

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME UZAY ÇERÇEVELERİN İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKE
GÖRE OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI İÇİN BİR ARDIŞIK YAKLAŞIM
YÖNTEMİ**

DOKTORA TEZİ

Yunus Emre ŞAYAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

EYLÜL 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME UZAY ÇERÇEVELERİN İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKE
GÖRE OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI İÇİN BİR ARDIŞIK YAKLAŞIM
YÖNTEMİ**

DOKTORA TEZİ

**Yunus Emre ŞAYAN
(501042013)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN

EYLÜL 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501042013 numaralı Doktora Öğrencisi **Yunus Emre ŞAYAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**BETONARME UZAY ÇERÇEVELERİN İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKE GÖRE OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI İÇİN BİR ARDIŞIK YAKLAŞIM YÖNTEMİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Erkan ÖZER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Zehra Canan GİRGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erdal İRTEM
Balıkesir Üniversitesi

Teslim Tarihi : **13 Haziran 2012**
Savunma Tarihi : **19 Eylül 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında betonarme uzay çerçeve sistemlerin başka bir deyişle üç boyutlu betonarme yapı sistemlerinin ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılmasını sağlayan bir ardışık yaklaşım yöntemi geliştirilmiştir.

Bu çalışma süresince yardımlarını ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen, değerli görüşleriyle destekleyen ve yönlendiren, sadece akademik alanda değil bir bütün olarak hayata bakışını örnek aldığım tez danışmanı hocam Sayın Prof.Dr.Engin ORAKDÖĞEN'e, tez izleme jürisindeki hocalarım Sayın Prof.Dr.Erkan ÖZER'e ve Sayın Doç.Dr.Zehra Canan GİRGİN'e, bu çalışma kapsamında kullandığım ve geliştirdiğim bilgisayar programları konusunda yardımlarını benden esirgemeyen hocam Sayın Doç.Dr.Konuralp GİRGİN'e, Yapı Statiği çalışma grubunun tüm değerli öğretim üyeleri ve araştırma görevlilerine teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca verdikleri destek için TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca bana karşı her türlü destek ve sabrı gösteren, beni başarıya ve akademik çalışmalarına teşvik eden anne ve babama sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2012

Yunus Emre ŞAYAN
(İnşaat Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
SEMBOL LİSTESİ	xxi
ÖZET.....	xxvii
SUMMARY	xxix
1. GİRİŞ	1
1.1 Konu	1
1.2 Konu İle İlgili Çalışmalar.....	4
1.3 Çalışmanın Amacı	11
2. BETONARME UZAY ÇERÇEVELERİN İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKE GÖRE OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI İÇİN BİR ARDIŞIK YAKLAŞIM YÖNTEMİ	13
2.1 Varsayımlar	14
2.2 Ardışık Yaklaşım Yöntemi.....	15
2.3 Optimum Boyutlandırma Probleminin Akma Koşulları ve Akma Koşullarının Süperpozisyon Denklemleri ile Elde Edilmesi	18
2.3.1 Akma koşulları	18
2.3.2 Akma koşullarının süperpozisyon denklemleri ile elde edilmesi	21
2.4 Optimize Edilecek Amaç Fonksiyon.....	22
2.4.1 Yapı ağırlığı	22
2.4.1.1 Enkesit optimizasyonu.....	23
2.4.1.2 Donatı optimizasyonu.....	25
2.4.2 Enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar.....	27
2.4.2.1 Donatı oranı-karakteristik plastik moment bağıntıları.....	28
2.4.2.2 Enkesit yüksekliği-karakteristik plastik moment bağıntıları.....	31
2.4.2.3 Diğer donatı yerleşim durumları.....	33
2.5 Eğik Eğilme ve Normal Kuvvet Etkisindeki Betonarme Çubuklarda Akma Koşulu Kısıtlamalarının Oluşturulması	35
2.5.1 Akma koşulu kısıtlamalarının oluşturulması için kullanılan hesap yöntemi	35
2.5.2 Eğik eğilme ve normal kuvvet etkisindeki betonarme çubuklarda taşıma gücünün bulunması	39
2.5.2.1 y_0 ve α değerlerinin tahmini için bir ardışık yaklaşım yöntemi.....	40
2.6 Optimum Boyutlandırma Probleminin Ek Kısıtlamaları	48
2.6.1 Enkesit boyutları ile ilgili yapısal kısıtlamalar	48
2.6.2 Plastik kesit dönmelerine ait ek kısıtlamalar.....	49
2.6.3 Yerdeğiştirme ve görelî kat ötelemeleri için ek kısıtlamalar	52

3. OPTİMİZASYON YÖNTEMİNİN ESASLARI VE OPTİMUM	
BOYUTLANDIRMADA İZLENEN YOL.....	55
3.1 Optimizasyon Probleminin Çözümüne Hazırlık İşlemleri	55
3.2 Simplex Yöntemi.....	57
3.2.1 Optimizasyon problemi	57
3.2.2 Simplex yönteminin esasları ve tanımlar	60
3.2.3 Simplex yöntemi ile hesapta izlenen yol.....	61
3.2.4 İlk uygun temel çözümün belirlenmesi	63
3.3 Optimum Boyutlandırma Yönteminde İzlenen Yol	64
3.3.1 Ardışık yaklaşımın ilk adımında boyutlandırma.....	64
3.3.2 Akma koşulu kısıtlamalarının oluşturulması.....	64
3.3.3 Optimizasyon aşaması.....	65
4. BOYUTLANDIRILAN SİSTEMİN İKİNCİ MERTEBE ELASTOPLASTİK	
HESABI.....	67
4.1 Varsayımlar	67
4.2 Yöntemin Esasları	68
4.3 Yöntemin Formülasyonu	70
4.3.1 Denge denklemleri	71
4.3.2 Plastik kesitlerdeki akma koşulları.....	72
4.3.3 Uç kuvvetlerinin ve iç kuvvetlerin hesabı.....	73
4.4 Hesapta İzlenen Yol	74
5. GELİŞTİRİLEN BİLGİSAYAR PROGRAMLARI	77
5.1 Genel Bilgiler	77
5.2 YCR3D Programı	80
5.2.1 Giriş bilgileri	81
5.2.2 Dış yükler ve birim plastik şekil değiştirme parametreleri için hesap	83
5.2.3 Kısıtlama denklemlerinin oluşturulması	86
5.3 KESIT Programı.....	89
5.4 SIM Programı	91
6. SAYISAL UYGULAMALAR.....	93
6.1 Uygulama 1A : Tek Katlı Düzlem Çerçeve	93
6.2 Uygulama 1B.....	95
6.2.1 Enkesit optimizasyonu	96
6.2.2 Donatı optimizasyonu	103
6.2.3 Farklı malzeme dayanımlarının optimum boyutlandırmaya etkisi	106
6.2.4 Ek kısıtlamaların optimum boyutlandırmaya etkisi	107
6.2.4.1 Plastik kesit dönmeleri için ek kısıtlamalar.....	107
6.2.4.2 Görelî kat ötelemeleri için ek kısıtlamalar.....	108
6.3 Uygulama 2: Bir Katlı Uzay Çerçeve.....	110
6.3.1 Birinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırma.....	115
6.3.2 Plastik şekil değiştirme kısıtlamalarının optimum boyutlandırmaya ve yapı ağırlığına etkisi.....	116
6.3.3 Yer değiştirme (görelî kat ötelemeleri) açısından değerlendirme	118
6.3.4 Optimizasyon sonucu bulunan kesit karakteristik plastik momentleri için en ekonomik betonarme kesitlerin bulunması.....	119
6.3.5 Duyarlılık analizi kontrolleri	121
6.3.6 Seçilen sabit enkesit boyutları için donatı oranı optimizasyonu	122
6.4 Uygulama 3: Altı Katlı Çok Açıklıklı Uzay Çerçeve.....	123
6.4.1 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırma.....	126

6.4.2 1975 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırma	130
6.4.3 Donatı optimizasyonu	130
6.4.4 ATC40 yönetmeliğindeki plastik dönme ek kısıtlamaları ile optimum boyutlandırma	132
6.4.5 2007 deprem yönetmeliğindeki birim şekildeğiştirme ek kısıtlamaları ile optimum boyutlandırma	136
6.4.5.1 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sistem.....	137
6.4.5.2 1975 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sistem.....	139
6.4.6 Göreli kat ötelemesi ek kısıtlamaları gözönüne alınarak optimum boyutlandırma	141
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	145
7.1 Çalışmanın Uygulama Alanı	145
7.2 Sonuçlar.....	145
7.3 Öneriler.....	154
KAYNAKLAR	157
EKLER.....	161
ÖZGEÇMİŞ.....	171

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ACI	: American Concrete Institute
API	: Application Programming Interface
AS3600	: Australian Standards-Concrete Structures
ATC	: Applied Technology Council
BM	: Birim Maliyet
BS	: Beton Sınıfı
EPARCS	: Elasto Plastic Analysis of Reinforced Concrete Structures
FORTTRAN	: Formula Translating System
GÇ	: Göçme Sınırı
GV	: Güvenlik Sınırı
IO	: Immediate Occupancy (Hemen Kullanım)
LRFD	: Load and Resistance Factor Design
LS	: Life Safety (Can Güvenliği)
MATLAB	: Matrix Laboratory
MN	: Minimum Hasar Sınırı
PEER	: Pacific Earthquake Engineering Research Center
RBDO	: Reliability Based Design Optimization
SAP2000	: Structural Analysis Program
SS	: Structural Safety (Göçmenin Önlenmesi)
TDY	: Türk Deprem Yönetmeliği
TL	: Türk Lirası
YCR3D	: Yield Condition Restraints

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	: Farklı kesit hasar sınırlarına ait birim şekildeğiştirme üst sınırları ...	51
Çizelge 6.1	: Başlangıç hesap çizelgesi	94
Çizelge 6.2	: 1.uygulama için tasarım değişkenleri ve yapı ağırlığının optimum değerleri.....	95
Çizelge 6.3	: Kolon ve kirişlerin optimum boyutları.....	95
Çizelge 6.4	: Hesap çizelgesinin $\Phi_1=1$ sütununun ilk 6 satırına ait bileşenler	100
Çizelge 6.5	: Akma düzlemi katsayıları.....	100
Çizelge 6.6	: Optimizasyonun ilk adımı sonunda elde edilen taşıyıcı sistem enkesit boyutları ve yapı ağırlığı	101
Çizelge 6.7	: Enkesit optimizasyonu ardışık yaklaşım adımlarında elde edilen sonuçlar.....	102
Çizelge 6.8	: Enkesit optimizasyonu ardışık yaklaşım adımlarına ait yatay yük parametreleri.....	102
Çizelge 6.9	: Donatı oranı optimizasyonuna ait ardışık yaklaşım adımlarında elde edilen sonuçlar ve yük parametreleri.....	103
Çizelge 6.10	: Optimizasyon hesapları sonucunda bulunan kesit özellikleri	104
Çizelge 6.11	: Kesit donatı alanları.....	105
Çizelge 6.12	: Net beton ağırlıkları	105
Çizelge 6.13	: Donatı ağırlıkları	105
Çizelge 6.14	: Enkesit optimizasyonuna farklı malzeme dayanımlarının etkisi....	106
Çizelge 6.15	: Plastik dönme ek kısıtlaması için ek kısıtlama denklemleri.....	107
Çizelge 6.16	: Plastik dönme sınır değerlerine ait ek kısıtlamalar	108
Çizelge 6.17	: Göreli kat ötelemesi ek kısıtlaması için ek kısıtlama denklemleri	109
Çizelge 6.18	: Ardışık yaklaşım adımlarına ait çubuk karakteristik plastik momentleri, toplam yapı ağırlıkları ve ikinci mertebe limit yük parametreleri.....	114
Çizelge 6.19	: Ardışık yaklaşım adımlarına ait enkesit boyutları.....	114
Çizelge 6.20	: Birinci ve ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan bir katlı betonarme uzay çerçevenin optimum enkesit boyutları,yapı ağırlıkları ve ikinci mertebe limit yük parametreleri.....	115
Çizelge 6.21	: Sistemdeki kiriş ve kolonlar için farklı performans seviyelerine ait sınır plastik dönme kapasitesi değerleri	116
Çizelge 6.22	: Hemen kullanım performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları ...	117
Çizelge 6.23	: Farklı kesit hasar sınırlarına ait göreli kat ötelemesi sınırları	118
Çizelge 6.24	: Seçilen sabit enkesit boyutları için donatı optimizasyonu ardışık yaklaşım hesap adımlarının sonuçları	123
Çizelge 6.25	: İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kolonlarına ait karakteristik plastik momentleri.....	127

Çizelge 6.26 :	İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kirişlerine ait karakteristik plastik momentleri	127
Çizelge 6.27 :	İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kolonlarına ait optimum enkesit boyutları	128
Çizelge 6.28 :	İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kirişlerine ait optimum enkesit boyutları	128
Çizelge 6.29 :	2007 ve 1975 Deprem Yönetmeliklerine göre hesaplanan yatay yükler için ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kolonlarına ait optimum enkesit boyutları	130
Çizelge 6.30 :	2007 ve 1975 Deprem Yönetmeliklerine göre hesaplanan yatay yükler için ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kirişlerine ait optimum enkesit boyutları	130
Çizelge 6.31 :	[8]'deki uygulama ile aynı enkesit boyutlarına sahip sistemin ikinci mertebe limit yüke göre hesaplanan optimum donatı oranları (Kolonlar).	131
Çizelge 6.32 :	[8]'deki uygulama ile aynı enkesit boyutlarına sahip sistemin ikinci mertebe limit yüke göre hesaplanan optimum donatı oranları (Kirişler).	132
Çizelge 6.33 :	Kiriş ve kolonlar için farklı performans seviyelerine ait sınır plastik dönme kapasitesi değerleri	133
Çizelge 6.34 :	Hemen kullanım performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kolonlar)	133
Çizelge 6.35 :	Hemen kullanım performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kirişler)	134
Çizelge 6.36 :	Can güvenliği performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kolonlar).	134
Çizelge 6.37 :	Can güvenliği performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kirişler).	134
Çizelge 6.38 :	Farklı kesit hasar sınırlarına ait birim şekildeğiştirme üst sınırları	137
Çizelge 6.39 :	2007 deprem yönetmeliği minimum hasar sınırına ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kolonlar)	139
Çizelge 6.40 :	2007 deprem yönetmeliği minimum hasar sınırına ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kirişler)	139
Çizelge 6.41 :	1975 deprem yönetmeliği yatay yükleri için optimum boyutlandırılan sistem için 2007 deprem yönetmeliği güvenlik sınırına ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kirişler).....	140
Çizelge 6.42 :	1975 deprem yönetmeliği yatay yükleri için optimum boyutlandırılan sistem için 2007 deprem yönetmeliği güvenlik sınırına ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kolonlar).....	141
Çizelge 6.43 :	Minimum hasar sınırına ait göreceli kat ötelemesi ek kısıtlamaları gözönüne alınarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kolonlar)	144

Çizelge 6.44 : Minimum hasar sınırına ait görelî kat ötelemesi ek kısıtlamaları gözönüne alınarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kirişler)	144
---	-----

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: Farklı hesap yöntemlerine ait yatay yük-yerdeğiştirme diyagramları.....	3
Şekil 2.1	: Dikdörtgen betonarme kesitlerde idealleştirilmiş akma yüzeyinin M_x - M_y düzlemindeki izdüşümleri.	20
Şekil 2.2	: Şematik F - M_p bağıntısı.....	24
Şekil 2.3	: Şematik ρ - M_p bağıntısı	26
Şekil 2.4	: Dikdörtgen kesit boyutları ve kesit tesirleri	28
Şekil 2.5	: Dikdörtgen betonarme kesitlerde dört köşede eşit donatı yerleşimi	29
Şekil 2.6	: Dikdörtgen betonarme kesitlerde dört kenarda eşit donatı yerleşimi.....	34
Şekil 2.7	: Dikdörtgen betonarme kesitlerde köşelerde ve kenar ortalarında sekiz eşit donatı yerleşimi	34
Şekil 2.8	: Dikdörtgen betonarme kesitlerde köşelerde 3/16 kenar ortalarında 1/16 donatı bulunması hali	35
Şekil 2.9	: Plastik şekildeğiştirme parametresinin birim değerinden meydana gelen çubuk uç kuvvetleri matrislerinin elde edilmesinde gözönüne alınan süperpozisyon durumları.	37
Şekil 2.10	: Çubuk uç kuvvetlerinin pozitif yönleri	38
Şekil 2.11	: Uzay çerçevelerin çubuk elemanında şekildeğiştirme durumu.....	40
Şekil 2.12	: (i) sayılı beton diliminin basınç gerilmesi yayılışları ve bileşkesi	45
Şekil 2.13	: Plastik mafsallı hipotezinin geçerli olduğu betonarme kesitlerde idealleştirilmiş M - χ diyagramı	52
Şekil 3.1	: Yöntemin herhangi bir adımına ait simplex hesap şeması	61
Şekil 5.1	: Ardışık boyutlandırma ve sistem hesabı aşamaları	78
Şekil 5.2	: YCR3D programının algoritması	81
Şekil 5.3	: YCR3D programının giriş bilgileri-1	82
Şekil 5.4	: YCR3D programının giriş bilgileri-2	82
Şekil 5.5	: Eksen takımına göre yüklerin pozitif yönleri	84
Şekil 5.6	: Birim plastik şekildeğiştirme durumuna ait yükler	85
Şekil 5.7	: Kritik kesitlerdeki iç kuvvetler.....	87
Şekil 5.8	: Ankastrelik uç kuvveti düzeltilmesi	87
Şekil 5.9	: İç kuvvetlerin akma düzlemi katsayıları ile çarpılması ile elde edilen sütun matrisler	88
Şekil 5.10	: Optimizasyon programının okuyacağı formatta sonuç dosyası görünümü	89
Şekil 5.11	: KESIT programının algoritması	90
Şekil 5.12	: KESIT programının bilgi giriş ekranı görünümü	91
Şekil 5.13	: KESIT programı için veri dosyası.....	91
Şekil 5.14	: SIM programının algoritması	92
Şekil 6.1	: Sistem geometrisi,dış yükler ve kritik kesit numaraları..	93
Şekil 6.2	: Seçilen plastik mafsallı yerleri ve düğüm noktası numaraları.....	94

Şekil 6.3 : Önboyutlandırılan sistemin analizi sonucunda elde edilen plastik kesit yerleri ve oluşum sırası.....	96
Şekil 6.4 : $\Phi_1=1$ birim plastik şekildeğiştirmesi için sisteme etkiyen yükler	97
Şekil 6.5 : $\Phi_1=1$ birim plastik şekildeğiştirmesi için moment diyagramı.....	99
Şekil 6.6 : $\Phi_1=1$ birim plastik şekildeğiştirmesi için düzeltilmiş moment diyagramı	99
Şekil 6.7 : Ardışık yaklaşımın 2,3,4. adımlarına ait plastik kesit yerleri ve oluşum sırası.....	102
Şekil 6.8 : Donatı optimizasyonu ardışık yaklaşım adımlarına ait plastik kesit yerleri ve oluşum sırası	104
Şekil 6.9 : Sistemin geometrik özellikleri ve hesap yükleri	110
Şekil 6.10 : Kolonlara ait donatı şeması	111
Şekil 6.11 : Sistemin düğüm noktası ve çubuk numaraları.....	112
Şekil 6.12 : İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan bir katlı betonarme uzay çerçevenin ardışık yaklaşım adımlarında esas alınan plastik kesit yerleri (İlk 6 adım)	113
Şekil 6.13 : İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan bir katlı betonarme uzay çerçevenin ardışık yaklaşım adımlarında esas alınan plastik kesit yerleri (Son adım)	114
Şekil 6.14 : Kat kalıp planı şeması	124
Şekil 6.15 : Çerçeve düşey enkesiti	124
Şekil 6.16 : 2007 Deprem Yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler.....	126
Şekil 6.17 : İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin X doğrultusundaki yatay yük parametresi-yerdeğiştirme diyagramı	129
Şekil 6.18 : İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin Y doğrultusundaki yatay yük parametresi-yerdeğiştirme diyagramı	129
Şekil 6.19 : Farklı performans seviyelerine ait plastik şekildeğiştirme sınır değerlerinin ilk aşıldığı plastik kesit yerleri.....	136
Şekil 6.20 : Kesit hasar sınırları ve hasar bölgeleri	138

SEMBOL LİSTESİ

$[A],[B]$	: Optimizasyon probleminde kısıtlama denklemlerinin katsayı ve sabitlerini içeren matrisler
$[A_i]$	: Akma koşulu katsayıları matrisi
A_s	: Çekme donatısı alanı
A_s'	: Basınç donatısı alanı
A_{top}	: Toplam donatı alanı
A_1, A_2, A_3, B	: Akma koşulu katsayıları
a_{ji}, b_j, c_i	: Optimizasyon probleminin özelliklerine bağlı olarak belirlenen sabit sayılar
a_x, a_y	: İkinci mertebe rijitlik matrisi elemanlarının katsayıları
b	: Kesit genişliği
b_{i1}	: Kesit gerilme yayılımı diyagramı üzerinde kısıtlama bölgesi uzunluğu
b_{i2}	: Kesit gerilme yayılımı diyagramı üzerinde uzama bölgesi uzunluğu
$b_{x11}, b_{x12}, b_{x22}$	: İkinci mertebe rijitlik matrisi elemanlarının katsayıları
$b_{y11}, b_{y12}, b_{y22}$	: İkinci mertebe rijitlik matrisi elemanlarının katsayıları
$[C]$	: Optimizasyon probleminde amaç fonksiyonun katsayılarını içeren kolon matris
c	: Kritik kesit sayısı
$[d]$	: Düğüm noktalarının bilinmeyen yerdeğiştirme bileşenlerinden oluşan kolon matris
$[d]_{ix}, [d]_{jx}$	: i ve j düğüm noktalarındaki yerdeğiştirme bileşenlerini içeren kolon matrisler
d	: Kesit hesap yüksekliği
d_i	: Dış yükler sıfıra eşitken her bir birim plastik şekildeğiştirme parametresi için ayrı ayrı yapılan hesap sonucunda bulunan yerdeğiştirme değeri
d_0	: Plastik şekildeğiştirme parametreleri sıfıra eşitken dış yükler için yapılan hesap sonucunda bulunan yerdeğiştirme değeri
E_c, E_b	: Betonun elastisite modülü
E_s	: Beton çeliğinin elastisite modülü

[F]	: Akma düzlemi katsayıları ile çarpılmış olarak birim plastik kesit şekildeğştirmeleri sebebiyle kritik kesitlerdeki normal kuvvet ve her iki yöndeki eğilme momentlerini içeren matris
[F_o]	: Akma düzlemi katsayıları ile çarpılmış olarak dış yükler etkisi sebebiyle kritik kesitlerdeki normal kuvvet ve her iki yöndeki eğilme momentlerini içeren kolon matris
[F_u]	: [F] matrisinin satırlarının toplanması ile elde edilen kolon matris
[f]	: f ₁ ,f ₂ fonksiyonlarından oluşan kolon matris
[f]_i	: f ₁ ,f ₂ fonksiyonlarının i.adımdaki değerleri
[f]_i'	: [f] _i fonksiyonunun türevi
F	: Kesit alanı
F_i	: Enkesitleri birbirinden farklı olan çubukların her birinin enkesit alanı
f_{cd}	: Beton tasarım (dizayn) basınç dayanımı
f_{ck}	: Beton karakteristik basınç dayanımı
f_{ctk}	: Beton karakteristik çekme dayanımı
f_{yd}	: Beton çeliği tasarım (dizayn) dayanımı
f₁,f₂	: Tarafsız eksenin yerinin tayini için yapılan hesapta kullanılan matematiksel fonksiyonlar
G	: Yapı ağırlığı
G_F	: Optimizasyon probleminde amaç fonksiyon
G_i	: Beton basınç dilimlerindeki gerilmelerin bileşke değeri
h	: Kesit yüksekliği
h'	: Paspayı
I	: Kesit atalet momenti
I_k	: Kiriş atalet momenti
I_x	: X doğrultusu kolon atalet momenti
I_y	: Y doğrultusu kolon atalet momenti
[k]_{ixix}	: Sistem eksenlerindeki eleman rijitlik matrisleri
L_i	: Enkesit alanı F _i olan çubukların uzunluklarının toplamı
L_k	: Kesit plastik momenti k sayılı enkesit grubuna ait olan çubukların uzunluklarının toplamı
L₀	: Beton kesitin dış çekme lifinde çatlakların başladığı durum
L₁	: Betonun dış basınç lifinde veya çekme donatısında plastik şekildeğştirmelerin başlamasına karşı gelen durum
L₂	: Eğilme momentinin artarak kesitin taşıma gücü adı verilen M _{L2} = M _p değerine eşit olduğu durum

$[m_p]$	: Aynı enkesite sahip grup elamanlara ait indirgenmiş kesit plastik momentlerini içeren kolon matris
M_{L_0}	: L_0 çatlama noktasına karşı gelen eğilme momenti
M_{L_1}	: L_1 noktasına karşı gelen eğilme momenti
M_{L_2}	: Kesit taşıma gücüne karşı gelen eğilme momenti
M_x	: X doğrultusu eğilme momenti
M_p	: Kesit plastik momenti
M_{pi}	: i sayılı çubuğun karakteristik plastik momenti
$(M_{pi})_s$	: Sınırlanacak enkesit karakteristiklerine ait plastik moment sınır değerlerini temsil eden değişken
M_{pk}	: k sayılı çubuğun enkesit karakteristiklerini temsil eden büyüklük
M_y	: Y doğrultusu eğilme momenti
M_{y_0}	: Eğilme momentinin bilinen başlangıç değeri
$(m_{ox})_i$	: Φ_j plastik kesitlerindeki birim şekildeğiştirmeler sıfır iken, i.kritik kesitte dış yüklerden dolayı oluşan m_x eğilme momenti
$(m_{oy})_i$	: Φ_j plastik kesitlerindeki birim şekildeğiştirmeler sıfır iken, i.kritik kesitte dış yüklerden dolayı oluşan m_y eğilme momenti
m_{pk}	: k sayılı aynı enkesite sahip grubun kesit plastik momenti
$(m_x)_i (\Phi_j=1)$	: Dış yükler sıfır iken, Φ_j plastik kesitin birim şekildeğiştirmesi için i.kritik kesitteki m_x eğilme momenti
$(m_y)_i (\Phi_j=1)$	: Dış yükler sıfır iken, Φ_j plastik kesitin birim şekildeğiştirmesi için i.kritik kesitteki m_y eğilme momenti
$\overline{m}, \overline{m_x}, \overline{m_y}$	: Eğilme momentine bağlı boyutsuz parametreler
N	: Normal kuvvet
N_0	: Normal kuvvetin bilinen başlangıç değeri
n	: Sistemdeki plastik kesit sayısı
$(n_o)_i$	: Φ_j plastik kesitlerindeki birim şekildeğiştirmeler sıfır iken, i.kritik kesitte dış yüklerden dolayı oluşan normal kuvvet
$(n)_i (\Phi_j=1)$	: Dış yükler sıfır iken, Φ_j plastik kesitin birim şekildeğiştirmesi için i.kritik kesitteki normal kuvvet
$\overline{n}$	: Normal kuvvete bağlı boyutsuz parametre
$[p_o]$	: Üzerinde plastik kesitler bulunmayan sistemde düğüm noktalarının yer değiştirme bileşenleri sıfır iken, çubuklara etkiyen dış yüklerden oluşan uç kuvvetleri kolon matrisi
$[p]_{ix}, [p]_{jx}$	: Sistem eksen takımındaki çubuk uç kuvvetleri matrisleri
$[p_o]_{ix}, [p_o]_{jx}$	: Çubuk üzerindeki yüklerden oluşan uç kuvvetleri kolon matrisleri

$[p_{\phi 0}]$	: k sayılı elemanı, düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri ve plastik şekildeğiştirme bileşenleri sıfır iken, k sayılı plastik kesitin bulunduğu çubuk üzerindeki yüklerden dolayı bu kesitteki iç kuvvet değişimlerinden oluşan kolon matris
$[p_{\phi}]_{ix}, [p_{\phi}]_{jx}$	: ij çubuğu üzerinde bulunan plastik kesitlerdeki birim plastik şekildeğiştirmelerden oluşan çubuk uç kuvvetleri matrisleri
P_G	: Göçme yükü
P_{L1}	: Birinci mertebe limit yük
P_{L2}	: İkinci mertebe limit yük
P_i, P_1, P_2	: Donatı sıralarındaki eksenel kuvvetler
$[q]$	: Düğüm noktaları yükleri kolon matrisi
$[S_{dd}]$	: Üzerinde plastik kesitler bulunmayan sistemin rijitlik matrisi
$[S_{d\phi}]$	: Plastik kesitlerdeki birim plastik şekildeğiştirmelerin denge denklemlerine etkisini ifade eden bir dikdörtgen matris
$[S_{\phi d}]$	: Dış yüksüz sistemde plastik şekildeğiştirmeler sıfır iken, yalnız düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden dolayı plastik kesitlerde oluşan iç kuvvetlerin akma koşullarına etkisini içeren bir matris
$[t]$	: Plastik kesit bilgilerini içeren matris
$[u]$	: Akma düzlemlerine bağlı olarak kesit plastik moment grupları ile ilgili katsayıları içeren bilgileri içeren matris
W_p	: Kesit plastik mukavemet momenti
w	: Optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu olarak hesaplanan yapı ağırlığı
$[X]$	: Optimizasyon probleminde tasarım değişkenlerinden oluşan kolon matris
$[x]$	: x_1, x_2 değerlerinden oluşan kolon matris
$[x]_i$	: x_1, x_2 denklem köklerinin i.adımdaki değerleri
$[x]_{i+1}$	: x_1, x_2 denklem köklerinin (i+1).adımdaki değerleri
X_c	: Optimizasyon probleminde çıkan değişkenler
X_g	: Optimizasyon probleminde giren değişkenler
X_{N+1}, X_{N+M}	: Optimizasyon probleminin gevşek değişkenleri
X_1, X_2, X_N	: Optimizasyon probleminin tasarım değişkenleri
x	: Beton basınç bölgesi yüksekliği
x_1, x_2	: Tarafsız eksenin yerinin tayini için yapılan hesapta kullanılan denklemin kökleri
y_o	: Tarafsız eksenin kesitin ağırlık merkezine olan uzaklığı
α	: Tarafsız eksenin x ekseniiyle yaptığı açı
α_i	: Optimizasyon probleminin değer sabitleri

α_{Lx}, α_{Ly}	: İkinci merteye teorisine göre hesapta çubuklara ait parametreler
Δ	: Kesit uzunluk doğrultusundaki plastik şekildeğiştirme bileşeni
Δ_i	: Beton hesap dilimi uzunluğu
δ_{lim}	: Göreli kat ötelemesine ait sınır değeri
δ_{xi}	: Herhangi bir katta x doğrultusunda dış yükler sıfıra eşitken her bir birim plastik şekildeğiştirme için ayrı ayrı yapılan hesap sonucunda bulunan maksimum göreli kat ötelemesi değeri
δ_{x0}	: Herhangi bir katta x doğrultusunda birim plastik şekildeğiştirmeler sıfıra eşitken dış yükler için yapılan hesap sonucunda bulunan maksimum göreli kat ötelemesi değeri
δ_{yi}	: Herhangi bir katta y doğrultusunda dış yükler sıfıra eşitken her bir birim plastik şekildeğiştirme için ayrı ayrı yapılan hesap sonucunda bulunan maksimum göreli kat ötelemesi değeri
δ_{y0}	: Herhangi bir katta y doğrultusunda birim plastik şekildeğiştirmeler sıfıra eşitken dış yükler için yapılan hesap sonucunda bulunan maksimum göreli kat ötelemesi değeri
ε	: Betonarme çubuğun dış basınç lifindeki şekildeğiştirme
ε_{co}	: Betonun elastik birim şekildeğiştirmesi
ε_{cu}	: Betonun izin verilen maksimum birim şekildeğiştirmesi
ε_e	: Beton çeliğinin elastik sınır (akma) birim uzaması
ε_{ea}	: Kesit yüksekliği içinde çekme donatısının bulunduğu yerdeki (akma) birim uzaması
ε_{i1}	: i_1 nolu beton kesit diliminin birim şekildeğiştirmesi
ε_{i2}	: i_2 nolu beton kesit diliminin birim şekildeğiştirmesi
ε_{su}	: Beton çeliğinin izin verilen maksimum (kopma) birim uzaması
σ	: Betonarme çubuğun dış basınç lifindeki gerilme
σ_{i1}	: i_1 nolu beton kesit diliminin gerilmesi
σ_{i2}	: i_2 nolu beton kesit diliminin gerilmesi
γ_b	: Betonarmenin birim hacim ağırlığı
χ	: Birim dönme (eğrilik)
χ_{L1}	: L_1 noktasına karşı gelen eğrilik
χ_{L2}	: L_2 noktasına karşı gelen eğrilik
η_a	: Çekme donatısının tarafsız eksenden olan uzaklığı
η_{i1}	: i_1 nolu beton kesit diliminin tarafsız eksenden olan uzaklığı
η_{i2}	: i_2 nolu beton kesit diliminin tarafsız eksenden olan uzaklığı
η_j	: Basınç donatısının tarafsız eksenden olan uzaklığı
η_u	: Kesit dış basınç lifinin tarafsız eksenden olan uzaklığı

$[\Phi]$	: Plastik kesitlerdeki bilinmeyen Φ plastik şekildeğiştirme parametrelerinden oluşan kolon matris
$[\Phi]_{ij}$	: ij çubuğu üzerinde bulunan plastik kesitlere ait plastik şekil değiştirme parametrelerinin alt alta gelmesinden oluşan kolon matris
Φ	: Plastik kesitlerdeki doğrusal olmayan şekildeğiştirmeleri temsil eden plastik şekildeğiştirme parametreleri
Φ_i	: i.plastik kesitteki şekildeğiştirme
Φ_j	: j.plastik kesitteki şekildeğiştirme
Φ_u	: Plastik kesit şekildeğiştirmeleri için üst sınır
Φ_x	: X doğrultusu plastik şekildeğiştirme bileşeni
Φ_y	: Y doğrultusu plastik şekildeğiştirme bileşeni
ρ_i	: i numaralı kesitteki toplam donatı oranı
ρ_t	: Kesitteki toplam donatı oranı

BETONARME UZAY ÇERÇEVELERİN İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKE GÖRE OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI İÇİN BİR ARDIŞIK YAKLAŞIM YÖNTEMİ

ÖZET

Son yıllarda yapı ve deprem mühendisliğindeki gelişmeler yapı sistemlerinin davranışını gerçeğe daha yakın olarak dikkate alabilme ve modelleyebilme konusunda birçok yeni yaklaşımı beraberinde getirmiştir. Yapı tasarımında amaçlanan, yönetmeliklerin gerektirdiği seviyede güvenli ve aynı zamanda ekonomik yapı tasarımıdır. Bu doğrultuda yapılan araştırma konularından biri de yapısal optimizasyon yöntemleridir.

Bu tez çalışmasında, betonarme uzay çerçeveleri ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan bir ardışık yaklaşım yöntemi önerilmiştir. Göçme yüküne veya limit yüke göre amaç fonksiyon olarak seçilen yapı ağırlığını optimum yapan çözümün en ekonomik çözüm olarak kabul edildiği bir optimum boyutlandırma probleminde yapı ağırlığı, tasarım değişkeni olarak seçilen enkesit karakteristiklerinden biri cinsinden ifade edilebilir. Çözümün sağlaması gereken akma koşulları, denge koşulları, geometrik uygunluk koşulları ile yerdeğiştirmeler, şekildeğiştirmeler ve enkesit karakteristiklerine ait sınırlamalar optimum boyutlandırma probleminin kısıtlamalarını oluştururlar.

Geliştirilen yöntemde, betonarme yapıların taşıyıcı sistem tasarımı ile ilgili istenen kısıtlamaların göz önüne alınabilmesine ilave olarak, ulusal ve uluslararası deprem yönetmeliklerinde öngörülen hasar ve performans seviyelerine bağlı olarak plastik şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme kısıtlamaları da göz önüne alınarak optimum boyutlandırma yapılabilmektedir.

Önerilen yöntemde akma koşulu kısıtlama denklemleri süperpozisyon yöntemi ile oluşturulmaktadır. Dış yükler ve plastik kesitlerdeki birim plastik şekildeğiştirme parametreleri için ayrı ayrı hesap yapılarak elde edilen sonuçlar süperpozisyon denklemleri yardımıyla birleştirilmektedir. Böylece denge denklemlerinin indirgenmesine gerek kalmamakta, büyük yapı sistemleri için de hesap aşamaları kısalmakta ve daha sistematik hale getirilmiş olmaktadır.

Tezin giriş bölümünü oluşturan ilk bölümünde konu tanıtılmaya çalışılmış, konu ile ilgili yapılan literatür araştırmasının sonuçlarına yer verilmiş ve çalışmanın amacı ile kapsamından bahsedilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde, betonarme yapıların ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılması için önerilen ardışık yaklaşım yönteminin esasları verilmiş, yöntemde yapılan varsayımlar anlatılmış, problemin kısıtlamaları, akma ve denge koşulları, optimize edilecek amaç fonksiyon kavramları açıklanmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde, optimizasyon yönteminin esasları ile boyutlandırmada izlenen yol ayrıntılı biçimde açıklanmaya çalışılmış, dördüncü bölümde ise önerilen

ardışık yaklaşım yönteminin sistem hesabı aşamasında kullanılacak olan doğrusal olmayan hesap yönteminin ve bu yöntemin sayısal uygulamaları için geliştirilmiş olan bilgisayar programının dayandığı esaslar anlatılmıştır.

Tez kapsamında geliştirilen bazı bilgisayar programları beşinci bölümde tanıtılmaya çalışılmış, programların amacı, giriş-çıkış bilgileri, programın kullanımı ile ilgili bilgiler bu bölümde açıklanmıştır.

Tezin altıncı bölümünde, geliştirilen ardışık yaklaşım yönteminin sayısal uygulamalarına yer verilmiş olup, tek katlı betonarme düzlem çerçeve, tek katlı betonarme uzay çerçeve ve çok katlı çok açıklıklı betonarme uzay çerçeve örnekleri üzerinde çeşitli optimum boyutlandırma hesapları yapılmış ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Tezin son bölümü olan yedinci bölümde, sonuçlara yer verilmiş olup, tez kapsamında geliştirilen ardışık yaklaşım yöntemi ve bu yöntemin sayısal uygulamaları neticesinde ulaşılan sonuçlar yorumlanmaya çalışılmıştır. Bu bölümde ayrıca, gelecekte konu ile ilgili yapılabilecek akademik çalışmalar ile ilgili öneriler sunulmuştur.

A SUCCESSIVE APPROXIMATION METHOD FOR THE OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE SPACE FRAME STRUCTURES ACCORDING TO THE SECOND ORDER LIMIT LOAD

SUMMARY

In recent years, innovations at the structural and earthquake engineering researches, lead to more reliable modelling and design of the structural systems. For instance, a lot of new design alternatives exist that provide more safe and economic structural design. One of these research topics is structural optimization techniques.

In this thesis, a successive approximation method is suggested for the optimum design of reinforced concrete space frame structures according to the second order limit load.

The first chapter of the thesis is the introducing section. In this chapter, the goal and scope of the thesis, the subject matter and conclusions of a literature research on the subject of the thesis are explained.

An economical solution in optimum design problem can be assumed by optimizing the structural weight for a limit load. In this kind of problem, structural weight can be expressed in terms of one of the section properties that chosen as design variable. The restrictions of optimum design problem consists of yield conditions, stability conditions, geometric compatibility conditions, displacements, deformations and some section properties.

By the suggested successive approximation method for the optimum design of reinforced concrete space frame structures according to the second order limit load, the restrictions related to the design parameters such as cross sectional dimensions and steel ratios of reinforced concrete structural systems can be taken into account. Also, plastic deformation limitations related to the different performance and hazard levels in national and international design standarts can be taken into account in this suggested successive approximation design method.

In the second chapter, the basis of the successive approximation method, assumptions of the method, restrictions of the optimization problem, yield conditions, stability conditions, goal function of the optimization problem are explained.

The basis of the successive approximation method for the optimum design of reinforced concrete space frame structures according to the second order limit load was established first using the matrix force method, then this method was innovated using matrix displacement method for steel space frame structures. After that, in a research paper, some systematic changes was made for the method in order to use it for the optimum design of plane frame steel structures. In this thesis, this method is innovated in order to use it for the optimum design of reinforced concrete space frame structures.

For this purpose, some kind of systematic innovations in mathematical formulations and algorithm of the method are made. In order to use the method for the optimum design of reinforced concrete space frame structures, some additions and new mathematical formulations especially for the yield conditions restraints and section properties formulations are taken into account in this thesis.

Cross sectional dimensions and steel ratios representing the weight of the structure are the goal functions of the optimum design problem alternatively. For this purpose, structural weight is expressed in terms of section properties which are the design variables of the optimization problem. In order to achieve this purpose, cross sectional dimension-plastic moment and steel ratio-plastic moment relations for reinforced concrete column and beam sections are developed. So, cross sectional area and steel ratios of the sections may be expressed in terms of plastic moments. In the proposed method, steel ratios in the reinforced concrete column and beam sections can also be taken into account as a goal function. For this reason, some mathematical formulations related to steel ratios of the cross sections for the combined axial force and two bending moments are explained. So, in numerical examples, steel ratios of the constant cross section dimensions are taken into account as the goal function of the optimization problem alternatively for the structural weight.

In this suggested successive approximation method for the optimum design of reinforced concrete space frame structures according to the second order limit load, axial forces and bending moments in the yield conditions are obtained by superposition of internal forces due to the unit plastic deformations and external loads. For this purpose, in order to find axial forces and bending moments in two directions at the critical sections of the system, the system is analyzed for external loads and for unit values of plastic deformations at the plastic sections, respectively. Then the internal forces at the critical sections are superposed using the suggested superposition formulations in order to construct the yield condition restraints.

In the third chapter, the basis of the optimization method used in the thesis and flow chart of the design is explained in detail. Some innovations are made in order to use the conventional simplex algorithm in the solution of optimization problem. In the fourth chapter, a non-linear calculation method used in the analysis phases of the suggested successive approximation method and basis of a computer programme that can be used for numerical examples of this calculation method, is explained.

A few computer software in order to use for numerical examples of the thesis are explained in the fifth chapter. The goal of the software, input and output data and usage of the programs are explained in this chapter.

YCR3D computer software, which is an API application, is developed in this thesis in order to construct yield condition restraints. Also the superposition of the internal forces due to the external loads and unit values of plastic rotations can be made by using this computer software.

Another computer software, KESIT, is developed in order to construct the relationships between cross-sectional area and plastic moment, and also the relationships between steel ratio and plastic moment.

At each step of the successive approximation, new section properties can be calculated by using KESIT computer software in terms of optimum plastic moments which are the design variables of the optimization problem. The software KESIT constructs also the coefficients of the goal function by using the relationships between cross-sectional properties.

In the design phase, the software SIM and in the non-linear analysis phase the software EPARCS are used.

Numerical examples of the successive approximation method for the optimum design of reinforced concrete space frame structures according to the second order limit load are given in the sixth chapter. A one story reinforced concrete plane frame, a one story reinforced concrete space frame and a six-story reinforced concrete space frame that consists of multiple spans in the two direction are designed by the proposed method in this chapter. These example structures are designed for different approaches.

The last chapter includes conclusions of the thesis. Results of the numerical examples of the proposed successive approximation method are evaluated and also some future academic research proposals that can be made related to this topic are included in the last chapter.

1. GİRİŞ

1.1 Konu

Son yıllarda yapı ve deprem mühendisliğindeki gelişmeler yapı sistemlerinin davranışını gerçeğe daha yakın olarak dikkate alabilme ve modelleyebilme konusunda birçok yeni yaklaşımı beraberinde getirmiştir. Yapı tasarımının amacı, yönetmeliklerin gerektirdiği ölçüde güvenli ve aynı zamanda ekonomik yapı tasarımıdır. Bu doğrultuda yapılan araştırma konularından biri de yapısal optimizasyon yöntemleridir.

Optimizasyon yöntemleri genel olarak, matematik programlama teknikleri ve optimumluk kriteri teknikleri olarak iki gruba ayrılmaktadır. Matematik programlama teknikleri de kendi içinde doğrusal programlama problemleri ve doğrusal olmayan programlama problemleri olarak ikiye ayrılır. Burada doğrusal olup olmama durumu, problemin kısıtlamalarının ve amaç fonksiyonunun tasarım değişkenleri cinsinden doğrusal bağıntılarla ifade edilip edilmemesine bağlıdır.

Doğrusal olmayan programlamaya dayanan yapı optimizasyonu problemlerinde, tasarım değişkenlerinin sayısının artması problemin çözümünün yakınsaklık hızını ve güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak amacı ile optimumluk kriteri yöntemleri geliştirilmiştir. Ardışık yaklaşımla optimum çözümün arandığı bu yöntemler, hem değişken sayısından bağımsızdır hem de basit bir algoritma ile ifade edilebilmektedir.

Göçme yüküne veya limit yüke göre yapı ağırlığını optimum yapan çözümün en ekonomik çözüm olarak kabul edildiği bir optimum boyutlandırma probleminde yapı ağırlığı, tasarım değişkeni olarak seçilen enkesit karakteristiklerinden birisi cinsinden ifade edilebilir. Çözümün sağlanması gereken akma koşulları, denge koşulları, geometrik uygunluk koşulları ile yerdeğiştirmeler, şekildeğiştirmeler ve enkesit karakteristiklerine ait sınırlamalar optimum boyutlandırma probleminin kısıtlamalarını oluştururlar [1].

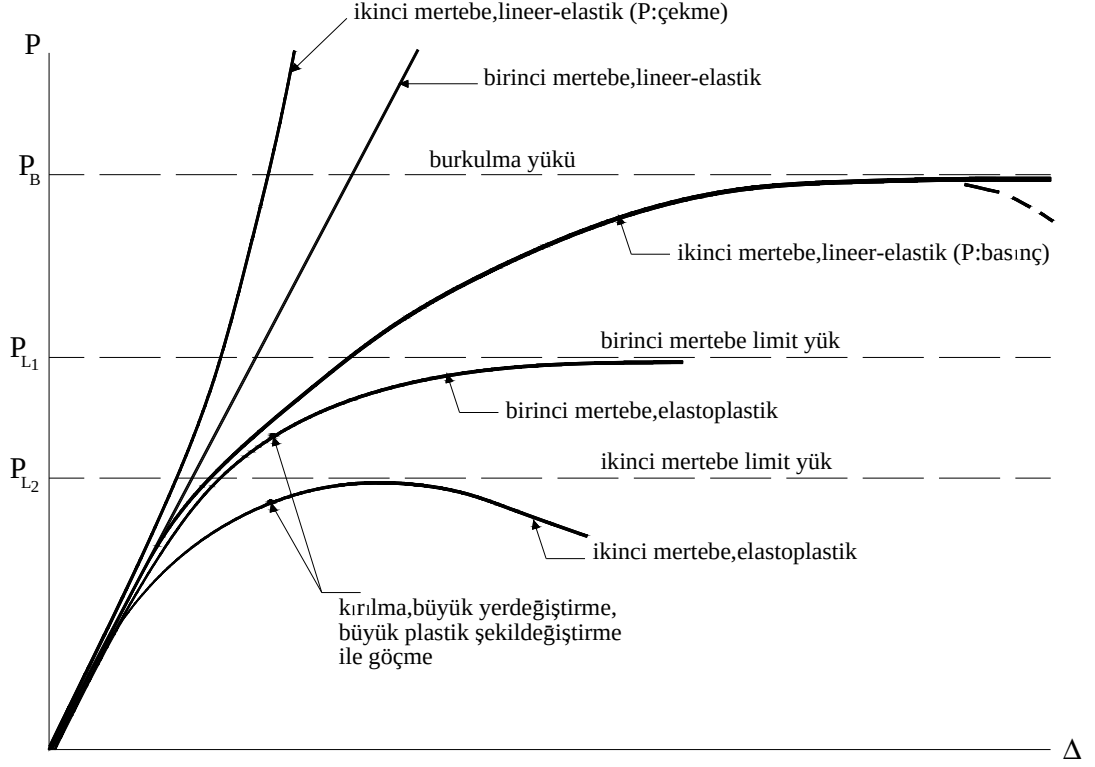
Yapılara etkiyen dış yükler işletme yükü sınırını aşarak yapının taşıma gücüne yaklaştıkça, yapısal elemanlardaki gerilmeler doğrusal elastik sınırı aşmakta ve yerdeğiştirmeler denge denklemlerinde ihmal edilemeyecek değerler almaktadır.

Bir yapı sisteminin dış yükler altındaki doğrusal olmayan davranışı iki temel nedenden kaynaklanmaktadır.

- Malzemenin doğrusal elastik olmaması nedeniyle gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarının (bünye denklemlerinin) doğrusal olmaması
- Geometri değişimleri nedeniyle denge denklemlerinin doğrusal olmaması

Doğrusal olmayan malzemeden yapılmış sistemlerde, artan dış yüklerle beraber iç kuvvetler de artarak bazı kesitlerde doğrusal elastik sınırı aşmakta ve bu kesitler dolayında doğrusal olmayan plastik şekildeğiştirmeler meydana gelmektedir. Doğrusal olmayan şekildeğiştirmeler genel olarak sistem üzerinde sürekli olarak yayılmakta ancak kopma sırasındaki toplam şekildeğiştirmelerin doğrusal şekil değiştirmelere oranının büyük olduğu sünek malzemeden yapılmış sistemlerde, doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin plastik mafsalları adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde ise sistemin doğrusal elastik davrandığı varsayılabilmektedir. Bu varsayım “plastik mafsalları hipotezi” olarak adlandırılmakta ve bu hipotezin geçerli olduğu bir yapı sisteminin birinci mertebe teorisine göre hesabında, oluşan plastik mafsallar sebebiyle sistemin tümünün veya bir bölümünün mekanizma durumuna getiren yük de “birinci mertebe limit yük” olarak tanımlanmaktadır [2].

Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin göz önüne alındığı ikinci mertebe teorisinde ise, aksenal kuvvetin basınç olması durumunda, dış yükler arttığında yerdeğiştirmeler de hızlı olarak artmakta ve dış yükler doğrusal elastik burkulma yükü adı verilen bir sınıra gelince sistem Şekil 1.1’de gösterildiği gibi burkularak göçmektedir.



Şekil 1.1 : Farklı hesap yöntemlerine ait yatay yük-yerdeğiştirme diyagramları.

Doğrusallığı bozan her iki etkinin beraber hesaba katılması halinde, yapı sistemi ikinci mertebe elasto-plastik teoriye göre hesaplanır. Yüklerin artmasıyla doğrusal elastik sınır aşıldığında oluşan plastik şekil değiştirmeler nedeniyle yer değiştirmeler hızlı olarak artmakta, plastik mafsal hipotezinin geçerli olduğu yapı sistemlerinde, dış yükler artarak “ikinci mertebe limit yük” olarak isimlendirilen bir sınır değere ulaşınca oluşan plastik mafsallar nedeniyle rijitliği azalan yapı sistemi stabilite yetersizliği nedeniyle taşıma gücünü yitirir.

Bazı hallerde dış yükler limit yüke erişmeden önce meydana gelen büyük yer değiştirmeler, büyük plastik şekil değiştirmeler ile betonarme sistemlerde oluşan çatlaklar ve kırılma ile yapının göçmesine neden olan yüke “göçme yükü” denilmektedir [2].

Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi terk edilir ve akma koşulu iç kuvvetlerin doğrusal bir fonksiyonu olarak ifade edilirse, limit yük için minimum ağırlıklı boyutlandırma amaçlı optimizasyon problemi, doğrusal programlama problemi olarak çözülebilmektedir. Bunun sebebi, bu durumda birinci mertebe limit yükün mekanizma yüküne eşit olması ve sistemin mekanizma durumuna gelmesine

neden olan iç kuvvet durumunun sadece denge denklemleri kullanılarak hesaplanabilmesidir.

Yerdeğiştirmelerin yeterince küçük olmadığı ve normal kuvvetlerin önemli olduğu sünek yapı sistemlerinin ikinci mertebe limit yüke göre boyutlandırılmaları gerekmektedir. Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi, akma koşullarının iç kuvvet bileşenlerine bağlı doğrusal olmayan bir fonksiyonla ifade edilmesi ve ikinci mertebe limit yükün mekanizma yüküne eşit olmaması gibi nedenlerle, optimum boyutlandırma amaçlı optimizasyon problemleri genellikle doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi olarak göz önüne alınmaktadır [1].

1.2 Konu ile ilgili çalışmalar

Bu bölümde betonarme yapıların optimum boyutlandırılması konusunda daha önce yapılan çalışmaları özetleyen bir literatür araştırmasının sonuçlarından bahsedilecektir.

Orakdöğen [1], çelik uzay çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yük için yapı ağırlığını minimum yapan bir ardışık yaklaşım yöntemi geliştirmiştir. Optimizasyon işleminin her adımı tasarım ve analiz aşamalarından oluşmaktadır. Doğrusal olmayan optimizasyon problemi çeşitli idealleştirmeler ile doğrusal bir optimizasyon problemi haline getirilmekte ve bir ardışık yaklaşım yöntemi uygulanmaktadır. Önerilen yöntemde yük katsayıları ile çarpılmış tasarım yüklerinden oluşan ve büyük ölçüde dış yüklere bağlı olan eksenel kuvvetler tahmin edilerek denge denklemleri doğrusal hale getirilmekte, akma koşulları ise akma yüzeyinin düzlemlerden oluştuğu kabulü ile doğrusallaştırılmaktadır. Ardışık yaklaşımın her adımında kesit özellikleri bir önceki hesap adımından alınmakta, plastik mafsallık yerleri ve plastik şekildeğiştirme vektörleri ise bir önceki adımda boyutlandırılan sistemin doğrusal olmayan hesabı ile bulunmaktadır. Tasarım değişkenleri ve yapı ağırlığı ardışık iki adımda birbirine yeter derecede yakın olunca optimum çözüm bulunmakta ve hesaba son verilmektedir. Geliştirilen yöntemin sayısal uygulamaları için FORTRAN programlama dili kullanılarak bir bilgisayar programı da hazırlanmıştır.

Özer [3], doçentlik tezinde çelik düzlem yapı sistemlerinde ikinci mertebe limit yük için yapı ağırlığını minimum yapan bir boyutlandırma yöntemi geliştirmiştir. Yöntemin boyutlandırma aşamasındaki denklemler matris kuvvet yöntemi ile elde

edilmiştir. Çalışmada kullanılan doğrusal programlama tekniği [1]'de, [4]'de ve bu çalışmada da örnek alınmıştır.

Orakdöğen [4], düzlem çerçevelerin birinci mertbe limit yüke göre minimum ağırlıklı boyutlandırılmaları amacıyla matris yerdeğiştirme yöntemine dayanan bir optimizasyon tekniği önermiştir. Önerilen yöntemde akma koşulu ifadelerindeki eğilme momentleri, birim plastik mafsallara dönme momentleri ve dış yükler cinsinden ifade edilmekte, geleneksel simplex algoritması üzerine bazı eklemeler yapılarak yapı ağırlığının optimizasyonu probleminin çözümüne uygun hale getirilmektedir. Geliştirilen formülasyon, matris yerdeğiştirme yöntemini baz aldığı için, yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme kısıtlamaları da kolaylıkla probleme dahil edilebilmektedir.

Özer [5], yapı sistemlerinin doğrusal olmayan hesabı için bir yük artımı yöntemi önermiştir. Yöntem bu çalışmada yapı sistemlerinin malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan hesabı için kullanılan yöntemle esas oluşturan ilk çalışmadır. Önerilen yöntemde, doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin sistem üzerinde sürekli yayılı olması durumu gözönüne alınmıştır.

Özer [6], [5]'de önerilen hesap yöntemini doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin sistem üzerinde sürekli yayılı olması yerine, plastik kesit adı verilen belirli kesitlerde toplandığı varsayımına dayanan plastik mafsalları kullanarak geliştirmiştir.

İrtem [7], [5] ve [6]'da önerilen yöntemlerden yararlanarak, yapı sistemlerinde ikinci mertbe limit yükün hesabı için bir yük artımı yöntemi önermiştir. Yöntemde, sabit düşey yükler ve orantılı olarak artan yatay yükler için hesap yapılmaktadır.

Girgin [8], [5] ve [6]'da önerilen yöntemden yararlanarak betonarme yapılarda ikinci mertbe limit yükün ve göçme güvenliğinin belirlenmesi için bir hesap yöntemi önermiştir. Yöntemde, sabit düşey yükler altında orantılı olarak artan yatay yükler için hesap yapılmaktadır. Yöntemin sayısal uygulamaları için geliştirilen bilgisayar programı, bu çalışmada betonarme yapıların ikinci mertbe elastoplastik teoriye göre hesabı için kullanılmaktadır.

Çakıroğlu ve Özer [9], malzeme ve geometri değişimi bakımından lineer olmayan yapı sistemlerinin hesabı için bir yöntem geliştirmiştir. Yöntem, bu çalışmada betonarme çubukların taşıma gücünün hesabında kullanılan yöntemle esas oluşturmaktadır. Farklı yükleme durumlarını gözönünde bulundurarak, eksenel

kuvvet, basit eğilme, bileşik eğilme ve iki yönde eğilme momentinin etkisi durumları için ayrı ayrı taşıma güçlerinin hesabında kullanılacak yöntem ve formüller önermiştir.

Orakdöğen ve Özer [10], Orakdöğen [2] tarafından önerilen yöntemi bir araştırma makalesi olarak sunmuşlardır. Uzun çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yük için yapı ağırlığını minimum yapan bir ardışık yaklaşım yönteminin sunulduğu çalışmada, optimizasyon için doğrusal bir matematik programlama tekniği olan simplex yöntemi kullanılmıştır. Doğrusal olmayan optimizasyon problemi her adımda amaç fonksiyon olan ağırlık fonksiyonunun ve tasarım kısıtlamalarının doğrusallaştırılması ile doğrusal programlama problemine indirgenerek çözülmektedir. Yöntemin geliştirilmesinde çelik uzay çerçeveler esas alınmıştır.

Hajek ve Frangopol [11], perde sistemlerin ağırlık optimizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, katlanmış plak teorisinden yararlanarak bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Programda kısıtlama olarak gerilmeler ve yerdeğiştirmeler seçilirken tasarım değişkenleri olarak da perde genişliği ve kalınlığı esas alınmıştır.

Dinno ve Mekha [12], malzeme bakımından doğrusal olmayan betonarme düzlem çerçevelerin optimizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, problemin tasarım değişkenleri olarak enkesit boyutları ve donatı miktarını seçmişlerdir. Minimum maliyetli boyutlandırmayı amaçlayan çalışmada, optimizasyon yöntemi olarak ardışık kısıtlamasız minimizasyon tekniği kullanılmıştır.

Moharrami ve Grierson [13], elastik davranan betonarme düzlem çerçevelerin optimizasyonu için bir yöntem önermişlerdir. Enkesit genişliği ve yüksekliği ile donatı miktarının tasarım değişkeni olarak seçildiği çalışmada yalnız gerilme kısıtlamaları göz önüne alınmakta ve optimizasyon tekniği olarak optimumluk kriteri yöntemi kullanılmaktadır.

Kanagasundaram ve Karihaloo [14], betonarme düzlem çerçeveler için, Avustralya dizayn standardında yer alan boyutlandırma kısıtlamalarını sağlayan en ekonomik çözüm için bir optimizasyon yöntemi geliştirmişler, amaç fonksiyon olarak beton, donatı miktarı ve kalıp maliyetinden oluşan toplam yapı maliyetini seçmişlerdir.

Ganzerli, Pantelides ve Reaveley [15], betonarme düzlem çerçevelerin minimum maliyet optimizasyonu için performansla göre tasarım yöntemlerinden faydalanmışlar, tasarım değişkenleri olarak kiriş ve kolon enkesitleri ve donatı

miktarlarını kullanıp, seçilen performans seviyesine göre kiriş ve kolonların uçlarındaki plastik dönmeleri problemin kısıtlamaları olarak seçmişlerdir.

Zou, Chan, Li ve Wang [16], betonarme düzlem çerçevelerin performansa dayalı tasarım yöntemlerine göre çok amaçlı optimizasyonunu incelemişlerdir. Geliştirilen yöntemde, yapıların toplam yapı maliyetinin optimize edilmesi amaçlanmış, toplam yapı maliyeti için, yapı tasarımındaki malzeme maliyeti ile yapıların ömrü içerisinde maruz kalacağı olası depremlerde oluşması beklenen hasar maliyeti kombine edilerek bir yöntem önerilmiştir.

Lee ve Ahn [17], betonarme düzlem çerçevelerin yatay ve düşey yükler altında optimizasyonu için genetik algoritmalarından faydalanan bir yöntem önermişlerdir. Kiriş ve kolon enkesit boyutları arasındaki oranlar ve donatı oranları için pratikte sıklıkla kullanılan değerler seçilmiştir.

Camp, Pezeshk ve Hansson [18], betonarme düzlem çerçevelerin genetik algoritmalar kullanılarak optimize edilmesi üzerinde çalışmış, problemin kısıtlamaları olarak Amerikan yapı şartnamesinde (ACI 318-77) [19], yer alan işletme ve dayanım koşullarını kullanmış, amaç fonksiyon olarak da malzeme ve inşaat maliyetini seçmişlerdir.

Balling ve Yao [20], üç boyutlu betonarme uzay çerçeveler için kolon ve kiriş enkesit boyutları ve donatı miktarı üzerinde bir optimizasyon yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Geliştirilen yöntemin sonuçlarını sınamak amacıyla seçilen sayısal örneklerin sonuçlarını benzer bir başka çalışmanın sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Yöntemin tek katlı, iki katlı ve dört katlı uzay çerçevelere uygulanmasını önermişlerdir.

Rajeev ve Krishnamorthy [21], betonarme düzlem çerçevelerin optimizasyonu için genetik algoritma yöntemini baz alarak çeşitli örnekler üzerinde çalışmışlar ve bir yöntem geliştirmişlerdir.

Zou [22], betonarme yapılar için deprem hesabında davranış spektrumu ve zaman tanım alanında doğrusal hesap yöntemlerini kullanarak bir elastik tasarım optimizasyonu yöntemi önermiştir. Optimize edilecek amaç fonksiyon olarak seçilen yapı maliyeti bulanık mantık yaklaşımı ile formüle edilmiştir.

Curry [23], akma çizgileri yöntemini kullanarak betonarme döşemelerin optimizasyonu üzerinde çalışmıştır. Optimize edilecek amaç fonksiyon olarak,

betonarme döşemenin donatı miktarının seçildiği çalışmada, yapılan sayısal uygulamaların sonuçları daha önce doğruluğu kabul edilmiş döşeme tasarımı yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Abadi ve Javad [24], betonarme yapılar için kiriş, kolon ve perde boyutlarını tasarım değişkenleri olarak almışlar, amaç fonksiyon olarak ise beton, donatı ve kalıptan oluşan yapı maliyetini seçerek optimize etmişlerdir. Problemin kısıtlamaları olarak Amerikan ACI yönetmeliğinin ilgili tasarım koşulları seçilmiştir.

Yao [25], detaylı yöntem, doğrusallaştırma yöntemi, geleneksel yöntem ve basitleştirilmiş yöntem adını verdiği dört ayrı yöntemi kullanarak, betonarme çerçeveler için optimizasyon problemini betonarme çerçeveler için iki aşamada ele almıştır. Sistem aşaması olarak adlandırdığı birinci aşamada betonarme kesitlerin, yapı elemanı aşaması olarak adlandırdığı ikinci aşamada ise donatı miktarının optimizasyonu amaçlanmıştır.

Hassanain [26], betonarme çerçevelerin optimizasyonu amacıyla, Amerikan ACI yönetmeliğinin ilgili tasarım koşullarını problemin kısıtlamaları olarak seçip, tasarım değişkenleri olarak betonarme kesit boyutları ve donatı miktarını esas almıştır. Her katta, tasarım değişkeni olarak seçilen beton kesit boyutları için, kolonların her iki boyutu ile kiriş genişlik ve yükseklikleri için tek bir parametre göz önüne alınmıştır.

Yang [27], betonarme yapılar için ayrık bir optimizasyon yöntemi geliştirmiş, tasarım değişkenleri olarak enkesit boyutları ve donatı miktarını seçmiştir. Problemin kısıtlamaları olarak ACI 318-77 yönetmeliği koşulları alınmış, amaç fonksiyon olarak da toplam yapı maliyeti seçilmiştir.

Chan ve Wang [28], çok katlı yüksek betonarme yapıların işletme yükleri altında, doğrusal olmayan analiz yöntemlerini kullanarak en büyük tepe noktası yerdeğiştirmesini optimize etmişler ve bu amaçla bir ardışık yaklaşım yöntemi önermişlerdir.

Fadaee ve Grierson [29], Amerikan ACI-1995 yönetmeliğini [30] esas alarak üç boyutlu betonarme uzay çerçevelerin minimum maliyetli olarak tasarımı amacıyla bir optimizasyon yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada kiriş ve kolonlar dikkörtgen kesitli olarak seçilmiştir. Amaç fonksiyon olarak seçilen yapı maliyeti ise beton, donatı ve kalıp maliyetlerini içerecek şekilde oluşturulmuştur.

Fereig [31], yerinde dökme döşemeleri olan tek açıklıklı köprülerin önerilmeli kirişlerinin minimum maliyetli olarak boyutlandırılmaları için, AASHTO-1992 [32] standardına uygun bir optimizasyon yöntemi önermiştir.

Guerra ve Kioussis [33], çok açıklıklı ve çok katlı betonarme kolon ve kirişlerden oluşan düzlem çerçeve sistemler için, eksenel yük ve eğilme momenti etkisi altında betonarme çerçevelerin maliyetini optimize etmek amacıyla bir algoritma geliştirmişler ve yöntemin sayısal uygulamaları için bir MATLAB programı önermişlerdir.

Chung ve Sun [34], betonarme kirişler için malzeme bakımından doğrusal olmayan teoriye göre kiriş ağırlığı üzerinde bir optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Tasarım değişkenleri olarak kesit genişlikleri ve donatı alanları seçilmiştir. Problemin kısıtlamaları gerilmeler ve şekildeğiştirmelerdir. Amaç fonksiyon olarak ise kiriş ağırlığı seçilmiştir.

Zou ve Chan [35], betonarme yapılar için, tasarım değişkeni olarak sadece donatı alanını kabul edip, itme analizi yöntemini kullanan bir optimizasyon yöntemi geliştirmişler, problemin kısıtlamaları olarak itme analizi sonucu bulunan kat yerdeğiştirmelerini kullanmışlardır. Optimizasyon aşamasında optimumluk kriteri yöntemi kullanılmıştır.

Afonso, Sienz ve Belblidia [36], değişken kalınlıklı serbest geometrilik kabukların yapısal optimizasyonu üzerine yaptıkları araştırmada, topoloji optimizasyonu ve yapısal şekil optimizasyonu olarak adlandırdıkları iki ayrı yöntem üzerine çalışmışlar ve bu iki ayrı yöntemin beraber uygulanması durumunda elde ettikleri sonuçları açıklamışlardır.

Tabatai ve Mosalam [37], basit eğilme etkisi altında tek doğrultuda çalışan döşemeler ve yüksek kirişler için, donatı optimizasyonunu amaçlayan bir yöntem geliştirmişler, sayısal örneklerin çözümü için DIANA adlı bilgisayar programını kullanmışlardır.

Lin ve Frangopol [38], karayolu köprü kirişlerinin optimizasyonu için bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada AASHTO yönetmeliğinin ilgili maddeleri göz önünde bulundurulmuş ve kısıtlama olarak göz önüne alınmıştır. Yöntem iki ayrı optimizasyon formülasyonundan oluşmaktadır. Birinci formülasyon yük ve dayanım faktörlerinden oluşmakta, ikincisi ise güvenilirlik yaklaşımına dayanmaktadır.

Çalışma kapsamında analizler güvenilirliği kanıtlanmış doğrusal olmayan hesap yapan bir bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal örnekler için T kesitli köprü kirişleri kullanılmıştır.

Liang, Haukaas ve Royset [39], yapı tasarımında mühendislere maliyet ve güvenliği dengeleyen bir yaklaşım sunmak amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada OpenSees isimli bilgisayar yazılımı kullanılmış, bu yazılımın algoritmasına direkt yer değiştirme yöntemini kullanarak çeşitli eklemeler yapmışlardır. Yöntemin sayısal uygulamasını üç açıklıklı altı katlı bir betonarme düzlem çerçeve üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Govindaraj ve Ramasamy [40], Hindistan yapı yönetmeliğindeki kısıtlamaları göz önüne alarak, genetik algoritmaya dayanan bir optimizasyon yöntemi üzerine çalışmışlardır. Çalışma betonarme düzlem çerçeveler için yapılmış olup, amaç fonksiyon olarak yapı toplam maliyeti seçilmiştir. Toplam yapı maliyeti beton, donatı ve kalıp maliyetinden oluşmaktadır.

Aoues ve Chateauneuf [41], güvenilirlik bazlı tasarım optimizasyonu (RBDO) olarak adlandırdıkları yöntemi kullanarak yapılarda güvenlik-maliyet ilişkisini dengelemek amacıyla bir çalışma yapmışlar, sistem bazında optimizasyonu amaçlamışlar ve seçilen hedef güvenliği sağlayan optimum çözümü aramışlardır. Önerdikleri yöntemi betonarme düzlem çerçeveler üzerinde sınamışlardır.

Perea, Alcala, Yepes, Vidoso ve Hospitaler [42], karayolu köprülerinde kullanılan betonarme kutu kesitli köprü kirişlerinin optimizasyonu için önerdikleri yöntemde, heristik (sezgisel) algoritma olarak adlandırdıkları dört ayrı formülasyonu, elli adet tasarım değişkeninden oluşan problemin çözümü için kullanmışlardır. Bütün formülasyonlar, 13 metre yatay açıklığı olan aynı örnek üzerinde uygulanmış, sonuçta kesitte % 1.4 - 7.5 oranları arasında değişen ekonomi sağlanmıştır.

Kwak ve Noh [43], betonarme yapıların donatı tasarımı için alternatif bir yaklaşım olan, literatürde “strut and tie” modelleri olarak geçen, betonarme kesit içindeki donatıyı eşdeğer çelik kafes elemanlar olarak varsayıp boyutlandıran yöntem üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmadaki amaç, çeşitli yapı sistemleri için doğru çelik kafes modelini seçmek olarak belirlenmiş ve bu problemin optimizasyonu yapılmaya çalışılmıştır.

Lagaros ve Papadrakis [44], Eurocode-8 deprem yönetmeliğini [45] değerlendirmek amacıyla, üç boyutlu betonarme yapıların bu yönetmeliğe göre tasarımları ile çok amaçlı bir optimizasyon kavramına göre yaptıkları tasarımları karşılaştırmışlardır. Çok amaçlı optimizasyon yönteminde başlangıçtaki yapı maliyeti esas alınarak Eurocode-8 deprem yönetmeliğine göre seçilen deprem düzeyi için bulunan maksimum yanal yerdeğiştirmenin optimizasyonunu sağlamaktır.

Chan ve Zou [46], elastik ve elastik olmayan tasarım optimizasyonu olarak adlandırdıkları iki aşamadan oluşan bir optimizasyon tekniği önermişlerdir. Önerilen optimizasyon tekniği ile seçilen örnek sistemin davranış spektrumu hesapları ve itme analizleri yapılmıştır. Çalışmada, davranış spektrumu analizinden elde edilen elastik yerdeğiştirmenin ve doğrusal olmayan statik hesabından elde edilen elastik olmayan yerdeğiştirmenin, elemanın boyutlandırılmasında kullanılan tasarım değişkenleri cinsinden ifade edilebileceği varsayımı yapılmıştır. Optimizasyon yöntemi olarak optimumluk kriteri yaklaşımından yararlanılmıştır. Önerilen yöntemin sayısal uygulaması için iki açıklıklı on katlı bir betonarme düzlem çerçeve kullanılmıştır.

PEER (Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi)'nin yayınladığı standartta ise [47], yüksek yapıların performansa dayalı tasarım yöntemleri kullanılarak boyutlandırılması ile ilgili önerilen yönetmelik esasları yer almaktadır.

1.3 Çalışmanın amacı

Bu çalışmanın amacı betonarme uzay çerçeve sistemlerin gözönüne alınan varsayımlar, sınır koşulları ve kısıtlamalar altında ikinci mertbe limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmasını sağlayan bir yöntemin geliştirilmesidir.

Çalışmada, boyutlandırma aşaması ilk olarak [3]'de matris kuvvet yöntemi formülasyonu kullanılarak önerilen, [1]'de matris yerdeğiştirme yöntemi kullanılarak çelik uzay çerçevelerin boyutlandırılması amacı ile algoritması genişletilen minimum ağırlıklı boyutlandırma yöntemi, betonarme uzay çerçevelerin ikinci mertbe limit yük için minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılması problemine uygulanmıştır.

Geliştirilen yöntemde, betonarme yapıların taşıyıcı sistem tasarımı ile ilgili istenen kısıtlamaların göz önüne alınabilmesine ek olarak, ulusal ve uluslararası deprem yönetmeliklerinde öngörülen hasar ve performans seviyelerine bağlı olarak plastik

şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme kısıtlamaları da göz önüne alınarak optimum boyutlandırma yapılabilmektedir.

Betonarme yapıların ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılmasını amaçlayan bu çalışmada, amaç fonksiyon olarak seçilen ağırlık fonksiyonu, kesit karakteristik plastik momentlerine (M_p) bağlı olarak ifade edilmektedir.

Bu amaçla, taşıyıcı sistemi oluşturan kolon ve kirişler için enkesit karakteristiklerinden olan genişlik (b), yükseklik (h), geometrik ve mekanik donatı oranları (ρ, μ) kesit karakteristik plastik momentlerine (M_p) bağlı olarak ifade edilmiştir.

Yapı çeliğinin homojen bir malzeme olması sebebi ile çelik yapı sistemleri için bu bağıntılar analitik yöntemler kullanılarak plastik mukavemet momentlerine (W_p) bağlı olarak yazılabilmektedir. Betonarme yapılarda ise, kesitin taşıma gücünü ifade eden plastik momentlerin hesabında hem betonun hem de donatının katkısı göz önüne alınmalıdır. Bu durumda, betonarme çubuk elemanlarda kesitin taşıma gücünü oluşturan karakteristik plastik momentlerin enkesit karakteristiklerine bağlı olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Söz konusu ifadeler, yöntemin esasları ve uygulamaları sonraki bölümlerde ayrıntılı biçimde ele alınmıştır.

2. BETONARME UZAY ÇERÇEVELERİN İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKE GÖRE OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI İÇİN BİR ARDIŞIK YAKLAŞIM YÖNTEMİ

Bu bölümde betonarme uzay çerçeve sistemleri olarak adlandırılan üç boyutlu betonarme yapı sistemlerinin ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılması için önerilen yöntemin esasları açıklanacaktır. Çalışmada yapı ağırlığının optimizasyonu için [1]'de çelik yapı sistemleri için geliştirilen minimum ağırlıklı boyutlandırma yöntemi esas alınarak, bu yöntemin betonarme yapılara uygulanması için yeni bir ardışık yaklaşım yöntemi önerilmektedir.

Bu sebeple, öncelikle [3]'de önerilen, [1]'de çelik uzay çerçeveler için geliştirilen ve [4]'de çelik düzlem çerçeve sistemler için birinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırma problemine uyarlanmak üzere sistematik düzenlemeler yapılan yöntemde geçerli olan bazı varsayımlar ile bu çalışmada önerilen yeni yönteme ait ek varsayımlar aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır. Ardışık yaklaşım yönteminin esaslarından ana hatlarıyla bahsedilmiş ve yöntemin betonarme yapılara uygulanması için gerekli olan değişiklik ve eklemeler ile bazı farklı yaklaşımlar da detaylı olarak açıklanmıştır.

Bu çalışmada önerilen optimizasyon yönteminde de optimize edilecek amaç fonksiyon olarak seçilen yapı ağırlığı, optimizasyon değişkeni olarak seçilen kesit karakteristik plastik momentleri cinsinden ifade edilmektedir. Bu sebeple, betonarme kolon ve kiriş kesitleri için, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar detaylı biçimde çıkarılarak, enkesit karakteristikleri olan enkesit alanı ve donatı oranları da karakteristik plastik momentleri cinsinden ifade edilmiştir.

Betonarme yapılar için enkesit alanları ve donatı oranlarına bağlı olarak çıkarılan enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar, ilgili bölümde detaylı olarak açıklanmıştır. Çalışmada, akma koşulu kısıtlamaları da, tasarım değişkeni olarak seçilen plastikleşen kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerine ve

karakteristik plastik momentlere bağlı olarak, denge denklemlerini de içerecek şekilde doğrudan elde edilmektedir.

2.1 Varsayımlar

Çalışmada yapılan varsayımlar, aşağıda maddeler halinde verilmiştir :

- a) Bernoulli-Navier hipotezi geçerlidir. Buna göre, düzlem kesitlerin şekildeğiştirmeden sonra da düzlem kaldığı varsayılmıştır.
- b) Malzeme ideal elasto-plastiktir ve plastik mafsall hipotezi geçerlidir. Doğrusal olmayan şekildeğiştirmeler plastik kesitlerde toplanmaktadır ve malzeme davranışı plastik kesitler dışında doğrusal elastiktir.
- c) Akma yüzeyi, akma koşulu kısıtlamalarının doğrusal hale getirilebilmesi amacıyla düzlemlerden oluşacak şekilde idealleştirilmektedir. Akma koşulu eksenel kuvvet ve iki doğrultudaki eğilme momentine bağlıdır.
- d) İkinci mertebe etkileri, sistemi oluşturan çubukların asal düzlemleri içindeki yerdeğiştirmeleri için göz önüne alınmakta, burulma doğrultusundaki yerdeğiştirmelere bağlı ikinci mertebe etkileri terk edilmektedir.
- e) Geometri değişimleri bakımından doğrusal olmama durumu denge denklemlerinde göz önüne alınmakta, inşaat mühendisliği problemlerinde genel olarak uygulandığı gibi geometrik uygunluk koşullarında terkedilmektedir.
- f) Dış yüklerin doğrultuları sistemin şekildeğiştirmesi sırasında değişmemektedir.
- g) Kayma şekildeğiştirmelerinin çözüme etkisi ihmal edilmektedir.
- h) Plastik kesitlerin çubuk uçlarında ve tekil yüklerin altında oluşmasını sağlamak amacıyla sisteme tekil yükler etkimekte olup, hesaplarda yayılı yükler statikçe eşdeğer tekil yüklere dönüştürölmektedir.
- i) İkinci mertebe elastoplastik hesap sabit düşey yükler ve orantılı olarak artan yatay yükler için yapılmakta olup, düşey işletme yükleri altında sistemde herhangi bir plastik kesitin oluşmadığı varsayımı yapılarak, ikinci mertebe elastoplastik hesap ile yatay yük parametreleri hesaplanmaktadır.

j) Çubuk elemanların içindeki donatının çubuk boyunca sabit ve çubuğun her bölgesinde aynı olduğu varsayılmıştır. Sistem hesaplarında kesitlerde sargı etkisi sağlayan yeterli enine donatının bulunduğu gözönüne alınarak hesap yapılmıştır.

k) Normal kuvvetin çubuk boyunca sabit olduğu ve sistemin sabit enkesitli, doğru eksenli çubuklardan oluştuğu varsayılmaktadır. Bu özellikleri sağlamayan çubuklar, benzer çalışmalarda olduğu gibi çubuk enkesitinin sabit kabul edilebildiği doğru eksenli küçük parçalara ayrılarak idealleştirilebilirler.

l) Betonarme kesitlerde, beton ile donatı çeliği arasındaki aderansın tam olduğu varsayılmaktadır.

2.2 Ardışık yaklaşım yöntemi

Bu bölümde, malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan üç boyutlu betonarme çerçevelerin ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılmaları amacı ile geliştirilen ardışık yaklaşım yönteminin esasları açıklanmıştır.

Yöntem, amaç fonksiyon ve kısıtlama denklemleri her adımda doğrusallaştırılarak bir doğrusal programlama problemine dönüştürülen optimum boyutlandırma probleminin ardışık yaklaşımla çözümüne dayanmaktadır.

İkinci mertebe limit yük için optimum boyutlandırma probleminin çözümüne ait iç kuvvetlerin, yerdeğiştirmelerin, şekildeğiştirmelerin ve bunlara karşı gelen enkesit karakteristiklerinin,

- İkinci mertebe limit yüke ait denge ve geometrik uygunluk koşullarını,
- Sistem üzerindeki bütün kesitlerde akma koşulu ile ilgili kısıtlamaları,
- İkinci mertebe limit yük için öngörülen yerdeğiştirme ve plastik şekildeğiştirme kısıtlamalarını,
- Enkesit boyutları ile ilgili yapısal kısıtlamaları sağlaması ve amaç fonksiyonu minimum yapması gerekmektedir.

Sunulan yöntemde akma koşullarındaki normal kuvvetler ve eğilme momentleri, birim plastik şekildeğiştirme parametreleri ve dış yükler cinsinden denge denklemlerini içerecek şekilde süperpozisyonla doğrudan ifade edilmektedir.

Doğrusal programlama probleminin çözümünde kullanılmak amacıyla, geleneksel Simplex algoritması yeniden düzenlenmiştir. Yöntemin formülasyonu, matris yerdeğiştirme yöntemine dayandığı için yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme kısıtlamaları da kolaylıkla gözönüne alınabilir [4].

Önerilen boyutlandırma yönteminde, kritik kesitlerdeki akma koşulları, normal kuvvetler ve her iki yöndeki eğilme momentlerine bağlı olarak, uzay çerçeve sisteminin sırasıyla dış yükler ve plastik kesitlerdeki birim plastik şekildeğiştirme parametreleri için ayrı ayrı hesabı ve süperpozisyonu ile doğrudan doğruya yazılmaktadır. Böylece, [4]'te önerilen yöntem, akma koşullarının süperpozisyon denklemleri yardımıyla denge denklemlerini de içerecek şekilde doğrudan yazılması ve boyutlandırma aşamasında betonarme kesitlere ait enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntıların kullanılması ile daha etkin hale getirilmiş ve uygulama alanı genişletilmiştir.

Yöntemin optimizasyon hesaplarında kullanılmak üzere, simplex yöntemi problemin fiziksel özelliğine göre iki önemli noktada yeniden düzenlenmiştir. İlgili bölümde daha detaylı olarak açıklanacağı gibi, doğrusal programlama problemindeki pozitiflik koşulunun sağlanması için probleme bir üst sınır değişkeni ilavesinin yanı sıra, başlangıç temel çözümünün elde edilmesinde özel bir pivotlama tekniği uygulanmıştır.

Gerekli görüldüğü takdirde yapı sistemlerinde yerdeğiştirme ve plastik şekildeğiştirme parametresi sınırlandırmalarına bağlı olarak yazılacak ek kısıtlamaların nasıl gözönüne alınacağı da ilgili bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

Birbirini izleyen boyutlandırma ve sistem hesabı aşamalarından oluşan ardışık yaklaşım yönteminde, her adımda tasarım değişkenleri olarak seçilen enkesit karakteristiklerinin ve amaç fonksiyonun katsayılarının değerleri bir önceki boyutlandırma adımından, ikinci mertebe limit yük parametresi, ikinci mertebe limit yüke ait plastik kesit yerleri ve bu plastik kesitlere ait akma düzlemleri ise bir önceki adımın sistem hesabı aşamasından alınmaktadır.

Betonarme yapıların ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılması için önerilen ardışık yaklaşım yönteminde amaç fonksiyon olarak seçilen ve kesit karakteristik plastik momentlerine bağlı olarak her adımda doğrusallaştırılmış bir bağıntı ile ifade edilen yapı ağırlığı optimize edilmektedir.

Her adımda bir önceki adımda boyutlandırılan sistem, malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan teoriye göre hesaplanarak, ikinci mertebe limit yük parametresi, ikinci mertebe limit yüke ait plastik kesit yerleri ve akma düzlemlerine ait akma koşulu katsayıları elde edilmektedir. Daha sonra uzay çerçeve sistemi, dış yükler ve plastik kesitlerdeki birim plastik şekil değiştirme parametrelerinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri için ayrı ayrı hesaplanarak kritik kesitlerdeki normal kuvvetler ve her iki yöndeki eğilme momentleri, süperpozisyonla hesaplanmakta ve akma koşulu kısıtlamaları yazılarak optimizasyon aşamasına geçilmektedir. Hesabın bu aşamasında kullanılmak üzere bir API (Application Programming Interface) uygulaması geliştirilmiştir. Optimizasyon yönteminin ilk adımındaki boyutlar ise bir ön boyutlandırma yapılarak seçilmektedir.

Simplex yöntemi ile doğrusal programlama probleminin çözülmesi ve tasarım değişkenleri ile amaç fonksiyonun optimum değerlerinin bulunmasından sonra, betonarme kesitler için elde edilen enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar kullanılarak yeni enkesit boyutları tasarım değişkenleri cinsinden ifade edilmektedir. Ardışık yaklaşıma yeni enkesit boyutları ile devam edilmekte ve ardışık iki adımdaki tasarım değişkenleri ve amaç fonksiyon birbirine yeter derecede yakın olunca hesaba son verilmektedir.

Geliştirilen ardışık yaklaşım yönteminin sistem hesabı aşamasında, malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan teoriye ikinci mertebe elastoplastik hesap yapılması amacıyla, öncelikle [5]'de doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin sistem üzerinde sürekli yayılı olması durumu için önerilen, [6], [7] ve [8]'de doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin plastik kesit adı verilen kesitlerde toplandığı varsayımına dayanan plastik mafsallı teorisi kullanılarak geliştirilen bir doğrusal olmayan hesap yöntemi ve bu yöntemin uygulamaları için [8]'de geliştirilen EPARCS adlı bilgisayar programından faydalanılmıştır. Yöntemin ve bilgisayar programının dayandığı esaslar ve çalışma prensipleri Bölüm 4'te verilmiştir. İkinci mertebe elastoplastik hesap sabit düşey yükler ve orantılı olarak artan yatay yükler altında yapılmaktadır. Büyük oranda yapı ağırlığından oluşan düşey yüklerin daha belirli olduğu, buna karşılık rüzgar ve deprem etkilerini temsil eden yatay yüklerin değişme olasılığının daha fazla olduğu göz önünde tutulduğunda, yapı güvenliğinin belirlenmesi için bu yaklaşımın daha gerçekçi sonuç vereceği söylenebilir [2].

2.3 Optimum Boyutlandırma Probleminin Akma Koşulları ve Akma Koşullarının Süperpozisyon ile Elde Edilmesi

2.3.1 Akma koşulları

Önerilen optimum boyutlandırma yönteminde akma koşulu aksenal kuvvet ve iki doğrultudaki eğilme momentinden oluşmakta ve burulma momentleri ile kesme kuvvetlerinin akma koşuluna etkisi ihmal edilmektedir. Akma koşulu genel hali ile (2.1) denklemi ile ifade edilebilir.

$$K(M_x, M_y, N) \leq 0 \quad (2.1)$$

İdeal elastoplastik malzemeden yapılmış kesitlerde yukarıdaki denklem yaklaşık olarak (2.2) denklemindeki gibi bir düzlem denklemi ile idealleştirilebilmektedir.

$$K(M_x, M_y, N) = A_1 \cdot M_x + A_2 \cdot M_y + A_3 \cdot N + B \leq 0 \quad (2.2)$$

(2.2) denklemi taşıma gücünü ifade eden plastik momentlere bağlı olarak,

$$\frac{M_x}{M_{xp}} + \frac{M_y}{M_{yp}} + \frac{N}{N_p} \leq 1 \quad (2.2a)$$

şeklinde de yazılabilir. (2.2a) denklemindeki terimler karakteristik plastik momentin M_{xp} olarak seçilmesi halinde, M_{xp} ile çarpılarak, M_x eğilme momentinin katsayısı birim olacak şekilde (2.2b) denklemi yazılabilir.

$$M_x + \frac{M_{xp}}{M_{yp}} \cdot M_y + \frac{M_{xp}}{N_p} \cdot N \leq M_{xp} \quad (2.2b)$$

(2.2) denkleminde verilen akma düzleminin üç boyutlu uzaydaki konumunu belirleyen A_1, A_2, A_3 ve B katsayıları, malzeme özelliklerine ve enkesit karakteristiklerine bağlı olarak belirlenirler. (2.2b) denkleminde, $A_1 = 1$ için, $\frac{M_{xp}}{M_{yp}}$

oranı A_2 katsayısını, $\frac{M_{xp}}{N_p}$ oranı ise A_3 katsayısını içermektedir.

(2.2), (2.2a) ve (2.2b) denklemlerinde verilen akma koşulundaki iç kuvvetler doğrultusunda oluşan Φ_x, Φ_y ve Δ plastik şekildeğiştirme bileşenleri, akma

vektörünün akma yüzeyine dik olması varsayımı ile A_1, A_2 ve A_3 katsayılarına bağlı olarak,

$$\begin{aligned}\Phi_x &= \Phi \cdot \frac{\partial K}{\partial M_x} = \Phi \cdot A_1 \\ \Phi_y &= \Phi \cdot \frac{\partial K}{\partial M_y} = \Phi \cdot A_2 \\ \Delta &= \Phi \cdot \frac{\partial K}{\partial N} = \Phi \cdot A_3\end{aligned}\tag{2.3}$$

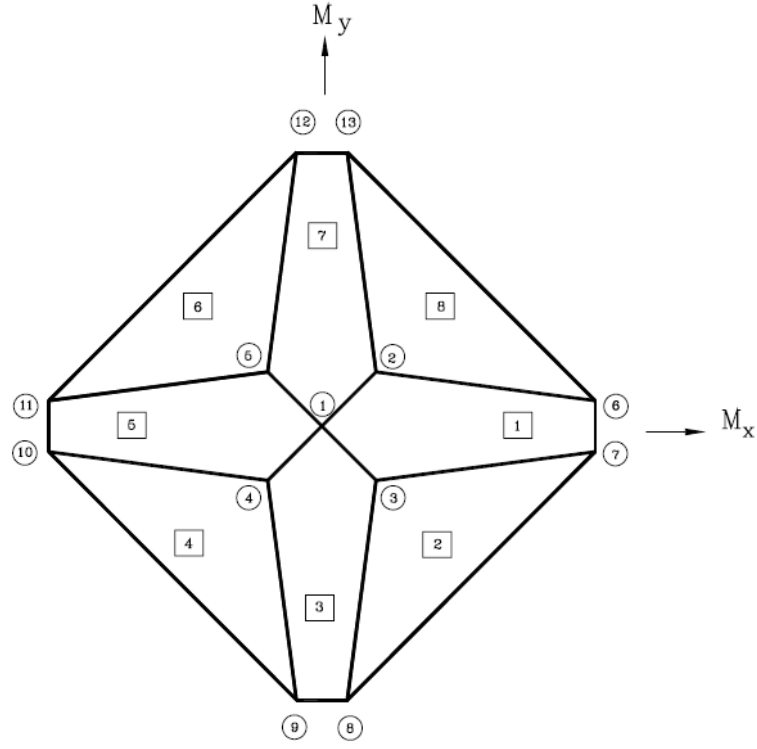
denklemleri ile ifade edilebilirler. Burada Φ_x, Φ_y ve Δ plastik şekil değiştirme bileşenleri, Φ ile gösterilen ve plastik şekil değiştirme vektörünün şiddetini temsil eden plastik şekil değiştirme parametresine bağlı olarak ifade edilmiş olur.

Sözkonusu bileşenler, plastik şekil değiştirme parametresinin birim değeri için (2.3a) denklemi ile gösterilen değerleri alırlar.

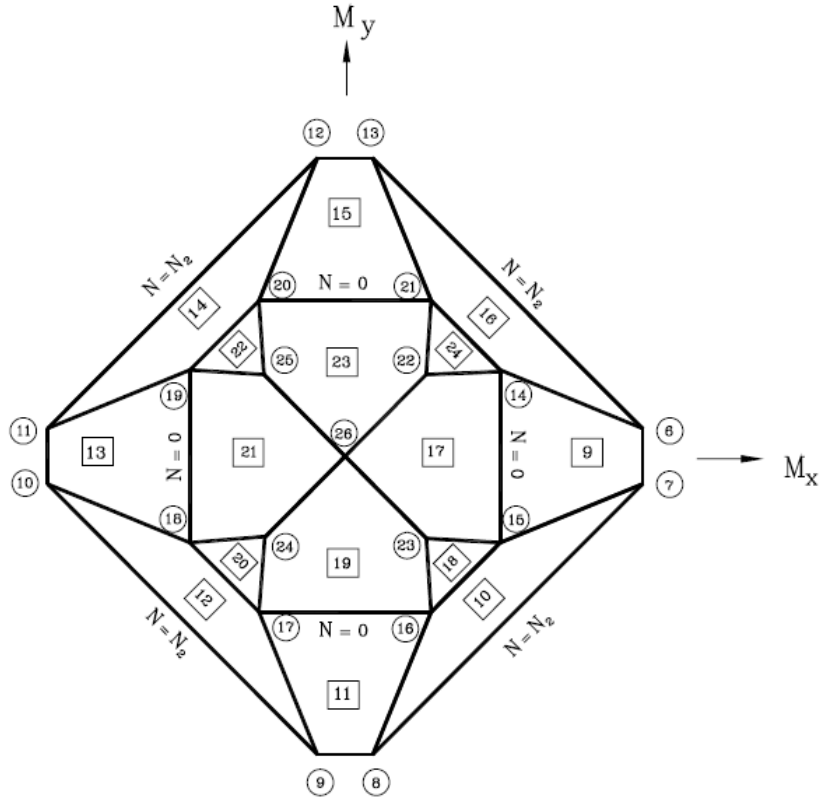
$$\begin{aligned}\Phi_x &= A_1 \\ \Phi_y &= A_2 \\ \Delta &= A_3\end{aligned}\tag{2.3a}$$

Akma yüzeyini oluşturan akma düzlemlerinin bazı iç kuvvet bileşenlerinden bağımsız olması halinde, söz konusu iç kuvvetler doğrultusundaki plastik şekil değiştirme bileşenleri sıfır olmaktadır [1].

Bu çalışmada kullanılan dikdörtgen betonarme kesitlerde akma yüzeyi, akma düzlemlerinden oluşacak şekilde idealleştirilmiştir [8]. İdealleştirilmiş akma yüzeyinin $M_x - M_y$ düzlemindeki izdüşümleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



a) normal kuvvetin $N \leq N_2$ olması hali



b) normal kuvvetin $N \geq N_2$ olması hali

Şekil 2.1 : Dikdörtgen betonarme kesitlerde idealleştirilmiş akma yüzeyinin M_x - M_y düzlemindeki izdüşümleri [8].

2.3.2 Akma koşullarının süperpozisyon denklemleri ile elde edilmesi

Önerilen boyutlandırma yönteminde, ikinci mertebe limit yüke ulaşmış sistemin kritik kesitlerdeki akma koşullarını oluşturan normal kuvvetler ve her iki yöndeki eğilme momentleri, uzay çerçeve sisteminin sırasıyla dış yükler ve plastik kesitlerdeki birim plastik şekil değiştirme parametreleri için ayrı ayrı hesabı ile bulunmaktadır.

Herhangi bir kritik kesitteki normal kuvvetler ve her iki yöndeki eğilme momentleri dış kuvvetlere ve birim plastik şekil değiştirme parametrelerine bağlı olarak (2.4) denklemleri ile ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} m_{xi} &= \sum_{j=1}^n (m_x)_{i(\Phi_j=1)} \cdot \Phi_j + (m_{ox})_i \\ m_{yi} &= \sum_{j=1}^n (m_y)_{i(\Phi_j=1)} \cdot \Phi_j + (m_{oy})_i \quad (i = 1 \text{ to } c) \\ n_i &= \sum_{j=1}^n (n)_{i(\Phi_j=1)} \cdot \Phi_j + (n_o)_i \end{aligned} \quad (2.4)$$

(2.4) denkleminde;

n : sistemdeki plastik kesit sayısını,

c : kritik kesit sayısını,

Φ_j : j sayılı plastik kesitteki dönmeyi,

$(m_x)_{i(\Phi_j=1)}$: Dış yükler sıfır iken, j sayılı plastik kesitin birim dönmesinden dolayı i sayılı kritik kesitte oluşan m_x eğilme momentini

$(m_y)_{i(\Phi_j=1)}$: Dış yükler sıfır iken, j sayılı plastik kesitin birim dönmesinden dolayı i sayılı kritik kesitte oluşan m_y eğilme momentini

$(n)_{i(\Phi_j=1)}$: Dış yükler sıfır iken, j sayılı plastik kesitin birim dönmesinden dolayı i sayılı kritik kesitte oluşan n normal kuvvetini

$(m_{ox})_i$: j sayılı plastik kesitlerdeki birim dönmeler sıfır iken, i sayılı kritik kesitte dış yüklerden dolayı oluşan m_x eğilme momentini

$(m_{oy})_i$: j sayılı plastik kesitlerdeki birim dönmeler sıfır iken, i sayılı kritik kesitte dış yüklerden dolayı oluşan m_y eğilme momentini

$(n_o)_i$: j sayılı plastik kesitlerdeki birim dönmeler sıfır iken, i.kritik kesitte dış yüklerden dolayı oluşan n normal kuvvetini göstermektedir.

Yukarıdaki (2.4) denklemindeki ifadeler matris formunda ifade edilirse ;

$$\begin{aligned} [m_x] &= [m_{x\Phi}] \cdot [\Phi] + [m_{ox}] \\ [m_y] &= [m_{y\Phi}] \cdot [\Phi] + [m_{oy}] \\ [n] &= [n_\Phi] \cdot [\Phi] + [n_o] \end{aligned} \quad (2.5)$$

(2.5) denklemi elde edilir. Matris formunda ifade edilen söz konusu denklemler, (2.2) denkleminde verilen akma koşulu kısıtlamalarında yerlerine yazılıp, karakteristik plastik moment de M_p ile gösterilirse, yine matris formunda doğrusal bir eşitsizlik olan (2.6) denklemi yazılabilir.

$$A_1 \cdot ([m_{x\Phi}] \cdot [\Phi] + [m_{ox}]) + A_2 \cdot ([m_{y\Phi}] \cdot [\Phi] + [m_{oy}]) + A_3 \cdot ([n_\Phi] \cdot [\Phi] + [n_o]) \leq M_p \quad (2.6)$$

Herhangi bir kritik kesitteki akma koşulu kısıtlamaları tüm akma düzlemlerini içerecek şekilde yine matris formda,

$$[A] \cdot [F(x)] - [u] \cdot M_p \leq 0 \quad (2.6a)$$

şeklinde yazılabilir. (2.6a) denkleminde, $[A]$ akma düzlemi katsayılarından oluşan matrisi, $[F(x)]$ kritik kesitlerdeki iç kuvvetleri içeren matrisi, $[u]$ ise akma düzlemlerine ait karakteristik plastik momentlerin katsayılarını içeren matrisi göstermektedir.

2.4 Amaç Fonksiyon

2.4.1 Yapı ağırlığı

Betonarme yapıların ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılması amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, optimize edilecek amaç fonksiyon olarak enkesit yükseklikleri veya donatı oranları seçilebilmektedir. Optimum boyutlandırma problemlerinde yapı ağırlığının enkesit karakteristiklerine bağlı olarak nasıl ifade

edileceği aşağıdaki b3l3mde ayrıntılı olarak açıklanmış ve enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar da çıkarılmıştır.

2.4.1.1 Enkesit optimizasyonu

Optimize edilecek amaç fonksiyon olan yapı ağırlığı fonksiyonu, sistemin çubuklarından n tanesinin enkesitinin birbirinden farklı olduğu ve betonarmenin birim hacim ağırlığı γ_b g3z 3n3nde bulundurularak (2.7) denklemi ile ifade edilebilir.

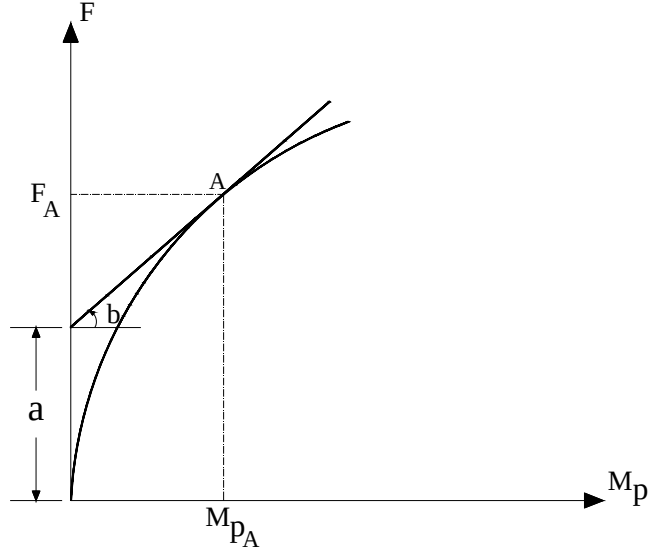
$$G = \gamma_b \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot F_i \quad (2.7)$$

(2.7) denkleminde, G optimize edilecek amaç fonksiyon olan yapı ağırlığı fonksiyonunu, F_i enkesitleri birbirinden farklı olan çubukların enkesit alanlarını, L_i ise enkesit alanı F_i olan çubukların uzunluklarının toplamını g3stermektedir. Enkesit optimizasyonu yapılırken kesit içindeki donatı oranları sabit olarak alınmakta, kesit içindeki donatının ağırlığa katkısı betonarmenin birim hacim ağırlığı olan γ_b , 25 kN/m^3 'e eşit alınarak g3z3n3ne alınmaktadır. Sayısal uygulamalar b3l3m3nde verilen Uygulama 1B'de, kesiti oluşturan beton ve donatının ağırlıkları ayrı ayrı g3z3n3ne alınarak da yapı ağırlığı hesaplanmış ve sonuçlardaki farklılığın ihmal edilebilir mertebede olduğu g3sterilmiştir. Aşağıdaki b3l3mde daha detaylı olarak açıklanacağı gibi yapı ağırlığı kesit karakteristik plastik momentlerine (M_p) bağlı olarak ifade edildiğinden (2.7) denklemi,

$$G = \gamma_b \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot F_i(M_{pi}) \quad (2.7a)$$

halini alır. Genellikle doğrusal olmayan bu bağıntının ardışık yaklaşımın her adımında nasıl doğrusallaştırılacağı aşağıda açıklanmıştır.

Enkesit alanı ile kesit plastik momenti arasındaki bağıntı şematik olarak şekil 2.2'de g3sterilmiştir.



Şekil 2.2 : Şematik F - M_p bağıntısı.

Şekil 2.2’de gösterilen herhangi bir A noktasında a ordinatı ve b eğimi,

$$a = F_A - \left(\frac{dF}{dM_p} \right)_A \cdot M_{pA} \quad b = \left(\frac{dF}{dM_p} \right)_A \quad (2.8)$$

olmak üzere enkesit alanı,

$$F = a + b \cdot M_p \quad (2.9)$$

şeklinde doğrusal bir fonksiyon ile ifade edilebilir. Bu fonksiyon A noktası için gerçek bağıntıyla aynı sonucu vermekte, bu noktaya yakın noktalarda ise gerçek bağıntıyı yaklaşık olarak ifade etmektedir. Ardışık yaklaşımın son iki adımında bulunan enkesit karakteristiklerinin birbirine yeter derecede yakın olacağından enkesit karakteristiklerine ait doğrusallaştırılmış bağıntılar gerçek bağıntılarla aynı sonucu verirler [1].

Enkesit alanını ifade eden (2.9) denklemi, (2.7) denkleminde yerine konulursa yapı ağırlığı fonksiyonu,

$$G = \gamma_b \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot (a_i + b_i \cdot M_{pi}) \quad (2.7b)$$

halini alır. (2.7b) denkleminde birinci terim sabit olduğundan optimize edilecek ağırlık fonksiyonunun ifadesi,

$$G = \gamma_b \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot b_i \cdot M_{pi} \quad (2.7c)$$

olarak yazılabilir.

Sayısal uygulamalar bölümündeki ilk uygulama olan düzlem çerçeve uygulamasında elde edilen sonuçları benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırmak amacıyla yapı ağırlığı [4]'de olduğu gibi (2.7d) denklemi ile ifade edilmiştir.

$$G = \sum_{k=1}^g L_k \cdot m_{pk} \quad (2.7d)$$

Yukarıdaki denklemde, m_{pk} , k sayılı aynı enkesitli grubun kesit plastik momentini, L_k ise kesit plastik moment k sayılı enkesit grubuna ait olan çubukların uzunluklarının toplamını göstermektedir. (2.7c) ifadesindeki yapı ağırlığı, tasarım değişkenlerine bağlı olarak matris formunda (2.7e) denklemi ile ifade edilebilir.

$$G = \begin{bmatrix} 0 & I^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi \\ m_p \end{bmatrix} \quad (2.7e)$$

Betonarme enkesitler için, enkesit boyutları ile problemin tasarım değişkenleri arasındaki karakteristik bağıntılar Bölüm 2.4.2'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.4.1.2 Donatı Optimizasyonu

Önerilen yöntem ile betonarme yapı sistemlerinin optimum boyutlandırması yapılırken, geliştirilen yöntemi ve sayısal uygulamaları genişletmek amacı ile seçilen ve yönetmeliklerdeki minimum koşulları sağlayan sabit enkesit boyutları için donatı oranı optimizasyonu da yapılmıştır. Bu amaçla, enkesit boyutları her adımda sabit tutulurken donatı oranları ise değişken olarak seçilmiştir.

Her adımda bir önceki adımda boyutlandırılan, başlangıçta ise ön boyutlandırılması yapılan yapı sisteminde, ilk adımda seçilen bir donatı oranı için (örnek olarak minimum donatı oranı için) ikinci mertebe elastoplastik hesap yapılarak, ikinci mertebe limit yük parametresi, bu yüke ait plastik kesit yerleri ve akma düzlemleri ile akma koşulu katsayıları belirlenir.

Dış yükler ve plastik şekildeğiştirme parametrelerinin birim değerleri için hesap yapılarak kritik kesitlerdeki normal kuvvet ve eğilme momentlerinin bulunmasını

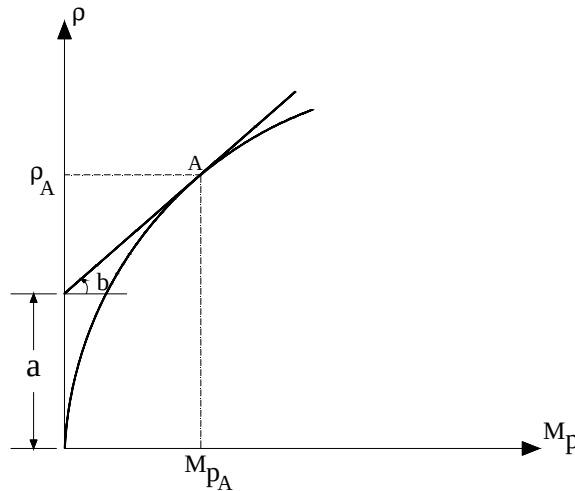
izleyen adımda, optimizasyon hesapları yapılır ve tasarım değişkenleri olan kesit plastik momentlerinin yeni değerleri elde edilir. Bölüm 2.4.2’de verilen enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar ve sayısal uygulamalar için geliştirilen bilgisayar programları yardımıyla her adımda sabit enkesit boyutları için optimizasyon sonucu elde edilen karakteristik plastik momentlerini sağlayan yeni donatı oranları elde edilebilmektedir.

Her adımda benzer şekilde hesap yapılarak ardışık iki adımdaki tasarım değişkenleri ve donatı oranları birbirine yeter derecede yakın olunca optimum donatı oranları elde edilmekte ve hesaba son verilmektedir.

Donatı oranı optimizasyonunda her adımda sabit enkesit boyutları için hesap yapıldığından amaç fonksiyon toplam donatı ağırlığını ifade etmektedir. Donatı oranları, Bölüm 2.4.2’de açıklanacağı gibi, kesit karakteristik plastik momentlerine bağlı olarak ifade edilirse, toplam donatı ağırlığı (2.7f) denklemi ile hesaplanabilir.

$$G = \gamma_C \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot \rho_i (M_{pi}) \quad (2.7f)$$

(2.7f) denkleminde γ_C , donatının birim hacim ağırlığını, L_i ise donatı oranı ρ_i olan çubukların toplam uzunluğunu göstermektedir.



Şekil 2.3 : Şematik $\rho - M_p$ bağıntısı.

Donatı oranı ile kesit plastik momenti arasındaki bağıntı şematik olarak Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Herhangi bir A noktasındaki a ordinatı ve b eğimi, (2.8) ve (2.9) denklemlerine benzer şekilde (2.8a) ve (2.9a) denklemleri ile ifade edilebilir.

$$a = \rho_A - \left(\frac{d\rho}{dM_p} \right)_A \cdot M_p \quad b = \left(\frac{d\rho}{dM_p} \right)_A \quad (2.8a)$$

olmak üzere donatı oranı,

$$\rho = a + b \cdot M_p \quad (2.9a)$$

şeklinde doğrusal bir fonksiyon ile ifade edilebilir. Bu fonksiyon A noktası için gerçek bağıntıyla aynı sonucu vermekte, bu noktaya yakın noktalarda ise gerçek bağıntıyı yaklaşık olarak temsil etmektedir. Ardışık yaklaşımın son iki adımında bulunan donatı oranlarının birbirine yeter derecede yakın olmaları istendiğinden, bu durum için, donatı oranlarına ait doğrusallaştırılmış bağıntılar gerçek bağıntılarla aynı sonucu vermektedirler. (2.7c) denkleminde benzer şekilde ifadelerdeki sabit terim çıkarılarak amaç fonksiyon (2.7g) denklemi ile yeniden yazılabilir.

$$G = \gamma_C \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot b_i \cdot M_{pi} \quad (2.7g)$$

Betonarme enkesitler için, enkesit karakteristikleri ve donatı oranları ile problemin tasarım değişkenleri olan karakteristik plastik momentler arasındaki bağıntılar Bölüm 2.4.2’de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.4.2 Enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar

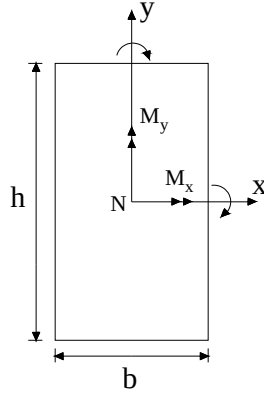
Bu bölümde, ardışık yaklaşımın her adımında bir sonraki hesap adımındaki amaç fonksiyonun katsayılarının (b_i) elde edilmesi amacıyla kullanılacak enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar verilmiştir.

Betonarme uzay çerçeve sistemlerin ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılması için bir ardışık yaklaşım yönteminin önerildiği bu çalışmada enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntıların çıkarılmasında [48]’de önerilen ve [49]’da üzerinde malzeme katsayılarına bağlı bazı iyileştirmeler yapılarak geliştirilen amprik bağıntılardan faydalanılacaktır.

[48]’de, beton ve beton çeliğine ait malzeme katsayıları göz önünde bulundurularak çıkarılan amprik bağıntılar, [49]’da malzeme katsayılarından bağımsız şekilde, istenilen malzeme katsayılarının dışarıdan verilerek kullanılmasına olanak

sağlayacak şekilde iyileştirilmiştir. Bu çalışmada, [49]'da verilen ve malzeme katsayılarının 1'e eşit olduğu durumdaki amprik bağıntılardan faydalanılmıştır.

Dikdörtgen veya kare enkesitli betonarme uzay çubuğun bir kesitine etkiyen kesit tesirleri Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Dikdörtgen kesit boyutları ve kesit tesirleri.

Hesaplarda (2.10) denkleminde tanımları yapılan boyutsuz parametreler kullanılmıştır [49].

$$\bar{n} = \frac{N}{b \cdot h \cdot 0.85 f_{ck}} \quad \bar{m}_x = \frac{M_x}{b \cdot h^2 \cdot 0.85 f_{ck}} \quad \bar{m}_y = \frac{M_y}{b^2 \cdot h \cdot 0.85 f_{ck}} \quad (2.10)$$

Kesit içindeki mekanik donatı oranı μ ise, (2.11) denklemi ile tanımlanabilir.

$$\mu = \frac{A_s}{b \cdot h} \cdot \frac{f_{yk}}{0.85 f_{ck}} \quad (2.11)$$

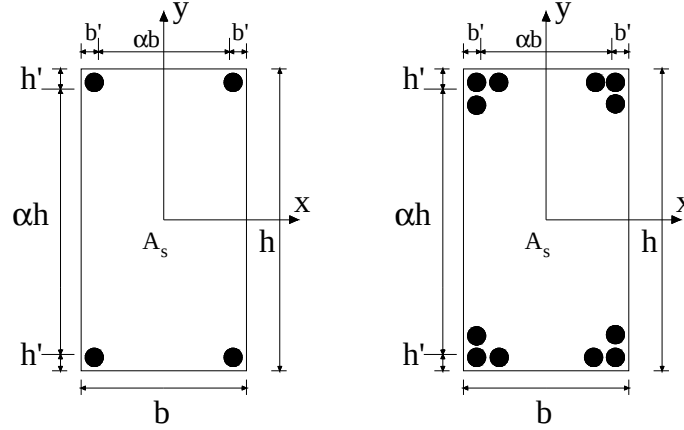
(2.10) ve (2.11) denklemlerinde, b ve h , enkesit boyutlarını, A_s , dört köşede eşit olarak toplanmış olan toplam donatı alanını, f_{ck} ve f_{yk} , sırasıyla beton ve donatı karakteristik malzeme dayanımlarını, N, M_x, M_y kesit tesirlerini, $\bar{n}, \bar{m}_x, \bar{m}_y$ ise hesaplarda kullanılacak boyutsuz parametreleri göstermektedir.

Betonarme kesitlerde bulunabilecek farklı donatı yerleşim durumları ise ileride açıklanacak olan düzeltme katsayıları ile göz önüne alınacaktır.

2.4.2.1 Donatı oranı – karakteristik plastik moment bağıntıları

Eksenel basınç kuvvetiyle birlikte , iki eksenli eğilme momenti etkisinde bulunan dikdörtgen betonarme kesitlerde, donatının Şekil 2.5'de gösterildiği gibi dört köşede

eşit olarak toplanması ve paspayı oranının 0.10 olması haline ait karakteristik bağıntılar S420 çeliği için [49]'dan faydalanılarak kesitteki farklı normal kuvvet durumları için (2.12), (2.13) ve (2.14) denklemleri ile açıklanmıştır.



Şekil 2.5 : Dikdörtgen betonarme kesitlerde dört köşede eşit donatı yerleşimi.

$\bar{n} < 0.35$ hali için,

$$k = (1.13 - 2.13 \cdot \bar{n}) \cdot \bar{m}_y + 1.50 \cdot \bar{n} + 0.20$$

$$\bar{m} = \bar{m}_x + k \cdot \bar{m}_y \quad (\bar{m}_y \leq \bar{m}_x) \quad (2.12)$$

$$\mu = 2.49 \cdot \bar{m} + 1.44 \cdot \bar{n}^2 - 1.29 \cdot \bar{n}$$

$0.35 \leq \bar{n} \leq 0.50$ hali için,

$$k = (-2.45 + 8 \cdot \bar{n}) \cdot \bar{m}_y - 1.16 \cdot \bar{n} + 1.14$$

$$\bar{m} = \bar{m}_x + k \cdot \bar{m}_y \quad (\bar{m}_y \leq \bar{m}_x) \quad (2.13)$$

$$\mu = 2.54 \cdot \bar{m} - 0.295$$

$\bar{n} > 0.50$ hali için,

$$k = (2.08 - 0.54 \cdot \bar{n}) \cdot \bar{m}_y - 0.42 \cdot \bar{n} + 0.75$$

$$\bar{m} = \bar{m}_x + k \cdot \bar{m}_y \quad (\bar{m}_y \leq \bar{m}_x) \quad (2.14)$$

$$\mu = 2.54 \cdot \bar{m} + 0.305 \cdot \bar{n}^2 + 0.22 \cdot \bar{n} - 0.49$$

Bu bağıntılar (2.15) denklemi ile verilen,

$$\frac{b'}{b} = 0.10, \frac{h'}{h} = 0.10, \alpha = 0.80 \quad (2.15)$$

oranları için geçerlidir.

Önerilen ardışık yaklaşım yönteminin sistem hesabı adımı, sistemdeki herhangi bir betonarme kesite ait akma düzlemi ve bu düzleme ait akma düzlemi katsayıları elde edilebilmektedir.

Akma koşulunu sağlayan iç kuvvet durumunda, iki adım arasında fazla değişmeyen normal kuvvetin bir önceki adımda elde edilen değerinin sabit olarak alınmasıyla, akma koşulunu sağlayan M_x ve M_y eğilme momentleri birbirleri cinsinden yazılabilir. Örneğin M_x eğilme momentinin karakteristik plastik moment olarak seçilmesi durumunda, M_y eğilme momenti, (2.2a) akma koşulu ifadesinden faydalanılarak (2.2c) denkleminde gösterildiği gibi, N sabit normal kuvveti için M_x eğilme momenti cinsinden yazılabilir.

$$M_y = M_{yp} \left(-\frac{M_x}{M_{xp}} - \frac{N}{N_p} + 1 \right) \quad (2.2c)$$

(2.2c) denkleminde M_{xp} , M_{yp} ve N_p bir önceki adımda elde edilen plastik momentleri, N ise bir önceki adımda elde edilen akma koşulunu sağlayan normal kuvveti göstermektedir.

M_y eğilme momentinin karakteristik plastik moment olarak seçilen M_x eğilme momenti cinsinden yazılmasından sonra, bu denklemin mekanik donatı oranının iç kuvvetler cinsinden ifade edildiği (2.12), (2.13) ve (2.14) denklemlerinde yerine konulmasıyla, bu denklemlerde yer alan k , $\bar{m}$, $\bar{m}_y$ ve mekanik donatı oranı μ , $\bar{m}_x$ değişkeninin fonksiyonu olarak (2.12a), (2.13a) ve (2.14a) denklemleri ile tanımlanabilir. Bu denklemlerde $\bar{m}(\bar{m}_x)$ ve $\bar{m}_y(\bar{m}_x)$ ifadeleri sırasıyla $\bar{m}$ ve $\bar{m}_y$ değişkenlerinin $\bar{m}_x$ cinsinden fonksiyonunu göstermektedir.

Böylece, mekanik donatı oranı ile karakteristik plastik moment arasındaki bağıntılar aşağıdaki şekilde elde edilebilir :

$\bar{n} < 0.35$ hali için,

$$\begin{aligned} k &= (1.13 - 2.13 \cdot \bar{n}) \cdot \bar{m}_y(\bar{m}_x) + 1.50 \cdot \bar{n} + 0.20 \\ \bar{m}(\bar{m}_x) &= \bar{m}_x + k \cdot \bar{m}_y(\bar{m}_x) \quad (\bar{m}_y \leq \bar{m}_x) \\ \mu &= 2.49 \cdot \bar{m}(\bar{m}_x) + 1.44 \cdot (\bar{n})^2 - 1.29 \cdot \bar{n} \end{aligned} \quad (2.12a)$$

$0.35 \leq \bar{n} \leq 0.50$ hali için,

$$k = (-2.45 + 8 \cdot \bar{n}) \cdot \bar{m}_y(\bar{m}_x) - 1.16 \cdot \bar{n} + 1.14$$

$$\bar{m}(\bar{m}_x) = \bar{m}_x + k \cdot \bar{m}_y(\bar{m}_x) \quad (\bar{m}_y \leq \bar{m}_x) \quad (2.13a)$$

$$\mu = 2.54 \cdot \bar{m}(\bar{m}_x) - 0.295$$

$\bar{n} > 0.50$ hali için,

$$k = (2.08 - 0.54 \cdot \bar{n}) \cdot \bar{m}_y(\bar{m}_x) - 0.42 \cdot \bar{n} + 0.75$$

$$\bar{m}(\bar{m}_x) = \bar{m}_x + k \cdot \bar{m}_y(\bar{m}_x) \quad (\bar{m}_y \leq \bar{m}_x) \quad (2.14a)$$

$$\mu = 2.54 \cdot \bar{m}(\bar{m}_x) + 0.305 \cdot (\bar{n})^2 + 0.22 \cdot \bar{n} - 0.49$$

Kesit içindeki donatı oranının optimizasyonu problemlerinde, seçilen sabit enkesit boyutları, karakteristik malzeme dayanımları ve kesit tesirleri belli olduğu için yukarıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanan mekanik donatı oranından yararlanılarak, (2.16) ve (2.17) denklemleri ile kesitteki toplam donatı alanı ve geometrik donatı oranı (ρ) da bulunabilir.

$$A_s = \mu \cdot b \cdot h \cdot \frac{0.85 f_{ck}}{f_{yk}} \quad (2.16)$$

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot h} \quad (2.17)$$

2.4.2.2 Enkesit yüksekliği – karakteristik plastik moment bağıntıları

Kesit içindeki mekanik donatı oranına benzer şekilde enkesit boyutlarının da karakteristik plastik momente bağlı olarak nasıl ifade edileceği bu bölümde açıklanmıştır.

Enkesit boyutları arasındaki oranların sabit olduğu ($h=b$, $h=1.5b$, $h=2b$ vb.) enkesit optimizasyonu problemlerinde ise enkesit boyutları optimize edileceği için kesitteki donatı oranı da başlangıçta sabit olarak seçilmektedir. Buna göre, enkesit yüksekliğini veren bağıntılar [49]'dan faydalanılarak aşağıda açıklanmıştır.

M_x eğilme momentinin karakteristik plastik moment olarak seçilmesi durumunda, M_y eğilme momentinin M_x eğilme momenti cinsinden nasıl ifade edileceği Bölüm 2.4.2.1'de açıklanmıştır. Aşağıda, enkesit yüksekliğinin iç kuvvetler cinsinden

yazıldığı denklemlerde de benzer şekilde M_y eğilme momenti, M_x eğilme momentinin fonksiyonu olarak hesaplanabilir.

$\bar{n} < 0.35$ hali için, (2.12a) denkleminde $\bar{m}, \bar{n}$ ifadelerinin (2.10)'daki değerlerinin yerine konulmasıyla (2.18) ve (2.19) denklemleri ile verilen $\bar{B}, \bar{C}$ kısaltmalarına bağlı olarak enkesit yüksekliği için (2.20) denklemi elde edilir.

$$\bar{B} = 0.645 \cdot \frac{N}{\mu \cdot b \cdot f_{ck}} \quad (2.18)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{\mu} \cdot \left[2.49 \cdot \frac{M(M_x)}{b \cdot f_{ck}} + 1.44 \cdot \left(\frac{N}{b \cdot f_{ck}} \right)^2 \right] \quad (2.19)$$

$$h = -\bar{B} + \sqrt{\bar{B}^2 + \bar{C}} \quad (2.20)$$

(2.18), (2.19) ve (2.20) denklemlerinde, $\bar{B}$ ve $\bar{C}$, kısaltma parametrelerini, (2.19) denkleminde yer alan $M(M_x)$ ise, x doğrultusundaki eğilme momentinin fonksiyonu olarak $\bar{m}$ parametresine benzer şekilde (2.21) denklemi ile belirlenecek olan tek eksenliye dönüştürülmüş eğilme halinde hesap yüküne ait eğilme momentini göstermektedir [49].

$$M(M_x) = M_x + k \cdot M_y(M_x) \quad (2.21)$$

$0.35 \leq \bar{n} \leq 0.50$ hali için, (2.13a) denkleminde $\bar{m}$ ifadesinin (2.10)'daki değerinin yerine konulmasıyla (2.18) ve (2.19) denklemleri ile verilen $\bar{B}, \bar{C}$ kısaltma parametrelerine bağlı olarak enkesit yüksekliği için (2.22) denklemi elde edilir.

$$h = \sqrt{\frac{2.54 \cdot M(M_x)}{b \cdot (\mu + 0.295) \cdot f_{ck}}} \quad (2.22)$$

$\bar{n} > 0.50$ hali için, (2.14a) denkleminde $\bar{m}, \bar{n}$ ifadelerinin (2.10)'daki değerlerinin yerine konulmasıyla (2.23) ve (2.24) denklemleri ile verilen $\bar{B}, \bar{C}$ kısaltma parametrelerine bağlı olarak enkesit yüksekliği için (2.25) denklemi elde edilir.

$$\bar{B} = \frac{0.11 \cdot N}{b \cdot f_{ck} (\mu + 0.49)} \quad (2.23)$$

$$\bar{C} = \frac{2.54 \cdot \frac{M(M_x)}{b \cdot f_{ck}} + 0.305 \cdot \left(\frac{N}{b \cdot f_{ck}} \right)^2}{\mu + 0.49} \quad (2.24)$$

$$h = \bar{B} + \sqrt{\bar{B}^2 + \bar{C}} \quad (2.25)$$

Böylece enkesit yüksekliği ile karakteristik plastik moment arasındaki bağıntılar da elde edilmiş olmaktadır. Enkesit karakteristiklerinin tamamı yukarıda açıklandığı gibi x doğrultusundaki eğilme momentine bağlı olarak belirlenen boyutsuz parametrenin fonksiyonu olarak başka bir ifade ile taşıma gücünü ifade eden karakteristik plastik momentle bağılı olarak ifade edilebilmektedir.

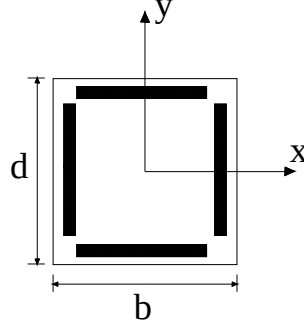
Bu bağıntılar belirlendikten sonra yine amaç fonksiyon bölümünde verilen doğrusallaştırma tekniği ile bağıntılar doğrusallaştırılarak ağırlık fonksiyonunun yeni katsayıları belirlenir. Özellikle kirişlerde ve düzlem sistemlerde kolonlarda mekanik donatı oranı-karakteristik plastik moment bağıntıları doğrusal olmakta, ayrıca bir doğrusallaştırma işlemine gerek kalmamaktadır. Bu durumda yapı ağırlığının karakteristik plastik momentler cinsinden ifadesinden oluşan amaç fonksiyonun katsayıları da, ardışık yaklaşımın adımları arasında değişmemektedir.

Bu bağıntılar yardımıyla amaç fonksiyon bölümünde açıklanan türev bağıntıları da türetilir. Ardışık yaklaşımın bir sonraki hesap adımında kullanılacak olan enkesit karakteristikleri, seçilen amaç fonksiyona bağlı olarak enkesit boyutları veya donatı oranı, yukarıda açıklanan enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar yardımıyla bulunabilir.

2.4.2.3 Diğer donatı yerleşim durumları

Yukarıda dört köşesinde eşit donatı bulunan kesitler için [49]'dan faydalanılarak çıkarılan denklemler, kesitteki farklı donatı yerleşim alternatifleri için k_1 düzeltme katsayıları kullanılarak geçerli olmaktadır. Aşağıda açıklanan denklemler yardımıyla belirlenen k_1 düzeltme katsayıları mekanik donatı oranı μ ile çarpılarak kullanılacaktır.

Şekil 2.6'da gösterildiği gibi dört kenar boyunca eşit ve düzgün yayılı donatı hali için (2.26) ve (2.27) denklemleri geçerlidir.

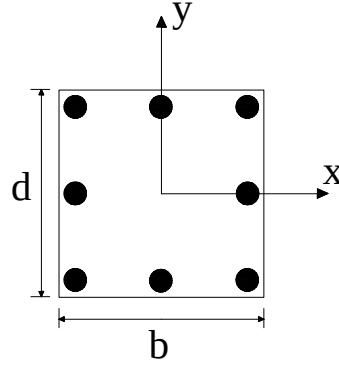


Şekil 2.6 : Dikdörtgen betonarme kesitlerde dört kenarda eşit donatı yerleşimi.

$$\bar{n} > 1 \rightarrow k_1 = 1.08 \quad (2.26)$$

$$\bar{n} \leq 1 \rightarrow k_1 = -1.406\bar{n}^4 + 4.062\bar{n}^3 - 3.994\bar{n}^2 + 1.349\bar{n} + 1.07 \quad (2.27)$$

Şekil 2.7’de gösterildiği gibi köşelerde ve kenar ortalarında bulunan sekiz eşit donatı hali için (2.28) ve (2.29) denklemleri geçerlidir.

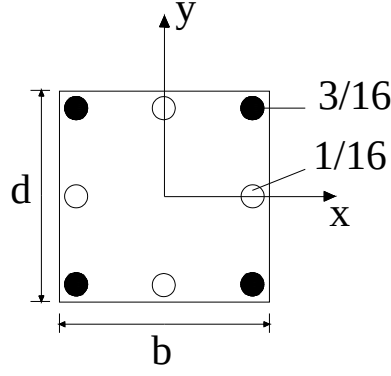


Şekil 2.7 : Dikdörtgen betonarme kesitlerde köşelerde ve kenar ortalarında sekiz eşit donatı yerleşimi.

$$\bar{n} > 1 \rightarrow k_1 = 1.12 \quad (2.28)$$

$$\bar{n} \leq 1 \rightarrow k_1 = -0.87\bar{n}^4 + 3.085\bar{n}^3 - 3.445\bar{n}^2 + 1.223\bar{n} + 1.137 \quad (2.29)$$

Şekil 2.8’de gösterildiği gibi toplam donatının köşelerde 3/16’sının kenar ortalarında 1/16’sının bulunması hali için (2.30) ve (2.31) denklemleri geçerlidir.



Şekil 2.8 : Dikdörtgen betonarme kesitlerde köşelerde 3/16 kenar ortalarında 1/16 donatı bulunması hali.

$$\bar{n} > 1 \rightarrow k_1 = 1.025 \quad (2.30)$$

$$\bar{n} \leq 1 \rightarrow k_1 = -0.584\bar{n}^4 + 1.816\bar{n}^3 - 1.868\bar{n}^2 + 0.633\bar{n} + 1.028 \quad (2.31)$$

2.5 Eğik Eğilme ve Normal Kuvvet Etkisindeki Betonarme Çubuklarda Akma Koşulu Kısıtlamalarının Oluşturulması

Bu bölümde, akma koşulu kısıtlamalarının süperpozisyon ile denge denklemlerini de içerecek şekilde toplu halde yazılması amacıyla, dış yükler sıfıra eşitken birim plastik şekildeğiştirme parametreleri için ve plastik kesitlerdeki şekildeğiştirme parametreleri sıfıra eşitken dış yükler için yapılacak hesap ile kritik kesitlerdeki iç kuvvetlerin bulunmasında kullanılan yöntem açıklanacaktır.

2.5.1 Akma koşulu kısıtlamalarının oluşturulması için kullanılan hesap yöntemi

Süperpozisyon denklemlerinden yararlanılarak akma koşulu kısıtlamalarının oluşturulması için, plastik kesitlerdeki şekildeğiştirme parametreleri sıfıra eşitken dış yükler altında ve dış yükler sıfıra eşitken plastik kesitlerdeki birim plastik şekildeğiştirme parametreleri için hesap yapılmaktadır. Kritik kesitlerde oluşan ve akma koşullarında göz önüne alınan iç kuvvet bileşenlerinin hesabı için, söz konusu plastik şekildeğiştirmelerin birim değerinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri sisteme dış yük olarak etki ettirilerek hesap yapılmakta ve her bir durum için ayrı ayrı kritik kesitlerdeki iç kuvvetler elde edilmektedir. Elde edilen iç kuvvetler, göz önüne alınan bütün akma düzlemlerine ait katsayılar da kullanılarak süperpozisyon denklemleri yardımıyla birleştirilmekte ve optimizasyon hesaplarına geçilmektedir. Bu çalışmada

akma koşulu kısıtlamalarının yazılabilmesi için yukarıda açıklanan hesaplar SAP2000 programını hesap motoru olarak kullanan bir API uygulaması ile yapılmaktadır. Bu program ile ilgili detaylı bilgilere Bölüm 5'te yer verilmiştir. Optimizasyon hesapları ile ilgili ayrıntılı bilgiler ise Bölüm 3'te açıklanmıştır.

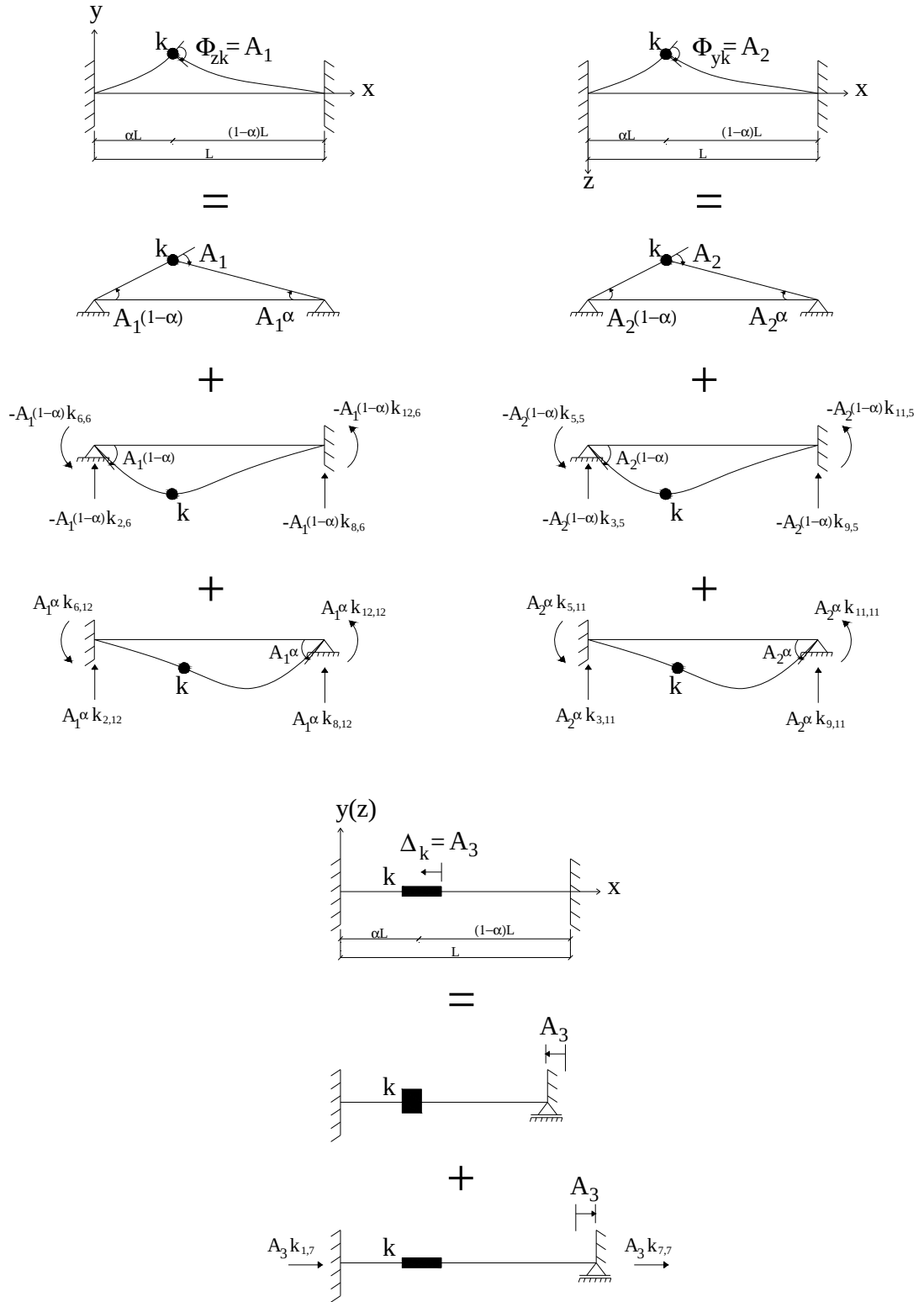
Doğru eksenli prizmatik bir uzay çubukta plastik şekil değiştirme parametresinin birim değerinden meydana gelen çubuk uç kuvvetleri matrislerinin elde edilmesinde göz önüne alınan süperpozisyon durumları ise Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

Şekil 2.9'da süperpozisyon durumları gösterilen birim plastik şekil değiştirme parametrelerinden meydana gelen çubuk uç kuvvetleri, ikinci mertebe etkileri terk edilebilecek mertebede olan doğru eksenli prizmatik çubuklarda i ve j uçlarına ait $[P_\Phi]$ matrisleri (2.32) ve (2.33) denklemleri ile ifade edilebilir.

$$[P_\Phi]_i = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_3 \cdot (EF / L) \\ A_1 \cdot (12\alpha - 6) \cdot (EI_x / L^2) \\ -A_2 \cdot (12\alpha - 6) \cdot (EI_y / L^2) \\ 0 \\ A_2 \cdot (6\alpha - 4) \cdot (EI_y / L) \\ A_1 \cdot (6\alpha - 4) \cdot (EI_x / L) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$[P_\Phi]_j = \begin{bmatrix} P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3 \cdot (EF / L) \\ -A_1 \cdot (12\alpha - 6) \cdot (EI_x / L^2) \\ A_2 \cdot (12\alpha - 6) \cdot (EI_y / L^2) \\ 0 \\ A_2 \cdot (6\alpha - 2) \cdot (EI_y / L) \\ A_1 \cdot (6\alpha - 2) \cdot (EI_x / L) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Bu denklemlerde, α plastik kesitin çubuk sol ucuna olan uzaklığının çubuk boyuna oranını, A_1, A_2 ve A_3 akma düzlemi katsayılarını, EI_x, EI_y sırasıyla x ve y doğrultusundaki çubuk eğilme rijitliğini, EF ise çubuk uzama rijitliğini temsil etmektedir.



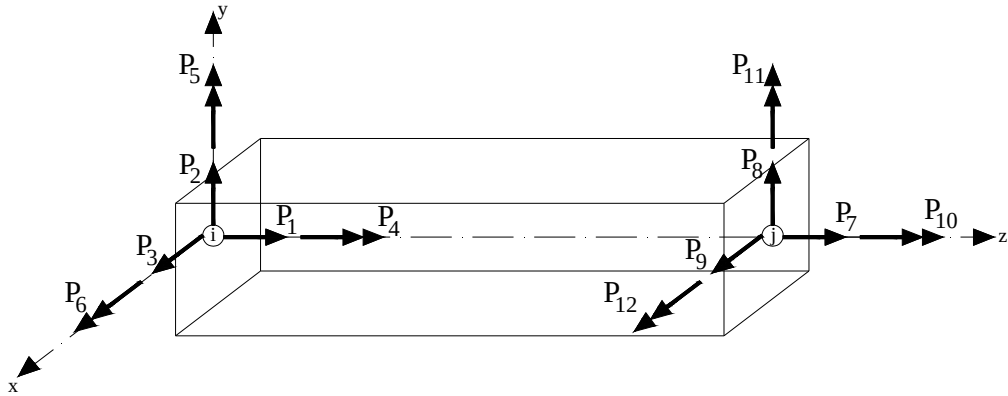
Şekil 2.9 : Plastik şekildeğiştirme parametresinin birim değerinden meydana gelen çubuk uç kuvvetleri matrislerinin elde edilışinde gözönüne alınan süperpozisyon durumları.

$[P_\Phi]$ matrislerinin ikinci merteye teorisine ait değerleri ise (2.32a) ve (2.33a) denklemleri ile ifade edilebilir. Bağıntılarda kullanılan $b_{x1,1}, b_{x1,2}, b_{y1,1}, b_{y1,2}$ büyüklükleri ikinci merteye rijitlik matrisi elemanlarının katsayıları olup, bu büyüklüklerin hesabı Ek A'da ayrıntılı olarak verilmiştir.

$$[P_\Phi]_i = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_3 \cdot (EF / L) \\ A_1 \cdot (2\alpha - 1) \cdot (b_{x1,1} + b_{x1,2} / L) \\ -A_2 \cdot (2\alpha - 1) \cdot (b_{y1,1} + b_{y1,2} / L) \\ 0 \\ A_2 \cdot [(\alpha - 1) \cdot b_{y1,1} + \alpha \cdot b_{y1,2}] \\ A_1 \cdot [(\alpha - 1) \cdot b_{x1,1} + \alpha \cdot b_{x1,2}] \end{bmatrix} \quad (2.32a)$$

$$[P_\Phi]_j = \begin{bmatrix} P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3 \cdot (EF / L) \\ -A_1 \cdot (2\alpha - 1) \cdot (b_{x1,1} + b_{x1,2} / L) \\ A_2 \cdot (2\alpha - 1) \cdot (b_{y1,1} + b_{y1,2} / L) \\ 0 \\ A_2 \cdot [\alpha \cdot b_{y1,1} + (\alpha - 1) \cdot b_{y1,2}] \\ A_1 \cdot [\alpha \cdot b_{x1,1} + (\alpha - 1) \cdot b_{x1,2}] \end{bmatrix} \quad (2.33a)$$

Bağıntılarda yer alan çubuk uç kuvvetlerinin pozitif yönleri Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : Çubuk uç kuvvetlerinin pozitif yönleri.

2.5.2 Eğik eğilme ve normal kuvvet etkisindeki betonarme çubuklarda taşıma gücünün bulunması

M_x, M_y eğilme momentlerinin ve N normal kuvvetinin etkisi altındaki bir betonarme çubuk elemanda, bu kesit tesirleri artarak (2.34) denklemleri ile ifade edilen,

$$K(M_x, M_y, N) = 0 \quad (2.34)$$

kırılma şartının belirlediği sınır duruma ulaşınca kesitin taşıma gücü sona ermektedir. Bu durumun, basit eğilme etkisindeki çubuklarda olduğu gibi, dış basınç lifindeki birim kısalmanın $\varepsilon_{cu} = 0.0035$ değerine erişip betonun ezilmesi ile veya çekme donatısındaki birim uzamanın $\varepsilon_{su} = 0.01$ değerini aşması ile meydana geldiği kabul edilir [9].

Plastik kesite M_x eğilme momentinin yanında N normal kuvvetinin ve uzay çubuk sistemlerde M_y eğilme momentinin de etkimesi halinde, bu iç kuvvetlere bağlı olarak yazılan akma koşulunu sağlayacak şekilde belirlenen karakteristik plastik moment (M_p) esas alınarak hesap yapılması gerekmektedir. Plastik kesitteki N normal kuvveti ve M_y eğilme momenti başlangıçta bilinmediğinden ve artan dış yükler altında sürekli olarak değiştiğinden, her yük artımında bir ardışık yaklaşım yolu uygulanması gerekebilir [2].

Kesit tesirlerinin bilinen N_o ve M_{y_o} değerlerine karşı gelen $M_{x,L2}$ taşıma gücünün hesaplanabilmesi için çubuk elamanındaki birim boy değişmesi yayılışının bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle bir ardışık yaklaşım yöntemi uygulanarak her adımda tarafsız eksenin yeri ile bu eksen etrafındaki χ birim dönmesi tahmin edilir. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi tarafsız eksenin yeri, kesitin G ağırlık merkezinden olan y_o uzaklığı ve x eksenine yaptığı α açısı ile belirlenmektedir. y_o , α ve χ büyüklükleri o şekilde tahmin edilmelidir ki bunların belirledikleri şekildeğiştirme durumu kırılmaya karşı gelen sınır durumlardan birisini vermeli ve birim boy değişmelerine bağlı olarak tayin edilen beton ve çelik gerilmelerine ait N normal kuvveti ile M_y eğilme momenti başlangıçta seçilen N_o ve M_{y_o} değerlerine eşit olmalıdır. Bu duruma ait M_x eğilme momenti aranan $M_{x,L2}$ taşıma gücünü vermektedir [9].

Bunun için ilk olarak y_o ve α büyüklükleri tahmin edilir ve kırılma olarak tanımlanan sınır durumlardan biri örneğin betonun ezilmesi esas alınarak bu duruma karşı gelen χ birim dönmesi, η_u dış basınç lifinin tarafsız eksenenden olan uzaklığını göstermek üzere (2.35) denklemi ile hesaplanır.

$$\chi = \frac{\varepsilon_{cu}}{\eta_u} \quad (\varepsilon_{cu} = 0.0035) \quad (2.35)$$

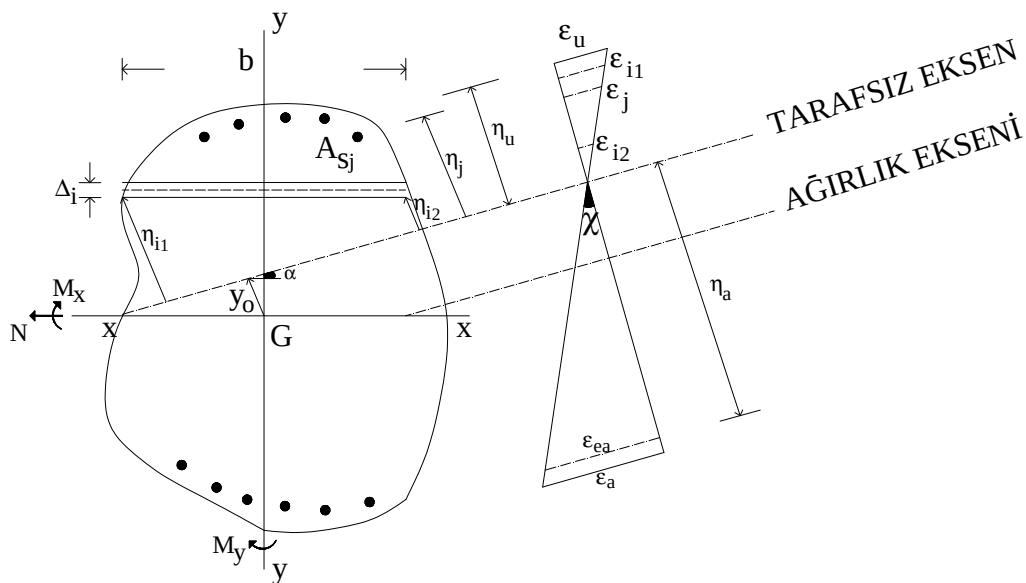
χ bulunduktan sonra çekme donatısındaki (2.36) denklemi ile ifade edilen,

$$\mathcal{E}_{ea} = \chi \cdot \eta_a \quad (2.36)$$

birim uzamasının $\varepsilon_{su} = 0.01$ sınır değerini aşmadığı kontrol edilmelidir. Bu şartın sağlanmaması halinde,

$$\varepsilon_{eq} = \chi \cdot \eta_a = \varepsilon_{su} = 0.01 \quad (2.36a)$$

denklemleri ile tayin edilen yeni bir χ alınarak hesaba devam edilir. Yukarıdaki bağıntılarda η_a dış çekme lifine en yakın donatının tarafsız eksenden olan uzaklığını göstermektedir.



Şekil 2.11 : Uzay çerçevelerin çubuk elemanında şekildeğiştirme durumu.

2.5.2.1 y_0 ve α değerlerinin tahmini için bir ardışık yaklaşım yöntemi

Eğik eğilme ve normal kuvvet etkisindeki betonarme kesitlerin taşıma gücünün tayininde (2.37) denklemi ile verilen doğrusal olmayan denklem sisteminin kökleri

y_o ve α büyüklüklerinin değerlerini, belirledikleri şekildeğiştirme durumu kırılmaya karşı gelen sınır durumlardan birisini verecek şekilde ve birim boy değışmelerine bağılı olarak tayin edilecek beton ve çelik gerilmelerine ait N normal kuvveti ile M_y eğilme momentini başlangıçta seçilen N_o ve M_{y_o} değerlerine eşit olacak şekilde vermektedir.

$$f_1 = N(y_o, \alpha) - N_o = 0 ; f_2 = M_y(y_o, \alpha) - M_{y_o} = 0 \quad (2.37)$$

Denklem sistemi matris formda (2.38) denklemi ile yeniden yazılabilir.

$$[f] = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.38)$$

Bu denklem sisteminin kökleri ise (2.39) denklemi ile verilebilir.

$$[x] = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_o \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

(2.38) denklemi, $[f]$ fonksiyonu (i) adımında Mac Laurin serisine açılıp yaklaşık olarak iki veya daha yüksek mertebeden terimler terk edilir ve (i+1) sayılı adıma ait $[x]_{i+1}$ köklerine göre düzenlenirse (2.40) denklemi elde edilir.

$$[f']_i \cdot [x]_{i+1} = -[f]_i + [f']_i \cdot [x]_i \quad (2.40)$$

Bu denklemde yer alan herhangi bir i.adıma ait büyüklükler ise (2.41), (2.42) ve (2.43) denklemleri ile ifade edilebilir.

$$[f]_i = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}_i \quad (2.41)$$

$$[f']_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}_i \quad (2.42)$$

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right)_i \cong \frac{[f_1(x_1 + \Delta x_1, x_2)]_i - [f_1(x_1, x_2)]_i}{\Delta x_1} \quad (2.43a)$$

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right)_i \cong \frac{[f_1(x_1, x_2 + \Delta x_2)]_i - [f_1(x_1, x_2)]_i}{\Delta x_2} \quad (2.43b)$$

$$\left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)_i \cong \frac{[f_2(x_1 + \Delta x_1, x_2)]_i - [f_2(x_1, x_2)]_i}{\Delta x_1} \quad (2.43c)$$

$$\left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)_i \cong \frac{[f_2(x_1, x_2 + \Delta x_2)]_i - [f_2(x_1, x_2)]_i}{\Delta x_2} \quad (2.43d)$$

Newton-Raphson yöntemi adını alan bu ardışık yaklaşım yöntemi ile hesabın ilk adımında (2.44) denkleminde verilen kökler için,

$$[x]_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

kabulü yapılır ve

$$[f]_1 = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} N(0,0) - N_o \\ M_y(0,0) - M_{y_o} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

denklemi ile fonksiyonların ilk adıma ait değerleri hesaplanır. $[f]_1$ matrisinin bütün elemanları sıfır veya yeteri kadar küçük ise çözüm elde edilmiştir. Bu şart sağlanmıyorsa, $[f']_1$ matrisinin elemanları (4 adet) yukarıdaki gibi hesaplanır. Bu aşamadan sonra (2.46) denklemi yardımıyla,

$$[f']_1 \cdot [x]_2 = -[f]_1 + [f']_1 \cdot [x]_1 \quad (2.46)$$

ikinci adıma ait $[x]_2$ bulunur. Benzer şekilde, diğer adımlara ait $[x]_3$, $[x]_4, \dots$ bulunur. Herhangi bir adım sonunda hesaplanan $[f]$ matrisinin bütün elemanları sıfır veya yeteri kadar küçük ise ardışık yaklaşıma son verilir.

Yukarıda açıklanan ardışık yaklaşım yöntemi ile y_o ve α büyüklükleri bulunduktan sonra, χ birim dönmesi daha önce verilen (2.35) denklemi ile hesaplanır.

Şekil 2.11'den faydalanarak bu denklem, (2.47) denklemi ile parametrik bir şekilde ifade edilebilir.

$$\chi = \frac{\varepsilon_{cu}}{\eta_u} = \frac{0.0035}{(d/2) - y_o} \quad (2.47)$$

χ bulunduktan sonra çekme donatısındaki (2.48) denklemi ile ifade edilen,

$$\varepsilon_{ea} = \chi \cdot \eta_a \quad (2.48)$$

birim uzamasının $\varepsilon_{su} = 0.01$ sınır değerini aşmadığı kontrol edilerek bu şartın sağlanmaması halinde χ birim dönmesi,

$$\varepsilon_{ea} = \chi \cdot \eta_a = \varepsilon_{su} = 0.01 \quad (2.48a)$$

denklemini yardımıyla yeniden hesaplanır. (2.48a) denklemini,

$$\chi = \frac{\varepsilon_{su}}{\eta_a} = \frac{0.01}{(d - d') - \eta_u} = \frac{0.01}{(d/2) - d' + y_o} \quad (2.48b)$$

şeklinde ifade edilebilir.

y_o ve α büyüklüklerinin tahmin edilen değerlerine ve (2.47) veya (2.48) denklemlerine göre hesaplanan χ birim dönmesine ait N , M_x ve M_y kesit tesirlerinin hesabı için önce kesit x-x eksenine paralel olan yeterli sayıda dilime ayrılır. Sonra,

$$\begin{aligned} \varepsilon_{i1} &= -\chi \cdot \eta_{i1} \\ \varepsilon_{i2} &= -\chi \cdot \eta_{i2} \end{aligned} \quad (2.49)$$

denklemini ile (i) sayılı dilimin sol ve sağ uçlarındaki birim boy değişmeleri ve

$$\varepsilon_j = -\chi \cdot \eta_j \quad (2.50)$$

denklemini ile de (j) sayılı donatı elemanındaki birim boy değişmesi bulunur. Bu denklemlerde yer alan $\eta_{i1}, \eta_{i2}, \eta_j$ uzaklıkları Şekil 2.11'de gösterildiğı gibi basınç tarafında pozitif kabul edilmişlerdir. $\varepsilon_{i1}, \varepsilon_{i2}, \varepsilon_j$ birim boy değişmeleri ise (+) oldukları zaman birim uzamayı, (-) oldukları zaman birim kısalmayı ifade etmektedirler [9].

- Donatıdaki çekme veya basınç kuvvetlerinin hesaplanması:

(2.48) denklemini ile ifade edilen donatı sıralarındaki birim boy değişmeleri kesit boyutlarına bağlı olarak parametrik biçimde (2.50a) denklemini ile gösterilebilir.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{j1} &= -\chi \cdot \eta_{j1} = -\chi \cdot (\eta_u - d') = -\chi \cdot \left(\frac{d}{2} - y_o - d'\right) \\ \varepsilon_{j2} &= -\chi \cdot \eta_{j2} = -\chi \cdot \eta_a = \chi \cdot (d - d' - \eta_u) = \chi \cdot \left(d - d' - \frac{d}{2} + y_o\right) = \chi \cdot \left(\frac{d}{2} - d' + y_o\right) \end{aligned} \quad (2.50a)$$

Donatı sıralarındaki çekme veya basınç kuvvetleri olan P_1 ve P_2 , ε_e elastik sınırdaki birim uzamayı göstermek üzere (2.51) denklemleri ile hesaplanabilirler.

$$\begin{aligned}
|\varepsilon_j| \leq \varepsilon_e &\rightarrow P_i = A_s \cdot E \cdot \varepsilon_j \\
|\varepsilon_j| > \varepsilon_e &\rightarrow P_i = \pm A_s \cdot f_{yk} \quad (\varepsilon_j > 0 \text{ için } (+); \varepsilon_j < 0 \text{ için } (-))
\end{aligned} \tag{2.51}$$

$$P_1 = \begin{cases} \frac{\rho \cdot b \cdot d \cdot E \cdot \varepsilon_{j1}}{2} & ; \quad |\varepsilon_{j1}| \leq \varepsilon_e \\ + \frac{\rho \cdot b \cdot d \cdot f_{yk}}{2} & ; \quad |\varepsilon_{j1}| > \varepsilon_e \text{ ve } \varepsilon_{j1} > 0 \\ - \frac{\rho \cdot b \cdot d \cdot f_{yk}}{2} & ; \quad |\varepsilon_{j1}| > \varepsilon_e \text{ ve } \varepsilon_{j1} < 0 \end{cases} \tag{2.51a}$$

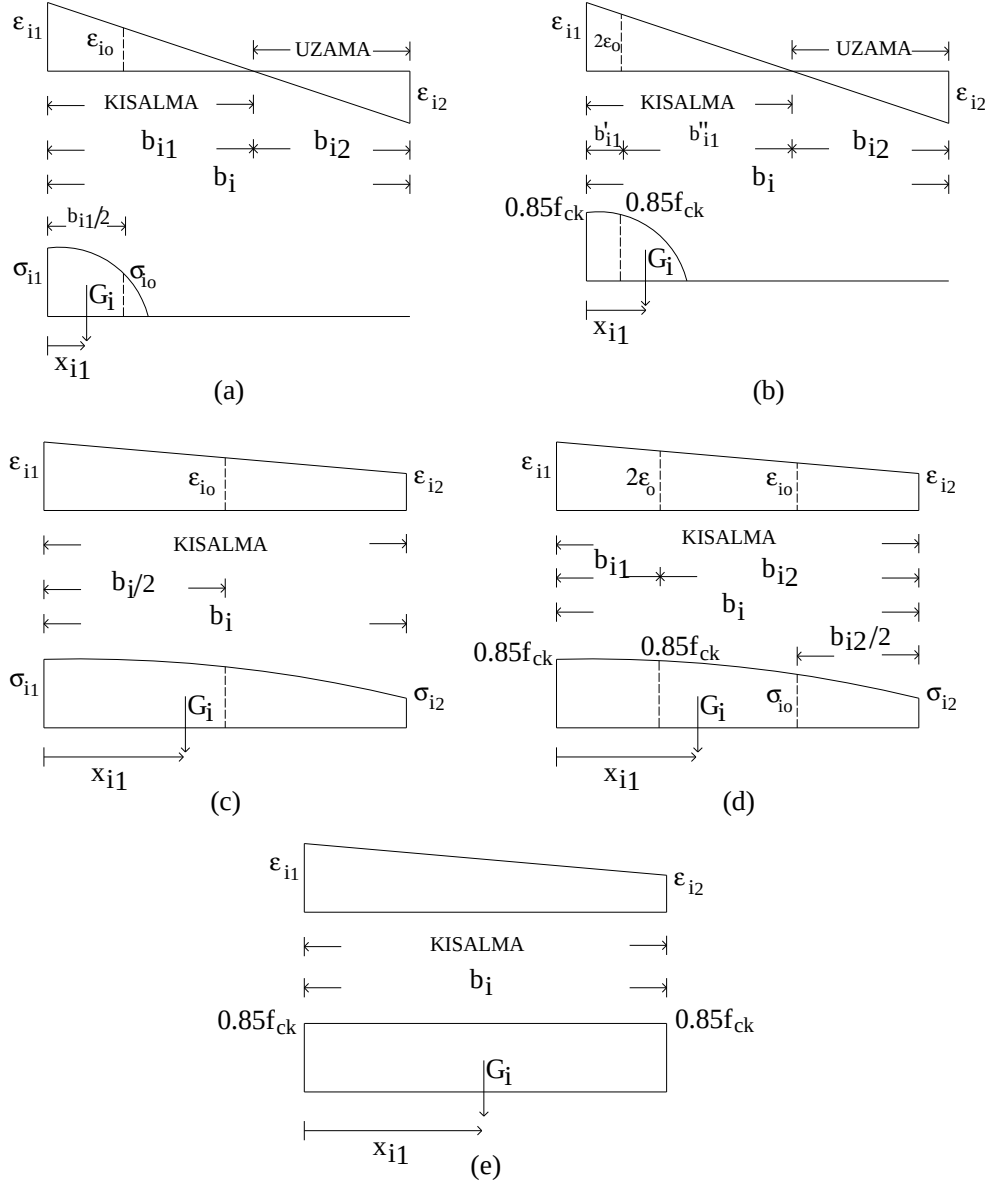
$$P_2 = \begin{cases} \frac{\rho \cdot b \cdot d \cdot E \cdot \varepsilon_{j2}}{2} & ; \quad |\varepsilon_{j2}| \leq \varepsilon_e \\ + \frac{\rho \cdot b \cdot d \cdot f_{yk}}{2} & ; \quad |\varepsilon_{j2}| > \varepsilon_e \text{ ve } \varepsilon_{j2} > 0 \\ - \frac{\rho \cdot b \cdot d \cdot f_{yk}}{2} & ; \quad |\varepsilon_{j2}| > \varepsilon_e \text{ ve } \varepsilon_{j2} < 0 \end{cases} \tag{2.51b}$$

- Beton dilimlerindeki basınç kuvvetlerinin hesaplanması:

(2.49) denklemi ile ifade edilen ve Şekil 2.11’de gösterilen (i) sayılı beton diliminin sol ve sağ uçlarındaki birim boy değişimlerinin değerlerine bağlı olarak beş değişik basınç gerilmesi yayılımı meydana gelmektedir. Bu durumlardan her biri için basınç gerilmelerinin bileşke değeri ile bileşkenin etkidiği noktanın nasıl hesaplanacağı Şekil 2.12 üzerinde gösterilmiş ve aşağıdaki bağıntılarla açıklanmıştır. Bu formüllerde $\varepsilon_{i1}, \varepsilon_{i2}$ birim boy değişimlerinin mutlak değerleri kullanılmalıdır [9].

ε birim kısalmasına karşı gelen beton basınç gerilmesi (2.52) denklemi ile hesaplanabilir.

$$\sigma(\varepsilon) = E_b \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{E_b}{4 \cdot 0.85 f_{ck}} \varepsilon\right) \tag{2.52}$$



Şekil 2.12 : (i) sayılı beton diliminin basınç gerilmesi yayılışları ve bileşkesi.

Durum 1

Sınırlar; $\epsilon_{i1} < 0$ (kısalma) ; $\epsilon_{i2} > 0$ (uzama) ve $|\epsilon_{i1}| \leq 0.002$

Gerilmeler,

$$\sigma_{i1} = \sigma(\epsilon_{i1}) , \quad \epsilon_{io} = \frac{1}{2} \epsilon_{i1} , \quad \sigma_{io} = \sigma(\epsilon_{io}) \quad (2.53)$$

Bileşke,

$$b_{i1} = b_i \cdot \frac{\epsilon_{i1}}{\epsilon_{i1} + \epsilon_{i2}} , \quad G_i = \frac{1}{6} b_{i1} \cdot \Delta_i \cdot (\sigma_{i1} + 4\sigma_{io}) \quad (2.54)$$

Bileşkenin etkidiği yer,

$$x_{i1} = b_{i1} \cdot \frac{2\sigma_{io}}{4\sigma_{io} + \sigma_{i1}} \quad (2.55)$$

Durum II

Sınırlar; $\varepsilon_{i1} < 0$ (kısalma) ; $\varepsilon_{i2} > 0$ (uzama) ve $|\varepsilon_{i1}| > 0.002$

Gerilmeler,

$$\sigma_{i1} = 0.85 f_{ck} \quad (2.56)$$

Bileşke,

$$b'_{i1} = b_i \cdot \frac{\varepsilon_{i1} - 2\varepsilon_o}{\varepsilon_{i1} + \varepsilon_{i2}}, b''_{i1} = b_i \cdot \frac{2\varepsilon_o}{\varepsilon_{i1} + \varepsilon_{i2}}, G_i = (b'_{i1} + \frac{2}{3}b''_{i1})\Delta_i 0.85 f_{ck} \quad (2.57)$$

Bileşkenin etkidiği yer,

$$x_{i1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3(b'_{i1})^2 + b''_{i1}(4b'_{i1} + 1.5b''_{i1})}{3b'_{i1} + 2b''_{i1}} \quad (2.58)$$

Durum III

Sınırlar; $\varepsilon_{i1} < 0$ (kısalma) ; $\varepsilon_{i2} < 0$ (kısalma) ve $|\varepsilon_{i1}| \leq 0.002$; $|\varepsilon_{i2}| \leq 0.002$

Gerilmeler,

$$\sigma_{i1} = \sigma(\varepsilon_{i1}), \sigma_{i2} = \sigma(\varepsilon_{i2}), \sigma_{io} = \sigma(\varepsilon_{io}), \varepsilon_{io} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{i1} + \varepsilon_{i2}) \quad (2.59)$$

Bileşke,

$$G_i = \frac{1}{6} b_i \cdot \Delta_i \cdot (\sigma_{i1} + 4\sigma_{io} + \sigma_{i2}) \quad (2.60)$$

Bileşkenin etkidiği yer,

$$x_{i1} = b_i \cdot \frac{2\sigma_{io} + \sigma_{i2}}{4\sigma_{io} + \sigma_{i1} + \sigma_{i2}} \quad (2.61)$$

Durum IV

Sınırlar; $\varepsilon_{i1} < 0$ (kısalma) ; $\varepsilon_{i2} < 0$ (kısalma) ve $|\varepsilon_{i1}| > 0.002$; $|\varepsilon_{i2}| \leq 0.002$

Gerilmeler,

$$\sigma_{i1} = 0.85 f_{ck}, \sigma_{i2} = \sigma(\varepsilon_{i2}), \sigma_{io} = \sigma(\varepsilon_{io}), \varepsilon_{io} = \frac{1}{2}(2\varepsilon_{io} + \varepsilon_{i2}) \quad (2.62)$$

Bileşke,

$$G_i = \Delta_i \cdot [b_{i1} \cdot 0.85 f_{ck} + \frac{1}{6} b_{i2} (0.85 f_{ck} + 4\sigma_{io} + \sigma_{i2})] \quad (2.63)$$

Bileşkenin yeri,

$$x_{i1} = \frac{\Delta_i}{G} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot b_{i1}^2 \cdot 0.85 f_{ck} + \frac{1}{6} b_{i2} [b_{i1} (2\sigma_{io} + 0.85 f_{ck}) + b_i (2\sigma_{io} + \sigma_{i2})] \right\} \quad (2.64)$$

Durum V

Sınırlar; $\epsilon_{i1} < 0$ (kısılma) ; $\epsilon_{i2} < 0$ (kısılma) ve $|\epsilon_{i1}| > 0.002$; $|\epsilon_{i2}| > 0.002$

Gerilmeler,

$$\sigma_{i1} = \sigma_{i2} = 0.85 f_{ck} \quad (2.65)$$

Bileşke,

$$G_i = b_i \cdot \Delta_i \cdot 0.85 f_{ck} \quad (2.66)$$

Bileşkenin yeri,

$$x_{i1} = \frac{1}{2} b_i \quad (2.67)$$

Yukarıdaki denklemlerde Δ_i dilim kalınlığını göstermektedir. Yukarıda açıklandığı gibi, beton dilimlerindeki basınç kuvvetleri ile donatı elemanlarındaki çekme veya basınç kuvvetlerinin bileşkeleri hesaplandıktan sonra, çubuk eksenini doğrultusundaki izdüşüm denge denklemi ile N normal kuvveti, x - x ve y - y eksenlerine göre moment denge denklemleri ile de sırasıyla M_x ve M_y momentleri bulunur [9].

y_o , α ve χ büyüklüklerinin belirlenmesi için yukarıda açıklanan yöntem kullanılarak çubuk elemanın kırılmasına karşı gelen gerçek şekildeğiştirme durumu elde edildikten sonra, açıklanan yöntemle hesaplanan basınç ve çekme kuvvetlerinin kesitin ağırlık merkezinden geçen x - x ve y - y eksenlerine göre momentleri alınarak kesitin taşıma gücü bulunabilir. Yöntemin sayısal uygulamalarına ait hesaplarda eğik eğilme ve normal kuvvet etkisindeki betonarme kesitler için [8] ve [9]'da yukarıda anlatılan esaslar doğrultusunda geliştirilen BEKE-2 isimli bilgisayar programından yararlanılmıştır.

Ardışık yaklaşım yönteminin her adımında, yukarıda anlatıldığı gibi betonarme uzay çubuklarda verilen bir enkesit yüksekliği veya donatı oranı için elde edilen 24 adet akma düzlemine ait katsayılardan yararlanılarak, çubuğun i ve j uçlarına ait $[P_\phi]$ yük vektörleri elde edilmektedir. Daha sonra esasları Bölüm 5'te açıklanacak olan YCR3D programı yardımıyla dış yükler sıfıra eşitken birim plastik şekildeğiştirme parametreleri için ve birim plastik şekildeğiştirmeler sıfıra eşitken dış yükler için ayrı ayrı hesap yapılarak kritik kesitlerdeki iç kuvvetler elde edilmektedir. Elde edilen iç kuvvetler ve Bölüm 2.3.2'de verilen süperpozisyon denklemleri kullanılarak, akma koşulu kısıtlama denklemlerinin oluşturulmasıyla optimizasyon aşamasına geçilmektedir.

2.6 Optimum Boyutlandırma Probleminin Ek Kısıtlamaları

Yapı mühendisliği uygulamalarında, işletme ve hesap yükleri altında, düğüm noktalarının yerdeğiştirmelerinin ve plastik kesitlerdeki plastik dönmelerinin söz konusu yükler için öngörülen sınır değerleri aşmaması, enkesit karakteristiklerinin verilen sınır değerlerden küçük olmaması veya enkesit karakteristikleri ile ilgili bazı özel kısıtlamalar (alt kat kolonlarının enkesit boyutlarının üst kat kolonlarının enkesit boyutlarından küçük olmaması gibi) istenebilir.

Bu çalışmada düğüm noktası yerdeğiştirmeleri ve plastik kesitlerdeki dönmeler ile ilgili kısıtlamalar, boyutlandırma aşamasında bu büyüklüklere ait kısıtlamaları içeren eşitsizlikler de kısıtlama denklemlerine dahil edilerek ek kısıtlama denklemleri olarak göz önüne alınmış ve söz konusu ek kısıtlamaların optimum boyutlandırma problemine etkileri hesaba dahil edilmiştir.

Optimum boyutlandırma probleminin ek kısıtlamaları, üç alt bölüme ayrılarak aşağıda açıklanmıştır.

2.6.1 Enkesit boyutları ile ilgili yapısal kısıtlamalar

Betonarme yapı sistemlerinin tasarımında enkesit boyutları ile ilgili çeşitli yapısal kısıtlamaların tasarımda gözönüne alınması gerekebilir. Enkesit boyutları ile ilgili yönetmeliklerde verilen minimum boyutlar ile ilgili sınırlamalara ek olarak, mimari, estetik ve ekonomik sebeplerle öngörülen bazı yapısal kısıtlamaların da (alt kat

kolonlarının üst kat kolonlarından daha büyük enkesite sahip olması gibi) gözönüne alınması gerekebilir.

Bu amaçla enkesit karakteristikleri ile ilgili yapısal kısıtlamalar için (2.68) ve (2.69) denklemleri yazılarak optimum boyutlandırma problemine dahil edilebilir.

$$-M_{pi} + (M_{pi})_s \leq 0 \quad (2.68)$$

$$M_{pi} \leq M_{pk} \quad (2.69)$$

Yukarıdaki eşitsizliklerde yer alan, M_{pi} ve M_{pk} sırasıyla i ve k sayılı çubukların enkesit karakteristiklerini temsil eden büyüklükleri, $(M_{pi})_s$ ise sınırlanacak büyüklüklere ait sınır değerleri göstermektedir [1].

2.6.2 Plastik kesit dönmelerine ait ek kısıtlamalar

Betonarme uzay çerçevenin ikinci mertebe elastoplastik analizi sonucunda elde edilen plastik kesitlerdeki plastik dönmeler aynı zamanda optimum boyutlandırma probleminin tasarım değişkenleri olduğu için, bu büyüklüklere ait ek kısıtlamalar, eşitsizlikler halinde kısıtlama denklemlerine eklenerek kolaylıkla gözönüne alınabilmektedir. Örnek olarak, Φ_{lim} , plastik kesit dönmeleri için öngörülen sınır değeri göstermek üzere,

$$|\Phi_i| \leq \Phi_{lim} \quad (2.70)$$

$$|\overline{\Phi_i} - \Phi_u| - \Phi_{lim} \leq 0 \quad (2.70a)$$

denklemleri kullanılarak mutlak değerli ifade açılırsa,

$$\overline{\Phi_i} - \Phi_u - \Phi_{lim} \leq 0 \quad (2.70b)$$

$$-\overline{\Phi_i} + \Phi_u - \Phi_{lim} \leq 0 \quad (2.70c)$$

her bir plastik kesit dönmesi için (2.70b) ve (2.70c) denklemlerinde gösterildiği gibi iki ayrı ek kısıtlama denklemi yazılabilir.

Plastik kesit dönmelerine ait bazı uluslararası tasarım yönetmeliklerinde örnek olarak ATC-40 yönetmeliğinde [50] farklı performans seviyeleri için sınır değerler tanımlanmış olup, ülkemizde geçerli olan “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar

Hakkında Yönetmelik”, kısaca TDY-2007’de [51] ise farklı kesit hasar düzeyleri için beton ve donatıya ait birim şekildeğiştirme üst sınırları öngörülmüştür. Söz konusu birim şekildeğiştirme üst sınırları kullanılarak aşağıda açıklanan yöntem ile optimum boyutlandırma problemine ilave edilecek ek kısıtlama denklemlerinde kullanılacak olan plastik kesit dönmesi sınırları hesaplanabilir.

TDY-2007’ye göre plastik eğrilik istemi χ_p ise,

$$\chi_p = \frac{\Phi_p}{L_p} \quad (2.71)$$

denklemi ile ifade edilmekte olup bu denklemde,

Φ_p : İkinci mertebe elastoplastik analiz sonucunda herhangi bir kesitte elde edilen plastik dönme istemini,

L_p : Plastik şekildeğiştirme bölgesinin uzunluğunu göstermekte olup, h çalışan doğrultudaki kesit yüksekliği olmak üzere,

$$L_p = 0.5 \cdot h \quad (2.72)$$

denklemiyle ifade edilebilir.

Kesitteki toplam eğrilik istemi χ_t ,

$$\chi_t = \chi_y + \chi_p \quad (2.73)$$

denklemi ile ifade edilmekte olup bu bağıntıdaki χ_y , eşdeğer akma eğriliğini göstermektedir.

Tezde önerilen yöntemde, tasarım değişkenleri olan kesit plastik dönmeleri ile ilgili doğrudan ek kısıtlama yazılabildiği için, TDY-2007’de farklı kesit hasar sınırlarına göre verilen şekildeğiştirme üst sınırlarının karşı geldiği plastik dönme üst sınırlarının bulunması gerekmektedir. Şekildeğiştirme üst sınırlarına karşı gelen plastik dönme üst sınırlarının (2.71) denklemi ile hesaplanabilmesi için, bu sınırlara karşı gelen plastik eğrilik istemi χ_p ’nin belirlenmesi gerekmektedir.

TDY-2007’de verilen farklı kesit hasar sınırlarına ait beton basınç birim şekildeğiştirmesi ile donatı çeliği birim şekil değiştirmesi üst sınırları (Çizelge 2.1) kullanılarak ilgili enkesit için moment-eğrilik ilişkisi yardımıyla kesitteki toplam eğrilik istemi, χ_t , tayin edilebilmektedir. Bu işlem [8]’de geliştirilen BEKE-2 isimli

bilgisayar programına amaç doğrultusunda ilaveler yapılarak tezin sayısal uygulamaları için hazırlanan BEKE-2011 programı yardımıyla yapılabilmektedir.

Çizelge 2.1 : Farklı kesit hasar sınırlarına ait birim şekildeğiştirme üst sınırları.

Kesit Hasar Sınırı	ε_{cu} (Beton)	ε_s (Beton çeliği)
Minimum Hasar (MN)	0.0035	0.010
Güvenlik Sınırı (GV)	0.0135	0.040
Göçme Sınırı (GÇ)	0.0180	0.060

Çizelge 2.1’de yer alan sınır değerler hesaplanırken kesitte mevcut bulunan ve sargı etkisi sağlayabilen enine donatı hacimsel oranının TDY-2007 süneklik düzeyi yüksek tasarım koşullarına göre bulunması gereken enine donatı hacimsel oranına eşit olduğu kabul edilmiştir.

Kesitteki toplam eğrilik istemi farklı sınır değerler için elde edildikten sonra,

$$\chi_t = \chi_y + \chi_p \quad (2.73)$$

$$\chi_p = \chi_t - \chi_y \quad (2.73a)$$

denklemleri yardımıyla, plastik eğrilik istemi hesaplanıp (2.71) denklemi kullanılarak farklı kesit hasar sınırlarına ait plastik dönme sınır değerleri elde edilebilir.

Bunun için (2.73a) denkleminde, eşdeğer akma eğriliği χ_y ’nin belirlenmesi gerekmektedir. Eşdeğer akma eğriliğinin belirlenmesi amacıyla aşağıdaki yol izlenebilir.

Eşdeğer akma eğriliği, TDY-2007’ye göre, kesitteki eksenel kuvvet istemi altında yapılan analizden elde edilen moment-eğrilik ilişkisi ile tanımlanmaktadır. TDY-2007’de yukarıdaki gibi açıklanan eşdeğer akma eğriliği, doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin plastik kesit (plastik mafsalsal) adı verilen belirli noktalarda toplandığı varsayımına dayanan hesap yöntemlerinde, Şekil 2.13’de gösterilen χ_{L1} büyüklüğüne karşı gelmektedir.

Bu kısıtlamalar yerdeğiştirmeler için öngörölen sınır değerler kullanılarak,

$$|d_i + d_0| \leq d_{\text{lim}} \quad (2.74)$$

$$|d_i + d_0| - d_{\text{lim}} \leq 0 \quad (2.74a)$$

veya,

$$d_i + d_0 - d_{\text{lim}} \leq 0 \quad (2.74b)$$

$$-d_i - d_0 - d_{\text{lim}} \leq 0 \quad (2.74c)$$

(2.74) denklemleri ile her yerdeğiştirme için iki eşitsizlik içerecek şekilde yazılabilir. Yukarıdaki eşitsizlikte d_i , sınırlandırılması istenen yerdeğiştirmenin dış yükler sıfıra eşitken birim plastik dönmeler için yapılan hesap sonucu bulunan değerini, d_0 , birim plastik dönmeler sıfıra eşitken dış yükler için yapılan hesap sonucu bulunan değerini, d_{lim} ise söz konusu yerdeğiştirmeye ait sınır değeri göstermektedir.

Benzer şekilde görelı kat ötelemeleri için öngörölen sınır değerler kullanılarak,

$$|(d_i / h) + (d_0 / h)| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (2.75)$$

$$|(d_i / h) + (d_0 / h)| - (\delta)_{\text{lim}} \leq 0 \quad (2.75a)$$

veya,

$$(d_i / h) + (d_0 / h) - (\delta)_{\text{lim}} \leq 0 \quad (2.75b)$$

$$-(d_i / h) - (d_0 / h) - (\delta)_{\text{lim}} \leq 0 \quad (2.75c)$$

(2.75) denklemleri ile her yerdeğiştirme ve görelı kat ötelemesi için iki eşitsizlik içerecek şekilde de yazılabilir. Yukarıdaki eşitsizlikte d_i / h , sınırlandırılması istenen görelı kat ötelemesinin dış yükler sıfıra eşitken birim plastik dönmeler için yapılan hesap sonucu bulunan değerini, d_0 / h , birim plastik dönmeler sıfıra eşitken dış yükler için yapılan hesap sonucu bulunan değerini, $(\delta)_{\text{lim}}$ ise söz konusu görelı kat ötelemesine ait sınır değeri göstermektedir.

3. OPTİMİZASYON YÖNTEMİNİN ESASLARI VE OPTİMUM BOYUTLANDIRMADA İZLENEN YOL

Bu bölümde betonarme uzay çerçevelerin ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılması için önerilen ardışık yaklaşım yönteminde kullanılacak optimizasyon yönteminin esasları açıklanacaktır.

Optimizasyon tekniği olarak daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi öncelikle [3]'de önerilen, [1] ve [4]'de geliştirilen yöntem kullanılacaktır. Bu yöntemde optimizasyon için Simplex yönteminden yararlanılmakta ve geleneksel Simplex algoritmasında problemin özelliklerine bağlı olarak bir takım değişiklikler yapılmaktadır.

Yöntemin sayısal uygulamalarının optimizasyon hesaplarında kullanılmak üzere [4]'de geliştirilen ve bu çalışmada amaçlara uygun olarak üzerinde bir takım değişiklikler yapılan SIM bilgisayar programı ile bilgiler Bölüm 5'te açıklanacaktır.

Bu bölümde ayrıca önerilen optimum boyutlandırılma yönteminde izlenen yol açıklanacaktır.

3.1 Optimizasyon probleminin çözümüne hazırlık işlemleri

Optimum boyutlandırma probleminin Simplex yönteminden yararlanarak çözülebilmesi için önce değişken dönüşümünün yapılması gerekmektedir. Problemde tasarım değişkenleri olarak seçilen plastik kesitlerdeki şekildeğiştirme parametreleri ve çubuk plastik momentlerinin pozitif olmaları gerekmektedir. Çubukların plastik momentleri daima pozitif olmakla birlikte, plastik şekildeğiştirme parametreleri pozitif veya negatif değerler alabilirler. Bu koşulun sağlanabilmesi için plastik şekildeğiştirme parametreleri (3.1) denklemi kullanılarak,

$$\Phi_i = \overline{\Phi_i} - \Phi_u \quad (3.1)$$

şeklinde iki pozitif değişkenin farklı olarak ifade edilmiştir. Burada Φ_u değişkeni bütün Φ_i değişkenleri için bir üst sınırı göstermektedir [1].

Bu pozitiflik koşulu süperpozisyon denklemlerinin verildiği Bölüm 2.3.2’de (2.6) denkleminde göz önüne alınırsa akma koşulu kısıtlamaları açık şekliyle (3.2), (3.2a) denklemleri ile yazılabilir.

$$\begin{aligned} & A_1 \cdot \left([m_{x\Phi}] \cdot [\bar{\Phi}] - [m_{x\Phi u}] \cdot [\Phi_u] + [m_{ox}] \right) + \\ & A_2 \cdot \left([m_{y\Phi}] \cdot [\bar{\Phi}] - [m_{y\Phi u}] \cdot [\Phi_u] + [m_{oy}] \right) + \\ & A_3 \cdot \left([n_\Phi] \cdot [\bar{\Phi}] - [n_{\Phi u}] \cdot [\Phi_u] + [n_o] \right) - u \cdot m_p \leq 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} & \left(A_1 \cdot [m_{x\Phi}] + A_2 [m_{y\Phi}] + A_3 [n_\Phi] \right) \cdot [\bar{\Phi}] - \left(A_1 \cdot [m_{x\Phi u}] + A_2 [m_{y\Phi u}] + A_3 [n_{\Phi u}] \right) \cdot [\Phi_u] \\ & + \left(A_1 \cdot [m_{ox}] + A_2 [m_{oy}] + A_3 [n_o] \right) - u \cdot m_p \leq 0 \end{aligned} \quad (3.2a)$$

Denklem sadeleştirilerek yazılırsa,

$$[F] \cdot [\bar{\Phi}] - [F_u] \cdot [\Phi_u] - [u] \cdot [m_p] + [F_o] \leq 0 \quad (3.3)$$

(3.3) denkleminde, $[F_u]$ matrisinin elemanları, $[F]$ matrisinin satırlarının toplanması ile elde edilir.

$$[F_{uj}] = \sum_{j=1}^n F_j \quad (3.4)$$

$$[F] = A_1 \cdot [m_{x\Phi}] + A_2 \cdot [m_{y\Phi}] + A_3 \cdot [n_\Phi] \quad (3.5)$$

$$[F_o] = A_1 \cdot [m_{ox}] + A_2 \cdot [m_{oy}] + A_3 \cdot [n_o] \quad (3.6)$$

Yukarıdaki denklemlerde;

$[\bar{\Phi}]$: Plastik kesit dönmlerini içeren kolon matrisi,

$[F]$: Akma düzlemi katsayıları ile çarpılmış olarak birim plastik kesit şekil değiştirmelerinden dolayı kritik kesitlerdeki normal kuvvet ve her iki yöndeki eğilme momentlerini içeren matrisi,

$[F_u]$: $[F]$ matrisinin satırlarının toplanması ile elde edilen kolon matrisi,

$[F_o]$: Akma düzlemi katsayıları ile çarpılmış olarak dış yüklerden dolayı kritik kesitlerdeki normal kuvvet ve her iki yöndeki eğilme momentlerini içeren kolon matrisi,

$[m_p]$: Aynı enkesite sahip grup elamanlara ait kesit karakteristik plastik momentlerini içeren kolon matrisi,

$[u]$: Akma düzlemlerine bağlı olarak kesit karakteristik plastik moment grupları ile ilgili katsayıları içeren matrisi,

göstermektedir.

3.2 Simplex Yöntemi

Bu bölümde betonarme uzay çerçevelerin ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılması için bu çalışmada lineer programlama probleminin çözümü için kullanılacak olan Simplex yönteminin esasları [1]'den faydalanılarak aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır.

Simplex yöntemi, minimum veya maksimum yapılacak bir amaç fonksiyon ile eşitlikler ve/veya eşitsizlikler şeklinde verilen belirli sayıdaki kısıtlamaların doğrusal bağıntılarla ifade edilebildiği optimizasyon problemlerinde, mutlak optimumun bulunmasını amaçlayan bir ardışık yaklaşım yöntemidir.

3.2.1 Optimizasyon problemi

Optimizasyon probleminde göz önüne alınan tasarım değişkenleri cinsinden, amaç fonksiyon ve kısıtlamaların doğrusal bağıntılarla ifade edilebilmesi durumunda (3.7) denklemi ile verilen amaç fonksiyonunu optimize ederek minimum yapan ve (3.8), (3.9) denklemleri ile gösterilen kısıtlamaları ve pozitiflik koşullarını sağlayan $X_1, X_2, \dots, X_N$ tasarım değişkenlerinin bulunması amaç haline gelmektedir.

$$G_F = \sum_{i=1}^N c_i \cdot X_i \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^N a_{ji} \cdot X_i \leq b_j \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (3.8)$$

$$X_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (3.9)$$

Yukarıdaki denklemlerde yer alan a_{ji} , b_j , c_i problemin özelliklerine bağlı olarak belirlenen sabit sayıları, N ve M ise sırasıyla tasarım değişkenlerinin ve toplam kısıtlamaların sayısını göstermektedir. Yukarıdaki denklemler ile tanımlanan optimizasyon problemi matris formunda (3.10) denkleminde gösterildiği gibi ifade edilebilir [1].

$$\begin{aligned} G_F &= [C]^T \cdot [X] \\ [A] \cdot [X] &\leq [B] \\ [X] &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

(3.10) denkleminde yer alan $[C]$ matrisi amaç fonksiyonun katsayılarını içeren bir kolon matristir ve (3.11) denklemi ile tanımlanabilir. $[X]$ matrisi tasarım değişkenlerinden oluşan bir kolon matristir ve (3.12) denklemi ile tanımlanabilir. $[A]$ ve $[B]$ matrisleri ise kısıtlama denklemlerinin katsayı ve sabitlerini içeren matrislerdir ve sırasıyla (3.13) ile (3.14) denklemleriyle tanımlanabilir.

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$[X] = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & \cdot & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdot & \cdot & a_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdot & \cdot & a_{MN} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_M \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Yukarıda (3.8) denklemi ile verilen problemin kısıtlamaları eşitsizlik halindedir. Simplex yönteminin optimizasyon probleminin çözümüne uygulanması amacıyla, *gevşek değişkenler* adı verilen M adet pozitif $X_{N+1}, X_{N+2}, \dots, X_{N+M}$ değişkenleri kısıtlama denklemlerine eklenirse, (3.8) denklemi aşağıdaki şekli alır.

$$\sum_{i=1}^N a_{ji} \cdot X_i + X_{N+j} = b_j \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (3.15)$$

Benzer şekilde, $[X]$, $[C]$ ve $[A]$ matrisleri de gevşek değişkenleri ve bunlara ait katsayıları içerecek şekilde (3.16) denklemi yardımıyla yeniden tanımlanabilir [1].

$$[X^+] = \begin{bmatrix} X_1 \\ \cdot \\ X_N \\ \cdot \\ X_{N+M} \end{bmatrix} \quad (3.16a)$$

$$[C^+] = \begin{bmatrix} c_1 \\ \cdot \\ c_N \\ \cdot \\ c_{N+M} \end{bmatrix} \quad (c_{N+1} = \dots = c_{N+M} = 0) \quad (3.16b)$$

$$[A^+] = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdot & a_{1N} & 1 & 0 & \cdot & 0 \\ a_{21} & \cdot & a_{2N} & 0 & 1 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{M1} & \cdot & a_{MN} & 0 & 0 & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16c)$$

Bu durumda, yukarıda (3.10) denklemi ile matris formda tanımlanan optimizasyon problemi yine matris formda aşağıdaki hale gelir.

$$\begin{aligned} G_F &= [C^+]^T \cdot [X^+] \\ [A^+] \cdot [X^+] &= [B] \\ [X^+] &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Böylece (3.17) denklemi ile tanımlanan optimizasyon probleminin çözülmesi amacıyla eşitlik haline getirilen M adet kısıtlama denklemini sağlayan ve optimize edilen amaç fonksiyonunu minimum yapan $N+M$ adet pozitif değişkenin belirlenmesi gerekmektedir [1].

3.2.2 Simplex yönteminin esasları ve tanımlar

Bu bölümde Simplex yönteminin esaslarından kısaca bahsedilecek ve yöntem ile ilgili temel kavramlar [1]'den ve [3]'den faydalanılarak açıklanacaktır.

Simplex yöntemi, tanımları aşağıda verilen uygun çözümler bölgesindeki herhangi bir noktadan başlayarak bir uygun temel çözümün bulunması ve bu çözümden hareketle en elverişli çözümün aranması amacını taşıyan bir ardışık yaklaşım yöntemi olup, her adımda temel olmayan değişkenlerden birisi serbest bırakılıp (giren değişken) temel değişkenlerden birisi sıfıra eşitlenerek (çıkan değişken) yeni bir uygun temel çözüm bulunmaktadır.

Değişkenlerin yerdeğiştirmesi olarak adlandırılan bu işlem, kısıtlamalar ve pozitiflik koşulları bozulmayacak ve amaç fonksiyonunun değeri bir önceki adıma göre daha küçük olacak şekilde gerçekleştirilir. Ardışık yaklaşımın herhangi bir adımında amaç fonksiyonunun değeriindeki azalmayı ifade eden ve *değer sabitleri* olarak adlandırılan büyüklüklerin tümü negatif değer aldıklarında en elverişli çözüm (mutlak optimum)

elde edilmiş olur [1,3]. Simplex yönteminde kullanılan ve yukarıda bahsedilen bazı temel kavramların tanımları aşağıda açıklanmıştır.

Temel çözüm : En az N adet değişkenin sıfır olduğu, geri kalan M adet değişkenin (3.17) denklemi ile hesaplanabildiği çözümdür.

Uygun çözüm : Kısıtlamaları ve pozitiflik koşullarını sağlayan herhangi bir çözümdür.

Uygun temel çözüm : Temel değişkenlerin pozitif olduğu bir temel çözümdür.

Mutlak optimum : En elverişli çözüm olan mutlak optimum, amaç fonksiyonunu minimum yapan uygun temel çözümdür.

Temel değişkenler : Temel çözümde değerleri sıfırdan farklı olan değişkenlerdir.

Temel olmayan değişkenler : Temel çözümde değerleri sıfır olan değişkenlerdir [1].

3.2.3 Simplex yöntemi ile hesapta izlenen yol

Ardışık yaklaşımın herhangi bir adımına ait işlemler, simplex hesap tablosu üzerinde sistematik bir şekilde yapılabilir.

$$\begin{array}{c}
 \text{(Temel Olmayan Değişkenler)} \\
 \begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{ccccccc} X_1 & X_2 & . & . & X_i & . & . & X_N \end{array} \right] \\
 \begin{array}{c} \left[\begin{array}{ccccccc} a_{11} & a_{12} & . & . & a_{1i} & . & . & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & . & . & a_{2i} & . & . & a_{2N} \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ a_{j1} & a_{j2} & . & . & a_{ji} & . & . & a_{jN} \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ a_{M1} & a_{M2} & . & . & a_{Mi} & . & . & a_{MN} \end{array} \right] \\
 \left[\begin{array}{ccccccc} \alpha_1 & \alpha_2 & . & . & \alpha_i & . & . & \alpha_N \end{array} \right]
 \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{c} X_{N+1} \\ X_{N+2} \\ . \\ X_{N+j} \\ . \\ X_{N+M} \end{array} \right]
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{c} b_1 \\ b_2 \\ . \\ b_j \\ . \\ b_M \end{array} \right]
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{Sabitler} \\
 \text{(Temel Değ.} \\
 \text{Bir önceki} \\
 \text{adıma ait} \\
 \text{değerleri)}
 \end{array}
 \end{array}$$

Şekil 3.1 : Yöntemin herhangi bir adımına ait simplex hesap şeması.

Simplex yönteminin herhangi bir adımı birbirini izleyen dört işlemden oluşur.

- 1.işlem: Değer sabitlerinin hesaplanması :

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^M a_{ji} \cdot c_{(j)} - c_i \quad (3.18)$$

Temel olmayan değişkenlerin her biri için ayrı ayrı söz konusu değişkenlerin bire eşit olması hali için hesap yapılır. Bütün α_i değerleri sıfır veya negatif değerler aldıklarında en elverişli çözüme ulaşılmış olur. Bu durumda çizelgenin en sağdaki kolonu en elverişli çözüme ait temel değişkenlerin değerlerini verir. Amaç fonksiyonun değeri de (3.17) denklemi yardımıyla hesaplanır.

Bir veya daha fazla α_i değer sabitinin sıfır olması, problemin birden fazla en elverişli çözümünün bulunduğunu gösterir. Bir veya daha fazla α_i değer sabitinin pozitif olması halinde ise en elverişli çözüm henüz elde edilmemiştir ve bu durumda 2.işleme geçilir.

- 2.işlem: Pivot kolon ve ona karşı gelen giren değişkenin saptanması:

En az bir elemanı sıfırdan farklı olan ve α_i değer sabiti en büyük olan “i” sayılı kolon “*pivot kolon*” , bu kolona ait X_i değişkeni “*giren değişken*” olarak seçilir. Pivot kolonun numarası “g” ile, giren değişken ise “ X_g ” ile gösterilir. Bu aşamadan sonra 3.işleme geçilir.

- 3.işlem: Pivot satır ve ona karşı gelen çıkan değişkenin saptanması:

Bu amaçla, pivot kolona ait $a_{jg} > 0$ olan bütün satırlar için; b_j / a_{jg} değerinin minimum olduğu “j” sayılı satır “*pivot satır*” ve bu satıra ait X_j değişkeni “*çıkan değişken*” olarak seçilir. Pivot satırın numarası “c” ile, çıkan değişken ise “ X_c ” ile gösterilir. Eğer b_j / a_{jg} değeri birden fazla satır için minimum çıkarsa, ardışık yaklaşımın halkalanma adı verilen sonsuz sayıda devam etmesi tehlikesini önlemek

için sırayla, $\frac{a_{j1}}{a_{jg}}, \frac{a_{j2}}{a_{jg}}, \dots, \frac{a_{jN}}{a_{jg}}$ oranları için aynı kriter uygulanarak pivot satır seçilir ve 4.işleme geçilir.

- 4.işlem: Hesap çizelgesinin yeni değerlerinin bulunması:

Pivot satır için,

$$a'_{ci} = \frac{a_{ci}}{a_{cg}} \quad b'_c = \frac{b_c}{a_{cg}} \quad (i \neq g) \quad (3.19)$$

Pivot kolon için,

$$a'_{jg} = -\frac{a_{jg}}{a_{cg}} \quad a'_{cg} = \frac{1}{a_{cg}} \quad (j \neq c) \quad (3.20)$$

Bunların dışındaki diğer satır ve kolonlar için;

$$a'_{ji} = a_{ji} - a_{ci} \frac{a_{jg}}{a_{cg}} \quad (i \neq g, j \neq c) \quad (3.21)$$

$$b'_j = b_j - b_c \frac{a_{jg}}{a_{cg}} \quad (j \neq c) \quad (3.22)$$

Yukarıdaki denklemler ile hesaplanan a' ve b' değerleri, yeni simplex hesap tablosunun elemanlarını göstermektedir.

3.2.4 İlk uygun temel çözümün belirlenmesi

Simplex yöntemi ile optimizasyon hesabına başlamadan önce ilk uygun temel çözümün belirlenmesi gerekmektedir. Geliştirilen yöntemde önceki bölümlerde anlatıldığı şekilde pozitiflik koşulunun sağlanması için değişken dönüşümü yapıldıktan sonra, ilk uygun temel çözümün belirlenmesi için sırasıyla aynı enkesite sahip elaman grubu sayısı “ g ” kadar plastik momente ait kolonlar pivot kolon olarak seçilir ve yukarıda anlatıldığı şekilde 3. ve 4. adımdaki işlemler gerçekleştirilerek ilk uygun temel çözüme ait hesap çizelgesi elde edilir. İlk uygun temel çözümün elde edilmesi amacıyla yapılan işlemlerde, simplex yönteminin herhangi bir adımına ait işlemlerden tek fark, 3.işlemdeki b_j / a_{jg} değerinin minimum değil maksimum olduğu “ j ” sayılı satırın “*pivot satır*” ve bu satıra ait X_j değişkenin de “*çıkan değişken*” olarak seçilmesidir.

İlk uygun temel çözüme ait hesap çizelgesi elde edildikten sonra Bölüm 3.2.3’te açıklandığı şekilde Simplex yöntemi hesap adımlarına geçilerek optimizasyon aşaması tamamlanır.

3.3 Optimum boyutlandırma yönteminde izlenen yol

Betonarme uzay çerçevelerin ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılması için önerilen ardışık yaklaşım yöntemi her adımda boyutlandırma ve sistem hesabı aşamalarından oluşmaktadır.

Her adımda tasarım değişkenlerinin ve amaç fonksiyonun katsayılarının değerleri bir önceki boyutlandırma adımından, ikinci mertebe limit yük, ikinci mertebe limit yüke ait plastik kesit yerleri ve bu plastik kesitlere ait akma vektörü doğrultuları ise bir önceki adımın sistem hesabı aşamasından alınmaktadır.

Önerilen optimum boyutlandırma yönteminde izlenen yol aşağıda detaylı biçimde açıklanmıştır.

3.3.1 Ardışık yaklaşımın ilk adımında boyutlandırma

Ardışık yaklaşımın ilk adımında problemin verileri dışında hiçbir bilgi olmadığından boyutlandırma işlemine, sistemin geometrisi ile yükleme karakteristiklerine bağlı olarak, bir ön boyutlandırma aşaması ile başlanabilir. Sistemin ön boyutlandırması doğrusal veya doğrusal olmayan teorilere göre yapılabileceği gibi uygulamada yapıldığı gibi yönetmeliklerde verilen minimum koşullar göz önünde bulundurularak da yapılabilir. Bu şekilde farklı başlangıç noktalarından hareketle yapılan optimum boyutlandırmada farklı ön boyutlandırma durumları ardışık yaklaşımın adım sayısına etki eder ancak daha önceki çalışmalarda da ispatlandığı gibi elde edilen optimum çözümler birbirine oldukça yakın olmaktadır.

Ön boyutlandırma sonucunda elde edilen kesit boyutlarından yararlanılarak, esasları ve işleyişi Bölüm 4'te verilen EPARCS programı ile yapılacak ikinci mertebe elastoplastik hesap sonucunda sistemin ikinci mertebe limit yükü, bu yüke ait plastik kesit yerleri ve bu plastik kesitlere ait akma vektörü doğrultularını gösteren katsayılar ardışık yaklaşımın ilk adımında başlangıç çözümü olarak alınır.

3.3.2 Akma koşulu kısıtlamalarının oluşturulması

Optimum boyutlandırma işleminin ilk adımındaki başlangıç çözümüne bağlı olarak, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar, ikinci mertebe limit yüke ait plastik kesitler ve bu plastik kesitlere ait akma vektörü doğrultularının Bölüm 3.3.1'de

belirtildiği gibi elde edilmesinden sonra, Bölüm 2.3.2’de açıklandığı şekilde süperpozisyon denklemleri kullanılarak akma koşulu kısıtlamalarının oluşturulması aşamasına geçilir. Bunun için, dış yükler sıfıra eşitken birim plastik şekildeğiştirme parametreleri için ve birim plastik şekildeğiştirme parametreleri sıfıra eşitken dış yükler için hesap yapılarak kritik kesitlerdeki iç kuvvetler elde edilir. Elde edilen iç kuvvetler gözönüne alınan 24 adet akma düzlemine ait akma düzlemi katsayıları kullanılarak önerilen yöntemle süperpoze edilir ve akma koşulu kısıtlama denklemleri oluşturulur. Bu işlemlerin yapılması için izlenen yola ait daha detaylı bilgi, geliştirilen bilgisayar programlarının açıklandığı Bölüm 5’te ve yöntemin sayısal uygulamalarının yer aldığı Bölüm 6’da verilmiştir.

3.3.3 Optimizasyon aşaması

Optimizasyon aşamasında esasları Bölüm 3.2’de açıklanan yöntem kullanılacaktır. Esasları yukarıda açıklanan Simplex yönteminden faydalanılarak Bölüm 3.2.1’de belirtildiği gibi $[A]$, $[X]$, $[B]$ ve $[C]$ matrislerinin elde edilmesini takiben gevşek değişkenlerin de ilave edilmesi ile $[A^+]$, $[X^+]$ ve $[C^+]$ genişletilmiş matrisleri oluşturulur.

Bu aşamadan sonra (3.17) denklemleri ile ifade edilebilen matris formda optimizasyon problemi elde edilmiş olur.

$$\begin{aligned} G_F &= [C^+]^T \cdot [X^+] \\ [A^+] \cdot [X^+] &= [B] \\ [X^+] &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Yukarıdaki denklemler ile matris formda ifade edilen optimizasyon problemi varsa ek kısıtlamaların da denklemlere ilave edilmesinden sonra simplex yöntemi yardımı ile çözülür.

Ardışık yaklaşımın diğer adımlarında ilk adım sonucu bulunan çözüme ait enkesit boyutları ile enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar kullanılarak yukarıda anlatılan şekilde hesap tekrarlanır.

Her adımda bir önceki adımda boyutlandırılan (başlangıçta ön boyutlandırma) sistem, malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan teoriye göre ikinci mertebe elastoplastik analiz ile hesaplanarak, ikinci mertebe limit yüke ait

plastik kesit yerleri ve akma düzlemi katsayıları elde edilmektedir. Daha sonra uzay çerçeve sistemi, dış yükler ve plastik kesitlerdeki birim plastik şekildeğiştirme parametreleri için ayrı ayrı analiz edilerek kritik kesitlerdeki normal kuvvetler ve her iki yöndeki eğilme momentleri hesaplanmakta ve optimizasyon aşamasına geçilmektedir.

Birbirini takip eden boyutlandırma ve sistem hesabı aşamalarından oluşan ardışık yaklaşım yönteminde, her adımda bir önceki adımda boyutlandırılan sistemin enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar kullanılarak ikinci mertebe elastoplastik hesap sonucunda elde edilen plastik kesitler ve bu kesitlere ait akma vektörü doğrultuları esas alınarak optimum boyutlandırma işlemi yapılır. Ardışık iki adımda bulunan tasarım değişkenlerinin ve enkesit karakteristiklerinin birbirine yeter derecede yakın olması halinde hesaba son verilir.

4. BOYUTLANDIRILAN SİSTEMİN İKİNCİ MERTEBE ELASTOPLASTİK HESABI

Betonarme uzay çerçevelerin ikinci mertebe limit yük için optimum boyutlandırılmaları amacıyla bu çalışmada önerilen ardışık yaklaşım yönteminde, daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi her adımda sistemin ikinci mertebe elastoplastik hesabı yapılarak ikinci mertebe limit yükü, bu yüke ait plastik kesit yerleri ve bu plastik kesitlere ait akma vektörü doğrultularının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, herhangi bir optimizasyon adımının sistem hesabı aşamasında üç boyutlu betonarme yapı sistemlerinin ikinci mertebe limit yüklerinin hesabı için [8]'de verilen yöntemden ve bu yöntemin sayısal uygulamaları için geliştirilen EPARCS (Elasto-Plastic Analysis of Reinforced Concrete Structures) adlı bilgisayar programından yararlanılmıştır. Yöntemin dayandığı varsayımlar, yöntemin esasları ve matematik formülasyonu aşağıdaki bölümlerde özetlenmiştir.

Betonarme yapıların ikinci mertebe teorisine göre elastoplastik hesabı ve göçme yükünün belirlenmesi amacıyla geliştirilen EPARCS bilgisayar programında, betonarme çubuk elamanların doğrusal olmayan davranışının belirlenmesinde *plastik mafsal hipotezinden* faydalanılmaktadır. Plastik kesitler bileşik iç kuvvet durumunu da içermektedir. Hesapta geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkilerini ifade eden ikinci mertebe etkileri de gözönüne alınmaktadır.

4.1 Varsayımlar

Hesap yönteminin ve bilgisayar programının dayandığı temel varsayımlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir :

- a) İç kuvvet-şekildeğiştirme bağıntıları, ideal elastoplastik malzeme tanımına uygun olarak, iki doğru parçasından meydana gelecek şekilde idealleştirilmektedir.
- b) Doğrusal olmayan eğilme ve uzama şekildeğiştirmelerinin plastik kesit adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bu kesitler dışındaki bölgelerde ve kesme kuvveti etkisi

altında sistemin doğrusal-elastik davrandığı varsayımı yapılmıştır. Böylece, basit eğilme etkisindeki çubuk elemanlara uygulanabilen plastik mafsallık hipotezi, bileşik iç kuvvet durumunu da içererek plastik kesit hipotezi şeklinde genişletilmiş olmaktadır.

c) Kesme kuvvetinin akma koşuluna etkisi terk edilmiştir. Bu şekilde, düzlem çubuk sistemlerde akma koşulu eğilme momenti ve normal kuvvete bağlı olarak ifade edilebilmektedir. Ayrıca, bileşik eğilme durumundaki akma eğrisinin doğru parçalarından oluştuğu varsayılmaktadır.

d) Akma vektörü akma eğrisine diktir. Bilindiği gibi, ideal elastoplastik malzemeden yapılmış çubuklar için kesin olan bu özellik betonarme kesitlerde bazı koşullar altında ve yaklaşık olarak geçerli sayılabilir.

e) İkinci mertebe teorisi uygulanmaktadır. Buna göre, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi göz önüne alınmakta, geometrik süreklilik koşullarına etkisi terk edilmektedir.

f) Sistemin şekildeğiştirmesi sırasında yüklerin doğrultularının değişmediği varsayılmaktadır.

g) İkinci mertebe elastoplastik hesap yapılırken sistemi oluşturan çubuklara ait çatlamış kesit rijitlikleri kullanılmaktadır.

h) Sistem doğru eksenli, prizmatik çubuklardan oluşmaktadır ve normal kuvvet çubuk boyunca sabittir. Bu koşulların sağlanmadığı çubuklar doğru eksenli, sabit enkesitli ve normal kuvveti sabit olan veya sabit varsayılabilen yeter derecede küçük parçalara ayrılarak idealleştirilebilirler [2].

4.2 Yöntemin Esasları

Yük artımı yönteminde, yapı sistemi sabit düşey yükler ve orantılı olarak artan yatay yükler altında hesaplanmaktadır. Böylece, düşey yükler için öngörülen belirli bir güvenlik katsayısı altında, yapının yatay yük taşıma kapasitesi elde edilir. Genellikle rüzgar ve deprem etkilerini temsil eden yatay yüklerin değişme olasılığının, önemli bir bölümü yapı öz ağırlığından oluşan düşey yüklere oranla daha fazla olduğu göz önünde tutulursa, bu yaklaşımın gerçekçi olduğu kabul edilebilir.

Yapıya etkiyen düşey yüklerin bilinmesi halinde, büyük ölçüde denge denklemlerine bağlı olan çubuk normal kuvvetleri kolaylıkla tahmin edilebilmekte ve bu normal

kuvvetlere bağılı olarak hesaplanan ikinci mertebe çubuk rijitlik (birim yer değiştirme) ve yükleme matrislerini kullanarak ikinci mertebe etkileri doğrusallaştırılabilmektedir.

Özellikle çok katlı yapılarda, artan yatay yüklerle birlikte kolonlardaki normal kuvvetler tahmin edilen değerlere oranla önemli miktarda değişebilmekte; fakat düşey denge denklemleri nedeniyle bir kattaki kolon normal kuvvetlerinin toplamı sabit kalmaktadır.

Yük artımı yönteminde, hesap sonunda bulunan normal kuvvetlerin tahmin edilen değerlerden çok farklı olması ve bu farkın sonucu etkileyebilecek mertebede bulunması halinde, bu normal kuvvetler esas alınarak hesap tekrarlanabilir. Ancak hesap sonunda bulunan kolon normal kuvvetlerinin başlangıçta tahmin edilen değerlerden çok fark etmesi durumunda bile, bunların bir kattaki toplamalarının sabit kalması nedeniyle, ikinci mertebe etkilerindeki değişim terk edilebilecek düzeyde kalmaktadır [2].

Önerilen yöntemde yapı sistemi ardışık yatay yük artımları için hesaplanmaktadır. Her yük artımı, herhangi bir kesitteki iç kuvvet durumunun akma koşulunun belirlediği sınır duruma erişmesi halinde, diğer bir deyişle sistemde bir plastik kesitin oluşması ile sona erer.

Artan dış yükler altında plastik kesitlerdeki iç kuvvetler akma koşullarını sağlayacak şekilde değişebilmekte, buna karşılık iç kuvvetler doğrultularında sonlu plastik şekildeğiştirmeler meydana gelmektedir. Herhangi bir plastik kesitte oluşan plastik şekildeğiştirme bileşenleri, akma vektörünün akma eğrisine dik olması özelliği nedeniyle, plastik şekildeğiştirme parametresi adı verilen tek bir plastik şekildeğiştirme bileşenine bağılı olarak ifade edilebilirler.

Yük artımı yönteminde, her plastik kesitin oluşumundan sonra, o kesitteki plastik şekildeğiştirmeleri ifade eden plastik şekildeğiştirme parametresinin yeni bir bilinmeyen olarak alınması ve plastik kesitteki değişen iç kuvvet durumunun akma koşulunu sağladığını ifade eden yeni bir denklemin denklem takımına ilave edilmesi öngörülmüştür. Ayrıca, akma koşullarının doğru parçalarından oluşacak şekilde idealleştirilmesi suretiyle, ilave edilen denklemin doğrusal olması da sağlanabilmektedir.

Yük artımı yönteminin herhangi bir adımında, bir önceki adıma ait denklem takımının indirgenmiş olması nedeniyle, söz konusu yük artımına ait çözüm, sadece yeni bilinmeyen ve o bilinmeyene karşı gelen yeni denklemin indirgenmesi ile elde edilebilmektedir. Görüldüğü gibi, esasları yukarıda açıklanan yük artımı yöntemi ile bir yapı sisteminin ikinci mertbe limit yükünün hesabı, düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinin yanında plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerini de içeren genişletilmiş bir denklem takımının kurulmasına ve bu denklem takımı ile bunun alt sistemlerinin çözümüne indirgenmiş olmaktadır. Bazı yapı sistemlerinde, dış yükler ikinci mertbe limit yüke erişmeden önce, büyük yerdeğiştirmeler veya plastik kesitlerdeki büyük plastik şekildeğiştirmeler nedeniyle sistem göçebilmektedir. Geliştirilen yöntemde sistemin düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri ve plastik kesitlerdeki dönmeler bilinmeyen olarak seçildiklerinden, göçme yükünün bulunması için bu büyüklüklerin ayrıca hesabına da gerek kalmamaktadır [2].

4.3 Yöntemin Formülasyonu

Geliştirilen yük artımı yönteminde, sisteme ait denklem takımının oluşturulması için *Matris Deplasman Yönteminden* yararlanılmıştır. Bu yöntemde, plastik kesitleri göz önüne almak üzere gerekli düzenlemeler yapıldığında, bilinmeyenler iki gruptan meydana gelirler.

- i) düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri
- ii) plastik kesitlerdeki doğrusal olmayan şekildeğiştirmeleri temsil eden Φ_k plastik şekildeğiştirme parametreleri

Bu bilinmeyenleri hesaplamak için kullanılan denklemler de iki gruptan meydana gelirler.

- i) düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri doğrultularında yazılan moment ve izdüşüm denge denklemleri
- ii) plastik kesitlerdeki iç kuvvet durumlarının akma koşullarını sağladığını (diğer bir deyişle, akma eğrisi üzerinde bulunduğunu) ifade eden denklemler

Görüldüğü gibi, bilinmeyenlerin ve denklemlerin sayıları birbirine eşittir [2].

4.3.1 Denge denklemleri

Sistem eksen takımında yazılan denge denklemlerinin matris formundaki ifadesi (4.1) denklemindeki gibidir.

$$[S_{dd}] \cdot [d] + [S_{d\Phi}] \cdot [\Phi] + [p_o] = [q] \quad (4.1)$$

Bu denklem takımındaki matrisler aşağıda tanımlanmışlardır.

$[d]$: düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden oluşan kolon matris

$[p_o]$: üzerinde plastik kesitler bulunmayan sistemde düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken, çubuklara etkiyen dış yüklerden oluşan uç kuvvetleri kolon matrisi

$[q]$: düğüm noktaları yükleri kolon matrisi

Sistemdeki düğüm noktalarının sayısı n ile gösterildiğinde, $[d]$, $[p_o]$ ve $[q]$ kolon matrisleri düzlem çubuk sistemlerde $3n$ elemanlıdır.

$[S_{dd}]$: üzerinde plastik kesitler bulunmayan sistemin rijitlik matrisidir. Bu matrisin $(S_{dd})_{\alpha\beta}$ sayılı elemanı, dış yükler sıfır iken, $d_\beta = 1$ birim yerdeğiştirme bileşeninden oluşan p_α uç kuvvetini göstermektedir.

Düzlem çubuk sistemlerde $[S_{dd}]$ matrisi $3n \times 3n$ boyutundadır.

İkinci mertebe teorisine göre hesapta $[S_{dd}]$ ve $[p_o]$ matrislerinin elemanları, çubukların (4.2) denklemi ile ifade edilen,

$$\alpha l = l \cdot \sqrt{\frac{|N|}{EI}} \quad (4.2)$$

büyükliklerine bağlı olarak hesaplanırlar. Burada N eksenel basınç kuvvetini, l çubuk boyunu, EI çubuk eğilme rijitliğini göstermektedir.

Doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin denge denklemlerine etkisini hesaba katmak üzere tanımlanan matrisler şunlardır.

$[\Phi]$: plastik kesitlerdeki bilinmeyen Φ plastik şekildeğiştirme parametrelerinden oluşan kolon matristir. Sistemdeki plastik kesitlerin sayısı m ile gösterildiğinde, bu matris m elemanlıdır.

$[S_{d\Phi}]$: plastik kesitlerdeki birim plastik şekildeğiştirmelerin denge denklemlerine etkisini ifade eden bir dikdörtgen matristir [2].

4.3.2 Plastik kesitlerdeki akma koşulları

Plastik kesitlerdeki akma koşulları, bir yük artımı sırasında plastik kesitlerdeki iç kuvvet durumlarının akma eğrisi üzerinde kaldığını ifade eden bağıntılardır ve tüm sistem için matris formunda (4.3) denklemi ile ifade edilebilir.

$$[S_{\Phi d}] \cdot [d] + [S_{\Phi\Phi}] \cdot [\Phi] + [p_{\Phi o}] = [0] \quad (4.3)$$

Yukarıdaki bağıntıda,

$[S_{\Phi d}]$: dış yüksüz sistemde plastik şekildeğiştirmeler sıfır iken, yalnız düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden dolayı plastik kesitlerde oluşan iç kuvvetlerin akma koşullarına etkisini içeren bir matristir. Düzlem sistemlerde $m \times 3n$ boyutundadır.

$[S_{\Phi\Phi}]$: $m \times m$ boyutunda bir kare matristir. Betti karşıtlık teoremine göre $[S_{\Phi\Phi}]$ matrisi esas köşegenine göre simetriktir. Ayrıca, sistemi oluşturan çubukların her birinde birden fazla plastik kesit bulunmadığı sürece, $[S_{\Phi\Phi}]$ matrisinin sadece esas köşegeni üzerindeki terimleri sıfırdan farklıdır.

$[p_{\Phi o}]$: m elemanlı bir kolon matristir. Bu matrisin $(p_{\Phi o})_k$ sayılı elemanı, düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri ve plastik şekildeğiştirme bileşenleri sıfır iken, k sayılı plastik kesitin bulunduğı çubuk üzerindeki yüklerden dolayı bu kesitteki iç kuvvet değişimlerinden oluşmaktadır [2].

Denge denklemleri ile akma koşulları bir arada düşünöldüğünde sisteme ait genişletilmiş denklem takımı (4.4) denklemiyle ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} [S_{dd}] & [S_{d\Phi}] \\ [S_{\Phi d}] & [S_{\Phi\Phi}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [d] \\ [\Phi] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [p_o] \\ [p_{\Phi o}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [q] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

(4.4) denkleminin katsayılar matrisi esas köşegene göre simetrik olup, akma vektörünün akma eğrisine dik olması halinde Betti karşıtlık teoremi uyarınca (4.5) denklemi geçerlidir.

$$[S_{\Phi d}] = [S_{d\Phi}]^T \quad (4.5)$$

4.3.3 Uç kuvvetlerinin ve iç kuvvetlerin hesabı

Herhangi bir yük artımında (4.4) denklemini çözülerek, $[d]$ ve $[\Phi]$ bilinmeyen matrisleri hesaplandıktan sonra, uç kuvvetleri ile uç yerdeğiştirmeleri ve plastik şekildeğiştirme parametreleri arasındaki bağıntılardan yararlanarak, sistem eksen takımındaki çubuk uç kuvvetleri (4.6) ve (4.7) denklemleri ile hesaplanır.

$$[p]_{ix} = [k]_{ixix} \cdot [d]_{ix} + [k]_{ixjx} \cdot [d]_{jx} + [p_o]_{ix} \cdot [\Phi]_{ij} + [p_o]_{ix} \quad (4.6)$$

$$[p]_{jx} = [k]_{jxix} \cdot [d]_{ix} + [k]_{jxjx} \cdot [d]_{jx} + [p_o]_{jx} \cdot [\Phi]_{ij} + [p_o]_{jx} \quad (4.7)$$

Yukarıdaki bağıntılarda,

$[p]_{ix}, [p]_{jx}$: Sistem eksen takımındaki çubuk uç kuvvetleri matrisleri

$[k]_{ixix}, \dots$: Sistem eksenlerindeki rijitlik matrisleri

$[d]_{ix}, [d]_{jx}$: i ve j düğüm noktalarındaki yerdeğiştirme bileşenlerini içeren kolon matrisler

$[p_\Phi]_{ix}, [p_\Phi]_{jx}$: ij çubuğu üzerinde bulunan plastik kesitlerdeki birim plastik şekildeğiştirmelerden oluşan çubuk uç kuvvetleri matrisleri

$[\Phi]_{ij}$: ij çubuğu üzerinde bulunan plastik kesitlere ait plastik şekildeğiştirme parametrelerinin alt alta gelmesinden oluşan kolon matris

$[p_o]_{ix}, [p_o]_{jx}$: çubuk üzerindeki yüklerden oluşan uç kuvvetleri kolon matrisleri olarak tanımlanmaktadır.

Sistem eksen takımındaki uç kuvvetleri matrisleri dönüştürme matrisleri ile çubuk eksen takımına dönüştürülerek, çubuk özel eksenlerindeki $[p]_i, [p]_j$ uç kuvvetleri matrisleri elde edilir. Daha sonra, çubukların denge denklemlerinden yararlanarak kesit zorları diyagramları çizilir [2].

4.4 Hesapta İzlenen Yol

Geliştirilen yük artımı yönteminin, yapı sistemlerinin limit ve göçme yüklerinin hesabına uygulanmasında izlenen yol şu adımlardan oluşmaktadır.

a) Düşey işletme yükleri, bu yükler için öngörülen bir güvenlik katsayısı ile çarpılarak düşey hesap yükleri elde edilir.

b) Düşey hesap yüklerinden oluşan çubuk normal kuvvetleri tahmin edilir. Normal kuvvetler büyük ölçüde denge denklemlerine bağlı olduklarından, bunların tahmininde birinci mertebe doğrusal-elastik hesaptan yararlanılabileceği gibi, doğrudan doğruya denge denklemleri ile tahmin edilmeleri de çok kere yeterli olmaktadır. Tahmin edilen normal kuvvetlere bağlı olarak, ikinci mertebe teorisine ait çubuk rijitlik ve yükleme matrisleri hesaplanır.

c) Sistem düşey yük parametresinin birim değeri için ikinci mertebe teorisine göre hesaplanarak çubuk uç kuvvetleri ve iç kuvvetler bulunur. Tüm kritik kesitlerdeki iç kuvvet durumları akma koşullarının belirlediği sınır durumlarla karşılaştırılarak ilk plastik kesitin oluşacağı düşey yük parametresi belirlenir. Bu değer düşey hesap yüklerinden daha büyük ise, sistemde düşey hesap yüklerinden dolayı plastik kesit meydana gelmediği anlaşılır ve yatay yükler için hesaba geçilir. Aksi halde, düşey yük parametresi düşey hesap yüklerine eşit oluncaya kadar, düşey yüklerden oluşan her plastik kesit için “e” ve “i” sayılı adımlar arasında verilen işlemler tekrarlanarak uygulanır. Sistemin düşey yükler için hesabı tamamlandıktan sonra, yatay yükler için hesaba başlanır.

d) Sistem yatay yük parametresinin birim değeri için hesaplanır. Bunun için, yatay yüklerden oluşan $[p_o]$ ve $[q]$ matrisleri ile, varsa plastik kesitlere ait $[p_{\phi_o}]$ matrisleri hesaplanarak denklem takımındaki yerlerine yazılır. Bir önceki adımda indirgenmiş olan katsayılar matrisinden yararlanarak sadece bu sabitler matrisleri indirgenir. Denklem takımı çözülerek bilinmeyenler bulunduktan sonra, çubuk uç kuvvetleri ve iç kuvvetler hesaplanır. Tüm kritik kesitlerdeki iç kuvvet durumları akma koşullarının belirlediği sınır durumlarla karşılaştırılarak yatay yüklerden oluşan ilk plastik kesitin yeri ve buna karşı gelen yatay yük parametresi bulunur.

e) Yeni oluşan k sayılı plastik kesitteki Φ_k plastik şekildeğiştirme parametresi yeni bilinmeyen olarak alınır, bu bilinmeyene bağlı olarak yazılan bir kolon ile bu yatay

yük artımında plastik kesitteki iç kuvvet durumunun akma koşulunu sağladığını ifade eden bir satır, önceki adıma ait indirgenmiş denklem takımına eklenir ve sadece yeni eklenen satır ve kolon indirgenir.

f) Denklem takımının katsayılar matrisinin determinant değeri hesaplanır. Eğer bu değer

$$\det [S] \leq 0 \quad (4.8)$$

ise, uygulanan teoriye bağlı olarak, birinci mertebe limit yüke (P_{L1}) veya ikinci mertebe limit yüke (P_{L2}) ulaşıldığı anlaşılır ve hesaba son verilir. Bu adımda ayrıca, bölgesel mekanizma ve bölgesel burkulma durumlarının meydana gelip gelmediği de kontrol edilir.

g) Denklem takımı çözülerek birim yük artımından oluşan $[d]$ ve $[\Phi]$ bilinmeyenler matrisleri ile çubuk uç kuvvetleri ve iç kuvvetler bulunur.

h) Tüm kritik kesitlerdeki iç kuvvet durumları akma koşullarının belirlediği sınır durumlarla karşılaştırılarak $k+1$ sayılı plastik kesitin yeri ve oluştuğu toplam yük parametresi bulunur. Bu yüklerden meydana gelen toplam yerdeğiştirmeler, plastik şekildeğiştirmeler, toplam çubuk uç kuvvetleri ve iç kuvvetler hesaplanır.

i) Sistemdeki başlıca yerdeğiştirmeler, rölatif yerdeğiştirmeler, plastik kesitlerdeki eğilme şekildeğiştirmeleri (plastik mafsallı dönmeleri) ve çubuklardaki kesme kuvvetleri kendilerine ait sınır değerlerle karşılaştırılır. Bu büyüklüklerden herhangi birinin kendisine ait sınır değere eşit olması halinde göçme yüküne (P_G) ulaşıldığı anlaşılır ve hesaba son verilir.

j) Limit yük veya göçme yükü elde edilinceye kadar, “e” ve “i” sayılı adımlar arasında verilen işlemler tekrarlanır.

Hesap sonunda elde edilen normal kuvvetlere bağlı olarak belirlenen ikinci mertebe çubuk rijitlik ve yükleme matrislerinin başlangıçta esas alınan değerlerden farklı olması ve bu farkın sonucu etkileyecek mertebede bulunması halinde, gerekirse bu büyüklükler esas alınarak hesap tekrarlanır [2].

5. GELİŞTİRİLEN BİLGİSAYAR PROGRAMLARI

5.1 Genel Bilgiler

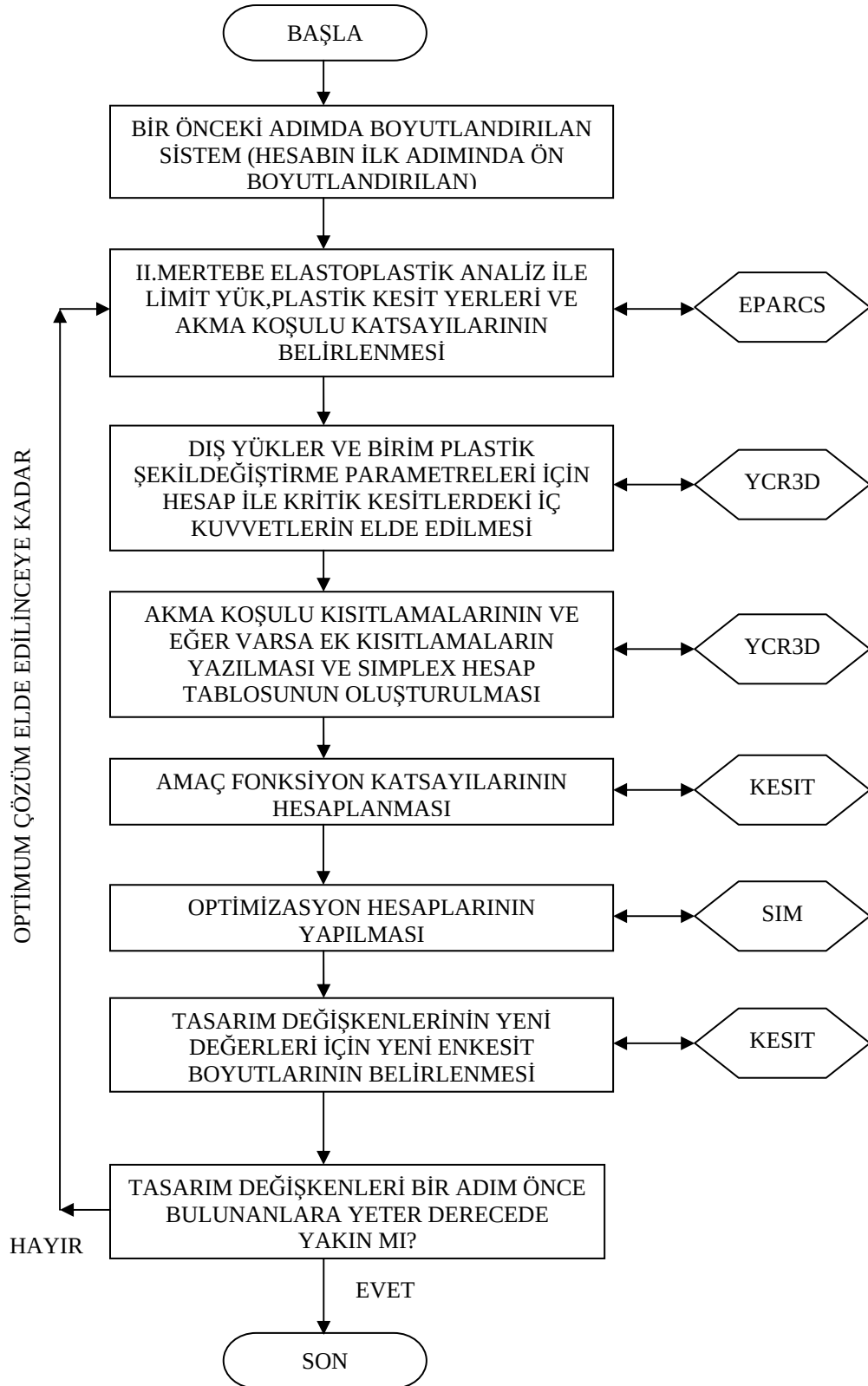
Bu bölümde, tez çalışması kapsamında geliştirilen bilgisayar programları tanıtılacaktır. Bilgisayar programları tanıtılırken, öncelikle hesap algoritması içerisindeki yeri belirtilecek daha sonra sırasıyla programın amacı, giriş-çıkış bilgileri ve programın kullanımı ile ilgili bilgiler sunulacaktır.

Betonarme uzay çerçevelerin ikinci merteye limit yüke göre optimum boyutlandırılması amacıyla geliştirilen ardışık yaklaşım yöntemi, sırasıyla birbirini izleyen sistem hesabı ve boyutlandırma aşamalarından oluşmaktadır. Şekil 5.1’de verilen akış diyagramından da görülebileceği gibi, bir önceki adımda boyutlandırılan (hesabın ilk adımında ön boyutlandırılan) sistem, önce ikinci merteye elastoplastik teoriye göre hesaplanarak ikinci merteye limit yük parametresi, ikinci merteye limit yüke ait plastik kesit yerleri ve akma düzlemi katsayıları elde edilmektedir. Sistem daha sonra, dış yükler ve plastik kesitlerdeki birim plastik şekil değiştirme parametreleri için ayrı ayrı hesaplanarak kritik kesitlerdeki normal kuvvetler ve her iki yöndeki eğilme momentleri bulunmakta ve akma koşulu kısıtlamaları oluşturulmaktadır.

Önceki adımda hesaplanan akma düzlemlerinden ve enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılardan yararlanarak amaç fonksiyonun katsayılarının hesaplanmasından ve eğer varsa optimizasyon probleminin diğer ek kısıtlamalarının da kısıtlama denklemlerine eklenmesinden sonra optimizasyon aşamasına geçilmektedir.

Optimizasyon hesaplarının yapılması ve tasarım değişkenleri ile amaç fonksiyonun optimum değerlerinin bulunmasından sonra, ilgili bölümde detaylı olarak açıklanan betonarme kesitler için verilen enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar kullanılarak yeni enkesit boyutları ve amaç fonksiyonun katsayıları elde edilmektedir. Ardışık yaklaşıma elde edilen yeni kesit boyutları için benzer şekilde

devam edilmekte, ardışık iki adımdaki tasarım değişkenleri ile amaç fonksiyon birbirine yeter derecede yakın olunca hesaba son verilmektedir.



Şekil 5.1 : Ardışık boyutlandırma ve sistem hesabı aşamaları.

Önerilen hesap ve boyutlandırma yönteminin sayısal uygulamaları için hazırlanan bilgisayar programları ile işlevleri aşağıda sırasıyla özetlenmiş, takip eden bölümlerde ise ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

- Yapı sisteminin ikinci mertbe elastoplastik teoriye göre hesaplanarak ikinci mertbe limit yük parametresi, ikinci mertbe limit yüke ait plastik kesit yerleri ve akma düzlemi katsayılarının bulunması EPARCS programı yardımıyla yapılmaktadır. Bu programın ve hesap yönteminin dayandığı esaslar Bölüm 4'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır.
- Optimizasyon aşaması için gerekli akma koşulu kısıtlama denklemlerinin ve amaç fonksiyonun yazılması, SAP2000 programı ile etkileşimli olarak çalışan YCR3D (Yield Condition Restraints-3D) programı tarafından yapılmaktadır. Bu program yardımıyla, plastik kesitlerdeki birim plastik şekil değiştirme parametreleri sıfıra eşitken sadece dış yükler ve dış yükler sıfıra eşitken plastik kesitlerdeki birim plastik şekil değiştirme parametreleri için ayrı ayrı hesaplanarak kritik kesitlerdeki normal kuvvetler ve her iki yöndeki eğilme momentleri hesaplanmakta ve optimizasyon aşaması için gerekli akma koşulu kısıtlamaları oluşturulmaktadır.
- YCR3D programında ayrıca, bir önceki hesap adımından bulunan akma düzlemi katsayıları ve enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılardan yararlanılarak amaç fonksiyonun katsayıları hesaplanmakta ve amaç fonksiyon yeniden yazılmaktadır. Eğer varsa optimum boyutlandırma probleminin ek kısıtlamalarına ait denklemlerin de kısıtlama denklemlerine eklenmesiyle optimizasyon hesaplarında kullanılacak hesap tabloları oluşturulmaktadır.
- Optimizasyon hesapları problemin özelliklerine göre modifiye edilen Simplex yöntemi kullanılarak, SIM programı yardımıyla yapılmaktadır. Bu program [1]'de geliştirilmiş olup, bu çalışmada, önerilen yöntemin özelliklerine bağlı olarak üzerinde bazı değişiklikler yapılmıştır. Programın dayandığı hesap ilkeleri Bölüm 3'te ayrıntılı olarak açıklanmış olup, kullanım bilgileri ile ilgili ayrıntılar ileriki bölümlerde açıklanacaktır.
- Optimizasyon hesapları yapılarak, tasarım değişkenlerinin yeni değerleri elde edildikten sonra, yapı sistemini oluşturan kolon ve kirişlerin yeni hesap

adımına esas olacak boyutları, ilgili bölümde verilen enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar kullanılarak KESIT programı yardımıyla elde edilmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen YCR3D ve KESIT programları ile, [1]'de geliştirilen ve bu çalışmada bazı değişiklikler yapılan SIM programının kullanımına ait bilgiler aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır. Geliştirilen ve kullanılan programlar birbirlerinin okuyacağı formatta giriş-çıkış dosyaları oluşturmakta ve önerilen akış diyagramına uygun bir düzen içerisinde bütünleşik olarak çalışmaktadırlar.

5.2 YCR3D Programı

YCR3D (Yield Condition Restraints-3D) programı EXCEL altında çalışan bir API(Application Programming Interface) uygulaması olup, akma koşulu kısıtlamalarını ve amaç fonksiyonun katsayılarını oluşturmaktadır. Program ile betonarme uzay çerçevelerde, dış yükler ve birim plastik şekildeğiştirme parametreleri için kritik kesitlerdeki normal kuvvet ve her iki yöndeki eğilme momentleri hesaplandıktan sonra, hesaplanan büyüklükleri ilgili kritik kesitler için akma düzlemi katsayıları ile çarparak önerilen formülasyona uygun biçimde akma koşulu kısıtlama denklemleri ile amaç fonksiyonun katsayılarını oluşturmakta ve optimizasyon programının okuyacağı formatta sonuç dosyasına yazmaktadır.

Program, son yıllarda sıkça kullanılmaya başlanan API uygulamalarına örnek olması amacıyla geliştirilmiştir ve SAP2000 programını [52] hesap motoru olarak kullanmaktadır.

YCR3D programı EXCEL altında çalışmakta olup bilgi giriş sayfasına yapı sistemi ile ilgili karakteristik bilgilerin girilmesi ve başla komutunun verilmesi ile çalışmaya başlamaktadır. SAP2000 programı arka planda çalıştırılıp kapatılır ve sonuçlar optimizasyon programının okuyacağı formatta sonuç dosyasına otomatik olarak yazdırılmaktadır.

Programın genel akışı Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Akış diyagramından da görüldüğü gibi, sisteme ait karakteristik bilgiler (sistem geometrisi, çubuk enkesitleri ve yükleme bilgileri) ile plastikleşen kesitlere ait bilgiler giriş bilgisi olarak programa verilmektedir. Programın çalışmaya başlaması ile dış yükler ve birim plastik şekildeğiştirme parametreleri için hesap yapılarak kritik kesitlerdeki iç kuvvetler elde

edilmekte ve gözönüne alınan bütün akma düzlemlerine ait katsayılar kullanılarak akma koşulu kısıtlama denklemleri oluşturulmaktadır. Optimum boyutlandırma probleminin ek kısıtlamalarına ait denklemlerin de kısıtlama denklemlerine eklenmesiyle optimizasyon hesaplarında kullanılacak hesap tablosu elde edilmekte ve programın çalışması sona ermektedir.



Şekil 5.2 : YCR3D programının algoritması.

YCR3D programı ile ilgili bilgiler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

5.2.1 Giriş bilgileri

Programın bilgi giriş sayfasının örnek görünümü Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi, programın giriş bilgileri;

- Sistemi oluşturan çubukların numaraları ve geometrik bilgileri
- Sistemi oluşturan çubukların enkesit karakteristikleri
- Çubuk ve düğüm noktası yük bilgileri

şeklindedir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	YIELD CONDITIONS RESTRAINTS 3D PROGRAMI																								
2	Çubuk Sayısı: 8																								
3	Çubuk No	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	KESİT BİLGİLERİ		KESİT ADI		B	D	YÜKLEME BİLGİLERİ		KIRIS DUSEY YUKLERİ		DÜĞÜM NOKTASI DİŞYÜKLERİ							
4	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	KOLON	0.5000	0.5000	KIRIS	yük yeri	yük (kN)	D.No	X Yönü	Y Yönü	Düşey	Kes.No	Cubuk-I	Cubuk-J	L(m)				
5	2	0.00	8.00	0.00	0.00	8.00	5.00	KIRIS1	0.2000	0.4000	5	0.50	200.00	2	50.00	-50.00	-1000.00	1	2	4	8.00				
6	3	10.00	0.00	0.00	10.00	0.00	5.00	KIRIS2	0.3000	0.4500	6	0.50	200.00	4	50.00	-50.00	-1000.00	2	2	4	8.00				
7	4	10.00	8.00	0.00	10.00	8.00	5.00				7	0.50	100.00	6	50.00	-50.00	-1000.00	3	6	8	8.00				
8	5	0.00	0.00	5.00	10.00	0.00	5.00				8	0.50	100.00	8	50.00	-50.00	-1000.00	4	6	8	8.00				
9	6	0.00	8.00	5.00	10.00	8.00	5.00											5	5	6	5.00				
10	7	0.00	0.00	0.00	0.00	8.00	5.00											6	7	8	5.00				
11	8	10.00	0.00	5.00	10.00	8.00	5.00											7	1	2	5.00				
12																									
13																									
14																									
15																									
16																									
17																									
18																									
19																									
20																									
21																									
22																									
23																									
24																									
25																									
26																									
27																									

[illegible]

82

5.2.2 Dış yükler ve birim plastik şekil değiştirme parametreleri için hesap

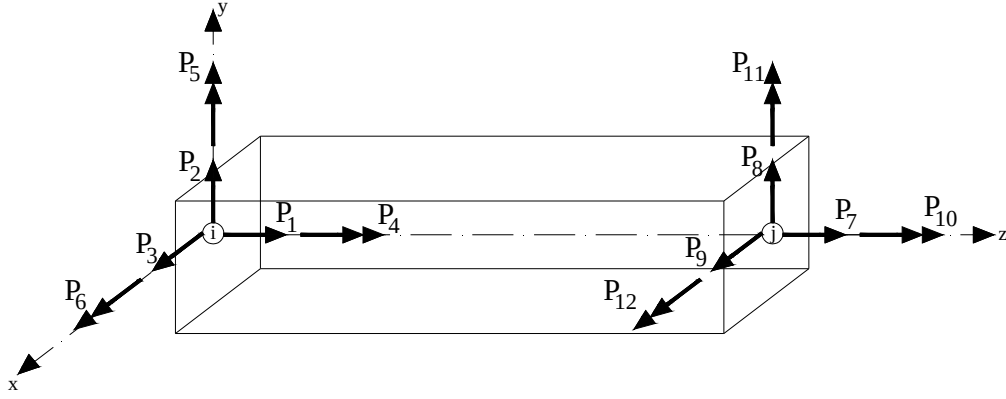
YCR3D bilgisayar programı, SAP2000 ile etkileşimli olarak çalışan bir API uygulaması olup hesap aşamaları ve hesap yöntemi aşağıda genel hatları ile açıklanmıştır. Sayısal uygulamalar bölümünde yer alan Uygulama 1B’de ise önerilen yöntem ile nasıl hesap yapıldığı detaylı olarak açıklanmıştır. Programa ait API kodları örnek olması amacıyla Ek B’de verilmiştir.

Önerilen yöntemde, Bölüm 2.3.2’de verilen süperpozisyon denklemleri kullanılarak akma koşulu kısıtlama denklemleri oluşturulmakta böylece akma koşulları sadece plastikleşen kesitlerdeki plastik şekil değiştirme parametreleri cinsinden denge denklemlerini de içerecek şekilde doğrudan ifade edilmektedir. Bu yöntem sayesinde, büyük yapı sistemlerinde hesap matrisinin boyutu küçültülmekte ve denge denklemlerinin indirgenmesi aşamasına gerek kalmamaktadır.

Bu amaçla, YCR3D programı SAP2000 programını hesap motoru olarak kullanmakta, yapı sisteminde dış yükler sıfıra eşitken birim plastik şekil değiştirme parametreleri için ve birim plastik şekil değiştirmeler sıfıra eşitken dış yükler için hesap yapılarak kritik kesitlerdeki iç kuvvetler elde edilmektedir.

API kodlama yöntemi yardımıyla SAP2000 programının çalıştırılması ve giriş bilgilerinin ilgili satır ve sütunlardan okunarak model geometrisinin oluşturulması için örnek kaynak kodu Ek B’de verilmiştir.

Model geometrisinin oluşturulmasından sonra, yükleme bilgilerinin okunması ve SAP2000 modeline otomatik olarak aktarılması aşamasına geçilir. Sisteme etkiyen dış yükler programa giriş bilgisi olarak verilmektedir. Dış yükler sıfıra eşitken birim plastik şekil değiştirme parametreleri için yapılan hesapta ise her bir plastik kesit için ayrı ayrı olmak üzere plastik şekil değiştirme parametrelerinin birim değerinden meydana gelen çubuk ankastrelik uç kuvvetleri dış yük olarak verilmektedir. Bu amaçla, Bölüm 2’de açıklanan ve aşağıda tekrar gösterilen (2.32), (2.33), (2.32a) ve (2.33a) denklemleri ile hesaplanan ankastrelik uç kuvvetleri ters yönlü olarak lokal eksenlerde düğüm noktası yükleri şeklinde sisteme verilmektedir. Şekil 5.5’de ankastrelik uç kuvvetlerinin pozitif yönleri gösterilmiştir.



Şekil 5.5 : Eksen takımına göre yüklerin pozitif yönleri.

YCR3D programı, kullanıcıyı SAP2000 programı ile karşı karşıya getirmeden bu programı arka planda çalıştırıp kapatmaktadır. Şekil 5.6’da herhangi bir kolondaki birim plastik şekildeğiştirmeye ait yükleme durumu gösterilmiştir. Sayısal uygulamalar bölümünde yer alan Uygulama 1B’de ise tüm bu işlemler yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi için ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

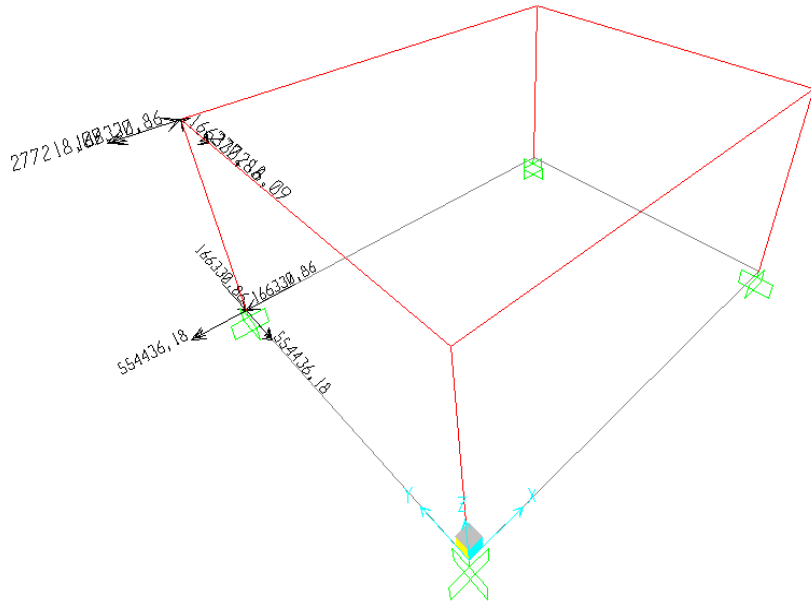
$$[P_{\Phi}]_i = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_3 \cdot (EF / L) \\ A_1 \cdot (12\alpha - 6) \cdot (EI_x / L^2) \\ -A_2 \cdot (12\alpha - 6) \cdot (EI_y / L^2) \\ 0 \\ A_2 \cdot (6\alpha - 4) \cdot (EI_y / L) \\ A_1 \cdot (6\alpha - 4) \cdot (EI_x / L) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$[P_{\Phi}]_j = \begin{bmatrix} P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3 \cdot (EF / L) \\ -A_1 \cdot (12\alpha - 6) \cdot (EI_x / L^2) \\ A_2 \cdot (12\alpha - 6) \cdot (EI_y / L^2) \\ 0 \\ A_2 \cdot (6\alpha - 2) \cdot (EI_y / L) \\ A_1 \cdot (6\alpha - 2) \cdot (EI_x / L) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

İkinci mertbe teorisine göre yapılan hesaplarda (2.32a) ve (2.33a) denklemleri ile verilen yükleme matrisleri kullanılmaktadır.

$$[P_{\Phi}]_i = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_3 \cdot (EF / L) \\ A_1 \cdot (2\alpha - 1) \cdot (b_{x1,1} + b_{x1,2} / L) \\ -A_2 \cdot (2\alpha - 1) \cdot (b_{y1,1} + b_{y1,2} / L) \\ 0 \\ A_2 \cdot [(\alpha - 1) \cdot b_{y1,1} + \alpha \cdot b_{y1,2}] \\ A_1 \cdot [(\alpha - 1) \cdot b_{x1,1} + \alpha \cdot b_{x1,2}] \end{bmatrix} \quad (2.32a)$$

$$[P_{\Phi}]_j = \begin{bmatrix} P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3 \cdot (EF / L) \\ -A_1 \cdot (2\alpha - 1) \cdot (b_{x1,1} + b_{x1,2} / L) \\ A_2 \cdot (2\alpha - 1) \cdot (b_{y1,1} + b_{y1,2} / L) \\ 0 \\ A_2 \cdot [\alpha \cdot b_{y1,1} + (\alpha - 1) \cdot b_{y1,2}] \\ A_1 \cdot [\alpha \cdot b_{x1,1} + (\alpha - 1) \cdot b_{x1,2}] \end{bmatrix} \quad (2.33a)$$



Şekil 5.6 : Birim plastik şekil değiştirme durumuna ait yükler.

Matrislerin elemanlarının hesaplanabilmesi için gerekli bilgiler (plastik kesitin çubuk üzerinde bulunduğu yer ve bu kesite ait akma düzlemi katsayıları), plastikleşen kesit

bilgileri bölümünde programa giriş bilgisi olarak verilmektedir. İkinci mertebe teorisine göre hesap için gerekli katsayılar ile yükleme matrisleri bu bilgiler girildikten sonra program tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır. Yükleme matrislerinin oluşturulması ve program tarafından okunup sisteme etkilmesine ait API kodları Ek B’de verilmiştir.

Yükleme ile ilgili değişkenlerin tanımlanmasından sonra her bir birim plastik şekil değiştirme parametresi için yukarıda anlatıldığı gibi hesaplanan yükler, matrisler halinde ilgili satır ve sütunlardan okutulmaktadır. Dış yükler ve sistemdeki plastik kesit sayısı kadar yükleme durumu oluşturulduktan sonra her bir yükleme durumu için ayrı ayrı yükleme matrislerinden okunan değerler, sisteme dış yük olarak verilmektedir.

5.2.3 Kısıtlama denklemlerinin oluşturulması

Yükleme bilgilerinin de verilmesinden sonra, sistem birim plastik şekil değiştirme parametreleri sıfıra eşitken dış yükler ve dış yükler sıfıra eşitken birim plastik şekil değiştirme parametreleri için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Hesap sonucunda dış yükler ve her bir plastik şekil değiştirme durumuna ait kritik kesitlerdeki iç kuvvetler farklı bir sayfaya Şekil 5.7’de gösterildiği gibi yazdırılır ve SAP2000 programı otomatik olarak kapatılır. Akma koşulu kısıtlamaları oluşturulmadan önce her plastik kesit için ayrı ayrı olmak üzere, plastik kesitin üzerinde bulunduğu çubuğun uçlarındaki ilgili uç kuvvetlere, ankastrelik uç kuvvetlerinin pozitif işaret kuralına göre eklenmesi veya çıkarılmasıyla ankastrelik uç kuvveti düzeltilmesi yapılır. Bu işlemin nasıl uygulanacağı Uygulama 1B’de ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. YCR3D programında bu işlem her bir plastik kesit için çubuk özelliklerine bağlı olarak ayrı bir sayfada hesaplatılan ankastrelik uç kuvvetlerinin, ilgili satırlara işaretleri de gözönüne alınarak eklenmesi veya çıkarılmasıyla otomatik olarak yapılmaktadır.

Ankastrelik uç kuvveti düzeltmelerinin yapılmasından sonra son aşama olan akma koşulu kısıtlama denklemleri oluşturularak optimizasyon hesaplarında kullanılan SIM programının okuyacağı formatta çıkış dosyası hazırlanması işlemine geçilir.

Sistemdeki bütün kritik kesitler için 24 adet akma düzlemine ait katsayılar kullanılarak dış yükler ve her bir plastik şekil değiştirme durumu için ayrı ayrı Şekil 5.9’da gösterildiği gibi otomatik olarak oluşturulan sütun matrisler, Bölüm 2.3.2’de yer alan süperpozisyon denklemleri yardımıyla birleştirilir.

L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
$\phi 2 = 1$				$\phi 3 = 1$				$\phi 4 = 1$				$\phi 5 = 1$	
A1MX	A2MY	A3N	[m] $\phi 2$	A1MX	A2MY	A3N	[m] $\phi 3$	A1MX	A2MY	A3N	[m] $\phi 4$	A1MX	A2MY
3838,36	0,00	0,00	3838,36	-322,27	0,00	-12,10	-334,37	25,26	0,00	0,00	25,26	-1022,81	0,00
3838,36	0,00	0,00	3838,36	-322,27	146,20	-11,47	-187,54	25,26	0,00	0,00	25,26	-1022,81	42131,97
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	146,20	-12,10	134,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42131,97
-3838,36	0,00	0,00	-3838,36	322,27	146,20	-11,47	457,00	-25,26	0,00	0,00	-25,26	1022,81	42131,97
-3838,36	0,00	0,00	-3838,36	322,27	0,00	-12,10	310,17	-25,26	0,00	0,00	-25,26	1022,81	0,00
-3838,36	0,00	0,00	-3838,36	322,27	-146,20	-11,47	164,61	-25,26	0,00	0,00	-25,26	1022,81	-42131,97
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-146,20	-12,10	-158,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-42131,97
3838,36	0,00	0,00	3838,36	-322,27	-146,20	-11,47	-479,94	25,26	0,00	0,00	25,26	-1022,81	-42131,97
-3838,36	0,00	0,00	-3838,36	322,27	0,00	-9,18	313,10	-25,26	0,00	0,00	-25,26	1022,81	0,00
-3838,36	0,00	0,00	-3838,36	322,27	-146,20	-6,56	169,51	-25,26	0,00	0,00	-25,26	1022,81	-42131,97
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-146,20	-9,18	-155,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-42131,97
3838,36	0,00	0,00	3838,36	-322,27	-146,20	-6,56	-475,03	25,26	0,00	0,00	25,26	-1022,81	-42131,97
3838,36	0,00	0,00	3838,36	-322,27	0,00	-9,18	-331,45	25,26	0,00	0,00	25,26	-1022,81	0,00
3838,36	0,00	0,00	3838,36	-322,27	146,20	-6,56	-182,64	25,26	0,00	0,00	25,26	-1022,81	42131,97
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	146,20	-9,18	137,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42131,97
-3838,36	0,00	0,00	-3838,36	322,27	146,20	-6,56	461,90	-25,26	0,00	0,00	-25,26	1022,81	42131,97
-3838,36	0,00	0,00	-3838,36	322,27	0,00	-18,27	304,00	-25,26	0,00	0,00	-25,26	1022,81	0,00
-3838,36	0,00	0,00	-3838,36	322,27	-146,20	-20,33	155,75	-25,26	0,00	0,00	-25,26	1022,81	-42131,97
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-146,20	-18,27	-164,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-42131,97
3838,36	0,00	0,00	3838,36	-322,27	-146,20	-20,33	-488,79	25,26	0,00	0,00	25,26	-1022,81	-42131,97
3838,36	0,00	0,00	3838,36	-322,27	0,00	-18,27	-340,54	25,26	0,00	0,00	25,26	-1022,81	0,00
3838,36	0,00	0,00	3838,36	-322,27	146,20	-20,33	-196,40	25,26	0,00	0,00	25,26	-1022,81	42131,97
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	146,20	-18,27	127,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42131,97

Şekil 5.9 : İç kuvvetlerin akma düzlemi katsayıları ile çarpılması ile elde edilen sütun matrisler.

Akma koşulu kısıtlama denklemlerinin tamamlanması için son olarak eğer varsa optimum boyutlandırma probleminin ek kısıtlamalarına ait denklemlerin de ek kısıtlama denklemlerine eklenmesi gerekir. Her bir ek kısıtlama için iki adet ek kısıtlama denklemi oluşturularak kısıtlama denklemlerine eklenir. Bu amaçla, ek kısıtlama yazılacak olan tasarım değişkenine ait sütuna, optimum boyutlandırma probleminin ek kısıtlamaları bölümünde tarif edildiği gibi “1.00” ve “-1.00” katsayılarını içeren iki adet satır ilave edilir. Bu satırlarda diğer sütunlara karşı gelen yerlere “0.00” yazılır. Kısıtlanacak büyüklüklere ait sınır değerler ise sabitler vektörüne ek kısıtlama denklemi sayısı kadar satır eklenerek yazılır. Sayısal uygulamalar bölümünde bu işlemin nasıl yapıldığı ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Ek kısıtlama denklemlerinin de eklenmesiyle akma koşulu kısıtlama denklemlerinin Şekil 5.10’da gösterildiği gibi optimizasyon programının okuyacağı formatta bir çıkış dosyası halinde yazdırılması ile programın çalışması sona ermektedir.

simdata - Not Defteri									
Dosya	Düzen	Biçim	Görünüm	Yardım					
-7014.75430	3838.35810	-334.37260	25.26210	-1225.37520	-1968.66610	-68443.4169			
-7127.76070	3838.35810	-187.54350	25.26210	40917.18360	1713.75770	3450.7268			
-780.95260	00	134.09460	00	41929.3970	3596.94560	69701.0963			
5632.23530	-3838.35810	436.98230	-25.26210	42962.79430	5488.62830	136169.4083			
5745.24170	-3838.35810	310.16920	-25.26210	820.23550	1806.20450	64275.2646			
5924.62790	-3838.35810	164.60570	-25.26210	-41301.13960	-1867.72450	-7400.9365			
-488.560	00	-158.2980	00	-42334.53680	-3759.40720	-73869.2485			
-6835.36810	3838.35810	-479.93620	25.26210	-43346.75020	-5642.59520	-140119.618			
5898.74490	-3838.35810	313.09580	-25.26210	869.2230	1825.84860	64779.2569			
6181.84940	-3838.35810	169.50960	-25.26210	-41219.05240	-1834.80750	-6556.4089			
-335.05680	00	-155.37150	00	-42285.54930	-3739.76320	-73365.2563			
-6578.14660	3838.35810	475.03220	25.26210	-43264.66310	-5609.67810	-139275.0904			
-6861.25110	3838.35810	-331.44610	25.26210	-1176.38770	-1949.02210	-67939.4246			
-6870.53920	3838.35810	-182.63960	25.26210	40999.27070	1746.67470	4295.2544			
-627.44940	00	137.02120	00	41978.38450	3616.58970	70205.0885			
5889.45680	-3838.35810	461.90220	-25.26210	43044.88140	5521.54540	137013.9359			
5421.64050	-3838.35810	303.99970	-25.26210	716.96460	1764.79270	63212.7944			
5459.96970	-3838.35810	155.74690	-25.26210	-41449.4260	-1927.18760	-8926.5347			
-812.16120	00	-164.46750	00	-42437.80770	-3800.8190	-74931.7187			
-7300.02630	3838.35810	-488.79490	25.26210	-43495.03670	-5702.05830	-141645.2162			
-7338.35550	3838.35810	-340.54210	25.26210	-1328.64610	-2010.07790	-69505.8871			
-7592.41890	3838.35810	-196.40230	25.26210	40768.89720	1654.29460	1925.1286			
-1104.55380	00	127.92510	00	41826.12610	3555.53380	68638.6261			
5167.57710	-3838.35810	448.13950	-25.26210	42814.50780	5429.16520	134643.8101			
-18955.95370	-7933.42120	-72.73340	-52.22110	-395.63250	428.48340	-13109.453			
-18875.54760	-7933.42120	-119.31680	-52.22110	-9238.8890	910.12990	-83167.6738			
-587.540	00	-59.31790	00	-9056.39830	396.16830	-72251.2683			
17766.84730	7933.42120	1.94650	52.22110	-8852.72380	-109.29860	-61116.9201			
17686.44120	7933.42120	48.530	52.22110	9.48730	-590.94510	8941.3007			
17672.41480	7933.42120	96.3790	52.22110	8854.9330	-1064.09680	79217.4641			
-681.97250	00	35.11450	00	8651.25850	-558.62990	68083.116			
-18969.98010	-7933.42120	-24.88440	-52.22110	8468.76780	-44.66830	57166.7104			
17839.94430	7933.42120	51.45650	52.22110	39.50020	-571.3010	9445.293			
17929.63630	7933.42120	101.28290	52.22110	8937.02010	-1031.17970	80061.9917			
-528.46940	00	38.04110	00	8700.2460	-538.98590	68587.1082			
-18712.75860	-7933.42120	-19.98040	-52.22110	8550.8550	-11.75120	58011.238			
-18802.45060	-7933.42120	-69.80680	-52.22110	-346.6650	448.12750	-12605.4607			
-18618.32610	-7933.42120	-114.41290	-52.22110	-9156.80180	943.0470	-82323.1462			
-434.03690	00	-56.39140	00	-9007.41080	415.81230	-71747.276			
18024.06880	7933.42120	6.85050	52.22110	-8770.63670	-76.38150	-60272.3925			
17362.83990	7933.42120	42.36050	52.22110	-112.75820	-632.35680	7878.8305			
17207.75660	7933.42120	87.52020	52.22110	8706.64660	-1123.55990	77691.8659			
-1005.57380	00	28.9450	00	8547.98760	-600.04170	67020.6458			
-19434.63830	-7933.42120	-33.74310	-52.22110	8320.48140	-104.13140	55641.1122			
-19279.5550	-7933.42120	-78.90290	-52.22110	-498.92340	387.07170	-14171.9232			
-19340.20580	-7933.42120	-128.17560	-52.22110	-9387.17540	850.66680	-84693.272			
-911.14130	00	-65.48740	00	-9159.66920	354.79650	-73313.7384			
17302.18910	7933.42120	-6.91230	52.22110	-9001.01020	-168.76170	-62642.5183			
14410.73070	3838.35810	386.2190	25.26210	1220.58150	1586.50070	95509.6517			
14523.73720	3838.35810	239.38990	25.26210	3507.78320	42333.83740	99893.5918			
780.95260	00	-134.09460	00	2296.76730	40629.21870	6373.3914			
-13028.21170	-3838.35810	-508.84470	-25.26210	1084.80080	38936.33850	-87344.5184			
-13141.21820	-3838.35810	-362.01560	-25.26210	-1202.40090	-1810.99820	-91728.4585			
-13320.60430	-3838.35810	-216.45210	-25.26210	-3490.55320	-42546.59650	-96310.108			

Şekil 5.10 : Optimizasyon programının okuyacağı formatta sonuç dosyası görünümü.

Optimizasyon hesapları için gerekli amaç fonksiyon katsayılarına ait yeni değerlerin her adımda KESIT programı yardımıyla nasıl hesaplandığı aşağıdaki bölümde açıklanmıştır.

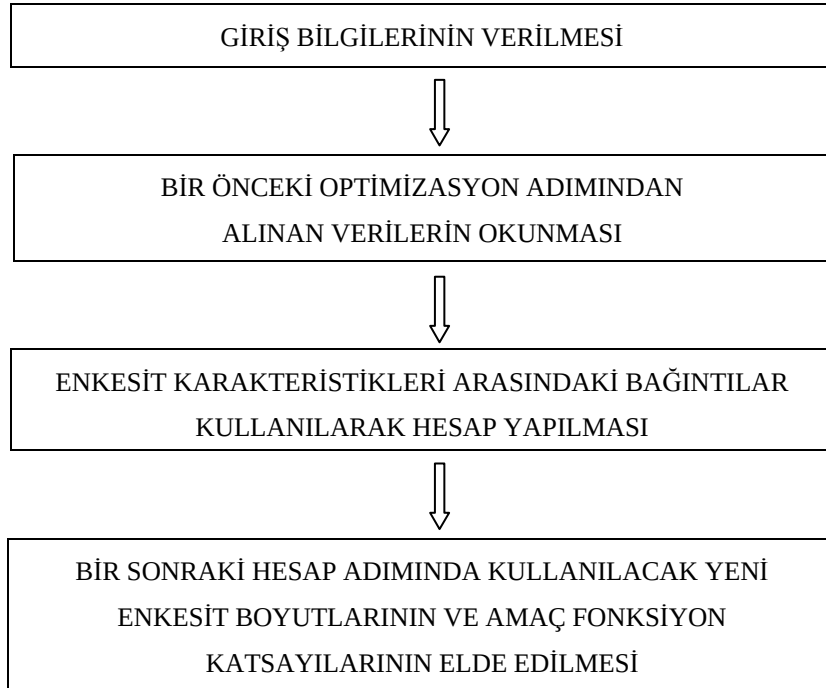
5.3 KESIT Programı

KESIT programı, optimizasyon hesapları sonucunda bulunan tasarım değişkenlerinin yeni değerleri için her adımda, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntıları kullanarak, bir sonraki hesap adımına esas olacak enkesit boyutları ile amaç fonksiyon katsayılarının yeni değerlerini hesaplamaktadır. Amaç fonksiyon katsayılarının yeni değerlerinin (b_i) hesaplanması için, bir adım önce hesaplanan akma düzlemlerinden ve enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılardan yararlanılmakta ve amaç fonksiyon bölümünde ayrıntılı olarak açıklanan türev bağıntıları ile amaç fonksiyon katsayıları yeniden hesaplanmaktadır.

Program Visual Basic programlama dili ile yazılmıştır. Bu programın uzay çerçeveler ile ilgili bölümünün oluşturulmasında [9]’da eğik eğilme ve normal kuvvet etkisindeki betonarme kesitlerin hesabı için geliştirilen ve [8]’de FORTRAN programlama dili ile kodlanan BEKE-2 isimli programdan faydalanılmıştır. Program BEKE-2011 ismiyle çalışmanın amacı doğrultusunda genişletilmiş ve KESIT

programı içerisine ilgili aşamada kullanılmak üzere bir alt program olarak yerleştirilmiştir.

KESIT programının genel akışı Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 : KESIT programının algoritması.

KESIT programı, amaç fonksiyon olarak hem enkesit yüksekliklerinin hem de donatı oranlarının seçilmesi durumlarının her ikisi için de ayrı ayrı çalışmakta ve yeni hesap adımına esas olacak enkesit boyutlarını ve/veya donatı oranlarını hesaplamaktadır.

Programın bilgi giriş ekranı görünümünün gösterildiği Şekil 5.12’den de görülebileceği gibi programın çalışmaya başlaması için gerekli giriş bilgileri;

- Sistemdeki çubuk sayısı
- Beton ve donatının karakteristik dayanımı
- Amaç fonksiyonun tipi (Enkesit yüksekliği / Donatı Oranı)
- Enkesit tiplerine ve optimizasyon sonucu bulunan tasarım değişkenlerine ait bilgileri içeren sonuç dosyası

PROGRAMIN KULLANIMI

BETONARME KESİT PROGRAMI

Sistemdeki toplam kolon-kiriş sayısını giriniz

Beton karakteristik dayanımını giriniz(MPa)

Donatı karakteristik dayanımını giriniz(MPa)

Amaç fonksiyon tipini giriniz (Yapı Ağırlığı:1, Donatı Optimizasyonu:2)

BAŞLA

KAPAT

Şekil 5.12 : KESIT programının bilgi giriş ekranı görünümü.

Program, “Başla” komutunun verilmesi ile çalışmakta ve Şekil 5.13’de örneği gösterilen veri dosyasından bir önceki adımın boyutlandırma aşamasında bulunan enkesit tiplerine ve tasarım değişkenlerine ait tipik bilgileri (çubuk numarası, kesit tipi, kesit plastik moment, kesite etkiyen normal kuvvet) okuyarak, bir sonraki hesap adımına ait enkesit boyutlarını ve/veya donatı oranlarını hesaplayarak sonuç dosyasına yazmakta ve programın çalışması sona ermektedir.

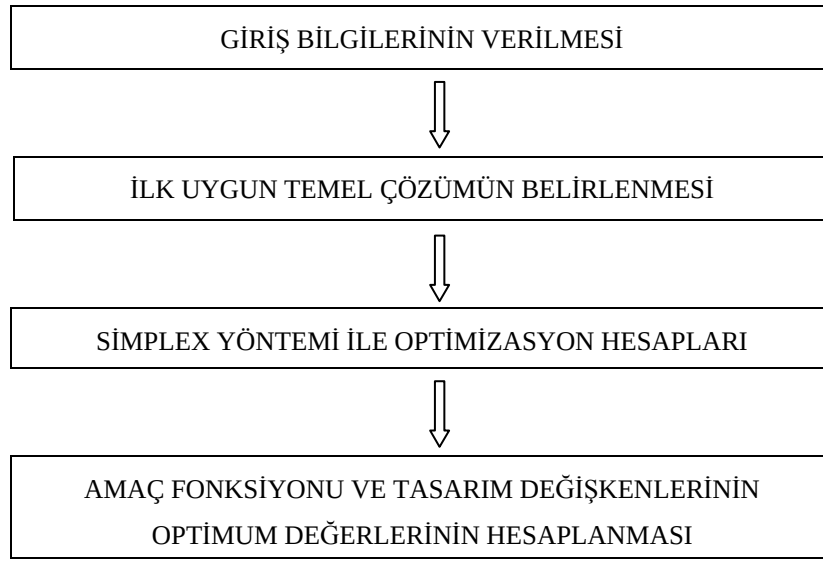
Dosya	Düzen	Birim	Görünüm	Yardım	
1	1	12.765	0.4797	0.4797	-7.50
2	16	219.36	0.2500	0.5000	0.00
3	11	181.64	0.3000	0.4500	0.00

Şekil 5.13 : KESIT programı için veri dosyası.

5.4 SIM Programı

SIM programı Fortran bilgisayar dili ile hazırlanmış bir programdır ve bu çalışmanın özelliklerine bağlı olarak yeniden düzenlenmiştir. Program Bölüm 3’te açıklanan yöntemle doğrusal programlama probleminin çözümünü yaparak, her adımda amaç fonksiyon ve tasarım değişkenlerinin optimum değerlerini vermektedir. Programın genel akışı Şekil 5.14’de gösterilmiştir.

Programın çalışması için gerekli akma koşulu kısıtlama denklemlerini içeren hesap tablosu YCR3D programı tarafından oluşturulmaktadır. Ayrıca, SIM programında kullanılan doğrusallaştırılmış amaç fonksiyona ait katsayıları içeren vektör ise KESIT programı tarafından oluşturulmaktadır. Optimizasyonun her adımında amaç fonksiyon, tasarım değişkenlerinden olan karakteristik plastik momentlere bağlı olarak hesaplanmaktadır. Tasarım değişkenlerinin ve buna bağlı olarak hesaplanan yapı ağırlığının değeri ardışık iki adımda birbirine yeter derecede yakın olduğunda hesaba son verilmektedir.



Şekil 5.14 : SIM programının algoritması.

Programın giriş bilgileri olarak,

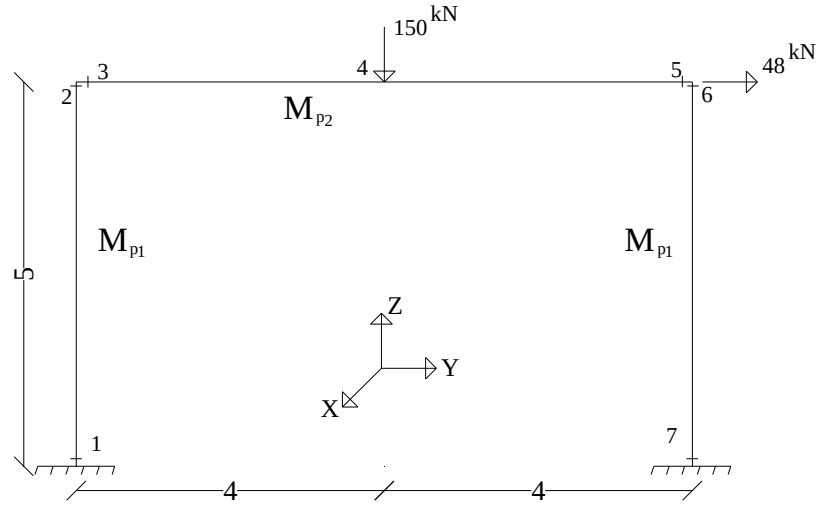
- Plastikleşen kesit sayısının
- Farklı özellikteki çubuk sayısının
- Kısıtlama denklemi sayısının
- Eğer varsa ek kısıtlama denklemi sayısının

verilmesi gerekmektedir.

Program, YCR3D ve KESIT programı tarafından oluşturulan, akma koşulu kısıtlamaları ile doğrusallaştırılmış amaç fonksiyona ait katsayıları içeren veri dosyasını kullanarak lineer programlama yöntemi ile hesap yapmakta ve amaç fonksiyon ile tasarım değişkenlerinin optimum değerlerini hesaplayarak ayrı bir çıkış dosyasına yazmaktadır.

6. SAYISAL UYGULAMALAR

6.1 Uygulama 1A : Tek Katlı Düzlem Çerçeve



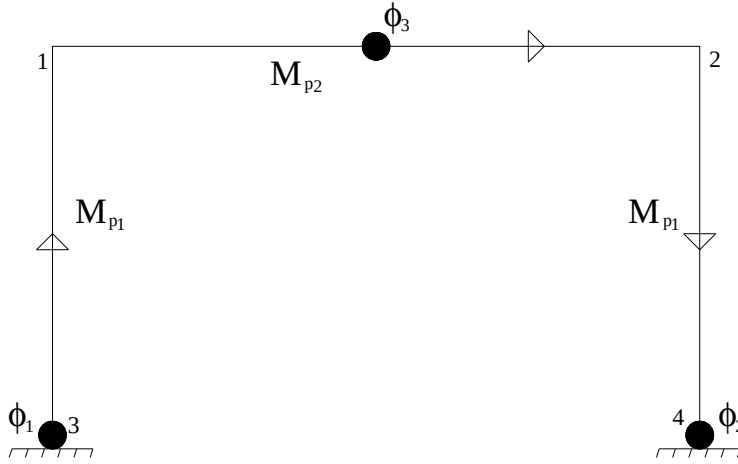
Şekil 6.1 : Sistem geometrisi,dış yükler ve kritik kesit numaraları.

Şekil 6.1’de geometrisi, dış yükleri ve kritik kesit numaraları gösterilen betonarme sistemin birinci merteye limit yüke göre optimum boyutlandırması yapılacaktır. Sonuçları karşılaştırmak amacı ile sistem geometrisi ve dış yükler [4]’ten alınmış, amaç fonksiyon olarak seçilen yapı ağırlığının hesabında da sonuçları karşılaştırmak amacıyla, kesit plastik momentleri ile çubuk ağırlıkları arasında doğrusal bir bağıntı olduğu kabul edilmiştir.

Sistemi oluşturan kolonlar için donatı oranı 0.01 olan kare kesitli ($d=b$) kolon, kiriş için ise yüksekliği genişliğinin iki katı ($d=2b$) ve donatı oranı 0.006 olan kesit öngörülmüştür.

Hesabın başlangıcında yapılan ön boyutlandırmaya göre kolonlar için 50/50, kiriş için ise 30/60 boyutları seçilmiştir. Bu kriterler göz önünde bulundurularak önerilen yöntemle betonarme çerçeve sisteminin optimum tasarımı yapılmış ve hedeflenen koşulları sağlayan en küçük enkesit boyutları bulunmuştur. Sistemdeki bütün

kuvvetlerin birimi kN , uzunlukların birimi ise m 'dir. Boyutlandırılacak sistemde normal kuvvetin akma koşuluna etkisi terk edilmiştir.



Şekil 6.2 : Seçilen plastik mafsalları ve düğüm noktası numaraları.

Hesabın başlangıcında plastik mafsalları dağılımı için Şekil 6.2'deki sistem öngörölmüş, dış yükler ve birim mafsalları dönmelerinin her biri için ayrı ayrı hesap yapılarak kritik kesitlerdeki eğilme momentleri elde edilmiştir. Başlangıç hesap çizelgesini oluşturan büyüklükler Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Başlangıç hesap çizelgesi.

X_i	X_1 $\overline{\Phi}_1$	X_2 $\overline{\Phi}_2$	X_3 $\overline{\Phi}_3$	X_4 $\overline{\Phi}_s$	X_5 M_{p1}	X_6 M_{p2}	Sabitler $[m_o]=[B]$
X_7	66020.3	39724.4	-7682.9	-98061.8	-1	0	-16.99
X_8	-66020.3	-39724.4	7682.9	98061.8	-1	0	16.99
X_9	5465.1	-20830.9	16127.7	-761.94	-1	0	-65.58
X_{10}	-5465.1	20830.9	-16127.7	761.94	-1	0	65.58
X_{11}	5465.1	-20830.9	16127.7	-761.94	0	-1	-65.58
X_{12}	-5465.1	20830.9	-16127.7	761.94	0	-1	65.58
X_{13}	-7682.9	-7682.9	16127.7	-761.93	0	-1	187.09
X_{14}	7682.9	7682.9	-16127.7	761.93	0	-1	-187.09
X_{15}	-20830.9	5465.1	16127.7	-761.94	0	-1	-160.25
X_{16}	20830.9	-5465.1	-16127.7	761.94	0	-1	160.25
X_{17}	-20830.9	5465.1	16127.7	-761.94	-1	0	-160.25
X_{18}	20830.9	-5465.1	-16127.7	761.94	-1	0	160.25
X_{19}	39724.4	66020.3	-7682.9	-98061.8	-1	0	128.35
X_{20}	-39724.4	-66020.3	7682.9	98061.8	-1	0	-128.35

Daha sonra yöntemin algoritmasına uygun olarak öncelikle ilk uygun temel çözüme ait hesap çizelgesi elde edilmiş, optimizasyon hesapları yapılarak ve 5 ardışık yaklaşım adımının sonunda optimum sonuca ulaşılmıştır. Optimum sonuç için, tasarım değişkenlerinin ve amaç fonksiyonun değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. Sonuçlardan da görülebileceği gibi aynı sistem geometrisi ve yükleme durumu için hesap yapıldığında taşıyıcı sistemin betonarme veya çelik olmasından ve başlangıçta seçilen ön boyutlardan bağımsız olarak optimum kesit plastik momentleri ile yapı ağırlığı, [4]’te bulunan sonuçlarla aynı olmaktadır.

Çizelge 6.2 : 1.uygulama için tasarım değişkenleri ve yapı ağırlığının optimum değerleri.

Tasarım Değişkeni	Değer
Φ_1	0.0024
Φ_2	-0.0012
Φ_3	0.0010
M_{p1}	120
M_{p2}	180
w	2640

Çizelge 6.2’de yer alan optimum kesit plastik momentleri için, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar kullanılarak hazırlanan KESIT programından yararlanılarak elde edilen taşıyıcı eleman boyutları Çizelge 6.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 : Kolon ve kirişlerin optimum boyutları.

Çubuk No	Taşıyıcı Eleman	Enkesit boyutları (m/m)
3-1	Kolon	0.3085/0.3085
1-2	Kiriş	0.2359/0.4718
2-4	Kolon	0.3085/0.3085

6.2 Uygulama 1B

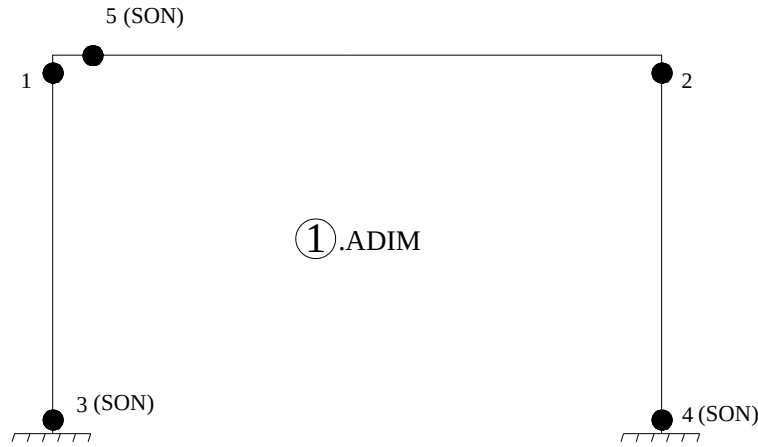
Uygulama1A’daki sistem, farklı amaç fonksiyonlar ve ek kısıtlamalar altında birinci mertbe limit yük için minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılacak ve sonuçlar yorumlanacaktır. Bu örnekte, plastik mafsallı dağılımı başlangıçta öngörülmemiş, birinci mertbe limit yüke göre hesap sonucunda elde edilen plastik kesit dağılımı esas alınarak sırasıyla, enkesit optimizasyonu, donatı optimizasyonu, farklı malzeme dayanımları için optimum boyutlandırma, plastik dönme ek kısıtlamaları için

optimum boyutlandırma, göreceli kat ötelemesi kısıtlamaları için optimum boyutlandırma yapılmıştır.

6.2.1 Enkesit optimizasyonu

Hesabın başlangıcında sistemi oluşturan kolonlar için 30/30, kiriş için 25/50 ön boyutları seçilmiştir. Malzeme dayanımı önce C30/S420 olarak alınmış, daha sonra farklı malzeme dayanımları alınarak da optimum boyutlandırma yapılmıştır.

Ön boyutlandırılan sistemin birinci mertebeli elastoplastik hesabı sonucunda elde edilen plastik kesit yerleri ve oluşum sırası Şekil 6.3’de gösterilmiştir.

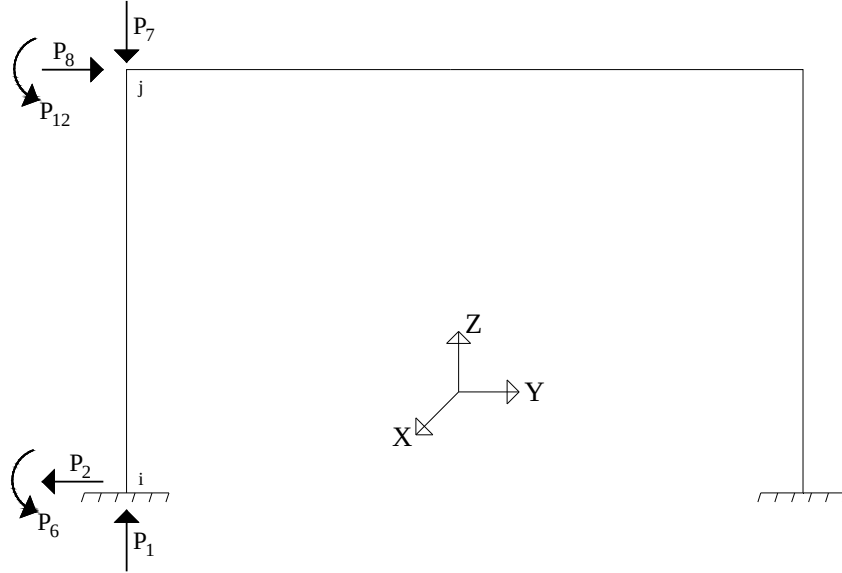


Şekil 6.3 : Ön boyutlandırılan sistemin analizi sonucunda elde edilen plastik kesit yerleri ve oluşum sırası.

Optimizasyon hesaplarında kullanılacak olan akma koşulu kısıtlaması denklemlerinin yazılabilmesi amacıyla, sistem öncelikle plastik kesitlerdeki şekil değiştirme parametreleri sıfıra eşitken dış yükler altında hesaplanmış, daha sonra dış yükler sıfıra eşitken sırasıyla plastik şekil değiştirme parametrelerinin birim değerinden kritik kesitlerde oluşan ve akma koşullarında göz önüne alınan iç kuvvet bileşenlerinin hesabı için söz konusu plastik şekil değiştirme parametrelerinin birim değerinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri sisteme dış yük olarak etki ettirilerek sistemin bu yükler altında hesabı yapılmış ve kritik kesitlerdeki eğilme momentleri ve normal kuvvetler elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar göz önüne alınan bütün akma düzlemlerine ait katsayılar ile çarpılarak süperpoze edilmiştir.

Bu örnekte yöntemi açıklamak amacıyla hesap aşamaları detaylı olarak verilmiştir. Örnek olması amacıyla, $\Phi_1 = 1$ birim plastik şekil değiştirme parametresi için sisteme

etkiyen ve Şekil 6.4’de gösterilen yüklerin hesabı ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Sisteme dış yük olarak etki ettirilecek ankastrelik uç kuvvetlerinin hesabında ikinci mertebe etkileri terk edilmiştir. Akma koşulunda normal kuvvet ve bir doğrultudaki eğilme etkisi dikkate alınmaktadır.



Şekil 6.4 : $\Phi_1 = 1$ birim plastik şekildeğiştirmesi için sisteme etkiyen yükler.

Şekil 6.4’de gösterilen yükler matris formda (6.1) ve (6.2) denklemleri ile ifade edilebilir.

$$[P]_i = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_3 \cdot (EF / L) \\ A_1 \cdot (12\alpha - 6) \cdot EI_x / L^2 \\ A_1 \cdot (6\alpha - 4) \cdot EI_x / L \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$[P]_j = \begin{bmatrix} P_7 \\ P_8 \\ P_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3 \cdot (EF / L) \\ -A_1 \cdot (12\alpha - 6) \cdot EI_x / L^2 \\ A_1 \cdot (6\alpha - 2) \cdot EI_x / L \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

(6.1) ve (6.2) denklemlerinde Φ_1 plastik kesitin üzerinde bulunduğu çubuğun karakteristik değerlerinin hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\alpha = 1, \quad L = 5 \text{ m},$$

$$EI_x = 3.2 \times 10^7 \times 0.30^4 / 12 = 21600 \text{ kNm}^2$$

$$EF = 3.2 \times 10^7 \times 0.30 \times 0.30 = 2880000 \text{ kN}$$

Sistemin hesabı sonucu bulunan bu plastik kesite ait akma düzlemi katsayıları ise,

$$A_1 = 1, A_2 = 0, A_3 = -0.074$$

şeklindedir.

Yukarıda sayısal değerleri verilen ifadeler uç kuvveti bağıntılarında yerlerine konarak hesaplanan ankastrelik uç kuvvetleri vektörleri aşağıda verilmiştir.

$$[P]_i = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 42624 \text{ kN} \\ 5184 \text{ kN} \\ 8640 \text{ kNm} \end{bmatrix} \quad [P]_j = \begin{bmatrix} P_7 \\ P_8 \\ P_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -42624 \text{ kN} \\ -5184 \text{ kN} \\ 17280 \text{ kNm} \end{bmatrix}$$

Ankastrelik uç kuvvetleri, hesaplarda kullanılan YCR3D programı içinde çalışan SAP2000 programına dışarıdan yük vektörü olarak verilemediği için, düğüm noktası yükü şeklinde verilmektedir. Bu nedenle, sistemin bütün kritik kesitlerinde, yukarıda açıklanan yükler altında hesap yapılarak iç kuvvetler elde edildikten sonra, sadece Φ_1 plastik kesitinin üzerinde bulunduğu çubuğun uçlarındaki ilgili uç kuvvetlerine, ankastrelik uç kuvvetlerinin pozitif işaret kuralına göre eklenmesi veya çıkarılmasıyla ankastrelik uç kuvveti düzeltilmesi yapılmaktadır. Sayısal uygulamalar için geliştirilen YCR3D bilgisayar programı ile otomatik olarak yapılabilen bu işlem, örnek olması amacıyla, $\Phi_1 = 1$ durumu için aşağıda açıklanmıştır. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da ise moment diyagramının yapılan uç kuvveti düzeltmesinden önceki ve sonraki durumu gösterilmiştir.

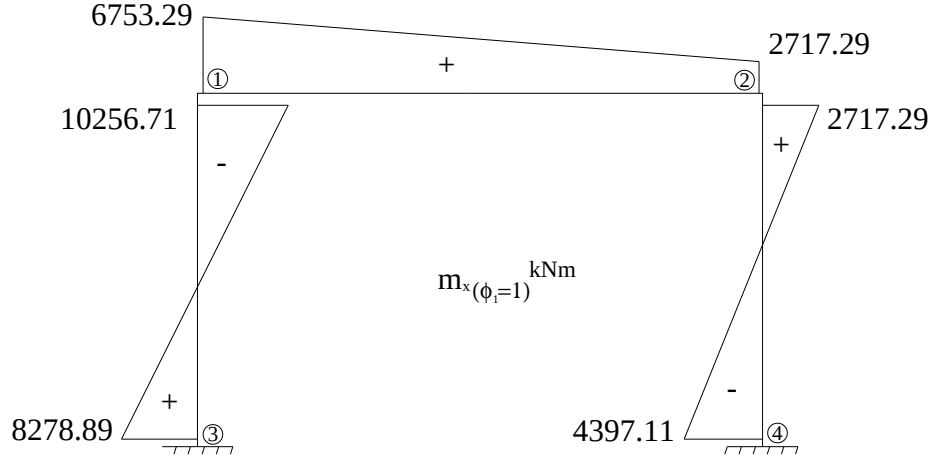
3-1 kolonunun solundaki 3 numaralı düğüm noktası için,

$$(m_x)_{i(\Phi_j=1)} = 8278.89 - 8640 = -361.11 \text{ kNm}$$

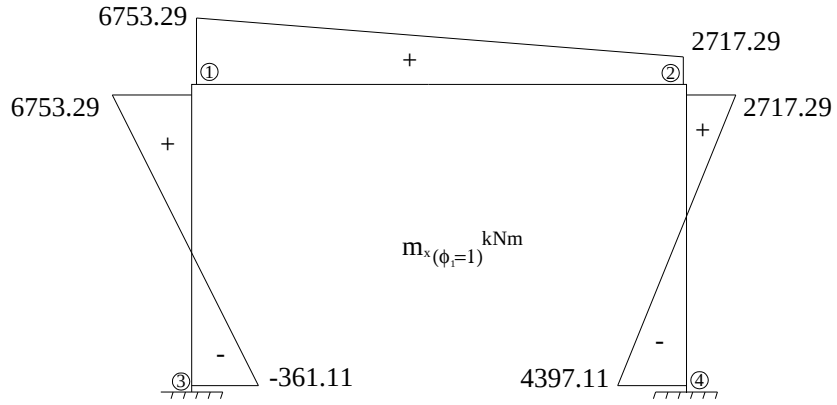
3-1 kolonunun sağındaki 1 numaralı düğüm noktası için,

$$(m_x)_{j(\Phi_j=1)} = -10526.71 + 17280 = 6753.29 \text{ kNm}$$

eşitlikleri geçerlidir.



Şekil 6.5 : $\Phi_1 = 1$ birim plastik şekildeğiştirmesi için moment diyagramı.



Şekil 6.6 : $\Phi_1 = 1$ birim plastik şekildeğiştirmesi için düzeltilmiş moment diyagramı.

Yukarıda $\Phi_1 = 1$ birim plastik dönmesi için açıklanan yol, sistemdeki diğer birim plastik dönmeler için de benzer şekilde tekrarlanmaktadır. Ayrıca, sistemdeki bütün plastik dönmeler sıfıra eşitken dış yükler altında da hesap yapılarak bu duruma ait iç kuvvetler de bulunur. Bu aşamadan sonra Bölüm 2.3.1’de açıklanan akma düzlemlerine ait katsayılar ve süperpozisyon denklemleri yardımıyla, elde edilen iç kuvvetlerin akma düzlemi katsayıları ile çarpılarak süperpoze edilmesiyle akma koşulu kısıtlama denklemleri oluşturulmaktadır.

Optimum boyutlandırılacak sistem bir düzlem çerçeve olduğundan, normal kuvvet ve bir doğrultuda eğilmeye ait akma düzlemleri kullanılmakta, bu durumda akma düzlemi sayısı 6’ya inmektedir.

Örnek olması amacıyla, soldaki kolonun altında yer alan ve Şekil 6.1’de gösterilen 1 numaralı kritik kesit için, $\Phi_1 = 1$ birim plastik dönmesine ait durumda bu işlem ayrıntılı olarak aşağıda açıklanmıştır.

1 numaralı kritik kesitte $\Phi_1 = 1$ birim plastik dönmeden meydana gelen iç kuvvetler aşağıdaki gibidir.

$$(n)_{1(\Phi_1=1)} = 504.50 \text{ kN}$$

$$(m_x)_{1(\Phi_1=1)} = -361.11 \text{ kNm}$$

1 numaralı kritik kesitte 6 adet akma düzlemine ait akma düzlemi katsayıları kullanılarak, optimizasyon aşamasındaki kısıtlama denklemlerinin oluşturduğu hesap çizelgesinin $\Phi_1 = 1$ sütununun ilk 6 satırına ait bileşenlerin (Çizelge 6.4) hesabı aşağıda detaylı olarak açıklanmış, 6 adet akma düzlemine ait, akma düzlemi katsayıları ise Çizelge 6.5’de verilmiştir.

Çizelge 6.4 : Hesap çizelgesinin $\Phi_1 = 1$ sütununun ilk 6 satırına ait bileşenler.

Satır No	$\Phi_1 = 1$
1	a_{11}
2	a_{21}
3	a_{31}
4	a_{41}
5	a_{51}
6	a_{61}

Çizelge 6.5 : Akma düzlemi katsayıları.

Satır No	A_1	A_3
1	1	-0.086
2	-1	-0.086
3	-1	-0.074
4	1	-0.074
5	-1	-0.141
6	1	-0.141

Çizelge 6.4’de gösterilen $a_{11}, \dots, a_{61}$ katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$a_{11} = 1x(-361.11) - 0.086x(504.50) = -404.50$$

$$a_{21} = -1x(-361.11) - 0.086x(504.50) = 317.52$$

$$a_{31} = -1x(-361.11) - 0.074x(504.50) = 323.78$$

$$a_{41} = 1x(-361.11) - 0.074x(504.50) = -398.44$$

$$a_{51} = -1x(-361.11) - 0.141x(504.50) = 289.98$$

$$a_{61} = 1x(-361.11) - 0.141x(504.50) = -432.24$$

Benzer şekilde, diğer birim plastik dönme durumları ve dış yükler için bütün kritik kesitlerde aynı işlemler yapılarak, Çizelge 6.1’de örneği gösterilen başlangıç hesap çizelgesi oluşturulup, Bölüm 3’te detaylı olarak açıklanan Simplex yöntemi yardımıyla optimizasyon hesapları yapılmış ve ilk adım sonucunda tasarım değişkenlerinin aşağıdaki değerleri elde edilmiştir.

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.954 \times 10^{-6} \\ 0.163 \times 10^{-5} \\ 0.140 \times 10^{-1} \\ -0.777 \times 10^{-4} \\ 0.945 \times 10^{-6} \end{bmatrix}, [M_{xp}] = \begin{bmatrix} M_{xp1} \\ M_{xp2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 145.35 \\ 138.92 \end{bmatrix}$$

Optimizasyonun ilk adımı sonucunda elde edilen taşıyıcı sistem enkesit boyutları ve yapı ağırlığının değerleri ise Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6 : Optimizasyonun ilk adımı sonucunda elde edilen taşıyıcı sistem enkesit boyutları ve yapı ağırlığı.

Çubuk No	Taşıyıcı Eleman	Enkesit boyutları (m/m)	Yapı Ağırlığı (kN)
3-1,2-4	Kolon	0.4079/0.4079	60.31
1-2	Kiriş	0.2163/0.4326	

Yeni enkesit boyutları için benzer şekilde hesaplar tekrarlanmış, optimum sonuca ait eleman boyutları ve limit yük parametreleri sırasıyla Çizelge 6.7 ve Çizelge 6.8’de verilmiştir.

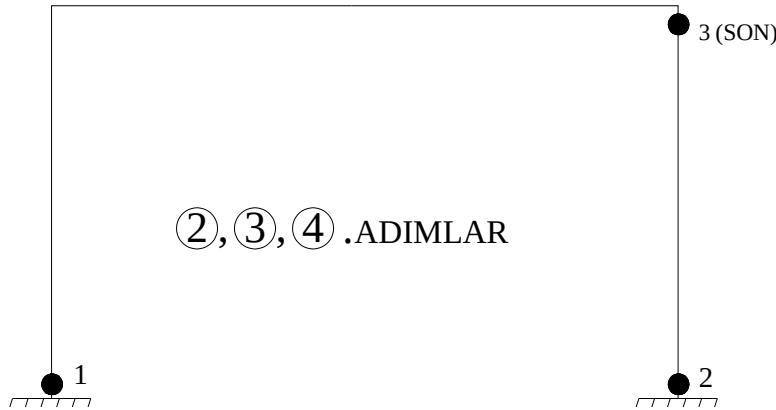
Ardışık yaklaşım adımlarının 2.,3. ve 4. adımlarına ait plastik kesit yerleri ve sırası ise Şekil 6.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.7 : Enkesit optimizasyonu ardışık yaklaşım adımlarında elde edilen sonuçlar.

Adım	Kolon (m/m)	Kiriş (m/m)	Yapı Ağırlığı (kN)	
			$\gamma_b \cdot \sum L_i \cdot F_i$	$\sum L_k \cdot b_k \cdot m_{pk}$
1	0.4079/0.4079	0.2163/0.4326	60.31	2564.82
2	0.4009/0.4009	0.2444/0.4888	64.07	2980.96
3	0.3919/0.3919	0.2519/0.5038	63.78	3031.41
4	0.3919/0.3919	0.2519/0.5038	63.78	3031.41

Çizelge 6.8 : Enkesit optimizasyonu ardışık yaklaşım adımlarına ait yatay yük parametreleri.

Adım	Yatay yük parametresi
Ön boyutlandırma	0.467
1	1.124
2	1.066
3	1.000
4	1.000



Şekil 6.7 : Ardışık yaklaşımın 2,3,4. adımlarına ait plastik kesit yerleri ve oluşum sırası.

Çizelge 6.7’de yapı ağırlığı için iki alternatif sütun yer almıştır. Bunlardan ilkinde yapı ağırlığı enkesit alanı cinsinden $\gamma_b = 25 \text{ kN/m}^3$ alınarak hesaplanmıştır. En sağdaki sütunda ise [4]’teki gibi hesaplanan amaç fonksiyonun hesabın sonundaki değeri verilmiştir. Sistemin yapı ağırlığı, Uygulama1A’da hesaplanan ve enkesit boyutları Çizelge 6.3’de verilen sistemin 46.05 kN olan yapı ağırlığından %38.5 oranında daha fazla bulunmuştur. Bunun sebepleri sırasıyla,

- Uygulama1A'daki sistemin birinci mertebe limit yük parametresi 0.471'e eşitken, Uygulama1B'de sistemin birinci mertebe limit yük parametresi 1'e eşit olacak şekilde boyutlandırılması,
- Uygulama1A'da sistem sadece basit eğilme etkisi altında hesaplanırken, Uygulama1B'de ise akma koşulu kısıtlama denklemlerinin oluşturulmasında eğilme momenti ile birlikte normal kuvvetin etkisinin de dikkate alınması,

olarak sayılabilir.

6.2.2 Donatı optimizasyonu

Uygulama1B'ye ait enkesit optimizasyonu hesaplarında elde edilen optimum enkesit boyutları, seçilen donatı oranları için geçerli olup, donatı oranları değiştirilerek optimum boyutlandırma hesapları tekrarlanabilir. Bu örnekte, ülkemizde geçerli olan yönetmeliklerde verilen minimum enkesit koşullarını sağlayan sabit enkesit boyutları seçilerek donatı oranı optimizasyonu da yapılmıştır.

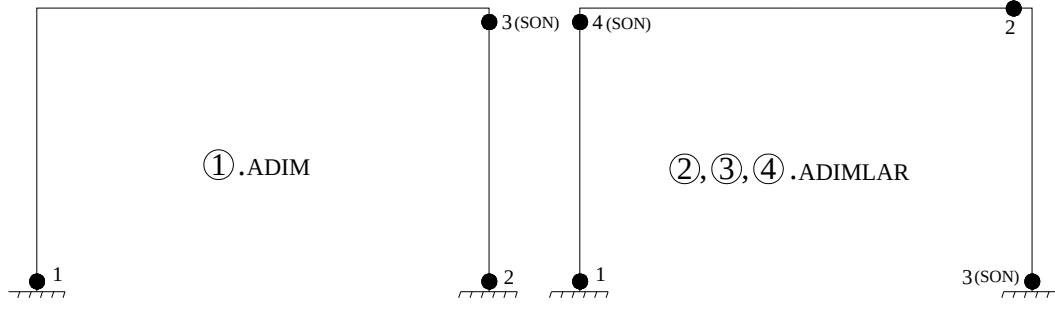
Sistemin kolonları için sabit enkesit boyutu olarak, TDY-2007'ye göre, minimum kolon enkesit alanı koşulu göz önünde bulundurularak 30/30 boyutları ile $d=b$ olan kare enkesitli kolon, kiriş için ise yine TDY-2007'ye göre minimum kiriş genişliği olan 25 cm genişlik için $d=1.5b$ olan enkesit seçilmiştir. Hesabın başlangıcında ön boyutlandırma olarak donatı oranları kolonlar için 0.01, kiriş için ise 0.006 olarak öngörülmüştür.

Yukarıda açıklanan şekilde ön boyutlandırılan sistem için yapılan donatı oranı optimizasyonu sonuçları ara adımları da içerecek şekilde Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.9 : Donatı oranı optimizasyonuna ait ardışık yaklaşım adımlarında elde edilen sonuçlar ve yük parametreleri.

Adım	Kolon (ρ)	Kiriş (ρ)	Yatay yük parametresi
Ön boyutlandırma	0.0100	0.006	0.321
1	0.02478	0.01628	0.873
2	0.02621	0.01628	0.990
3	0.02634	0.01628	1.000
4	0.02635	0.01628	1.000

Donatı optimizasyonu ardışık yaklaşım adımlarına ait plastik kesit yerleri ve oluşum sırası ise Şekil 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.8 : Donatı optimizasyonu ardışık yaklaşım adımlarına ait plastik kesit yerleri ve oluşum sırası.

Seçilen sabit enkesit boyutları için donatı oranı optimizasyonu yapılan sistem için, karşılaştırma yapabilmek amacıyla [4]'te olduğu gibi kesit plastik momentleri ile çubuk ağırlıkları arasında doğrusal bir bağıntı olduğu kabul edilerek hesaplanan amaç fonksiyon değeri 2879.02 kN olmakta, enkesit optimizasyonu yapılan sistem ile karşılaştırıldığında %5.03 daha küçük çıkmaktadır. Böylece, enkesit optimizasyonu yapılan sistem ile aynı yatay yük taşıma kapasitesine ancak daha küçük amaç fonksiyon değerine sahip bir sistem boyutlandırılmış olmaktadır.

Daha gerçekçi olan yapı ağırlığına bağlı olarak karşılaştırma yapmak amacıyla, beton enkesitin ve donatının ağırlıkları ayrı ayrı göz önüne alınarak da yapı ağırlığı hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak aşağıda açıklanmıştır.

Brüt enkesit alanı F , donatı alanı A_{op} olmak üzere, brüt enkesit alanından toplam donatı alanı çıkarılarak hesaplanan net beton alanı için, birim hacim ağırlığı 24 kN/m^3 alınarak hesaplanan ağırlık, beton çeliğinin birim hacim ağırlığının 78.5 kN/m^3 olduğu göz önünde tutularak hesaplanan donatı ağırlığı ile toplanarak birim kesit ağırlığı ve toplam kesit uzunlukları ile çarpılarak toplam yapı ağırlığı hesaplanabilir.

Çizelge 6.10'da optimizasyon hesapları sonucunda bulunan enkesit boyutları, donatı oranları ve kolon ile kirişlere ait brüt enkesit alanları verilmiştir.

Çizelge 6.10 : Optimizasyon hesapları sonucunda bulunan kesit özellikleri.

Boyutlandırma Kriteri	Kolon (b/d)	Kiriş (b/d)	Kolon (ρ)	Kiriş (ρ)	F (m^2) Kolon	F (m^2) Kiriş
Enkesit optimizasyonu	0.3919/ 0.3919	0.2519/ 0.5038	0.0100	0.006	0.1536	0.1269
Donatı optimizasyonu	0.3000/ 0.3000	0.2500/ 0.3750	0.02635	0.01628	0.0900	0.0938

Donatı oranları kullanılarak hesaplanan donatı alanları ise Çizelge 6.11’de verilmiştir.

Çizelge 6.11 : Kesit donatı alanları.

Boyutlandırma Kriteri	Kolon (m ²) Donatı Alanı	Kiriş (m ²) Donatı Alanı
Enkesit optimizasyonu	0.001536	0.000761
Donatı optimizasyonu	0.002372	0.001526

Çizelge 6.12’de sistemdeki toplam kolon uzunluğunun 10 m, kiriş uzunluğunun ise 8 m olduğu göz önünde bulundurularak, net beton ağırlıkları ayrıca hesaplanmış ve verilmiştir.

Çizelge 6.12 : Net beton ağırlıkları.

Boyutlandırma Kriteri	Kolon kesitleri net beton alanı (m ²)	Kiriş kesitleri net beton alanı (m ²)	Kolon kesitleri net beton ağırlığı (kN)	Kiriş kesitleri net beton ağırlığı (kN)
Enkesit optimizasyonu	0.15206	0.12614	36.49	24.22
Donatı optimizasyonu	0.08763	0.09227	21.03	17.72

Çizelge 6.13’de ise beton çeliği birim hacim ağırlığının 78.5 kN/m³ olduğu göz önünde tutularak hesaplanan kolon ve kiriş enkesitlerine ait donatı ağırlıkları gösterilmiştir.

Çizelge 6.13 : Donatı ağırlıkları.

Boyutlandırma Kriteri	Kolon donatı ağırlığı (kN)	Kiriş donatı ağırlığı (kN)
Enkesit optimizasyonu	1.206	0.478
Donatı optimizasyonu	1.862	0.958

Yukarıdaki çizelgelerde verilen değerler kullanılarak hesaplanan toplam yapı ağırlıkları, enkesit optimizasyonu yapılan sistem için,

$$36.49 + 24.22 + 1.206 + 0.478 = 62.39 \text{ kN}$$

donatı optimizasyonu yapılan sistem için ise,

$$21.03 + 17.72 + 1.862 + 0.958 = 41.57 \text{ kN}$$

şeklindedir.

Sonuçlardan görüldüğü gibi, aynı yatay yük taşıma kapasitesine sahip olacak şekilde boyutlandırılan iki farklı sistemden, enkesit boyutları sabit tutularak, donatı oranları optimize edilen sistemin yapı ağırlığı %33.4 oranında daha az olmaktadır.

6.2.3 Farklı malzeme dayanımlarının optimum boyutlandırmaya etkisi

Bu uygulama için örnek olması amacıyla farklı beton ve donatı sınıflarının optimum boyutlandırmaya etkileri incelenmiş, bu amaçla sistemde beton ve donatıya ait C30/S420 malzeme dayanımlarının yanısıra, C30/S220, C20/S420 ve C20/S220 malzeme dayanımları için de enkesit optimizasyonları yapılmıştır.

Farklı malzeme dayanımları için optimum hesap sonucu elde edilen yapı ağırlıkları Çizelge 6.14’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 6.14 : Enkesit optimizasyonuna farklı malzeme dayanımlarının etkisi.

Malzeme sınıfı		Optimum Boyutlar	
Beton/Donatı	Kolon (m/m)	Kiriş (m/m)	Yapı Ağırlığı (kN)
C30/S420	0.3919/0.3919	0.2519/0.5038	62.39
C30/S220	0.4746/0.4746	0.3312/0.6624	97.98
C20/S420	0.4239/0.4239	0.3035/0.6070	79.96
C20/S220	0.4952/0.4952	0.3834/0.7668	117.41

Sonuçlardan görülebileceği gibi, beton sınıfının değişmeyip, donatı karakteristik dayanımının azalması yapı ağırlığında % 57.04 oranında artışa neden olurken, donatı sınıfının aynı kalıp beton dayanımının azalması durumunda yapı ağırlığında % 28.16 oranında artış olmaktadır. Bu sonuçlardan donatı sınıfının optimum boyutlandırmaya etkisinin beton sınıfına göre daha önemli olduğu görülmektedir. Hem donatı hem de beton dayanımının beraber azalması ise yapı ağırlığını % 88.19 oranında arttırmaktadır.

6.2.4 Ek kısıtlamaların optimum boyutlandırmaya etkisi

Bölüm 2.6’de açıklandığı gibi, yapı sistemini oluşturan taşıyıcı sistem elemanları ile ilgili yapısal kısıtlamaların yanı sıra tasarım değişkenleri olan plastik kesit dönmeleri ve görelî kat ötelemeleri ile ilgili sınır değerler göz önünde bulundurularak ek kısıtlamalar da yazılabilmektedir. Tasarım değişkenleri olan plastik kesit dönmeleri ve görelî kat ötelemeleri için yazılan ek kısıtlamaların sonuca etkilerini görmek amacıyla bu iki durum için ayrı ayrı sınır değerler göz önüne alınarak ek kısıtlama denklemlerinin nasıl oluşturulduğu ve ek kısıtlamalı optimum boyutlandırma hesaplarında elde edilen sonuçlar aşağıdaki bölümde verilmiştir.

6.2.4.1 Plastik kesit dönmeleri için ek kısıtlamalar

Optimum boyutlandırma hesaplarının tasarım değişkenlerinden olan plastik kesit dönmeleri için öngörülen sınır değerler ile ,

$$\overline{\Phi}_i - \Phi_u - \Phi_{\lim} \leq 0 \quad (2.68b)$$

$$-\overline{\Phi}_i + \Phi_u - \Phi_{\lim} \leq 0 \quad (2.68c)$$

sınırlama denklemleri kullanılarak her bir plastik kesit dönmesi için iki ayrı ek kısıtlama denklemi yazılabilir. Uygulama1B için enkesit optimizasyonu yapılan sistemde tasarım değişkenleri olan plastik kesit dönmelerinin değerleri,

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00193 \\ 0.0033 \end{bmatrix}$$

olarak elde edilmiştir. Örneğin, $\Phi_{\lim} = 0.0010$ değeri sınır değer olarak göz önüne alınırsa, kısıtlama denklemlerine Çizelge 6.15’de verilen 4 adet ek kısıtlama denklemi yazılabilir.

Çizelge 6.15 : Plastik dönme ek kısıtlaması için ek kısıtlama denklemleri.

Ek denklem	$\Phi_1 = 1$	$\Phi_2 = 1$
1	1.00	0.00
2	-1.00	0.00
3	0.00	1.00
4	0.00	-1.00

Kısıtlanacak büyüklüklere ait sınır değerler ise, Çizelge 6.16’da verildiği gibi sabitler vektörüne ek kısıtlama denklemi sayısı kadar satır eklenerek göz önüne alınır.

Çizelge 6.16 : Plastik dönme sınır değerlerine ait ek kısıtlamalar.

Ek denklem	Denklemin sabiti
1	-0.0010
2	-0.0010
3	-0.0010
4	-0.0010

Φ_{lim} değeri yukarıda açıklanan eşitsizliğin sol tarafına alınırken işareti değiştiği için negatif işaretli olarak yazılmıştır. Plastik moment grupları ile ilgili bilgileri içeren $[u]$ matrisine de ek kısıtlama denklemi sayısı kadar sıfır satırı ilave edilerek optimizasyon hesapları yapılmış ve yapılan optimum boyutlandırma sonucunda plastik kesit dönmelerindeki istemler, verilen sınır değerlerden büyük olduğu için, sınır değerler ile kısıtlanmış ve aşağıdaki değerler elde edilmiştir.

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.001 \\ 0.001 \end{bmatrix}$$

Bu uygulama için plastik şekildeğiştirme istemleri rastgele seçilen sınır değerler ile sınırlandırıldığından, yapı ağırlığı % 7.49 oranında artarak 68.56 kN olmuştur. 2. ve 3. uygulamalarda, yönetmeliklerde öngörülen farklı performans seviyelerine ait sınır değerler için ek kısıtlamalar göz önüne alınmış ve yapı ağırlığı üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

6.2.4.2 Göreli kat ötelemeleri için ek kısıtlamalar

Optimum boyutlandırma yönteminin ardışık yaklaşım adımlarında plastik kesit dönmeleri aynı zamanda tasarım değişkenleri olduğundan yukarıda açıklandığı gibi bu değerler için ek kısıtlamalar doğrudan göz önüne alınabilmektedir. Sistemdeki yatay yerdeğiştirmelere bağlı olarak hesaplanan göreli kat ötelemeleri için de aşağıda açıklanan yol izlenerek sistematik biçimde ek kısıtlama denklemleri yazılabilir.

Yapı sisteminde, dış yükler ve birim plastik dönmelerinin her biri için hesap yapıldığından, söz konusu yükleme durumlarında sınırlandırılması istenen yerdeğiştirmeler de iç kuvvetlere benzer şekilde süperpozisyon ile elde edilmektedir.

Daha sonra, görelî kat ötelemeleri yerdeğıştirmeler cinsinden yazılarak bunlara ait ek kısıtlama denklemleri oluşturulabilir.

Bu uygulamada sistemin tepe noktası olan 2 numaralı düğüm noktasına ait δ_2 görelî kat ötelemesine sınır değeri verilerek ek kısıtlama denklemleri yazılacak ve yöntem açıklanmaya çalışılacaktır.

Görelî kat ötelemeleri için öngörülen sınır değeri için,

$$(\delta_{2i}) + (\delta_{20}) - (\delta)_{\lim} \leq 0 \quad (6.3)$$

$$-(\delta_{2i}) - (\delta_{20}) - (\delta)_{\lim} \leq 0 \quad (6.3a)$$

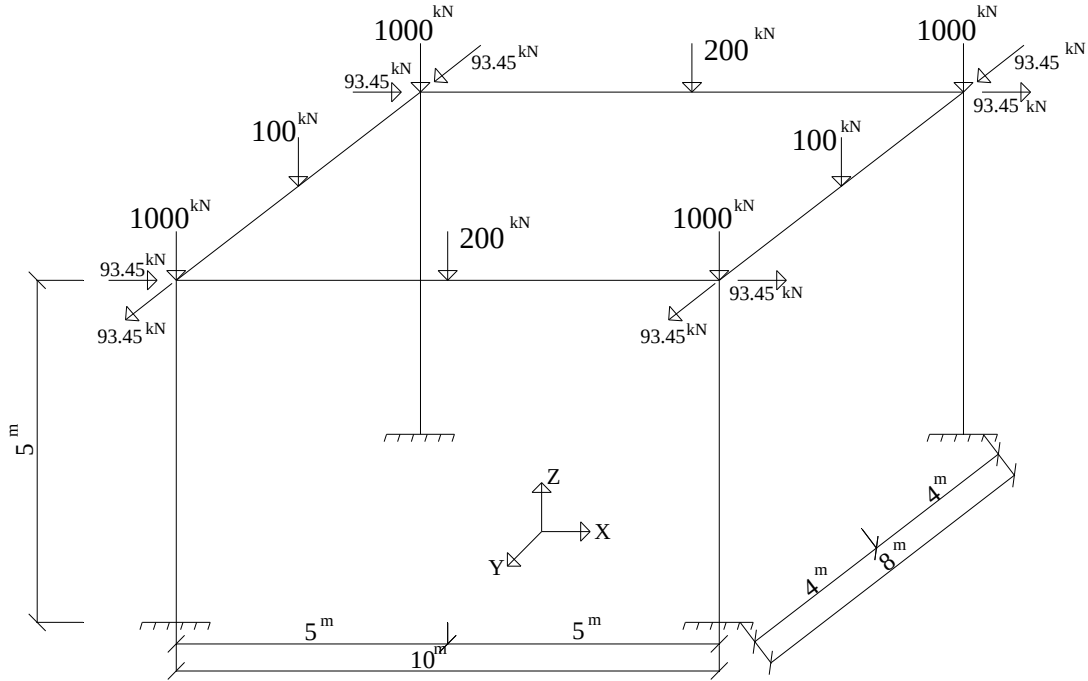
denklemleri kullanılarak her bir görelî kat ötelemesi için iki ayrı ek kısıtlama denklemi yazılabilir. Uygulama1B’de TDY-2007’de minimum hasar seviyesi için verilen $(\delta)_{\lim} = 0.01$ görelî kat ötelemesi değeri sınır değeri olarak alınmış ve Çizelge 6.17’de katsayıları verilen ek kısıtlama denklemleri yazılmıştır.

Çizelge 6.17 : Görelî kat ötelemesi ek kısıtlaması için ek kısıtlama denklemleri.

Ek denklem	$\Phi_1 = 1$	$\Phi_2 = 1$	Sabit
1	$\delta_{21} = -0.295$	$\delta_{22} = 0.213$	$(\delta_{20} - \delta_{\lim}) = -0.00879$
2	$-\delta_{21} = 0.295$	$-\delta_{22} = -0.213$	$(-\delta_{20} - \delta_{\lim}) = -0.0112$

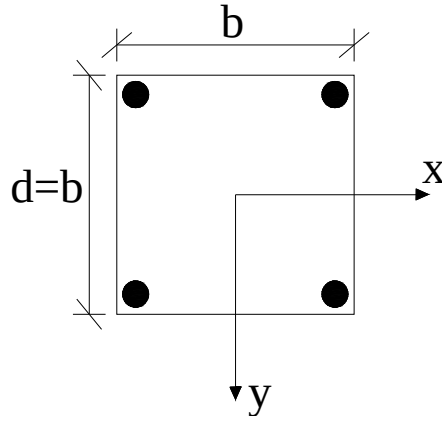
Yapılan ek kısıtlamalı optimum boyutlandırma hesapları sonucunda tek katlı düzlem çerçeve örnek görelî kat ötelemesi istemleri öngörülen sınır değeri altına olduğundan, optimum boyutlandırmada söz konusu ek kısıtlamalar nedeni ile bir değışiklik olmamış ve aynı sonuçlara ulaşılmıştır. Görelî kat ötelemesine ait ek kısıtlamalarının optimum boyutlandırmaya etkisi sonraki örneklerde daha ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

6.3 Uygulama 2: Bir Katlı Uzay Çerçeve



Şekil 6.9 : Sistemin geometrik özellikleri ve hesap yükleri.

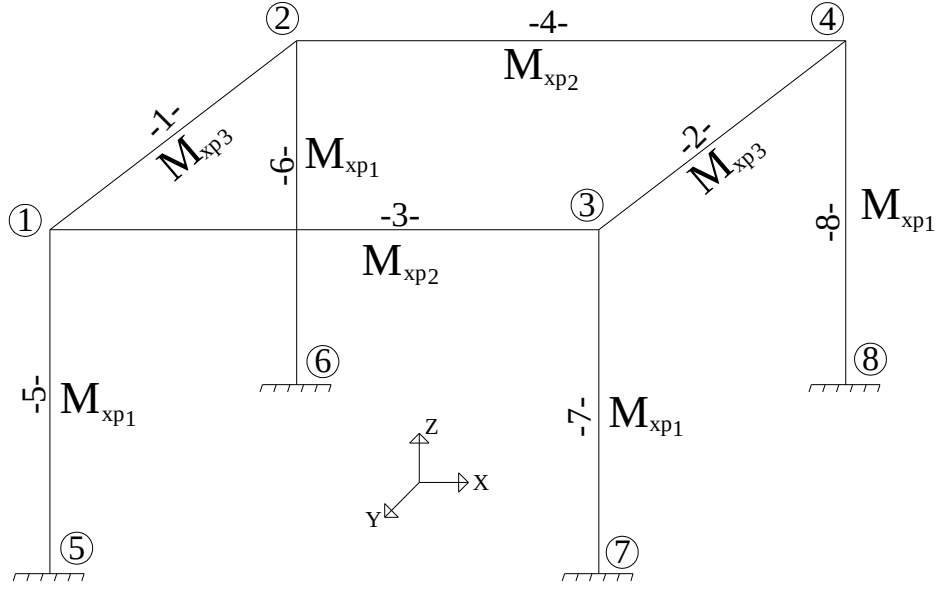
Geometrik özellikleri ve hesap yükleri Şekil 6.9’da verilen bir katlı bir açıklıklı betonarme uzay çerçeve sistem ikinci mertbe limit yüke göre farklı boyutlandırma kriterleri için optimum olarak boyutlandırılacaktır. Sistemin kolonları için kare kesitli ($d=b$) ve donatı oranı 0.015 olan kesit, X doğrultusundaki kirişleri için yüksekliği genişliğinin iki katı ($d=2b$) ve donatı oranı 0.006 olan kesit, Y doğrultusundaki kirişleri için yüksekliği genişliğinin 1.5 katı ($d=1.5b$) ve donatı oranı 0.009 olan kesit öngörülmüştür. Sistemin kolonlarına ait donatılar dört köşeye eşit olarak dağıtılmış olup donatı şeması Şekil 6.10’da verilmiştir. Ayrıca yapısal kısıtlama olarak, kolonların ve karşılıklı kiriş enkesit boyutlarının aynı olması istenmektedir. Sistemin yatay yükleri, yapılan ön boyutlandırma sonucunda elde edilen yapı ağırlığı esas alınarak TDY-2007 eşdeğer deprem yükü yöntemine uygun olarak hesaplanmıştır. Beton için C30, donatı çeliği için S420 sınıfları seçilmiştir. Sistemdeki bütün kuvvetlerin birimi kN , uzunlukların birimi ise m ’dir.



Şekil 6.10 : Kolonlara ait donatı şeması.

Bu uygulamada, farklı boyutlandırma kriterlerinin ve ek kısıtlamaların sonuca etkisini görmek amacıyla aşağıda sıralanan boyutlandırmalar da yapılmış, ulaşılan sonuçlar örneğin sonunda verilerek yorumlanmıştır.

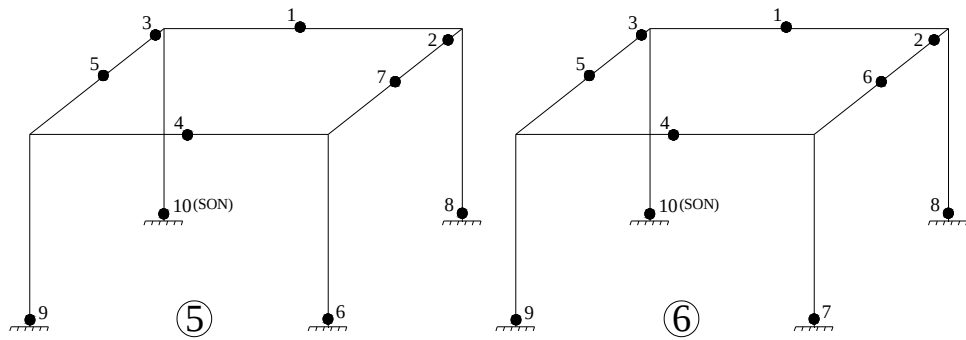
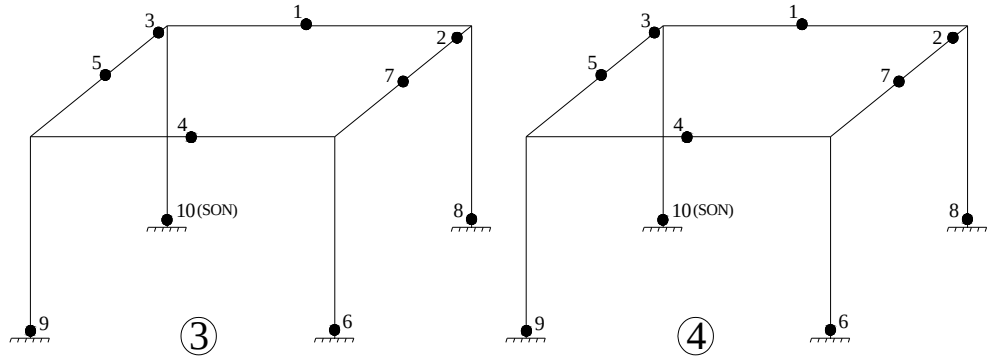
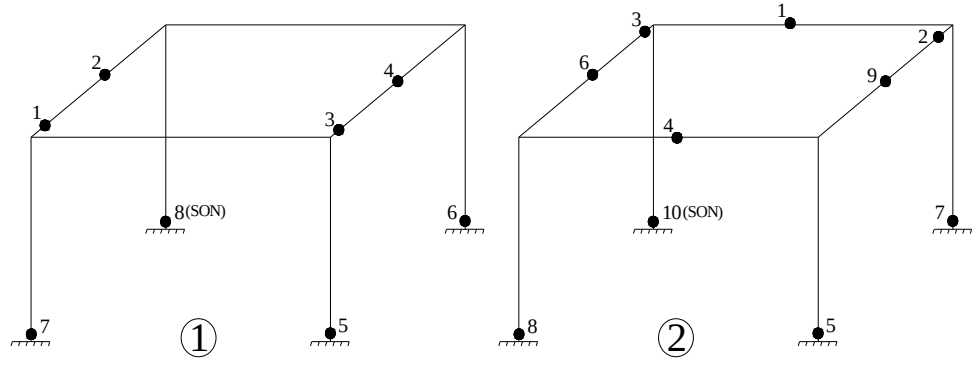
- Sistem hem ikinci mertebe hem de birinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılmıştır.
- Plastik dönmelerin farklı sınır değerleri için yazılan ek kısıtlamaların sonuçlar ve yapı ağırlığı üzerindeki etkisini görmek için farklı optimum boyutlandırmalar yapılmıştır.
- Yerdeğiştirmeler ve görelî kat ötelemeleri için öngörülen sınır değerlerin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilerek, sınır değerlerin aşılması durumunda ek kısıtlamaların yazılması ile sözkonusu kısıtlamaların optimum boyutlandırmaya etkisi araştırılmıştır.
- İkinci mertebe limit yüke göre optimum kesit karakteristik plastik momentleri bulunarak boyutlandırılan sistemin enkesit boyutlarını yapı maliyeti açısından değerlendirmek amacıyla, betonarme enkesit boyutları ve donatı oranının taşıyıcı eleman maliyetine etkileri araştırılmıştır.
- Enkesit boyutları ve yatay yükler açısından duyarlılık analizi kontrolleri yapılmış ve sonuçlara etkileri araştırılmıştır.
- Bölüm 2.4.1.2’de açıklandığı şekilde optimize edilecek amaç fonksiyon olarak donatı oranları göz önüne alınmış, yani seçilen sabit enkesit boyutları için kesitlerdeki donatı oranları optimize edilmiştir.



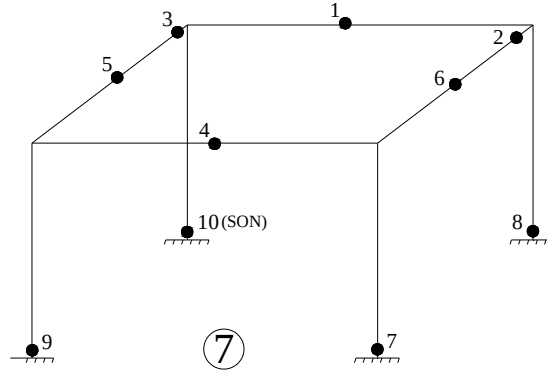
Şekil 6.11 : Sistemin düğüm noktası ve çubuk numaraları.

Sistemin düğüm noktası ve çubuk numaraları ile karakteristik plastik moment grup numaraları Şekil 6.11’de verilmiştir. Sistem, her adımda önce ikinci mertebe elastoplastik teoriye göre hesaplanarak ikinci mertebe limit yük parametresi ile ikinci mertebe limit yüke ait plastik kesit yerleri ve akma koşulu katsayıları belirlenmiştir. Daha sonra, karakteristik plastik momentler cinsinden yazılan amaç fonksiyon ile dış yükler ve birim plastik şekildeğiştirme parametreleri cinsinden yazılan akma koşulu kısıtlamaları altında simplex yöntemi ile çözülmüştür. Her adımda birbirini takip edecek şekilde tekrarlanan bu hesaplar sonucunda ardışık iki adımdaki tasarım değişkenlerinin ve yapı ağırlığının birbirine yeter derecede yakın olması durumunda hesaba son verilmiştir.

İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan bir katlı betonarme uzay çerçevenin ardışık yaklaşım adımlarında esas alınan plastik kesit yerleri Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’de verilmiştir.



Şekil 6.12 : İkinci merteye limit yüke göre optimum boyutlandırılan bir katlı betonarme uzay çerçevenin ardışık yaklaşım adımlarında esas alınan plastik kesit yerleri (İlk 6 adım).



Şekil 6.13 : İkinci merteye limit yüke göre optimum boyutlandırılan bir katlı betonarme uzay çerçevenin ardışık yaklaşım adımlarında esas alınan plastik kesit yerleri (Son adım).

İkinci merteye limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin ardışık yaklaşım adımlarında elde edilen çubuk karakteristik plastik momentleri, toplam yapı ağırlıkları ve ikinci merteye limit yük parametreleri ile her ardışık yaklaşım adımı için enkesit boyutları ise sırasıyla Çizelge 6.18 ve Çizelge 6.19’da verilmiştir.

Çizelge 6.18 : Ardışık yaklaşım adımlarına ait çubuk karakteristik plastik momentleri, toplam yapı ağırlıkları ve ikinci merteye limit yük parametreleri.

Adım	$M_{xp1}(kNm)$	$M_{xp2}(kNm)$	$M_{xp3}(kNm)$	$G (kN)$	P_{L2}
1	484.06	109.75	238.31	219.00	0.651
2	655.18	289.91	188.71	275.55	0.948
3	702.37	291.41	193.89	281.93	0.987
4	711.20	290.53	194.01	283.07	0.998
5	713.06	290.28	194.07	283.25	1.000
6	713.19	290.21	194.08	283.29	1.000
7	713.19	290.21	194.08	283.29	1.000

Çizelge 6.19 : Ardışık yaklaşım adımlarına ait enkesit boyutları.

Adım	Kolon (b/h)	X-Kiriş (b/h)	Y-Kiriş (b/h)
1	0.5000 / 0.5000	0.2000 / 0.4000	0.3000 / 0.4500
2	0.5530 / 0.5530	0.2765 / 0.5530	0.2775 / 0.4162
3	0.5625 / 0.5625	0.2769 / 0.5538	0.2801 / 0.4201
4	0.5647 / 0.5647	0.2767 / 0.5534	0.2801 / 0.4201
5	0.5651 / 0.5651	0.2766 / 0.5532	0.2801 / 0.4201
6	0.5651 / 0.5651	0.2766 / 0.5532	0.2802 / 0.4203
7	0.5651 / 0.5651	0.2766 / 0.5532	0.2802 / 0.4203

Ardışık yaklaşımın son adımına ait sistem hesabı sonucunda elde edilen tasarım değişkenlerinin (plastik şekildeğiştirme parametrelerinin ve çubuk karakteristik plastik momentlerinin) değerleri aşağıda verilmiştir. Ardışık yaklaşımın son adımında oluşan 9 adet plastik kesite ait dönmelerin hangi kesitlere ait olduğunun takip edilebilmesi amacıyla, aşağıda matris formda verilen indis numaraları Şekil 6.13'te gösterilen plastik kesit numaraları ile uyumlu olarak verilmiştir.

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \\ \Phi_6 \\ \Phi_7 \\ \Phi_8 \\ \Phi_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000886 \\ -0.00297 \\ -0.00692 \\ 0.000569 \\ -0.00682 \\ -0.01040 \\ 0.000788 \\ 0.000617 \\ -0.00048 \end{bmatrix} \quad [M_p] = \begin{bmatrix} M_{xp1} \\ M_{xp2} \\ M_{xp3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 713.19 \\ 290.21 \\ 194.08 \end{bmatrix}$$

6.3.1 Birinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırma

Sonuçları karşılaştırmak amacıyla, ikinci mertebe etkileri terk edilerek sistem birinci mertebe limit yüke göre de önerilen yöntemle optimum olarak boyutlandırılmış, her iki boyutlandırma durumuna ait sonuçlar Çizelge 6.20'de verilmiştir.

Çizelge 6.20 : Birinci ve ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan bir katlı betonarme uzay çerçevenin optimum enkesit boyutları, yapı ağırlıkları ve ikinci mertebe limit yük parametreleri.

Kriter	Kolon (b/h)	X-Kiriş (b/h)	Y-Kiriş (b/h)	G (kN)	P _{L2}
1.mertebe	0.5136 / 0.5136	0.2653 / 0.5306	0.2675 / 0.4012	245.21	0.777
2.mertebe	0.5651 / 0.5651	0.2766 / 0.5532	0.2802 / 0.4203	283.29	1.000

Çizelge 6.20'de görülebileceği gibi, boyutlandırmada ikinci mertebe etkilerinin terk edilmesi halinde optimum boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe limit yük parametresi 0.777 değerini almakta, yani göçme güvenliği %22.30 oranında azalmaktadır.

İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin ağırlığındaki,

$$\frac{283.29 - 245.21}{245.21} = \%15.53 \text{ oranındaki artışın ikinci mertebe limit yükün,}$$

$$\frac{1 - 0.777}{0.777} = \%28.70 \text{ oranında artmasına neden olduğu görülmektedir. Sonuç olarak,}$$

yapı göçme güvenliğindeki artışın optimum enkesit boyutları ve buna bağlı olarak yapı ağırlığının artışı ile sağlandığı görülmektedir.

6.3.2 Plastik şekildeğiştirme kısıtlamalarının optimum boyutlandırmaya ve yapı ağırlığına etkisi

Optimizasyon probleminin tasarım değişkenlerinden olan plastik kesitlerdeki dönmeler için farklı sınır değerler öngörülmesiyle elde edilen ek kısıtlama denklemleri kullanılarak sistem ikinci mertebe teorisine göre optimum olarak yeniden boyutlandırılmıştır.

Farklı performans seviyelerine göre ATC-40 yönetmeliğinde tanımlanan plastik dönme sınır değerlerinin, incelenen sistemdeki kiriş ve kolonlara karşı gelen sınırları Çizelge 6.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.21 : Sistemdeki kiriş ve kolonlar için farklı performans seviyelerine ait sınır plastik dönme kapasitesi değerleri.

Plastik kesit	Hemen Kullanım(IO)	Can Güvenliği(LS)	Göçmenin Önlenmesi(SS)
Kirişlerdeki plastik kesitler	0.005	0.02	0.025
Kolonlardaki plastik kesitler	0.005	0.01	0.02

Çizelge 6.21’de gösterilen sınır değerler kullanılarak, plastik şekildeğiştirme sınırlaması yapılmayan boyutlandırmaya ait olan ve aşağıda tekrar verilen plastik kesit dönmeleri için ek kısıtlamalı optimum boyutlandırma yapılmıştır. Burada $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5, \Phi_6$ plastik dönmeleri kirişlere ait dönmeler, Φ_7, Φ_8, Φ_9 plastik dönmeleri ise kolonlara ait dönmelerdir.

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \\ \Phi_6 \\ \Phi_7 \\ \Phi_8 \\ \Phi_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000886 \\ -0.00297 \\ -0.00692 \\ 0.000569 \\ -0.00682 \\ -0.01040 \\ 0.000788 \\ 0.000617 \\ -0.00048 \end{bmatrix}$$

Hemen kullanım performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlama denklemleri yazılarak ikinci mertebe teorisine göre yapılan optimum boyutlandırma sonucunda plastik kesit dönmelerinin yeni değerleri,

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \\ \Phi_6 \\ \Phi_7 \\ \Phi_8 \\ \Phi_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000886 \\ -0.00297 \\ -0.00500 \\ 0.000569 \\ -0.00500 \\ -0.00500 \\ 0.000788 \\ 0.000617 \\ -0.00048 \end{bmatrix}$$

şeklindedir.

Sistemin karakteristik plastik momentleri ve yapı ağırlığı ise Çizelge 6.22’de verilmiştir.

Çizelge 6.22 : Hemen kullanım performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları.

Mxp ₁ (kNm)	Mxp ₂ (kNm)	Mxp ₃ (kNm)	G (kN)
747.93	289.22	159.08	288.88

Sonuçlardan görüldüğü gibi, plastik dönmelerin hemen kullanım performans seviyesine göre sınırlandırılması yapı ağırlığının %1.974 oranında artmasına neden olmaktadır. Bu artışın küçük olmasının nedeni plastik kesit dönmelerinin büyük çoğunluğunun öngörülen sınır değerlerin altında olmasıdır.

Ek kısıtlama denklemlerinin gözönüne alındığı optimum boyutlandırma problemlerinin çözümünde, EPARCS programında sınırlanması istenen yerdeğiştirme veya kesit dönmesine ait sınır değerlere ulaşıldığı andaki plastik kesit yerleri ile akma düzlemi katsayılarının kullanılması gerekmektedir.

Can güvenliği performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlama denklemleri yazılarak ikinci mertbe teorisine göre yapılan optimum boyutlandırma sonucunda ise ek kısıtlama yazılmadan optimum boyutlandırılan sistem ile aynı sonuçlara ulaşılmaktadır. Bunun sebebi, plastik dönmelerin can güvenliği ve daha yukarı performans seviyelerine göre sınırlandırılması durumunda plastik dönme istemlerinin zaten bu sınırların altında olmasıdır.

6.3.3 Yerdeğiştirme (görelî kat ötelemesi) açısından değerlendirme

Tek katlı betonarme uzay çerçeve uygulaması, görelî kat ötelemesi sınırları açısından da değerlendirilmiştir.

TDY-2007’de farklı hasar seviyelerine ait görelî kat ötelemeleri için verilen sınır değerler Çizelge 6.23’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.23 : Farklı kesit hasar sınırlarına ait görelî kat ötelemesi sınırları.

Kesit Hasar Sınırı	$(\delta)_{\lim}$
Minimum Hasar (MN)	0.01
Güvenlik Sınırı (GV)	0.03
Göçme Sınırı (GÇ)	0.04

Dış yükler ve birim plastik dönmeler için ayrı ayrı yapılan hesap sonucunda sisteme ait her iki doğrultudaki yerdeğiştirmeler de iç kuvvetlere benzer şekilde elde edilmektedir. Görelî yerdeğiştirme sınırları, tek katlı düzlem çerçeve uygulamasında verilen (6.3) denklemine benzer şekilde, 3 numaralı düğüm noktasında her iki doğrultu için ayrı ayrı (6.3b) ve (6.3c) denklemleri ile,

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{3xi}) + (\delta_{3x0}) \right| \leq (\delta)_{\lim} \quad (6.3b)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{3yi}) + (\delta_{3y0}) \right| \leq (\delta)_{\lim} \quad (6.3c)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu denklemlerde; n , plastik kesit sayısını, δ_{3xi} , 3 numaralı düğüm noktası için x doğrultusunda dış yükler sıfıra eşitken her bir birim plastik şekildeğiştirme parametresi için ayrı ayrı yapılan hesap sonucunda bulunan görelî kat ötelemesini, δ_{3x0} , 3 numaralı düğüm noktası için x doğrultusunda birim plastik şekildeğiştirme parametreleri sıfıra eşitken dış yükler için yapılan hesap sonucunda bulunan görelî kat ötelemesini, δ_{3yi} , 3 numaralı düğüm noktası için y doğrultusunda dış yükler sıfıra eşitken her bir birim plastik şekildeğiştirme parametresi için ayrı ayrı yapılan hesap sonucunda bulunan görelî kat ötelemesini, δ_{3y0} , 3 numaralı düğüm noktası için y doğrultusunda birim plastik şekildeğiştirme parametreleri sıfıra eşitken dış yükler için yapılan hesap sonucunda bulunan görelî kat ötelemesini göstermektedir.

Bu uygulamada optimum boyutlandırılan yapıdaki görelî kat ötelemeleri minimum hasar sınırı için öngörülen değerden daha küçük kalmıştır. Görelî kat ötelemeleri için verilen sınır değerlerin sağlanmaması durumunda ise (6.3b) ve (6.3c) denklemleri kullanılarak her görelî kat ötelemesi için iki eşitsizlik içerecek şekilde ek kısıtlama denklemleri yazılarak optimum boyutlandırma algoritması tekrarlanabilir.

6.3.4 Optimizasyon sonucu bulunan kesit karakteristik plastik momentleri için en ekonomik betonarme kesitlerin bulunması

İkinci mertebe limit yüke göre optimum kesit karakteristik plastik momentleri bulunarak boyutlandırılan sistemi yapı maliyeti açısından değerlendirmek amacıyla, betonarme enkesit boyutları ve donatı oranının taşıyıcı eleman maliyetine etkileri incelenmiştir.

Tipik bir betonarme kesitin yaklaşık birim maliyetini etkileyen unsurlar, Bayındırlık Bakanlığı 2011 yılı birim fiyatları [53] kullanarak aşağıda açıklanmıştır.

- BS30 Hazır Betonarme Betonu (16.059/1A) $\sim 121 \text{ TL/m}^3$
- Düz yüzeyli betonarme kalıbı (21.011) $\sim 16.5 \text{ TL/m}^2$
- Betonarme Çeliği (23.002) $\sim 1455 \text{ TL/ton}$

Birim kesit uzunluğu için metrajlar (6.4), (6.5) ve (6.6) denklemleri ile hesaplanabilir.

- Beton metrajı:

$$1 \cdot b \cdot h = b \cdot h \text{ (m}^3\text{)} \quad (6.4)$$

- Kalıp metraji:

$$2 \cdot (b + h) \cdot 1 = 2b + 2h \text{ (m}^2\text{)} \quad (6.5)$$

- Donatı metraji:

$$A_{top} \text{ (cm}^2\text{)} \cdot 1,00 \text{ (m)} \cdot 0,785 \text{ (kg)} = \rho_{top} \cdot b \cdot h \cdot 0,785 \cdot 10^4 \text{ (kg)} \quad (6.6)$$

Birim uzunluktaki betonarme kesitin toplam birim maliyeti (BM), (6.7) denklemi kullanılarak hesaplanabilir. Bu denklemde, enkesit boyutlarının birimi m , birim maliyetin birimi ise TL 'dir.

$$BM = 121 \cdot (b \cdot h) + 33 \cdot (b + h) + 11422(\rho_{top} \cdot b \cdot h) \quad (6.7)$$

İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kolon ve kirişlerinin enkesit boyutları yukarıda açıklanan yola uygun olarak maliyet açısından değerlendirilmiş ve sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Kolonlar:

Optimizasyon sonucu bulunan kesit plastik momenti için ilgili bölümde verilen enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar kullanılarak minimum ve maksimum donatı oranları için kolon enkesit boyutları bulunmuştur. Buna göre kolon boyutları,

Minimum kolon donatı oranı için; $b=h= 0.6212 \text{ m}$,

Maksimum kolon donatı oranı için; $b=h= 0.4518 \text{ m}$, olmaktadır.

Yukarıda çıkarılan birim maliyet formülü yardımıyla birim kesit uzunluğu için kolon maliyeti;

Minimum kolon donatı oranı için ; $BM = 131.77 \text{ TL/m}$,

Maksimum kolon donatı oranı için ; $BM = 147.78 \text{ TL/m}$, olarak hesaplanmıştır.

- Kirişler:

Optimizasyon sonucu bulunan kesit plastik momenti için enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar kullanılarak minimum ve maksimum donatı oranları için kiriş enkesit boyutları bulunmuştur. Buna göre,

X doğrultusu kirişleri için kiriş boyutları;

Minimum kiriş donatı oranı için; $b/h= 0,2784/0,5568 \text{ m}$,

Maksimum kiriş donatı oranı için; $b/h= 0,2004/0,4008 \text{ m}$, olmaktadır.

Yukarıda çıkarılan birim maliyet formülü yardımıyla birim kesit uzunluğu için kiriş maliyeti;

Minimum kiriş donatı oranı için ; $BM = 56.23 \text{ TL/m}$,

Maksimum kiriş donatı oranı için ; $BM = 66.26 \text{ TL/m}$, olarak hesaplanmıştır.

Y doğrultusu kirişleri için kiriş boyutları;

Minimum kiriş donatı oranı için; $b/h = 0,2949/0,4424 \text{ m}$,

Maksimum kiriş donatı oranı için; $b/h = 0,2123/0,3185 \text{ m}$, olmaktadır.

Yukarıda çıkarılan birim maliyet formülü yardımıyla birim kesit uzunluğu için kiriş maliyeti;

Minimum kiriş donatı oranı için ; $BM = 48.46 \text{ TL/m}$,

Maksimum kiriş donatı oranı için ; $BM = 56.59 \text{ TL/m}$, olarak hesaplanmıştır.

Sonuçlardan görüldüğü gibi, enkesit maliyetine donatı oranının etkisi daha belirgin olmakta, aynı karakteristik plastik moment değeri için donatı oranının minimum olması durumu ile daha ekonomik enkesit maliyeti elde edilmektedir. Daha büyük enkesit boyutları ile tasarım pratik, mimari kullanım alanı ve estetik açıdan istenmeyen bir durum olduğu için donatı oranlarının ve enkesit boyutlarının optimum değerlerinin aranması önem kazanmaktadır.

6.3.5 Duyarlılık analizi kontrolleri

İkinci merteye limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin tasarım değişkenleri duyarlılık analizi (sensitivity analysis) yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Duyarlılık analizi esas olarak tasarım değişkenlerini etkileyen faktörlerin değerlerindeki küçük değişimler sonucunda tasarım değişkenlerinin ve optimize edilen amaç fonksiyonunun değerlerindeki değişimleri belirlemeyi amaçlayan bir yöntem olup, böyle bir durumda amaç fonksiyonun ve tasarım değişkenlerinin değerlerinin hangi mertebede değiştiği ile ilgilenmektedir.

Bu çalışmada önerilen yöntemde, ardışık yaklaşım adımlarının sonuçlarından görülebileceği gibi, enkesit boyutlarının küçük değişimleri karşısında, tasarım

değişkenlerinin ve yapı ağırlığının değişimleri de küçük mertebede kalmakta, sonuçlarda büyük değişimler olmamaktadır.

Ek olarak, boyutlandırmayı etkileyen faktörlerden yatay yüklerdeki değişimlerin ikinci mertebe limit yük parametresi üzerindeki etkisi incelenmiş ve yapılan optimum boyutlandırma açısından küçük mertebedeki yatay yük değişimlerinin sonucu hangi mertebede etkilediği araştırılmıştır.

Buna göre, sisteme etkileyen yatay yükler 1.05 katsayısı ile çarpılarak, optimum boyutlandırılan sistem ikinci mertebe teoriye göre analiz edildiğinde ikinci mertebe limit yük parametresi 0.952 değerini almaktadır. Yatay yüklerdeki % 5'lik bir artımın, optimum boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe limit yük parametresini % 4.8 oranında azalttığı ve mertebe açısından anlamlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu sonuçlar, optimizasyonun tasarım değişkenlerindeki veya yüklerdeki küçük değişimlere hassas olmadığını göstermiştir.

6.3.6 Seçilen sabit enkesit boyutları için donatı oranı optimizasyonu

Donatı oranı optimizasyonunun sonuçlara etkisini görmek amacıyla, optimize edilecek amaç fonksiyon olarak donatı oranları göz önüne alınmış, seçilen sabit enkesit boyutları için kesitlerdeki donatı oranları optimize edilmiştir.

Sistemi oluşturan kolon ve kiriş boyutları yönetmeliklerdeki minimum enkesit boyutu kısıtlamalarını sağlayacak şekilde ve ağırlık optimizasyonunda kullanılan enkesit boyutları arasındaki oranlara da sadık kalınarak, kolonlar için 50/50, x doğrultusu kirişleri 25/50, y doğrultusu kirişleri de 25/37.5 olarak seçilmiştir. Hesabın başlangıcında tüm enkesitlerde toplam donatı oranı için minimum donatı oranları seçilmiştir. Kolonlarda 0.01, kirişlerde ise C30/S420 malzeme dayanımı için 0.006 donatı oranları ile hesaba başlanmıştır.

Her adımda bir önceki adımda donatı oranları için optimum boyutlandırılan sistem ikinci mertebe elastoplastik teoriye göre hesaplanarak, ikinci mertebe limit yükü, plastik kesitlerin yerleri ve oluşum sırası ile akma düzlemi katsayıları belirlenmiştir. Daha sonra, dış yükler ve birim plastik şekildeğiştirme parametrelerinden meydana gelen uç kuvvetlerinden yararlanarak amaç fonksiyon ile akma koşulu kısıtlamaları oluşturulmuş ve optimizasyon hesapları yapılmıştır. Her adımda birbirini takip edecek şekilde tekrarlanan bu hesaplar sonucunda, ardışık iki adımdaki karakteristik

plastik momentler ve donatı oranları birbirine yeter derecede yakın olduğunda hesaba son verilmiştir.

Ardışık yaklaşımın hesap adımlarında elde edilen sonuçlar Çizelge 6.24’de özetlenmiştir.

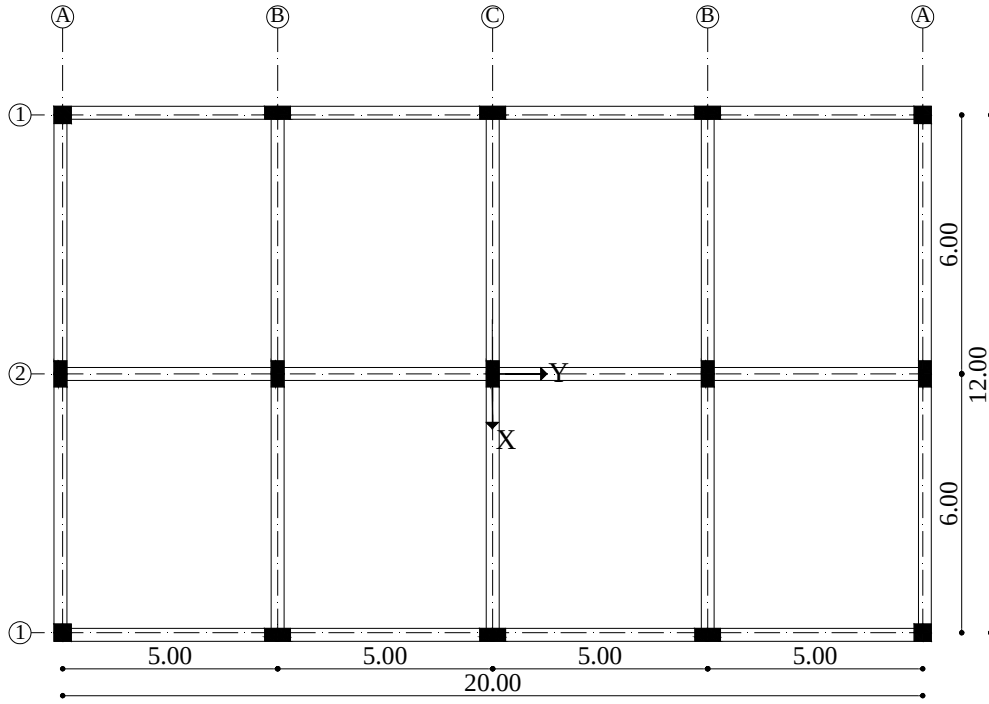
Çizelge 6.24 : Seçilen sabit enkesit boyutları için donatı optimizasyonu ardışık yaklaşım hesap adımlarının sonuçları.

Adım	M_{px_1} (kNm) (Kolon)	M_{px_2} (kNm) (X-Kiriş)	M_{px_3} (kNm) (Y-Kiriş)	ρ_1 (Kolon)	ρ_2 (X-Kiriş)	ρ_3 (Y-Kiriş)	P_{L2}
1	314.65	214.36	120.58	0.0100	0.006	0.006	0.605
2	749.99	299.26	144.69	0.02752	0.0143	0.0102	1.154
3	626.75	294.73	119.24	0.02250	0.0138	0.00577	1.012
4	615.82	295.91	117.54	0.02194	0.0139	0.00547	1.000
5	615.82	295.91	117.54	0.02194	0.0139	0.00547	1.000

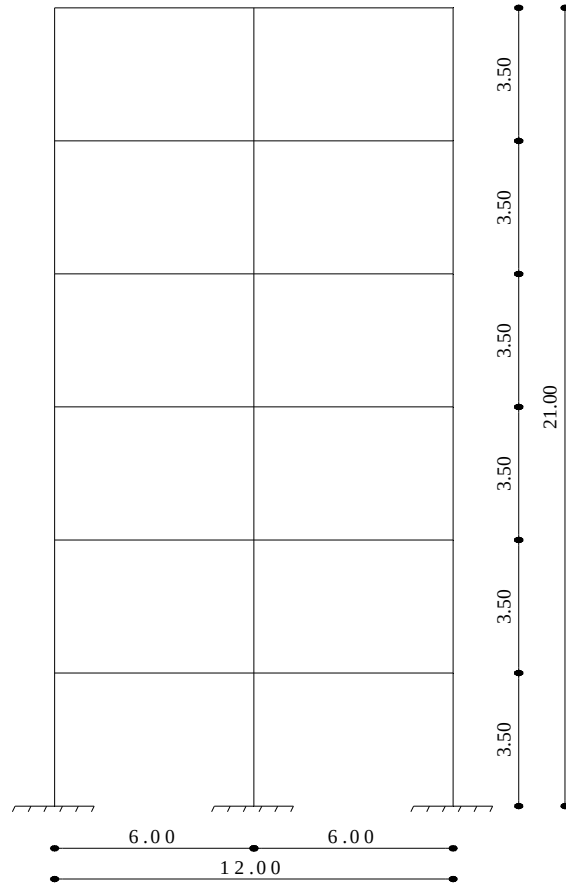
Başlangıçta seçilen ve yönetmeliklerdeki minimum enkesit boyutu kısıtlamalarını sağlayan sabit enkesit boyutları için donatı oranı optimizasyonunun yapıldığı bu örnekte, yapı ağırlığı 225 kN olarak elde edilmiş ve enkesit optimizasyonu yapılan sisteme göre (283.29 kN) % 20.58 daha küçük bulunmuştur. Ancak, önceki bölümdeki enkesit maliyeti değerlendirmesinde verildiği gibi donatı oranının yapı maliyetine etkisi daha fazla olduğu için, enkesit boyutlarında ve buna bağlı olarak yapı ağırlığında elde edilen bu azalma yapı maliyetindeki artış ile sonuçlanmaktadır.

6.4 Uygulama 3: Altı Katlı Çok Açıklıklı Uzak Çerçeve

Geometrik özellikleri Şekil 6.14 ve Şekil 6.15’de gösterilen altı katlı çok açıklıklı betonarme uzak çerçeve sistem ikinci mertebe limit yüke göre optimum olarak boyutlandırılmıştır. Sistem geometrisi ve düşey yükler [8]’den alınmış olup, sistemde yatay yükleme açısından farklı yaklaşımlarla boyutlandırmalar yapılarak elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.



Şekil 6.14 : Kat kalıp planı şeması.



Şekil 6.15 : Çerçeve düşey enkesiti.

Taşıyıcı sistem elemanları için, A1 aksı kolonları için kare kesitli ($d=b$) ve donatı oranı 0.015 olan kesit, B1 ve C1 aksı kolonları için yüksekliği genişliğinin 1.5 katı ($d=1.5b$) ve donatı oranı 0.015 olan kesit, A2, B2 ve C2 aksı kolonları için yüksekliği genişliğinin iki katı ($d=2b$) ve donatı oranı 0.025 olan kesit, A, B ve C aksı kirişleri için yüksekliği genişliğinin 1.5 katı ($d=1.5b$) ve donatı oranı 0.012 olan kesit, 1 ve 2 aksı kirişleri için yüksekliği genişliğinin 2 katı ($d=2b$) ve donatı oranı 0.012 olan kesit öngörülmüştür. Donatıların dört köşede toplandığı kabul edilmiştir. Ayrıca, yapısal kısıtlama olarak birinci ve ikinci kat kolon enkesitlerinin, üçüncü ve dördüncü kat kolon enkesitlerinden büyük olması ve üçüncü ve dördüncü kat kolon enkesitlerinin de beşinci ve altıncı kat kolon enkesitlerinden büyük olması istenmektedir. Beton için C30, donatı çeliği için S420 sınıfları seçilmiştir. Sistemdeki bütün kuvvetlerin birimi kN , uzunlukların birimi ise m 'dir.

Bu uygulama için, sistem aşağıda açıklanan farklı yaklaşımlar göz önünde bulundurularak boyutlandırılmıştır:

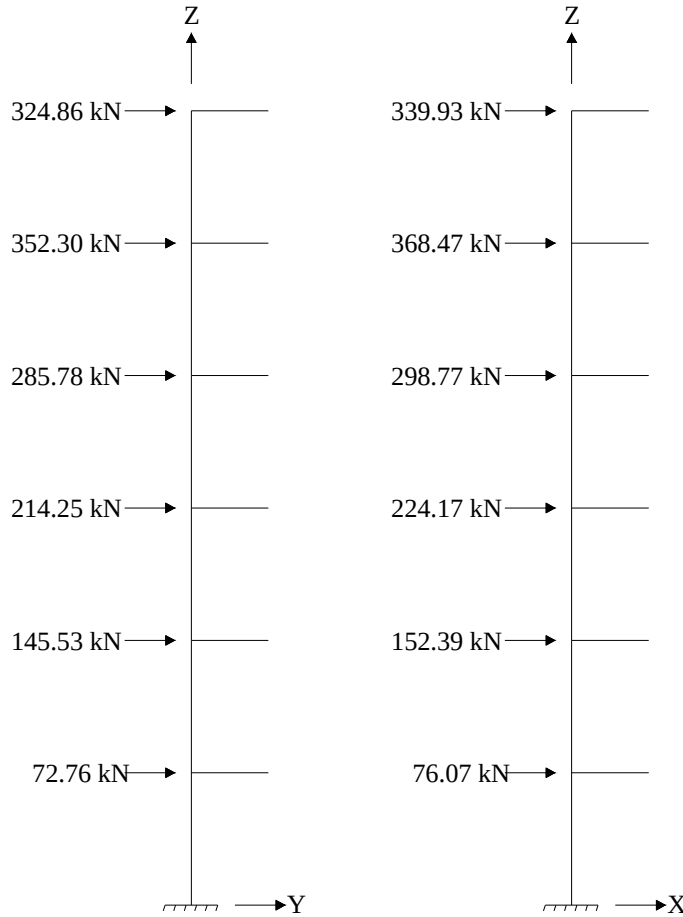
- Sistem, eşdeğer statik deprem yükleri birinci derece deprem bölgesi için sistemin dinamik karakteristiklerine bağlı olarak 2007 Deprem Yönetmeliğine göre hesaplanarak ikinci mertbe limit yüke göre optimum boyutlandırılmıştır.
- Sistem, deprem yükleri birinci derece deprem bölgesi için sistemin dinamik karakteristiklerine bağlı olarak 1975 Deprem Yönetmeliğine [54] göre hesaplanarak ikinci mertbe limit yüke göre optimum boyutlandırılmıştır.
- Beton enkesit boyutları ve sistemin deprem yükleri için [8]'de yer alan sistemle aynı değerler esas alınarak bu çalışmada önerilen yöntemle ikinci mertbe limit yüke göre donatı optimizasyonu yapılmıştır.
- Tasarım değişkeni olarak seçilen plastik dönmeler için, farklı yönetmeliklerde (ATC-40, 2007 Deprem Yönetmeliği) verilen hasar ve performans seviyelerine ait sınır değerler ile oluşturulan ek kısıtlamaların sonuçlar ve yapı ağırlığı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.
- 1975 Deprem Yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sistem mevcut bir yapı gibi düşünülüp, bu yapıya 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yüklerin etkimesi

durumunda bu yönetmelikte öngörülen hasar ve performans seviyeleri için ek kısıtlamalar yazılarak optimum boyutlandırma yapılmıştır.

- Yerdeğiştirme ve görelî kat ötelemesi sınır değerleri ile ek kısıtlamalar verilmesinin sonuçlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

6.4.1 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırma

Sistemin dinamik karakteristiklerine bağılı olarak 2007 deprem yönetmeliği'ne göre hesaplanan eşdeğer deprem yükleri Şekil 6.16'da gösterilmiştir.



Şekil 6.16 : 2007 Deprem Yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler.

Sistem, bu uygulama için seçilen ilk boyutlandırma kriterine göre, ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılmıştır. Optimum çözüme 9 ardışık yaklaşım adımı sonucunda ulaşılmıştır. Ardışık yaklaşımın sonunda elde edilen yapı ağırlığı 4110.82 kN ve boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe limit yük parametresi 0.9999 $\approx$ 1.000 değerini almaktadır. Optimum boyutlandırılan sistemin kolon ve kirişlerine

ait karakteristik plastik momentler sırasıyla Çizelge 6.25 ve Çizelge 6.26'da verilmiştir.

Karakteristik plastik momentlere göre hesaplanan enkesit boyutları ise sırasıyla Çizelge 6.27 ve Çizelge 6.28'de verilmiştir.

Çizelge 6.25 : İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kolonlarına ait karakteristik plastik momentler.

Kolonlar	M _{xp} (kNm)
A1 (1,2.kat)	259.31
A1 (3,4.kat)	183.47
A1 (5,6.kat)	129.19
A2,B2,C2 (1,2.kat)	574.65
A2,B2,C2 (3,4.kat)	322.08
A2,B2,C2 (5,6.kat)	181.83
B1,C1 (1,2.kat)	381.54
B1,C1 (3,4.kat)	264.75
B1,C1 (5,6.kat)	181.53

Çizelge 6.26 : İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kirişlerine ait karakteristik plastik momentler.

Kirişler	M _{xp} (kNm)
A,B,C Aksları	404.11
1,2 Aksları	364.15

Çizelge 6.27 : İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kolonlarına ait optimum enkesit boyutları.

Kolonlar	b/h (m/m)
A1 (1,2.kat)	0.3689/0.3689
A1 (3,4.kat)	0.3384/0.3384
A1 (5,6.kat)	0.3047/0.3047
A2,B2,C2 (1,2.kat)	0.3422/0.6844
A2,B2,C2 (3,4.kat)	0.2853/0.5706
A2,B2,C2 (5,6.kat)	0.2419/0.4838
B1,C1 (1,2.kat)	0.5268/0.3512
B1,C1 (3,4.kat)	0.4691/0.3127
B1,C1 (5,6.kat)	0.4182/0.2788

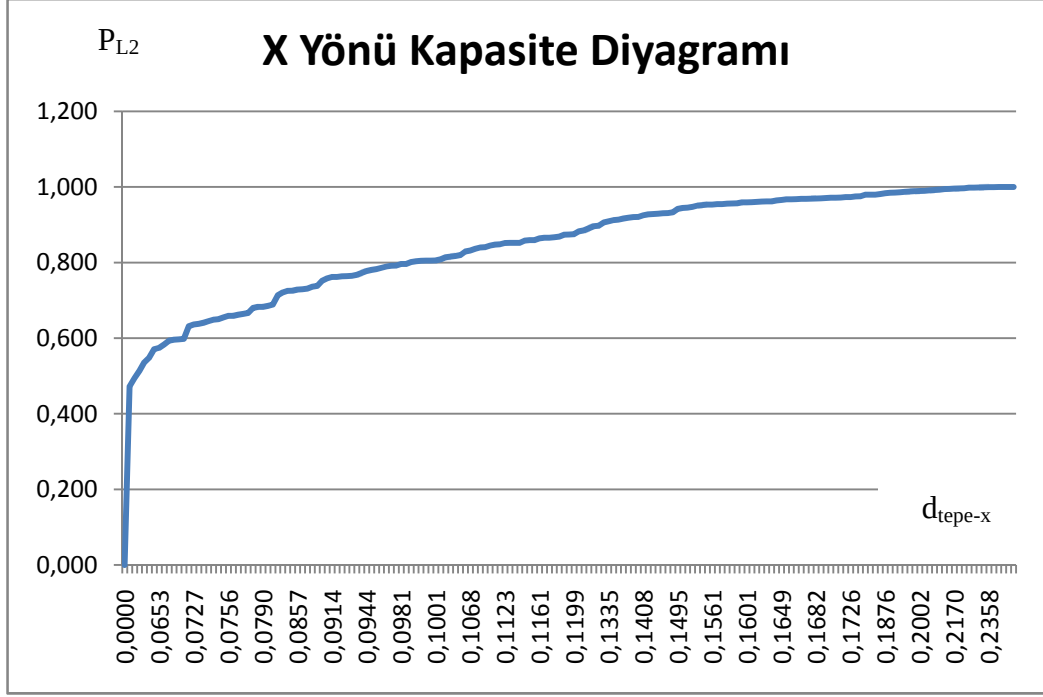
Çizelge 6.28 : İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kirişlerine ait optimum enkesit boyutları.

Kirişler	b/h (m/m)
A,B,C Aksları	0.3439/0.5159
1,2 Aksları	0.2742/0.5484

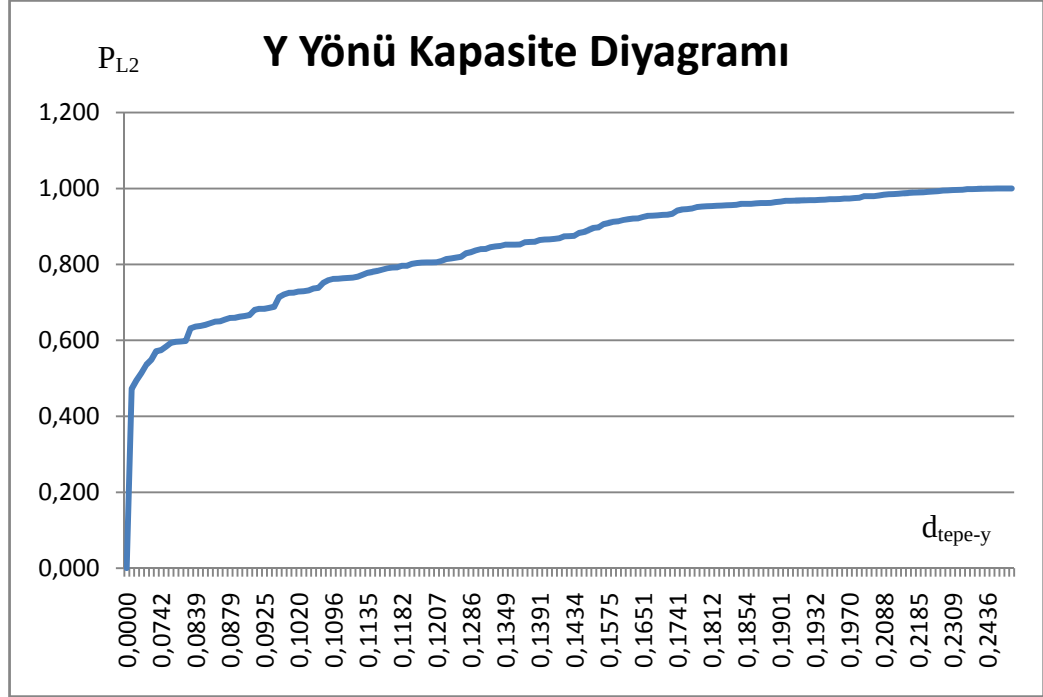
Optimum boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe elastoplastik hesabı sonucunda elde edilen her iki doğrultudaki yatay yük parametresi-yerdeğiştirme eğrileri (kapasite diyagramları) sırasıyla Şekil 6.17 ve Şekil 6.18’de verilmiştir. Diyagramlar yardımıyla optimum boyutlandırılan yapıların sünekliği hakkında da fikir sahibi olunabilmektedir.

Taşıyıcı sistemin sünekliği, ikinci mertebe elastoplastik teoriye göre yapılan hesap sonucunda yatay yük parametresinin 1.00’e eşit olduğu durumdaki yerdeğiştirmelerin doğrusal elastik sınıra karşı gelen durumdaki yerdeğiştirmelere oranı olarak tanımlanabilir. Buna göre süneklik katsayısı, x doğrultusu için 8.807’e, y doğrultusu için ise 8.208’e eşit olmaktadır.

Altı katlı çok açıklıklı uzay çerçeve sisteminin titreşim periyodu 0.5 sn’den büyük olduğu için davranış katsayısı süneklik katsayısına eşit olarak alınabilir. Görüldüğü gibi x hem de y doğrultuları için optimum boyutlandırılan yapının taşıyıcı sistemi yüksek sünek davranışa sahip olmaktadır.



Şekil 6.17 : İkinci merteye limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin X doğrultusundaki yatay yük parametresi-yerdeğiştirme diyagramı.



Şekil 6.18 : İkinci merteye limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin Y doğrultusundaki yatay yük parametresi-yerdeğiştirme diyagramı.

6.4.2 1975 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırma

Aynı sistem yatay yükleri 1975 deprem yönetmeliğine göre hesaplanarak ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılmış ve ulaşılan sonuçlar karşılaştırmalı olarak Çizelge 6.29 ve Çizelge 6.30’da verilmiştir.

Buna göre, optimum boyutlandırılan sistemin yapı ağırlığı 4110.82 kN değerinden 3453.55 kN değerine düşmekte ve yatay yüklerin azalmasına bağlı olarak, yapı ağırlığında da % 15.99 oranında bir azalma meydana gelmektedir.

Çizelge 6.29 : 2007 ve 1975 Deprem Yönetmeliklerine göre hesaplanan yatay yükler için ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kolonlarına ait optimum enkesit boyutları.

Kolonlar	1975 Dep.Yön. b/h (m/m)	2007 Dep.Yön. b/h (m/m)
A1 (1,2.kat)	0.3417/0.3417	0.3689/0.3689
A1 (3,4.kat)	0.3059/0.3059	0.3384/0.3384
A1 (5,6.kat)	0.2771/0.2771	0.3047/0.3047
A2,B2,C2 (1,2.kat)	0.3034/0.6068	0.3422/0.6844
A2,B2,C2 (3,4.kat)	0.2576/0.5152	0.2853/0.5706
A2,B2,C2 (5,6.kat)	0.2477/0.4954	0.2419/0.4838
B1,C1 (1,2.kat)	0.4626/0.3084	0.5268/0.3512
B1,C1 (3,4.kat)	0.4173/0.2782	0.4691/0.3127
B1,C1 (5,6.kat)	0.3749/0.2499	0.4182/0.2788

Çizelge 6.30 : 2007 ve 1975 Deprem Yönetmeliklerine göre hesaplanan yatay yükler için ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemin kirişlerine ait optimum enkesit boyutları.

Kolonlar	1975 Dep.Yön. b/h (m/m)	2007 Dep.Yön. b/h (m/m)
A,B,C Aksları	0.3094/0.4641	0.3439/0.5159
1,2 Aksları	0.2588/0.5176	0.2742/0.5484

6.4.3 Donatı optimizasyonu

Aynı örnek yapı sistemi, amaç fonksiyonun donatı oranlarına bağlı olarak yazılması ile ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılmış ve elde edilen sonuçlar

karşılaştırmalı olarak Çizelge 6.31 ve Çizelge 6.32’de verilmiştir. Enkesit boyutları olarak [8]’deki örnek ile aynı enkesit boyutları seçilmiş ve malzeme sınıfları da C20/S420 olarak alınmıştır. [8]’deki örnekte kiriş boyuna donatısı kiriş boyunca farklılıklar gösterdiği için Çizelge 6.32’de yer alan [8]’deki sisteme ait kiriş donatı oranları mesnet bölgeleri de göz önüne alınarak hesaplanmış ortalama değerlerdir. Optimum boyutlandırılan sistemde kiriş donatılarının mesnet ve açıklık bölgelerinde aynı olduğu ve değişmediği varsayımı yapılmaktadır. Bunun dışında [8]’deki örnekte bu uygulamadan farklı olarak kirişlerde 2φ12 gövde donatısı mevcut olup paspayları kirişlerde 3.5 cm, kolonlarda da 4 cm olarak alınmıştır. Bu örnekte ise paspayları kesit yüksekliğinin %10’u olarak alınmıştır.

Çizelge 6.31 : [8]’daki uygulama ile aynı enkesit boyutlarına sahip sistemin ikinci mertebe limit yüke göre hesaplanan optimum donatı oranları (Kolonlar).

Kolonlar	Enkesit boyutu b/h (m)	Donatı Oranı [8]	Optimum Donatı Oranı	Azalma %
A1 (1,2.kat)	0.4000/0.3000	0.0150	0.0126	16
A1 (3,4.kat)	0.4000/0.3000	0.0150	0.0123	18
A1 (5,6.kat)	0.4000/0.3000	0.0150	0.0121	19.4
B1,C1 (1,2.kat)	0.6000/0.3000	0.0154	0.0128	16.9
B1,C1 (3,4.kat)	0.5000/0.3000	0.0167	0.0139	16.8
B1,C1 (5,6.kat)	0.4000/0.3000	0.0134	0.0097	27.6
A2 (1,2.kat)	0.6000/0.3000	0.0113	0.0092	18.6
A2 (3,4.kat)	0.5000/0.3000	0.0120	0.0094	21.7
A2 (5,6.kat)	0.4000/0.3000	0.0120	0.0090	25
B2,C2 (1,2.kat)	0.8000/0.3000	0.0185	0.0151	18.4
B2,C2 (3,4.kat)	0.6000/0.3000	0.0140	0.0109	22.2
B2,C2 (5,6.kat)	0.4000/0.3000	0.0120	0.0091	24.2

Çizelge 6.32 : [8]'daki uygulama ile aynı enkesit boyutlarına sahip sistemin ikinci merteye limit yüke göre hesaplanan optimum donatı oranları (Kirişler).

Kirişler	Enkesit boyutu b/h (m)	Donatı Oranı [8]	Optimum Donatı Oranı	Azalma %
A Aksı (1,2.kat)	0.3000/0.6000	0.0134	0.0102	23.9
A Aksı (3,4.kat)	0.3000/0.6000	0.0123	0.0091	26.1
A Aksı (5,6.kat)	0.3000/0.6000	0.0088	0.0063	28.5
B,C Aksı (1,2.kat)	0.3000/0.6000	0.0184	0.0139	24.5
B,C Aksı (3,4.kat)	0.3000/0.6000	0.0155	0.0132	14.8
B,C Aksı (5,6.kat)	0.3000/0.6000	0.0083	0.0071	14.5
1 Aksı (1,2.kat)	0.3000/0.6000	0.0134	0.0102	23.9
1 Aksı (3,4.kat)	0.3000/0.6000	0.0114	0.0098	14.1
1 Aksı (5,6.kat)	0.3000/0.6000	0.0074	0.0065	12.2
2 Aksı (1,2.kat)	0.3000/0.6000	0.0113	0.0086	23.9
2 Aksı (3,4.kat)	0.3000/0.6000	0.0097	0.0083	14.5
2 Aksı (5,6.kat)	0.3000/0.6000	0.0074	0.0065	12.2

[8]'deki sistemin ikinci merteye limit yük parametresi 1.574'e eşitken, bu örnekte sistem ikinci merteye limit yük parametresi 1.00'e eşit olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Çizelge 6.31 ve Çizelge 6.32'ye göre, taşıma gücündeki % 36.5 azalmaya karşılık donatı oranlarında kolonlarda ortalama % 20.1, kirişlerde ortalama % 18.8 oranında azalma olmuştur.

6.4.4 ATC-40 yönetmeliğindeki plastik dönme ek kısıtlamaları ile optimum boyutlandırma

Plastik dönme kısıtlamalarının optimum boyutlandırmaya ve yapı ağırlığına etkisini incelemek amacıyla, 2007 deprem yönetmeliği yatay yükleri için optimum boyutlandırılan sistem, optimizasyon probleminin tasarım değişkenlerinden olan plastik kesitlerdeki dönmelere farklı sınır değerler verilmesiyle elde edilen ek kısıtlama denklemleri ile ikinci merteye teorisine göre optimum olarak yeniden boyutlandırılmıştır.

Plastik dönme kapasiteleri için farklı performans seviyelerine göre ATC-40 yönetmeliğinde tanımlanan plastik dönme sınır değerlerinin incelenen sistemdeki kiriş ve kolonlara karşı gelen sınırları Çizelge 6.33'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.33 : Kiriş ve kolonlar için farklı performans seviyelerine ait sınır plastik dönme kapasitesi değerleri.

Plastik kesit	Hemen Kullanım(IO)	Can Güvenliği(LS)	Göçmenin Önlenmesi(SS)
A,B,C aksları kirişleri	0.005	0.02	0.025
1,2 aksları kirişleri	0.005	0.02	0.025
A1 kolonları (1,2.kat)	0.001	0.006	0.0160
A1 kolonları (3,4.kat)	0.001	0.006	0.0160
A1 kolonları (5,6.kat)	0.0015	0.0065	0.0165
B1,C1 kolonları (1,2.kat)	0.0015	0.0065	0.0165
B1,C1 kolonları (3,4.kat)	0.0025	0.0075	0.0175
B1,C1 kolonları (5,6.kat)	0.0040	0.0090	0.0190
A2,B2,C2 kolonları (1,2.kat)	0.001	0.006	0.0160
A2,B2,C2 kolonları (3,4.kat)	0.001	0.006	0.0160
A2,B2,C2 kolonları (5,6.kat)	0.0025	0.0075	0.0175

Hemen kullanım performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlama denklemleri yazılarak ikinci merteye teorisine göre yapılan optimum boyutlandırma sonucunda sisteme ait enkesit boyutları Çizelge 6.34 ve Çizelge 6.35’de gösterilmiştir. Bu ek kısıtlama durumuna ait yapı ağırlığı 4479.74 kN olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.34 : Hemen kullanım performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kolonlar).

Kolonlar	b/h (m/m)
A1 (1,2.kat)	0.3743/0.3743
A1 (3,4.kat)	0.3531/0.3531
A1 (5,6.kat)	0.3258/0.3258
A2,B2,C2 (1,2.kat)	0.3761/0.7522
A2,B2,C2 (3,4.kat)	0.3389/0.6778
A2,B2,C2 (5,6.kat)	0.2843/0.5686
B1,C1 (1,2.kat)	0.5562/0.3708
B1,C1 (3,4.kat)	0.5373/0.3582
B1,C1 (5,6.kat)	0.4686/0.3124

Çizelge 6.35 : Hemen kullanım performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kirişler).

Kirişler	b/h (m/m)
A,B,C Aksları	0.3521/0.5282
1,2 Aksları	0.2773/0.5546

Sonuçlardan görüldüğü gibi, plastik dönmelerin hemen kullanım performans seviyesine göre sınırlandırılması yapı ağırlığının % 8.97 oranında artmasına neden olmaktadır.

Can güvenliği performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlama denklemleri yazılarak ikinci mertbe teorisine göre yapılan optimum boyutlandırma sonucunda sistemin enkesit boyutları ise Çizelge 6.36 ve Çizelge 6.37’de gösterilmiştir. Bu ek kısıtlama durumuna ait yapı ağırlığı 4203.44 kN olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.36 : Can güvenliği performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kolonlar).

Kolonlar	b/h (m/m)
A1 (1,2.kat)	0.3689/0.3689
A1 (3,4.kat)	0.3384/0.3384
A1 (5,6.kat)	0.3047/0.3047
A2,B2,C2 (1,2.kat)	0.3691/0.7382
A2,B2,C2 (3,4.kat)	0.3163/0.6326
A2,B2,C2 (5,6.kat)	0.2714/0.5428
B1,C1 (1,2.kat)	0.5268/0.3512
B1,C1 (3,4.kat)	0.4691/0.3127
B1,C1 (5,6.kat)	0.4182/0.2788

Çizelge 6.37 : Can güvenliği performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kirişler).

Kirişler	b/h (m/m)
A,B,C Aksları	0.3439/0.5159
1,2 Aksları	0.2742/0.5484

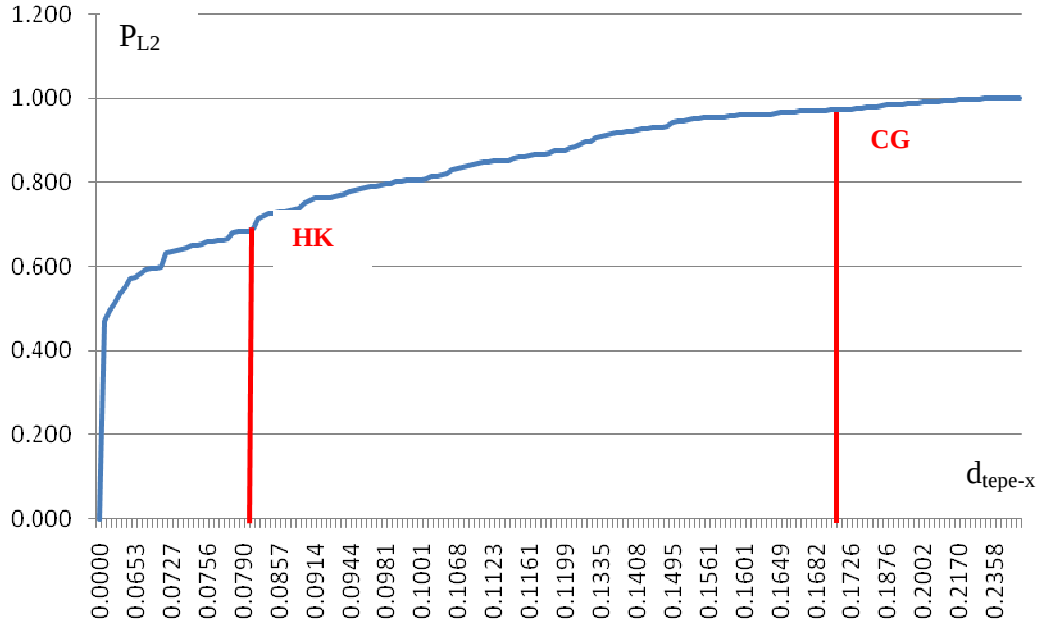
Sonuçlardan görüldüğü gibi, plastik şekildeğiştirmelerin can güvenliği performans seviyesine göre sınırlandırılması yapı ağırlığının % 2.25 oranında artmasına neden olmaktadır.

Göçmenin önlenmesi performans seviyesine ait sınır değerler ile ek kısıtlama denklemleri yazılarak ikinci merteye teorisine göre yapılan optimum boyutlandırma sonucunda yapı ağırlığı 4110.82 kN olarak bulunmuştur. Bu durumda, plastik dönmeler zaten sınır değerlerin altında olduğu için sonuç değişmemiştir.

Ek kısıtlama denklemlerinin gözönüne alındığı optimum boyutlandırma problemlerinde, ikinci merteye elastoplastik teoriye göre hesapların yapıldığı EPARCS programında, sınırlandırılması istenen yerdeğiştirme veya kesit dönmesine ait sınır değerlere ulaşıldığı andaki plastik kesit yerleri ile akma düzlemi katsayıları kullanılmaktadır.

Bölüm 6.4.1'deki optimum boyutlandırılan sistemde, ATC-40 yönetmeliğindeki farklı performans seviyelerine ait plastik dönme sınır değerlerinin ilk aşıldığı plastik kesitlerin yerlerini belirten kapasite diyagramı Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Bölüm 6.4.5'de ise 2007 deprem yönetmeliğinde verilen birim şekildeğiştirme sınır değerleri için yapılan hesaplarda, farklı hasar seviyelerine göre her bir katta kesit düzeyinde yapılan incelemeler sonucunda, elemanların hasar bölgesi dağılımları hesaplanarak taşıyıcı sistem performansı hakkında fikir edinilmeye çalışılmış ve yeni sınır değerlere ait ek kısıtlamalar gözönüne alınarak optimum boyutlandırma tekrarlanmıştır.

İkinci merteye limit yüke göre optimum boyutlandırılan sistemde ikinci merteye limit yükün 1.000 olduğu durumdaki plastik kesit sayısı kirişlerde 102, kolonlarda 78 adet olmak üzere toplam 180 olurken, Şekil 6.19'dan da görüldüğü gibi sistemdeki ilk plastik kesitin meydana geldiği andaki yük parametresi 0.472'e eşit olmaktadır.



Şekil 6.19 : Farklı performans seviyelerine ait plastik şekildeğiştirme sınır değerlerinin ilk aşıldığı plastik kesit yerleri.

Hemen kullanım performans seviyesine ait plastik dönme sınırlarının ilk aşıldığı andaki kesit olan 2.kattaki C1-C2 aksları arasındaki kirişin sol ucundaki plastik dönme $\Phi = 0.005$ 'e ulaştığında, ikinci mertebe limit yük parametresi 0.689'a eşit olmakta, bu duruma ait plastik kesit sayıları ise kirişlerde 28, kolonlarda 2 olmak üzere toplam 30'a eşit olmaktadır. Can güvenliği performans seviyesine ait plastik dönme sınırlarının ilk aşıldığı andaki kesit olan 4.kattaki C1 kolonunun üst ucundaki plastik dönme $\Phi = 0.0075$ 'e ulaştığında, ikinci mertebe limit yük parametresi 0.972'e eşit olmakta, bu duruma ait plastik kesit sayıları kirişlerde 85, kolonlarda 58 olmak üzere toplam 143'e eşit olmaktadır. Plastik dönmelerin göçmenin önlenmesi performans seviyesine göre sınırlandırılması durumunda ise plastik dönme istemleri zaten bu sınırların altında kaldığı için bu performans seviyesine ait plastik dönme sınırları aşılmamaktadır.

6.4.5 2007 deprem yönetmeliğindeki birim şekildeğiştirme ek kısıtlamaları ile optimum boyutlandırma

Önerilen yöntemin uygulama sınırlarını genişletmek amacıyla, 6.4.1'de 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sistem ile 6.4.2'de 1975 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sistemde, 2007 deprem yönetmeliğinde öngörülen farklı kesit hasar

sınır değerleri için ek kısıtlamalar gözönüne alınarak optimum boyutlandırmalar tekrarlanmıştır.

Bu amaçla, iki farklı yönetmeliğe ait yatay yüklere göre optimum boyutlandırılan yapı sistemleri için, öncelikle beton ve donatı çeliğinin birim şekildeğiştirmeleri farklı hasar seviyelerine ait birim şekildeğiştirme kapasiteleri ile karşılaştırılarak kesit düzeyinde taşıyıcı sistem performansları belirlenecek ve bu sonuçlar kullanılarak yine 2007 deprem yönetmeliğine göre sistem performans düzeyi hesaplanacaktır. Daha sonra sözkonusu sistem için bir üst performans düzeyine ait sınır değerler kullanılarak ek kısıtlamaların gözönüne alınmasıyla optimum boyutlandırma tekrarlanmıştır. Bu uygulamadaki amaç, önerilen optimum boyutlandırma yönteminde 2007 deprem yönetmeliğinde verilen şekildeğiştirme sınırlarının da ek kısıtlama olarak gözönüne alınabileceğini göstermek ve ek kısıtlamalı optimum boyutlandırma hesapları ile elde edilen sonuçları genişletmektir.

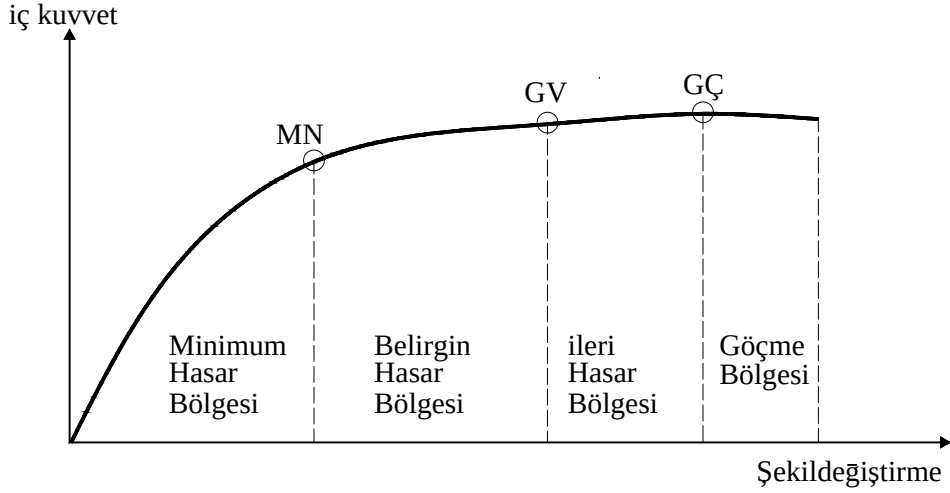
6.4.5.1 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sistem

6.4.1’de 2007 deprem yönetmeliği yatay yüklerine göre optimum boyutlandırılan sistemi oluşturan kesitler için, kesit düzeyinde taşıyıcı sistem performansları 2007 deprem yönetmeliğinde verilen ve Çizelge 6.38’de gösterilen sınırlar ve bu sınırların belirlediği Şekil 6.20’de gösterilen hasar bölgeleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.38’de TDY-2007 deprem yönetmeliğinde öngörülen farklı hasar sınırları için beton ve beton çeliğine ait birim şekildeğiştirme üst sınırları verilmiştir. Önerilen optimum boyutlandırma yönteminde problemin tasarım değişkenleri olan plastik kesit dönmelerine ait sınır değerler için ek kısıtlama denklemleri yazılarak boyutlandırma yapılmaktadır. Bu amaçla, beton ve beton çeliği birim şekildeğiştirme sınır değerlerinden ilgili betonarme kesitin karakteristiklerine bağlı olarak her kesit için ayrı ayrı hesaplanan plastik dönme sınır değerlerine geçilmektedir.

Çizelge 6.38 : Farklı kesit hasar sınırlarına ait birim şekildeğiştirme üst sınırları.

Kesit Hasar Sınırı	ε_{cu} (Beton)	ε_s (Beton çeliği)
Minimum Hasar (MN)	0.0035	0.010
Güvenlik Sınırı (GV)	0.0135	0.040
Göçme Sınırı (GÇ)	0.0180	0.060



Şekil 6.20 : Kesit hasar sınırları ve hasar bölgeleri.

Buna göre, 2007 deprem yönetmeliği yatay yükleri için optimum boyutlandırılan sistemin mevcut durumu için yapılan kesit düzeyinde taşıyıcı sistem performansı değerlendirmesi ile kesit hasar düzeyleri dağılımı için, 1. ve 2. kat kolonlarının tamamı minimum hasar bölgesinde, 3. ve 4. kat kolonlarının % 26.7'si belirgin hasar bölgesinde, 5. ve 6. kat kolonlarının % 40'ı belirgin hasar bölgesinde, 1. ve 6. kat kirişlerinin % 27.3'ü belirgin hasar bölgesinde, diğer katlardaki kirişlerin ise % 45.4'ü belirgin hasar bölgesinde, bunların dışındaki diğer kesitler ise minimum hasar bölgesindedir. Kesit hasar bölgesi değerlendirmesinden, sistemin 2007 deprem yönetmeliği can güvenliği performans seviyesini sağladığı ancak hemen kullanım performans seviyesini sağlamadığı görülmüştür. Alt ve üst kesitlerinin ikisinde birden minimum hasar sınırı aşılmış olan kolonlar için, bu kolonların taşıdığı kesme kuvvetinin ilgili kattaki tüm kolonlar tarafından taşınan kesme kuvvetine oranının % 30'un altında olduğu kontrolü yapılmıştır.

Yukarıda açıklandığı gibi, bu durum için sistemde hemen kullanım performans seviyesine ulaşmak için minimum hasar sınırına ait birim şekildeğiştirme sınırlarının ek kısıtlama olarak gözönüne alınmasıyla yeniden optimum boyutlandırma yapılmış ve elde edilen yeni enkesit boyutları Çizelge 6.39 ve Çizelge 6.40'da gösterilmiştir. Bu ek kısıtlama durumuna ait yapı ağırlığı ise 4392.15 kN olarak bulunmuştur.

Sonuçlardan görüldüğü gibi, 6.4.1'de 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sistem, yine aynı yönetmeliğin minimum hasar sınırına ait sınır değerler ile ek kısıtlama denklemleri yazılarak yeniden

boyutlandırılmış, buna göre yapı ağırlığı % 6.84 oranında, yatay yük taşıma kapasitesi de % 6.9 oranında artmıştır.

Çizelge 6.39 : 2007 deprem yönetmeliği minimum hasar sınırına ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kolonlar).

Kolonlar	b/h (m/m)
A1 (1,2.kat)	0.3689/0.3689
A1 (3,4.kat)	0.3593/0.3593
A1 (5,6.kat)	0.3047/0.3047
A2,B2,C2 (1,2.kat)	0.3422/0.6844
A2,B2,C2 (3,4.kat)	0.2853/0.5706
A2,B2,C2 (5,6.kat)	0.2419/0.4838
B1,C1 (1,2.kat)	0.5268/0.3512
B1,C1 (3,4.kat)	0.4691/0.3127
B1,C1 (5,6.kat)	0.4533/0.3022

Çizelge 6.40 : 2007 deprem yönetmeliği minimum hasar sınırına ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kirişler).

Kirişler	b/h (m/m)
A,B,C Aksları	0.3651/0.5476
1,2 Aksları	0.2789/0.5578

6.4.5.2 1975 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sistem

6.4.2’de 1975 deprem yönetmeliği yatay yükleri için optimum boyutlandırılan sistem mevcut bir yapı gibi düşünülerek, sisteme 2007 deprem yönetmeliği yatay yüklerinin etkimesi durumunda sistemi oluşturan kesitler için, kesit düzeyinde taşıyıcı sistem performansları 2007 deprem yönetmeliğinde verilen ve Çizelge 6.38’de gösterilen sınırlar ve bu sınırların belirlediği Şekil 6.20’de gösterilen hasar bölgeleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Buna göre, yukarıda açıklandığı gibi kesit düzeyinde yapılan taşıyıcı sistem performansı değerlendirmesi ile kesit hasar seviyeleri dağılımı için, 1. ve 2. kat kolonlarının % 33.3’ü minimum hasar bölgesinde, % 66.7’si belirgin hasar bölgesinde, diğer kat kolonlarının % 100’ünün belirgin hasar bölgesinde, 1., 2. ve 6.

kat kirişlerinin % 27.3'ü ileri hasar bölgesinde, % 72.7'si belirgin hasar bölgesinde, diğer katlardaki kirişlerin ise % 45.4'ü ileri hasar bölgesinde, % 54.6'sı belirgin hasar bölgesindedir. Kesit hasar bölgesi değerlendirmesine göre sistem 2007 deprem yönetmeliği can güvenliği performans seviyesini sağlamamaktadır.

Yukarıda açıklandığı gibi, bu durum için sistemde can güvenliği performans seviyesini sağlayacak şekilde can güvenliği sınırına ait birim şekildeğiştirme sınırlarından yararlanılarak Bölüm 2.6.2'de verilen yöntem ile hesaplanan plastik dönme sınırlarının ek kısıtlama olarak gözönüne alınmasıyla yeniden boyutlandırılmış ve elde edilen yeni enkesit boyutları Çizelge 6.41 ve Çizelge 6.42'de gösterilmiştir. Bu ek kısıtlama durumuna ait yapı ağırlığı ise 3962.33 kN olarak bulunmuştur.

Sonuçlardan görüldüğü gibi, 6.4.2'de 1975 deprem yönetmeliği yatay yükleri için optimum boyutlandırılan sistem, mevcut bir yapı gibi kabul edilerek 2007 deprem yönetmeliği yatay yüklerinin etkimesi durumunda yine aynı yönetmeliğin güvenlik sınırına ait sınır değerler ile ek kısıtlama denklemleri yazılarak yeniden boyutlandırma yapıldığında, can güvenliği performans seviyesinin sağlatılması için 3453.55 kN olan yapı ağırlığının % 14.73 oranında arttırılması gerekmektedir.

Çizelge 6.41 : 1975 deprem yönetmeliği yatay yüklerine göre optimum boyutlandırılan sistem için 2007 deprem yönetmeliği güvenlik sınırına ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kirişler).

Kirişler	b/h (m/m)
A,B,C Aksları	0.3397/0.5096
1,2 Aksları	0.2711/0.5422

Çizelge 6.42 : 1975 deprem yönetmeliği yatay yüklerine göre optimum boyutlandırılan sistem için 2007 deprem yönetmeliği güvenlik sınırına ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kolonlar).

Kolonlar	b/h (m/m)
A1 (1,2.kat)	0.3613/0.3613
A1 (3,4.kat)	0.3279/0.3279
A1 (5,6.kat)	0.2961/0.2961
A2,B2,C2 (1,2.kat)	0.3034/0.6068
A2,B2,C2 (3,4.kat)	0.2781/0.5562
A2,B2,C2 (5,6.kat)	0.2532/0.5064
B1,C1 (1,2.kat)	0.5096/0.3397
B1,C1 (3,4.kat)	0.4544/0.3029
B1,C1 (5,6.kat)	0.4118/0.2745

Bölüm 6.4.2’de 1975 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sisteme 2007 deprem yönetmeliği yatay yüklerinin etkimesi durumunda, 2007 deprem yönetmeliği minimum hasar sınırına ait sınır değerler kullanılarak da ek kısıtlamalı optimum boyutlandırma yapılmıştır.

Bu durumda, sistem geometrisi, yatay yükler, ek kısıtlama denklemleri gibi bütün parametreler aynı olduğu için Bölüm 6.4.5.1’de 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için boyutlandırılan sistemle aynı optimum sonuçlara ulaşılmış olup, aynı performans düzeyinin sağlatılması için yapı ağırlığının 3453.55 kN değerinden 4392.15 kN değerine çıkarılması yani % 27.2 oranında arttırılması gerekmektedir.

6.4.6 Görelî kat ötelemesi ek kısıtlamaları gözönüne alınarak optimum boyutlandırma

Yerdeğiştirme (görelî kat ötelemeleri) için öngörülen sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılmasının optimum boyutlandırmaya etkisi çok katlı çok açıklıklı bir uygulama olan bu örnek için aşağıda açıklanmıştır.

TDY-2007’de farklı kesit hasar seviyelerine ait görelî kat ötelemeleri için verilen sınır değerler Çizelge 6.23’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.23 : Farklı kesit hasar sınırlarına ait görelî kat ötelemesi sınırları.

Kesit Hasar Sınırı	$(\delta)_{\text{lim}}$
Minimum Hasar (MN)	0.01
Güvenlik Sınırı (GV)	0.03
Göçme Sınırı (GÇ)	0.04

Bölüm 2.6.3’de açıklandığı gibi, dış yükler ve birim plastik şekildeğiştirme parametreleri için ayrı ayrı yapılan hesap sonucunda sisteme ait her iki doğrultudaki yerdeğiştirmeler de iç kuvvetlere benzer şekilde elde edilmektedir. Buna göre toplam yerdeğiştirmelerden yararlanılarak hesaplanan görelî kat ötelemelerine ait ek kısıtlama denklemleri aşağıdaki denklem takımı yardımıyla kısıtlama denklemlerine eklenebilir.

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{1xi}) + (\delta_{1x0}) \right| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (6.8)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{1yi}) + (\delta_{1y0}) \right| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (6.8a)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{2xi}) + (\delta_{2x0}) \right| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (6.9)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{2yi}) + (\delta_{2y0}) \right| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (6.9a)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{3xi}) + (\delta_{3x0}) \right| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (6.10)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{3yi}) + (\delta_{3y0}) \right| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (6.10a)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{4xi}) + (\delta_{4x0}) \right| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (6.11)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{4yi}) + (\delta_{4y0}) \right| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (6.11a)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{5xi}) + (\delta_{5x0}) \right| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (6.12)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{5,yi}) + (\delta_{5,y0}) \right| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (6.12a)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{6,xi}) + (\delta_{6,x0}) \right| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (6.13)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (\delta_{6,yi}) + (\delta_{6,y0}) \right| \leq (\delta)_{\text{lim}} \quad (6.13a)$$

Yukarıdaki denklemlerde,

n : plastik kesit sayısını,

$\delta_{1,xi}, \dots, \delta_{6,xi}$: 1.kattan 6.kata kadar her bir katta x doğrultusunda dış yükler sıfıra eşitken her bir birim plastik şekildeğiştirme parametresi için ayrı ayrı yapılan hesap sonucunda bulunan maksimum görelî kat ötelemesi değerini,

$\delta_{1,x0}, \dots, \delta_{6,x0}$: 1.kattan 6.kata kadar her bir katta x doğrultusunda birim plastik şekildeğiştirme parametreleri sıfıra eşitken dış yükler için yapılan hesap sonucunda bulunan maksimum görelî kat ötelemesi değerini,

$\delta_{1,yi}, \dots, \delta_{6,yi}$: 1.kattan 6.kata kadar her bir katta y doğrultusunda dış yükler sıfıra eşitken her bir birim plastik şekildeğiştirme parametresi için ayrı ayrı yapılan hesap sonucunda bulunan maksimum görelî kat ötelemesi değerini,

$\delta_{1,y0}, \dots, \delta_{6,y0}$: 1.kattan 6.kata kadar her bir katta y doğrultusunda birim plastik şekildeğiştirme parametreleri sıfıra eşitken dış yükler için yapılan hesap sonucunda bulunan maksimum görelî kat ötelemesi değerini,

$(\delta)_{\text{lim}}$: Görelî kat ötelemeleri için Çizelge 6.23’de verilen sınır değerleri göstermektedir.

Bölüm 6.4.1’de 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yüklere göre optimum boyutlandırılan yapı sisteminde öncelikle, hangi hasar sınırına ait sınır değerlerin gözönüne alınacağını belirlemek amacıyla, mevcut boyutlar için görelî kat ötelemeleri açısından bir değerlendirme yapılmış ve minimum hasar sınırına ait 0.01 sınır değerinin, x doğrultusunda 6.katta (0.0112) , y doğrultusunda ise 5.katta (0.0109) ve 6.katta (0.0131) aşıldığı gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlardan hareketle, minimum hasar sınırına ait görelî kat ötelemesi sınır değeri olan 0.01 değeri kullanılarak, her görelî kat ötelemesi için toplam yerdeğıştirmeler ve kat yüksekliklerinden yararlanarak iki eşitsizlik içerecek şekilde ek kısıtlama denklemleri yazılmış ve optimum boyutlandırma tekrarlanmıştır. Görelî kat ötelemesi ek kısıtlamaları gözönüne alınarak yapılan optimum boyutlandırma sonucunda elde edilen enkesit boyutları Çizelge 6.43 ve Çizelge 6.44’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.43 : Minimum hasar sınırına ait görelî kat ötelemesi ek kısıtlamaları gözönüne alınarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kolonlar).

Kolonlar	b/h (m/m)
A1 (1,2.kat)	0.3791/0.3791
A1 (3,4.kat)	0.3629/0.3629
A1 (5,6.kat)	0.3341/0.3341
A2,B2,C2 (1,2.kat)	0.3814/0.7628
A2,B2,C2 (3,4.kat)	0.3420/0.6840
A2,B2,C2 (5,6.kat)	0.2907/0.5814
B1,C1 (1,2.kat)	0.5865/0.3910
B1,C1 (3,4.kat)	0.5426/0.3617
B1,C1 (5,6.kat)	0.5239/0.3493

Çizelge 6.44 : Minimum hasar sınırına ait görelî kat ötelemesi ek kısıtlamaları gözönüne alınarak yapılan optimum boyutlandırma sonuçları (Kirişler).

Kirişler	b/h (m/m)
A,B,C Aksları	0.3583/0.5375
1,2 Aksları	0.2794/0.5588

Sonuçlardan görüldüğü gibi, görelî kat ötelemelerinin minimum hasar sınırına ait sınır değerler ile kısıtlanması durumunda, bu sınırların sağlatılması için yapı ağırlığının 4110.82 kN’dan 4655.34 kN’a çıkarılması yani % 13.25 oranında artması gerekmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Çalışmanın Uygulama Alanı

Betonarme uzay çerçeve sistemlerin ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılmaları amacıyla geliştirilen ardışık yaklaşım yöntemi, Bölüm 2.1’de belirtilen varsayımlar altında, bütün betonarme düzlem ve uzay çerçeve sistemlere uygulanabilmektedir.

7.2 Sonuçlar

Betonarme uzay çerçeve sistemlerin ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılmaları amacıyla geliştirilen ardışık yaklaşım yönteminin ve bu yöntemin sayısal uygulamalarının verildiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1) Yapı sistemlerinin hesabında doğrusal yöntemler yerine, malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan yöntemlerin kullanılması, yapı davranışının gerçeğe daha yakın izlenmesine ve daha ekonomik yapı tasarımına olanak vermektedir.

2) Bu çalışmada [3]’te matris kuvvet yöntemi kullanılarak önerilen, [1]’de matris deplasman yöntemi kullanılarak çelik uzay çerçeveler için geliştirilen ve [4]’te düzlem çerçeve sistemlerinin birinci mertebe limit yüke göre hesabına yönelik iyileştirmeler yapılan minimum ağırlıklı boyutlandırma yöntemleri esas alınarak, betonarme uzay çerçevelerin ikinci mertebe limit yük için optimum boyutlandırılmasına yönelik olarak bir ardışık yaklaşım yöntemi geliştirilmiştir.

3) Geliştirilen yöntemde, betonarme yapıların taşıyıcı sistem tasarımı ile ilgili istenen kısıtlamaların göz önüne alınabilmesine ek olarak, ulusal ve uluslararası deprem yönetmeliklerinde öngörülen hasar ve performans düzeylerine bağlı olarak plastik dönme ve göreceli yerdeğiştirme kısıtlamaları da göz önüne alınarak optimum

boyutlandırma yapılabilir. Böylece, göz önüne alınan ek kısıtlamaların amaç fonksiyona ve enkesit boyutlarına etkileri de görülebilmektedir.

4) Önerilen ardışık yaklaşım yöntemi birbirini izleyen boyutlandırma ve sistem hesabı aşamalarından oluşmaktadır. Buna göre, ardışık yaklaşımın her adımında tasarım değişkenlerinin ve amaç fonksiyonun katsayılarının değerleri bir önceki boyutlandırma adımından, ikinci mertebe limit yük parametresi, ikinci mertebe limit yüke ait plastik kesit yerleri ve bu plastik kesitlere ait akma vektörü doğrultuları ise bir önceki adımın sistem hesabı aşamasından alınmaktadır.

5) Her adımda bir önceki adımda boyutlandırılan (başlangıçta ön boyutlandırılan) sistem, malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan teoriye göre ikinci mertebe elastoplastik teoriye göre hesaplanarak, ikinci mertebe limit yük parametresi, ikinci mertebe limit yüke ait plastik kesit yerleri ve akma koşulu düzlemlerinin katsayıları elde edilmektedir. Daha sonra, uzay çerçeve sistemi, akma koşulu kısıtlamalarının oluşturulabilmesi için, dış yükler ve plastik kesitlerdeki birim plastik şekildeğiştirme parametreleri için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Kritik kesitlerdeki normal kuvvetler ve her iki yöndeki eğilme momentlerinin süperpozisyonu ile akma koşulu kısıtlamaları oluşturulmakta ve optimizasyon aşamasına geçilmektedir.

6) Optimizasyon hesapları, problemin fizik yapısına göre algoritması yeniden düzenlenen Simplex yöntemi kullanılarak yapılmakta ve tasarım değişkenleri ile amaç fonksiyonun optimum değerlerinin bulunmasından sonra, betonarme kesitler için elde edilen enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar kullanılarak yeni enkesit boyutları elde edilmektedir. Ardışık yaklaşıma, elde edilen yeni enkesit boyutları için benzer şekilde devam edilmekte ve ardışık iki adımdaki tasarım değişkenleri ve amaç fonksiyon katsayıları birbirine yeter derecede yakın olunca hesaba son verilmekte ve optimum çözüm elde edilmektedir.

7) Önerilen boyutlandırma yöntemi kullanılarak betonarme uzay çerçeveler ikinci mertebe limit yük için, yapılan varsayımlar altında, optimum kesit yüksekliği veya donatı oranı için optimum boyutlandırılabilir.

8) Önerilen yöntem ile betonarme kesitlerin optimum boyutlandırması yapılırken, amaç fonksiyon olarak enkesit yüksekliği seçilebileceği gibi,

yönetmeliklerdeki minimum koşulları sağlayan sabit enkesit boyutları için donatı oranları da seçilebilmektedir.

9) Yöntemin sayısal uygulamaları için, birbirlerinin okuyacağı formatta giriş ve çıkış dosyaları oluşturabilen ve akış diyagramına uygun biçimde bütünleşik olarak çalışabilen alt programlar geliştirilmiştir. Doğrusal olmayan sistem hesabı EPARCS programı yardımıyla yapıldıktan sonra, optimizasyon aşamasına geçilmesi için gerekli amaç fonksiyon katsayılarının ve akma koşulu kısıtlamalarının oluşturulması için YCR3D (Yield Condition Restraints-3D) programı geliştirilmiştir. Bu program yardımıyla uzay çerçeve sistemi, dış yükler ve plastik kesitlerdeki birim plastik şekildeğiştirme parametreleri için ayrı ayrı hesaplanarak kritik kesitlerdeki normal kuvvetler ve her iki yöndeki eğilme momentleri elde edilmekte ve optimizasyon aşamasına geçilmesi için gerekli akma koşulu kısıtlamaları ve amaç fonksiyonun katsayıları oluşturulmaktadır. Böylece optimizasyon hesaplarında kullanılacak hesap tabloları hazır hale gelmektedir.

10) Optimizasyon hesapları, problemin özelliklerine göre yeniden düzenlenen Simplex yöntemi kullanılarak, SIM programı yardımıyla yapılmaktadır. Bu program [1]'de geliştirilmiş olup, bu çalışmada önerilen yöntemin özelliklerine bağlı olarak üzerinde bazı değişiklikler yapılmıştır.

11) Optimizasyon hesapları yapılarak, tasarım değişkenlerinin yeni değerleri elde edildikten sonra, yapı sistemini oluşturan kolon ve kirişlerin yeni hesap adımına esas olacak boyutları, ilgili bölümdeki enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar kullanılarak geliştirilen KESIT programı yardımıyla elde edilmektedir.

12) Sayısal uygulamalar bölümündeki ilk örnek olan tek katlı betonarme düzlem çerçeve uygulaması, bu çalışmada önerilen yöntemin hesap ve optimizasyon adımlarında ulaşılan sonuçların ve matematik formülasyonunun doğruluğunu kontrol etmek amacıyla yapılmıştır. Sonuçları karşılaştırma ve doğrulama amacı taşıyan Uygulama 1A için sistem geometrisi, dış yükler ve amaç fonksiyon olan yapı ağırlığının ifadesi [4]'teki uygulamadan alınmış ve ulaşılan sonuçların aynı olduğu görülmüştür.

13) Uygulama 1B 'de ise aynı sistem, önerilen yöntem kullanılarak ve yöntemi açıklamak amacıyla hesap aşamaları detaylı olarak anlatılarak, farklı amaç fonksiyonlar ve ek kısıtlamalar altında boyutlandırılmıştır.

- a. İlk olarak önerilen yöntem ile sistemin birinci mertebe limit yüküne göre elde edilen plastik kesit dağılımı esas alınarak enkesit optimizasyonu yapılmış, seçilen enkesit tipleri ve donatı oranları için optimum enkesit boyutları ve yapı ağırlığı elde edilmiştir. Buna göre hesaplanan yapı ağırlığı Uygulama 1A'da bulunan değere göre % 38.5 oranında artış göstermektedir. Bu sonucun sebepleri arasında, Uygulama 1B'de sistemin limit yükünün 1.00'e eşit olacak şekilde boyutlandırılması, plastik kesit yerlerinin Uygulama 1A'dan farklı olarak her adımda bir önceki adımın analiz aşamasından alınması, basit eğilme etkisine ek olarak normal kuvvet etkisinin de, ankastrelik uç kuvvetlerinin hesabında, akma koşulu kısıtlama denklemlerinin oluşturulmasında ve enkesit boyutlarının hesabında dikkate alınarak bileşik eğilme etkisi için hesap yapılması yer almaktadır.
- b. Amaç fonksiyon olarak donatı optimizasyonu seçilerek de optimum boyutlandırma yapılmıştır. Bu amaçla, ülkemizde geçerli olan yönetmeliklerde verilen minimum enkesit koşullarını sağlayan enkesit boyutları için donatı oranları optimize edilerek enkesit optimizasyonu yapılan sisteme göre %33.4 oranında daha hafif bir yapı sistemi elde edilmiştir.
- c. Farklı beton ve donatı sınıflarının optimum boyutlandırmaya etkileri incelenmiş, bu amaçla sistemde beton ve donatıya ait C30/S420 malzeme dayanımlarının yanında, C30/S220, C20/S420 ve C20/S220 malzeme dayanımları için de optimum boyutlandırma yapılmıştır. Yapılan boyutlandırmalardan elde edilen sonuçlara göre, beton sınıfının aynı kalıp, donatı karakteristik dayanımının azalmasının yapı ağırlığını % 57.04 oranında artırdığını, donatı sınıfının aynı kalıp beton dayanımının azalmasının ise yapı ağırlığını % 28.16 oranında artırdığını göstermektedir. Bu sonuçlardan, donatı sınıfının optimum boyutlandırmaya etkisinin beton sınıfına göre daha etkin olduğu görülmektedir. Hem donatı hem de beton dayanımının beraber azalması ise yapı ağırlığını % 88.19 oranında arttırmaktadır.
- d. Optimum boyutlandırma probleminde ek kısıtlamaların nasıl gözönüne alınacağı ve kısıtlama denklemlerine nasıl ekleneceğini açıklamak

amacıyla yapılacak işlemler, plastik dönmeler ve yerdeğiştirme (görelı kat ötelemesi) ek kısıtlamaları için ayrı ayrı seçilen sınır değerler için detaylı olarak açıklanmıştır. Plastik dönme ve görelı kat ötelemesi istemlerinin gelişigüzel seçilen sınır değerler ile sınırlandırılması durumunda, plastik dönme ek kısıtlamaları için yapı ağırlığında bu ek kısıtlama koşulunun sağlatılması dolayısıyla % 7.49 oranında bir artış olurken, görelı kat ötelemesi istemleri öngörülen sınır değerlerin altında olduğu için optimum boyutlandırmada söz konusu ek kısıtlamalara bağlı olarak bir değişiklik olmamış ve aynı sonuçlara ulaşılmıştır.

14) Sayısal uygulamalar bölümündeki ikinci örnek olan tek katlı tek açıklıklı betonarme uzay çerçeve, farklı boyutlandırma kriterlerinin ve ek kısıtlamalar yazılmasının sonuca etkisini görmek amacıyla geliştirilen yöntem kullanılarak boyutlandırılmıştır. Ulaşılan sonuçlar aşağıdaki alt maddelerde açıklanmıştır.

- a. İkinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırmaya ek olarak, birinci mertebe limit yüke göre de benzer şekilde optimum olarak boyutlandırma yapılmış ve bu durumda yapı ağırlığının %15.53 oranında azaldığı görölmüştür. Yapı ağırlığındaki bu azalma limit yük parametresinin başka bir deyişle sistemin göçme güvenliğinin %22.30 oranında azalmasıyla mümkün olmaktadır. Sonuç olarak, ikinci mertebe limit yüke göre yapılan tasarımda, yapı göçme güvenliğindeki artışın optimum enkesit boyutları ve yapı ağırlığının artışı ile sağlandığı görölmektedir.
- b. Önerilen optimum boyutlandırma yönteminde plastik dönmeler için farklı sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılmasının sonuçlar ve yapı ağırlığı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla plastik dönme kapasiteleri farklı performans seviyelerine ait sınır değerler ile kısıtlanarak optimizasyon yapılmış ve bu örnek için plastik dönmelerin hemen kullanım performans seviyesine göre sınırlandırılması durumunda yapı ağırlığının %1.974 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Plastik dönmelerin can güvenliği ve daha yukarı performans seviyelerine göre sınırlandırılması durumunda bu uygulama için plastik dönme istemleri zaten bu sınırların altında olduğundan ikinci mertebe limit yüke göre

kısıtlama yazılmadan optimum boyutlandırılan sistem ile aynı sonuçlara ulaşılmaktadır.

- c. İkinci mertebe limit yüke göre optimum kesit karakteristik plastik momentleri bulunarak boyutlandırılan bir katlı betonarme uzay çerçevenin enkesit boyutlarını yapı maliyeti açısından değerlendirmek amacıyla, betonarme enkesit boyutları ve donatı oranının taşıyıcı eleman maliyetine etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, enkesit maliyetine donatı oranının etkisinin daha belirgin olduğu görülmüştür.
- d. Son yıllarda optimizasyon konusunda yapılan çalışmalarda yararlanılan yöntemlerden biri olan duyarlılık analizi (sensitivity analysis) yöntemine göre bu uygulama için değerlendirme yapılmış ve enkesit boyutlarının küçük değişimleri karşısında, tasarım değişkenlerinin ve yapı ağırlığının değişimlerinin de aynı küçük mertebede kaldığı, sonuçlarda büyük değişimler olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, boyutlandırmayı etkileyen faktörlerden yatay yüklerdeki değişimlerin ikinci mertebe limit yük parametresi üzerindeki etkisi incelenmiş, yatay yüklerdeki % 5'lik bir artımın, optimum boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe limit yük parametresini % 4.8 oranında azalttığı ve mertebe açısından anlamlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sonuçlardan yapı optimizasyonu probleminin tasarım değişkenlerine ve yüklere karşı çok hassas olmadığı görülmüştür.
- e. Amaç fonksiyon olarak donatı oranları da göz önüne alınmış, sistemi oluşturan kolon ve kiriş boyutları yönetmeliklerdeki minimum enkesit boyutu kısıtlamalarını da sağlayacak şekilde seçilerek kesitlerdeki donatı oranları optimize edilmiştir.

15) Sayısal uygulamalar bölümündeki son örnek olan altı katlı çok açıklıklı betonarme uzay çerçeve uygulaması için, sistem geometrisi ve düşey yükler [8]'den alınmış, yatay yüklerin hesabı açısından farklı yaklaşımlar göz önünde bulundurularak çeşitli optimum boyutlandırmalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki alt maddelerde açıklanmıştır.

- a. Altı katlı çok açıklıklı betonarme uzay çerçevede yatay yükler birinci derece deprem bölgesi için sistemin dinamik karakteristiklerine bağlı

olarak hem 2007 hem de 1975 Deprem Yönetmelikleri'ne göre hesaplanarak ayrı ayrı ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırma yapılmış, deprem yüklerinin güncel yönetmeliğe göre hesaplanması durumu, yapı ağırlığında % 19.03 oranında artışa sebep olmuştur.

- b. Bu uygulama için ayrıca beton enkesit boyutları ve sistemin yatay yükleri için [8]'de yer alan sistemle aynı değerler esas alınmış, amaç fonksiyon olarak ise donatı oranları göz önüne alınarak optimizasyon yapılmıştır.
- c. Plastik dönmeler için ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde öngörülen farklı sınır değerler ile ek kısıtlamalar gözönüne alınmasının sonuçlar ve yapı ağırlığı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle ATC-40 yönetmeliğinde öngörülen plastik dönme kapasiteleri için farklı performans seviyelerine ait sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılarak optimum boyutlandırma yapılmıştır. Buna göre, plastik dönmelerin hemen kullanım performans seviyesine göre sınırlandırılması durumunda yapı ağırlığının %8.97 oranında arttığı gözlenmiştir. Plastik dönmelerin can güvenliği performans seviyesine göre sınırlandırılması durumunda yapı ağırlığının %2.25 oranında arttığı, plastik dönmelerin göçmenin önlenmesi performans seviyesine göre sınırlandırılması durumunda ise, plastik şekil değiştirme istemleri zaten bu sınırların altında olduğundan ikinci mertebe limit yüke göre kısıtlama yazılmadan optimum boyutlandırılan sistem ile aynı yapı ağırlığı elde edilmiştir.
- d. Sistemin ek kısıtlama yazılmadan ikinci mertebe limit yüke göre optimum boyutlandırılması durumunda, sistemdeki ilk plastik kesitin meydana geldiği andaki yük parametresi 0.472'ye eşit olmaktadır. Hemen kullanım performans seviyesine ait plastik dönme sınırlarının ilk aşıldığı andaki ikinci mertebe limit yük parametresi ise 0.689'a eşit olmakta, bu duruma ait plastik kesit sayıları kirişlerde 28, kolonlarda 2 olmak üzere toplam 30'a eşit olmaktadır. Can güvenliği performans seviyesine ait plastik dönme sınırlarının ilk aşıldığı andaki ikinci mertebe limit yük parametresi 0.972'e eşit olmakta, bu duruma ait plastik kesit sayıları kirişlerde 85, kolonlarda 58 olmak üzere toplam 143'tür.

- e. Boyutlandırılan sistemlerin performansını değerlendirmek üzere, 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sistem ile 1975 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sistem için ayrı ayrı olmak üzere, 2007 deprem yönetmeliğinde öngörülen farklı kesit hasar sınır değerlerinden yararlanılarak belirlenen plastik dönme sınır değerleri için de ek kısıtlamalar gözönüne alınarak optimum boyutlandırmalar tekrarlanmıştır.
- f. 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sistemin kesit düzeyinde taşıyıcı sistem performansının değerlendirmesi sonucunda, kesit hasar düzeylerinin dağılımı için, 1. ve 2. kat kolonlarının %100'ünün minimum hasar bölgesinde, 3. ve 4. kat kolonlarının % 26.7'sinin belirgin hasar bölgesinde, 5. ve 6. kat kolonlarının % 40'ının belirgin hasar bölgesinde, 1. ve 6. kat kirişlerinin % 27.3'ünün belirgin hasar bölgesinde, diğer katlardaki kirişlerin ise % 45.4'ünün belirgin hasar bölgesinde, bunların dışındaki diğer kesitlerin minimum hasar bölgesinde olduğu gözlenmiştir. Kesit hasar bölgesi değerlendirmesinden ise sistemin, 2007 deprem yönetmeliği can güvenliği performans seviyesini sağladığı ancak hemen kullanım performans seviyesini sağlamadığı görülmüştür.
- g. Sistemde hemen kullanım performans seviyesine ulaşmak için minimum hasar sınırına ait birim şekildeğiştirme sınırlarının ek kısıtlama olarak gözönüne alınmasıyla yeniden boyutlandırma yapılmış ve bu sınırların sağlatılmasının yapı ağırlığında % 6.84 oranında artışa neden olduğu görülmüştür.
- h. 1975 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yükler için optimum boyutlandırılan sistem mevcut bir yapı gibi düşünülerek, yapıya 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yüklerin etkimesi durumunda, kesit düzeyindeki taşıyıcı sistem performansları 2007 deprem yönetmeliğinde verilen sınırlar ve bu sınırların belirlediği hasar bölgeleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Buna göre, kesit hasar düzeyleri dağılımı için, 1. ve 2. kat kolonlarının % 33.3'ü minimum hasar bölgesinde, % 66.7'si belirgin hasar bölgesinde, diğer kat kolonlarının % 100'ünün

belirgin hasar bölgesinde, 1., 2. ve 6. kat kirişlerinin % 27.3'ü ileri hasar bölgesinde, % 72.7'si belirgin hasar bölgesinde, diğer katlardaki kirişlerin ise % 45.4'ü ileri hasar bölgesinde, % 54.6'sı belirgin hasar bölgesinde olduğu, sistemin 2007 deprem yönetmeliği can güvenliği performans seviyesini sağlamadığı görülmüştür.

- i. Sistemde can güvenliği performans seviyesine ulaşmak için güvenlik sınırına ait birim şekildeğiştirme sınırlarının ek kısıtlama olarak gözönüne alınmasıyla yeniden optimum boyutlandırma yapılmış ve bu sınırların sağlatılmasının yapı ağırlığında % 14.73 oranında artışa neden olduğu görülmüştür.
- j. 1975 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yüklere göre optimum boyutlandırılan sisteme 2007 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan yatay yüklerin etkimesi durumunda, sistem hemen kullanım performans seviyesine ait sınır değerleri sağlayacak şekilde yeniden boyutlandırılmış, ve bu durumun yapı ağırlığında % 27.2 oranında artışa neden olmuştur.
- k. Çok katlı çok açıklıklı betonarme sistemde yerdeğiştirme (görelî kat ötelemeleri) için öngörülen sınır değerler ile ek kısıtlamalar yazılmasının optimum boyutlandırmaya etkisi de araştırılmıştır. Bu amaçla kısıtlama denklemlerine eklenecek olan kısıtlama denklemleri açıklanmış ve yapı sisteminde öncelikle hangi hasar sınırına ait sınır değerlerin gözönüne alınacağını belirlemek amacıyla, mevcut boyutlar için görelî kat ötelemeleri açısından bir değerlendirme yapılmıştır. Buna göre, minimum hasar sınırına ait 0.01 sınır değerinin, x doğrultusunda 6.katta (0.0112) , y doğrultusunda ise 5.katta (0.0109) ve 6.katta (0.0131) geçildiği gözlemlenmiştir. Minimum hasar sınırına ait görelî kat ötelemesi sınır değeri olan 0.01 değeri kullanılarak optimum boyutlandırma tekrarlanmış ve görelî kat ötelemelerinin minimum hasar sınırına ait sınır değerler ile kısıtlanması durumunda, bu sınırların sağlatılmasının yapı ağırlığında % 13.25 oranında bir artışa neden olduğu görülmüştür.

7.3 Öneriler

Bu çalışmada betonarme uzay çerçeve sistemlerin ikinci mertbe limit yüke göre optimum boyutlandırılmaları amacıyla bir ardışık yaklaşım yöntemi önerilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen yöntemin varsayımları, esasları, matematiksel formülasyonu, sayısal uygulamaları için kullanılan ve geliştirilen bilgisayar programları, yöntemin sayısal uygulamaları ve ulaşılan sonuçlar ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Bu konuda ileride yapılabilecek bazı akademik araştırma konuları ile ilgili öneriler ise bu alt bölümde ele alınmıştır.

1) Geliştirilen yöntemde ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde farklı performans seviyeleri için öngörülen plastik şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme sınırları ek kısıtlama olarak göz önüne alınabilmekte ve optimum boyutlandırma ikinci mertbe limit yüke göre yapılmaktadır. Bu çalışmada optimum boyutlandırılan sistemler üzerinde performans düzeyleri açısından çeşitli irdelemeler yapılarak, ilgili performans düzeylerinin sağlatılması için gerekli sınır değerler ek kısıtlama olarak gözönüne alınmıştır. Bu konu ile ilgili olarak, yapı sistemlerinin ikinci mertbe elastoplastik hesabını sonuna kadar devam ettirmeyip, plastik şekildeğiştirmeler ve yerdeğiştirmeler için farklı performans seviyelerine göre öngörülen sınır değerlere ait plastik kesitlerin oluştuğu anda analizi kesip, bu plastik kesit dağılımı için optimum boyutlandırma yapılarak, başlangıçta seçilen performans seviyesinin gerçekleşip gerçekleşmediği kontrol edilebilir ve performansa göre optimum boyutlandırma çalışmaları yapılabilir.

2) Yapılan çalışma betonarme uzay çubuk sistemleri kapsamakta olup, perdeli sistemleri de içerecek şekilde genişletilebilir.

3) Zeminin optimum boyutlandırmaya etkisini incelemek amacıyla, zemin cinsine bağlı olarak temeldeki dönme ve yerdeğiştirmelerin etkisi uygun modellerle sistem rijitlik matrisinde göz önüne alınarak, zemin-yapı etkileşimli yapı sistemlerinin optimum boyutlandırması da yapılabilir.

4) Yapı ve deprem mühendisliği problemlerinde gelecekte daha sık kullanım alanı bulacağı tahmin edilen zaman tanım alanında hesap yöntemlerinden yararlanılarak ve seçilen ivme kayıtları kullanılarak optimum boyutlandırma yapılacak şekilde konu genişletilebilir.

5) Kirişlerde mesnet ve açıklık donatılarının farklı olması durumu, farklı enkesit şekilleri ile farklı donatı yerleşim durumları da yöntemde kolaylıkla gözönüne alınabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Orakdöğen, E.** (1994). *Uzay Çubuk Sistemlerde İkinci Mertebe Limit Yük İçin Yapı Ağırlığını Minimum Yapan bir Boyutlandırma Yöntemi*, (Doktora Tezi), İTÜ.
- [2] **Özer, E.** (2004). *Yapı Sistemlerinin Lineer Olmayan Analizi Ders Notları*, İTÜ.
- [3] **Özer, E.** (1975). *İkinci Mertebe Limit Yük İçin Yapı Ağırlığını Minimum Yapan Bir Boyutlandırma Metodu*, (Doçentlik Tezi), İTÜ.
- [4] **Orakdöğen, E.** (2002). A Matrix Displacement Formulation for Minimum Weight Design of Frames. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 14, No. 4, pp: 473-489.
- [5] **Özer, E.** (1969). *Lineer Olmayan Sistemlerin Hesabı İçin Bir Metot*, (Doktora Tezi), İTÜ.
- [6] **Özer, E.** (1987). Determination of Second Order Limit Load by a Method of Load Increments. *Bulletin of the Technical University of İstanbul*, Vol. 40, No. 4, pp: 815-836.
- [7] **İrtem, E.** (1991). *Uzay Çubuk Sistemlerde İkinci Mertebe Limit Yükün Hesabı İçin Bir Yük Artımı Yöntemi*, (Doktora Tezi), İTÜ.
- [8] **Girgin, K.** (1996). *Betonarme Yapı Sistemlerinde İkinci Mertebe Limit Yükün ve Göçme Güvenliğinin Belirlenmesi İçin Bir Yük Artımı Yöntemi*, (Doktora Tezi), İTÜ.
- [9] **Çakıroğlu, A., Özer, E.** (1980). *Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler*. İstanbul: Matbaa Teknisyenleri Basımevi.
- [10] **Orakdöğen, E., Özer, E.** (1996). A Minimum Weight Design for Materially and Geometrically Nonlinear Framed Space Structures. *Bulletin of the Technical University of İstanbul*, Vol. 49, No. 1-2, pp: 107-134.
- [11] **Hajek, P., Frangopol, D.M.** (1991). Optimum Design of Shear-wall Systems. *Computers and Structures*, Vol. 38, No. 2, pp: 171-184.
- [12] **Dinno, K.S., Mekha, B.B.** (1993). Optimal Design of Reinforced Concrete Frames Based on Inelastic Analysis. *Computers and Structures*, Vol. 47, No. 2, pp: 245-252.
- [13] **Moharrami, H., Grierson, D.E.** (1993). Computer Otomated Design of Reinforced Concrete Frameworks. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 7, pp: 2036-2058.
- [14] **Kanagasundarm, S., Karihaloo, B.L.** (1991). Minimum Cost Design of Reinforced Concrete Structures. *Computers and Structures*, Vol. 41, No. 6, pp: 1357-1364.

- [15] **Ganzerli, S., Pantelides, C.P. ve Reaveley, L.D.** (2000). Performance-based Design Using Structural Optimization. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, pp: 1677-1690.
- [16] **Zou, X.K., Chan, C.M., Li, G., ve Wang, Q.** (2007). Multi Objective Optimization for Performance-based Design of Reinforced Concrete Frames. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133, No. 10, pp: 1462-1474.
- [17] **Lee, C., Ahn, J.** (2003). Flexural Design of Reinforced Concrete Frames by Genetic Algorithm. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, pp: 762-774.
- [18] **Camp, C.V., Pezeshk, S. ve Hansson, H.** (2003). Flexural Design of Reinforced Concrete Frames Using a Genetic Algorithm. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, pp: 105-115.
- [19] **ACI 318-77**, 2000. Building Code Requirements for Reinforced Concrete, *American Concrete Institute*, ABD.
- [20] **Balling, R.J., Yao, X.** (1997). Optimization of Reinforced Concrete Frames. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, pp: 193-202.
- [21] **Rajeev, S., Krishnamorthy, C.S.** (1998). Genetic Algorithm Based Methodology for Design Optimization of Reinforced Concrete Frames. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 13, Issue 1, pp: 63-74.
- [22] **Zou, X.** (2002). *Optimal Seismic Performance-based Design of Reinforced Concrete Buildings*, (Doktora Tezi), Hong-Kong University of Science and Technology, People's Republic of China.
- [23] **Curry, J.** (2002). *Optimal Design of Reinforced Concrete Slabs Using Yield Line Theory*, (Doktora Tezi), Queen's University of Belfast, United Kingdom.
- [24] **Abadi, F.F., Javad, M.** (1996). *Design Optimization of Three Dimensional Reinforced Concrete Structures*, (Doktora Tezi), University of Waterloo, Canada.
- [25] **Yao, X.** (1994). *Optimization of Reinforced Concrete Frames*, (Doktora Tezi), Brigham Young University, United Kingdom.
- [26] **Hassanain, M.A.** (1992). *Optimal Design of Reinforced Concrete Frames*, (Yüksek Lisans Tezi), King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia.
- [27] **Yang, M.F.** (1982). *Optimization of Reinforced Concrete Structures*, (Doktora Tezi), University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- [28] **Chan, C.M., Wang, Q.** (2006). Nonlinear Stiffness Design Optimization of Tall Reinforced Concrete Buildings Under Service Loads. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No. 6, pp: 978-990.
- [29] **Fadaee, M.J., Grierson, D.E.** (1996). Design Optimization of 3D Reinforced Concrete Structures. *Structural Optimization*, Vol. 12, Issue 2, No. 3, pp: 127-134.

- [30] **ACI 318**, 1995. Building Code Requirements for Reinforced Concrete, *American Concrete Institute*, ABD.
- [31] **Fereig, S.M.** (1996). Economic Preliminary Design of Bridges with Pre-stressed I-girders. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp: 18-25.
- [32] **AASHTO**, 1992. Recommended Guidelines for the Seismic Design of Highway Bridges, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, ABD.
- [33] **Guerra, A., Kiouisis, P.D.** (2006). Design Optimization of Reinforced Concrete Structures. *Computers and Concrete*, Vol. 3, No. 5, pp: 313-334.
- [34] **Chung, T.T., Sun, T.C.** (1994). Weight Optimization for Flexural Reinforced Concrete Beams with Static Nonlinear Response. *Structural Optimization*, Vol. 8, No. 2-3, pp: 174-180.
- [35] **Zou, X.K., Chan, C.M.** (2005). Optimal Seismic Performance Design of Reinforced Concrete Buildings Using Nonlinear Pushover Analysis. *Engineering Structures*, Vol. 27, pp: 1289-1302.
- [36] **Afonso, S.M.B., Belblidia, F. ve Sienz, J.** (2005). Structural Optimization Strategies for Simple and Integrally Stiffened Plates and Shells. *International Journal for Computed Aided Engineering and Software*, Vol. 22, No. 4, pp: 429-452.
- [37] **Tabatai, S.M.R., Mosalam, K.M.** (2001). Computational Platform for Nonlinear Analysis/Optimal Design of Reinforced Concrete Structures. *Engineering Computations*, Vol. 18, No. 5-6, pp: 726-743.
- [38] **Lin, K.V., Frangopol, D.M.** (1996). Reliability Based Optimum Design of Reinforced Concrete Girders. *Structural Safety*, Vol. 18, Issue 2-3, pp: 239-258.
- [39] **Liang, H., Haukaas, T., ve Rousset, J.O.** (2007). Reliability Based Optimal Design Software for Earthquake Engineering Applications. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34, Issue 7, pp: 856-869.
- [40] **Govindaraj, V., Ramasamy, J.V.** (2007). Optimum Detailed Design of Reinforced Concrete Frames Using Genetic Algorithms. *Engineering Optimization*, Vol. 39, Issue 4, pp: 471-494.
- [41] **Aoues, Y., Chateauneuf, A.** (2008). Reliability Based Optimization of Structural Systems by Adaptive Target Safety – Application to Reinforced Concrete Frames. *Structural Safety*, Vol. 30, pp: 144-161.
- [42] **Perea, C., Alcalá, J., Yepes, V., Vidosa, F.G. ve Hospitaler, A.** (2008). Design of Reinforced Concrete Bridge Frames by Heuristic Optimization. *Advances in Engineering Software*, Vol. 39, pp: 676-688.
- [43] **Kwak, H.G., Noh, S.H.** (2006.) Determination of Strut and Tie Models Using Evolutionary Structural Optimization. *Engineering Structures*, Vol. 28, pp: 1440-1449.

- [44] **Lagaros, N.D., Papadrakis, M.** (2007). Seismic Design of Reinforced Concrete Structures: A Critical Assesment in the Framework of Multi-objective Optimization. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, pp: 1623-1639.
- [45] **Eurocode 8**, 2004. Design of Structures for Earthquake Resistance, *European Committe for Standardization*, Belgium.
- [46] **Chan, C.M., Zou, X.K.** (2004). Elastic and Inelastic Drift Performance Optimization for Reinforced Concrete Buildings under Earthquake Loads. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 33, pp: 929-950.
- [47] **TBI**, 2010. Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings, *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, California, ABD.
- [48] **Çakıroğlu, A., Özer, E.** (1983). *Eğik Eğilme ve Normal Kuvvet Etkisindeki Dikdörtgen Betonarme Kesitlerde Taşıma Gücü Formülleri*. İstanbul: Matbaa Teknisyenleri Basımevi.
- [49] **Çakıroğlu, A., Özer, E.** (1990). Dikdörtgen ve Daire Betonarme Kesitlerde Taşıma Gücü Formülleri ve Yaklaşıklık Mertebeleri. *İMO Teknik Dergi*, Sayı. 1, Sf. 25-48.
- [50] **ATC-40**, 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, *Applied Technology Council*, California, ABD.
- [51] **Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik**, 2007. *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü*, Ankara.
- [52] **SAP2000 Analysis Reference Manual**, 2011. *Computers and Structures Inc.*, Berkeley, California, ABD.
- [53] **İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları**, 2011. *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Yüksek Fen Kurulu Başkanlığı*, Ankara.
- [54] **Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik**, 1975. *Bayındırlık Bakanlığı*, Ankara.

EKLER

EK A : Birinci ve İkinci Mertebe Eleman Rijitlik Matrisleri

EK B : YCR3D Programı API Kodu

Ek A Birinci ve İkinci Mertebe Eleman Rijitlik Matrisleri

Çubuk eksen takımındaki $[K]$ rijitlik matrisi, i ve j uçlarına ait 6 x 6 boyutundaki $[k]_{ii}, [k]_{ij}, [k]_{ji}, [k]_{jj}$ matrislerinin (A.1) denkleminde gösterildiği gibi,

$$[K] = \begin{bmatrix} [k]_{ii} & [k]_{ij} \\ [k]_{ji} & [k]_{jj} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

biraraya gelmesi ile oluşmaktadır.

Doğru eksenli, prizmatik uzay çubuklarda birinci mertebe teorisine ait çubuk rijitlik matrisleri (A.2), (A.3), (A.4) ve (A.5) denklemleri ile verilmiştir.

$$[k]_{ii} = \begin{bmatrix} \frac{EF}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_x}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_x}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_z}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_x}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$[k]_{ij} = \begin{bmatrix} -\frac{EF}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_x}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_x}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_z}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_x}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Betti karşılıklı teoremine göre birinci mertebe çubuk rijitlik matrisleri arasında,

$$[k]_{ji} = [k]_{ij}^T \quad (\text{A.4})$$

$$[k]_{jj} = \begin{bmatrix} \frac{EF}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_x}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_z}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_x}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

Yalnız çubukların asal düzlemleri içindeki yerdeğiştirmelere ait ikinci mertebe etkilerinin gözönüne alındığı durum için, doğru eksenli prizmatik uzay çubuklarda ikinci mertebe çubuk rijitlik matrisleri (A.6), (A.7), (A.8) ve (A.9) denklemleri ile verilmiştir.

$$[k]_{ii} = \begin{bmatrix} \frac{EF}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_x & 0 & 0 & 0 & \frac{b_{x1,1}+b_{x1,2}}{L} \\ 0 & 0 & a_y & 0 & \frac{-b_{y1,1}-b_{y1,2}}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_z}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-b_{y1,1}-b_{y1,2}}{L} & 0 & b_{y1,1} & 0 \\ 0 & \frac{b_{x1,1}+b_{x1,2}}{L} & 0 & 0 & 0 & b_{x1,1} \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$[k]_{ij} = \begin{bmatrix} -\frac{EF}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_x & 0 & 0 & 0 & \frac{b_{x1,1}+b_{x1,2}}{L} \\ 0 & 0 & -a_y & 0 & \frac{-b_{y1,1}-b_{y1,2}}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_z}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{b_{y1,1}+b_{y1,2}}{L} & 0 & b_{y1,2} & 0 \\ 0 & \frac{-b_{x1,1}-b_{x1,2}}{L} & 0 & 0 & 0 & b_{x1,2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Betti karşılık teoremine göre ikinci mertebe çubuk rijitlik matrisleri arasında da,

$$[k]_{ji} = [k]_{ij}^T \quad (\text{A.8})$$

$$[k]_{jj} = \begin{bmatrix} \frac{EF}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_x & 0 & 0 & 0 & \frac{-b_{x1,1}-b_{x1,2}}{L} \\ 0 & 0 & a_y & 0 & \frac{b_{y1,1}+b_{y1,2}}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_z}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{b_{y1,1}+b_{y1,2}}{L} & 0 & b_{y2,2} & 0 \\ 0 & \frac{-b_{x1,1}-b_{x1,2}}{L} & 0 & 0 & 0 & b_{x2,2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

İkinci mertebe rijitlik matrisi elemanlarının katsayıları (A.10) ve (A.11) denklemleri ile verilen parametrelere bağlı olarak (A.12),.....,(A.17) denklemleri kullanılarak bulunabilir.

$$\alpha L_x = L \cdot \sqrt{\frac{|N|}{EI_x}} \quad (\text{A.10})$$

$$\alpha L_y = L \cdot \sqrt{\frac{|N|}{EI_y}} \quad (\text{A.11})$$

$$b_{x1,1} = b_{x2,2} = \frac{EI_x}{L} \cdot \frac{\alpha L_x \sin \alpha L_x - \alpha L_x^2 \cos \alpha L_x}{2 \cdot (1 - \cos \alpha L_x) - \alpha L_x \sin \alpha L_x} \quad (\text{A.12})$$

$$b_{y1,1} = b_{y2,2} = \frac{EI_y}{L} \cdot \frac{\alpha L_y \sin \alpha L_y - \alpha L_y^2 \cos \alpha L_y}{2 \cdot (1 - \cos \alpha L_y) - \alpha L_x \sin \alpha L_y} \quad (\text{A.13})$$

$$b_{x1,2} = \frac{EI_x}{L} \cdot \frac{\alpha L_x^2 - \alpha L_x \sin \alpha L_x}{2 \cdot (1 - \cos \alpha L_x) - \alpha L_x \sin \alpha L_x} \quad (\text{A.14})$$

$$b_{y1,2} = \frac{EI_y}{L} \cdot \frac{\alpha L_y^2 - \alpha L_x \sin \alpha L_y}{2 \cdot (1 - \cos \alpha L_y) - \alpha L_y \sin \alpha L_y} \quad (\text{A.15})$$

$$a_x = \frac{2 \cdot (b_{x1,1} + b_{x1,2})}{L^2} - \frac{EI_x \cdot \alpha L_x^2}{L^3} \quad (\text{A.16})$$

$$a_y = \frac{2 \cdot (b_{y1,1} + b_{y1,2})}{L^2} - \frac{EI_y \cdot \alpha L_y^2}{L^3} \quad (\text{A.17})$$

Ek B YCR3D Programı API Kodu

- *Programın açılması ve giriş bilgilerinin okutulması*

Option Explicit

Dim SapObject As Sap2000.SapObject

Dim ret As Long

Dim SapModel As cSapModel

Sub SAP2000_API()

Set SapObject = New Sap2000.SapObject

SapObject.ApplicationStart

Set SapModel = SapObject.SapModel

ret = SapModel.InitializeNewModel(kN_m_C)

ret = SapModel.File.NewBlank

Dim b1, b2, b3, d1, d2, d3, k1, k2, k3

b1 = Sheets("data").Cells(4, 10).Value

d1 = Sheets("data").Cells(4, 11).Value

b2 = Sheets("data").Cells(5, 10).Value

d2 = Sheets("data").Cells(5, 11).Value

b3 = Sheets("data").Cells(6, 10).Value

d3 = Sheets("data").Cells(6, 11).Value

k1 = Sheets("data").Cells(4, 9).Text

k2 = Sheets("data").Cells(5, 9).Text

k3 = Sheets("data").Cells(6, 9).Text

ret = SapModel.PropMaterial.SetMaterial("BETON", 2)

ret = SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic("BETON", 32000000, 0.2, 0.000001)

ret = SapModel.PropMaterial.SetWeightAndMass("BETON", 1, 0)

ret = SapModel.PropFrame.SetRectangle(k1, "BETON", d1, b1)

ret = SapModel.PropFrame.SetRectangle(k2, "BETON", d2, b2)

ret = SapModel.PropFrame.SetRectangle(k3, "BETON", d3, b3)

- *Model geometrisinin oluşturulması*

Dim FrameNo As Integer

Dim x1() As Double, y1() As Double, z1() As Double, x2() As Double, y2() As Double, z2() As Double

Dim i As Integer

Dim restraintValue() As Boolean

Dim PointLoadValue() As Double


```

Dim NumberResults As Long
Dim Obj( ) As String, Elm( ) As String, ACase( ) As String, StepType( ) As String
Dim ObjSta( ) As Double, ElmSta( ) As Double, StepNum( ) As Double
Dim P( ) As Double, V2( ) As Double, V3( ) As Double
Dim T( ) As Double, M2( ) As Double, M3( ) As Double
FrameNo = Sheets("data").Cells(2, 3).Value
ReDim x1(1 To FrameNo), y1(1 To FrameNo), z1(1 To FrameNo), x2(1 To
FrameNo), y2(1 To FrameNo), z2(1 To FrameNo)
    For i = 1 To FrameNo
        x1(i) = Sheets("data").Cells(i + 3, 2).Value
        y1(i) = Sheets("data").Cells(i + 3, 3).Value
        z1(i) = Sheets("data").Cells(i + 3, 4).Value
        x2(i) = Sheets("data").Cells(i + 3, 5).Value
        y2(i) = Sheets("data").Cells(i + 3, 6).Value
        z2(i) = Sheets("data").Cells(i + 3, 7).Value
    Next i
ret = SapModel.FrameObj.AddByCoord(x1(1), y1(1), z1(1), x2(1), y2(1), z2(1),
"KOLON", "KOLON", "1")
ret = SapModel.FrameObj.AddByCoord(x1(2), y1(2), z1(2), x2(2), y2(2), z2(2),
"KOLON", "KOLON", "2")
ret = SapModel.FrameObj.AddByCoord(x1(3), y1(3), z1(3), x2(3), y2(3), z2(3),
"KOLON", "KOLON", "3")
ret = SapModel.FrameObj.AddByCoord(x1(4), y1(4), z1(4), x2(4), y2(4), z2(4),
"KOLON", "KOLON", "4")
ret = SapModel.FrameObj.AddByCoord(x1(5), y1(5), z1(5), x2(5), y2(5), z2(5),
"KIRIS1", "KIRIS1", "5")
ret = SapModel.FrameObj.AddByCoord(x1(6), y1(6), z1(6), x2(6), y2(6), z2(6),
"KIRIS1", "KIRIS1", "6")
ret = SapModel.FrameObj.AddByCoord(x1(7), y1(7), z1(7), x2(7), y2(7), z2(7),
"KIRIS2", "KIRIS2", "7")
ret = SapModel.FrameObj.AddByCoord(x1(8), y1(8), z1(8), x2(8), y2(8), z2(8),
"KIRIS2", "KIRIS2", "8")
    • Ankastre mesnetlerin tanımlanması
ReDim restraintValue(5)
For i = 0 To 5
    restraintValue(i) = True
Next i
ret = SapModel.PointObj.SetRestraint("1", restraintValue)

```

```

ret = SapModel.PointObj.SetRestraint("3", restraintValue)
ret = SapModel.PointObj.SetRestraint("5", restraintValue)
ret = SapModel.PointObj.SetRestraint("7", restraintValue)
ret = SapModel.View.RefreshView(0, False)

```

- *Yükleme matrislerinin oluşturulması*

```

Dim PointLoadValue( ) As Double, m( ) As Double, n( ) As Double, o( ) As Double
Dim q( ) As Double, r( ) As Double, s( ) As Double, tt( ) As Double, w( ) As Double
Dim x( ) As Double, Txsol( ) As Double, Txsg( ) As Double, Mxsol( ) As Double,
Mxsg( ) As Double, Tysol( ) As Double, Tysg( ) As Double, Mysol( ) As Double,
Mysg( ) As Double, Nsol( ) As Double, Nsg( ) As Double
Dim beamnumber As Integer, jointno As Integer, plasno As Integer
beamnumber = Sheets("data").Cells(1, 14).Value
jointno = Sheets("data").Cells(1, 18).Value
plasno = Sheets("data").Cells(1, 23).Value
ReDim m(1 To beamnumber), n(1 To beamnumber), o(1 To beamnumber)
ReDim q(1 To jointno), r(1 To jointno), s(1 To jointno), tt(1 To jointno)
ReDim w(1 To plasno), x(1 To plasno), Txsol(1 To plasno), Txsg(1 To plasno),
Mxsol(1 To plasno), Mxsg(1 To plasno), Tysol(1 To plasno), Tysg(1 To plasno),
Mysol(1 To plasno), Mysg(1 To plasno), Nsol(1 To plasno), Nsg(1 To plasno)
For i = 1 To beamnumber
m(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 13).Value
n(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 14).Value
o(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 15).Value
Next i
For i = 1 To jointno
q(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 17).Value
r(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 18).Value
s(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 19).Value
tt(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 20).Value
Next i
For i = 1 To plasno
w(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 23).Value
x(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 24).Value
Txsol(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 33).Value
Txsg(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 34).Value
Mxsol(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 37).Value

```

```

Mxsag(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 40).Value
Tysol(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 43).Value
Tysag(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 44).Value
Mysol(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 47).Value
Mysag(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 50).Value
Nsol(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 51).Value
Nsag(i) = Sheets("data").Cells(i + 4, 52).Value
Next i

```

- *Yüklerin program tarafından okunup sisteme etkitilmesi*

```

ret = SapModel.LoadPatterns.Add("DISYUK", LTYPE_OTHER, 0, True)
For i = 1 To plasno
'PSD sayısı kadar döngü ile otomatik...
ret = SapModel.LoadPatterns.Add(i, LTYPE_OTHER, 0, True)
Next i
'Kiriş düşey yüklerinin okunması
For i = 1 To beamnumber
ret = SapModel.FrameObj.SetLoadPoint(m(i), "DISYUK", 1, 10, n(i), o(i))
Next i
'Düğüm noktası yükleri:
'DIŞ YÜKLERİN VERİLMESİ:
For i = 1 To jointno
ReDim PointLoadValue(5)
PointLoadValue(2) = tt(i)
PointLoadValue(0) = r(i)
PointLoadValue(1) = s(i)
ret = SapModel.PointObj.SetLoadForce(q(i), "DISYUK", PointLoadValue)
Next i
'Birim P.S.D oluşan düğüm noktası yüklerinin verilmesi:
'PSD sayısı kadar döngü ile otomatik...
'Sol uçlar...
For i = 1 To plasno
ReDim PointLoadValue(5)
PointLoadValue(0) = Txsol(i)
PointLoadValue(1) = Tysol(i)
PointLoadValue(2) = Nsol(i)

```

```

PointLoadValue(3) = Mxsol(i)
PointLoadValue(4) = Mysol(i)
ret = SapModel.PointObj.SetLoadForce(w(i), i, PointLoadValue)
Next i
'Sağ uçlar...
For i = 1 To plasno
ReDim PointLoadValue(5)
PointLoadValue(0) = Txsag(i)
PointLoadValue(1) = Tysag(i)
PointLoadValue(2) = Nsag(i)
PointLoadValue(3) = Mxsag(i)
PointLoadValue(4) = Mysag(i)
ret = SapModel.PointObj.SetLoadForce(x(i), i, PointLoadValue)
Next i
    • Modelin kaydedilmesi, analizin çalıştırılması ve programın kapatılması
'Modelin kaydedilmesi
ret = SapModel.File.Save("C:\SapAPI\UYG3_S2.sdb")
'Analizin çalıştırılması
ret = SapModel.Analyze.RunAnalysis
'Programın kapatılması
SapObject.ApplicationExit False
Set SapModel = Nothing
Set SapObject = Nothing
End Sub

```

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Yunus Emre ŞAYAN

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 12.11.1980

E-Posta: yunusbey@hotmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi – İnşaat Mühendisliği (2003)

Yüksek Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi – Fen Bilimleri Enstitüsü - İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı - Deprem Mühendisliği Programı (2005)

Mesleki Deneyim: Proje Mühendisi - (Erdemli Proje, Mayıs 2004-Şubat 2006)

İnşaat Mühendisi - (Ark İnşaat, Haziran 2006-Şubat 2007)

Proje Mühendisi - (YNS Proje, Ağustos 2007-Haziran 2009)

Yedek Subay – (Hava Lojistik Komutanlığı İstihkam İnşaat Dairesi, Ağustos 2009-Ağustos 2010)

Proje Mühendisi - (YNS Proje, Ağustos 2011-.....)

