreleri gerektirdiği söylenebilir. MATLAB® ve ETABS®'ın paralel çözüm prosedürü, işlem sürecinden tasarruf etmek için yüksek hızlı bir dijital bilgisayar gerektirmektedir.

Daha büyük konfigürasyonlara sahip binaların optimum bir çözüme ulaşmak için daha yüksek tasarım değişkenleri ve üretim sayıları gerektirdiği de söylenebilir. Daha büyük tasarım değişken sayısı, daha yavaş, ancak daha güvenilir bir bağlanma ile sonuçlanırken, daha küçük tasarım değişken sayısı tam tersini yapar.

Daha doğru bir çözüm elde etmek için Popülasyon Boyutu ve Maksimum Jenerasyonu seçeneklerini varsayılan değerlerinden artırıp, Elit Sayısı ve Tolerans Fonksiyonu seçeneklerini azaltmıştır. Bu ayarlar, GA'nın daha büyük bir popülasyon kullanmasına (artan Popülasyon Boyutu), tasarım alanı aramasını artırmasına (azaltılmış Elit Sayısı) ve en iyi tasarım değişkeni çok az değişene kadar (küçük Toleransı Fonksiyonu) devam etmesine

neden olur. Ayrıca en iyi amaç fonksiyon değerinin iyileşebileceğini veya farklı operatörler seçerek kötüleşebileceğini önemlidir. Bir problem için iyi bir operatör grubu seçmek genellikle en iyi mühendis deneyiyle yapılır.

GA'nın kullanımı için problemin yapısal formu ile ilgili yeterince bilgili olmak gerekmektedir. Aksi takdirde optimum çözüme ulaşmayan tasarım değişkenlerinin araştırma uzayı dışında olduğu anlamına gelir ki bu da global optimum yerine lokal optimum bulunmasına neden olur. Problemin çözüm seti olabilen tasarım değişkeni değerleri tasarımcı tarafından doğru bir şekilde tahmin edilmeli ve araştırma uzayına yerleştirilmelidir. Var olan tasarım değişken sayısı, araştırma alanının eleman sayısı ve sistem boyutu çözüme erişme hızı ile ters orantılıdır. Sistemin karmaşık ve geniş olması, tasarım değişkenleri ve araştırma uzayı elemanlarının fazla olması, çözüme yavaş ulaşılmasına neden olur. Araştırma uzayının eleman sayısının azaltılması, çözümü hızlandırmak için uygulanabilecek metotlardan biridir. Unutmamak gerekir ki hesaplamalar ve optimizasyonlar esas olarak bilgisayar tarafından yapılmaktadır. Yöntem yine de iyi kalitede bir yapı tasarlamak için yetenekli bir mühendise ihtiyaç duymaktadır.

12.2.4. Deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilen sonuçlar

Deneyde, deprem etkime açısının optimize edilmiş planda düzensiz 8 katlı binanın sismik performansı üzerindeki etkisi hakkında teorik ve deneysel çalışmaları gerçekleştirmiştir. Deney modelinde maksimum kat deplasmanlarının varyasyonu, genetik algoritma uygulamalarının düzensiz yapıların sismik performans üzerindeki etkisini belirlemek için dikkate alınmıştır. Binada, 15 derecelik artışlarla değerleri 0 ile 180 derece arasında değişen on üç deprem etkime açısı dikkate alınmıştır. MATLAB® programı üzerine inşa edilen açık kaynaklı Ncorr üzerinde Dijital Görüntü Korelasyonu (Digital Image Correlation- DIC) tekniği kullanılarak yatay yükler altında kolonların yüzey deplasman alanı ölçülmüştür. Teorik analiz için deney modelin özellikleri kullanılarak sonlu eleman modelleme (FEM) analizi yazılımında bina modellenmiştir. Sismik performans üzerindeki maksimum kat deplasmanının değişimini belirlemek için on üç yön dikkate alınmıştır. Sonuçlar çizelge haline getirilmiş ve uygun grafikler, maksimum deplasman değerlerini ve depremin farklı etkime açısı ile varyasyonu ve ayrıca deneysel ve FEM analizi arasındaki varyasyonları göstermek için çizilmiştir (Şekil 11.15 ve 11.16; Çizelge 11.3 ve 11.4). Bu çalışmanın en önemli bulguları şu şekilde özetlenebilir:

Çalışmanın sonunda; deneysel ve FEA çalışmalarının sonuçları, optimize edilmiş planda düzensizliği sahip betonarme bina yatay yük etkime açılarına maruz kaldığında sismik performansını arttırdığını göstermektedir. Bu iki yöntem istatiksel olarak karşılaştırıldığında aradaki maksimum farkın x yönde %5 ve y yönde %6 civarında olduğu görülmektedir. Deneysel ve FEA çalışmalarının sonuçları karşılaştırıldığında aralarında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Ayrıca yatay deplasmanların tüm yükleme yönlerinde birbirine çok yakın bulunmuştur. İki komşu açıya göre maksimum farklar X yönleri için FEMA'da %2,37 ve deneyde %1,47 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak deneysel çalışmalara göre geliştirilen genetik algoritma yönteminin tatmin edici sonuçlar verdiği ispatlanmıştır.

Deney, Türkiye'de Gazi Üniversitesi Yapısal Mekanik Laboratuvarı'nda öğrenci tarafından maliyeti karşılanarak gerçekleştirilmiştir.

12.3. Gelecekteki Araştırmalar için Öneriler

Bu çalışmada geliştirilen bilgisayar yardımlı otomatik optimizasyon tekniğinin bina tasarımcıları için çok faydalı bir araç olduğuna dair çok az şüphe olsa da bu tekniğin pratik uygulamalar için kendi sınırlamaları ve eksiklikleri vardır. Tekniğin kapasitesini arttırmak ve bina yapılarının uygulanabilirlik aralığını genişletmek için aşağıdaki ileri çalışmaların kazanılması tavsiye edilebilir.

1. Betonarme binaların doğrusal olmayan davranışının incelenmesi ve dinamik yükler altındaki performansları açısından optimum tasarımının elde edilmesi,
2. Tasarım kasıtlamalarının geliştirmesi,
3. Optimizasyon problemine global bir çözüm bulmak için kullanılan değişkenler, elemanların enkesitlerindeki kısıtlamaların yanı sıra boyuna donatı ve kesme donatı dahil olmak üzere güçlendirilmiş çeliğin genişliğini ve alanını içermesi,
4. Topolojik ve şekil tasarım problemlerine uygulama,
5. Optimizasyon sonuçlarının çeşitli uygulama kurallarına göre karşılaştırılması,
6. Çeşitli optimizasyon tekniklerine dayalı optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması,

Bununla birlikte betonarme optimizasyon alanı, araştırılmayı ve analiz edilmeyi bekleyen yeni fikirlerle doludur.

KAYNAKLAR

1. Goldberg, D. E. (1989), *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning,* Tuscaloosa, USA: Addison Wesley Publishing Company, Inc, 1-56.

2. Turgut, P., Gürel, M. A., ve Arslan, A. (1997), Genetik algoritma ile betonarme bir kirişin optimum tasarımı, *İstanbul Teknik üniversitesi*, 349-361.

3. Turğut, P., and Arslan, A. (2001), Sürekli bir kirişte maksimum momentlerin genetik algoritmalar ile belirlenmesi, *Fen ve Mühendislik Dergisi* , 3(3), 1-9.

4. Lee, C., and Ahn, J. (2003), Flexural design of reinforced concrete frames by genetic algorithm, *Journal of Structural Engineering., (ASCE),* 129(6), 762-774.

5. Camp, C. V., Pezeshk, S., and Hansson, H. (2003), Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm, *Journal of Structural Engineering, (ASCE),* 129, 105-115.

6. Atabay, Ş., and Gülay, F. G. (2004), Genetik algoritmalar ile perdeli yapı sisteminin maliyet optimizasyonu, *İstanbul Teknik Üniversite Dergisi,* 3(6), 71-81.

7. Govindaraj, V., and Ramasamy, J. V. (2005), Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using genetic algorithms, *Computers and Structures,* 84, 34-48.

8. Guerra, A., and Kiousis, P. D. (2006), Design optimization of reinforced concrete structures, *Computers and Concrete,* 3(5), 313-334.

9. Kömür, M., and Altan, M. (2006), Betonarme bir kiriş ve kolonun genetik algoritma ile optimum boyutlandırılması, *Proceedings of the Fifth GAP Engineering Congress, Şanlıurfa, Türkiye,* 26-28.

10. Sahab, M. G. (2008), Sensitivity of the optimum design of reinforced concrete flat slab buildings to the unit cost components and characteristic material strengths, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing),* 9(5), 487-503.

11. Gh. Ghodrati, A., Mohebi, B., and Maddah, N. (2008), Optimization of damage index in RC structures using genetic algorithm,*The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.

12. Hatindera, S., Hardeep, S. R., and Jagbir S. (2014), Discrete optimisation of one way slab using genetic algorithm, *International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications,* 9(2), 116-121.

13. Alex, D. M., and Kottalil, L. (2015), Genetic algorithm based design of a reinforced concrete continuous beam, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT),* 4(09), 224-227.

14. Hisham, A. P. C. (2017), A study on cost optimised structural design of reinforced concrete beams, *International Journal of Scientific & Engineering Research,* 8 (11).

15. Samruddha, S. R., and Patel, R. B. (2017), Column capital and drop panel optimization of flat slab using genetic algorithm, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6(4).

16. Fayaz Basha, S. B., and Madhavi Latha, K. (2018), Design optimization of reinforced concrete slabs using genetic algorithms, *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 9(4), 1370–1386.

17. Kan, C. L., and Chopra, A. K. (1979), Linear and nonlinear earthquake responses of simple torsionally coupled systems, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.

18. Özmen, G. (2004), Excessive torsion irregularity in multi-storey buildings, *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi Digest,* 15(1), 3331-3144.

19. Özmen, G., Girgin, K., and Durgun, Y. (2014), Torsional irregularity in multi-story structures, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 6, 121–131.

20. Momen, M. M. A., Shehata, E. A. R., Mohamed, M. A., and Aly, G. A. A. S. (2016), Irregularity effects on the seismic performance of L-shaped multi-story buildings, *Journal of Engineering Sciences Assiut University Faculty of Engineering*, 44(5), 513-536.

21. Mary Williams, P., and Tripathi, R. K. (2016), Study of effect of eccentricity on the linear and nonlinear behaviour of RCC irregular buildings, *International Journal of Engineering Research*, 5(4), 275-278.

22. Naresh kumar, B. G., Punith, N., Bhyrav, Raj B., and Arpitha, T. P. (2017), Assessment of location of centre of mass and centre of rigidity for different setback buildings, *International Journal of Engineering Research& Technology*, 6(05).

23. Lopez, O. A., and Torres, R. (1997), The critical angle of seismic incidence and the maximum structural response, *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, 26, 881—894.

24. Athanatopoulou, A. M. (2005), Critical orientation of three correlated seismic components, *Engineering Structures*, 27, 301–312.

25. Rigato, A. B., and Medina, R. A. (2007), Influence of angle of incidence on seismic demands for inelastic single-storey structures subjected to bi-directional ground motions, *Engineering Structures.*

26. Magliulo, G., Maddaloni, G. and Petrone, C. (2014), Influence of Earthquake Direction on the Seismic Response of Irregular Plan RC Frame Buildings, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13, 243-256.

27. Maheri, M. R., Chandler, A. M., and Bassett, R. H. (1991), Coupled lateral-torsional behaviour of frame structures under earthquake loading, *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, 20, 61- 85.

28. De La Llera, J. C., Almazan, J. L., VIAL, I., Ceballos, V., and Garcia, M. (2004), Analytical and experimental response of asymmetric structures with friction and viscoelastic dampers, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada.

29. Zhou, Y., Xilin Lu., and Jian, Yu. (2011), Experimental Study on the Seismic Behavior of a High-rise Hybrid Structure, *Proceedings of the 2nd EFAST Workshop & 4AESE International Conference*, Ispra.

30. Broderick, B. M., and McCrum, D. P. (2012), An experimental and numerical investigation into the seiusmic performance of a multi-storey concentrically braced plan irregular structure, *15th World Conference on Earthquake Engineering, LISBOA*, Trinity College Dublin, Ireland.

31. TDY (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Esaslar (DBYBHY), *T. C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, DepremAraştırma Dairesi*, Türkiye.

32. İnternet: TBDY (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Başkanlığı, Ankara, https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1, adresinden 4 Eylül 2021'de alınmıştır.

33. ASCE/SEI 7-10 (2010), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, *American Society of Civil Engineers*, 1801 Alexander Bell Drive Reston, Virginia 20191.

34. Celep, Z. (2017), *Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı*, (Beşinci Baskı), İstanbul: Beta Basım Yayım Dağıtım, 99-104, 232-319.

35. Duggal, S. K. (2013), *Earthquake-Resistant Design of Structures* (Second Edition), United Kingdom: Oxford University Press , 203-205.

36. İnternet: Eurocode 8 (2012), Seismic Design of Buildings, Luxembourg: *Publications Office of the European Union, https://cupdf.com/document/ec8-seismic-design-of-buildings-worked-examples.html*, adresinden 4 Eylül 2021'de alınmıştır.

37. Chopra, A. K. (1995), *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*, University of California, Berkeley: Earthquake Engineering & Structural Dynamics.

38. Anagnostopoulos, S. A., Kyrkos, M. T., and Stathopoulos, K. G. (2015), Earthquake induced torsion in buildings: Critical review and state of the art, *Earthquakes and Structures*, 8(2), 305-377.

39. Humar, J. L. (1984), Design for seismic torsional forces, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12(2), 150-163.

40. Darılmaz K. (2015), *Depreme Dayanıklı Betonarme Binaların Tasarımına Giriş*, İstanbul, Türkiye: İstanbul Teknik Üniversitesi.

41. TS500 (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.

42. Arora, J. S. (2012), *Introduction to optimum design* (3rd edition), USA, Iowa: Academic Press.

43. Singiresu, S. Rao, (2009), Engineering Optimization; Theory and Practice (Fourth edition), USA: Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

44. Kuhn, H. W., and Tucker, A. W. (1951), Nonlinear Programming, Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, Calif.

45. Sivakumar, P., Rajaraman, A., Samuel Knight, G. M., and Ramachandramurthy, D. S. (2004), Object-oriented optimization approach using genetic algorithms for lattice towers, *Journal of Computing in Civil Engineering.*

46. Haupt, S. E., and Haupt, Randy L. (2004), *Practical genetic algorithms* (Second edition), USA: Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

47. Achille Messac (2015), Optimization in Practice with MATLAB®for Engineering Students and Professionals, New York, USA: Cambridge University.

48. Sivanandam, S.N., and Deepa, S. N. (2008), *Introduction to Genetic Algorithms*, TN, India: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

49. Holland, J. H. (1975), *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann Arbor: University of Michigan Press.

50. Koza, J. R. (1992), *Genetic Programming*: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection, Cambridge, London: MIT Press.

51. Schwefel, H. P., (1995), *Evolution and Optimum Seeking*, Dortmund, Autumn, Germany: Wiley ISBN: 978-0-471-57148-3.

52. David, B. F. (1992), *An overview of evolutionary programming*, Springer Link, New York.

53. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Jr., and Vecchi, M. P., (1983), Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 220(4598), 671-680.

54. Dorigo, M., and Blum, C. (2005), Ant colony optimization theory: A survey, *Theoretical Computer Science,* 344, 243 – 278.

55. Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995), Particle Swarm Optimization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Washington, DC.

56. Gharehbaghi, S., and Fadaee, M. J. (2012), Design optimization of RC frames under earthquake loads, *International Journal Of Optimization In Civil Engineering*, 2(4), 459-477.

57. Glover, F., and Laguna, M., (2013), TABU SEARCH: Effective Strategies for Hard Problems in Analytics and Computational Science, *Combinatorial Optimization*, Colorado, Boulder, 3261-3362.

58. İnternet: MATLAB®, (2021), genetic-algorithm-options, The MathWorks, [online] Available: https://www.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm-options.html, adresinden 2 Nisan 2017'de alınmıştır.

59. Cronin, K. J. (2007), *Response sensitivity of highway bridges to random multicomponent earthquake excitation*, Master Thesis, University of Central Florida,, Orlando, USA, 12-14.

60. İnternet: Computers and Structures, INC (2016). CSI Analysis Reference Manual for ASP 2000, *ETABS and SAFE, Berkeley, California, USA, www.csiamerica.com,* 2 Nisan 2017'de alınmıştır.

61. Lopez, O. A. and Marinilli, A. (2008), Evaluation of critical responses and critical incidence angles obtained with RSA and RHA, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.

62. Santos, A. H. A., Pitangueira, R. L. S., Ribeiro, G. O., and Caldas, R. B. (2015), Study of size effect using digital image correlation, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais,* 8, 323-340.

63. Ghorbani, R., Matta, F., and Sutton, M. A. (2015), Full-field deformation measurement and crack mapping on confined masonry walls using digital image correlation, *Experimental Mechanics,* 55, 227-243.

64. İnternet: Ncorr v1,2, (2020), [online], http://www.ncorr.com/index.php/dic-algorithms, adresinden 2 Nisan 2020'de alınmıştır.

65. Kostinakis, K. G., Athanatopoulou, A. M., and Avramidis, I. E. (2012), Orientation effects of horizontal seismic components on longitudinal, *Natural Hazards and Earth System Sciences,* 12, 1-10.

66. İnternet: Hul, C. W., (2014) [online] 3D printing (stereolithography). USA Patent: EP0171069, EP0681906, EP1946910, EP0852536, adresinden 5 Aralık 2019'de alınmıştır.

67. Panes, A. R. , Claver, J., and Camacho, A. M. (2018), The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM, *Materials.*

68. Özkan, M. T., Çetindağ, H. A., and Toktaş, I. (2018), Determination of cross sectional geometries of beams according to tension and compression strength which are 3D printed with the same amount of filament, *Journal of Polytechnic*, 213-219.

69. Pan, B., Dafang, W., and Yong, X. (2012), Incremental calculation for large deformation measurement using reliability-guided digital image correlation, *Optics and Lasers in Engineering*, 50, 586–592.

70. İnternet: Blaber, J., and Antoniou, A. (2017), *Ncorr*, *Instruction Manual*, Georgia Institute of Technology, Georgia, USA, http://www.ncorr.com/download/ncorrmanual_v1_2_1, adresinden 4 Eylül 2020'de alınmıştır.



GAZİ GELECEKTİR…