

39821

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

39821

**UZAY ÇUBUK SİSTEMLERDE İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜK İÇİN
YAPI AĞIRLIĞINI MİNİMUM YAPAN BİR BOYUTLANDIRMA YÖNTEMİ**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Engin ORAKDÖĞEN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Ocak 1994

Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Nisan 1994

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erkan ÖZER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Faruk KARADOĞAN

Prof. Dr. Gülay AŞKAR

NİSAN 1994

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Yapı Programında gerçekleştirilen bu doktora çalışmasında, uzay çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yük için yapı ağırlığını minimum yapan bir boyutlandırma yöntemi geliştirilmiştir.

Bu çalışma süresince değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım danışman hocam sayın Prof. Dr. Erkan ÖZER başta olmak üzere, hocam sayın Prof. Adnan ÇAKIROĞLU' na, Yapı Statığı Çalışma Grubunun diğer değerli öğretim üyelerine, bana destek olan çalışma arkadaşlarıma ve şekillerin çiziminde yardımcı olan İnş. Müh. Tunç YAVUZ' a teşekkür ederim.

Tahsil hayatım boyunca hiç bir fedakarlıktan kaçınmayarak bana her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan aileme de minnet ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

- NOTASYON LİSTESİ	v
- ŞEKİL LİSTESİ	x
- TABLO LİSTESİ	xiii
- ÖZET	xv
- SUMMARY	xvi
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Konu	1
1.2. Konu İle İlgili Çalışmalar	4
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	13
BÖLÜM 2. UZAY ÇUBUK SİSTEMLERDE İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜK İÇİN YAPI AĞIRLIĞINI MİNİMUM YAPAN BİR BOYUTLANDIRMA YÖNTEMİ	15
2.1. Kabuller	15
2.2. Ardışık Yaklaşım Yönteminin Esasları	16
2.2.1. Sistemin Boyutlandırılması	19
2.2.2. Boyutlandırılan Sistemin Hesabı	22
2.3. Çözümün Sağlaması Gereken Koşullar ve Kısıtlamalar	23
2.3.1. Akma Koşulu	24
2.3.2. Denge Koşulları	32
2.3.3. Akma Koşulu İle İlgili Kısıtlamalar	37
2.3.4. Diğer Kısıtlamalar	41
2.4. Ağırlık Fonksiyonu	43
BÖLÜM 3. MİNİMUM AĞIRLIKLILİNEER SİSTEMLERİN BOYUTLANDIRILMASI	48
3.1. Denge Denklemlerinin İndirgenmesi	50
3.2. Değişken Dönüşümü	52
3.3. Simplex Yöntemi	53
3.3.1. Minimum Yapma Problemi	54
3.3.2. Tanımlar	57
3.3.3. Yöntemin Esasları	57
3.3.4. Hesapta İzlenen Yol	58
3.4. İlk Uygun Temel Çözümün Belirlenmesi	61
3.5. Boyutlandırmada İzlenen Yol	64

BÖLÜM4. BOYUTLANDIRILAN SİSTEMİN HESABI	68
4.1. Yöntemin Esasları	68
4.2. Matematik Formülasyon	69
4.3. İkinci Mertebe Limit Yükün Hesabında İzlenen Yol	71
BÖLÜM5. YAPI SİSTEMLERİNİN MİNİMUM AĞIRLIKLI OLARAK BOYUTLANDIRILMASI	75
5.1. İkinci Mertebe Limit Yük İçin Boyutlandırmada İzlenen Yol	75
5.2. Göçme Yüküne Göre Boyutlandırma	76
5.3. İşletme Yükleri Altında Sistemin İncelenmesi	76
BÖLÜM6. MWDOS BİLGİSAYAR PROGRAMI	77
6.1. Programın Amacı, Yapısı ve Kapsamı	77
6.2. Giriş Bilgileri	78
6.3. Çıkış Bilgileri	81
6.4. Akış Diyagramı	81
6.5. Altprogramların Açıklanması	81
BÖLÜM7. SAYISAL ÖRNEKLER	89
7.1. Bir Katlı Düzlem Çerçeve	89
7.2. Bir Katlı Uzay Çerçeve	94
7.3. On Katlı Uzay Çerçeve	104
BÖLÜM8. SONUÇLAR	112
- KAYNAKLAR	115
- EK A.: ENKESİT KARAKTERİSTİKLERİ ARASINDAKİ BAĞINTILAR	121
- EK B.: BİRİNCİ VE İKİNCİ MERTEBE ELEMAN RİJİTLİK MATRİSLERİ	124
- ÖZGEÇMİŞ	129

NOTASYON LİSTESİ

$[A]$	: Simplex yönteminin kısıtlamalarına ait katsayıları içeren matris
$[a]$	: Akma koşulu kısıtlamalarının katsayılarını içeren matris
$[a_0]$	: İndirgmeden sonraki kısıtlama denklemlerinin katsayılarını içeren matris
A_1, A_2, A_3, B	: Lineerleştirilmiş akma koşulu katsayıları
$a_y, b_{y1,1}, b_{y1,2}, b_{y2,2},$ $a_z, b_{z1,1}, b_{z1,2}, b_{z2,2}$	: Çubuk eksenlerindeki ikinci mertebe eleman rijitlik matrisi elemanlarının katsayıları
$[B]$	: Simplex yönteminin kısıtlama denklemlerine ait sabitleri içeren matris
$[b]$	: Akma koşulu kısıtlamalarının sabitlerini içeren matris
$[b_0]$	: İndirgmeden sonraki kısıtlama denklemlerinin sabitlerini içeren matris
$[C]$	: Simplex yönteminde amaç fonksiyonun katsayılarını içeren matris
$\bar{d}(\phi_z, \phi_y, \Delta)$	: Plastik şekil değiştirme vektörü
$[d]$	: Düğüm noktalarının yer değiştirme bileşenleri matrisi
$[d]_i, [d]_j$	: Çubuk eksenlerindeki çubuk uç yer değiştirmeleri matrisleri
$[d]_{ix}, [d]_{jx}$	: Sistem eksenlerindeki çubuk uç yer değiştirmeleri matrisleri
$D_1, \dots, D_{12}$	: Çubuk uç yer değiştirmeleri

e	: Güvenlik katsayısı
E	: Elastisite modülü
$[F(x)]$	: Kritik kesite ait iç kuvvetleri içeren matris
$[F_o(x)]$	: Basit mesnetli kiriş üzerindeki kritik kesite ait iç kuvvetleri içeren matris
F	: Enkesit alanı
$[g]$	: Ağırlık fonksiyonunun katsayılarını içeren matris
G	: Yapı ağırlığı, kayma modülü
G_F	: Ağırlık fonksiyonu
I_x, I_y, I_z	: Enkesit atalet momentleri
i, j	: Çubuk uç numaraları
$[k]$	: Sisteme ait genişletilmiş denge denklemlerinin katsayılarını içeren matris
$[k_0]$	: Sisteme ait genişletilmiş denge denklemlerinin sabitlerini içeren matris
$K(M_x, M_y, M_z, N, T_y, T_z)$	: Genelleştirilmiş akma koşulu fonksiyonu
$[k]_{ii}, [k]_{ij}, \dots$	: Çubuk eksenlerindeki eleman rijitlik matrisleri
$[k]_{ixix}, [k]_{ixjx}, \dots$	: Sistem eksenlerindeki eleman rijitlik matrisleri
L	: Çubuk uzunluğu
$[M_p]$	: Değişken olarak seçilen çubuk plastik momentleri matrisi
M_x, M_y, M_z	: Burulma ve eğilme momentleri
M_{xp}, M_{yp}, M_{zp}	: Burulma ve eğilme plastik momentleri
m	: Plastik kesit sayısı
N	: Normal kuvvet

N_p	: Plastik normal kuvvet
n	: Düğüm noktası sayısı
o	: Toplam ek kısıtlama sayısı
P_i	: İşletme yükü parametresi
P_G	: Göçme yükü parametresi
P_H	: Hesap yükü parametresi
P_{L1}	: Birinci mertebe limit yük parametresi
P_{L2}	: İkinci mertebe limit yük parametresi
$[P]_i, [P]_j$	: Çubuk eksenlerindeki çubuk uç kuvvetleri matrisleri
$[P]_{ix}, [P]_{jx}$	: Sistem eksenlerindeki çubuk uç kuvvetleri matrisleri
$P_1, \dots, P_{12}$	: Çubuk uç kuvvetleri
$[P_0]_i, [P_0]_j$	: Çubuk eksenlerindeki ankastrelik uç kuvvetleri matrisleri
$[P_0]_{ix}, [P_0]_{jx}$	: Sistem eksenlerindeki ankastrelik uç kuvvetleri matrisleri
$[P_{\phi k}]_i, [P_{\phi k}]_j$	: Plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerinin birim değerinden meydana gelen, çubuk eksenlerindeki uç kuvvetleri matrisleri
$[P_{\phi k}]_{ix}, [P_{\phi k}]_{jx}$	: Plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerinin birim değerinden meydana gelen, sistem eksenlerindeki uç kuvvetleri matrisleri
$[q]$	: Düğüm noktası yükleri matrisi
r	: Sistemdeki farklı enkesitli çubuk sayısı
s	: Sistemdeki toplam kritik kesit sayısı

$[S_{dd}]$	: Üzerinde plastik kesit bulunmayan sisteme ait sistem rijitlik matrisi
$[S_{d\phi}]$	: Plastik şekildeğiştirme parametrelerinin birim değerlerinden meydana gelen uç kuvvetlerinin denge denklemlerine katkısını ifade eden matris
$[T]$	: Çubuk dönüştürme matrisi
T_y, T_z	: Kesme kuvvetleri
$[t]$	: Lineerleştirilmiş akma koşulu katsayılarını içeren matris
$[u]$	: Çubuğa ait akma koşulu kısıtlamalarındaki plastik moment değişkenlerinin sabit katsayılarından oluşan matris
$[U]$	: Sisteme ait akma koşulu kısıtlamalarındaki plastik moment değişkenlerinin sabit katsayılarından oluşan matris
W_{px}, W_{py}, W_{pz}	: Plastik mukavemet momentleri
$[X]$	: Simplex yönteminin tasarım değişkenleri matrisi
x	: Kritik kesitin çubuk sol ucundan olan uzaklığı
x, y, z	: Çubuk eksenleri
X, Y, Z	: Sistem eksenleri
α_i	: Değer sabitleri
γ	: Malzemenin birim hacim ağırlığı
δ_x, δ_z	: Karakteristik yerdeğiştirmeler
δ_G	: Göçme yüküne karşı gelen karakteristik yerdeğiştirme
δ_{L1}	: Birinci mertebe limit yüke karşı gelen karakteristik yerdeğiştirme
δ_{L2}	: İkinci mertebe limit yüke karşı gelen karakteristik yerdeğiştirme

ε	: Birim boy değışmesi
ε_e	: Elastik sınıra ait birim boy değışmesi
σ_F	: Akma gerilmesi
ϕ_s	: Plastik şekildeğıştirme parametreleri için üst sınır
ϕ	: Plastik şekildeğıştirme parametresi
ϕ_y, ϕ_z, Δ	: Plastik şekildeğıştirme bileşenleri
$[\phi]$	: Sistemde oluşan plastik kesitlere ait plastik şekildeğıştirme parametrelerini içeren matris
$[\phi_0]$	: İndirgeme işleminden sonraki plastik şekildeğıştirme parametrelerini içeren matris
$[\overline{\phi}_0]$	: Değışken dönüşümü işleminden sonraki plastik şekildeğıştirme parametrelerini içeren matris
ν	: Poisson oranı
ψ_y, ψ_z	: İkinci mertebe etkilerini belirleyen parametreler (Ek B12)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. İdeal elastoplastik malzemede $\sigma - \varepsilon$ bağıntısı.	15
Şekil 2.2. İdeal elastoplastik malzemeden yapılmış yapı sistemlerinde $P - \delta$ bağıntısı.	17
Şekil 2.3. İdealleştirilmiş akma yüzeyi.	28
Şekil 2.3a. İdealleştirilmiş akma yüzeyinin $(M_y - M_z)$ düzlemi üzerindeki izdüşümü.	29
Şekil 2.3b. İdealleştirilmiş akma yüzeyinin $(N - M_z), (N - M_y)$ düzlemleri ile arakesiti.	29
Şekil 2.4. $[S_{d\phi}]$ matrisinin elde edilmesi.	34
Şekil 2.5. Plastik şekil değiştirme parametresinin birim değerinden meydana gelen çubuk uç kuvvetleri matrislerinin elde edilışinde gözönüne alınan süperpozisyon durumları.	35
Şekil 2.6. Çubuk uç kuvvetlerinin pozitif yönleri.	40
Şekil 2.7. Çubuk üzerindeki bir kesitteki iç kuvvetlerin pozitif yönleri.	40
Şekil 2.8. $F - W_{pz}$ bağıntısı.	44
Şekil 3.1. Simplex yöntemi hesap tablosu.	58
Şekil 3.2. Simplex yöntemi hesap tablosunda pivot kolon ve pivot satır.	61

	Sayfa
Şekil 6.1. MWDOS bilgisayar programının genel akış diyagramı.	82
Şekil 6.1a. KISITLA programının akış diyagramı.	83
Şekil 6.1b. MINBUL programının akış diyagramı.	85
Şekil 7.1. Bir katlı düzlem çerçevenin geometrik özellikleri ve hesap yükleri.	89
Şekil 7.2. İkinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan bir katlı düzlem çerçevenin plastik kesit yerleri ve oluşum sırası.	93
Şekil 7.3. İkinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan bir katlı düzlem çerçevenin eğilme momenti ve normal kuvvet diyagramları.	93
Şekil 7.4. Bir katlı uzay çerçevenin geometrik özellikleri ve hesap yükleri.	94
Şekil 7.5. Bir katlı uzay çerçevenin düğüm noktaları ve farklı enkesitli çubuk numaraları.	95
Şekil 7.6. İkinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan bir katlı uzay çerçevenin ardışık yaklaşım adımlarında esas alınan plastik kesit yerleri.	99
Şekil 7.7. İkinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan bir katlı uzay çerçevenin $P - \delta_x$ eğrisi.	101
Şekil 7.8. İkinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan bir katlı uzay çerçevenin $P - \delta_z$ eğrisi.	102
Şekil 7.9. On katlı uzay çerçevenin geometrik özellikleri ve hesap yükleri.	105

Şekil 7.10. On katlı uzay çerçevenin farklı enkesitli çubuk numaraları.	106
Şekil 7.11. İkinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan on katlı uzay çerçevenin plastik kesit yerleri.	109
Şekil 7.12. İkinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan on katlı uzay çerçevede $P - \delta_x$ eğrisi.	110
Şekil 7.13. İkinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan on katlı uzay çerçevede $P - \delta_z$ eğrisi.	111
Şekil A.1. I kesitlerinin enkesit boyutları.	121
Şekil A.2. Dikdörtgen ve kare kutu kesitlerin enkesit boyutları.	121

TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Yaklaşık akma koşulunu tanımlayan katsayılar.	30
Tablo 7.1. Bir katlı düzlem çerçevede birinci başlangıç çözümü esas alınarak yapılan minimum ağırlıklı boyutlandırma işleminin adımları.	91
Tablo 7.2. Bir katlı düzlem çerçevede ikinci başlangıç çözümü esas alınarak yapılan minimum ağırlıklı boyutlandırma işleminin adımları.	91
Tablo 7.3. İkinci merteye limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan bir katlı düzlem çerçevede plastik kesitlerin oluşum sırası, oluştukları yük parametreleri ve akma düzlemi katsayıları.	93
Tablo 7.4. Farklı şekillerde boyutlandırılan bir katlı uzay çerçevenin çubuk plastik momentleri, toplam yapı ağırlıkları ve ikinci merteye limit yük parametreleri.	97
Tablo 7.5. Bir katlı uzay çerçevede ardışık yaklaşım adımlarına ait çubuk plastik momentleri, toplam yapı ağırlıkları ve ikinci merteye limit yük parametreleri.	98
Tablo 7.6. Bir katlı uzay çerçevede ardışık yaklaşım adımlarına ait ikinci merteye limit yük parametreleri ve plastik kesit yerleri.	98
Tablo 7.7. Bir katlı uzay çerçevede plastik kesitlerin oluşum sırası, oluştukları yük parametreleri ve akma düzlemi katsayıları.	100

Tablo 7.8. İkinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan on katlı uzay çerçevenin çubuk plastik momentleri.	107
Tablo 7.9. On katlı uzay çerçevede plastik kesitlerin oluşum sırası, oluştukları yük parametreleri ve akma düzlemi katsayıları.	108



ÖZET

Bu çalışmada, uzay çubuk sistemlerin ikinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmaları için bir ardışık yaklaşım yöntemi geliştirilmiştir.

Sekiz bölüm olarak sunulan bu çalışmanın birinci bölümünde konunun tanıtılması, konu ile ilgili çalışmaların gözden geçirilmesi, çalışmanın amacı ve kapsamı yer almaktadır.

İkinci bölümde, çalışmada yapılan kabuller ve ardışık yaklaşım yönteminin esasları verilmiştir. Her adımı birbirini izleyen boyutlandırma ve sistem hesabı aşamalarından oluşan yöntemde, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar bir önceki adımın boyutlandırma aşamasından, ikinci mertebe limit yüke karşı gelen plastik kesit yerleri ile bu kesitlere ait akma vektörü doğrultuları ise bir önceki adımın sistem hesabı aşamasından alınmaktadır. Bu bölümde ayrıca, yaklaşık akma koşulu, çözümün sağlanması gereken koşullar ve kısıtlamalar ile minimum yapılması istenen ağırlık fonksiyonu ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, ağırlık fonksiyonunun ve kısıtlamaların lineerleştirilmesi ile lineer programlama problemine dönüştürülen optimizasyon probleminin çözümündeki indirgeme ve değişken dönüşümü işlemleri, Simplex yönteminin bu problemin çözümüne uygulanması ve herhangi bir ardışık yaklaşım adımının boyutlandırma aşamasında izlenen yol açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, uzay çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yükün hesabı için geliştirilen bir yük artımı yönteminin esasları ve ikinci mertebe limit yükün hesabında izlenen yol özetlenmiştir.

Beşinci bölümde, yapı sistemlerinin, ikinci mertebe limit yüke göre ve göçme yüküne göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmalarında izlenen yol verilmiş, ayrıca, boyutlandırılan sistemde işletme yükleri altında sağlanması gereken koşullar açıklanmıştır.

Altıncı bölüm, yöntemin sayısal uygulamaları için hazırlanan ve Fortran-77 programlama dilinde kodlanan bir bilgisayar programının ve programı oluşturan altprogramların açıklanmasına ayrılmıştır.

Yedinci bölümde, yöntemin sayısal uygulamaları için hazırlanan bilgisayar programı kullanılarak çözülen üç örneğin sonuçları verilmiştir.

Sekizinci bölümde, bu çalışmada elde edilen sonuçlar açıklanmış, Ek A ve Ek B de ise sırasıyla, kutu ve I kesitler için çıkarılan enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar ve matris yerdeğiştirme yönteminde kullanılan eleman rijitlik matrisleri verilmiştir.

SUMMARY

A MINIMUM WEIGHT DESIGN METHOD FOR MATERIALLY AND GEOMETRICALLY NON-LINEAR FRAMED SPACE STRUCTURES

The main objective of the structural engineering is to design structures which withstand external loads safely and at a minimum cost. During last decades, the developments in the optimization methods which attempt to find the most economical solutions to design problems by satisfying the required safety and rigidity constraints and minimizing the cost function as well as the developments in the non-linear analysis methods which aim to determine the real behavior of structures under external effects, give the structural engineer the opportunity to reach this objective.

The structural systems made of ductile material demonstrate elastic-plastic behavior under increasing loads, i.e., the non-linear deformations are assumed to accumulate at certain sections which are defined as plastic sections while the remaining structure behaves linearly-elastic. As the loads reach a limiting value, either the complete structure or its part transforms into a mechanism or buckling failure occurs due to the lack of stability. The mechanism load is called as the first-order limit load and the buckling load is defined as the second-order limit load. The slender structural systems which demonstrate high ductility can be designed by equating the factored loads to the second-order limit load. The designed structure should also satisfy certain stress and displacement requirements under service loads.

As the optimization problems gain great importance in the field of structural engineering, numerous research works have been carried out and various algorithms have been developed for solving these types of problems. These algorithms can be mainly classified as the optimality criteria approaches and the mathematical programming techniques.

The objective of the mathematical programming techniques utilized for the minimum weight design of structural systems is to determine the design variables which minimize the objective function representing the cost of the structure and satisfy a set of constraints. The optimization problems in which all of the constraints and the objective function can be expressed linearly in terms of design variables are called as linear programming problems and those are expressed non-linearly in terms of design variables are called as non-linear programming problems. Cross-sectional properties of the members, displacements, internal force components, deformations etc. can be chosen as design variables.

In the minimum weight design problems where the cost of the structure is assumed to be represented by the weight of material, the objective function can be expressed in terms of the cross-sectional characteristics. The equilibrium and compatibility equations, the yield conditions, the stress and displacement limitations, constructive requirements constitute the constraints of the problem.

When the effect of geometrical changes on the equilibrium equations is neglected, the structure can be designed for the first-order limit load at which the structure transforms into a complete mechanism. The internal forces corresponding the mechanism load are determined through the equilibrium equations. Therefore, the minimum weight design problem can be transformed into a linear programming problem, provided that the objective function and the yield conditions are expressed by linear functions of cross-sectional properties.

The structural systems for which the effect of geometrical changes on the equilibrium equations is significant, should be designed for the second-order limit load. Since the equilibrium equations, the yield conditions and the relationships between the cross-sectional properties are non-linear and since the second-order limit load is not equal to the mechanism load, the minimum weight design of geometrically and materially non-linear structural systems generally requires the formulation and solution of a non-linear programming methods. However, if the axial forces caused by the factored loads, the relationships between the cross-sectional properties and the locations and deformation vectors of plastic sections corresponding the second-order limit load are estimated and if the yield surface is idealized as composed of planes, the minimum weight design problem can be reduced to successive solutions of a linear programming problem.

In this study, a method of successive approximations is developed for the minimum weight design of non-linear framed space structures. Each step of the optimization process is composed of design and analysis phases. At each design phase of the method, a linear programming technique may be applied for structural optimization.

The proposed optimum design method is independent of the characteristics of the structure and can be applied to all types of framed structures which comply the following assumptions.

- a) Bernoulli-Navier hypothesis is valid.
- b) Members forming the structure are considered to be made of ideal elastic-plastic material.
- c) It is assumed that the non-linear deformations accumulate at certain sections which are defined as plastic sections and the remaining structure behaves linearly-elastic. This assumption corresponds to the plastic hinge concept applied to planar framed structures.

d) It is considered that the yield condition can be idealized by assuming the yield surface to be composed of planes.

e) The second-order theory is applied. In this theory, the effect of geometrical changes on the equilibrium equations is considered while their effect on the compatibility equations is neglected.

f) In the application of the second-order theory, the second-order effects caused by the torsional displacement and the local deformations within the cross-section are ignored. Hence, only the second-order effects due to the geometrical changes within the principal planes of the members are considered.

g) Members forming the structure are straight, prismatic and the axial force is constant along the member. In case of existence of members which do not satisfy these conditions, they can be approximated by dividing them into smaller straight and prismatic segments with constant axial force.

In the proposed method, equilibrium equations are linearized by estimating the axial forces caused by the factored loads and yield condition is linearized by assuming the yield surface is composed of planes. In each design phase, the relationships between the cross-sectional properties are taken from the previous design phase and the plastic section locations and the corresponding deformation vector directions are taken from the non-linear analysis of the system designed in the previous step. When the design variables, the weight function and the plastic sections and corresponding deformation vectors are same or close enough in two successive steps, the computation is terminated and the minimum weight solution is obtained.

Since the plastic deformation vector is normal to the yield surface, the finite plastic deformations at a plastic section can be represented by a single parameter called as plastic deformation parameter. Utilizing the matrix displacement method and considering the plastic deformation parameters at plastic sections as structural variables along with the nodal displacement components, the equilibrium equations corresponding the second-order limit load can be written directly and systematically. These equilibrium equations also cover the geometrical compatibility conditions for the second-order limit load.

The yield condition for members subjected to combined biaxial bending and axial force can be expressed in a general form, as in the following:

$$K(M_z, M_y, N) \leq 0$$

where $K(M_z, M_y, N)$ represents a non-linear function of internal forces. If the yield surface representing function K is idealized as composed of planes, the linear yield condition

$$A_1 M_z + A_2 M_y + A_3 N + B \leq 0$$

is obtained.

In this relationship, M_z and M_y are the bending moments about the z and y local axes respectively, N is the axial force and A_1, A_2, A_3, B are the constant coefficients defining the planes forming the yield surface.

The displacements, deformations, internal forces and the corresponding cross-sectional properties which belong to the solution of the minimum weight design problem should satisfy the following conditions and constraints:

- a) equilibrium equations and compatibility conditions corresponding the second-order limit load,
- b) yield condition constraints at all sections of the structure,
- c) displacement and deformation constraints for the second-order limit load,
- d) constructive restrictions related to the cross-sectional dimensions.

In designing a structural system as the second-order limit load equals to factored loads, the axial forces due to the factored loads can be estimated easily. The second-order equilibrium conditions are expressed as linear equations by calculating the stability functions for the estimated axial forces. As mentioned above these equations also cover the geometrical compatibility conditions.

The yield condition constraints are expressed in terms of the nodal displacement components, the plastic deformation parameters and the characteristic plastic moments of members. These constraints are linear inequalities since the yield surface is assumed to be composed of planes. The linear displacement and plastic deformation limitations and the limitations on the cross-sectional properties of members constitute the other constraints of the optimization problem. By expressing the structural weight in terms of a linear function of member plastic moments, the minimum weight design problem transforms into a linear programming problem. In this study Simplex method is utilized for the solution of the linear programming problem.

Before the solution of the minimum weight design problem by the Simplex method, some pre-calculations are required. These pre-calculations are explained below.

- i) The determination of the initial feasible solution of the Simplex method requires the calculation of plastic moment variables when the nodal displacements and the plastic deformation parameters are equal to

zero. However, the equilibrium equations cannot be satisfied when these variables are equal to zero. Therefore, new plastic deformation parameters which satisfy the equilibrium equations are defined. Thus, by equating these variables to zero, the initial feasible solution is obtained.

ii) The variables in the Simplex method must be positive. As the nodal displacements and plastic deformation parameters may have positive or negative values, these variables are expressed as the difference of two positive variables.

As explained above, the initial feasible solution or so called initial tableau in the Simplex method is obtained in a simple way which is appropriate to the phenomena of the structural optimization problem, instead of mathematical techniques. After the initial feasible solution is obtained, Simplex method is applied to determine the values of design variables which minimize the objective function.

In certain cases, the structural system may collapse before the second-order limit load due to the excessive displacements, plastic deformations and the large cracks in reinforced concrete structures. The load parameter which causes the structural collapse is defined as the collapse load. The minimum weight design of structures for the collapse load can be performed by the proposed method with certain modifications. In the design phase of the method the equilibrium equations are written by considering the plastic deformation parameters corresponding the collapse mode. Furthermore, displacement and plastic deformation constraints related to the collapse load are added to the constraints of the optimization problem.

The proposed optimum design method is also be applied to the minimum weight design of materially and geometrically non-linear plate and shell structures which can be idealized by equivalent frame elements.

A computer program called as MWDOS has been developed and coded in FORTRAN-77 programming language for the numerical applications of the proposed method. The minimum weight design of plane and space framed structures for the second-order limit load (or for the collapse load) can be performed by the use of this computer program. As MWDOS computer program is executed in a batch program structure, it can also be utilized for optimum design of large structural systems.

Three numerical examples are given to illustrate the minimum weight design method developed herein. In the first example a single story, single bay plane frame is designed by the proposed method and the numerical results are compared with those obtained by a previous study. In the second example, a single story, single bay space frame is designed under different design criteria and the numerical results are compared. In this example the results of minimum weight design for the second-order limit load are given in detail. The third example is devoted to the minimum weight design of a single bay, ten story space frame.

Numerical examples have shown that the effect of geometrical changes on the equilibrium equations and compatibility conditions corresponding the second-order limit load must be considered in the optimization problem. It is observed that, if the effect of geometrical changes on the equilibrium equations is not considered the factor of safety of the structure decreases 20.3%.

Numerical examples have also shown that the optimum solutions obtained with using different initial values are extremely close or almost the same. Based on these results, it can be concluded that, the number of the local optimums in the domain of the feasible solutions are few and their values are close to each other.



BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Konu

Yapı mühendisliğinin amacı, yapıları dış etkilere karşı güvenli ve maliyeti en az olacak şekilde boyutlandırmaktır. Son yıllarda, yapıların dış etkiler altındaki gerçek davranışını belirlemeye yönelik lineer olmayan hesap yöntemlerindeki ve gerekli güvenlik ve rijitlik kısıtlamalarını sağlayan en ekonomik çözümü bulmayı amaçlayan optimizasyon yöntemlerindeki gelişmeler yapı mühendislerinin bu amaca ulaşmalarına olanak sağlamaktadır.

Yapı sistemlerinin boyutlandırılmaları amacıyla uygulanmakta olan yöntemler genel olarak ikiye ayrılırlar.

Gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları orantı sınırı adı verilen bir sınır değerin altında lineer-elastik kabul edilen ve yerdeğiştirmeleri yeterince küçük olan yapılar *güvenlik gerilmeleri esasına* göre boyutlandırılabilirler. Bu tür boyutlandırmada, işletme yüklerinden oluşan gerilmelerin güvenlik gerilmesi adı verilen bir sınır gerilmeden, yerdeğiştirmelerin de kabul edilebilecek sınır değerlerden küçük olması istenir. Bu koşulları sağlayan yapılar, orantı sınırına karşı belirli bir güvenliğe sahip olurlar.

Yapının orantı sınırından sonraki davranışı izlendiğinde, yükler artarak göçme yükü adı verilen bir sınır değere ulaşınca kadar, sistemin yük taşımaya devam ettiği görülür. Yükleri bu değere ulaşan yapı, burkulma, kırılma, büyük yerdeğiştirme ve plastik şekildeğiştirmelerin oluşması, betonarme sistemlerde büyük çatlaklar gibi nedenlerden birinin veya birkaçının etkisi ile göçer. Yapı davranışının daha gerçekçi olarak gözönüne alınması ile hesaplanan göçme yükü ile orantı sınırına karşı gelen yük arasındaki oran sabit olmadığından, güvenlik gerilmeleri esasına göre boyutlandırılan yapıların göçmeye karşı güvenlikleri de sabit olmayıp, yapının geometrik özellikleri, kullanılan malzemenin mekanik özellikleri, yükleme şekli gibi çeşitli etkenlere bağlıdır. İşletme yüklerinin bir güvenlik katsayısı ile çarpımından oluşan hesap yükleri, göçme yüküne eşit olacak

şekilde boyutlandırılan yapılar ise, göçmeye karşı belirli bir güvenliği sağlarlar. *Göçme yükü esasına göre boyutlandırma* adı verilen bu yöntemle boyutlandırılan yapıların, işletme yükleri altında, gerekli gerilme, şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme koşullarını da ayrıca sağlamaları istenir.

Göçme sırasındaki toplam şekildeğiştirmelerin lineer şekildeğiştirmelere oranının büyük olduğu sünek malzemeden yapılmış yapı sistemlerinde, iç kuvvet bileşenleri doğrultularındaki lineer olmayan şekildeğiştirmelerin *plastik kesit* adı verilen belirli kesitlerde toplandığı ve bu kesitlerin dışında sistemin davranışının lineer-elastik olduğu kabul edilebilir. Bu kabulün geçerli olduğu hallerde, yükler artarak bir limit değere ulaştığında, oluşan plastik kesitler nedeniyle sistemin tümü veya bir bölümü mekanizma durumuna gelir veya mekanizma durumuna gelmeden önce stabilize yetersizliği nedeniyle sistem burkularak göçer. Sistemin mekanizma durumuna gelmesine neden olan yüke *birinci mertebe limit yük* (P_{L1}), geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin gözönüne alınması sonucunda, sistemin burkularak göçmesine karşı gelen yüke de *ikinci mertebe limit yük* (P_{L2}) adı verilir. Yüksek süneklik özelliği gösteren yapı sistemleri, hesap yükleri ikinci mertebe limit yüke eşit olacak şekilde boyutlandırılabilirler. Bu şekilde boyutlandırılan yapı sistemlerinde, hesap yüklerinden oluşan yerdeğiştirmelerin ve şekildeğiştirmelerin çok büyük olmaması da istenir. Ayrıca işletme yüklerinden meydana gelen yerdeğiştirmelerin kabul edilebilen sınır değerlerden küçük olması ve gerilmelerin lineer-elastik sınırı pek aşmaması sağlanmalıdır.

Optimizasyon problemlerinin yapı mühendisliği alanında önem kazanması ile birlikte, bu problemlerin çözümü amacıyla yoğun araştırmalar yapılmış ve çok sayıda algoritma geliştirilmiştir. Optimum boyutlandırma problemini formüle etmeye ve çözmeye yönelik olan bu algoritmalar, matematik programlama ve optimumluk kriteri tekniklerini esas almaktadır, [1], [2], [3].

Yapıların en ekonomik şekilde boyutlandırılmalarına yönelik matematik programlama tekniklerinin amacı, *tasarım değişkenleri* adı verilen değişkenler cinsinden ifade edilen kısıtlamaları sağlayan ve yapı maliyetini ifade eden bir amaç fonksiyonu minimum yapan çözümü belirlemektir. Kısıtlamaların ve amaç fonksiyonun tasarım değişkenleri cinsinden lineer bağıntılarla ifade edilebildiği problemlere lineer programlama problemleri,

lineer olmayan bağıntılarla ifade edildiği problemlere ise lineer olmayan programlama problemleri adı verilir. Optimizasyon probleminin yapısına göre, enkesit karakteristikleri (enkesit alanı, atalet momenti, plastik moment), iç kuvvetler, yerdeğiştirmeler veya şekildeğiştirmeler tasarım değişkenleri olarak seçilebilirler. Son yıllarda, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, matematik programlama tekniği esasına dayanan çok sayıda lineer ve lineer olmayan programlama yöntemi geliştirilmiştir.

Lineer olmayan programlama problemi olarak ifade edilen yapı optimizasyonu problemlerinde, tasarım değişkenlerinin sayısının artmasının çözümün yakınsaklık hızını ve güvenilirliğini etkilemesi sonucunda, değişken sayısından bağımsız olan ve basit bir algoritma ile ifade edilebilen optimumluk kriteri yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde, yapı ile ilgili enerji teoremlerinden yararlanarak bir optimumluk kriteri türetilmekte ve bu kriter kullanılarak, ardışık yaklaşımla optimum zm aranmaktadır.

Göçme yüküne veya limit yüke göre yapı ağırlığını minimum yapan zmn en ekonomik zm olarak kabul edildiği bir optimum boyutlandırma probleminde yapı ağırlığı tasarım değişkeni olarak seçilen enkesit karakteristiklerinden bir tanesi cinsinden ifade edilebilir. zmn sağlaması gereken akma koşulları, denge koşulları, geometrik uygunluk koşulları ile yerdeğiştirmeler, şekildeğiştirmeler ve enkesit karakteristiklerine ait sınırlamalar optimum boyutlandırma probleminin kısıtlamalarını oluştururlar.

Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin terkedilmesi ve akma koşulunun iç kuvvetlerin lineer bir fonksiyonu ile ifade edilebilmesi halinde limit yk için minimum ağırlıklı boyutlandırma problemi lineer programlama problemi olarak zlelebilmektedir. Çünkü, bu durumda birinci mertebe limit yk mekanizma yüküne eşit olmakta ve sistemin mekanizma durumuna gelmesine neden olan i kuvvet durumu ise sadece denge denklemleri ile hesaplanabilmektedir.

Birinci mertebe limit yk için minimum ağırlıklı boyutlandırma probleminin lineer programlama yardımıyla zm konusunda yapılan ilk çalışmalarda, sistemin bütün olası mekanizma durumları içinden yapı ağırlığını minimum yapan mekanizma durumu ve ona karşı gelen enkesit karakteristiklerinin

belirlenmesine yönelik yöntemler geliştirilmiştir. Sistemin olası bütün mekanizma durumlarının araştırılmasını gerektiren bu yöntemler, büyük yapı sistemlerinde hesapların çok uzamasına neden olmaktadır, [4], [5], [6].

Bilgisayarlara uygulanabilecek ilk çalışmalarda ise, sistemin bütün kesitlerindeki iç kuvvetler dış yüklere ve tasarım değişkeni olarak seçilen hiperstatik bilinmeyenlere bağlı olarak lineer bir fonksiyonla ifade edilmekte, akma koşullarını sağlayan ve yapı ağırlığını minimum yapan iç kuvvetlerle enkesit karakteristikleri çözüm olarak alınmaktadır, [7], [8].

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 koşulunun iç kuvvet bileşenlerine bağlı lineer olmayan bir fonksiyonla ifade edilmesi ve ikinci mertebe limit yükün mekanizma yüküne eşit olmaması gibi nedenlerle, minimum ağırlıklı boyutlandırma problemleri, genel olarak, lineer olmayan bir optimizasyon probleminin çözümünü gerektirmektedir.

1.2. Konu İle İlgili Çalışmalar

Bu bölümde, yapı sistemlerinin minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılması konusundaki çalışmalar gözden geçirilecek ve bu amaçla yapılan bir literatür araştırmasının sonuçları verilecektir.

Truman ve Cheng [9], değişik kısıtlamalar altında, yer hareketleri etkisindeki üç boyutlu çelik yapı sistemlerinin optimizasyonu için genel bir algoritma vermişlerdir. Her katın kendi düzlemi içinde sonsuz rijit kabul edildiği ve böylelikle yapı davranışının her katta toplam üç serbestlik ile ifade edildiği bu çalışmada ikinci mertebe etkileri gözönüne alınmakta, optimizasyon tekniği olarak optimumluk kriteri tekniği kullanılmaktadır.

Grierson ve Chiu [10], düzlem çerçevelerin işletme ve göçme yükleri seviyesinde minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmaları için genelleştirilmiş optimumluk kriteri yöntemine dayanan bir yol önermişlerdir. İşletme yükü seviyesinde elastik gerilmelerin ve yerdeğiştirmelerin, göçme yükü seviyesinde ise plastik göçmeye karşı

güvenliğin kabul edilebilir değerler alması sağlanmıştır. Önerilen yöntem çelik bir endüstri yapısı ile alüminyum tünel halkası üzerinde uygulanarak tartışılmıştır.

Nooshin, Bauer, Gutkowski ve Iwanow [11], düzenli çerçevelerden oluşan uzay çelik yapıların minimum ağırlıklı boyutlandırılmasını incelemişlerdir. Çalışmada, bilinmeyen düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin sayısını azaltmak için yarı analitik bir yol uygulanmış ve yapının düğüm noktalarına ait diferansiyel denge denklemleri Galerkin yöntemi ile çözülmüştür. Kısıtlama denklemlerinin sayısının azaltılması ile oluşturulan lineer olmayan programlama probleminin çözümü ile minimum ağırlıklı boyutlandırma gerçekleştirilmiştir.

Cinquini ve Contro [12], tanımını verdikleri elastik-plastik sonlu eleman modeli ile ayrık hale getirilen kirişlerin optimum boyutlandırılmasını malzemenin lineer olmayan davranışı ile ilgili kısıtlamaları da dikkate alarak incelemişlerdir. Optimizasyon probleminin çözümünde optimumluk kriteri yöntemini kullanmışlardır.

Gülay [13], statik yükler ve deprem yükleri etkisindeki çaprazlı ve çaprazsız düzlem çelik çerçevelerin optimizasyonu problemini, matris yerdeğiştirme ve modların süperpozisyonu yöntemleri ile formüle etmiş ve bu problemin çözümü için ardışık lineer programlama tekniğini kullanmıştır. Rijitlik, gerilme ve yerdeğiştirme kısıtlamalarının yer aldığı bu çalışmada, çaprazlı ve çaprazsız düzlem çelik çerçevelerin optimum boyutlandırılmaları sonucunda elde edilen toplam malzeme hacimleri literatürde aynı örnekler için elde edilen değerlerle karşılaştırılmaktadır.

Sadek [14], uzay kafes sistemlerin ve düzlem çerçevelerin elastik optimizasyonunu, dolaylı optimizasyon yöntemlerinden iç ceza fonksiyonları yöntemi ile yapmış ve elde edilen sonuçları, daha önceden direkt optimizasyon yöntemlerinden uygun yön yöntemi ile bulunan optimum çözümlerle karşılaştırmıştır.

Ding, Björn ve Esping [15], iki ve üç boyutlu çerçevelerin gerilme ve yerdeğiştirme kısıtlamaları altında minimum ağırlıklı boyutlandırılması problemini incelemişlerdir. Çeşitli enkesit şekillerine ait kesit boyutları tasarım değişkenleri olarak seçilmiş ve problemin çözümü için matematik

programlama yöntemlerinden dual yöntem ile birlikte karışık yaklaşım tekniği kullanılmıştır. Bu çalışmada yedi ayrı enkesit şekline ait bağıntılar incelenmekte ve dört ayrı örneğin çözümüne ait sayısal sonuçlar verilmektedir.

Machaly [16], yarı rijit bağlantılı düzlem çelik çerçevelerin minimum ağırlık esasına göre boyutlandırılması problemini incelemiştir. Tasarım değişkenleri olarak her elemanın başlık genişliği ve gövde yüksekliği seçilmiştir. Gerilme, yerdeğiştirme ve burkulma kısıtlamaları ile birlikte eleman boyutları ile ilgili yan kısıtlamalar da gözönüne alınmıştır. Lineer olmayan programlama probleminin çözümünde iç ceza fonksiyonu tekniğine dayanan kısıtlamasız formülasyon kullanılmış, araştırma vektörünün seçimi Powell algoritması ile, adım boyunun belirlenmesi ise kuadratik interpolasyon tekniği ile gerçekleştirilmiştir.

Machaly [17], gerilme, yerdeğiştirme ve eleman boyutları ile ilgili yan kısıtlamalar altında çelik ızgara sistemlerin minimum ağırlıklı boyutlandırılması problemini incelemiştir. Optimizasyon probleminin çözümü [16] da verilen yolla bulunmuştur. Örnek olarak seçilen çelik köprü kirişleri çeşitli çelik cinsleri için boyutlandırılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Machaly [18], gerilme, yerdeğiştirme ve eleman boyutları ile ilgili yan kısıtlamalar altında yarı rijit bağlantılı çelik ızgara sistemlerin minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılması problemini incelemiştir. Boyutlandırmada I ve kutu enkesit şekilleri kullanılmakta, tasarım değişkenleri olarak enkesit boyutları ile ilgili parametreler seçilmektedir. Optimizasyon probleminin çözümünde yine [16] da verilen yöntem kullanılmıştır.

No ve Aquinagalde [19], sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenen yapıların optimizasyonu için optimumluk kriteri yöntemine dayanan bir algoritma geliştirmişlerdir. Problem, elastik bir boyutlandırma problemi olarak ele alınmakta ve kısıtlama denklemleri düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri ve eleman gerilmeleri cinsinden ifade edilmektedir.

Nafday, Corotis ve Cohon [20], düzlem çerçeveler için sınır çokyüzlülerini ve bunlara karşı gelen bağımsız mekanizma durumlarını tanımlamak için çok amaçlı Simplex yöntemine dayanan bir algoritma geliştirmişlerdir.

Saka [21], optimumluk kriteri yöntemini kullanarak, çelik uzay kafes sistemlerin optimizasyonu problemini incelemiştir. Geometri değişimlerinin ve malzeme davranışının lineer olmayan etkilerinin gözönüne alındığı çalışmada yerdeğiştirmelerle ilgili kısıtlamalar da gözönüne alınmaktadır.

Alwis [22], kare şeklindeki akma kriterini kullanarak, düzlem çelik çerçevelerin optimum plastik boyutlandırılmasını incelemiştir. Geometri değişimlerinin denge genklemlerine etkisinin gözönüne alındığı bu çalışmada maliyeti gerçekçi bir biçimde hesaplayabilmek için standart profiller kullanılmıştır.

Hager ve Balling [23], düzlem çelik sistemlerde ayrık optimum standart kesitlerin belirlenmesi için üç aşamadan oluşan bir hesap yöntemi vermişlerdir. Birinci aşamada, standart profillerin oluşturduğu zarf kısıtlamaları belirleyerek, orijinal ve zarf kısıtlamalar altında sürekli ortamda çözüm bulunmakta, ikinci aşamada, her elemanın sürekli optimum bölgesindeki komşuluk ilişkileri belirlenerek standart kesitler yeniden listelenmekte, üçüncü aşamada ise, amaç fonksiyon ve kısıtlamalar sürekli optimum civarında lineerleştirilmekte ve ayrık optimumu bulmak üzere geliştirilmiş sınır yöntemi uygulanmaktadır. Önerilen yaklaşımın özelliğı, ayrık optimumu bulmak için minimum sayıda yapı analizine gerek olmasıdır.

Cheng ve Juang [24], Amerikan UBC ve ATC-03 ile Çin TJ-11-78 yönetmeliklerini esas alarak tipik çelik yapıların optimum boyutlandırılmasını incelemişler ve bazı karşılaştırmalı boyutlandırma sonuçları vermişlerdir.

Tam ve Jennings [25], değişken kesitli düzlem çelik çerçevelerin optimum plastik boyutlandırılmasını incelemişlerdir. Çalışmada, olası plastik göçme mekanizmaları içinden dış virtüel işi maksimum yapanını bulmayı amaçlayan kinematik yöntemden yararlanılmaktadır. Yapı ağırlığını temsil eden amaç fonksiyon, plastik momentler ile çubuk boylarının çarpımı olarak lineer bir bağıntıyla ifade edilmiştir. Normal kuvvetlerin plastik moment taşıma kapasitelerine etkisi ile geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin gözönüne alınmadığı lineer programlama probleminin çözümünde Simplex yönteminden yararlanılmıştır.

Levy ve Perng [26], uzay kafes sistemlerin stabilite kısıtlamaları altında minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmasını incelemişlerdir. Malzeme davranışının lineer-elastik kabul edildiği bu çalışmada, sistem hesabı ve yeniden boyutlandırma aşamalarından oluşan optimizasyon probleminin çözümünde optimumluk kriteri yönteminden yararlanılmaktadır.

Amir ve Hasegawa [27], sürekli ve ayrık değişkenlerin birarada bulunduğu karışık-ayrık bir lineer olmayan optimizasyon yöntemini kullanarak, düzlem yapı sistemlerinin elastik optimizasyonunu incelemişlerdir.

Frangopol ve Klisinski [28], malzemenin lineer olmayan davranışını gözönüne alarak, çelik düzlem kafes sistemlerin optimizasyonunu Rosenbrock minimizasyon algoritmasını kullanarak incelemişlerdir. Bu çalışmada gerilme ve yerdeğiştirme kısıtlamaları ayrı ayrı ele alınmış, çözüme ait sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Mahadevan ve Haldar [29], sağlanması gereken kısıtlamaları eleman düzeyinde ele alan stokastik bir optimizasyon yöntemini çelik düzlem çerçevelere uygulamışlardır. Çalışmada hem geometri değişimlerinin hem de malzeme davranışının lineer olmaması gözönüne alınmakta, güvenilirlik analizi için stokastik sonlu eleman yöntemi ve Monte Carlo simülasyonu kullanılmaktadır.

El-Sayed , Ridgely ve Sandgren [30], lineer olmayan programlama problemini, ardışık lineerleştirme işlemi ile lineer programlama problemine dönüştürerek çelik düzlem kafes sistemlerin optimizasyonuna uygulamışlardır.

Cheng ve Yuang [31], statik yükler ile dinamik deprem ve rüzgar yükleri etkisindeki çelik düzlem çerçevelerin optimizasyonunu incelemişlerdir. Sismik veriler gerçek deprem kayıtlarından, değişik davranış spektrumlarından ve Amerikan UBC, ATC-03 ile Çin TJ-11 yönetmeliklerinden alınmıştır. İkinci mertebe etkilerini gözönüne alan yerdeğiştirme yöntemi kullanılarak üç aşamalı tekrarlı optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyon olarak yapım ve hasar maliyetleri esas alınmış, gerilme, yerdeğiştirme ve frekans kısıtlamaları gözönünde

tutulmuş ve optimizasyon aşamasında optimumluk kriteri yönteminden yararlanılmıştır.

Ding [32], burkulma kısıtlamalarını da gözönüne alarak düzlem çerçevelerin bir veya iki aşamalı optimizasyonu problemini incelemiş ve dört adet örneğin bu iki yöntemle optimum boyutlandırılmasına ait sayısal sonuçları karşılaştırılmalı olarak vermiştir.

Grandhi [33], iki ve üç boyutlu kafes sistemlerin özdeğer dağılımı ve sönüm parametreleri kısıtlamaları altında ağırlık ve Frobenious norm optimizasyonunu incelemiştir. Optimum çözümler üç ayrı optimizasyon algoritması ile elde edilmiş ve çözümlerin tek olup olmadığı tartışılmıştır.

McGee ve Phan [34], frekans ve sönüm kısıtlamaları altında düzlem sistemlerin enkesit optimizasyonu için, her adımı ölçeklendirme ve yeniden boyutlandırma işlemlerinden oluşan etkin bir optimumluk kriteri algoritması önermişlerdir. Çalışmada, yapılan sayısal uygulamalara ait ağırlık-ardışık yaklaşım sayısı grafikleri, Lagrange çarpanları için seçilen çeşitli bağıntılara bağlı olarak verilmektedir.

Karihaloo ve Kanagasundaram [35], yayılı ve tekil yükler etkisindeki düzlem yapı çerçevelerinin minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılması için bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri, maksimum yerdeğiştirme ve burkulmaya ait kritik yük faktörü ile ilgili kısıtlamalar dikkate alınmıştır. Çözümü basitleştirmek üzere çerçeve elemanlarının kütle dağılımları 0. , 1. , 2. derece eğrilerle temsil edilmiş ve optimizasyon problemi, lineer olmayan programlama problemi olarak ele alınmıştır. Çeşitli yapı sistemlerinin farklı lineer olmayan programlama yöntemleri esas alınarak boyutlandırılması ile elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Balling [36], üç boyutlu çelik çerçevelerin ayrıntı optimizasyonu için mevcut boyutlandırmadan aday boyutlandırmalar elde etmek amacıyla, olasılık teorisini esas alan bir stratejiye dayanan yöntem geliştirmiştir. Herhangi bir aday boyutlandırmanın, mevcut boyutlandırmanın yerini alıp alamayacağını belirlemek için olasılık teorisine dayanan bir kabul kriteri kullanmıştır. Çalışmanın sayısal sonuçlarını göstermek amacıyla, öz ağırlığı ve sismik yükler etkisindeki üç boyutlu çelik çerçevenin optimum

boyutlandırılması Fortran 77 dilinde kodlanan bir bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır.

Hall, Cameron ve Grierson [37], çelik yapı çerçevelerinin minimum ağırlıklı boyutlandırılmasını lineer olmayan yük-yerdeğiştirme etkilerini de dikkate alarak incelemişlerdir. Minimum ağırlıklı boyutlandırma, ikinci mertebe elastik hesap, duyarlılık analizi ve optimizasyon adımlarından oluşan bir ardışık yaklaşım işlemi ile gerçekleştirilmiştir. Kısıtlama denklemleri olarak yönetmeliklerde verilen gerilme, yerdeğiştirme sınırlamaları ve eleman boyutları ile ilgili koşullar kullanılmıştır. İki adet yapı çerçevesi, geliştirilen bilgisayar programı kullanılarak boyutlandırılmış ve sayısal sonuçları verilmiştir.

Corotis ve Nafday [38], olası göçme mekanizmalarından elde edilen simülasyon esasına dayanan bir lineer programlama tekniğini kullanarak düzlem çelik yapı sistemlerinin güvenilirlik analizlerini yapmışlardır.

Nakib ve Frangopol [39], düzlem çelik çerçevelerin optimizasyonu için güvenilirlik analizi esasına dayanan ve karşılıklı etkileşimli olarak çalışan bir bilgisayar programı algoritması vermişlerdir. Böylece, optimizasyon işleminin adımları arasında, tasarımcıya programa müdahale etme ve problem formülasyonunu yeniden gözden geçirme olanağı sağlanmaktadır.

Yang ve Ma [40], eleman ve sistem optimizasyonu aşamalarından oluşan bir optimizasyon tekniğini kullanarak, kompozit yapı sistemleri için güvenilirlik analizi esasına dayanan bir optimum boyutlandırma yöntemi vermişlerdir.

Sadek [41], değişken kesitli çubuklardan oluşan düzlem çerçevelerin elastik optimizasyonu için bir optimumluk kriteri yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada gerilme, yerdeğiştirme kısıtlamaları ve eleman boyutlarıyla ilgili yan kısıtlamalar gözönüne alınmaktadır.

Nakib ve Frangopol [42], düzlem yapı sistemlerinin güvenilirlik esasına dayanan analizi ve optimizasyonu için geliştirilen RBSA ve RBSA-OPT adlı bilgisayar programlarını sunmuşlardır. RBSA programı yapı sisteminin plastik göçme mekanizmalarını ve bunların oluşma olasılıklarını belirlemektedir. RBSA-OPT programı ise, lineer olmayan bir programlama

paketinden oluşmaktadır ve güvenilirlik esasına dayanan yapı optimizasyonu işlemini gerçekleştirmektedir.

Kanagasundaram ve Karihaloo [43], çeşitli yükler etkisindeki düzlem yapı çerçevelerinin minimum ağırlıklı boyutlandırılmasını incelemişlerdir. Gerilme, yerdeğiştirme ve burkulma kısıtlamalarını gözönüne alan lineer olmayan programlama problemi çeşitli yöntemlerle çözülmüş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada ayrıca Fortran 77 dilinde kodlanmış bir bilgisayar programı da verilmiştir.

Mohandas, Phelps ve Ragsdell [44], yapı optimizasyonu problemini bulanık kümelerle modellemişler ve skaler optimizasyon problemi yerine bulanık amaç programlaması problemini önermişlerdir. Problemin çözümü, bulanık küme olarak seçilen bir karar fonksiyonunun bulanık matematik kullanılarak çözümü ile elde edilmiş ve düzlem kafes sistem üzerindeki uygulamasının sonuçları tartışılmıştır.

Raman [45], ortotrop plakların optimum boyutlandırılması için basit, tek bir analiz aşamasından oluşan ve ardışık yaklaşım gerektirmeyen bir yöntem önermiştir. Amaç fonksiyon yapı ağırlığı ile temsil edilmiş, frekans, yerdeğiştirme, statik ve dinamik gerilme kısıtlamaları gözönüne alınmıştır. Önerilen yöntemde tasarım değişkenleri ayrık veya sürekli olarak alınabilmektedir.

Saka [46], büyük boyutlu uzay kafes sistemlerin çeşitli yüklemeler altında optimum boyutlandırılması için yönetmeliklerde verilen gerilme, yerdeğiştirme, burkulma kısıtlamalarını ve minimum enkesit boyutlarıyla ilgili kısıtlamaları gözönüne alan ve optimumluk kriteri esasına dayanan bir yöntem vermiştir.

Hajek ve Frangopol [47], katlanmış plak teorisinden yararlanarak perde sistemlerin gerilme ve yerdeğiştirme kısıtlamaları altında ağırlık optimizasyonu için bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Programda tasarım değişkenleri olarak perde genişliği ve kalınlığı esas alınmaktadır.

Hjelmstad ve Pezeshk [48], üç boyutlu çelik yapı sistemlerinin elastik olmayan sistem burkulmasını dikkate alan ve optimumluk kriteri esasına dayanan bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Amaç fonksiyon, kritik

burkulma modlarına ait özdeğerlerin lineer bir fonksiyonu olarak ifade edilmiş ve modların katılma oranları gözönüne alınmıştır. Kısıtlama denklemleri, eleman enkesit alanları cinsinden ifade edilen yapı ağırlığı ve kesit boyutları ile ilgili sınır değerlerdir.

Dinno ve Mekha [49], betonarme düzlem çerçevelerin optimizasyonunu elastik olmayan malzeme davranışını gözönüne alarak incelemişlerdir. Problemin tasarım değişkenleri olarak minimum maliyeti verecek enkesit boyutları ve donatı miktarı esas alınmıştır. Optimizasyon yöntemi olarak ardışık kısıtlamasız minimizasyon tekniği ve Rosenbrock minimizasyon tekniği kullanılmıştır.

Moharrami ve Grierson [50], betonarme düzlem çerçevelerin elastik optimizasyonunu yapmak üzere bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Tasarım değişkenleri olarak enkesit genişliği ve yüksekliği ile boyuna donatı miktarı esas alınmıştır. Çalışmada yalnız gerilme kısıtlamaları gözönüne alınmakta ve optimizasyon aşamasında optimumluk kriteri yönteminden yararlanılmaktadır.

Lassen [51], yapıyı oluşturan her elemanın alt optimizasyonuna dayanan bir tekrarlı analiz yöntemi ile üç boyutlu çelik çerçevelerin optimizasyonunu yapmıştır. Kısıtlama denklemlerinde maksimum Von Misses gerilmeleri, kiriş stabilitesi ve düğüm noktalarındaki yorulmadan oluşan hasarlar gözönüne alınmıştır. Alt optimizasyon işlemi, lineer olmayan programlama yöntemlerinden ardışık kuadratik programlama yöntemi ile gerçekleştirilmektedir.

Saka ve Hayaloğlu [52], geometri değişimleri bakımından lineer olmayan ve elastoplastik davranış gösteren düzlem çelik çerçevelerin minimum ağırlıklı boyutlandırılmaları için, optimumluk kriteri yaklaşımına dayanan ve her adımı sistem hesabı ile optimizasyon işlemlerinden oluşan bir yöntem vermişlerdir. Yük artımı esasına dayanan sistem hesabı aşamasında denklemler Newton-Raphson iterasyon işlemi ile lineerleştirilmiş ve önceden belirlenen yük parametresine erişildiğinde iterasyon işlemine son verilmiştir. Problemin formülasyonunda yerdeğiştirme ve enkesit boyutları ile ilgili kısıtlamalara yer verilmiş, akma koşulu kısıtlamaları ise gözönüne alınmamıştır.

Hayaloğlu ve Saka [53], [52] de verdikleri minimum ağırlıklı boyutlandırma yöntemini, değişken kesitli çubuklardan oluşan çelik düzlem çerçeveleri de içerecek şekilde geliştirmişlerdir.

Özer [54], çelik düzlem sistemlerin ikinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı boyutlandırılması için, her adımı ikinci mertebe limit yük hesabı ve boyutlandırma aşamalarından oluşan bir ardışık yaklaşım yöntemi geliştirmiştir. Bu çalışmada, yapı ağırlığını temsil eden amaç fonksiyon ve sistemin davranışını ifade eden denge ve akma koşulları her adımda lineerleştirilmekte ve problem bir lineer programlama problemine dönüştürülmektedir. Kısıtlama denklemlerinin oluşturulmasında matris kuvvet yönteminden yararlanılan çalışmada tasarım değişkenleri olarak kesitlerin plastik momentleri ile hiperstatik bilinmeyenler esas alındığından, yerdeğiştirmelerle ve plastik mafsallardaki dönmelerle ilgili kısıtlamalar gözönüne alınamamaktadır. Yöntemin sayısal uygulamalarına olanak sağlamak amacıyla geliştirilen MABO isimli bilgisayar programı ve bu program kullanılarak boyutlandırılan iki ayrı yapı sistemine ait sonuçlar da çalışmada yer almaktadır.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, uzay çubuk sistemlerin ikinci mertebe limit yük için minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmaları amacıyla, bilgisayarlara uyarlanabilecek sistematik bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi ve malzemenin elastoplastik davranışı gözönüne alınmaktadır. Ayrıca, denge denklemleri ve akma koşulları ikinci mertebe limit yüke karşı gelen plastik kesitleri içeren sistem üzerinde ifade edilmiş, böylece geometrik uygunluk koşullarının çözüme etkisi de gözönüne alınmıştır. Geliştirilen yöntem, Bölüm 2.1. de verilecek koşulları sağlayan bütün yapı sistemlerine uygulanabilmektedir.

Malzemenin lineer olmayan davranışının, ikinci mertebe etkilerinin ve limit yüke karşı gelen geometrik uygunluk koşullarının gözönüne alındığı bir optimum boyutlandırma problemi, genel olarak, lineer olmayan programlama yöntemlerinden birisinin uygulanmasını gerektirmektedir. Buna karşılık, boyutlandırılacak olan sistemin enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntıların, plastik kesit yerlerinin ve bu kesitlere ait akma vektörü doğrultularının bilinmesi veya tahmin edilmesi halinde, minimum

ağırlıklı boyutlandırma problemi bir lineer programlama problemine dönüştürülebilir ve bu problem lineer programlama yöntemlerinden birisi ile örneğin Simplex yöntemi ile çözülebilir.

Bu çalışmada, her adımı boyutlandırma ve boyutlandırılan sistemin hesabı aşamalarından oluşan bir ardışık yaklaşım yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntemde, hesap yüküne karşı gelen normal kuvvetlerin esas alınması suretiyle denge denklemleri, akma yüzeyinin düzlemlerden oluşacak şekilde idealleştirilmesi suretiyle de akma koşulu kısıtlamaları lineerleştirilmektedir. Yöntemin her boyutlandırma adımında enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar bir önceki boyutlandırma adımından, plastik kesit yerleri ile bu kesitlere ait akma vektörü doğrultuları ise bir önceki adımda boyutlandırılan sistemin hesabından alınmaktadır. Ardışık iki adımda bulunan enkesit karakteristiklerinin, plastik kesit yerlerinin ve bu kesitlere ait akma vektörü doğrultularının birbirine yeter derecede yakın olması halinde çözüm elde edilmektedir.

Yerdeğiştirmelerin ve plastik kesitlerdeki şekildeğiştirmelerin kabul edilebilen sınır değerleri aşması halinde, yük parametresi ikinci mertebe limit yüke ulaşmadan sistem göçebilir. Geliştirilen yöntem yerdeğiştirme ve plastik kesitlerdeki şekildeğiştirme kısıtlamalarını da içerdiğinden, yapıların göçme yükü için minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmaları amacıyla da kullanılabilir.

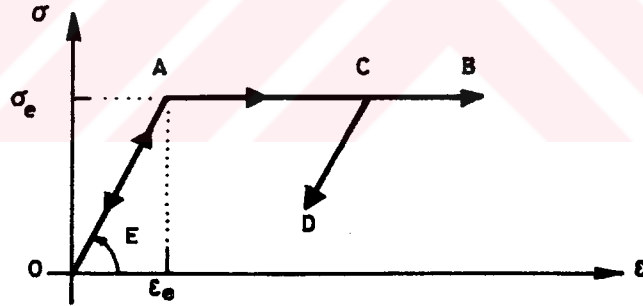
Yöntemin esasları ve uygulaması ilerideki bölümlerde geniş olarak ele alınacaktır.

BÖLÜM 2. UZAY ÇUBUK SİSTEMLERDE İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜK İÇİN YAPI AĞIRLIĞINI MİNİMUM YAPAN BİR BOYUTLANDIRMA YÖNTEMİ

2.1. Kabuller

Bu çalışmada geliştirilen ve uzay çubuk sistemlerin ikinci mertebe limit yük için yapı ağırlığı minimum olacak şekilde boyutlandırılmalarını amaçlayan yöntemde gözönünde tutulan kabuller aşağıda verilmiştir.

- a) Düzlem kesitler, şekil değiştirdikten sonra da düzlem kalırlar.
- b) Malzeme ideal elastoplastiktir. Bu tür malzemelere ait gerilme-şekil değiştirme bağıntısı Şekil 2.1 de verilmiştir, [55].



Şekil 2.1. İdeal Elastoplastik Malzemede $\sigma - \epsilon$ Bağıntısı

- c) Lineer olmayan şekil değiştirmelerin plastik kesit adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bu kesitlerin dışında kalan bölgelerde malzeme davranışının lineer-elastik olduğu kabul edilmiştir.

- d) Akma yüzeyi düzlemlerden oluşacak şekilde idealleştirilmektedir. Ayrıca, yöntemin uygulamalarında, akma koşulunun iki doğrultudaki eğilme momenti ve normal kuvvete bağlı olduğu gözönünde tutulmuştur.

- e) Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi gözönüne alınmakta; geometrik uygunluk koşullarına etkisi terkedilmektedir.

- f) Çubukların asal düzlemleri içindeki yer değiştirmelere ait ikinci mertebe etkileri gözönüne alınmış; buna karşılık burulma doğrultusundaki

yerdeşiştirmelerden oluşan ikinci mertebe etkileri ile çubuk enkesitindeki bölgesel ikinci mertebe etkileri terkedilmiştir.

g) Sistemin şekildeğiştirmesi sırasında dış yüklerin doğrultuları değişmemektedir.

h) Kayma şekildeğiştirmelerinin czme etkisi terkedilmektedir.

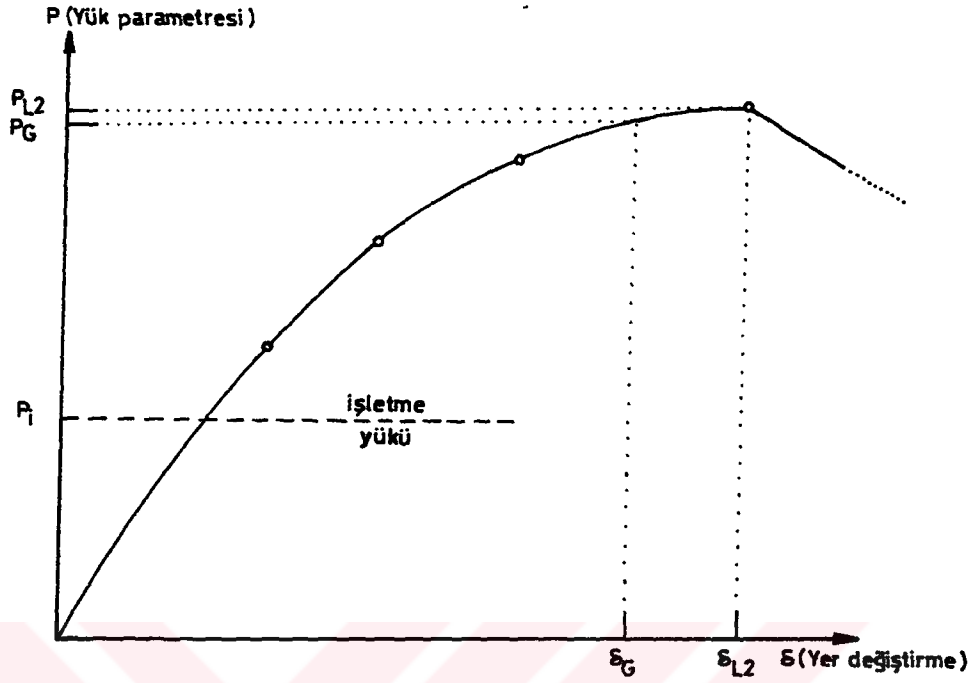
i) Sisteme tekil yükler etkimektedir. Yayılı yüklerin bulunduğu sistemlerde, bu yükler yerine statikçe eşdeğer tekil yükler esas alınarak hesap yapılır. Böylece, plastik kesitlerin çubuk uçlarında ve tekil yüklerin altında oluşması sağlanmaktadır.

j) Sistemin doğru eksenli, sabit enkesitli çubuklardan meydana geldiği ve normal kuvvetin çubuk boyunca sabit olduğu kabul edilmektedir. Bu koşulları sağlamayan çubuklar, normal kuvvetin ve çubuk enkesitinin yaklaşık olarak sabit kabul edilebildiği doğru eksenli küçük parçalara ayrılarak idealleştirilebilirler.

2.2. Ardışık Yaklaşım Yönteminin Esasları

Bu bölümde, malzeme ve geometri değişimleri bakımından lineer olmayan uzay çubuk sistemlerin, ikinci mertebe limit yk için yapı ağırlığı minimum olacak şekilde boyutlandırılmalarını amaçlayan bir ardışık yaklaşım yönteminin esasları verilecektir. Geliştirilen ardışık yaklaşım yönteminin her adımı birbirini izleyen boyutlandırma ve sistem hesabı aşamalarından oluşmaktadır. Herhangi bir boyutlandırma aşamasında, ikinci mertebe limit yüke karşı gelen plastik kesit yerleri, bu kesitlere ait akma vektörlerinin doğrultuları ve sistemin enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar bir önceki adımdan alınmakta, böylece minimum ağırlıklı boyutlandırma problemi bir lineer programlama probleminin ardışık czmne indirgenmektedir. Diğer taraftan, düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerine ek olarak plastik kesitlerdeki şekildeğiştirme parametrelerini de bilinmeyen olarak almak suretiyle, ikinci mertebe limit yüke ait denge ve geometrik uygunluk koşullarının doğrudan doğruya yazılabilmesi mümkün olmaktadır.

Lineer olmayan şekildeğiştirmelerin belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışında kalan bölgelerdeki malzeme davranışının lineer-elastik olduğu kabul edilen bir yapı sisteminin ikinci mertebe teorisine göre hesabıyla elde edilen yük parametresi-yerdeğiştirme bağıntısı şekil 2.2. de verilmiştir.



Şekil 2.2.İdeal Elastoplastik Malzemedan Yapılmış Yapı Sistemlerinde $P - \delta$ Bağıntısı

Sisteme etkiyen dış yükler arttıkça bu yüklerden oluşan iç kuvvetler de artarlar ve iç kuvvet durumu akma koşulunun belirlediği sınıra ulaşan kesitler plastikleşir. Dış yükler artmaya devam ettiğinde plastik kesitlerdeki iç kuvvetlerin değerleri değişir; ancak bu iç kuvvetlerin oluşturduğu bileşik iç kuvvet durumu akma koşulunun belirlediği sınırın dışına çıkamaz ve iç kuvvetler doğrultusunda sonlu plastik şekildeğiştirmeler oluşur. İdeal elastoplastik malzemedan yapılan kesitlerde akma vektörünün akma yüzeyine dik olması özelliği nedeniyle iç kuvvetler doğrultusundaki plastik şekildeğiştirmeler tek bir parametreye bağlı olarak ifade edilebilmektedirler.

Artan dış yükler altında oluşan plastik kesitler nedeniyle sistemin rijitliği giderek azalır ve yük parametresi belirli bir değere ulaştığında sistem burkularak geçer. Sistemin burkulmasına sebep olan bu yük parametresi P_{L2} ile gösterilir ve ikinci mertebe limit yük parametresi adını alır. Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi nedeniyle, ardışık plastik kesitlerin oluşumu arasında sistemin davranışı lineer değildir.

Bazı durumlarda, yük parametresi P_{L2} değerine ulaşmadan önce, oluşan büyük yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler (betonarme sistemlerde büyük çatlaklar) nedeniyle sistem işletme dışı kalabilir. Bu duruma sebep olan P_G yük parametresine göçme yükü parametresi adı verilir. Yüksek süneklik özelliği gösteren sistemlerde göçme yükü genellikle ikinci mertebe limit yüke eşit olmaktadır.

Yapıya etkiyen işletme yüklerinin, bu yükler için öngörülen güvenlik katsayıları ile çarpımından oluşan yüke hesap yükü denilmektedir. İkinci mertebe teorisine göre boyutlandırılan sünek bir yapı sisteminde, hesap yükünün ikinci mertebe limit yüke eşit olması sağlanmalıdır.

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

- a) ikinci mertebe limit yüke ait denge ve geometrik uygunluk koşullarını,
- b) sistem üzerindeki bütün kesitlerde akma koşulu ile ilgili kısıtlamaları,
- c) ikinci mertebe limit yük için öngörülen yerdeğiştirme ve plastik şekildeğiştirme kısıtlamalarını,
- d) enkesit boyutları ile ilgili yapısal kısıtlamaları sağlaması,
- e) yapı ağırlığını minimum yapması gerekmektedir.

İkinci mertebe limit yüke ait denge ve geometrik uygunluk koşulları ile akma koşulu kısıtlamalarının yazılabilmesi için, bu yüke karşı gelen plastik kesit yerlerinin, plastik kesitlerdeki akma vektörü doğrultularının ve sistemin enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntıların bilinmesi gerekmektedir. Hesabın başlangıcında bu bilgiler elde olmadığından, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntıları tahmin edilen bir sistemin ikinci mertebe limit yüküne karşı gelen plastik kesit yerleri ile bu kesitlere ait akma vektörü doğrultuları esas alınarak bir ardışık yaklaşım yöntemi uygulanır. Ardışık boyutlandırma ve sistem hesabı aşamalarından oluşan bu yöntemin her adımında, bir önceki adımda boyutlandırılan sistemin enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar ve bu sistemin ikinci mertebe elastoplastik hesabı sonucunda elde edilen plastik kesit yerleri ile bu kesitlere ait akma vektörü doğrultuları esas alınarak minimum ağırlıklı boyutlandırma işlemi tekrarlanır. Ardışık iki adımdaki enkesit

karakteristiklerinin ve plastik kesit yerleri ile bu kesitlere ait akma vektörü doğrultularının birbirine yeter derecede yakın olması halinde hesaba son verilir.

Aşağıdaki bölümlerde, geliştirilen ardışık yaklaşım yönteminin bir adımını oluşturan boyutlandırma ve sistem hesabı aşamaları ayrı ayrı ele alınacaktır.

2.2.1. Sistemin Boyutlandırılması

Hesap yükü ikinci mertebe limit yüke eşit olacak şekilde, minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan bir yapı sisteminde, hesap yüklerinden oluşan normal kuvvetler büyük ölçüde denge denklemlerine bağlı olduğundan, başlangıçta kolaylıkla tahmin edilebilir. Bu normal kuvvetler için, ikinci mertebe limit yüke ait plastik kesitleri içeren sistem üzerinde yazılacak denge denklemleri, hesap yükleri, düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri ve plastik kesitlerdeki şekildeğiştirme durumunu belirleyen parametreler cinsinden lineer bağıntılarla ifade edilebilir. Düğüm noktalarının yerdeğiştirmelerinin yanısıra plastik kesitlerdeki şekildeğiştirme durumunu belirleyen parametrelerin de değişken olarak alındığı bu denklemlere *genişletilmiş denge denklemleri* adı verilecektir. Genişletilmiş denge denklemleri, sözkonusu sistemin ikinci mertebe limit yüke karşı gelen geometrik uygunluk koşullarını da içerirler.

Denge ve geometrik uygunluk koşullarını sağlayan yerdeğiştirmelerin, plastik şekildeğiştirmelerin ve bunlara karşı gelen iç kuvvetlerin çözüm olabilmesi için akma koşulu kısıtlamalarını da sağlamaları gerekir.

Uzay çubuk sistemlerde akma koşulu, genel olarak,

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

şeklinde, altı adet iç kuvvete bağlı, lineer olmayan bir eşitsizlik ile ifade edilmektedir. Bu bağıntıdaki $K(M_x, M_y, M_z, N, T_y, T_z)$ fonksiyonu enkesit şekline ve malzeme karakteristiklerine bağlı olarak belirlenir.

Uygulamada çok karşılaşıldığı şekilde, altı adet iç kuvvetten bazılarının akma koşuluna etkileri terkedilebilecek mertebede olabilir. Örneğin,

burulma momentinin ve T_y, T_z kesme kuvvetlerinin akma koşuluna etkileri terkedilirse (2.1) bağıntısı

$$K(M_z, M_y, N) \leq 0 \quad (2.2)$$

şeklini alır. Bu bağıntı, M_z, M_y eğilme momentlerinin ve N normal kuvvetinin belirlediği iç kuvvet durumunun, üç boyutlu akma yüzeyinin belirlediği sınırın dışına çıkamayacağını ifade eder.

İdeal elastoplastik malzemeden yapılmış kesitlerde (2.2) bağıntısı yaklaşık olarak,

$$K(M_z, M_y, N) = A_1 M_z + A_2 M_y + A_3 N + B \leq 0 \quad (2.3)$$

şeklinde lineer fonksiyonlarla ifade edilebilir. (2.3) ile verilen akma düzlemlerinin üç boyutlu uzaydaki konumunu belirleyen A_1, A_2, A_3 ve B katsayıları, malzeme özelliklerine ve enkesit karakteristiklerine bağlı olarak tayin edilirler.

Sistemin bütün kesitlerinde düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri ve plastik kesitlerdeki şekildeğiştirme durumunu belirleyen parametreler cinsinden ifade edilebilen iç kuvvetlere bağlı olarak, lineer eşitsizlikler halinde yazılan akma koşulu kısıtlamaları genişletilmiş denge denklemlerini içerecek şekilde yeniden düzenlenebilirler. Bu işlemin matematik karşılığı, sayısı düğüm noktalarındaki yerdeğiştirme bileşenlerinin toplamına eşit olan genişletilmiş denge denklemlerinin akma koşulu kısıtlamalarının üzerine indirgenmesidir. Böylece akma koşulu kısıtlamaları, sadece plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerine bağlı olarak, denge denklemlerini ve geometrik uygunluk koşullarını da içerecek şekilde yeniden düzenlenmiş olur.

Problemin kısıtlamalarını oluşturan genişletilmiş denge denklemlerinin ve akma koşulu kısıtlamalarının lineer bağıntılarla ifade edildiği boyutlandırma aşamasında, yapı ağırlığını temsil eden amaç fonksiyon da, her çubuğun enkesit karakteristikleri arasından seçilen bir tanesine bağlı olarak lineer bir bağıntı ile ifade edilebilir. Bu çalışmada yapı ağırlığı, sistemi oluşturan çubukların z eksenine etrafındaki M_p plastik momentlerine bağlı olarak, her adımda lineerleştirilen bir fonksiyonla ifade edilmektedir.

Amaç fonksiyon ve kısıtlamaları, tasarım değişkenleri olarak seçilen plastik şekildeğiştirme parametreleri ve çubukların plastik momentleri cinsinden ifade edilen lineer bağıntılardan oluşan lineer programlama probleminin çözümü için, bu amaçla geliştirilen yöntemlerden yararlanılabilir. Bu çalışmada, her adımında lineer programlama problemine dönüştürülen minimum ağırlıklı boyutlandırma probleminin çözümü için Simplex yönteminden yararlanılmıştır. Yöntemin uygulanması sırasında, ele alınan boyutlandırma probleminin yapısına uygun, gerekli değişiklik ve düzenlemeler yapılmıştır.

Yüksek süneklik özelliği gösteren yapı sistemlerinin ikinci merteye teorisine göre, minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılması için aşağıda açıklanan yollardan birisi uygulanabilir.

a) Sistemin mekanizma durumuna gelerek göçtüğü kabul edilir ve sistem, mekanizma yükü hesap yüküne eşit olacak şekilde, minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılır. Bunun için ardışık yaklaşımın her adımında genişletilmiş denge denklemleri ve akma koşulları mekanizma durumuna gelmiş sistem üzerinde yazılır. Bu şekilde boyutlandırılan sistem, geometrik uygunluk koşullarının etkisi terkedildiğinden, hesap yüklerinden önce burkulma konumuna gelir. Bu durum elde edilen çözümün güvensiz tarafta kaldığını ifade eder.

b) Sistem alt sınır teoremine göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılır. Bu durumda denge denklemleri ve akma koşulları plastik kesit oluşmamış sistem üzerinde yazılır. Bir başka deyişle, geometrik uygunluk koşullarının tümü gözönüne alınır. Bu şekilde boyutlandırılan sistem ise hesap yüklerinden daha büyük yükleri taşıyabilir; yani boyutlandırma ekonomik değildir.

c) Sistem, ikinci merteye limit yük hesap yüküne eşit olacak şekilde minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılır. Bu durumda hem güvenlik hem de ekonomi koşulları birlikte sağlatılmış olur. Bu çalışmada, genişletilmiş denge denklemleri ve akma koşulu kısıtlamaları ikinci merteye limit yüke ulaşmış sistem esas alınarak yazılmış, böylece ikinci merteye limit yükün hesap yüküne eşit olması sağlanmıştır.

Esasları yukarıda verilen boyutlandırma yönteminin ardışık iki adımda bulunan plastik kesit yerleri ve bunlara ait akma vektörü doğrultuları ile enkesit karakteristikleri birbirlerine yeter derecede yakın olduğunda hesaba son verilir. Bu şekilde, verilen hesap yüklerini taşıyan ve ağırlığı minimum olan sistemin enkesit karakteristikleri elde edilmiş olur.

İkinci mertebe limit yük için yapı ağırlığını minimum yapan boyutlandırma problemi, genel olarak lineer olmayan bir programlama problemidir. Bilindiği gibi lineer olmayan programlama problemlerinde uygun çözümler bölgesi dışbükey olmayabilir, yani birden fazla optimum çözüm bulunabilir. Bu çözümlerden bir tanesi mutlak optimum, diğerleri yerel optimum olarak adlandırılmaktadır. Mutlak optimumun aranması için uygulanan genel yol, farklı başlangıç noktalarından hareket ederek çeşitli yerel optimum çözümlerin bulunması ve bu çözümleri karşılaştırarak ile bir tanesinin mutlak optimum olarak seçilmesidir.

Birinci mertebe limit yükü esas alan minimum ağırlıklı boyutlandırma problemlerinde dışbükey olduğu bilinen uygun çözüm bölgesinin şeklinin ikinci mertebe etkileri ile çok değişmediği, bu yüzden yerel optimumların sayısının az ve değerlerinin birbirine yakın olacağı gözönünde tutulursa, herhangi bir başlangıç noktasından hareket edilerek bulunacak optimum çözümün mutlak optimuma yakın olacağı söylenebilir.

2.2.2. Boyutlandırılan Sistemin Hesabı

Boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe limit yükünün belirlenebilmesi için, artan yükler altında plastik kesitlerin oluşumlarını izleyerek adım adım hesap yapılması gerekmektedir. İkinci mertebe teorisine göre hesapta süperpozisyon prensibi geçerli olmadığından, ardışık plastik kesitlerin oluşumu arasında sistemin davranışı lineer değildir. Bu nedenle, her plastik kesitin meydana geldiği yük parametresinin belirlenmesi için yük üzerinde bir araştırma yapılması gerekmekte, dolayısıyla hesaplar uzamaktadır. Ancak, boyutlandırılan sistemin hesabının amacı ikinci mertebe limit yük parametresi ile bu yüke karşı gelen plastik kesit yerlerinin ve akma vektörü doğrultularının belirlenmesi olduğundan, sistemin limit yükten önceki gerçek davranışını izlemeye gerek yoktur. Ayrıca, ardışık yaklaşımın sonunda limit yükün hesap yüküne eşit olacağı da bilinmektedir. Bu özellikler gözönünde tutulduğunda ve artan yükler

etkisindeki sistem davranışının yüklemenin tarihinden bağımsız olduğu kabul edildiğinde, hesap yüküne karşı gelen ve başlangıçta tahmin edilen normal kuvvetler için hesap yapılabilir. Böylece, bilinen normal kuvvetler için denge denklemleri lineerleştirilmiş olur. Akma koşulunun da düzlemlerden oluşacak şekilde idealleştirilerek lineerleştirilmesi halinde, plastik kesitlerin meydana geldiği yük parametreleri doğrudan doğruya hesaplanabilir.

Bu çalışmada, uzay çubuk sistemlerde ikinci mertbe limit yükün doğrudan hesabı için geliştirilen bir yük artımı yönteminden [56] ve bu yöntemin sayısal uygulamaları için hazırlanan İMEP-3D bilgisayar programından yararlanılmıştır. Yöntemde, hesap yükünden oluşan normal kuvvetlerin başlangıçta tahmin edilmesi suretiyle denge denklemlerinin, akma yüzeyinin düzlemlerden oluşacak şekilde idealleştirilmesi ile de akma koşullarının lineerleştirilmesi esasına göre hesap yapılmaktadır. Sabit düşey yükler ve orantılı olarak artan yatay yükler etkisindeki sistemlerin ikinci mertbe elastoplastik hesabını yapmak üzere geliştirilen İMEP-3D programı, orantılı olarak artan düşey ve yatay yükler etkisindeki sistemlerin hesabını da içerecek şekilde yeniden düzenlenmiştir.

2.3. Çözümün Sağlaması Gereken Koşullar ve Kısıtlamalar

İşletme yüklerinin öngörülen bir güvenlik katsayısı ile çarpımından oluşan hesap yükleri ikinci mertbe limit yüke eşit olacak şekilde boyutlandırılan minimum ağırlıklı bir yapı sisteminin çözümüne ait enkesit karakteristikleri ile iç kuvvet, yerdeğiştirme ve şekildeğiştirmelerin;

- a) ikinci mertbe limit yüke karşı gelen denge ve geometrik uygunluk koşullarını,
- b) sistem üzerindeki bütün kesitlerde akma koşulu ile ilgili kısıtlamaları,
- c) ikinci mertbe limit yük için öngörülen yerdeğiştirme ve plastik şekildeğiştirme kısıtlamalarını,
- d) enkesit boyutları ile ilgili yapısal kısıtlamaları sağlaması,
- e) amaç fonksiyon olarak seçilen toplam yapı ağırlığını minimum yapması gerekmektedir.

Bu bölümde çözümün sağlaması gereken koşullar ve kısıtlamalar ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.3.1. Akma Koşulu

İdeal elastoplastik malzemedan yapılmış çubuklardan oluşan sistemlerde, bir kesitteki iç kuvvetler artarak akma koşulunun belirlediği sınır duruma ulaştığında kesitin taşıma kapasitesi sona erer ve iç kuvvetler doğrultusunda sonlu plastik şekil değiştirmeler oluşur.

Uzay çubuk sistemlerde bir kesite ait akma koşulu genel olarak altı tane iç kuvvet bileşeni cinsinden

$$K(M_x, M_y, M_z, N, T_y, T_z) = 0 \quad (2.1a)$$

şeklinde lineer olmayan bir bağıntı ile ifade edilebilir.

Uygulamada, iç kuvvet bileşenlerinden bir bölümünün akma koşulu üzerindeki etkisi terkedilebilecek mertebede olabilir. Bu durumda akma koşulu diğer iç kuvvet bileşenleri cinsinden yazılır. Örneğin, uzay çubuk sistemlerde, M_x burulma momentinin ve T_y, T_z kesme kuvvetlerinin akma koşuluna etkisi terkedilirse, (2.1a) bağıntısı M_z, M_y eğilme momentlerine ve N normal kuvvetine bağlı olarak,

$$K(M_z, M_y, N) = 0 \quad (2.2a)$$

şeklini alır.

Lineer olmayan şekil değiştirmelerin plastik kesitlerde toplandığı ve bu kesitler dışındaki bölgelerde sistemin lineer-elastik davrandığı kabul edildiğinden, akma yüzeyi içindeki bir iç kuvvet durumuna ait şekil değiştirmeler lineer-elastiktir. İç kuvvet durumu akma yüzeyi üzerinde ise kesit plastikleşir ve iç kuvvet bileşenleri doğrultularında sonlu plastik şekil değiştirmeler oluşur.

Değişen dış etkiler altında bir plastik kesitteki iç kuvvet durumu da değişerek akma yüzeyinin üzerinde hareket edebilir veya yüzeyin içine doğru yönelebilir; fakat akma yüzeyinin dışına çıkamaz.

Plastik hale gelen bir kesitteki iç kuvvet durumunun (2.2a) bağıntısı ile verilen akma yüzeyinin üzerinde kalma özelliği

$$dK = \frac{\partial K}{\partial M_z} dM_z + \frac{\partial K}{\partial M_y} dM_y + \frac{\partial K}{\partial N} dN = 0 \quad (2.4)$$

denklemini ifade edilir.

Plastik kesitte toplandığı kabul edilen plastik şekil değiştirmeler, $\bar{d}(\phi_z, \phi_y, \Delta)$ akma vektörü ile tanımlanır. Akma vektörüne ait ϕ_z, ϕ_y, Δ bileşenleri sırasıyla M_z, M_y eğilme momentleri ve N normal kuvveti doğrultusundaki sonlu plastik şekil değiştirmeleri göstermektedirler.

İdeal elastoplastik malzemeden yapılmış kesitlerde $\bar{d}$ akma vektörünün akma yüzeyine dik olduğu bilinmektedir, Çakıroğlu ve Özer [55], Neal [57], Hodge [58]. Diklik özelliği nedeniyle akma vektörünün bileşenleri,

$$\begin{aligned} \phi_z &= \phi \frac{\partial K}{\partial M_z} \\ \phi_y &= \phi \frac{\partial K}{\partial M_y} \\ \Delta &= \phi \frac{\partial K}{\partial N} \end{aligned} \quad (2.5)$$

şeklinde $K(M_z, M_y, N)$ fonksiyonunun kısmi türevlerine bağlı olarak ifade edilebilirler. Burada $\phi, \bar{d}$ akma vektörünün şiddetini belirleyen bir parametreyi göstermektedir.

(2.2a) ile verilen akma koşulundaki iç kuvvetlerden biri daha terkedilebilir mertebede veya sıfır olduğunda, akma koşulu geriye kalan diğer iki iç kuvvete bağlı olarak ifade edilir. Örneğin, M_y eğilme momentinin sıfır olduğu plastik kesitlerdeki akma koşulu,

$$K(M_z, N) = 0 \quad (2.2b)$$

şeklinde dir. Benzer şekilde (2.2a) ile verilen akma koşulundaki iç kuvvetlerden ikisi terkedilebilir mertebede veya sıfır olduğunda, akma koşulu tek iç kuvvete bağlı olarak yazılır. Bu duruma örnek olarak, M_y eğilme momentinin ve N normal kuvvetinin sıfır olduğu plastik kesitlerdeki

$$K(M_z) = M_z - M_{zp} = 0 \quad (2.2c)$$

akma koşulu verilebilir. Burada M_{zp} , z eksenini etrafında, kesitin elastoplastik olarak taşıyabileceği en büyük eğilme momentidir ve *plastik moment* adını alır. M_z eğilme momentinin M_{zp} plastik momentine eşit olduğu kesitlerin *plastik mafsall* olarak tanımlandığı ve akma vektörünün yalnız ϕ_z plastik şekildeğiştirme bileşeninden (plastik mafsall dönmesi) oluştuğu bilinmektedir.

Eğilme momentlerinin sıfır olduğu kesitlerde ise (2.2a) akma koşulu

$$K(N) = N - N_p = 0 \quad (2.2d)$$

şeklini alır. Burada N_p , kesitin elastoplastik olarak taşıyabileceği en büyük normal kuvveti göstermektedir. Normal kuvvetin N_p değerine eşit olduğu kesitlerde yalnız Δ plastik boydeğişimleri meydana gelir.

İdeal elastoplastik malzemeden yapılmış kesitlerde (2.2a) akma koşulu yaklaşık olarak

$$K(M_z, M_y, N) = A_1 \cdot M_z + A_2 \cdot M_y + A_3 \cdot N + B = 0 \quad (2.3a)$$

şeklinde lineer bir bağıntı ile idealleştirilebilir. Burada A_1 , A_2 , A_3 ve B , malzeme ve enkesit özellikleri ile kesitteki iç kuvvet durumuna bağlı olarak belirlenen sabit katsayılardır.

(2.3a) bağıntısı ile verilen akma koşulundaki iç kuvvetler doğrultusunda oluşan ϕ_z , ϕ_y ve Δ plastik şekildeğiştirme bileşenleri, bu bağıntıdaki A_1 , A_2 ve A_3 katsayılarına bağlı olarak,

$$\begin{aligned} \phi_z &= \phi \frac{\partial K}{\partial M_z} = \phi A_1 \\ \phi_y &= \phi \frac{\partial K}{\partial M_y} = \phi A_2 \\ \Delta &= \phi \frac{\partial K}{\partial N} = \phi A_3 \end{aligned} \quad (2.5a)$$

şeklinde ifade edilebilirler.

Böylece plastik şekil değiştirme bileşenleri, plastik şekil değiştirme vektörünün şiddetini gösteren tek bir ϕ parametresine bağlı olarak yazılmış olur. Bu parametreye *plastik şekil değiştirme parametresi* adı verilir.

Plastik şekil değiştirme parametresinin birim değeri için plastik şekil değiştirme bileşenleri,

$$\begin{aligned}\phi_z &= A_1 \\ \phi_y &= A_2 \\ \Delta &= A_3\end{aligned}\tag{2.5b}$$

değerlerini alırlar.

Akma yüzeyini oluşturan akma düzlemlerinin bazı iç kuvvet bileşenlerinden bağımsız olması halinde, (2.5a) bağıntısı uyarınca, sözkonusu iç kuvvetler doğrultusundaki plastik şekil değiştirme bileşeni sıfır olmaktadır. Örneğin akma düzlemlerinin M_z iç kuvvetinden bağımsız olması durumunda,

$$\begin{aligned}\phi_z &= 0 \\ \phi_y &= A_2 \\ \Delta &= A_3\end{aligned}\tag{2.5c}$$

yazılabilir.

M_z ve M_y eğilme momentlerinin sıfır olduğu, yalnız normal kuvvet etkisindeki kesitlerde ise (2.5b) ile verilen plastik şekil değiştirme bileşenleri,

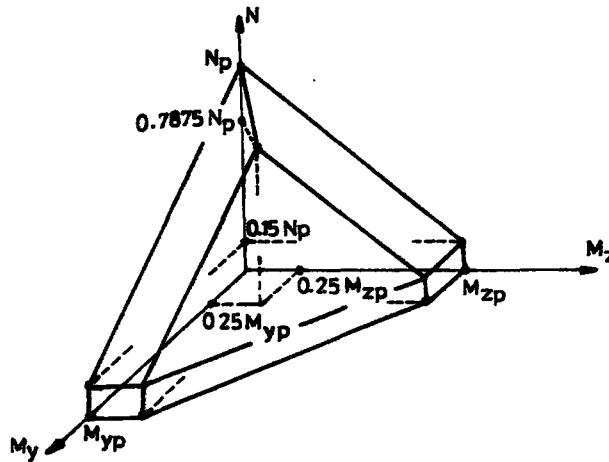
$$\begin{aligned}\phi_z &= 0 \\ \phi_y &= 0 \\ \Delta &= A_3\end{aligned}\tag{2.5d}$$

halini alır.

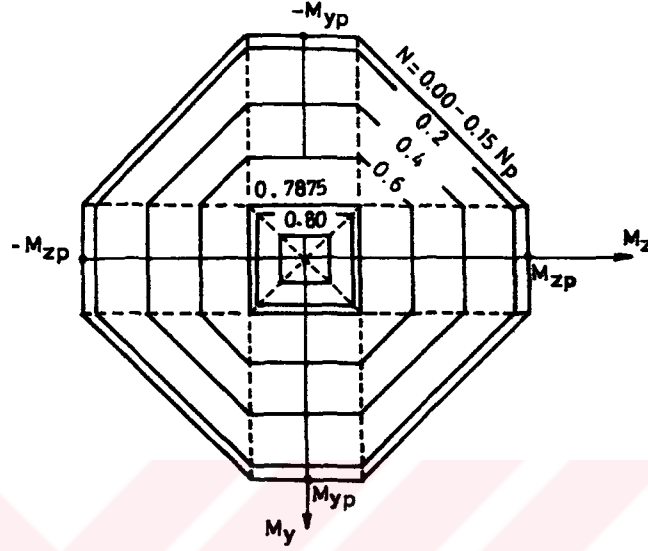
Bilindiği gibi akma koşulları, malzeme karakteristiklerine ve enkesit şekline bağlı olarak elde edilmektedirler, Çakıroğlu ve Özer [55], Neal [57], Hodge [58].

Bu çalışmada kutu enkesitli uzay çubuklarda $K(M_z, M_y, N) = 0$ akma koşulu ile elde edilen akma yüzeyinin (2.3a) bağıntısına göre düzlemlerden oluşacak şekilde idealleştirilmesi esasına dayanan ve İrtem [56] tarafından önerilen yaklaşık akma yüzeyi kullanılmıştır. Önerilen akma yüzeyi, bu yüzeyin $M_y - M_z$ düzlemi üzerindeki izdüşümü ve $N - M_y$, $N - M_z$ düzlemleri ile elde edilen kesitleri sırasıyla Şekil 2.3, Şekil 2.3a ve Şekil 2.3b de gösterilmiştir.

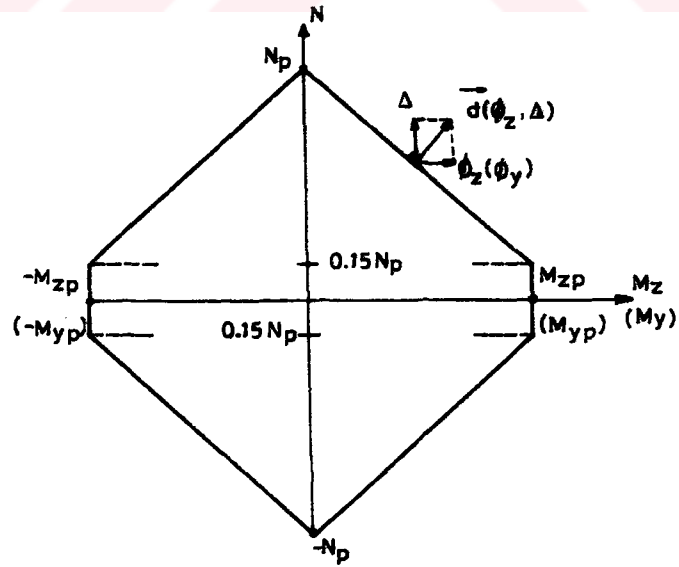
Önerilen akma koşulu, $M_y = 0$ için, M_z eğilme momenti ve N normal kuvveti etkisindeki kutu ve I enkesitli çubuklara uygulanmakta olan yaklaşık akma koşulunu vermektedir, [54], [55]. Diğer taraftan Şekil 2.3a dan görüldüğü gibi, $N < 0.80N_p$ olduğu durumlarda $M_y < 0.25M_{yp}$ için M_y eğilme momentinin, $M_z < 0.25M_{zp}$ için M_z eğilme momentinin akma koşuluna etkisi terkedilmektedir.



Şekil 2.3.İdealleştirilmiş Akma Yüzeyi



Şekil 2.3a. İdealleştirilmiş Akma Yüzeyinin $(M_y - M_z)$ Düzlemi Üzerindeki İzdüşümü



Şekil 2.3b. İdealleştirilmiş Akma Yüzeyinin $(N - M_z), (N - M_y)$ Düzlemleri İle Arakesiti

Yaklaşık akma koşulunu tanımlayan A_1, A_2, A_3 ve B katsayılarının değerleri, akma yüzeyini oluşturan düzlemlere ait 32 farklı iç kuvvet durumunu ve $N = \pm N_p$ durumlarını içerecek şekilde Tablo 2.1 de verilmiştir.

Tablo 2.1. Yaklaşık Akma Koşulunu Tanımlayan Katsayılar

$$-0.15N_p \leq N \leq 0.15N_p$$

A_1	A_2	A_3	B
0	1	0	$-M_{yp}$
0	-1	0	$-M_{yp}$
1	0	0	$-M_{zp}$
-1	0	0	$-M_{zp}$
1	M_{zp} / M_{yp}	0	$-1.25M_{zp}$
-1	$-M_{zp} / M_{yp}$	0	$-1.25M_{zp}$
1	$-M_{zp} / M_{yp}$	0	$-1.25M_{zp}$
-1	M_{zp} / M_{yp}	0	$-1.25M_{zp}$

$$-0.7875N_p \leq N \leq -0.15N_p$$

A_1	A_2	A_3	B
0	-1	$-M_{yp} / 0.85N_p$	$-M_{yp} / 0.85$
0	1	$-M_{yp} / 0.85N_p$	$-M_{yp} / 0.85$
-1	0	$-M_{zp} / 0.85N_p$	$-M_{zp} / 0.85$
1	0	$-M_{zp} / 0.85N_p$	$-M_{zp} / 0.85$
-1	$-M_{zp} / M_{yp}$	$-M_{zp} / 0.85N_p$	$-1.4265M_{zp}$
1	M_{zp} / M_{yp}	$-M_{zp} / 0.85N_p$	$-1.4265M_{zp}$
-1	M_{zp} / M_{yp}	$-M_{zp} / 0.85N_p$	$-1.4265M_{zp}$
1	$-M_{zp} / M_{yp}$	$-M_{zp} / 0.85N_p$	$-1.4265M_{zp}$

Tablo 2.1. Yaklaşık Akma Koşulunu Tanımlayan Katsayılar (devam)

$$0.15N_p \leq N \leq 0.7875N_p$$

A ₁	A ₂	A ₃	B
0	-1	$M_{yp} / 0.85N_p$	$-M_{yp} / 0.85$
0	1	$M_{yp} / 0.85N_p$	$-M_{yp} / 0.85$
-1	0	$M_{yp} / 0.85N_p$	$-M_{zp} / 0.85$
1	0	$M_{zp} / 0.85N_p$	$-M_{zp} / 0.85$
-1	$-M_{zp} / M_{yp}$	$M_{zp} / 0.85N_p$	$-1.4265M_{zp}$
1	M_{zp} / M_{yp}	$M_{zp} / 0.85N_p$	$-1.4265M_{zp}$
-1	M_{zp} / M_{yp}	$M_{zp} / 0.85N_p$	$-1.4265M_{zp}$
1	$-M_{zp} / M_{yp}$	$M_{zp} / 0.85N_p$	$-1.4265M_{zp}$

$$-N_p \leq N \leq -0.7875N_p$$

A ₁	A ₂	A ₃	B
0	-1	$-M_{yp} / 0.85N_p$	$-M_{yp} / 0.85$
0	1	$-M_{yp} / 0.85N_p$	$-M_{yp} / 0.85$
-1	0	$-M_{zp} / 0.85N_p$	$-M_{zp} / 0.85$
1	0	$-M_{zp} / 0.85N_p$	$-M_{zp} / 0.85$

$$0.7875N_p \leq N \leq N_p$$

A ₁	A ₂	A ₃	B
0	-1	$M_{yp} / 0.85N_p$	$-M_{yp} / 0.85$
0	1	$M_{yp} / 0.85N_p$	$-M_{yp} / 0.85$
-1	0	$M_{zp} / 0.85N_p$	$-M_{zp} / 0.85$
1	0	$M_{zp} / 0.85N_p$	$-M_{zp} / 0.85$

Tablo 2.1. Yaklaşık Akma Koşulunu Tanımlayan Katsayılar (devam)

$$N = N_p$$

A_1	A_2	A_3	B
0	0	1	$-N_p$

$$N = -N_p$$

A_1	A_2	A_3	B
0	0	-1	$-N_p$

2.3.2. Denge Koşulları

İkinci mertebe limit yük için yapı ağırlığını minimum yapan bir optimum boyutlandırma probleminde çözüme ait iç kuvvetlerin denge denklemlerini ve geometrik uygunluk koşullarını sağlaması gerekmektedir. Bu çalışmada, denge denklemlerinin yazılması için matris yerdeğiştirme yönteminden yararlanılmıştır, [59]. Bu yöntemde, düğüm noktalarındaki moment ve izdüşüm denge koşullarını ifade eden denge denklemleri aynı zamanda geometrik uygunluk koşullarını da içerdiğinden bu koşulların ayrıca yazılmasına gerek kalmamaktadır. Ancak bu durumda, denge denklemleri yazılırken ikinci mertebe limit yüke ait geometrik uygunluk koşullarının gözönüne alınması, diğer bir deyişle, uç kuvvetlerinin uç yerdeğiştirmelerine ve ikinci mertebe limit yüke karşı gelen plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerine bağlı olarak ifade edilmesi gerekir. Bu şekilde elde edilen genişletilmiş denge denklemleri matris formunda,

$$[S_{dd}][d] + [S_{d\phi}][\phi] + [P_0] = [q] \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir. Bu matrislerin tanımları ve nasıl elde edilebilecekleri aşağıda açıklanmıştır.

$[d]$: düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden oluşan bir kolon matristir. Bu kolon matris n sayıdaki düğüm noktasının sistem eksenleri doğrultularındaki yerdeğiştirme bileşenlerinden oluşan $[d]_x$ kolon matrislerinin alt alta yazılması ile elde edilir.

$[S_{dd}]$: plastik kesit oluşmamış sisteme ait $6n \times 6n$ boyutundaki sistem rijitlik matrisidir. Bu matrisin i sayılı kolonu, düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden i sırasındaki bir, diğerleri sıfır iken düğüm noktalarına etkiyen dış kuvvetlerden oluşmaktadır. İkinci mertebe teorisinde, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi nedeniyle, $[S_{dd}]$ matrisinin elemanları, Ek B de tanımlanan Ψ_y ve Ψ_z değerlerine bağlı olarak belirlenirler.

$[P_0]$: plastik kesit oluşmamış sisteme ait $6n$ elemanlı dış yük matrisidir. Bu matrisin elemanları, düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken yalnız çubukların üzerine etkiyen dış yüklerden dolayı çubuk uçlarında oluşan, sistem eksenleri doğrultusundaki uç kuvvetlerinden meydana gelmektedir.

$[q]$: sistemin düğüm noktalarına etkiyen dış yüklerin sistem eksen takımındaki bileşenlerinden oluşan $6n$ elemanlı bir kolon matristir.

$[\phi]$: plastik kesitlerdeki ϕ plastik şekildeğiştirme parametrelerinden oluşan bir kolon matristir. Plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme bileşenleri, bu kesitlere ait ϕ plastik şekildeğiştirme parametreleri cinsinden ifade edildiklerinden, düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleriyle birlikte bu parametreler, bilinmeyen olarak alınmaktadır. m adet plastik kesitin bulunduğu bir sistemde $[\phi]$ kolon matrisi m sayıdaki plastik kesite ait ϕ parametrelerinden oluşur. Bu büyüklükler, plastik kesitlerin oluşum sırasına göre $[\phi]$ kolon matrisinde alt alta yazılırlar.

$[S_{d\phi}]$: plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirmelerin denge denklemlerine etkisini ifade eden bir matristir. $6n \times m$ boyutundaki bu matrisin k sayılı kolonu, k sayılı plastik kesite ait plastik şekildeğiştirme parametresi $\phi_k = 1$, diğer plastik kesitlere ait plastik şekildeğiştirme parametreleri ve düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken düğüm noktalarına etkiyen dış kuvvetlerden oluşur. $[S_{d\phi}]$ matrisi, sistemde

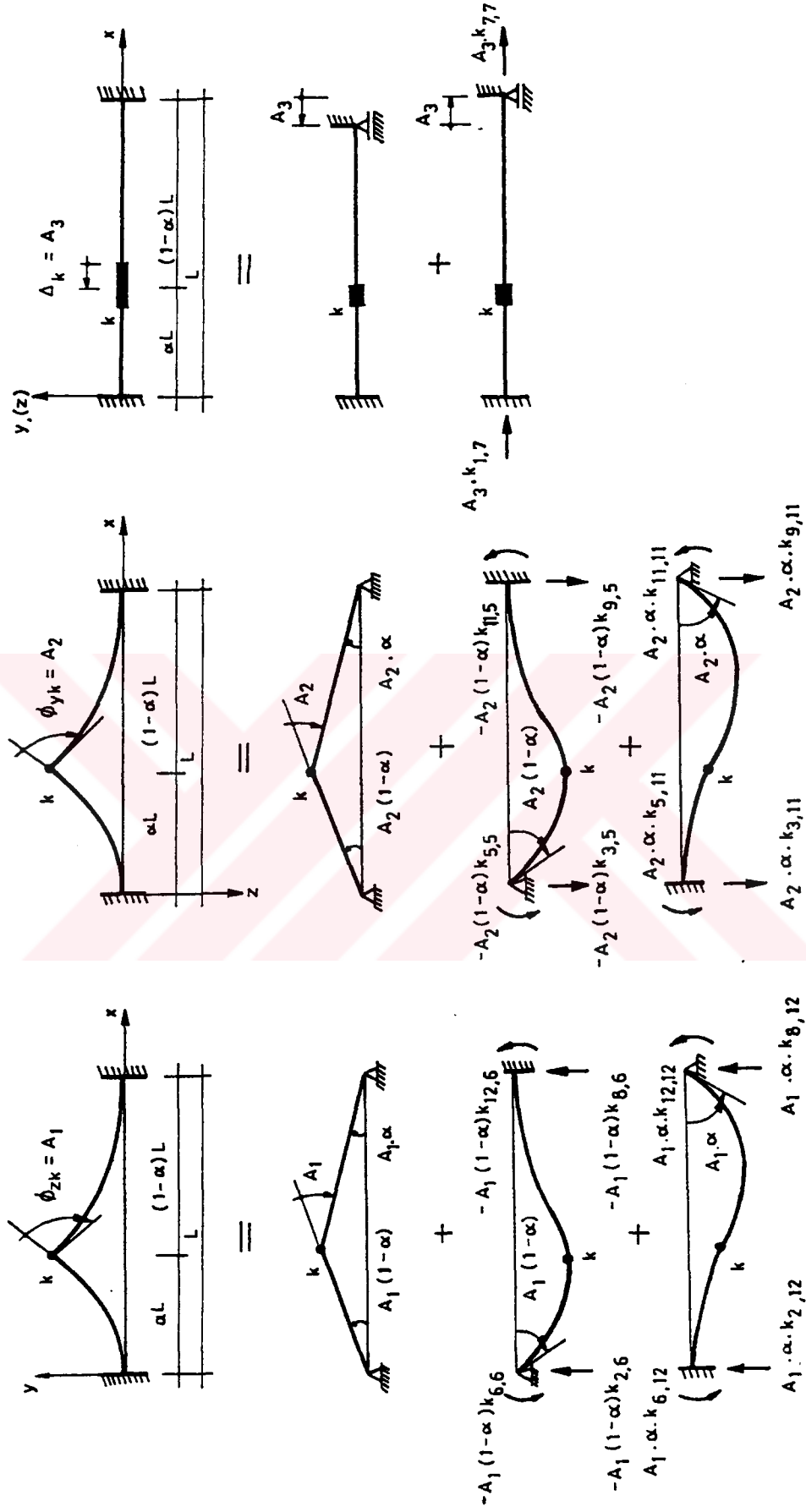
oluşan her plastik kesit için sistem eksenlerinde hesaplanan $[P_{\phi k}]_{ix}, [P_{\phi k}]_{jx}$ uç kuvvetleri matrislerinin sırasıyla yanyana gelmeleri ile elde edilir, Şekil 2.4.

$[S_{d\phi}] =$

1	.	.	k	.	.	m	
			0				1
			0				.
			$[P_{\phi k}]_{ix}$				i
			0				.
			0				.
			0				.
			0				.
			$[P_{\phi k}]_{jx}$				j
			0				.
			0				n

Şekil 2.4. $[S_{d\phi}]$ Matrisinin Elde Edilmesi

Üzerindeki k noktasında plastik kesit bulunan bir $i-j$ çubuğunda, bu plastik kesite ait plastik şekil değiştirme parametresinin birim değerinden meydana gelen çubuk uç kuvvetlerini içeren $[P_{\phi k}]$ matrisinin elde edilmesinde kullanılan süperpozisyon durumları Şekil 2.5 te verilmiştir.



Şekil 2.5. Plastik Şekildeğiştirme Parametresinin Birim Değerinden Meydana Gelen Çubuk Uç Kuvvetleri Matrislerinin Elde Edilişinde Gözönüne Alınan Süperpozisyon Durumları

İkinci merteye etkileri terkedilebilecek mertebede olan doğru eksenli-prizmatik çubuklarda, i ve j uçlarına ait $[P_{\phi k}]$ matrisleri, akma vektörünün doğrultusunu belirleyen A_1, A_2, A_3 katsayılarına bağlı olarak,

$$[P_{\phi k}]_i = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_3(EF/L) \\ A_1(12\alpha-6)(EI_z/L^2) \\ -A_2(12\alpha-6)(EI_y/L^2) \\ 0 \\ A_2(6\alpha-2)(EI_y/L) \\ A_1(6\alpha-2)(EI_z/L) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

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

şeklinde ifade edilir.

$[P_{\phi k}]$ matrislerinin ikinci merteye teorisine ait değerleri ise

$$[P_{\phi k}]_i = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_3(EF/L) \\ A_1(2\alpha-1)(b_{z1,1} + b_{z1,2})/L \\ -A_2(2\alpha-1)(b_{y1,1} + b_{y1,2})/L \\ 0 \\ A_2[-(1-\alpha)b_{y1,1} + b_{y1,2}] \\ A_1[-(1-\alpha)b_{z1,1} + b_{z1,2}] \end{bmatrix} \quad (2.7a)$$

$$[P_{\phi k}]_j = \begin{bmatrix} P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3(EF/L) \\ -A_1(2\alpha-1)(b_{z1,1} + b_{z1,2})/L \\ A_2(2\alpha-1)(b_{y1,1} + b_{y1,2})/L \\ 0 \\ A_2[\alpha b_{y1,1} - (1-\alpha)b_{y1,2}] \\ A_1[\alpha b_{z1,1} - (1-\alpha)b_{z1,2}] \end{bmatrix}$$

şeklindedir.

(2.7a) ifadelerindeki a , b_y ve b_z terimlerinin tanımları Ek B de verilmiştir.

(2.7) ve (2.7a) ifadeleri ile elde edilen, çubuk eksenlerindeki $[P_{\phi k}]_i$ ve $[P_{\phi k}]_j$ uç kuvvetleri matrislerini sistem eksen takımına dönüştürmek için

$$[P_{\phi k}]_{ix} = [T] \cdot [P_{\phi k}]_i \quad (2.8)$$

$$[P_{\phi k}]_{jx} = [T] \cdot [P_{\phi k}]_j$$

bağıntılarından yararlanılır. Bu bağıntılardaki $[T]$ matrisi, çubuğa ait dönüştürme matrisidir ve çubuğun uzaydaki konumunu belirleyen büyüklüklere bağlı olarak elde edilir.

Yukarıda tanımlanan matrislerin yardımı ile oluşturulacak $[S_{d\phi}]$ matrisinin (2.6) denklemindeki yerine yazılmasıyla elde edilen genişletilmiş denge denklemleri, bu çalışmaya konu olan optimizasyon probleminin eşitlik şeklindeki kısıtlamalarını oluştururlar.

Genişletilmiş denge denklemleri yazılırken, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar bir önceki adımın boyutlandırma aşamasından, ikinci mertebe limit yüke karşı gelen plastik kesit yerleri ve bu kesitlere ait akma vektörü doğrultularını belirleyen A_1, A_2, A_3 katsayıları bir önceki adımın sistem hesabı aşamasından alınırlar.

2.3.3. Akma Koşulu İle İlgili Kısıtlamalar

Akma koşulu ile ilgili kısıtlamalar sistemin *kritik kesit* adı verilen kesitlerindeki iç kuvvet durumlarının akma koşulunun belirlediği sınırı aşamayacağını ifade eden eşitsizliklerdir. Bu kısıtlamalar, çubuk uçlarındaki ve tekil yüklerin altındaki kritik kesitlerde, düğüm noktalarının yerdeğiştirmelerine ve plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerine bağlı olarak ifade edilen iç kuvvetlerin, lineerleştirilmiş akma koşulu ifadesindeki yerlerine yazılmaları ile elde edilirler.

Üç adet iç kuvvet bileşenine bağlı olan lineerleştirilmiş akma koşulunun kullanılması halinde

$$A_1 M_z + A_2 M_y + A_3 N + B \leq 0 \quad (2.3)$$

şeklinde lineer bir eşitsizlik ile ifade edilen akma koşulu kısıtlaması, sistemdeki bir $i-j$ çubuğu üzerinde bulunan herhangi bir kritik kesit için matris formunda

$$[t].[F(x)] + [u].M_p \leq 0 \quad (2.9)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu eşitsizlikteki $[F(x)]$, gözönüne alınan kesitteki iç kuvvetlere ait

$$[F(x)] = \begin{bmatrix} N(x) \\ T_y(x) \\ T_z(x) \\ M_x(x) \\ M_y(x) \\ M_z(x) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

kolon matrisini göstermektedir. Bu matrisin elde edilişi aşağıda açıklanmıştır.

Çubuklara ait uç kuvvetlerini veren süperpozisyon denklemleri [59], plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirmelerin etkisini de içerecek şekilde yeniden düzenlenirse,

$$\begin{aligned} [P]_i &= [T]^T [k]_{ixix} [d]_{ix} + [T]^T [k]_{ixjx} [d]_{jx} + [T]^T [P_\phi]_{ix} [\phi]_{ij} + [T]^T [P_0]_{ix} \\ [P]_j &= [T]^T [k]_{jxix} [d]_{ix} + [T]^T [k]_{jxjx} [d]_{jx} + [T]^T [P_\phi]_{jx} [\phi]_{ij} + [T]^T [P_0]_{jx} \end{aligned} \quad (2.11)$$

şeklini alırlar. Bu ifadedeki $[P_\phi]_{ix}$ ve $[P_\phi]_{jx}$ matrisleri, $i-j$ çubuğu üzerinde oluşan her plastik kesite ait, sistem eksenlerindeki $[P_{\phi k}]_{ix}$ ve $[P_{\phi k}]_{jx}$ uç kuvvetleri matrislerinin yanyana gelmesiyle elde edilir. $[\phi]_{ij}$ ise sözkonusu

plastik kesitlere ait plastik şekildeğiştirme parametrelerini içeren bir kolon matristir.

Uzunluğu L olan bir $i-j$ çubuğu üzerinde, çubuğun sol ucuca uzaklığı x olan bir kritik kesitteki iç kuvvet bileşenlerini içeren $[F(x)]$ matrisi $[P]_j$ ve $[P]_i$ uç kuvvetleri matrislerine bağlı olarak

$$[F(x)] = (x/L)[P]_j - (1-x/L)[P]_i + [F_0(x)] \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilebilir. (2.12) bağıntısındaki $[F_0(x)]$, aynı açıklıklı basit mesnetli kirişte çubuk üzerindeki yüklerden dolayı söz konusu kritik kesitte meydana gelen iç kuvvetleri içeren bir kolon matrisi göstermektedir.

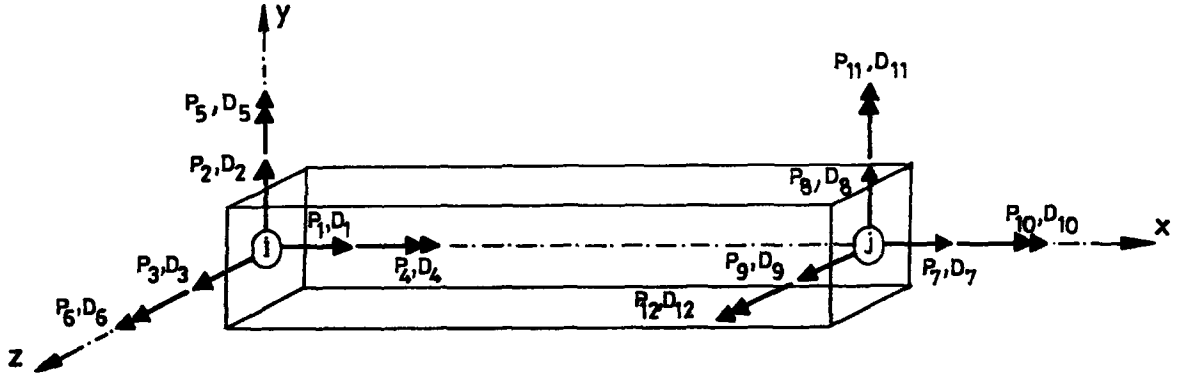
(2.11) bağıntısındaki $[P]_i$ ve $[P]_j$ uç kuvvetleri matrisleri, (2.12) bağıntısındaki yerlerine yazılırlarsa, kritik kesitteki iç kuvvet bileşenlerinden meydana gelen $[F(x)]$ matrisi, kritik kesitin bulunduğu çubuğun i ve j düğüm noktalarının sistem eksenleri doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenlerini içeren $[d]_{ix}, [d]_{jx}$ matrislerine ve aynı çubuk üzerindeki plastik kesitlere ait plastik şekildeğiştirme parametrelerini içeren $[\phi]_{ij}$ matrisine bağlı olarak,

$$\begin{aligned} [F(x)] = & \left[(x/L)[T]^T[k]_{jix} - (1-x/L)[T]^T[k]_{ixix} \right] \cdot [d]_{ix} \\ & + \left[(x/L)[T]^T[k]_{jix} - (1-x/L)[T]^T[k]_{ixix} \right] \cdot [d]_{jx} \\ & + \left[(x/L)[T]^T[P_\phi]_{jx} - (1-x/L)[T]^T[P_\phi]_{ix} \right] \cdot [\phi]_{ij} \\ & + \left[(x/L)[T]^T[P_0]_{jx} - (1-x/L)[T]^T[P_0]_{ix} \right] \\ & + [F_0(x)] \end{aligned} \quad (2.12a)$$

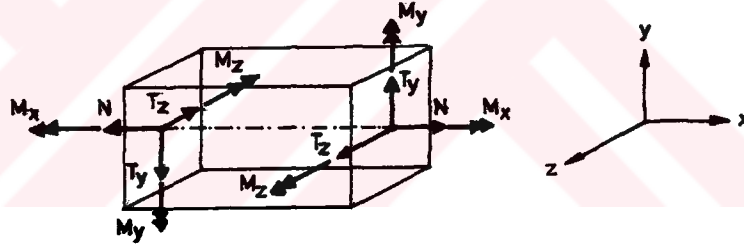
şeklinde yazılabilir.

(2.12) ve (2.12a) ifadeleri, ikinci mertebe etkileri terkedilebilecek mertebede olan çubuklarda bütün kritik kesitler için, ikinci mertebe etkileri önemli olan çubuklarda ise yalnız çubuk uçlarındaki kritik kesitler için geçerlidir.

Çubuk uç kuvvetlerinin ve çubuk üzerindeki herhangi bir kesitteki iç kuvvetlerin pozitif yönleri sırasıyla Şekil- 2.6 ve Şekil 2.7 de verilmiştir.



Şekil 2.6.Çubuk Uç Kuvvetlerinin Pozitif Yönleri



Şekil 2.7.Çubuk Üzerindeki Bir Kesitteki İç Kuvvetlerin Pozitif Yönleri

Akma koşulu kısıtlamalarının sağlatılması, genel olarak, sistemdeki her kritik kesit için yaklaşık akma yüzeyini oluşturan akma düzlemlerine ait tüm kısıtlamaların gözönüne alınmasını gerektirmektedir. Bu durumda, A_1, A_2, A_3 katsayılarına bağlı olarak,

$$[t] = \begin{bmatrix} [A_3, 0, 0, 0, A_2, A_1] \\ \vdots \\ [A_3, 0, 0, 0, A_2, A_1] \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

şeklinde tanımlanan $[t]$ matrisi, her satırı bir akma düzlemine ait katsayıları içermek üzere toplam 32 satırdan oluşur. Ancak, her boyutlandırma adımında, hesap yüküne karşı gelen ve bir önceki sistem hesabı adımından elde edilen normal kuvvetlerin değerlerine bağlı olarak sadece gerekli kısıtlamalar yazılabilir. Böylece, Bölüm 2.3.1 de verilen tablolara göre, $[t]$ matrisinin satır sayısı, dolayısıyla akma koşulu kısıtlamalarının sayısı azaltılabilir.

(2.9) akma koşulu kısıtlaması ifadesindeki M_p , her kritik kesit için enkesit karakteristiklerini temsil eden ve önceden seçilen bir değişkeni, $[u]$ ise Bölüm 2.3.1. de verilen tablolardaki B terimlerinin M_p değişkenine bölünmesiyle elde edilen sabit katsayılardan oluşan bir kolon matrisi göstermektedir. $[u]$ matrisinin satır sayısı, $[t]$ matrisinin satır sayısına eşittir.

(2.12a) bağıntısı, (2.9) akma koşulu kısıtlaması bağıntısında yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned}
& [t] \left[(x/L)[T]^T[k]_{jix} - (1-x/L)[T]^T[k]_{ixix} \right] \cdot [d]_{ix} \\
& + [t] \left[(x/L)[T]^T[k]_{jixj} - (1-x/L)[T]^T[k]_{ixjx} \right] \cdot [d]_{jx} \\
& + [t] \left[(x/L)[T]^T[P_\phi]_{jx} - (1-x/L)[T]^T[P_\phi]_{ix} \right] \cdot [\phi]_{ij} \\
& + [u] \cdot M_p \\
& + [t] \left[(x/L)[T]^T[P_0]_{jx} - (1-x/L)[T]^T[P_0]_{ix} \right] \\
& + [t] [F_0(x)] \leq 0
\end{aligned} \tag{2.9a}$$

ifadesi elde edilir. Böylece herhangi bir kritik kesite ait akma koşulu kısıtlamaları, değişken olarak seçilen düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerine, plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerine ve enkesit karakteristiklerini temsil eden büyüklüklere bağlı olarak matris formunda elde edilmiş olur.

2.3.4. Diğer Kısıtlamalar

Verilen hesap yüklerini taşıması istenen bir yapıda iç kuvvetlerin ve enkesit karakteristiklerinin yukarıda verilen koşulları sağlaması çözüm için

yeterlidir. Ancak uygulamada, işletme ve hesap yükleri altında, düğüm noktaları yerdeğiştirmelerinin ve plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerinin bu yükler için öngörölen sınır değerleri aşmaması, enkesit karakteristiklerinin verilen sınır değerlerden küçük olmaması veya bazı enkesit karakteristiklerinin diğerlerinden daha küçük olmaması (örneğin alt kat kolonlarının enkesit boyutlarının üst kat kolonlarının enkesit boyutlarından küçük olmaması) gibi koşulların da ayrıca sağlanması istenebilir. Ele alınan problemin özelliği nedeniyle, yalnız hesap yüklerinden oluşan düğüm noktası yerdeğiştirmeleri ve plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametreleri ile ilgili kısıtlamalar gözönüne alınabileceğinden, bu kısıtlamalar yardımıyla işletme yükleri altında istenen koşulların da sağlatılmasına çalışılır.

Düğüm noktalarının yerdeğiştirmelerinin ve/veya plastik kesitlerdeki şekildeğiştirme parametrelerinin sınırlanması istenen optimizasyon problemlerinde, boyutlandırma aşamasında, bu büyüklöklere ait kısıtlamaları içeren eşitsizlikler de kısıtlama denklemlerine dahil edilir. Bu eşitsizlikler yazılırken, istenen kısıtlamaları sağlayan plastik kesit yerleri bir önceki adımın sistem hesabı aşamasından alınır. Böylelikle sistem, verilen hesap yüklerini taşıyacak, ayrıca istenen yerdeğiştirme ve plastik şekildeğiştirme kısıtlamalarını da sağlayacak şekilde minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmış olur.

Düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri ve plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametreleri ile ilgili kısıtlamalar

$$|\delta| - \delta_s \leq 0 \quad (2.14)$$

veya

$$\pm \delta - \delta_s \leq 0 \quad (2.14a)$$

olarak, her kısıtlama için iki eşitsizlik içerecek şekilde verilebilir.

(2.14a) ifadesinde δ , sınırlanması istenen yerdeğiştirme veya plastik şekildeğiştirme parametresini, δ_s ise sözkonusu büyüklöklere ait sınır değeri göstermektedir.

Enkesit karakteristikleri ile ilgili yapısal kısıtlamalar ise

$$-M_{pi} + (M_{pi})_s \leq 0 \quad (2.15)$$

ve

$$M_{pi} \leq M_{pk} \quad (2.15a)$$

şeklinde verilebilir. Bu ifadelerdeki 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.

2.4. Ağırlık Fonksiyonu

Minimum ağırlıklı bir boyutlandırma probleminde, bütün kısıtlamaları sağlayan çözümün yapı ağırlığını temsil eden bir fonksiyonu da minimum yapması gerekmektedir.

r tanesinin enkesiti birbirinden farklı olan p tane çubuktan oluşan bir yapı sisteminin toplam ağırlığını ifade eden fonksiyon

$$G = \gamma \sum_{i=1}^r L_i \cdot F_i \quad (2.16)$$

bağıntısı ile verilebilir. Bu bağıntıda,

γ : sistemi oluşturan çubukların yapıldığı malzemenin birim hacim ağırlığını

F_i : enkesitleri birbirinden farklı olan çubukların enkesit alanlarını

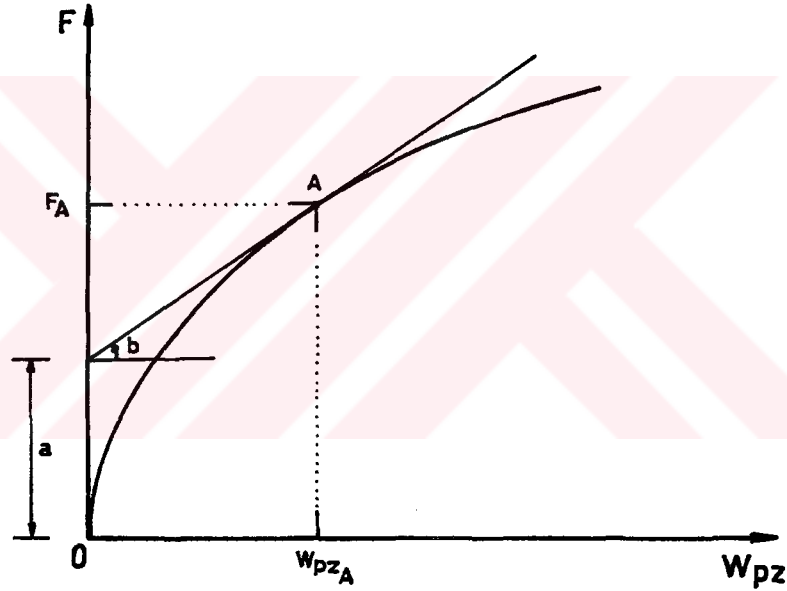
L_i : enkesit alanı F_i olan çubukların uzunluklarının toplamını göstermektedir.

Akma koşulları ile ilgili kısıtlamalar, enkesit karakteristiklerini temsil eden büyüklüklerden birine örneğin M_{pz} plastik momentlerine bağlı olarak ifade edildiğinden, (2.16) ifadesinin de W_{pz} plastik mukavemet momentlerine bağlı olarak yazılması gerekir. Bu halde toplam ağırlık fonksiyonunun ifadesi

$$G = \gamma \sum_{i=1}^r L_i \cdot F_i(W_{pzi}) \quad (2.16a)$$

şeklini alır. Burada $F_i(W_{pzi})$, enkesit alanı ile z eksenine etrafındaki plastik mukavemet momenti arasındaki, enkesit şekline bağlı olarak belirlenen bir bağıntıyı göstermektedir. Genellikle lineer olmayan bu bağıntının ardışık yaklaşımın her adımında nasıl lineerleştirileceği aşağıda açıklanmıştır.

W_{pz} plastik mukavemet momenti ile F enkesit alanı arasındaki bağıntı Şekil 2.8 de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.8. $F - W_{pz}$ bağıntısı

Bu bağıntı, eğrinin belirli bir $A(F_A, W_{pzA})$ noktasında

$$a = F_A - \left(\frac{dF}{dW_{pz}} \right)_A \cdot W_{pzA} \quad (2.17)$$

$$b = \left(\frac{dF}{dW_{pz}} \right)_A$$

olmak üzere

$$F = a + b.W_{pz} \quad (2.18)$$

şeklinde lineer bir fonksiyonla 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 birbirlerine yeter derecede yakın olmaları istendiğinden, bu durum için, enkesit karakteristiklerine ait lineerleştirilmiş bağıntılar gerçek bağıntılarla aynı sonucu verirler.

(2.18) bağıntısında

$$W_{pz} = \frac{M_{pz}}{\sigma_F} \quad (2.19)$$

olduğu gözönünde tutulursa enkesit alanları M_{pz} plastik momentine bağlı olarak

$$F = a + \frac{b}{\sigma_F} M_{pz} \quad (2.18a)$$

şeklinde ifade edilebilir.

(2.18a) bağıntısı, (2.16a) bağıntısındaki yerine yazılırsa toplam ağırlık fonksiyonu

$$G = \gamma \sum_{i=1}^r (L_i a_i + \frac{1}{\sigma_{Fi}} L_i b_i M_{pzi}) \quad (2.16b)$$

olarak elde edilir.

(2.16b) ifadesinde birinci terim sabit olduğundan, minimum olması istenen toplam ağırlık fonksiyonu yerine

$$G_F = \gamma \sum_{i=1}^r \frac{1}{\sigma_{Fi}} L_i b_i M_{pzi} \quad (2.16c)$$

fonksiyonu kullanılabilir.

σ_F akma gerilmesi sistemi oluşturan bütün çubuklarda aynı ise, (2.16c) bağıntısı

$$G_F = \sum_{i=1}^r L_i b_i M_{pzi} \quad (2.16d)$$

halini alır.

Bu fonksiyon matris formunda

$$G_F = [g]^T [M_p] \quad (2.20)$$

olarak ifade edilebilir. Bu ifadede $[M_p]$, tasarım değişkeni olarak seçilen, birbirinden farklı enkesitli r adet çubuğa ait M_{pz} plastik momentlerini içeren bir kolon matrisi, $[g]^T$ ise farklı enkesitli çubukların her biri için bir önceki adımda bulunan enkesit karakteristiklerine bağlı olarak

$$b_i = \left(\frac{dF}{dW_{pz}} \right)_i \quad (2.17a)$$

olmak üzere

$$[g] = \begin{bmatrix} L_1 b_1 \\ L_2 b_2 \\ \vdots \\ L_r b_r \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

şeklinde tanımlanan bir kolon matrisin transpozunu göstermektedir.

Geliştirilen boyutlandırma yönteminin sayısal uygulamaları için, kullanılan enkesit şekillerine ait, F enkesit alanı, çubuk asal eksenlerindeki W_p plastik mukavemet momentleri ve I atalet momentleri arasındaki bağıntıların bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmadaki sayısal uygulamalarda

kullanılan I kesitleri ve kutu kesitler için elde edilen sözkonusu bağıntılar Ek A da verilmiştir.



BÖLÜM 3. MINIMUM AĞIRLIKLI LİNEER SİSTEMLERİN BOYUTLANDIRILMASI

Uzay çubuk sistemlerin ikinci merteye limit yük için ağırlıkları minimum olacak şekilde boyutlandırılmaları amacıyla geliştirilen ve her adımı boyutlandırma ve sistem hesabı aşamalarından oluşan bir ardışık yaklaşım yönteminin esasları Bölüm 2 de verilmiştir. Geliştirilen yöntemde, ardışık yaklaşımın bir önceki adımında boyutlandırılan sistemin enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılardan ve bu sistemin elastoplastik hesabı sonucunda elde edilen plastik kesit yerleri ile plastik kesitlerdeki akma vektörü doğrultularını belirleyen katsayılardan yararlanarak ağırlık fonksiyonu ve kısıtlamalar

$$G_F = [g]^T [M_p] \quad (2.20)$$

$$[S_{dd}] [d] + [S_{d\phi}] [\phi] + [P_0] = [q] \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} & [t] \left[(x/L) [T]^T [k]_{jxix} - (1-x/L) [T]^T [k]_{ixix} \right] \cdot [d]_{ix} \\ & + [t] \left[(x/L) [T]^T [k]_{jxjx} - (1-x/L) [T]^T [k]_{ixjx} \right] \cdot [d]_{jx} \\ & + [t] \left[(x/L) [T]^T [P_\phi]_{jx} - (1-x/L) [T]^T [P_\phi]_{ix} \right] \cdot [\phi]_{ij} \\ & + [u] \cdot M_p \\ & + [t] \left[(x/L) [T]^T [P_0]_{jx} - (1-x/L) [T]^T [P_0]_{ix} \right] \\ & + [t] [F_0(x)] \leq 0 \end{aligned} \quad (2.9a)$$

şeklinde lineer bağıntılarla ifade edilmektedir.

Yukarıda verilen bağıntılar sırası ile, minimum yapılması istenen ağırlık fonksiyonunu, çözümün sağlaması gereken denge ve geometrik uygunluk koşullarını ve gözönüne alınan bir kritik kesitteki akma koşulu kısıtlamalarını ifade ederler. (2.9a) akma koşulu kısıtlamaları sistemdeki bütün kritik kesitler için birarada yazıldığında, (2.6) ve (2.9a) bağıntıları toplu olarak çözümün sağlaması gereken koşulları ve kısıtlamaları içerirler.

(2.6) ve (2.9a) ifadelerinde

$$\begin{aligned}
 [k] &= \begin{bmatrix} [S_{dd}] & [S_{d\phi}] \end{bmatrix} \\
 [\bar{d}] &= \begin{bmatrix} [d] \\ [\phi] \end{bmatrix} \\
 [k_0] &= [P_0] - [q] \\
 [a_1] &= [t][T]^T \left[(x/L)[k]_{jxix} - (1-x/L)[k]_{ixix} \right] \\
 [a_2] &= [t][T]^T \left[(x/L)[k]_{jxjx} - (1-x/L)[k]_{ixjx} \right] \\
 [a_3] &= [t][T]^T \left[(x/L)[P_{\phi k}]_{jx} - (1-x/L)[P_{\phi k}]_{ix} \right] \\
 [\bar{a}] &= \begin{bmatrix} . & [a_1] & . & [a_2] & . & . & [a_3] \end{bmatrix} \\
 [\bar{u}] &= \begin{bmatrix} . & . & [u] & . & . \end{bmatrix} \\
 [\bar{b}] &= [t][T]^T \left[(x/L)[P_0]_{jx} - (1-x/L)[P_0]_{ix} \right] + [F_0(x)]
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

ek tanımlamaları yapılabilir. Burada $[\bar{a}]$, kritik kesitin üzerinde bulunduğu çubuğun i ucunun yerdeğiştirme bileşenlerine karşı gelen kolonları $[a_1]$ matrisi kolonlarından, j ucunun yerdeğiştirme bileşenlerine karşı gelen kolonları $[a_2]$ matrisinin kolonlarından, çubuğun üzerinde bulunan plastik kesitlerin plastik şekildeğiştirme parametrelerine ait kolonları $[a_3]$ kolon matrislerinden oluşan ve diğer kolonları sıfır olan bir dikdörtgen matrisi, $[\bar{u}]$, kritik kesitin üzerinde bulunduğu çubuğun tasarım değişkeni olarak seçilen plastik momentine karşı gelen kolonu $[u]$ kolon matrisinden oluşan ve diğer kolonları sıfır olan bir dikdörtgen matrisi göstermektedir.

Bu tanımlamalar gözönünde tutularak, minimum ağırlıklı boyutlandırma problemi

$$G_F = [g]^T [M_p] \tag{2.20}$$

ağırlık fonksiyonunu minimum yapan,

$$[k][\bar{d}] + [k_0] = 0 \tag{3.2}$$

denge denklemlerini ve

$$[a][\bar{d}] + [U][M_p] + [b] \leq 0 \quad (3.3)$$

eşitsizliği ile ifade edilen akma koşulu kısıtlamalarını sağlayan $[\bar{d}]$ ve $[M_p]$ tasarım değişkenlerinin (düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri, plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametreleri ve farklı enkesitli çubukların plastik momentleri) belirlenmesine dönüştürülmüş olur. (3.3) ifadesindeki $[a]$, $[b]$ ve $[U]$ matrisleri sırasıyla, sistemdeki bütün kritik kesitlere ait $[\bar{a}]$, $[\bar{b}]$ ve $[\bar{u}]$ matrislerinin alt alta yazılmalarıyla elde edilirler.

Minimum ağırlıklı boyutlandırma probleminin Simplex yönteminden yararlanılarak çözülebilmesi için bazı ön işlemlerin yapılması gerekmektedir. Aşağıdaki bölümlerde, bu ön işlemler ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.1. Denge Denklemlerinin İndirgenmesi

Bölüm 3.4. te açıklanacağı gibi, Simplex yönteminin ilk adımında gerekli başlangıç çözümünün bulunması için, düğüm noktalarındaki yerdeğiştirme bileşenleri ile plastik şekildeğiştirme parametrelerini içeren $[\bar{d}]$ kolon matrisinin bütün elemanları sıfır iken denge denklemlerini ve gözönüne alınan kritik kesitlerdeki akma koşulu kısıtlamalarını sağlayan $[M_p]$ plastik momentlerinin hesaplanması gerekmektedir. Ancak, bütün düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin ve plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerinin sıfıra eşit olmaları halinde denge denklemlerinin sağılatılması mümkün değıldir. Bu nedenle denge denklemlerini sağılayan başlangıç çözümünün bulunabilmesi için kritik kesitlere ait akma koşullarının denge denklemlerini de içerecek şekilde yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Başka bir deyişle, m sayıdaki plastik şekildeğiştirme parametresi, düğüm noktalarının $6n$ sayıdaki yerdeğiştirme bileşenlerine bağılı olarak yeniden tanımlanmalı ve gözönüne alınan kritik kesitlere ait akma koşulu kısıtlamaları plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerine karşı gelen bu yeni değışkenler cinsinden yazılmalıdır. Böylece, Simplex yönteminin başlangıcında, değışkenlerin sıfır olması durumu için akma koşullarını sağılayan çubuk plastik momentlerinin bulunması halinde denge denklemleri de kendiliğinden sağılatılmış olur.

Yukarıda önerilen yolla elde edilen akma koşulu kısıtlamaları, (3.2) denge ve geometrik uygunluk koşullarını sağlayan, üzerinde m sayıda plastik kesit bulunan sisteme ait akma koşulu kısıtlamalarına karşı gelmektedir.

Denge denklemlerinin akma koşulu kısıtlamaları üzerine indirgenmesi işlemi için Gauss indirgeme yönteminden yararlanılabilir. Bunun için $[k]$, $[k_0]$, $[a]$, $[b]$ alt matrislerinden oluşan

$$\begin{bmatrix} [k] & [k_0] \\ [a] & [b] \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

matrisine indirgeme işlemi uygulanır. İndirgeme işleminin sonunda $[a]$ ve $[b]$ matrislerinin elemanları yeni değerler alırlar. Elemanlarının yeni değerler alması ile oluşan bu matrisler $[a_0]$ ve $[b_0]$ ile gösterilecektir.

Düğüm noktalarındaki yerdeğiştirme bileşenlerine ait bilinmeyenlerin elenmesi suretiyle, sadece plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerine karşı gelen yeni değişkenleri içeren matris $[\phi_0]$ ile gösterilirse optimum boyutlandırma problemi,

$$G_F = [g]^T [M_p] \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilen ağırlık fonksiyonunu minimum yapan ve

$$[a_0][\phi_0] + [U][M_p] + [b_0] \leq 0 \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilen akma koşulu kısıtlamalarını sağlayan $[\phi_0]$ ve $[M_p]$ tasarım değişkenlerinin Simplex yöntemi yardımı ile belirlenmesine dönüştürülmüş olur.

Problemde düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleriyle ilgili ek kısıtlamaların olması durumunda, indirgeme işlemi bu eşitsizliklere de uygulanarak, bu kısıtlamaların sadece plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerine bağlı olarak yeniden yazılması sağlanır. Plastik şekildeğiştirme parametreleri ve değişken olarak seçilen enkesit plastik momentleri ile ilgili kısıtlamalar indirgeme işleminden etkilenmeyeceğinden, bu kısıtlamalar indirgeme işleminden sonra probleme katılabilir.

3.2. Değişken Dönüşümü

(2.20) ve (3.5) ile verilen minimum ağırlıklı boyutlandırma probleminin Simplex yöntemi ile çözülebilmesi için tasarım değişkenleri olarak seçilen $[\phi_0]$ plastik şekildeğiştirme parametrelerinin ve çubukların plastik momentlerinin pozitif olmaları gerekmektedir. Çubukların plastik momentleri daima pozitif olmakla birlikte indirgmeden sonraki plastik şekildeğiştirme parametreleri pozitif veya negatif değerler alabilirler. Yukarıdaki koşulun sağlanabilmesi için plastik şekildeğiştirme parametreleri,

$$\phi_i = \overline{\phi_i} - \phi_s \quad (3.6)$$

şeklinde iki pozitif değişkenin farkı olarak ifade edilmelidir. Burada ϕ_s değişkeni bütün ϕ_i değişkenleri için bir üst sınırı göstermektedir.

(3.6) bağıntısı ile verilen değişken dönüşümü yapıldığında (3.5) akma koşulu kısıtlamaları

$$[a_0][\overline{\phi_0}] - [\sum a_0]\phi_s + [U][M_p] + [b_0] \leq 0 \quad (3.5a)$$

halini alır. Tasarım değişkenlerinin sayısının bir tane arttığı bu bağıntıda

$[\overline{\phi_0}]$: m sayıda pozitif $\overline{\phi_1}, \overline{\phi_2}, \dots, \overline{\phi_m}$ değişkenlerinden oluşan bir kolon matrisi,

$[\sum a_0]$: j sayılı elemanı, $\sum a_{0j} = \sum_{i=1}^m a_{0ji}$ olmak üzere, $[a_0]$ matrisinin aynı sayılı satırına ait bütün elemanların toplamına eşit olan bir kolon matrisi göstermektedir.

(3.5a) ifadesi, bütün tasarım değişkenleri biraraya toplanarak yeniden düzenlenirse,

$[A]$: $[a_0]$, $-\left[\sum a_0\right]$ ve $[U]$ matrislerine bağlı olarak

$$[A] = \left[[a_0], -\left[\sum a_0\right], [U] \right] \quad (3.7)$$

şeklinde tanımlanan bir dikdörtgen matrisi,

$[B]$: eşitsizliklerdeki sabit sayıları içeren ve

$$[B] = -[b_0] \quad (3.8)$$

olarak tanımlanan bir kolon matrisi,

$[X]$: sırası ile m adet $\overline{\phi_1}, \overline{\phi_2}, \dots, \overline{\phi_m}$ ile ϕ_s ve r adet $M_{pz1}, M_{pz2}, \dots, M_{pzr}$ tasarım değişkenlerini içeren

$$[X]^T = [\overline{\phi_1} \quad \overline{\phi_2} \quad \dots \quad \overline{\phi_m} \quad \phi_s \quad M_{pz1} \quad \dots \quad M_{pzr}] = \left[\begin{bmatrix} \overline{\phi_0} \end{bmatrix} \quad \phi_s \quad [M_p] \right] \quad (3.9)$$

şeklindeki bir kolon matrisi,

$[C]$: ilk $m+1$ tane elemanı sıfır olan, diğer elemanları ise $[g]$ matrisi elemanlarından oluşan

$$[C]^T = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad L_1 b_1 \quad \dots \quad L_r b_r] = \left[\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad [g] \right] \quad (3.10)$$

şeklindeki bir kolon matrisi göstermek üzere, Simplex yönteminin uygulanması için gerekli olan pozitiflik koşullarının da eklenmesiyle, minimum ağırlıklı boyutlandırma problemi matris formunda

$$\begin{aligned} G_F &= [C]^T [X] \quad (\text{minimum}) \\ [A][X] &\leq [B] \\ [X] &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

olarak ifade edilir.

3.3. Simplex Yöntemi

Simplex yöntemi, amaç fonksiyon adı verilen ve minimum veya maksimum yapılması istenen bir fonksiyon ile eşitlikler ve/veya eşitsizlikler şeklinde verilen belirli sayıdaki kısıtlamaların lineer bağıntılarla ifade edilebildiği optimizasyon problemlerinde, mutlak optimumun bulunmasını amaçlayan bir ardışık yaklaşım yöntemidir, [54], [60], [61]. Bu bölümde, Simplex

yöntemi ve bu yöntemin minimum ağırlıklı boyutlandırma probleminin çözümüne uygulanması açıklanacaktır.

3.3.1. Minimum Yapma Problemi

Amaç fonksiyonun ve kısıtlamaların, gözönüne alınan tasarım değişkenleri cinsinden lineer bağıntılarla ifade edildiği bir minimum yapma probleminde,

$$G_F = \sum_{i=1}^N c_i X_i \quad (3.12)$$

şeklinde verilen amaç fonksiyonu minimum yapan ve

$$\sum_{i=1}^N a_{ji} X_i \leq b_j \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (3.13)$$

kısıtlamaları ile

$$X_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (3.14)$$

pozitiflik koşullarını sağlayan $X_1, X_2, \dots, X_N$ tasarım değişkenlerinin değerlerinin bulunması amaçlanmaktadır. Bu ifadelerde 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.

(3.12), (3.13) ve (3.14) bağıntıları ile tanımlanan minimum yapma problemi matris formunda,

$$\begin{aligned} G_F &= [C]^T [X] && (\text{minimum}) \\ [A][X] &\leq [B] \\ [X] &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadelerde

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

şeklinde tanımlanan ve amaç fonksiyonun katsayılarını içeren bir kolon matrisi,

$$[X] = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

tasarım değişkenlerinden oluşan bir kolon matrisi,

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & \cdot & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdot & \cdot & a_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdot & \cdot & a_{MN} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_M \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

şeklinde, kısıtlama denklemlerinin katsayı ve sabitlerini içeren matrisleri göstermektedir.

Simplex yönteminin minimum yapma probleminin çözümüne uygulanabilmesi için eşitsizlik şeklinde verilen kısıtlamaların kanonik formda eşitlikler halinde ifade edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, gevşek değişkenler adı verilen M adet pozitif $X_{N+1}, X_{N+2}, \dots, X_{N+M}$ değişkenleri kısıtlama denklemlerine eklenir ve bu denklemler

$$\sum_{i=1}^N a_{ji} X_i + X_{N+j} = b_j \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (3.20)$$

şeklinde yeniden düzenlenir.

$[X]$, $[C]$ ve $[A]$ matrisleri de gevşek değişkenleri ve bunlara ait katsayıları içerecek şekilde yeniden tanımlanırsa

$$[X^+] = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \\ \vdots \\ X_{N+M} \end{bmatrix}$$

$$[C^+] = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_N \\ \vdots \\ c_{N+M} \end{bmatrix} \quad (c_{N+1} = \dots = c_{N+M} = 0) \quad (3.21)$$

$$[A^+] = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1N} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & \dots & a_{2N} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{M1} & \dots & a_{MN} & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere, minimum yapma problemi

$$\begin{aligned} G_F &= [C^+]^T [X^+] && (\text{minimum}) \\ [A^+] [X^+] &= [B] \\ [X^+] &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.22)$$

halini alır. (3.22) ile verilen minimum yapma probleminin çözümü için, eşitlik şeklindeki M adet kısıtlama denklemini sağlayan ve amaç fonksiyonu minimum yapan $N+M$ adet pozitif değişkenin belirlenmesi gerekmektedir.

3.3.2. Tanımlar

Bu bölümde, Simplex yöntemi ile ilgili temel kavramlar kısaca tanımlanacaktır.

Temel çözüm : en az N adet değişkenin sıfır olduğu, geri kalan M adet değişkenin $[A^+][X^+] = [B]$ denklemi ile hesaplanabildiği çözümdür.

Temel değişkenler : temel çözümde, değerleri sıfırdan farklı olan değişkenlerdir.

Temel olmayan değişkenler : temel çözümde, değerleri sıfır olan değişkenlerdir.

Giren değişken : Simplex yönteminin herhangi bir adımında temel değişkenler grubuna katılan değişkendir.

Çıkan değişken : temel değişkenler grubundan ayrılan değişkendir.

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

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

En elverişli çözüm : amaç fonksiyonu minimum yapan uygun temel çözümdür.

3.3.3. Yöntemin Esasları

Simplex yöntemi, uygun çözümler bölgesindeki herhangi bir noktadan başlayarak bir uygun temel çözümün bulunması ve bu uygun temel çözümden hareket ederek en elverişli çözümün aranmasına yönelik bir ardışık yaklaşım yöntemidir. Ardışık yaklaşımın her adımında, yeni bir uygun temel çözüm bulmak amacıyla, temel olmayan değişkenlerden birisi serbest bırakılır ve temel değişkenlerden birisi sıfıra eşitlenir. Değişkenlerin yer değiştirmesi olarak adlandırılan bu işlem, kısıtlamalar ve

pozitiflik koşulları bozulmayacak ve amaç fonksiyonun değeri bir önceki adıma göre daha küçük olacak şekilde gerçekleştirilir. Ardışık yaklaşımın herhangi bir adımında amaç fonksiyonun değerindeki azalmayı ifade eden ve *değer sabitleri* olarak adlandırılan büyüklüklerin tümü negatif değer aldıklarında en elverişli çözüm (mutlak optimum) elde edilmiş olur.

3.3.4. Hesapta İzlenen Yol

Bu bölümde Simplex yönteminin herhangi bir adımında yapılacak işlemler açıklanmıştır. Yöntemin ilk adımında *başlangıç tablosu* olarak adlandırılan ilk uygun temel çözümün nasıl elde edileceği Bölüm 3.4 te açıklanacaktır.

Ardışık yaklaşımın herhangi bir adımına ait işlemler Şekil 3.1 de görülen tablo üzerinde sistematik bir şekilde yapılabilir. Tablonun en üst satırı temel olmayan değişkenlere, en alt satırı bu değişkenlere karşı gelen değer sabitlerine, en soldaki kolonu temel değişkenlere, en sağdaki kolonu ise temel değişkenlerin bir önceki adıma ait değerlerini veren $[B]$ matrisi elemanlarına ayrılmıştır. Tablonun diğer kolonlarına ise $[A]$ matrisinin temel olmayan değişkenlere karşı gelen elemanları yazılır.

temel olmayan değişkenler

$$[X_1 \ X_2 \ . \ . \ X_i \ . \ . \ X_N]$$

temel değişkenler

$$\left\{ \begin{array}{c} X_{N+1} \\ X_{N+2} \\ . \\ . \\ X_{N+j} \\ . \\ . \\ X_{N+M} \end{array} \right\} \left[\begin{array}{ccccccc} a_{11} & a_{12} & . & . & a_{1i} & . & . & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & . & . & a_{2i} & . & . & a_{2N} \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ a_{j1} & a_{j2} & . & . & a_{ji} & . & . & a_{jN} \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ a_{M1} & a_{M2} & . & . & a_{Mi} & . & . & a_{MN} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} b_1 \\ b_2 \\ . \\ . \\ b_j \\ . \\ . \\ b_M \end{array} \right\}$$

sabitler

değer sabitleri

$$[\alpha_1 \ \alpha_2 \ . \ . \ \alpha_i \ . \ . \ \alpha_N]$$

katsayılar

Şekil 3.1.Simplex Yöntemi Hesap Tablosu

Simplex yönteminin herhangi bir adımı birbirini izleyen dört işlemden oluşur.

1) Temel olmayan değişkenlerin her biri için ayrı ayrı olmak üzere, sözkonusu değişkenlerin sıfırdan bire yükseltilmesi halinde amaç fonksiyonunun değerindeki azalmayı veren α_i değer sabitleri hesaplanarak en elverişli çözümün elde edilip edilmediği kontrol edilir.

Bu amaçla, temel olmayan X_i değişkenine karşı gelen α_i değer sabiti

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^M a_{ji} c_{(j)} - c_i \quad (3.23)$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada $c_{(j)}$, amaç fonksiyonun j sayılı temel değişkene karşı gelen katsayısını göstermektedir.

(3.23) bağıntısı ile hesaplanan bütün α_i değer sabitlerinin sıfır veya negatif değerler alması en elverişli (minimum) çözümün bulunduğunu ifade eder. Bu durumda, tablonun en sağdaki kolonu en elverişli çözüme ait temel değişkenlerin değerlerini verir. Amaç fonksiyon ise

$$G_F = [C^+]^T [X^+] \quad (3.22a)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Bir veya daha fazla sayıda α_i değer sabitinin sıfır olması, problemin birden fazla en elverişli çözümünün bulunduğunu ifade etmektedir.

Bir veya daha fazla sayıda α_i değer sabitinin pozitif olması halinde ise en elverişli çözüm henüz elde edilmemiştir. Bu durumda, bir sonraki işleme geçilir.

2) Pivot kolon ve ona karşı gelen giren değişken saptanır. Bu amaçla, en az bir elemanı sıfırdan farklı olan ve α_i değer sabiti en büyük olan (i) sayılı kolon pivot kolon, buna ait $X(i)$ değişkeni giren değişken olarak seçilir. Pivot kolonun numarası (g) ile, giren değişken ise X_g ile gösterilir.

3)Pivot satır ve ona karşı gelen çıkan değişken saptanır. Bu amaçla pivot kolona ait

$$a_{jg} > 0 \quad (j = 1, 2, \dots, M)$$

olan bütün j ler için

$$\frac{b_j}{a_{jg}} \quad (3.24)$$

değerinin minimum olduğu (j) sayılı satır pivot satır, ona ait $X_{(j)}$ değişkeni çıkan değişken olarak seçilir. Pivot satır (c), çıkan değişken X_c ile gösterilir.

b_j / a_{jg} değerinin birden fazla satır için minimum olması durumunda, ardışık yaklaşımın sonsuz sayıda devam etmesini önlemek için, sırasıyla

$$\frac{a_{j1}}{a_{jg}}, \frac{a_{j2}}{a_{jg}}, \dots, \frac{a_{jN}}{a_{jg}} \quad (3.25)$$

oranları için aynı kriter uygulanarak pivot satır seçilir.

4)Bir sonraki adıma ait tablo elde edilir. Ardışık yaklaşımın bir sonraki adımında X_g ve X_c değişkenleri yer değiştirmekte, $[A]$ ve $[B]$ matrislerinin elemanları da buna bağlı olarak yeni değerler almaktadır. Buna göre, yeni tablonun elde edilmesi için

- a) X_g ve X_c değişkenleri yer değiştirir,
- b) $[A]$ ve $[B]$ matrislerinin yeni elemanları, pivot satır için

$$a'_{ci} = \frac{a_{ci}}{a_{cg}} \quad b'_c = \frac{b_c}{a_{cg}} \quad (i \neq g) \quad (3.26)$$

pivot kolon için

$$a_{jg}' = -\frac{a_{jg}}{a_{cg}} \quad (j \neq c) \quad (3.27)$$

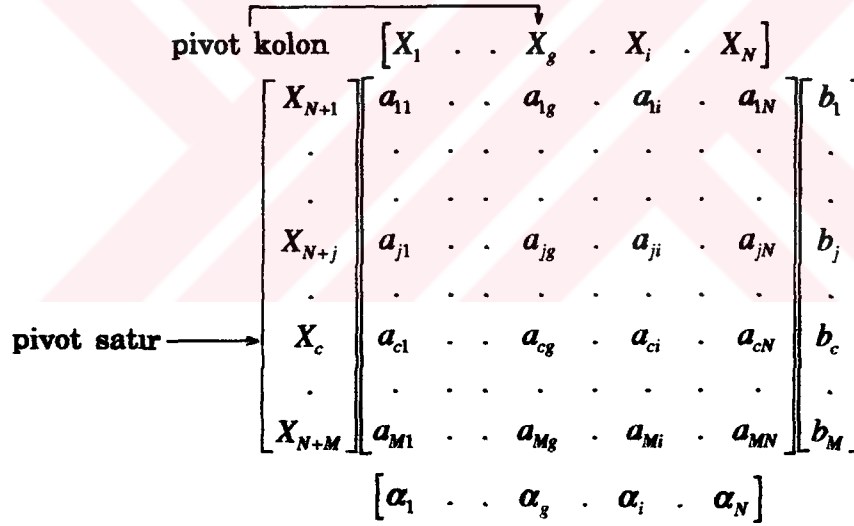
$$a_{cg}' = \frac{1}{a_{cg}}$$

bunların dışındaki diğer satır ve kolonlar için

$$a_{ji}' = a_{ji} - a_{ci} \frac{a_{jg}}{a_{cg}} \quad (i \neq g, j \neq c) \quad (3.28)$$

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

bağıntıları ile hesaplanır, Şekil 3.2. Bu bağıntılardaki a' ve b' yeni tablonun elemanlarını göstermektedir.



The diagram shows a Simplex tableau. The columns are labeled $X_1, \dots, X_g, \dots, X_i, \dots, X_N$. The rows are labeled $X_{N+1}, \dots, X_{N+j}, \dots, X_c, \dots, X_{N+M}$. The pivot column is indicated by a bracket above the columns X_g, X_i and the pivot row is indicated by an arrow pointing to the row X_c . The tableau is represented as a matrix of coefficients a_{ij} and a right-hand side vector b_i . The pivot element is a_{cg} .

$$\begin{array}{c} \text{pivot kolon} \rightarrow \\ \begin{array}{c} [X_1 \quad \dots \quad X_g \quad \dots \quad X_i \quad \dots \quad X_N] \\ \begin{array}{c} X_{N+1} \\ \vdots \\ X_{N+j} \\ \vdots \\ X_c \\ \vdots \\ X_{N+M} \end{array} \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1g} & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{j1} & \dots & a_{jg} & \dots & a_{ji} & \dots & a_{jN} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{c1} & \dots & a_{cg} & \dots & a_{ci} & \dots & a_{cN} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{M1} & \dots & a_{Mg} & \dots & a_{Mi} & \dots & a_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_j \\ \vdots \\ b_c \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix} \end{array} \\ \text{pivot satır} \rightarrow \end{array}$$

$$[\alpha_1 \quad \dots \quad \alpha_g \quad \dots \quad \alpha_i \quad \dots \quad \alpha_N]$$

Şekil 3.2.Simplex Yöntemi Hesap Tablosunda Pivot Kolon ve Pivot Satır

3.4. İlk Uygun Temel Çözümün Belirlenmesi

Bu bölümde, kısıtlamaların eşitlikler haline getirilmesi ile

$$\begin{aligned} G_F &= [C^+]^T [X^+] & (\text{minimum}) \\ [A^+] [X^+] &= [B] \\ [X^+] &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.22)$$

şeklinde ifade edilen minimum ağırlıklı boyutlandırma probleminin Simplex yöntemi ile çözümünde, ilk adım için gerekli olan uygun temel çözümün nasıl elde edileceği açıklanacaktır. (3.22) bağıntısındaki $[A^+]$ $[C^+]$ ve $[X^+]$, Bölüm 3.3.1 de tanımlanan genişletilmiş matrisleri göstermektedir. Bu bağıntıdaki değişken ve denklem sayısı ise, sırası ile

$$N = m + 1 + r \quad (3.29)$$

$$M = l.s + o$$

dur. Bu ifadelerdeki m sistemde ikinci mertebe limit yüke karşı gelen toplam plastik kesit sayısını, r farklı enkesitli çubuk sayısını, s akma koşullarını sağlaması gereken kritik kesit sayısını, l sözkonusu kritik kesite ait $[t]$ matrisindeki satır sayısını, o ise toplam ek kısıtlama sayısını göstermektedir.

Bölüm 3.3.3 te belirtildiği gibi Simplex yönteminin ilk adımında bir uygun temel çözümün elde edilmesi gerekmektedir. $[B]$ matrisinin bütün elemanlarının pozitif olması halinde N adet tasarım değişkeni

$$X_1 = X_2 = \dots = X_N = 0 \quad (3.30)$$

alınarak

$$X_{N+1} = b_1, X_{N+2} = b_2, \dots, X_{N+M} = b_N \quad (3.31)$$

olan bir uygun temel çözüm bulunabilir. $[B]$ matrisinin bütün elemanlarının pozitif olmaması halinde ise, ilk uygun temel çözümün bulunması amacıyla geliştirilen matematik yöntemlerden yararlanılabilir,[61]. Bu çalışmada, denklem sistemine yeni değişkenler eklenmesi esasına dayanan bu yöntemler yerine, ele alınan problemin fizik yapısına uygun bir yolla ve Simplex yönteminde herhangi bir değişiklik yapılmasına gerek kalmadan ilk uygun temel çözüm elde edilmektedir. Sözkonusu çözümün nasıl elde edileceği aşağıda açıklanmıştır.

$[A^+][X^+] = [B]$ bağıntısının sistemdeki bütün kritik kesitlere ait akma koşullarını ifade ettiği gözönünde tutulursa, indirgmeden sonraki plastik

şekildeğiştirme parametrelerini veren $(m+1)$ adet $\overline{\phi_1}, \dots, \overline{\phi_m}, \phi_s$ değişkenleri

$$\overline{\phi_1} = \dots = \overline{\phi_m} = \phi_s = 0 \quad (3.32)$$

iken, bütün kesitlerde

$$A_1 M_z + A_2 M_y + A_3 N + B < 0 \quad (3.33)$$

akma koşulunu sağlayan (r) adet $M_{pz1}, M_{pz2}, \dots, M_{pzt}$ değişkenleri bir uygun çözüm oluştururlar. Bu çözümün aynı zamanda temel çözüm olabilmesi için (r) adet gevşek değişkenin sıfır olması, yani $M_{pz1}, M_{pz2}, \dots, M_{pzt}$ değişkenlerinin (r) adet kesitte

$$A_1 M_z + A_2 M_y + A_3 N + B = 0 \quad (3.34)$$

diğer kesitlerde ise

$$A_1 M_z + A_2 M_y + A_3 N + B < 0 \quad (3.35)$$

koşullarını sağlayacak şekilde belirlenmesi gerekir. Diğer bir deyişle ikinci mertbe limit yüke karşı gelen denge koşullarının ve geometrik uygunluk koşullarının sağlandığı kesim yapılmış sistemde $[\overline{\phi_0}] = 0$ iken akma koşullarını sağlayan M_{pz} plastik momentleri ilk uygun temel çözümü oluştururlar.

Esasları yukarıda verilen yolun Simplex yöntemindeki karşılığı, indirgmeden sonraki plastik şekildeğiştirme parametreleri

$$\overline{\phi_1} = \dots = \overline{\phi_m} = \phi_s = 0 \quad (3.32)$$

iken

$$[A^+][X^+] = [B] \quad (3.36)$$

denklemini sağlayan (r) adet $M_{pz1}, M_{pz2}, \dots, M_{pzt}$ plastik momentleri ile kısıtlama denklemlerine eklenen $(M-r)$ adet gevşek değişkenin

hesaplanmasıdır. Bu amaçla $M_{p=1}, M_{p=2}, \dots, M_{p=r}$ tasarım değişkenlerine ait kolonlar sırası ile pivot kolon, her pivot kolon için

$$a_{jg} \neq 0$$

olan bütün kolonlar arasında

$$\frac{b_j}{a_{jg}} \quad (3.24)$$

değerinin maksimum olduğu (j) sayılı satır da pivot satır olarak seçilir ve Bölüm 3.3.4. te verilen hesap sırasının dört numaralı adımı uygulanır. Bu işlemlerin bütün M_{pzi} tasarım değişkenleri için tekrarlanması sonucunda ilk uygun temel çözüm elde edilir.

3.5. Boyutlandırmada İzlenen Yol

Bu bölümde, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntıların bir önceki boyutlandırma adımından, ikinci mertebe limit yüke karşı gelen plastik kesit yerleri ile akma vektörü doğrultularının ise bir önceki adımda boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe elastoplastik hesabından alınması esasına dayanan ardışık yaklaşım yönteminin herhangi bir adımına ait boyutlandırma aşamasında izlenen yol verilecektir. Ardışık yaklaşımın diğer adımlarında aynı yol tekrarlanarak uygulanmakta ve böylece optimum çözüm elde edilmektedir.

1) Ardışık yaklaşımın ilk adımında problemin verileri dışında hiçbir bilgi elde olmadığından boyutlandırma işlemine aşağıda önerilen yollardan birisi ile başlanabilir.

i) Sistem, birinci mertebe limit yük için, minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılır. Bilindiği gibi, birinci mertebe limit yük sistemi mekanizma durumuna getiren yük olarak tanımlanmaktadır ve bu yük altında, son plastik kesitin şekildeğiştirmeleri sıfır olduğundan, sistem izostatiktir. İzostatik sisteme ait denge koşullarının bu çalışmada önerilen sistematik yol ile doğrudan doğruya yazılabilmesi için, boyutlandırılacak sistemi izostatik duruma getirecek sayıda iç kuvvet bileşeni kaldırılır ve bu iç kuvvet bileşenleri doğrultusunda serbestçe şekildeğiştirebilen plastik

kesitler tanımlanır. Plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerinin birim değerlerinden meydana gelen uç kuvvetlerini içeren $[P_{\phi k}]$ matrislerinin hesabında, kaldırılan iç kuvvetler doğrultusundaki A katsayıları bir, diğerleri sıfır olarak alınır. Bu şekilde elde edilen izostatik sistem üzerinde, Bölüm 2.3.2 de açıklanan denge denklemleri ve Bölüm 2.3.3 te açıklanan akma koşulu kısıtlamaları yazılarak boyutlandırılması istenen sisteme ait kısıtlama denklemleri oluşturulur. İzostatik sistemlerde denge denklemleri enkesit karakteristiklerinden bağımsız olduğundan, denklemlerde yeralan rijitlik ve yükleme matrislerinin hesabında, enkesit karakteristikleri için gelişigüzel değerler seçilebilir. Sistemi oluşturan çubukların enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntıların lineer olması veya lineer kabul edilmesi halinde, birinci mertebe teorisine göre minimum ağırlıklı boyutlandırma problemi, ardışık yaklaşım işlemine gerek kalmadan çözülebilmektedir. Bu bağıntıların lineer olmaması halinde ise, her adımında enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntıların lineerleştirildiği bir ardışık yaklaşım yöntemi uygulanır.

Bu şekilde boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe elastoplastik hesabı yapılarak, ardışık yaklaşımın bir sonraki boyutlandırma aşaması için esas alınacak plastik kesit yerleri ve bu kesitlere ait akma vektörü doğrultuları elde edilir.

Yukarıda açıklanan boyutlandırma işleminde, ikinci mertebe limit yüke karşı gelen yerdeğiştirmeler tahmin edilerek bu yerdeğiştirmelerin denge denklemlerine etkisi düğüm noktalarına etkiyen fiktif yüklerle temsil edilirse [54], optimum çözümün elde edilmesi için gerekli olan ardışık yaklaşım sayısı azaltılabilir.

ii) Sistemin lineer veya lineer olmayan teoriye göre ön boyutlandırması yapılır. Boyutlandırma sonucunda elde edilen enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar ile bu bağıntılar esas alınarak yapılan ikinci mertebe elastoplastik hesap sonucunda bulunan plastik kesit yerleri ve akma vektörü doğrultuları başlangıç çözümü olarak alınır. Yapılan sayısal uygulamalar, Bölüm 2.2.1 de de belirtildiği gibi, farklı başlangıç noktalarından hareket ederek elde edilen optimum çözümlerin birbirlerine oldukça yakın olduğunu göstermektedir.

2)Optimum boyutlandırmanın ilk adımında gerekli olan, sistemin enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar, plastik kesit yerleri ve bu kesitlere ait akma vektörü doğrultuları yukarıda önerilen yollardan biri ile belirlendikten sonra, kesim yapılmış sisteme ait genişletilmiş denge denklemleri ile gözönüne alınan bütün kritik kesitlere ait akma koşulu kısıtlamaları oluşturulur ve çubukların enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar, tahmin edilen enkesit karakteristikleri dolaylarında lineerleştirilir. Denge denklemleri ve akma koşulu kısıtlamaları oluşturulurken ikinci mertebe limit yüke karşı gelen son plastik kesitlerin özel durumlarının da gözönüne alınması gerekir. Sistemin burkulma konumuna gelmesine neden olan bu son plastik kesitlere ait plastik şekil değiştirme parametreleri sıfır olduğundan, bu plastik kesitlerin sistemin davranışına etkisi bulunmamaktadır.

3)Denge denklemleri Bölüm 3.1 de açıklandığı şekilde indirgenerek $[a_0]$, $[b_0]$ matrisleri hesaplanır. Böylece akma koşulları, tasarım değişkeni olarak gözönüne alınan plastik şekil değiştirme parametrelerine bağlı olarak ve denge denklemlerini de içerecek şekilde yeniden düzenlenmiş olur. Hesabın bu aşamasında yerdeğiştirmeler ve plastik şekil değiştirme parametreleri ile ilgili sınırlamalar denge denklemleri indirgenmeden önce, enkesit boyutları ile ilgili kısıtlamalar ise denge denklemleri indirgendikten sonra Bölüm 2.3.4. te açıklandığı şekilde kısıtlamalara dahil edilir.

4)Bölüm 3.2 de açıklanan değişken dönüşümü işlemi yapılarak $[A]$, $[X]$, $[B]$ ve $[C]$ matrisleri elde edilir.

5)Gevşek değişkenlerin ilavesi ile $[A^+]$, $[X^+]$ ve $[C^+]$ genişletilmiş matrisleri elde edilir. Böylece,

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

şekline dönüştürülen boyutlandırma problemi Simplex yöntemi yardımı ile çözülür. Yöntemin ilk adımında bir uygun temel çözümün bulunması için Bölüm 3.4 te verilen yol uygulanır.

6) İndirgmeden sonraki plastik şekildeğiştirme parametrelerinden ve çubuk plastik momentlerinden oluşan $\overline{\phi}_1, \overline{\phi}_2, \dots, \overline{\phi}_m, \phi_s, M_{pz1}, M_{pz2}, \dots, M_{pzr}$ tasarım değişkenleri elde edildikten sonra

$$\phi_i = \overline{\phi}_i - \phi_s$$

dönüşümü ile m adet plastik şekildeğiştirme parametresi ve bunların denge denklemlerinde yerine konulmaları ile düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri hesaplanır. Daha sonra, süperpozisyon denklemleri ile uç kuvvetleri, çubuk denge denklemleri ile iç kuvvetler bulunur. Çubukların enkesit karakteristikleri ise, M_{pz} tasarım değişkenine bağlı olarak hesaplanır.



BÖLÜM 4. BOYUTLANDIRILAN SİSTEMİN HESABI

Bu çalışmada geliştirilen ardışık yaklaşım yönteminin her adımında, minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe elastoplastik hesabının yapılarak ikinci mertebe limit yükünün (veya göçme yükünün) elde edilmesi ve bu yüke karşı gelen plastik kesitler ile bu kesitlere ait akma vektörü doğrultularının belirlenmesi gerekmektedir. Bu bölümde, uzay çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yükün hesabı için geliştirilen bir yük artımı yönteminin,[56] esasları ve matematik formülasyonu özetlenecek, yöntemin uygulanmasında izlenen yol açıklanacaktır. Yöntem sistemin özelliklerinden bağımsız olup Bölüm 2.1. deki koşulları sağlayan bütün yapı sistemlerine uygulanabilmektedir.

4.1. Yöntemin Esasları

İdeal elastoplastik malzemeden yapılmış yapı sistemlerinde, artan dış yükler altında, iç kuvvetler de artarak bazı kesitlerde akma koşulunun belirlediği sınır durumlara erişince, bu kesitlerde sonlu plastik şekildeğiştirmeler meydana gelir. Bölüm 1.1 de belirtildiği gibi, bu kesitlere plastik kesit denilmektedir.

Boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe limit yükünün belirlenebilmesi için, artan yükler altında plastik kesitlerin oluşumlarını izleyerek adım adım hesap yapılması gerekmektedir. Lineer olmayan teoriye göre hesapta süperpozisyon prensibi geçerli olmadığından, ardışık plastik kesitlerin oluşumu arasında sistemin davranışı lineer değildir. Bu nedenle, her plastik kesitin meydana geldiği yük parametresinin belirlenmesi için, genel olarak, yük üzerinde bir araştırma yapılması gerekmektedir. Ancak boyutlandırılan sistemin hesabının amacı ikinci mertebe limit yük parametresi ile bu yüke karşı gelen plastik kesit yerlerinin ve akma vektörü doğrultularının belirlenmesi olduğundan, sistemin limit yükten önceki gerçek davranışını izlemeye gerek yoktur. Ayrıca, boyutlandırmanın sonunda limit yükün hesap yüküne eşit olacağı da bilinmektedir. Bu özellikler gözönünde tutulduğunda ve artan yükler etkisindeki sistem davranışının yüklemenin tarihinden bağımsız olduğu kabul edildiğinde,

hesap yüküne karşı gelen ve başlangıçta tahmin edilen normal kuvvetler için hesap yapılabilir. Böylece, bilinen normal kuvvetler için denge denklemleri lineerleştirilmiş olur. Ayrıca, plastik kesitlerin oluşumunu belirleyen ve esasları Bölüm 2.3.1. de verilen akma koşulları da lineer bağıntılar şeklinde idealleştirilmiş olduğundan, her plastik kesitin meydana geldiği yük parametresi doğrudan doğruya bulunabilmektedir. Diğer taraftan, akma vektörünün akma yüzeyine dik olması özelliği nedeniyle, plastik kesitlerdeki lineer olmayan şekildeğiştirmeler tek bir parametreye bağlı olarak ifade edilebilirler. Geliştirilen yöntemde, her plastik kesitin oluşmasından sonra o kesitteki plastik şekildeğiştirme durumunu belirleyen ve plastik şekildeğiştirme parametresi adı verilen yeni bir değişkenin ek bilinmeyen olarak alınması ve plastik kesitteki iç kuvvet durumunun akma yüzeyi üzerinde kaldığını ifade eden lineer bir denklemin, denklem takımına eklenmesi öngörülmektedir. Böylece, her yük artımı için, bir önceki yük artımı adımına ait denklem takımından ve onun çözümünden yararlanılması mümkün olmaktadır. Görüldüğü gibi, esasları yukarıda özetlenen yük artımı yöntemi ile, malzeme ve geometri değişimleri bakımından lineer olmayan uzay çubuk sistemlerin ikinci mertebe teorisine göre elastoplastik hesabı ve ikinci mertebe limit yükün belirlenmesi, plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerini de içeren tek bir genişletilmiş lineer denklem sisteminin kurulmasına ve bu denklem sistemi ile alt sistemlerinin ardışık çözümüne indirgenmiş olmaktadır.

4.2. Matematik Formülasyon

Sistem hesabının her adımında, önceki yük artımlarında oluşan plastik kesitleri içeren sistemin, birim yük artımı için hesabı gerekmektedir. Sistemin hesabı için matris yerdeğiştirme yönteminden,[59] yararlanılmaktadır. Bu yöntemin uygulanmasında, plastik kesitlerdeki şekildeğiştirmelerin denge denklemlerine etkisini gözönüne alan gerekli değişiklikler yapıldığında, bilinmeyenler iki grupta toplanabilir.

a) Her düğüm noktasında üç tanesi açısal ve üç tanesi doğrusal olmak üzere, sistemdeki n adet düğüm noktasındaki toplam $6n$ sayıdaki yerdeğiştirme bileşenlerinden oluşan bilinmeyenler.

b) Hesabın sözkonusu adımına kadar oluşan m adet plastik kesite ait plastik şekildeğiştirme parametrelerinden oluşan bilinmeyenler.

Bu bilinmeyenleri belirlemek için kullanılan denklemler de iki grupta toplanabilir.

a) Düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri doğrultularında yazılan ve

$$[S_{dd}][d] + [S_{d\phi}][\phi] + [P_0] = [q] \quad (2.6)$$

matris bağıntısı ile verilen genişletilmiş denge denklemleri.

b) Hesabın sözkonusu adımına kadar oluşan m sayıdaki plastik kesitteki iç kuvvet durumunun, lineerleştirilmiş akma yüzeyi üzerinde kaldığını ifade eden ve

$$[S_{\phi d}][d] + [S_{\phi\phi}][\phi] + [P_{\phi 0}] = [0] \quad (4.1)$$

matris bağıntısı ile verilen akma koşulu denklemleri.

(2.6) ve (4.1) bağıntılarında,

$[S_{dd}]$: üzerinde plastik kesit bulunmayan sisteme ait rijitlik matrisini,

$[d]$: düğüm noktalarının bilinmeyen yerdeğiştirme bileşenlerinden oluşan bir kolon matrisi,

$[S_{d\phi}]$: plastik kesitlerdeki sonlu plastik şekildeğiştirmelerin denge denklemlerine etkisini ifade eden matrisi,

$[\phi]$: plastik kesitlerdeki bilinmeyen plastik şekildeğiştirme parametrelerinden oluşan bir kolon matrisi,

$[P_0]$: çubukların üzerine etkiyen dış yüklerden oluşan, sisteme ait yükleme matrisini,

$[q]$: düğüm noktalarına etkiyen dış yüklerden oluşan, sisteme ait dış yük matrisini,

$[S_{\phi d}]$: düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinin birim değerlerinden dolayı plastik kesitlerde oluşan iç kuvvetlerin, akma koşuluna katkısını ifade eden bir matrisi,

$[S_{\phi\phi}]$: plastik şekildeğiştirme parametrelerinin birim değerinden dolayı, plastik kesitlerdeki iç kuvvet durumunun değişimini ifade eden bir matrisi,

$[P_{\phi 0}]$: çubuklara etkiyen dış yüklerden dolayı plastik kesitlerdeki iç kuvvet durumunun değişimini ifade eden kolon matrisi,

göstermektedirler.

Genişletilmiş denge denklemleri ve plastik kesitlere ait akma koşulları bir arada yazıldığında, herhangi bir yük artımında, sistemin ikinci mertebe elastoplastik hesabına ait denklem takımı

$$\begin{bmatrix} [S_{dd}] & [S_{d\phi}] \\ [S_{\phi d}] & [S_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [d] \\ [\phi] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [P_0] \\ [P_{\phi 0}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [q] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

şeklinde elde edilir.

4.3. İkinci Mertebe Limit Yükün Hesabında İzlenen Yol

Bir önceki aşamada minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan yapı sisteminin ikinci mertebe limit yükünün hesabında izlenecek yol aşağıda adımlar halinde verilmiştir.

a) Sistemdeki her çubuk için, hesap yüklerinden oluşan normal kuvvetler tahmin edilir. Normal kuvvetler büyük ölçüde denge denklemlerine bağlı olduklarından, hesap yüklerinden oluşacak normal kuvvetler kolaylıkla tahmin edilebilirler veya bir önceki boyutlandırma aşamasına ait sonuçlardan alınabilirler.

b) Tahmin edilen normal kuvvetlere bağlı olarak, her çubuk için rijitlik ve yükleme matrislerinin ikinci mertebe teorisindeki değerleri hesaplanır.

Normal kuvvetin sıfır veya küçük olduğu çubukların rijitlik ve yükleme matrislerin hesabında birinci mertebe teorisi esas alınabilir.

c) İlk yük artımında, yük parametresinin birim değeri için, sistemin ikinci mertebe teorisine göre hesabı yapılır. Başlangıçta sistem üzerinde plastik kesit bulunmadığı için (2.6) denge denklemi,

$$[S_{dd}][d] + [P_0] = [q] \quad (4.3)$$

şeklinde olacaktır. (4.3) bağıntısı ile verilen denklem takımı çözülerek, düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden oluşan bilinmeyenler belirlenir.

d) Bilinmeyenlere bağlı olarak, sistemdeki her çubuk için, uç kuvvetleri ve kritik kesitlerdeki iç kuvvetler hesaplanır ve bu iç kuvvetlerden yararlanarak ilk plastik kesitin oluşacağı yer ve buna ait yük parametresi belirlenir. Daha sonra birim yük parametresinden oluşan iç kuvvetler ilk plastik kesitin meydana geldiği yük parametresiyle çarpılarak bu duruma ait toplam iç kuvvetler hesaplanır.

e) Diğer yük artımlarında, sistemde en son oluşan plastik kesite ait plastik şekildeğiştirme parametresi bilinmeyen olarak alınır ve bu bilinmeyenin denge denklemlerine ve akma koşullarına etkisini ifade eden bir kolon ve satır, denklem takımına eklenir. Bu şekilde elde edilen genişletilmiş denklem takımının sadece yeni eklenen satır ve kolonu indirgenerek bilinmeyenler hesaplanır. Daha sonra uç kuvvetleri ve kritik kesitlere ait iç kuvvetler hesaplanır. Bunlara bağlı olarak bir sonraki plastik kesitin yeri ve onu oluşturan yük parametresi belirlenir.

f) Her yük artımı için hesap sonunda şu kontrol işlemleri yapılır:

i) Plastik kesitlerdeki sonlu plastik şekildeğiştirmelerin bu kesitlerdeki iç kuvvetler ile aynı yönde olup olmadıkları kontrol edilir. Eğer bir veya daha çok kesitte, plastik şekildeğiştirme parametreleri kendi doğrultularındaki iç kuvvetler ile ters yönde iseler, bu kesitlerdeki iç kuvvet durumunun yön değiştirerek akma yüzeyinin içine yöneldiği anlaşılır ve [56] da verilen yollardan biri uygulanarak bu adıma ait hesaplar tekrarlanır.

ii) Plastik kesitlerdeki iç kuvvet durumlarının akma düzlemlerini değiştirip değiştirmediği kontrol edilir. Bir veya daha çok kesitteki iç kuvvet durumu akma düzlemlerini değiştirmişse, bu plastik kesitlere ait akma koşulları yeniden yazılarak sözkonusu adımdaki yük artımına ait hesaplar tekrarlanır,[56].

iii) Genişletilmiş denklem takımı indirgendikten sonra katsayılar matrisinin determinant değeri hesaplanır. Determinantın değeri negatif ise veya artan yüklere karşılık düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri ve plastik şekildeğiştirme parametreleri önceki adıma ait değerlerle ters işaretli ise sistemin burkulduğu anlaşılır. Bu adımdan önceki toplam yük parametresi sistemin ikinci mertebe limit yükü olarak alınır ve hesaba son verilir.

iv) Plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametreleri ile düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri, öngörülen sınır değerlerle karşılaştırılır. Eğer düğüm noktaları yerdeğiştirmeleri ve plastik şekildeğiştirme parametrelerinden biri veya birkaçı sınır değerleri aşıyorsa, sistemin ikinci mertebe limit yükten önce göçtüğü anlaşılır. Bu adımdan önceki toplam yük parametresi göçme yükü olarak alınır ve hesaba son verilir.

v) Hesabın her adımında, sistemde bölgesel mekanizmaların ve yerel burkulmaların olup olmadığı kontrol edilir.

g)d ve f arasındaki adımlar, ikinci mertebe limit yük veya göçme yükü elde edilinceye kadar tekrarlanarak hesap işlemi tamamlanır.

h) Hesabın sonunda çubukların normal kuvvetleri başlangıçta tahmin edilen değerlerle karşılaştırılır. Tahmin edilen ve bulunan normal kuvvetler arasındaki fark çözümü etkileyecek mertebede ise, yeni normal kuvvetlere göre sistemin hesabı tekrarlanır. Ancak, çok kere tahmin edilen normal kuvvetlerle elde edilen çözüm yeterli olmakta ve hesabın tekrarlanmasına gerek kalmamaktadır.

Yukarıda verilen hesap adımlarının uygulanması sonucunda, sistemin ikinci mertebe limit yükü veya göçme yükü ile birlikte, plastik kesit yerleri, bu kesitlere ait akma vektörü doğrultularını belirleyen A_1, A_2, A_3 katsayıları,

düğüm noktalarının yerdeğıştirmeleri, plastik şekildeğıştirme parametreleri ve iç kuvvetler elde edilir. Elde edilen bu bilgilerden yararlanarak boyutlandırma aşamasına geçilir.



BÖLÜM 5. YAPI SİSTEMLERİNİN MİNİMUM AĞIRLIKLIL OLARAK BOYUTLANDIRILMASI

Bu bölümde, yapı sistemlerinin ikinci mertebe limit yük için minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmalarında izlenen genel yol verilecek, göçme yüküne göre boyutlandırmada gözönünde tutulacak hususlar ve boyutlandırılan sistemin işletme yükleri altında incelenmesi açıklanacaktır.

5.1. İkinci Mertebe Limit Yük İçin Boyutlandırmada İzlenen Yol

Bir yapı sisteminin, ikinci mertebe limit yük için minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmasında izlenen genel yol şu adımlardan oluşmaktadır.

1) Ardışık yaklaşımın ilk adımına başlamadan önce, Bölüm 3.5 te açıklanan yollardan biri uygulanarak sistem boyutlandırılır ve enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar belirlenir. Sonra boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe elastoplastik hesabı yapılarak plastik kesit yerleri ve bu kesitlerdeki akma vektörü doğrultuları elde edilir.

2) Ardışık yaklaşımın herhangi bir adımında,

a) enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar, plastik kesit yerleri ve bu kesitlerdeki akma vektörü doğrultuları başlangıç çözümünden veya bir önceki adımdan alınan sistem, Bölüm 3.5 te açıklanan yol izlenerek minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılır,

b) Bölüm 4.3 te verilen yol izlenerek, boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe elastoplastik hesabı yapılır. İkinci mertebe limit yükü, bu yüke karşı gelen plastik kesit yerleri ve plastik kesitlerdeki akma vektörü doğrultuları belirlenir.

3) Ardışık iki adımdaki enkesit karakteristikleri birbirinin aynı veya yeter derecede yakın olduğunda hesaba son verilir. Bu koşulun sağlanmaması halinde ikinci adımda verilen işlemler tekrarlanır.

5.2. Göçme Yüküne Göre Boyutlandırma

Bazı hallerde, sistemin ve yüklemenin özelliğine bağlı olarak, yük parametresi ikinci mertebe limit yüke ulaşmadan önce kırılma, büyük yerdeğiştirme veya plastik şekildeğiştirmelerin oluşması, betonarme sistemlerde büyük çatlaklar gibi nedenlerden birinin veya birkaçının etkisi ile sistem işletme dışı olabilir; yani göçebilir. Bu durumda sistemin, göçme yükü altında ağırlığı minimum olacak şekilde boyutlandırılması gerekir.

Göçme yükü için minimum ağırlıklı boyutlandırmada, Bölüm 5.1 de verilen genel yol uygulanır. Ancak, boyutlandırma aşamasında, plastik kesit yerleri ve bu kesitlerdeki akma vektörü doğrultuları göçme yüküne karşı gelen durumdan alınır. Ayrıca, kısıtlamalar yazılırken, sistemin göçmesine neden olan yerdeğiştirmelerle ve plastik şekildeğiştirmelerle ilgili koşullar gözönünde tutulur.

5.3. İşletme Yükleri Altında Sistemin İncelenmesi

İkinci mertebe limit yük veya göçme yükü esasına göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan sistemlerin, işletme yükü altında

- a) yerdeğiştirmelerin öngörülen sınır değerleri aşmaması,
 - b) değişken yüklemeler altında plastik şekildeğiştirmelerin yığılmasını önlemek amacıyla, çok sayıda plastik kesit oluşmaması,
- gibi koşulları sağlaması gerekir.

Bu nedenle boyutlandırılan sistemin işletme yükü altında elastoplastik hesabı yapılarak bu koşulların sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmelidir. İşletme yükü altında öngörülen koşulların sağlanmaması halinde, yapı sisteminin boyutlarında uygun değişiklikler yapılarak bu koşulların sağlatılmasına çalışılır.

Geliştirilen yöntemde, minimum ağırlıklı boyutlandırma problemine esas olan yükün ikinci mertebe limit yük veya göçme yükü olduğu kabul edildiğinden, işletme yükü altında sağlanması gereken koşulların etkin olduğu bir minimum ağırlıklı boyutlandırma probleminin elastik optimizasyon problemi olarak ele alınması daha uygun olmaktadır.

BÖLÜM 6. MWDOS BİLGİSAYAR PROGRAMI

6.1. Programın Amacı, Yapısı ve Kapsamı

Bu çalışmada geliştirilen minimum ağırlıklı boyutlandırma yöntemi, her adımı birbirini izleyen boyutlandırma ve sistem hesabı aşamalarından oluşan bir ardışık yaklaşım yöntemidir. Ardışık iki adımdaki toplam yapı ağırlığının ve çubuk enkesit karakteristiklerinin birbirlerine eşit veya yeterince yakın olması durumunda hesaba son verilmektedir. Bu bölümde, yöntemin sayısal uygulamalarına olanak sağlamak amacıyla, FORTRAN77 programlama dili kullanılarak geliştirilen ve *batch program* düzeninde çalışan MWDOS isimli bir bilgisayar programının yapısı, çalışma düzeni, giriş ve çıkış bilgileri açıklanacaktır. Bölüm 2.1 de verilen koşullar altında, uzay çubuk sistemlerin ikinci mertebe limit yük (veya göçme yükü) için minimum ağırlıklı olacak şekilde boyutlandırılmalarını sağlayan program ayrıca, sistemlerin birinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmaları amacıyla da kullanılabilir.

MWDOS bilgisayar programını oluşturan program parçaları ve işlevleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

KISITLA programı : Bu programda, minimum ağırlıklı boyutlandırma probleminin kısıtlamaları oluşturularak diske yazılır.

INDIRGE programı : Kısıtlama denklemleri diskten okunur, Bölüm 3.1. de açıklanan Gauss indirgeme yöntemi kullanılarak denge denklemleri indirgenir ve indirgenmiş kısıtlamalar diske gönderilir.

MINBUL programı : Bu programda, amaç fonksiyon ve indirgenmiş kısıtlama denklemleri diskten okunur ve Simplex yöntemi uygulanarak lineer programlama probleminin çözümü bulunur.

KESIT programı : Enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar kullanılarak, bir sonraki adım için gerekli olan enkesit alanları, atalet momentleri ve plastik momentler ile plastik normal kuvvetler hesaplanır ve

İMEP-3D sistem hesabı programının yararlanabileceği şekilde diske yazılır. Bu programda ayrıca, gerekli türev bağıntılarından yararlanarak, lineerleştirilmiş amaç fonksiyon oluşturulur ve bir sonraki adımda MINBUL programı tarafından kullanılmak üzere diske gönderilir.

6.2. Giriş Bilgileri

Bu bölümde, MWDOS programını oluşturan program parçalarının giriş bilgileri ayrı ayrı verilecektir.

KISITLA programı : Bu programın giriş bilgileri

- a)program kontrol bilgileri,
- b)sistem özellikleri ile ilgili giriş bilgileri,
- c)çubuk özellikleri ile ilgili giriş bilgileri,
- d)düğüm noktası yüklerine ve çubuk üzerindeki yüklere ait bilgiler,
- e)özel mesnet durumları ile ilgili bilgiler,
- f) plastik kesitlere ait bilgiler,
- g)akma koşulu kısıtlamalarının yazılabilmesi için gerekli bilgiler,
- h)diğer kısıtlamalara ait bilgiler

şeklinde düzenlenmiştir.

Aşağıda bu giriş bilgileri ayrı ayrı açıklanmıştır.

a)Program kontrol bilgileri

Bu grupta verilen değişkenler yardımıyla program akışı kontrol edilmektedir. Eleman rijitlik matrislerinin birinci veya ikinci mertebe teorisinden alınması, kontrol amacıyla kısıtlama denklemlerinin bastırılması veya bastırılmaması bu değişkenlerin değerlerine göre belirlenir.

b)Sistem özellikleri ile ilgili giriş bilgileri

Sistemin tam ankastre olan mesnetleri dışında kalan düğüm noktası sayısı, sistemi oluşturan çubuk sayısı, yüklü düğüm noktası sayısı, elastisite ve kayma modülünün değerleri, sistem özellikleri ile ilgili giriş bilgilerini oluşturmaktadır.

c) Çubuk özellikleri ile ilgili giriş bilgileri

Bu bölümde, çubuk sayısı kadar tekrarlanmak üzere, çubukların i ve j düğüm noktalarının numaraları, çubuk üzerindeki tekil yüklerin sayısı, çubuk eksenlerinin sistem eksenleri ile yaptığı açılar, çubuk boyları, ikinci mertebe limit yüke ait çubuk normal kuvvetleri, çubukların enkesit alanları ve atalet momentleri ile plastik momentleri ve plastik normal kuvvetleri giriş bilgisi olarak verilir.

d) Düğüm noktası yükleri ve çubuk üzerindeki yüklere ait bilgiler

Üzerinde tekil yük bulunan çubuklarda, tekil yük sayısı kadar tekrarlanmak üzere, bu yüklerin çubuk eksenlerindeki bileşenlerinin değerleri ve çubukların i ucuna olan uzaklıkları ile düğüm noktalarına etkiyen yüklerin sistem eksenlerindeki bileşenlerinin değerleri giriş bilgisi olarak verilir.

e) Özel mesnet durumları ile ilgili bilgiler

Bu bölümde, tam ankastre olmayan mesnetlerin numaraları ve bu mesnetlerdeki serbest olan yerdeğiştirmeler giriş bilgisi olarak verilir.

f) Plastik kesitlere ait bilgiler

Bir önceki hesap aşamasından elde edilen plastik kesit yerleri, plastik kesitlerin çubukların i ucundan olan uzaklıkları ve bu kesitlere ait akma vektörü doğrultularını belirleyen A_1, A_2, A_3 katsayıları plastik kesitlere ait bilgileri oluşturmaktadır.

g) Akma koşulu kısıtlamalarının yazılabilmesi için gerekli bilgiler

Bu bölümde, gözönüne alınan kritik kesitlerde akma koşulu kısıtlamalarının yazılabilmesi için gerekli olan bilgiler verilir. Bu bilgiler, çubuk sayısı kadar tekrarlanmak üzere, çubuk numarası, bir önceki hesap aşamasından elde edilen çubuk normal kuvveti, akma koşulu kısıtlamaları yazılacak kritik kesit sayısı, bu kesitlerin numaraları, çubuk üzerindeki

konumları, çubuk üzerindeki plastik kesit sayısı, bu plastik kesitlerin oluşum sıra numaraları, çubuk üzerindeki konumları ve bu kesitlere ait A_1, A_2, A_3 katsayılarından oluşur.

h)Diğer kısıtlamalara ait bilgiler

Bu grupta, sınırlanması istenen yerdeğiştirmelerin veya plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerinin değişken sıra numaraları ve bunlara ait sınır değerler giriş bilgisi olarak verilir.

INDIRGE programı : Bu programın giriş bilgileri KISITLA programı tarafından hazırlanıp diske yazıldığı için, ayrıca bir bilginin verilmesine gerek yoktur. Bu program tarafından kullanılan giriş bilgileri, denge denklemlerini ve akma koşulu kısıtlamalarını oluşturan $[k], [k_0], [a]$ ve $[b]$ matrisleri ile yerdeğiştirme kısıtlamalarına ait bilgilerdir.

MINBUL programı : Bu programın giriş bilgileri, INDIRGE programı tarafından oluşturulan indirgenmiş akma koşulu kısıtlamalarını içeren $[A], [B]$ matrisleri ve yerdeğiştirme kısıtlamalarına ait bilgiler ile KESIT programı tarafından oluşturulan ve lineerleştirilmiş amaç fonksiyona ait katsayıları içeren $[C]$ kolon matrisidir. Bu bilgilerin de ayrıca verilmesine gerek olmamaktadır. Problemin değişkenleri arasında bulunan plastik momentlerle ilgili yapısal kısıtlamalar varsa, bu tür kısıtlamaların oluşturulması için gerekli bilgiler ayrıca verilmelidir. Bu bilgiler, kısıtlanması istenilen plastik momentlere ait değişkenlerin sıra numaraları ile bu plastik momentlere ait sınır değerlerden oluşmaktadır.

KESIT programı : Bu programın giriş bilgileri, MINBUL programı tarafından belirlenen M_{pz} çubuk plastik momentleri ile bu plastik momentlerin ait olduğu çubuk numaraları ve çubuk uzunluklarıdır. Bu programda, Ek A da verilen enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılardan yararlanarak, İMEP-3D, KISITLA ve MINBUL programları tarafından kullanılmak üzere bir veri dosyası da hazırlanır.

6.3. Çıkış Bilgileri

MWDOS programının çıkış bilgileri, batch program düzeni içerisinde çalışan programların birbirleri için hazırladıkları gerekli veri dosyalarından ve batch programın son aşamasını oluşturan MINBUL programının çalışması sonucunda elde edilen ve tasarım değişkenlerinin değerleri ile toplam yapı ağırlığını içeren çıkış dosyasından oluşmaktadır.

6.4. Akış Diyagramı

MWDOS programının genel akış diyagramı Şekil 6.1 de, KISITLA programının akış diyagramı Şekil 6.1a da ve MINBUL programının akış diyagramı Şekil 6.1b de verilmiştir.

6.5. Altprogramların Açıklanması

Şekil 6.1 den görüldüğü gibi, MWDOS bilgisayar programı, batch program düzeninde çalışan dört ana program ile İMEP-3D programını ve bu ana programları oluşturan altprogramları içermektedir. Aşağıda, sözkonusu altprogramlar ve işlevleri açıklanmıştır.

1) KISITLA programı

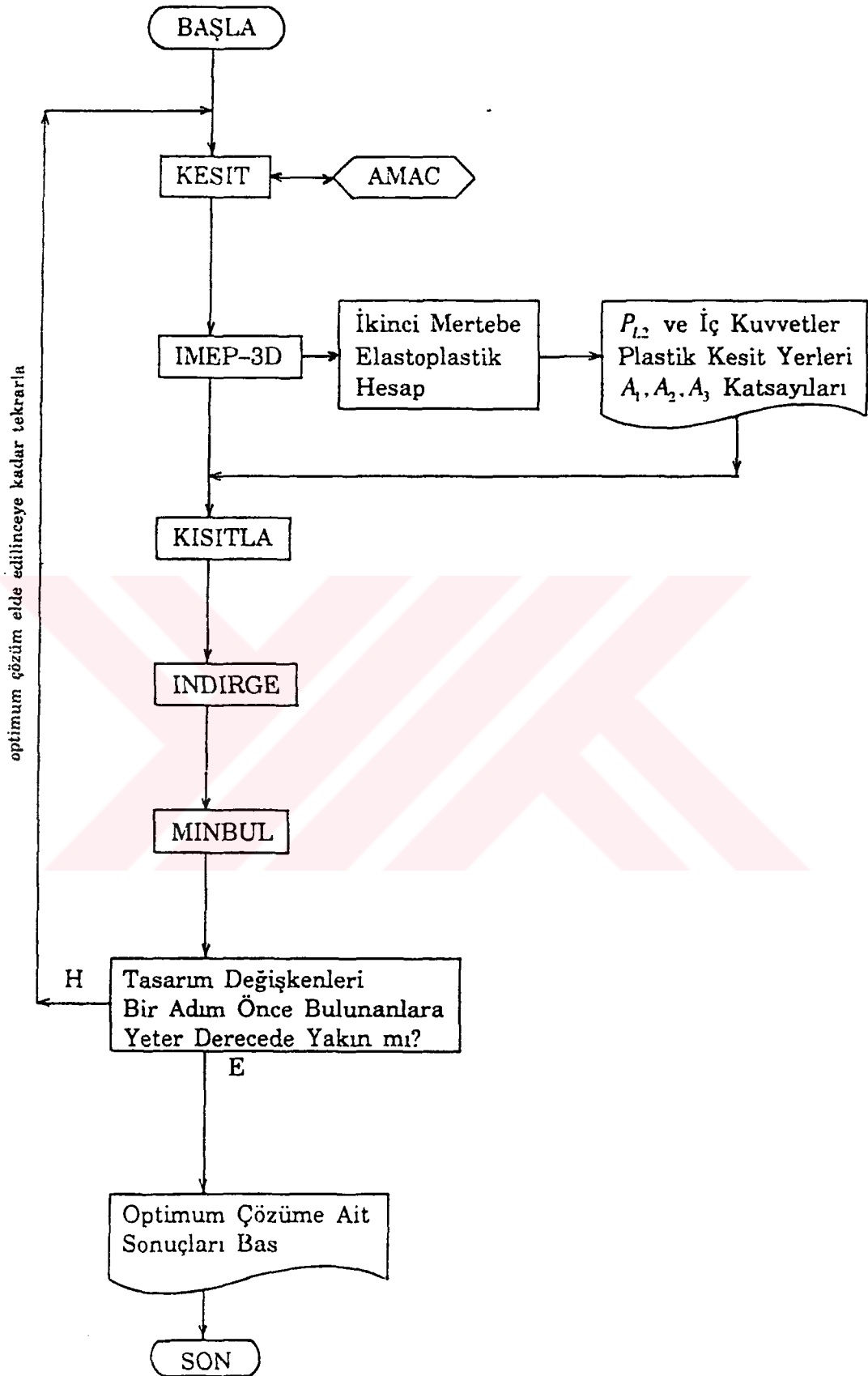
Kısıtlama denklemlerini oluşturan matrislerin elde edildiği bu program yirmibir adet altprogramı içermektedir.

CRMII : Bu altprogramda, çubuk eksenlerindeki $[k]_{ii}$ çubuk rijitlik matrislerinin birinci veya ikinci mertebe teorisine ait değerleri hesaplanır.

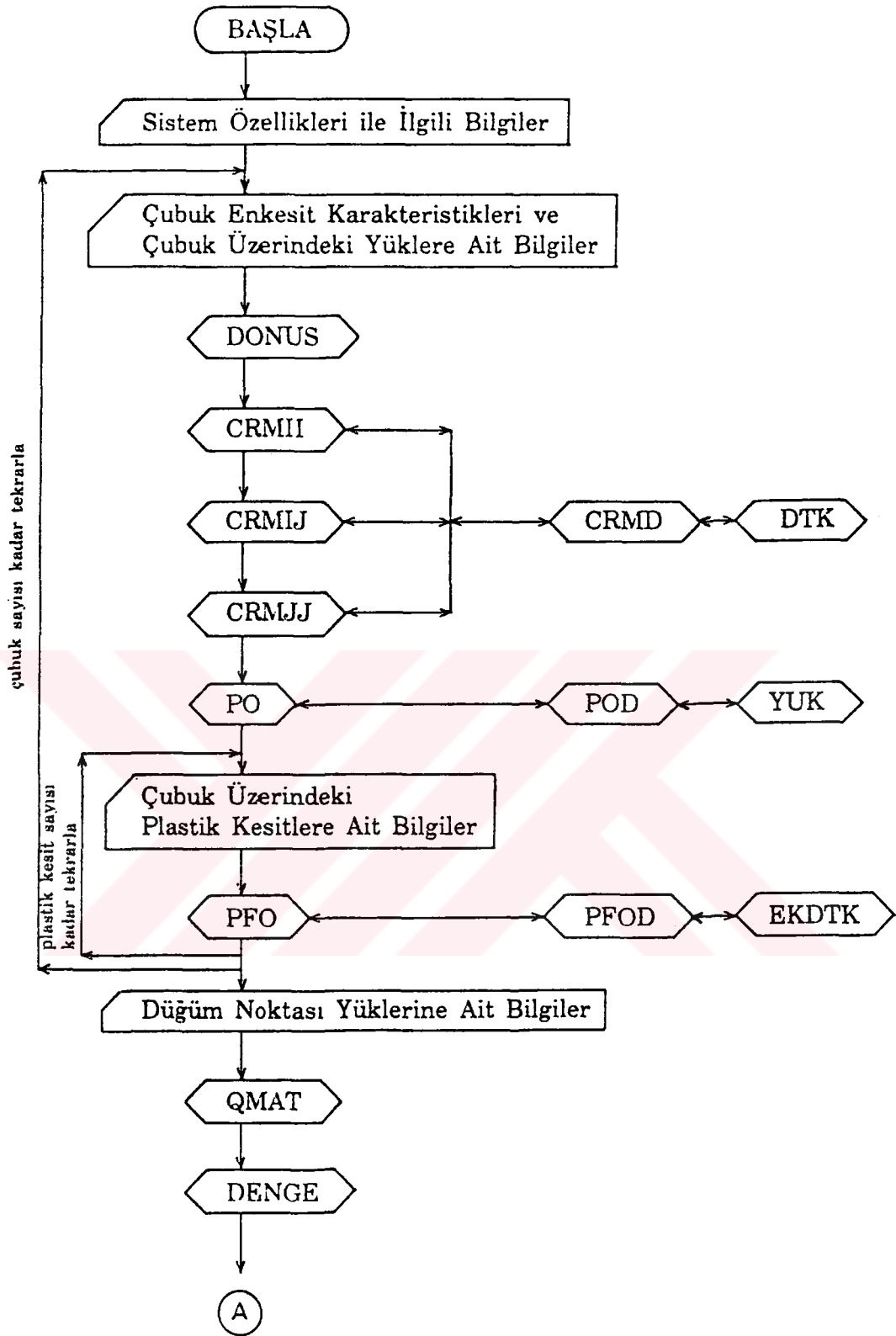
CRMIJ : Çubuk eksenlerindeki $[k]_{ij}$ çubuk rijitlik matrislerinin birinci veya ikinci mertebe teorisine ait değerleri hesaplanır.

CRMJJ : Çubuk eksenlerindeki $[k]_{jj}$ çubuk rijitlik matrislerinin birinci veya ikinci mertebe teorisine ait değerleri hesaplanır.

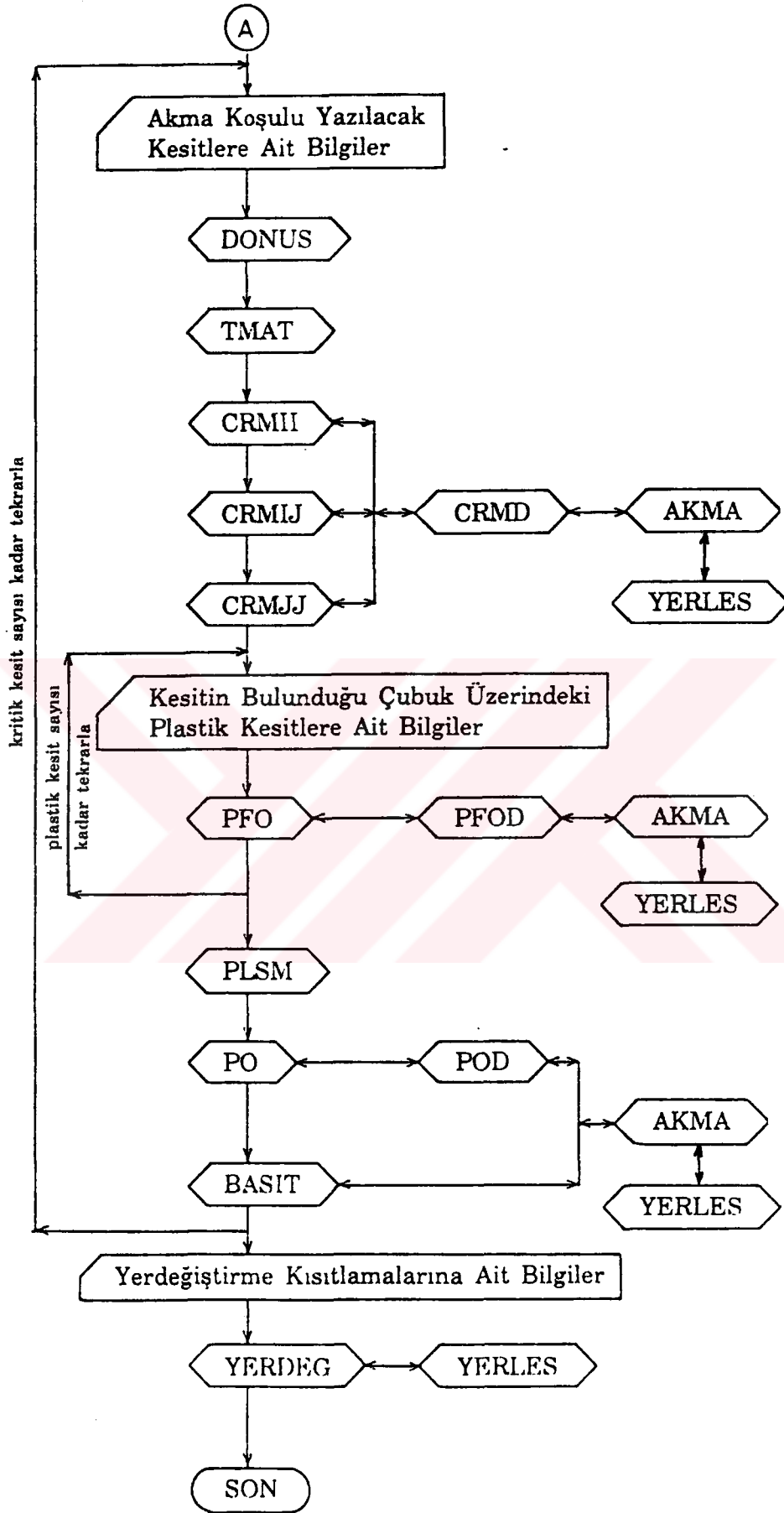
DONUS : Çubukların $[T]$ dönüştürme matrisleri hesaplanır.



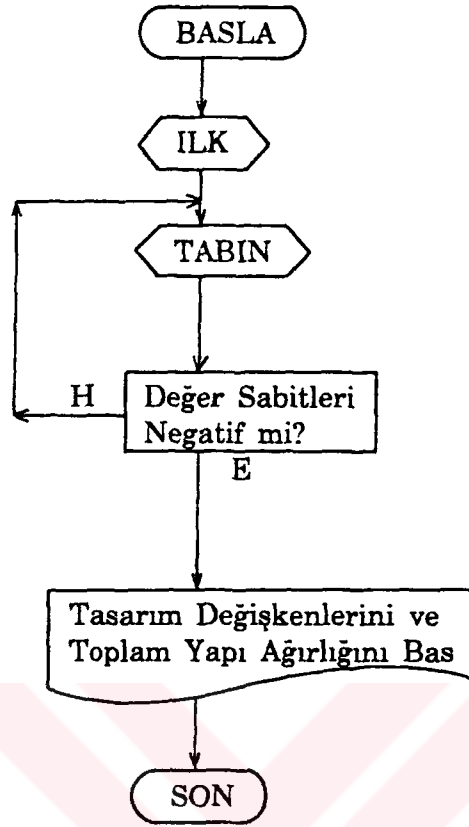
Şekil 6.1.MWDOS Bilgisayar Programının Genel Akış Diyagramı



Şekil 6.1a. KISITLA Programının Akış Diyagramı



Şekil 6.1a. KISITLA Programının Akış Diyagramı (Devam)



Şekil 6.1b. MINBUL Programının Akış Diyagramı

CRMD : Ek B de verilen dönüştürme bağıntılarından yararlanarak sistem eksenlerindeki çubuk rijitlik matrisleri elde edilir.

PFO : Plastik şekildeğiştirme parametrelerinin birim değerlerinden dolayı çubuk eksenlerinde oluşan $[P_{\phi k}]_i, [P_{\phi k}]_j$ çubuk uç kuvvetleri matrisleri hesaplanır.

PFOd : PFO altprogramında hesaplanan uç kuvvetleri matrisleri $[T]$ dönüştürme matrisleri ile çarpılarak, plastik şekildeğiştirme parametrelerinin birim değerlerinden dolayı sistem eksenlerinde oluşan $[P_{\phi k}]_{ix}, [P_{\phi k}]_{jx}$ çubuk uç kuvvetleri matrisleri elde edilir.

PO : Çubukların üzerindeki tekil yüklerden dolayı, çubuk eksenlerinde oluşan $[P_0]_i, [P_0]_j$ uç kuvvetleri matrisleri hesaplanır.

POd : PO altprogramında hesaplanan uç kuvvetleri matrisleri $[T]$ dönüştürme matrisleri ile çarpılarak sistem eksenlerindeki, $[P_0]_{ix}, [P_0]_{jx}$ çubuk uç kuvvetleri matrisleri elde edilir.

QMAT : Düğüm noktalarına etkiyen dış yüklerden oluşan $[q]$ yükleme matrisi hesaplanır.

DTK : Plastik kesit oluşmamış sisteme ait $[S_{dd}]$ sistem rijitlik matrisi oluşturulur.

YUK : Bu altprogramda, POD altprogramında hesaplanan çubuk uç kuvvetleri matrislerinden yararlanarak sisteme ait $[P_0]$ yükleme matrisi oluşturulur.

EKDTK : Plastik kesitlerdeki şekildeğiştirmelerin denge denklemlerine katkısını ifade eden $[S_{d\phi}]$ matrisi oluşturulur.

TMAT : Kritik kesitlerde, akma koşuluna ait A_1, A_2, A_3 katsayılarını içeren $[t]$ matrisleri hesaplanır.

DENGE : $[S_{dd}], [S_{d\phi}], [P_0], [q]$ matrislerinden yararlanarak denge koşullarına ait kısıtlamalar oluşturulur ve diske yazılır.

PLSM : Akma koşulundaki B katsayılarını içeren $[u]$ matrisleri oluşturulur ve diske yazılır.

AKMA : Bu altprogramda, akma koşulu kısıtlamalarının oluşturulması amacıyla, (3.1) bağıntısı ile verilen yardımcı matrisler hesaplanır.

BASIT : İki ucu basit mesnetli çubuk üzerindeki kritik kesitlerde, dış yüklerden oluşan $[F_0(x)]$ iç kuvvet matrisleri hesaplanır.

YERDEG : Yerdeğiştirme veya plastik şekildeğiştirme parametrelerine ait kısıtlamalar oluşturulur ve diske yazılır.

YERLES : AKMA altprogramında hesaplanan matrisler, (3.3) akma koşulu kısıtlamaları bağıntısındaki yerlerine yerleştirilerek akma koşullarına ait kısıtlamalar oluşturulur ve diske yazılır.

MATCAR : Bu altprogramda, kısıtlama denklemlerinin oluşturulması için gerekli matris çarpımı işlemleri yapılır.

2)INDIRGE programı

Kısıtlama denklemlerinin bir bölümünü oluşturan denge denklemlerinin indirgenmesi suretiyle, indirgenmiş akma koşulu ve yerdeğiştirme kısıtlamalarının oluşturularak diske yazıldığı bu program, alt program içermemektedir.

3)MINBUL programı

Simplex yöntemi yardımı ile amaç fonksiyonun minimumunun ve bu fonksiyonu minimum yapan tasarım değişkenlerinin değerlerinin bulunduğu bu program, iki adet altprogram içermektedir.

ILK : Bu altprogramda, Bölüm 3.4 te verilen yol uygulanarak ilk uygun temel çözüme ait Simplex tablosu oluşturulur.

TABIN : Bu altprogramda, hesabın herhangi bir adımında oluşturulan Simplex tablosu indirgenir, değişkenlerin ve değer sabitlerinin o adım sonundaki değerleri hesaplanır.

4) KESIT programı

MINBUL programı ile elde edilen $[M_p]$ tasarım değişkenlerine bağlı olarak, bir sonraki adımda kullanılacak enkesit karakteristiklerinin ve amaç fonksiyonun katsayılarının Ek A da verilen bağıntılardan yararlanılarak hesaplandığı bu program, bir adet altprogram içermektedir.

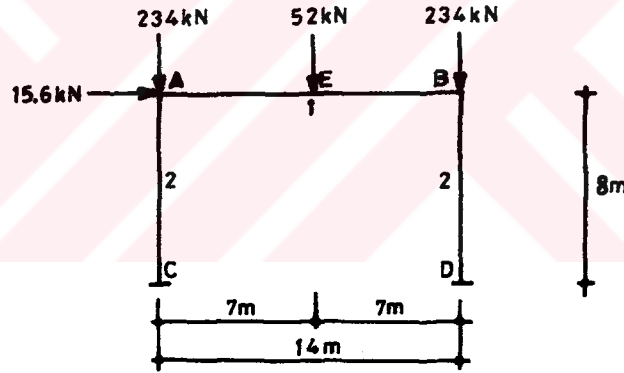
AMAC : Bu altprogramda, Ek A da verilen enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılardan yararlanarak, lineerleştirilmiş amaç fonksiyonun katsayıları hesaplanır ve diske gönderilir.

Önerilen boyutlandırma yönteminin sistem hesabı aşamasında, lineer olmayan çubuk sistemlerin ikinci mertebe limit yükünün hesabı amacıyla geliştirilen herhangi bir bilgisayar programından yararlanılabilir. Bu çalışmada, İrtem [56] tarafından geliştirilen İMEP-3D bilgisayar programından yararlanılmış ve bu programın batch program düzeni içerisinde çalışması sağlanmıştır. Ancak, bu çalışmada geliştirilen yöntemde, sisteme etkiyen düşey ve yatay yüklerin orantılı olarak arttığı gözönünde tutulduğundan, esas olarak sabit düşey yükler ve orantılı olarak artan yatay yükler etkisindeki sistemlerin ikinci mertebe limit yükünü belirlemek üzere geliştirilen İMEP-3D programının giriş bilgilerinde ve genel yapısında bazı düzenlemeler yapılması gerekmiştir.

BÖLÜM 7. SAYISAL ÖRNEKLER

7.1. Bir Katlı Düzlem Çerçeve

Geometrik özellikleri ve hesap yükleri ($P_H = 1.000$) Şekil 7.1 de verilen bir katlı, bir açıklıklı düzlem çerçeve ikinci mertebe limit yük için ağırlığı minimum olacak şekilde boyutlandırılacaktır. Sistemin çubukları, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntıları Ek A da verilen *NPI* profilleri benzeri yapma kesitlerden oluşmaktadır. Ayrıca yapısal kısıtlama olarak, kolon enkesit boyutlarının aynı olması istenmektedir. Malzeme Fe37 yapı çeliği olup, akma gerilmesi $\sigma_F = 240 \text{ N/mm}^2$ ve elastisite modülü $E = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ dir.



Şekil 7.1. Bir Katlı Düzlem Çerçevenin Geometrik Özellikleri ve Hesap Yükleri

Geliştirilen minimum ağırlıklı boyutlandırma yönteminin ilk adımına, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntıları tahmin edilen sistemin ikinci mertebe elastoplastik hesabı sonucunda elde edilen plastik kesit yerleri ile bu kesitlere ait akma vektörü doğrultuları esas alınarak başlanması gerekmektedir. İlk adımın boyutlandırma aşamasında, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar lineerleştirilir ve yapı ağırlığı tasarım değişkeni olarak seçilen çubuk plastik momentlerine bağlı olarak ifade edilir. Düğüm noktalarının yerdeğiştirmelerine ve başlangıç çözümünden elde edilen plastik şekildeğiştirme parametrelerine bağlı olarak yazılan genişletilmiş denge denklemleri ile kritik kesitlere ait akma koşulu

kısıtlamaları oluşturulduktan sonra, düğüm noktalarının yerdeğiştirmelerine karşı gelen değişkenler elenerek ulaşılan lineer programlama problemi Simplex yöntemi ile çözülr ve yeni enkesit karakteristikleri elde edilir. Bu adımın sistem hesabı aşamasında, elde edilen kesit karakteristikleri esas alınarak, sistemin ikinci mertebe elastoplastik hesabı yapılır ve ikinci mertebe limit yük parametresi, yeni plastik kesit yerleri ve bunlara ait akma vektörü doğrultuları elde edilir. Ardışık iki adımdaki enkesit karakteristikleri ile sistem hesabı sonucunda elde edilen plastik kesit yerleri ve akma vektörü doğrultuları birbirlerine yeter derecede yakın olduğunda ardışık yaklaşıma son verilir. İkinci mertebe elastoplastik hesap sonucunda elde edilen ve sistemin burkulmasına neden olan son plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirmeler sıfır olduğundan, boyutlandırma aşamasında bu plastik kesitlerin denge denklemlerine ve akma koşullarına etkileri gözönüne alınmaz.

Sistem, ilk adıma esas olacak kesit karakteristiklerinin tahmin edilmesi amacıyla, önce birinci mertebe limit yük için minimum ağrlıklı olarak boyutlandırılmıştır. Bu boyutlandırmada ayrıca, ikinci mertebe etkilerini yaklaşık olarak hesaba katmak için $\delta/L=0.01$ rölaf yerdeğiştirmesine karşı gelen $N\delta/L$ fiktif kuvvetleri gözönüne alınmış, böylece ikinci mertebe limit yük için boyutlandırmada gereken ardışık yaklaşım sayısının azaltılması amaçlanmıştır. Bu boyutlandırma sonucunda, kiriş plastik momentleri için $M_{pz1}=91.00kNm$. ve kolon plastik momentleri için $M_{pz2}=100.40kNm$. değerleri elde edilmiş ve bu plastik momentlere karşı gelen enkesit karakteristikleri başlangıç çözümü olarak alınarak ikinci mertebe teorisine göre minimum ağrlıklı boyutlandırma işleminin gerçekleştirilmiştir.

Sistem daha sonra, başlangıçta seçilen enkesit karakteristiklerinin sonucu ve ardışık yaklaşım sayısını nasıl etkilediğini incelemek amacıyla, kiriş ve kolonların plastik momentleri için gelişigüzel seçilen $300kNm$. değerine karşı gelen enkesit karakteristikleri esas alınarak, ikinci mertebe teorisine göre minimum ağrlıklı olarak, yeniden boyutlandırılmıştır.

Yukarıda açıklanan iki farklı başlangıç çözümü esas alınarak gerçekleştirilen, ikinci mertebe limit yük için minimum ağrlıklı boyutlandırma işleminin adımlarına ait sayısal sonuçlar sırası ile Tablo 7.1 ve Tablo 7.2 de verilmiştir.

Tablo 7.1. Bir Katlı Düzlem Çerçeve, Birinci Başlangıç Çözümü Esas Alınarak Yapılan Minimum Ağırlıklı Boyutlandırma İşleminin Adımları

Adım	M_{pz1}	M_{pz2}	AFK_1	AFK_2	P_{L2}
No	(kNm)	(kNm)	(-)	(-)	(-)
1	91.00	100.40	103.62	116.61	0.858
2	106.34	114.41	101.04	113.92	1.010
3	104.50	113.86	101.35	114.02	0.999
4	104.56	113.88	101.34	114.02	1.000
5	104.56	113.88	101.34	114.02	1.000

Tablo 7.2. Bir Katlı Düzlem Çerçeve, İkinci Başlangıç Çözümü Esas Alınarak Yapılan Minimum Ağırlıklı Boyutlandırma İşleminin Adımları

Adım	M_{pz1}	M_{pz2}	AFK_1	AFK_2	P_{L2}
No	(kNm)	(kNm)	(-)	(-)	(-)
1	300.00	300.00	85.25	97.43	1.943
2	93.11	93.11	103.26	118.02	0.834
3	107.60	114.90	100.82	113.82	1.018
4	104.45	113.85	101.35	114.02	0.999
5	104.57	113.88	101.33	114.02	1.000
6	104.56	113.88	101.34	114.02	1.000

Yukarıdaki tablolarda AFK , amaç fonksiyonun katsayılarını, P_{L2} ise ikinci mertebe limit yük parametresini göstermektedir.

Görüldüğü gibi, birinci mertebe teorisine göre minimum ağırlıklı boyutlandırma sonucunda elde edilen enkesit karakteristikleri ile boyutlandırmaya başlanması durumunda optimum çözüme daha hızlı ulaşılmaktadır.

Her iki yolla gerçekleştirilen minimum ağırlıklı boyutlandırma sonucunda elde edilen toplam yapı ağırlığı birbirine eşit ve 11.49 kN dur.

Aynı problemin [54] te verilen yöntemle boyutlandırılması ile elde edilen plastik momentler sırasıyla 104.6 kNm ve 113.8 kNm, toplam yapı ağırlığı ise 11.49 kN değerlerini almaktadır. Görüldüğü gibi, aynı kabullere dayanan; fakat farklı yöntemler izlenen her iki çalışma ile elde edilen sonuçlar birbirinin aynıdır.

Boyutlandırmanın son adımında, tasarım değişkenleri

$$[\phi_0] = \begin{bmatrix} \phi_E \\ \phi_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.270 \times 10^{-1} \\ 0.171 \times 10^{-1} \end{bmatrix}, \quad [M_p] = \begin{bmatrix} M_{pz1} \\ M_{pz2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.10456 \times 10^3 \\ 0.11388 \times 10^3 \end{bmatrix}$$

olarak elde edilmişlerdir. Bu büyüklükler sırasıyla E ve B kesitlerindeki plastik kesitlere ait plastik şekil değiştirme parametreleri ile kirişin ve kolonların plastik momentlerini göstermektedirler. Son oluşan plastik kesitlere ait plastik şekil değiştirme parametreleri sıfır değerini almaktadır.

ϕ_E ve ϕ_B plastik şekil değiştirme parametrelerinin genişletilmiş denge denklemlerinde yerine konulmasıyla düğüm noktalarının yer değiştirmeleri,

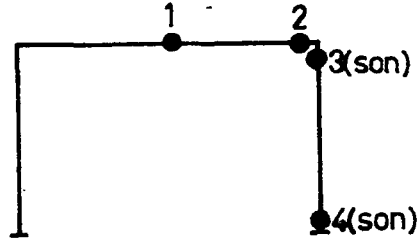
$$\Theta_A = -0.0301 \text{radyan}$$

$$\Theta_B = 0.0171 \text{radyan}$$

$$\delta = 0.1061 \text{m.}$$

olarak elde edilir.

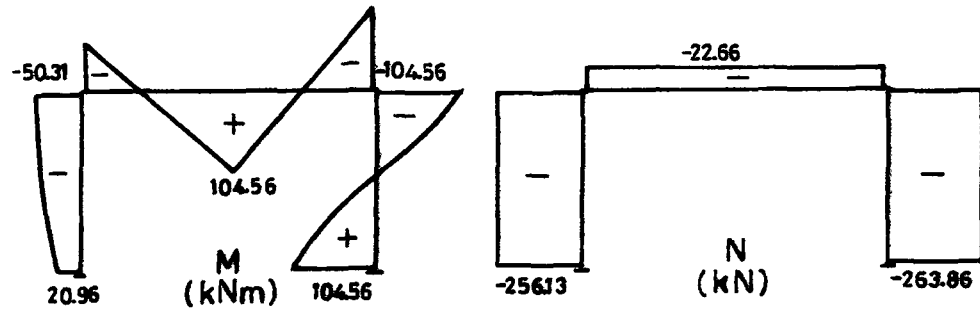
Ardışık yaklaşımın son adımında boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe teorisi ile hesabı sonucunda bulunan plastik kesit yerleri Şekil 7.2 de, plastik kesitlerin olduğu yük parametreleri ve akma vektörü doğrultularını belirleyen A_1, A_2, A_3 katsayıları Tablo 7.3 te, bu çözüme ait eğilme momenti ve normal kuvvet diyagramları Şekil 7.3 te verilmişlerdir.



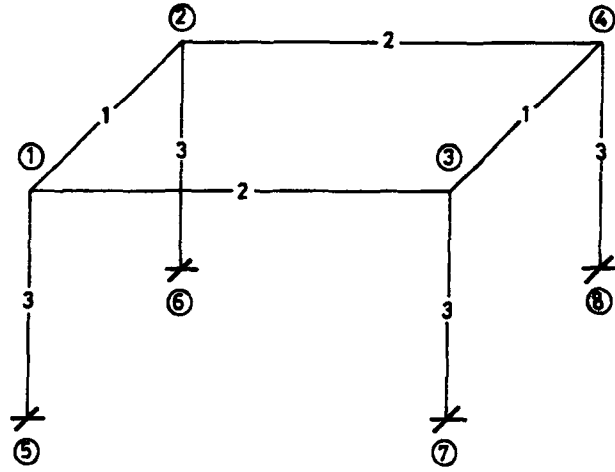
Şekil 7.2. İkinci Mertebe Limit Yüke Göre Minimum Ağırlıklı Olarak Boyutlandırılan Bir Katlı Düzlem Çerçevenin Plastik Kesit Yerleri ve Oluşum Sırası

Tablo 7.3. İkinci Mertebe Limit Yüke Göre Minimum Ağırlıklı Olarak Boyutlandırılan Bir Katlı Düzlem Çerçeve Plastik Kesitlerin Oluşum Sırası, Oluştukları Yük Parametreleri ve Akma Düzlemi Katsayıları

Çubuk	X(m)	P_{L2}	A_1	A_2	A_3
A-B	7.00	0.9476	1.0000	0.0000	0.0000
A-B	14.00	0.9796	1.0000	0.0000	0.0000
B-D	0.00	1.0000	1.0000	0.0000	0.1115
B-D	8.00	1.0000	1.0000	0.0000	-0.1115



Şekil 7.3. İkinci Mertebe Limit Yüke Göre Minimum Ağırlıklı Olarak Boyutlandırılan Bir Katlı Düzlem Çerçevenin Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Diyagramları



Şekil 7.5. Bir Katlı Uzay Çerçevesinin Düğüm Noktaları ve Farklı Enkesitli Çubuk Numaraları

Çeşitli boyutlandırma kriterlerinin sonuca etkisini incelemek ve farklı kriterler altında minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan sisteme ait sayısal sonuçları karşılaştırmak amacıyla, bir katlı uzay çerçeve, bu çalışmada geliştirilen yöntem ile ve dört farklı şekilde boyutlandırılmıştır. Bu boyutlandırmaların dayandığı kriterler ve yöntemin her bir boyutlandırma için nasıl uygulandığı aşağıda açıklanmıştır.

1) Sistem birinci mertebe limit yük için ağırlığı minimum olacak şekilde boyutlandırılmış, normal kuvvetin akma koşuluna etkisi terkedilmiştir.

2) Sistem birinci mertebe limit yük için ağırlığı minimum olacak şekilde boyutlandırılmış, normal kuvvetin akma koşuluna etkisi gözönüne alınmıştır.

Birinci mertebe teorisine göre minimum ağırlıklı boyutlandırmada, sistemin tümü mekanizma durumuna gelmekte ve bu duruma ait iç kuvvetler yalnız denge denklemlerine bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Bu nedenle, sistemin mekanizma durumuna gelmesine yol açan ve şekil değiştirmeleri sıfır olan son plastik kesitlerin gözönüne alınmadığı bir izostatik sistem üzerinde yazılan denge denklemleri enkesit karakteristiklerinden bağımsız olarak elde edilebilmektedir.

Boyutlandırılacak sisteme ait herhangi bir izostatik sistem elde etmek amacıyla 24 adet iç kuvvet bileşeni kaldırılmış ve bu iç kuvvet bileşenlerinin doğrultusunda serbestçe şekil değiştirebilen plastik kesitler tanımlanarak denge denklemleri bu sistem üzerinde yazılmıştır. Sistematik ve bilgisayarla programlamaya uygun olması açısından her kirişte iki ayrı kritik kesitte toplam 6 adet plastik şekil değiştirme parametresi serbest bırakılmıştır. Bunlar sırasıyla, kirişlerin her iki ucundaki kritik kesitlere ait M_y, M_z eğilme momentleri doğrultularındaki plastik şekil değiştirme parametreleri ile, kirişler üzerinde herhangi bir kritik kesitteki N normal kuvveti ve M_x burulma momenti doğrultularındaki plastik şekil değiştirme parametreleridir. Plastik şekil değiştirme parametrelerinin birim değerlerinden oluşan uç kuvvetleri matrislerinin hesabında, serbest bırakılan plastik şekil değiştirme parametreleri doğrultusundaki A katsayıları bir, diğerleri sıfır olarak alınmıştır.

Birinci mertebe limit yüke göre minimum ağırlıklı boyutlandırmada denge denklemlerinin lineer olması ve geometrik uygunluk koşullarına gerek olmaması nedeniyle, optimum çözümün elde edilmesi için yalnız enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar üzerinde ardışık yaklaşım yapılması yeterli olmaktadır.

3) Sistem ikinci mertebe limit yük için ağırlığı minimum olacak şekilde, yaklaşık olarak boyutlandırılmıştır. Bu boyutlandırmada normal kuvvetin akma koşuluna etkisi gözönüne alınmıştır. Ayrıca, ikinci mertebe limit yük altında sistemin mekanizma durumuna geldiği kabul edilerek geometrik uygunluk koşulları terkedilmiştir. İkinci mertebe etkilerinin yaklaşık olarak gözönüne alındığı bu boyutlandırmada katların her iki doğrultudaki rölatif yer değiştirmeleri $\delta/L = 0.01$ olarak tahmin edilmiş ve bu duruma ait ikinci mertebe etkileri $N\delta/L$ fiktif kuvvetleri ile temsil edilmiştir.

4) Sistem ikinci mertebe limit yük için ağırlığı minimum olacak şekilde boyutlanmıştır. Problemin başlangıç çözümünü oluşturmak üzere, 3 te verilen kriterle boyutlandırılan sistemin enkesit karakteristikleri esas alınmıştır.

Esasları yukarıda açıklanan dört farklı şekilde boyutlandırılan sistemin kiriş ve kolon plastik momentleri, toplam yapı ağırlıkları, ikinci mertebe

limit yük parametreleri ve optimum boyutlandırma için gereken ardışık yaklaşım sayıları Tablo 7.4 te toplu olarak verilmiştir.

Tablo 7.4. Farklı Şekillerde Boyutlandırılan Bir Katlı Uzay Çerçevenin Çubuk Plastik Momentleri, Toplam Yapı Ağırlıkları ve İkinci Mertebe Limit Yük Parametreleri

Kriter	$M_{pz1} (kNm)$	$M_{pz2} (kNm)$	$M_{pz3} (kNm)$	A.Y.S.	$G (kN)$	P_{L2}
1	200.00	414.81	414.81	1	80.178	0.686
2	200.00	364.28	512.04	4	84.029	0.797
3	200.00	427.38	561.64	5	90.016	0.914
4	215.60	461.64	599.48	10	94.329	1.000

Tablo 7.4 ten görüldüğü gibi, boyutlandırmada ikinci mertebe etkilerinin terkedilmesi halinde (Boyutlandırma:2), boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe limit yük parametresi 0.797 değerini almakta, diğer bir deyişle, göçme güvenliği % 20.3 oranında azalmaktadır.

Birinci mertebe limit yük için (Boyutlandırma:2) ve ikinci mertebe limit yük için (Boyutlandırma:4) minimum ağırlıklı boyutlandırılan sistemler üzerinde yapılan bir karşılaştırmada, yapı ağırlığındaki

$$\frac{94.329 - 84.029}{84.029} = \%12.258$$

oranındaki artışın, ikinci mertebe limit yükün

$$\frac{1 - 0.797}{0.797} = \%25.471$$

oranında artmasına neden olduğu görülmektedir. Ayrıca, her iki çözüme ait enkesit karakteristikleri arasındaki oranların da farklı olduğu gözlenmiştir. Bu durum, yapı güvenliğindeki artışın optimum ağırlık artışı ile sağlandığını göstermektedir.

İkinci mertebe limit yüke göre yapılan minimum ağırlıklı boyutlandırmanın (Boyutlandırma:4) ardışık yaklaşım adımlarında elde edilen çubuk plastik

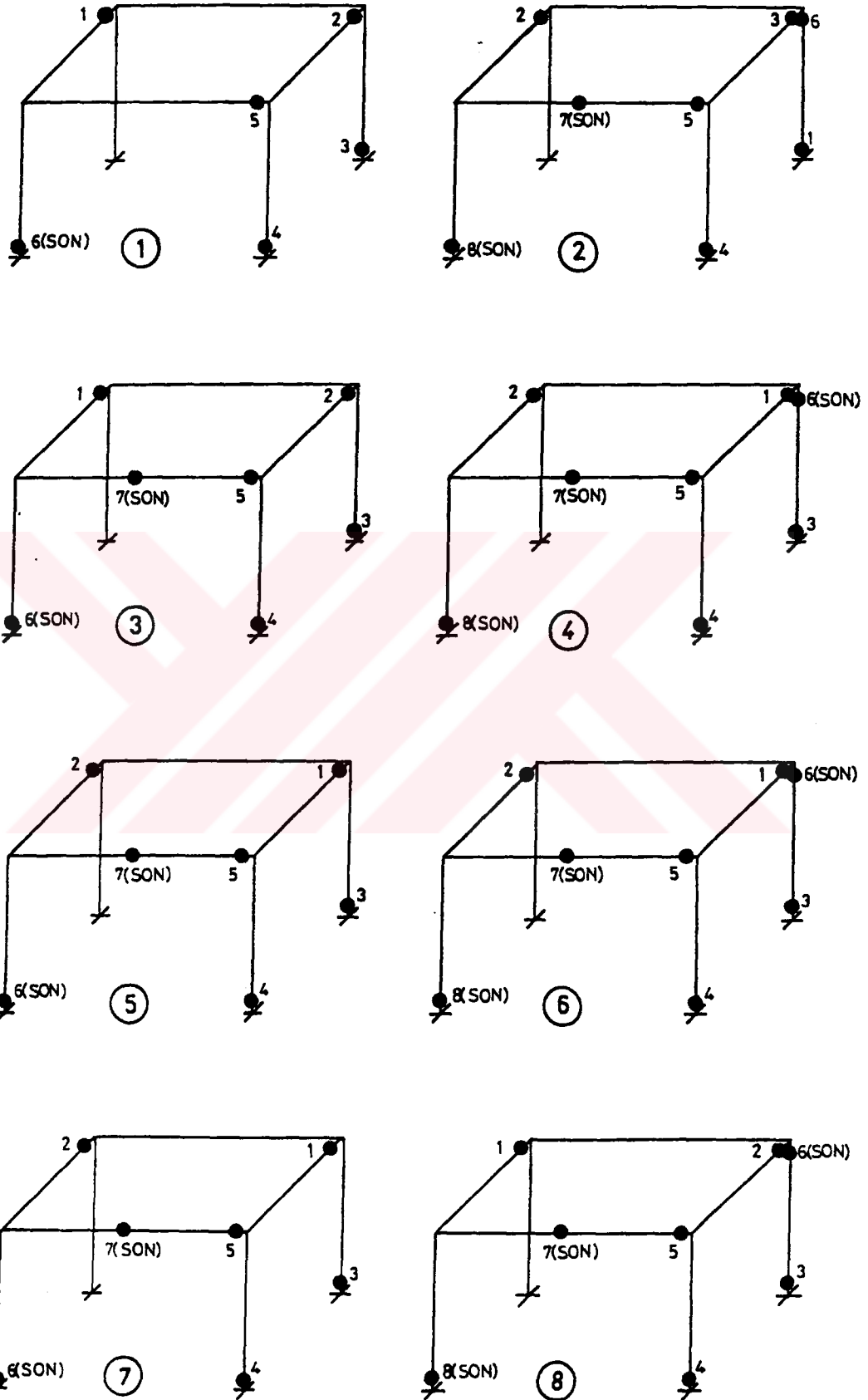
momentleri, toplam yapı ağırlıkları ve ikinci mertebe limit yük parametreleri Tablo 7.5 te, boyutlandırmaya esas olan plastik kesit yerleri ve oluşum sıraları Şekil 7.6 da ve Tablo 7.6 da verilmiştir.

Tablo 7.5. Bir Katlı Uzay Çerçeve Ardışık Yaklaşım Adımlarına Ait Çubuk Plastik Momentleri, Toplam Yapı Ağırlıkları ve İkinci Mertebe Limit Yük Parametreleri

Adım	$M_{pz1} (kNm)$	$M_{pz2} (kNm)$	$M_{pz3} (kNm)$	$G (kN)$	P_{L2}
1	200.00	427.38	561.64	90.0160	0.914
2	227.49	465.35	609.09	95.4441	1.020
3	211.18	460.50	597.06	93.9902	0.992
4	217.06	461.94	600.41	94.4447	1.002
5	215.11	461.52	599.18	94.2898	0.999
6	215.76	461.68	599.58	94.3418	1.000
7	215.54	461.63	599.44	94.3241	1.000
8	215.62	461.64	599.49	94.3301	1.000
9	215.59	461.64	599.47	94.3280	1.000
10	215.60	461.64	599.48	94.3289	1.000
11	215.60	461.64	599.48	94.3289	1.000

Tablo 7.6. Bir Katlı Uzay Çerçeve Ardışık Yaklaşım Adımlarına Ait İkinci Mertebe Limit Yük Parametreleri ve Plastik Kesit Yerleri

Adım	P_{L2}	Plastik Kesit Durumu
1	0.914	1
2	1.020	2
3	0.992	3
4	1.002	4
5	0.999	5
6	1.000	6
7	1.000	7
8	1.000	8
9	1.000	8
10	1.000	8



Şekil 7.6. İkinci Mertebe Limit Yüke Göre Minimum Ağırlıklı Olarak Boyutlandırılan Bir Kath Uzak
Çerçevenin Ardışık Yaklaşım Adımlarında Esas Alınan Plastik Kesit Yerleri

Tablo 7.5 ten görüldüğü gibi, 4 ardışık yaklaşım adımı sonunda elde edilen çözüm pratik bakımdan yeterli olmaktadır. Ancak bu örnekte, ardışık iki adımda elde edilen çubuk plastik momentlerinin iki ondalıkları eşit oluncaya kadar ardışık yaklaşıma devam edilmiştir.

Ardışık yaklaşımın son adımına ait sistem hesabı sonucunda elde edilen tasarım değişkenlerinin değerleri aşağıda verilmiştir. Bu değişkenler indirgemeden sonraki plastik şekil değiştirme parametreleri ve çubukların M_{pz} plastik momentlerinden oluşmaktadır.

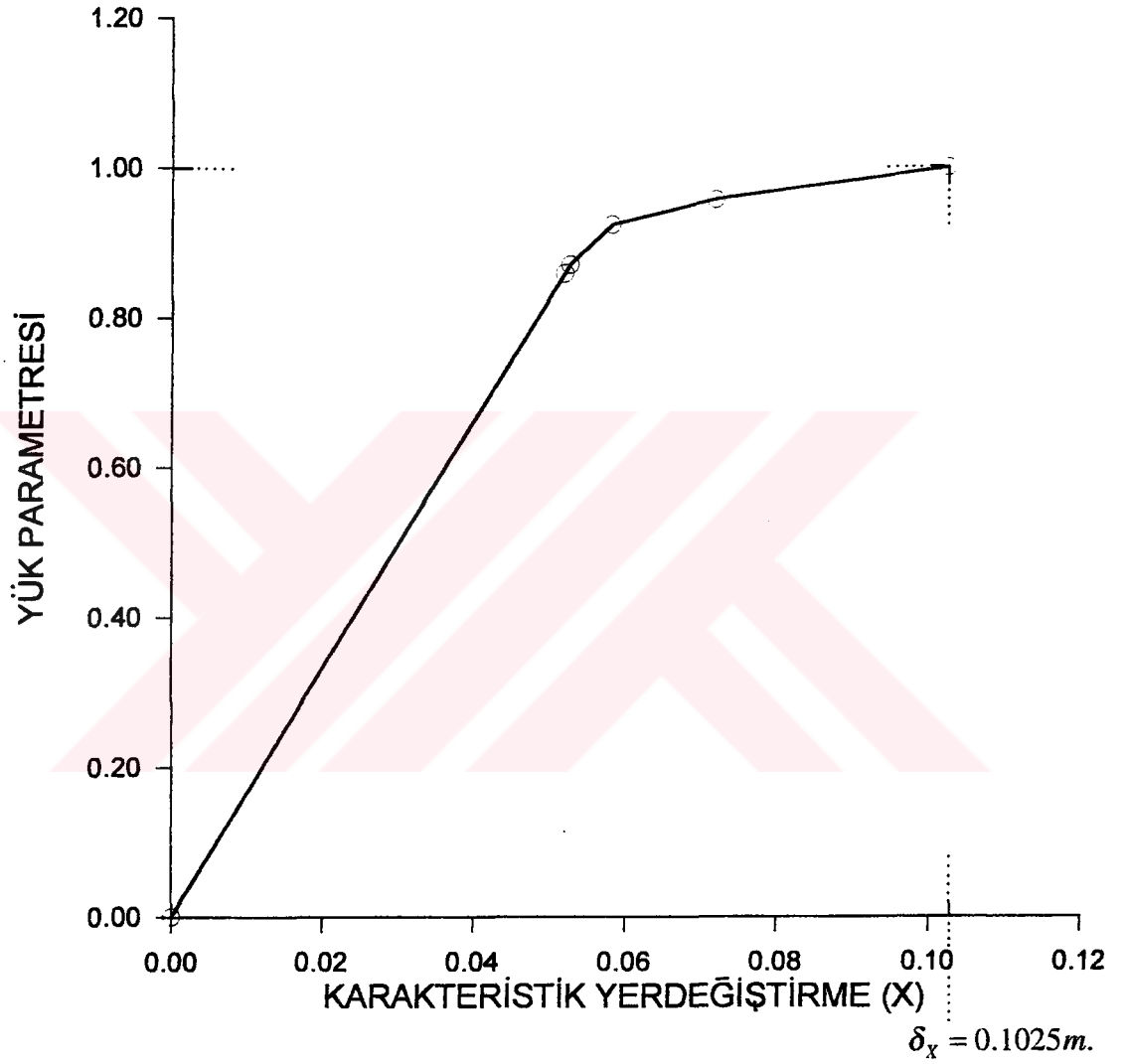
$$[\phi_0] = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.17627298 \times 10^{-1} \\ 0.11656789 \times 10^{-1} \\ -0.76568518 \times 10^{-2} \\ -0.82549903 \times 10^{-2} \\ -0.82549903 \times 10^{-2} \end{bmatrix}, \quad [M_p] = \begin{bmatrix} M_{pz1} \\ M_{pz2} \\ M_{pz3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.21559564 \times 10^3 \\ 0.46163849 \times 10^3 \\ 0.59947532 \times 10^3 \end{bmatrix}$$

Ardışık yaklaşımın son adımına ait sistem hesabı sonucunda elde edilen plastik kesit yerleri, oluştukları yük parametreleri ve bu plastik kesitlere ait A katsayıları Tablo 7.7 de, bu duruma ait $P-\delta_x$, $P-\delta_z$ yük parametresi-karakteristik yerdeğiştirme eğrileri sırasıyla Şekil 7.7 ve Şekil 7.8 de verilmiştir..

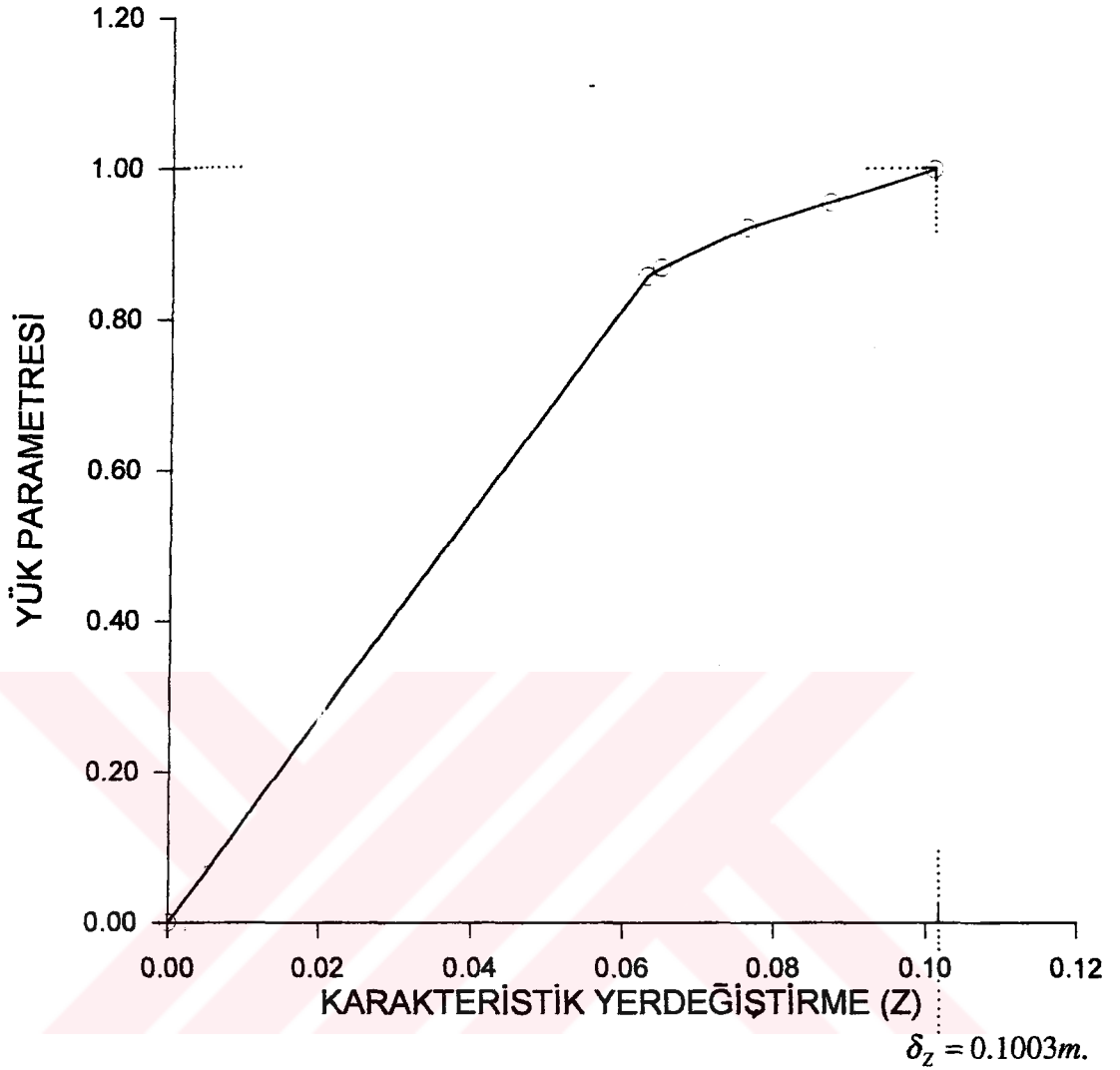
Tablo 7.7. Bir Katlı Uzay Çerçeve Plastik Kesitlerin Oluşum Sırası, Oluştukları Yük Parametreleri ve Akma Düzlemi Katsayıları

ÇUBUK X(m)	P(YÜK PAR.)	A1	A2	A3
3 - 4	8.00	0.85797916	1.00000000	0.00000000
1 - 2	8.00	0.00000000	1.00000000	0.00000000
4 - 8	8.00	0.01177158	1.00000000	-0.13962231
3 - 7	8.00	0.05314149	1.00000000	-0.13962231
1 - 3	14.00	0.03358203	1.00000000	0.00000000
4 - 8	0.00	0.04353000	1.00000000	0.13962231
1 - 3	7.00	0.00000000	1.00000000	0.00000000
1 - 5	8.00	0.00000158	1.00000000	-0.13962231

TOPLAM YÜK PARAMETRESİ $P=1.00000584$



Şekil 7.7. İkinci Mertebe Limit Yüke Göre Minimum Ağırlıklı Olarak Boyutlandırılan Bir Katlı Uzay Çerçevenin $P - \delta_x$ Eğrisi



Şekil 7.8.İkinci Mercebe Limit Yüke Göre Minimum Ağırlıklı Olarak Boyutlandırılan Bir Katlı Uzay Çerçevenin $P - \delta_z$ Eğrisi

Boyutlandırılan sistemin ikinci mercebe elastoplastik hesabının her yük artımında, hesap yüklerine karşı gelen toplam düşey yüklerden oluşan ikinci mercebe etkileri gözönüne alındığından Şekil 7.7 ve Şekil 7.8 de verilen $P - \delta$ eğrileri yalnız hesap yükleri altında sistemin gerçek davranışını temsil etmektedir. Bu nedenle, işletme yükleri ($e = 1.500$ için $P_i = P_H / e = 1.000 / 1.500 = 0.667$) arasındaki iç kuvvet ve yerdeğiştirmeleri belirlemek amacıyla, sistemin bu yükler altında ikinci mercebe elastoplastik hesabı yapılmış, sistemde plastik kesit oluşmadığı görülmüş ve tepe noktasının X ve Z sistem eksenleri doğrultusundaki yerdeğiştirmeleri sırası ile 0.1462 m. ve 0.1985 m. olarak bulunmuştur.

Hesap yüklerine ait yerdeğiştirme kısıtlamalarının sonuca etkisini incelemek amacıyla, çerçevenin X - ve Z doğrultularındaki yatay yerdeğiştirmeleri 0.065 m. olarak sınırlandırılmış ve bu kısıtlamalar altında sistem ikinci mertebe teorisine göre minimum ağırlıklı olarak yeniden boyutlandırılmıştır.

Boyutlandırma sonucunda, çubuk plastik momentleri ve toplam yapı ağırlığı ile boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe limit yükü

$$M_{pz1} = 258.19kNm.$$

$$M_{pz2} = 457.42kNm.$$

$$M_{pz3} = 625.92kNm.$$

$$G = 97.0389kN.$$

$$P_{L2} = 1.039$$

olarak elde edilmiştir. Bu sonuca göre, hesap yüklerinden oluşan yerdeğiştirmelerin 0.065 m. ile sınırlandırılması yapı ağırlığının %2.8 oranında artmasına neden olmaktadır.

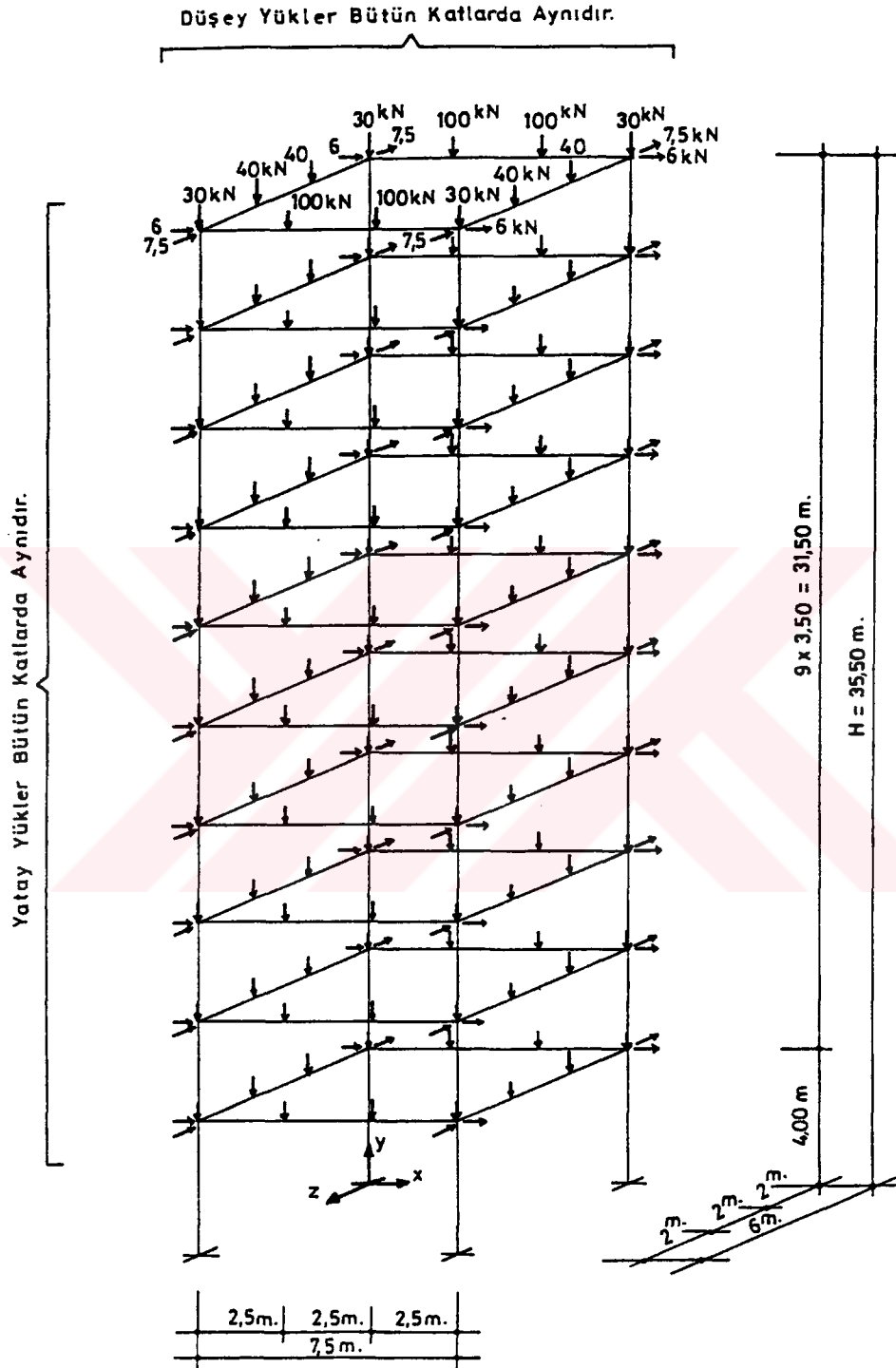
7.3. On Katlı Uzay Çerçeve

Geometrik özellikleri ve hesap yükleri ($P_H = 1.000$) Şekil 7.9 da verilen on katlı uzay çerçeve, ikinci mertebe limit yük için ağırlığı minimum olacak şekilde boyutlandırılacaktır. Sistem, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntıları Ek A da verilen kutu ve I enkesitli çubuklardan oluşmaktadır. Kolonların kare kutu enkesitli, kirişlerin ise b/d oranı $1/2$ olan I enkesitli çubuklardan oluştuğu öngörülmektedir. Ayrıca, yapısal kısıtlama olarak, ardışık iki kattaki kolon enkesitlerinin ve karşılıklı kiriş enkesitlerinin aynı olması istenmektedir, Şekil 7.10. Bu durumda birbirinden farklı enkesitli çubuk sayısı 15 olmaktadır. Kullanılan malzeme Fe37 yapı çeliği olup, akma gerilmesi $\sigma_F = 240 N/mm^2$, elastisite modülü $E = 2.1 \times 10^5 N/mm^2$ ve kayma modülü $G = 8.1 \times 10^4 N/mm^2$ dir.

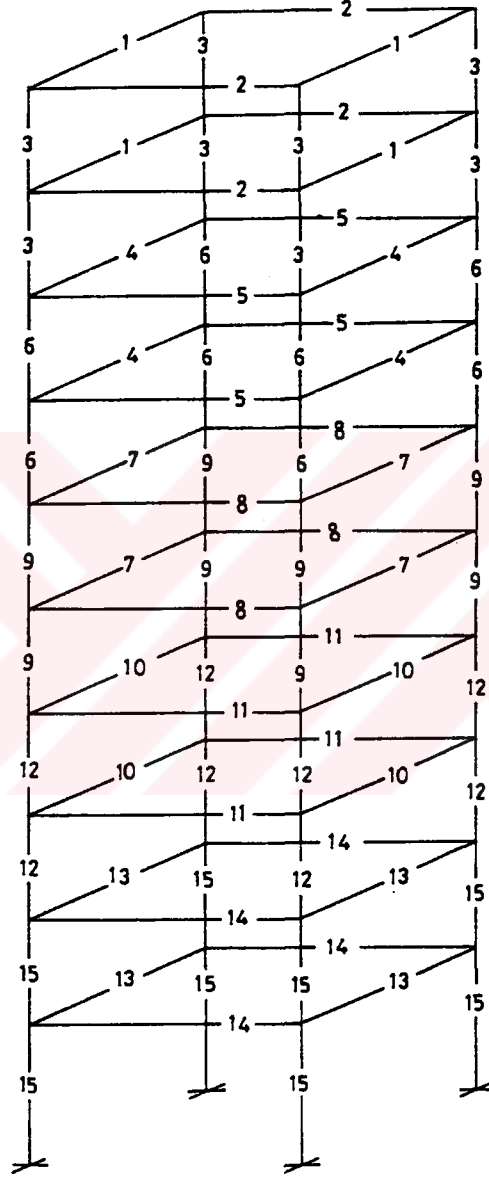
Minimum ağırlıklı boyutlandırmanın başlangıç çözümünü oluşturmak amacıyla elastoplastik teoremin alt sınır teoreminden yararlanarak sistemin ön boyutlandırması yapılmıştır. Ön boyutlandırmada ayrıca, ikinci mertebe etkilerini yaklaşık olarak gözönüne almak üzere, her iki doğrultuda $\delta/L = 0.01$ rölaf kat yerdeğiştirmelerine karşı gelen $N\delta/L$ fiktif kuvvetleri hesaba katılmıştır.

İkinci mertebe limit yük için minimum ağırlıklı boyutlandırmada, yakınsaklık kriteri olarak, ardışık iki adımda toplam yapı ağırlığı ve boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe limit yükü için 0.001 rölaf hata öngörülmüştür. Bu yakınsaklık kriteri altında 13 ardışık yaklaşım adımı sonunda optimum çözüme ulaşılmıştır. Ardışık yaklaşım sonunda elde edilen yapı ağırlığı $G = 322.33 kN$ ve boyutlandırılan sistemin ikinci mertebe limit yük parametresi $P_{L2} = 0.9997$ değerini almaktadır.

Öngörülen hata sınırı için daha büyük değerlerin seçilmesi, gerekli ardışık yaklaşım sayısının azalmasına neden olmaktadır. Nitekim, rölaf hata sınırının 0.01 olarak seçilmesi halinde, 7 ardışık yaklaşım adımı sonunda optimum çözüme ulaşılmakta ve bu çözüme ait değerler $G = 323.14 kN$ ve $P_{L2} = 0.9921$ olmaktadır.



Şekil 7.9. On Katlı Uzay Çerçevenin Geometrik Özellikleri ve Hesap Yükleri



Şekil 7.10. On Katlı Uzay Çerçevenin Farklı Enkesitli Çubuk Numaraları

İkinci mertebe limit yük için minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan sistemin çubuklarına ait M_{pz} plastik momentleri Tablo 7.8 de, bu sistemin ikinci mertebe elastoplastik hesabı sonucunda elde edilen plastik kesit yerleri, oluştukları yük parametreleri ve plastik kesitlerdeki akma vektörü doğrultularını belirleyen A_1, A_2, A_3 katsayıları Tablo 7.9 da, plastik kesitlerin sistem üzerindeki yerleri Şekil 7.11 de, artan dış yükler altındaki $P-\delta_x, P-\delta_z$ yük parametresi-karakteristik yerdeğiştirme eğrileri sırası ile Şekil 7.12 de ve Şekil 7.13 te verilmiştir. İkinci mertebe limit yük için sistemin tepe noktasının X ve Z sistem eksenleri doğrultularındaki yerdeğiştirmeleri sırasıyla 0.5855m. ve 0.5631m. değerlerini almaktadır. Sistemde oluşan toplam plastik kesit sayısı ise 52 dir.

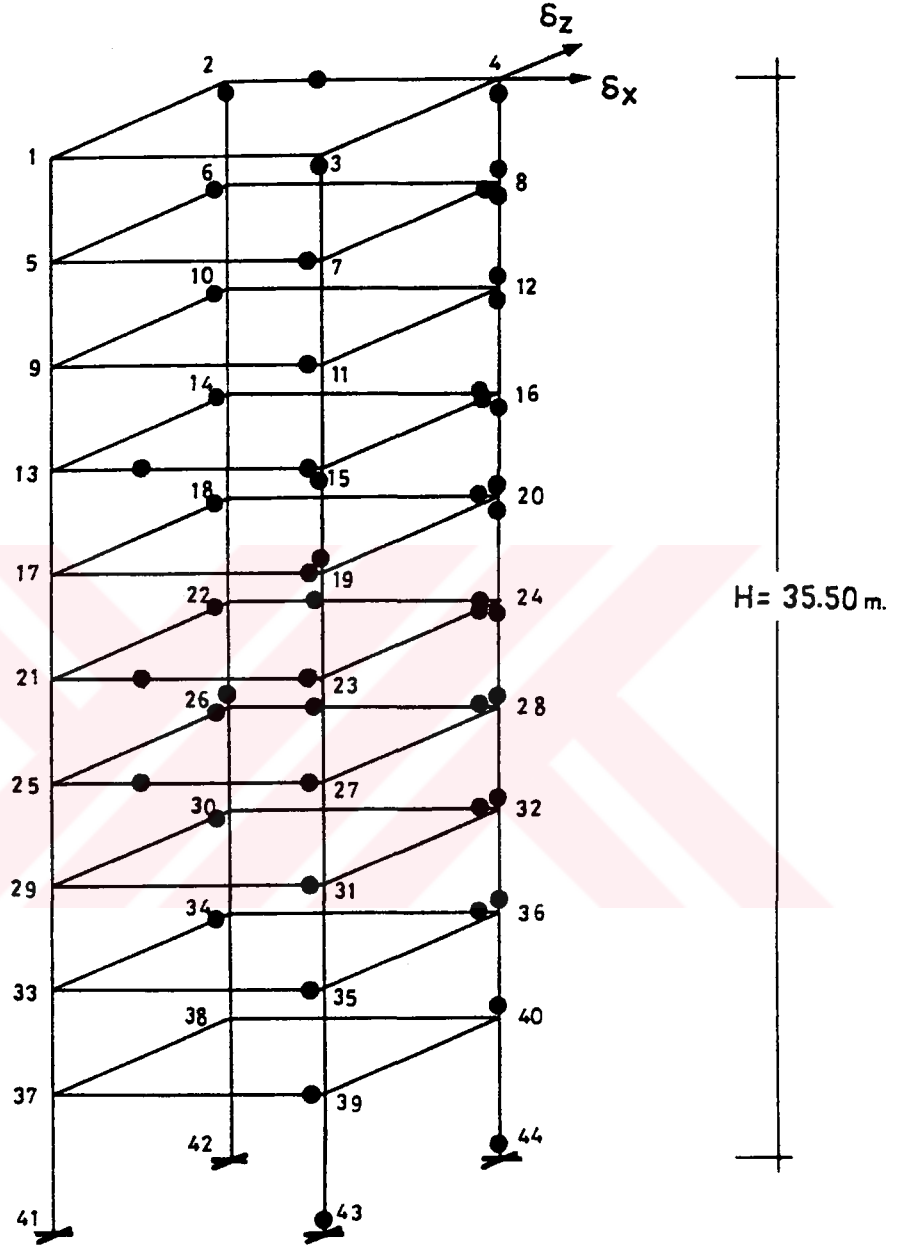
Tablo 7.8. İkinci Mertebe Limit Yüke Göre Minimum Ağırlıklı Olarak Boyutlandırılan On Katlı Uzay Çerçevenin Çubuk Plastik Momentleri

Kat	Kiriş (Z)	Kiriş (X)	Kolon
No	(kNm)	(kNm)	(kNm)
9,10	76.45	173.04	98.38
7,8	124.48	200.40	164.62
5,6	202.62	241.64	251.25
3,4	296.96	251.05	387.81
1,2	314.21	394.19	511.65

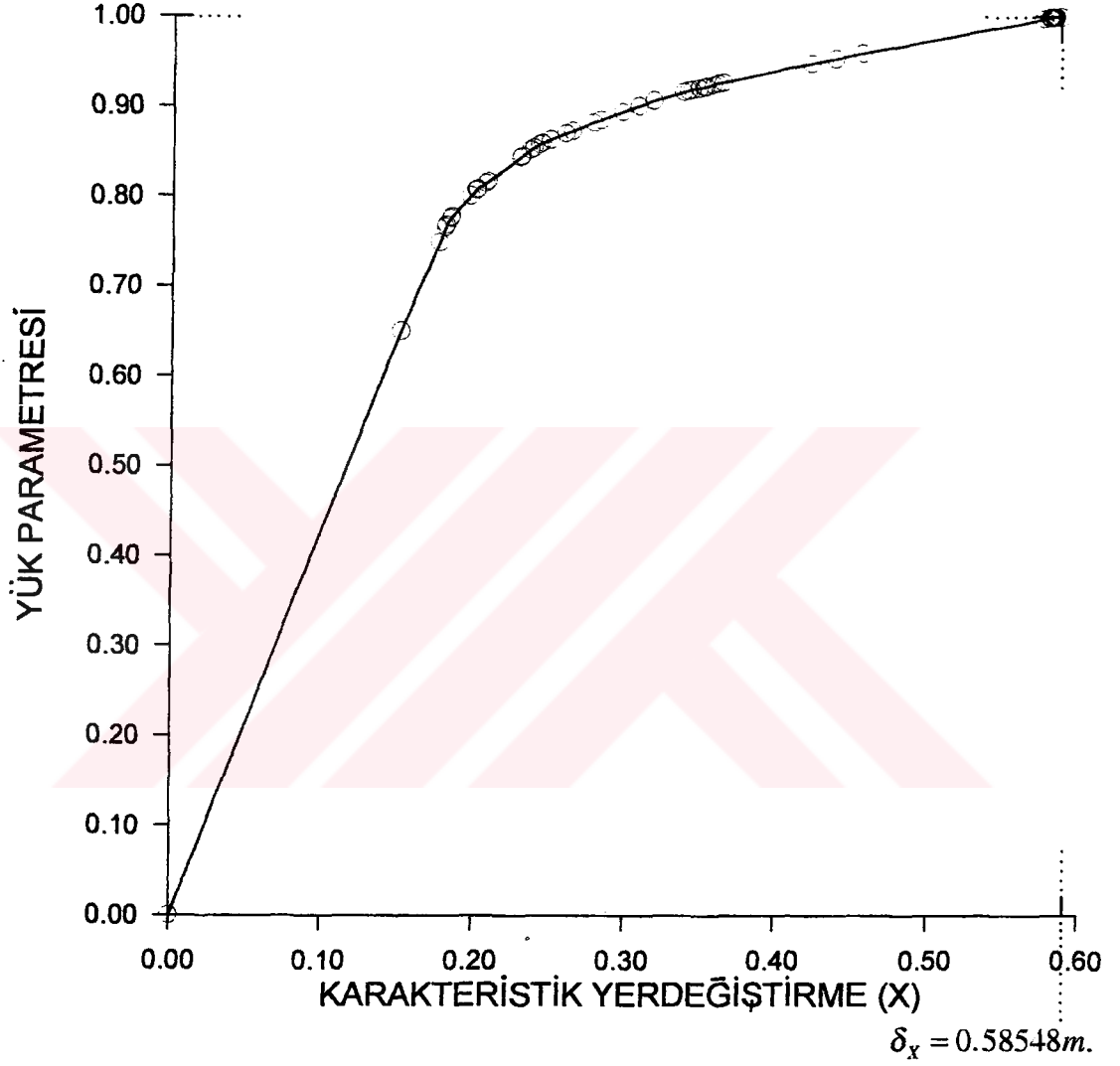
Tablo 7.9. On Katlı Uzak Çerçeve Plastik Kesitlerin Oluşum Sırası, Oluştukları Yük Parametreleri ve Akma Düzlemi Katsayıları

ÇUBUK	X(m)	P(YÜK PAR.)	A1	A2	A3
4 - 8	0.00	0.64943763	1.00000000	1.00000000	0.00000000
2 - 6	0.00	0.09886685	1.00000000	-1.00000000	0.00000000
30 -32	7.50	0.01745300	1.00000000	0.00000000	0.00000000
3 - 7	0.00	0.00194019	1.00000000	0.00000000	0.00000000
29 -31	7.50	0.00003551	1.00000000	0.00000000	0.00000000
26 -28	7.50	0.00757759	1.00000000	0.00000000	0.00000000
25 -27	7.50	0.00146789	1.00000000	0.00000000	0.00000000
5 - 6	6.00	0.02274927	1.00000000	0.00000000	0.00000000
22 -24	7.50	0.00687901	1.00000000	0.00000000	0.00000000
7 - 8	6.00	0.00034117	1.00000000	0.00000000	0.00000000
21 -23	7.50	0.00055484	1.00000000	0.00000000	0.00000000
15 -16	6.00	0.00682299	1.00000000	0.00000000	0.00000000
13 -14	6.00	0.00168367	1.00000000	0.00000000	0.00000000
16 -20	3.50	0.02713196	1.00000000	1.00000000	-0.09075198
8 -12	0.00	0.00102436	1.00000000	1.00000000	0.07644182
13 -15	7.50	0.00702101	1.00000000	0.00000000	0.00000000
14 -16	7.50	0.00226707	1.00000000	0.00000000	0.00000000
17 -19	7.50	0.00391125	1.00000000	0.00000000	0.00000000
18 -20	7.50	0.00149464	1.00000000	0.00000000	0.00000000
12 -16	0.00	0.00380014	1.00000000	1.00000000	0.09075198
8 -12	3.50	0.00671918	1.00000000	1.00000000	-0.07644182
9 -10	6.00	0.00280871	1.00000000	0.00000000	0.00000000
16 -20	0.00	0.00915284	1.00000000	1.00000000	0.09075198
40 -44	4.00	0.00296765	1.00000000	1.00000000	-0.13244024
20 -24	0.00	0.00923084	1.00000000	1.00000000	0.10448789
32 -36	3.50	0.00666616	1.00000000	1.00000000	-0.12075418
9 -11	7.50	0.00583881	1.00000000	0.00000000	0.00000000
24 -28	3.50	0.00970761	1.00000000	1.00000000	-0.10448789
4 - 8	3.50	0.00147638	1.00000000	1.00000000	0.00000000
5 - 7	7.50	0.00104797	1.00000000	0.00000000	0.00000000
17 -18	6.00	0.00204511	1.00000000	0.00000000	0.00000000
21 -22	6.00	0.00132940	1.00000000	0.00000000	0.00000000
33 -35	7.50	0.00049123	1.00000000	0.00000000	0.00000000
34 -36	7.50	0.00195348	1.00000000	0.00000000	0.00000000
24 -28	0.00	0.00110651	1.00000000	1.00000000	0.10448789
23 -24	6.00	0.00132570	1.00000000	0.00000000	0.00000000
15 -19	3.50	0.02106230	1.00000000	1.00000000	-0.09075198
2 - 4	2.50	0.00542848	1.00000000	0.00000000	0.00000000
36 -40	3.50	0.00597916	1.00000000	1.00000000	-0.13244024
15 -19	0.00	0.03893770	1.00000000	1.00000000	0.09075198
26 -28	2.50	0.00125474	1.00000000	0.00000000	0.00000000
22 -24	2.50	0.00022022	1.00000000	0.00000000	0.00000000
22 -26	3.50	0.00000000	1.00000000	1.00000000	-0.10448789
37 -39	7.50	0.00010444	1.00000000	0.00000000	0.00000000
39 -43	4.00	0.00014359	1.00000000	1.00000000	-0.13244024
25 -26	6.00	0.00002935	1.00000000	0.00000000	0.00000000
28 -32	3.50	0.00000520	1.00000000	1.00000000	-0.12075418
29 -30	6.00	0.00007110	1.00000000	0.00000000	0.00000000
21 -23	2.50	0.00003164	1.00000000	0.00000000	0.00000000
33 -34	6.00	0.00002128	1.00000000	0.00000000	0.00000000
13 -15	2.50	0.00003038	1.00000000	0.00000000	0.00000000
25 -27	2.50	0.00005401	1.00000000	0.00000000	0.00000000

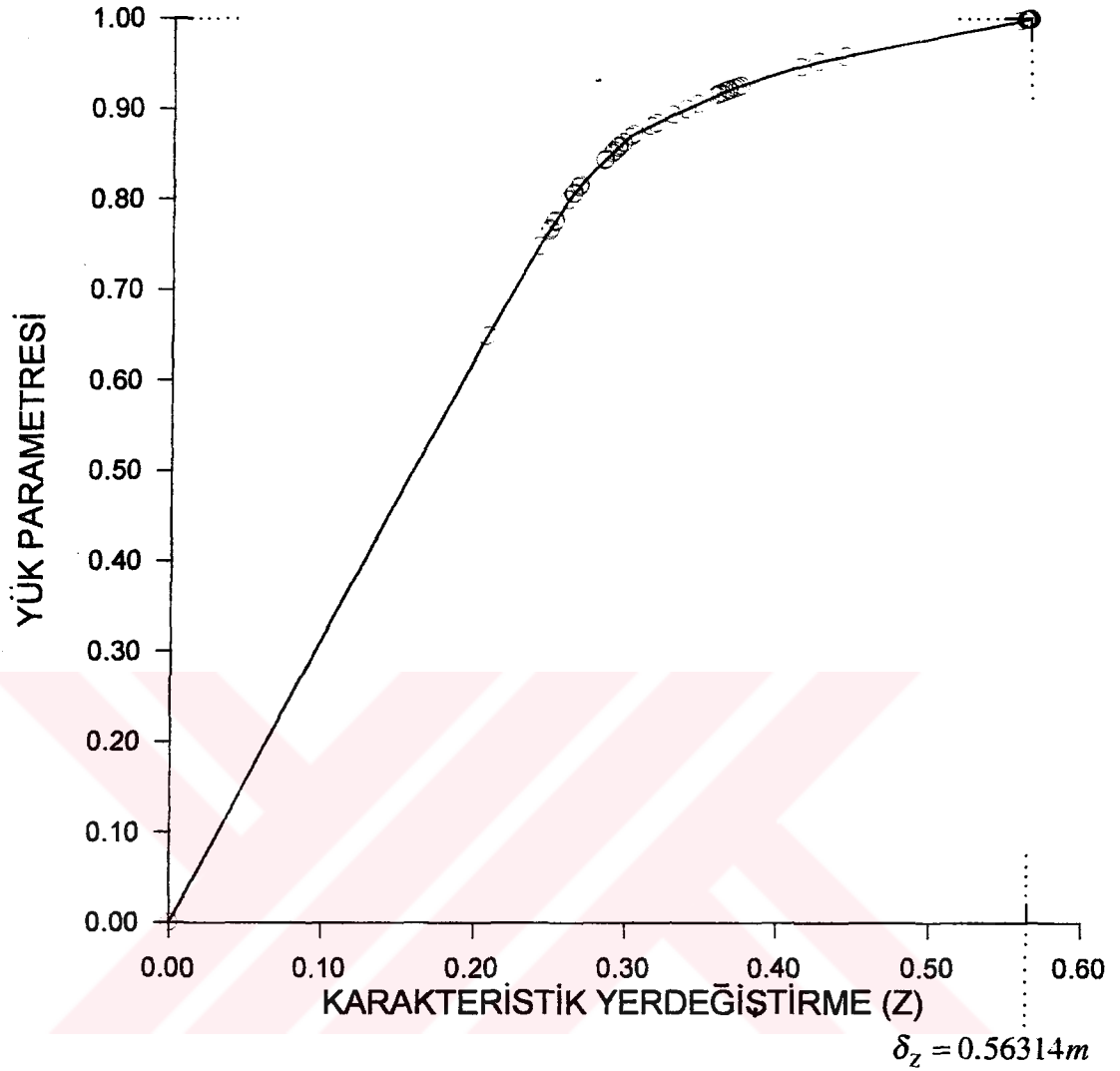
TOPLAM YÜK PARAMETRESİ P=0.99970122



Şekil 7.11. İkinci Mertebe Limit Yüke Göre Minimum Ağırlıklı Olarak Boyutlandırılan On Katlı Uzay Çerçevenin Plastik Kesit Yerleri



Şekil 7.12. İkinci Mertebe Limit Yüke Göre Minimum Ağırlıklı Olarak Boyutlandırılan On Katlı Uzay Çerçeve $P - \delta_x$ Eğrisi



Şekil 7.13. İkinci Mertebe Limit Yüke Göre Minimum Ağırlıklı Olarak Boyutlandırılan On Katlı Uzay Çerçeve $P-\delta_z$ Eğrisi

İşletme yükleri ($e = 1.500$ için $P_i = P_H / e = 1.000 / 1.500 = 0.667$) altındaki iç kuvvet ve yerdeğiştirmeleri belirlemek amacıyla, sistemin bu yükler altında ikinci mertebe elastoplastik hesabı yapılmış ve bu yükler altında sistemde bir adet plastik kesit olduğu görülmüştür. Aynı hesap sonucunda tepe noktasının X ve Z sistem eksenleri doğrultusundaki yerdeğiştirmeleri sırası ile 0.1462 m. ve 0.1985m. olarak bulunmuştur.

BÖLÜM 8. SONUÇLAR

Malzeme ve geometri değişimleri bakımından lineer olmayan uzay çubuk sistemlerin minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmaları amacıyla geliştirilen bir ardışık yaklaşım yönteminin ve sayısal uygulamalarının verildiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1)Geliştirilen minimum ağırlıklı boyutlandırma yöntemi sistemin özelliklerinden bağımsız olup, Bölüm 2.1 deki kabuller altında, bütün düzlem ve uzay çubuk sistemlere uygulanabilmektedir.

2)Malzemenin elastoplastik davranışının, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin, ikinci mertebe limit yüke karşı gelen geometrik uygunluk koşullarının, birden fazla sayıdaki iç kuvvetin akma koşuluna etkisinin ve enkesit karakteristikleri arasındaki lineer olmayan bağıntıların gözönüne alındığı minimum ağırlıklı boyutlandırma problemi, genel olarak, bir lineer olmayan optimizasyon probleminin çözümünü gerektirmektedir. Bu çalışmada, her adımda çözümün sağlaması gereken koşulların ve amaç fonksiyonun lineerleştirilmesi esasına dayanan bir ardışık yaklaşım yöntemi önerilmekte ve böylece minimum ağırlıklı boyutlandırma problemi lineer bir optimizasyon probleminin ardışık çözümlerine indirgenmektedir. Her adımı boyutlandırma ve sistem hesabı aşamalarından oluşan ardışık yaklaşım yönteminde, hesap yüküne karşı gelen normal kuvvetlerin esas alınması suretiyle denge denklemleri, akma yüzeyinin düzlemlerden oluşacak şekilde idealleştirilmesi suretiyle de akma koşulları lineerleştirilmektedir. Ayrıca, enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılar bir önceki boyutlandırma adımından alınmakta ve yapı ağırlığı enkesit plastik momentlerinin lineer bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. İkinci mertebe limit yüke karşı gelen plastik kesit yerleri ile bu kesitlere ait akma vektörü doğrultularını belirleyen katsayılar bir önceki adımda boyutlandırılan sistemin hesabından alınarak ikinci mertebe limit yüke ait geometrik uygunluk koşulları ifade edilebilmektedir.

3)Minimum ağırlıklı boyutlandırma probleminin formülasyonunda matris yerdeğiştirme yönteminden yararlanılmış, ancak düğüm noktalarının

yerdeğiştirme bileşenlerine ek olarak plastik kesitlerdeki şekildeğiştirme parametreleri de problemin değişkenleri arasına katılmıştır. Böylece ikinci mertebe limit yüke karşı gelen denge ve geometrik uygunluk koşullarının doğrudan doğruya yazılması mümkün olmaktadır. Bu zellik, yöntemin bilgisayarlar sistematik olarak uygulanmasına olanak sağlamaktadır.

4) Ardışık yaklaşımın her adımında bir lineer programlama problemine dönüştürülen minimum ağırlıklı boyutlandırma probleminin czmnde yararlanılan Simplex yönteminde, başlangıç tablosunun oluşturulabilmesi için gerekli olan ilk uygun temel czm matematiksel yöntemler yerine, problemin fizik yapısına uygun basit bir yolla bulunmaktadır. Ayrıca, Simplex yöntemindeki pozitiflik koşulunun, tasarım değişkenlerinin sayısının bir tane arttırılması ile sağlanabileceği gösterilmiştir.

5) Geliştirilen yöntemde düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri ve plastik kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametreleri değişken olarak alındığından, bu büyüklüklerle ilgili kısıtlamalar da kolaylıkla gözönüne alınabilmektedir. Böylece, ikinci mertebe limit yükten önce göçme durumuna ulaşan sistemlerin göçme yükü esasına göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmaları mümkün olmaktadır.

6) Yöntemin sayısal uygulamalarında, iki eksenli eğilme momenti ve normal kuvvet etkisindeki kutu kesitler ve I kesitleri için elde edilen lineerleştirilmiş akma koşullarından ve bu kesitlerin enkesit karakteristikleri arasındaki bağıntılardan yararlanılmıştır. Geliştirilen yöntem sistemi oluşturan çubukların enkesit şekillerinden ve bunlara ait akma koşullarından bağımsız olduğundan, akma koşulları lineer bağıntılar şeklinde idealleştirilebilen bütün enkesit şekilleri için ve her türlü i kuvvet durumu altında kullanılabilmektedir.

7) Bu çalışmada geliştirilen boyutlandırma yöntemi, eşdeğer çubuk sistem ortamında idealleştirilebilen yzeyssel taşıyıcı sistemlerin lineer olmayan teoriye göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmalarına uygulanabilmektedir.

8) Yöntemin sayısal uygulamaları için, MWDOS adı verilen bir bilgisayar programı hazırlanarak FORTRAN-77 dilinde kodlanmıştır. Bu programdan

yararlanarak sistemlerin, birinci merteye ve ikinci merteye limit yüklere göre veya göçme yüküne göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmaları mümkün olmaktadır. MWDOS programı batch program düzeninde çalışan ayrı program parçalarından oluştuğından, büyük yapı sistemlerinin minimum ağırlıklı boyutlandırılmalarına da etkin olarak uygulanabilmektedir. Ayrıca, uzay çubuk sistemlerde ikinci merteye limit yükün hesabı için geliştirilen İMEP-3D programı batch program düzeni içinde çalıştırılarak, minimum ağırlıklı boyutlandırma probleminin tümüyle otomatik olarak çözülebilmesi sağlanmıştır.

9)Yapılan sayısal uygulamalar, narin yapı sistemlerinin boyutlandırılmasında geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin gözönüne alınmasının gerekliliğini sayısal olarak vurgulamaktadır. Nitekim, Bölüm 7.2 de verilen örnek üzerinde yapılan sayısal karşılaştırmaya göre, ikinci merteye etkilerinin gözönüne alınmaması yapı güvenliğinin %20.3 oranında azalmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan, birinci ve ikinci merteye limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılan yapıların enkesit karakteristikleri arasındaki oranların birbirinden farklı olduğu gözlenmektedir. Bu durum, sistemlerin ikinci merteye limit yüke göre minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmaları halinde yapı ağırlığındaki artışın taşıma gücünde sağlanan artışa oranla daha küçük olduğunu göstermektedir.

10)Sayısal uygulamalar, farklı başlangıç noktalarından hareket ederek elde edilen optimum çözümlerin aynı veya birbirine yakın enkesit karakteristikleri ve yapı ağırlığı verdiklerini göstermektedir. Bu sonuca göre, ikinci merteye limit yk için minimum ağırlıklı boyutlandırma probleminde uygun çözümler bölgesindeki yerel optimumların sayısının az ve değerlerinin birbirlerine yakın oldukları söylenebilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] LEV, O.E., Structural Optimization, Recent Developments and Applications, ASCE, New York, (1981).
- [2] LEVY, R., LEV, O.E., Recent Developments in Structural Optimization, Journal of Structural Engineering, Vol.113, No.9, September, pp.1939-1962, (1987).
- [3] BERKE, L., KHOT, N.S., Structural Optimization Using Optimality Criteria, Computer Aided Optimal Design : Structural and Mechanical Systems, ed., Mota Soares, C.A., pp.271-312, Springer-Verlag, Berlin, (1987).
- [4] HEYMAN, J., Plastic Design of Beams and Frames for Minimum Material Consumption, Quart. Appl. Math., Vol.8, p.373, (1951).
- [5] FOULKES, J.D., Minimum Weight Design and the Theory of Plastic Collapse, Quart. Appl. Math., Vol.10, p.347, (1953).
- [6] FOULKES, J.D., Minimum Weight Design of Structural Frames, Proc. Roy. Soc., A223, p.482, (1954).
- [7] LIVESLEY, R.K., The Automatic Design of Structural Frames, Quart. Journal of Mech. and Appl. Math., Vol.9, p.257, (1956).
- [8] LIVESLEY, R.K., The Selection of Redundant Forces in Structures with an Application to the Collapse Analysis of Frameworks, Proc. Roy. Soc., A301, p.493, (1967).
- [9] TRUMAN, K.Z., CHENG, F.Y., Optimum Design of Steel and Reinforced Concrete 3-D Seismic Building Systems, Proc. 8.th WCEE, San Francisco, Vol. V, pp. 475-482, (1984).
- [10] GRIERSON, D.E., CHIU, T.C.W., Optimal Synthesis of Frameworks Under Multilevel Performance Constraints, Computers & Structures Vol.18, No. 5, pp. 889-898, (1984).
- [11] NOOSHIN, H., BAUER, J., GUTKOWSKI, W., IWANOW, Z., Optimum Design of Regular Space Structures, International Conference on Space Structures, GB, Guilford, pp. 672-676, (1984).

- [12] CINQUINI, C., CONTRO, C., Optimal Design of Beams Discretized by Elastic Plastic Finite Element, Computers & Structures Vol. 20, No. 1-3, pp. 475-485, (1985).
- [13] GÜLAY, F.G., Merkezsel ve Dışmerkezsel Çapraz Elemanlı Çerçeve Yapıların Statik ve Deprem Yüküne Göre Optimum Tasarımı, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Nisan (1985).
- [14] SADEK, E.A., Direct Versus Indirect Methods in Structural Optimization, Computers & Structures Vol. 23, No. 6, pp. 725-737, (1986).
- [15] DING, Y., ESPING, B.J.D., Optimum Design of Beams with Different Cross-Sectional Shapes, Computers & Structures Vol.24, No.5, pp.707-726, (1986).
- [16] MACHALY, E.S.B., Optimum Weight Analysis of Steel Frames with Semirigid Connections, Computers & Structures Vol.23, No.4, pp. 461-474, (1986).
- [17] MACHALY, E.S.B., Optimum Weight Analysis of Steel Grid Bridges, Computers & Structures Vol.23, No.5, pp.575-586, (1986).
- [18] MACHALY, E.S.B., Optimum Weight Analysis of Steel Grids with Semirigid Connections, Computers & Structures Vol. 23, No.5, pp. 565-574, (1986).
- [19] NO, M., AGUINAGALDE, J.M., Finite Element Method and Optimality Criterion Based Structural Optimization, Computers & Structures, Vol.27, No.2, pp.287-295, (1987).
- [20] NAFDAY, A.M., COROTIS, R.B., COHON, J.L., Multiparametric Limit Analysis of Frames: Part II-Computations, Journal of Engineering Mechanics, Vol.114, No.3, March, pp.387-403, (1988).
- [21] SAKA, M.P., Optimum Design of Nonlinear Space Trusses, Computers & Structures Vol 30, No.3, pp.545-551, (1988).
- [22] ALWIS, W.A.M., Computer Aided Optimal Plastic Design, Computers & Structures Vol.30, No.6, pp.1275-1280, (1988).
- [23] HAGER, K., BALLING, R., New Approach for Discrete Structural Optimization, Journal of Structural Engineering, Vol.114, No.5, May, pp.1120-1134, (1988).

- [24] CHENG, F.Y., JUANG, D.S., Assessment of Various Code Provisions Based on Optimum Design of Steel Structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.16, pp.45-61, (1988).
- [25] TAM, T.K.H., JENNINGS, A., Optimal Plastic Design of Frames with Tapered Members, *Computers & Structures* Vol.30, No.3, pp.537-544, (1988).
- [26] LEVY, R., PERNG, H., Optimization for Nonlinear Stability, *Computers & Structures* Vol.30, No.3, pp.529-535, (1988).
- [27] AMIR, H.M., HASEGAWA, T., Nonlinear Mixed-Discrete Structural Optimization, *Journal of Structural Engineering*, Vol.115, No.3, March, pp.626-646, (1989).
- [28] FRANGOPOL, D.M., KLISINSKI, M., Material Behavior and Optimum Design of Structural Systems, *Journal of Structural Engineering*, Vol.115, No.5, May, pp.1054-1075, (1989).
- [29] MAHEDEVAN, S., HALDAR, A., Efficient Algorithm for Stochastic Structural Optimization, *Journal of Structural Engineering*, Vol.115, No.7, July, pp.1579-1598, (1989).
- [30] EL-SAYED, M., RIDGELY, B.J., SANDGREN, E., Nonlinear Structural Optimization Using Goal Programming, *Computers & Structures* Vol.32, No.1, pp.69-73, (1989).
- [31] CHENG, F.Y., JUANG, D.S., Recursive Optimization for Seismic Frames, *Journal of Structural Engineering*, Vol.115, No.2, February, pp.445-455, (1989).
- [32] DING, Y., Multilevel Optimization of Frames with Beams Including Buckling Constraints, *Computers & Structures* Vol.32, No.2, pp.249-261, (1989).
- [33] GRANDHI, R.V., Structural and Control Optimization of Space Structures, *Computers & Structures* Vol.31, No.2, pp.139-150, (1989).
- [34] KARIHALOO, B.L., KANAGASUNDARAM, S., Minimum-Weight Design of Structural Frames, *Computers & Structures* Vol.31, No.5, pp.647-655, (1989).
- [35] BALLING, R.J., Optimal Steel Frame Design by Simulated Annealing, *Journal of Structural Engineering*, Vol.117, No.6, June, pp.1780-1795, (1989).

- [36] HALL, S.K., CAMERON, G.E., GRIERSON, D.E., Least-Weight Design of Steel Frameworks Accounting for P-Delta Effects, *Journal of Structural Engineering*, Vol.115, No.6, pp.1463-1475, (1989).
- [37] COROTIS, R.B., NAFDAY, A.M., Structural System Reliability Using Linear Programming and Simulation, *Journal of Structural Engineering*, Vol.115, No.10, October, pp.2435-2447, (1989).
- [38] NAKIB, R., FRANGOPOL, D.M., Reliability-Based Structural Optimization Using Interactive Graphics, *Computers & Structures* Vol.37, No.1, pp.27-34, (1990).
- [39] YANG, L., MA, Z.K., Optimum Design Based on Reliability for A Composite Structural System, *Computers & Structures* Vol.36, No.5, pp.785-790, (1990).
- [40] SADEK, E.A., Optimality Criterion Method for Structures Having General Cross-Sectional Relationships, *Computers & Structures* Vol.36, No.2, pp.267-277, (1990).
- [41] NAKIB, R., FRANGOPOL, D.M., RBSA and RBSA-OPT : Two Computer Programs for Structural System Reliability Analysis and Optimization, *Computers & Structures* Vol.36, No.1, pp.13-27, (1990).
- [42] KANAGASUNDARAM, S., KARIHALOO, B.L., Optimum Design of Frames Under Multiple Loads, *Computers & Structures* Vol.36, No.3, pp.443-489, (1990).
- [43] MOHANDAS, S.U., PHELPS, T.A., RAGSDELL, K.M., Structural Optimization Using A Fuzzy Goal Programming Approach, *Computers & Structures* Vol.37, No.1, pp.1-8, (1990).
- [44] RAMAN, A., A Non-Iterative Method of Structural Optimization for Static, Dynamic and Response Problems, *Computers & Structures* Vol.34, No.2, pp.185-190, (1990).
- [45] SAKA, P.M., Optimum Design of Pin-Jointed Steel Structures with Practical Applications, *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, No.10, pp.2599-2620, (1990).
- [46] HAJEK, P., FRANGOPOL, D.M., Optimum Design of Shear-Wall Systems, *Computers & Structures* Vol.38, No.2, pp.171-184, (1991).

- [47] HJELMSTAD, K.D., PEZESHK, S., Optimal Design of Frames to Resist Buckling under Multiple Load Cases, *Journal of Structural Engineering*, Vol.117, No.3, March, pp.914-935, (1991).
- [48] DINNO, K.S., MEKHA, B.B., Optimal Design of Reinforced Concrete Frames Based on Inelastic Analysis, *Computers & Structures* Vol.47, No.2, pp.245-252, (1993).
- [49] McGEE, O.G., PHAN, K.F., A Robust Optimality Criteria Procedure for Cross-Sectional Optimization of Frame Structures with Multiple Frequency Limits, *Computers & Structures* Vol.38, No.5/6, pp.485-500, (1991).
- [50] MOHARRAMI, H., GRIERSON, D.E., Computer-Otomated Design of Reinforced Concrete Frameworks, *Journal of Structural Engineering*, Vol.119, No.7, July, pp.2036-2058, (1993).
- [51] LASSEN, T., Optimum Design of Three-Dimensional Framework Structures, *Journal of Structural Engineering*, Vol.119, No.3, March, pp.713-727, (1993).
- [52] SAKA, M.P., HAYALIOGLU, M.S., Optimum Design of Geometrically Nonlinear Elastic-Plastic Steel Frames, *Computers & Structures* Vol.38, No.3, pp.329-344, (1991).
- [53] HAYALIOGLU, M.S., SAKA, M.P., Optimum Design of Geometrically Nonlinear Elastic-Plastic Steel Frames with Tapered Members, *Computers & Structures*, Vol.44, No.4, pp.915-924, (1992).
- [54] ÖZER, E., İkinci Mertebe Limit Yük İçin Yapı Ağırlığını Minimum Yapan Bir Boyutlandırma Metodu, *Doçentlik Tezi*, (1975).
- [55] ÇAKIROĞLU, A., ÖZER, E., Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler, Cilt.1, İ.T.Ü. Kütüphanesi, İstanbul, (1980).
- [56] İRTEM, E., Uzay Çubuk Sistemlerde İkinci Mertebe Limit Yükün Hesabı İçin Bir Yük Artımı Yöntemi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, (1991).
- [57] NEAL, B.G., The Plastic Methods of Structural Analysis, Chapman and Hall, London, (1963).
- [58] HODGE, P.G., Plastic Analysis of Structures, Mc. Graw Hill, (1959).

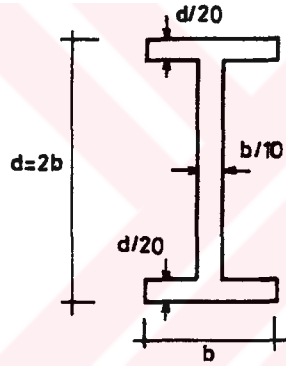
- [59] ÇAKIROĞLU, A., ÖZDEN, E., ÖZMEN, G., Yapı Sistemlerinin Hesabı İçin Matris Metodları ve Elektronik Hesap Makinası Programları, Cilt I, II, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, (1992).
- [60] GÜREL, O., Lineer Programlama ve Dinamik Programlamaya Giriş, İ.T.Ü. Kütüphanesi, Elektronik Hesap Merkezi Yayınları, (1966).
- [61] KUNZI, H.P., TZSCHAH, H.G., ZEHNDER, C.A., Numerical Methods of Mathematical Optimization, Academic Press, (1968).



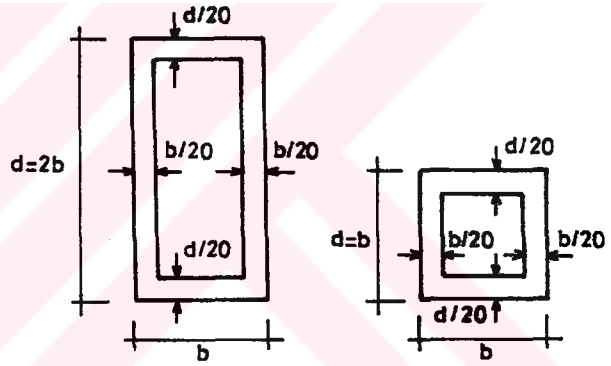
EK A. ENKESİT KARAKTERİSTİKLERİ ARASINDAKİ BAĞINTILAR

Geliştirilen boyutlandırma yönteminin sayısal uygulamaları için, pratikte genellikle kullanılmakta olan enkesit şekillerine ait F enkesit alanı, W_{py}, W_{pz} plastik mukavemet momentleri ve I_x, I_y, I_z atalet momentleri arasındaki bağıntıların bilinmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, boyutlarının oranı Şekil A.1 de görülen I kesitleri ile Şekil A.2 de görülen dikdörtgen ve kare kutu kesitler için enkesit alanı, plastik mukavemet momenti ve atalet momentleri arasındaki bağıntılar analitik olarak elde edilmiş ve tüm enkesit karakteristikleri W_{pz} plastik mukavemet momentine bağlı olarak ifade edilmiştir.



Şekil A.1. I Kesitlerinin Enkesit Boyutları



Şekil A.2. Dikdörtgen ve Kare Kutu Kesitlerin Enkesit Boyutları

I kesitleri için bu bağıntılar

$$b = 1.545290852 \times W_{pz}^{1/3}$$

$$d = 3.090581704 \times W_{pz}^{1/3}$$

$$F = 0.907411061 \times W_{pz}^{2/3}$$

$$\frac{dF}{dW_{pz}} = 0.604940707 \times W_{pz}^{-1/3}$$

$$W_{px} = 4.0478432 \times 10^{-2} \times W_{pz}$$

$$W_{py} = 0.201107 \times W_{pz}$$

$$I_x = 7.222761 \times 10^{-3} \times W_{pz}^{4/3}$$

$$I_y = 9.589166 \times 10^{-2} \times W_{pz}^{4/3}$$

$$I_z = 1.307304655 \times W_{pz}^{4/3}$$

(Ek A1)

şeklindedir.

Aynı bağıntılar, b/d oranı $1/2$ olan dikdörtgen kutu kesitlerde

$$\begin{aligned}
 b &= 1.545290852 \times W_{pz}^{1/3} \\
 d &= 3.090581704 \times W_{pz}^{1/3} \\
 F &= 0.907411061 \times W_{pz}^{2/3} \\
 \frac{dF}{dW_{pz}} &= 0.604940707 \times W_{pz}^{-1/3} \\
 W_{px} &= 0.426088748 \times W_{pz} \\
 W_{py} &= 0.5 \times W_{pz} \\
 I_x &= 7.822251 \times 10^{-1} \times W_{pz}^{4/3} \\
 I_y &= 3.26826168 \times 10^{-1} \times W_{pz}^{4/3} \\
 I_z &= 1.307304655 \times W_{pz}^{4/3}
 \end{aligned} \tag{Ek A2}$$

kare kutu kesitlerde ise

$$\begin{aligned}
 b &= 2.452996302 \times W_{pz}^{1/3} \\
 d &= 2.452996302 \times W_{pz}^{1/3} \\
 F &= 1.143263005 \times W_{pz}^{2/3} \\
 \frac{dF}{dW_{pz}} &= 0.762175336 \times W_{pz}^{-1/3} \\
 W_{px} &= 0.85217748 \times W_{pz} \\
 W_{py} &= W_{pz} \\
 I_x &= 1.552131134 \times W_{pz}^{4/3} \\
 I_y &= 1.037608363 \times W_{pz}^{4/3} \\
 I_z &= 1.037608363 \times W_{pz}^{4/3}
 \end{aligned} \tag{Ek A3}$$

şeklini almaktadırlar.

Bu bağıntılarda enkesit alanları m^2 , atalet momentleri m^4 , plastik mukavemet momentleri m^3 boyutunda verilmişlerdir.

Bölüm 7.1 de verilen sistemin boyutlandırılmasında kullanılan *NPI* profilleri benzeri yapma kesitler için enkesit alanı, plastik mukavemet momentine bağlı olarak

$$0 \leq W_{pz} \leq 250 cm^3 \quad \text{için}$$

$$F = -0.2238 \times 10^{-3} \times W_{pz}^2 + 0.1725 \times W_{pz} + 3.88 \quad (cm^2) \tag{Ek A4}$$

$250cm^3 \leq W_{pz} \leq 1714cm^3$ için

$$F = -0.14446 \times 10^{-4} \times W_{pz}^2 + 0.08497 \times W_{pz} + 13.02 \quad (cm^2) \quad (\text{Ek A5})$$

yaklaşık bağıntıları ile ifade edilebilmektedir.

Enkesit alanları ile plastik mukavemet momenti arasındaki türev bağıntıları

$0 \leq W_{pz} \leq 250cm^3$ için

$$\frac{dF}{dW_{pz}} = -0.4476 \times 10^{-3} \times W_{pz} + 0.1725 \quad (1/cm) \quad (\text{Ek A6})$$

$250cm^3 \leq W_{pz} \leq 1714cm^3$ için

$$\frac{dF}{dW_{pz}} = -0.28892 \times 10^{-4} \times W_{pz} + 0.08497 \quad (1/cm) \quad (\text{Ek A7})$$

atalet momenti ile plastik mukavemet momenti arasındaki bağıntılar ise

$0 \leq W_{pz} \leq 250cm^3$ için

$$I_z = 0.01674 \times W_{pz}^2 + 4.741 \times W_{pz} - 39.74 \quad (cm^4) \quad (\text{Ek A8})$$

$250cm^3 \leq W_{pz} \leq 1714cm^3$ için

$$I_z = 0.00449 \times W_{pz}^2 + 10.054 \times W_{pz} - 614.64 \quad (cm^4) \quad (\text{Ek A9})$$

şeklindedir, [54].

EK B. BİRİNCİ VE İKİNCİ MERTEBE ELEMAN RİJİTLİK MATRİSLERİ

Çubuk eksen takımındaki $[K]$ rijitlik matrisi, i ve j uçlarına ait 6×6 boyutundaki $[k]_{ii}, [k]_{ij}, [k]_{ji}, [k]_{jj}$ matrislerinin

$$[K] = \begin{bmatrix} [k]_{ii} & [k]_{ij} \\ [k]_{ji} & [k]_{jj} \end{bmatrix} \quad (\text{Ek B1})$$

şeklinde biraraya gelmesiyle oluşmaktadır, Çakıroğlu, Özden ve Özmen [59].

Bilindiği gibi $[K]$ matrisinin $k_{m,n}$ elemanı, $D_n = 1$ yerdeğiştirmesinden dolayı P_m uç kuvvetinin değerini vermektedir.

Betti karşılıklı teoremi uyarınca $[K]$ matrisinin elemanları arasında

$$[k]_{ii} = [k]_{ii}^T, \quad [k]_{ji} = [k]_{ij}^T, \quad [k]_{jj} = [k]_{jj}^T \quad (\text{Ek B2})$$

özellikleri bulunmaktadır.

Doğru eksenli, prizmatik uzay çubuklarda birinci mertebe teorisine ait çubuk rijitlik matrisleri aşağıda verilmiştir, [59].

$$[k]_{ii} = \begin{bmatrix} \frac{EF}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix}$$

(Ek B3)

$$[k]_{ij} = \begin{bmatrix} -\frac{EF}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \end{bmatrix}$$

(Ek B4)

$$[k]_{ji} = [k]_{ij}^T$$

(Ek B5)

$$[k]_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{EF}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix}$$

(Ek B6)

Burada E , elastisite modülünü, G ,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

(Ek B7)

şeklinde verilen kayma modülünü, L çubuk boyunu, F çubuk enkesit alanını, I_z ve I_y sırasıyla z ve y çubuk eksenleri etrafındaki atalet momentlerini, I_x burulma atalet momentini göstermektedir.

Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin gözönüne alınması halinde, uzay çubuk sistemlerde oluşan tüm ikinci mertebe etkileri, Çakıroğlu, Özden ve Özmen [59] da açıklanmıştır. Bu çalışmada, burulma

doğrultusundaki yerdeğiştirmelerden oluşan ikinci mertebe etkileri ile çubuk enkesitindeki yerel ikinci mertebe etkileri terkedilmektedir. Buna göre, ikinci mertebe teorisine ait çubuk rijitlik matrislerinin hesabında yalnız çubukların asal düzlemleri içindeki yerdeğiştirmelere ait ikinci mertebe etkileri gözönüne alınmaktadır.

Doğru eksenli prizmatik uzay çubuklarda, bu kabuller altında elde edilen ikinci mertebe çubuk rijitlik matrisleri aşağıda verilmiştir.

$$[k]_{ii} = \begin{bmatrix} \frac{EF}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_z & 0 & 0 & 0 & \frac{b_{z1,1} + b_{z1,2}}{L} \\ 0 & 0 & a_y & 0 & -\left(\frac{b_{y1,1} + b_{y1,2}}{L}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_y}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\left(\frac{b_{y1,1} + b_{y1,2}}{L}\right) & 0 & b_{y1,1} & 0 \\ 0 & \frac{b_{z1,1} + b_{z1,2}}{L} & 0 & 0 & 0 & b_{z1,1} \end{bmatrix}$$

(Ek B8)

$$[k]_{ij} = \begin{bmatrix} -\frac{EF}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_z & 0 & 0 & 0 & \frac{b_{z1,1} + b_{z1,2}}{L} \\ 0 & 0 & -a_y & 0 & -\left(\frac{b_{y1,1} + b_{y1,2}}{L}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_y}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{b_{y1,1} + b_{y1,2}}{L} & 0 & b_{y1,2} & 0 \\ 0 & -\left(\frac{b_{z1,1} + b_{z1,2}}{L}\right) & 0 & 0 & 0 & b_{z1,2} \end{bmatrix}$$

(Ek B9)

$$[k]_{ji} = [k]_{ij}^T$$

(Ek B10)

$$[k]_{jj} = \begin{bmatrix} \frac{EF}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_z & 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{b_{z1,1} + b_{z1,2}}{L}\right) \\ 0 & 0 & a_y & 0 & \frac{b_{y1,1} + b_{y1,2}}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{b_{y1,1} + b_{y1,2}}{L} & 0 & b_{y2,2} & 0 \\ 0 & -\left(\frac{b_{z1,1} + b_{z1,2}}{L}\right) & 0 & 0 & 0 & b_{z2,2} \end{bmatrix}$$

(Ek B11)

Bu matrislerdeki terimlerin açık ifadeleri

$$\Psi_y = L \sqrt{\frac{|N|}{EI_y}}, \quad \Psi_z = L \sqrt{\frac{|N|}{EI_z}} \quad (\text{Ek B12})$$

parametrelerine bağlı olarak aşağıda verilmiştir, [59]. Burada N , basınç olan normal kuvveti göstermektedir.

$$b_{y1,1} = b_{y2,2} = \frac{EI_y}{L} \frac{\Psi_y \sin \Psi_y - \Psi_y^2 \cos \Psi_y}{2(1 - \cos \Psi_y) - \Psi_y \sin \Psi_y} \quad (\text{Ek B13})$$

$$b_{y1,2} = \frac{EI_y}{L} \frac{\Psi_y^2 - \Psi_y \sin \Psi_y}{2(1 - \cos \Psi_y) - \Psi_y \sin \Psi_y} \quad (\text{Ek B14})$$

$$b_{z1,1} = b_{z2,2} = \frac{EI_z}{L} \frac{\Psi_z \sin \Psi_z - \Psi_z^2 \cos \Psi_z}{2(1 - \cos \Psi_z) - \Psi_z \sin \Psi_z} \quad (\text{Ek B15})$$

$$b_{z1,2} = \frac{EI_z}{L} \frac{\Psi_z^2 - \Psi_z \sin \Psi_z}{2(1 - \cos \Psi_z) - \Psi_z \sin \Psi_z} \quad (\text{Ek B16})$$

$$a_y = \frac{2(b_{y1,1} + b_{y1,2})}{L^2} - \frac{EI_y \Psi_y^2}{L^3} \quad (\text{Ek B17})$$

$$a_z = \frac{2(b_{z1,1} + b_{z1,2})}{L^2} - \frac{EI_z \Psi_z^2}{L^3} \quad (\text{Ek B18})$$

Sistem eksen takımındaki

$$[K]_x = \begin{bmatrix} [k]_{ixix} & [k]_{ixjx} \\ [k]_{jxix} & [k]_{jxjx} \end{bmatrix}_{12 \times 12} \quad (\text{Ek B19})$$

çubuk rijitlik matrisinin elemanları ise aşağıda verilen dönüştürme ifadeleri ile elde edilirler.

$$\begin{aligned} [k]_{ixix} &= [T][k]_{ii}[T]^T, & [k]_{ixjx} &= [T][k]_{ij}[T]^T \\ [k]_{jxix} &= [T][k]_{ji}[T]^T, & [k]_{jxjx} &= [T][k]_{jj}[T]^T \end{aligned} \quad (\text{Ek B20})$$

Bu ifadelerdeki $[T]$ dönüştürme matrisi, çubuk eksenlerinin sistem eksenlerine göre doğrultu kosinüslerine bağlı olarak belirlenmektedir, [59].

Çubuk eksen takımındaki rijitlik matrisleri arasında bulunan özellikler, sistem eksen takımındaki matrisler için de geçerlidir.

Bu özelliklere göre

$$[k]_{ixix} = [k]_{ixix}^T, \quad [k]_{jxix} = [k]_{ixjx}^T, \quad [k]_{jxjx} = [k]_{jxjx}^T \quad (\text{Ek B2a})$$

olmaktadır.

$i-j$ çubuğunun uçlarının bazı doğrultularda serbestçe yerdeğiştirebilmesi halinde bu tür çubuklar için Çakıroğlu, Özden, Özmen [59] da verilen genel yol uygulanarak, bu özel durumlara ait $[\bar{k}]_{ii}$, $[\bar{k}]_{ij}$, $[\bar{k}]_{ji}$ ve $[\bar{k}]_{jj}$ özel rijitlik matrisleri elde edilebilir.

ÖZGEÇMİŞ

Engin ORAKDÖĞEN, 1963 yılında Lüleburgaz'da doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini sırasıyla Gümüşpala İlkokulu ve İstanbul 50. Yıl Avcılar İnsa Lisesi'nde tamamlamıştır. 1979 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girmiş ve 1983 yılında lisans öğrenimini tamamlayarak mezun olmuştur. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans öğrenimine başlamış ve 1986 yılında yüksek mühendis ünvanı ile mezun olmuştur. 1988-1990 yılları arasında yedek subay olarak askerlik görevini yapan Engin Orakdoğan, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

