

ÇELİK YAPILARDA NON-LİNEER ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

138877

Dokuz Eylül Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı

Mutlu SEÇER

Aralık, 2003

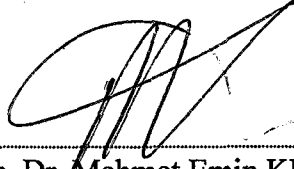
İZMİR

138877

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

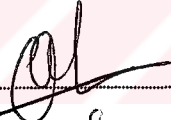
Yüksek Lisans Tezi Sınav Sonuç Formu

Mutlu SEÇER, tarafından Doç. Dr. Mehmet Emin KURAL yönetiminde hazırlanan “Çelik Yapılarda Non-Linear Çözüm Yöntemleri” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



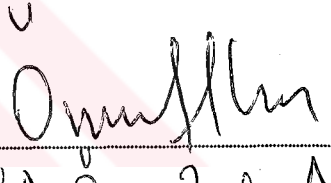
Doç. Dr. Mehmet Emin KURAL

Yönetici



Prof. Dr. Ömer Sayman

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ömer Zafar Akkurt

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Cahit HELLVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana yol gösteren ve çalışmalarımı yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Emin KURAL'a göstermiş olduğu yakın ilgi ve yardımlardan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasındaki yardımlarından dolayı, değerli çalışma arkadaşım Araş. Gör. Özgür BOZDAĞ başta olmak üzere diğer Yapı Grubu çalışma arkadaşlarıma ve Yapı Grubu Öğretim Üyelerine teşekkürü borç bilirim.

Araştırma Fon Saymanlığı Projesi kapsamındaki 03.KB.FEN.027 No'lu Araştırma Projemize maddi destek sağlayan Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğüne ve çalışmalarım sırasında maddi destek sağlayan TUBİTAK – BAYG grubuna teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam İnş. Yük. Müh. Tevfik SEÇER ve annem Prof. Dr. Müzeyyen SEÇER'e teşekkür eder, saygılar sunarım.

Mutlu SEÇER

ÖZET

Bu çalışmada, çelik yapıların gerçek davranışlarını incelemek amacıyla malzeme ve geometri bakımından lineer olmayan çözüm yöntemleri ele alınmıştır.

Altı bölüm halinde sunulan bu çalışmanın birinci bölümünde lineer olmayan davranışın tanıtılması, konu ile ilgili çalışmaların gözden geçirilmesi, çalışmanın amacı ve kapsamı yer almaktadır.

İkinci bölümde, malzeme bakımından lineer olmayan davranış tanıtılmış, yapılan kabuller ve yöntemin esasları sunulmuştur. Yapı davranışının malzeme bakımından lineer olmayan yöntemlere göre incelenmesi açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, geometri bakımından lineer olmayan davranış, $P-\Delta$ ve $P-\delta$ etkileri incelenmiştir. İkinci mertebe analiz; stabilite fonksiyonları, geometrik rijitlik matrisleri ile ifade edilmiş ve bazı iteratif yaklaşık yöntemler incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, ikinci ve üçüncü bölümde tanıtılan malzeme ve geometri bakımından lineer olmayan çözüm yöntemleri incelenmiş ve hesap yöntemlerine değinilmiştir. Lineer olmayan işlem adımları da açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, incelenen lineer ve lineer olmayan hesap yöntemleri örnek çerçeveler üzerinde matris yöntemler kullanılarak uygulanmıştır. Yöntemlerin uygulaması adım adım ve detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Çeşitli yük artımı yöntemleri incelenmiş ve yöntemlerin birbirlerine göre avantajları sunulmuştur.

Altıncı bölümde, lineer olmayan hesap yöntemlerinin kullanılması ile bir önceki bölümden elde edilen hesap sonuçları karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

ABSTRACT

In this study, material and geometrical non-linear analysis methods are investigated to find out the real behaviours of steel structures.

The study is concluded in six parts, in which the purpose and the scope of the study are defined in the first chapter by introducing non-linear behaviour and surveying the former studies.

In the second chapter, materially non-linear behaviour is introduced in relation with the assumptions and the principles of method are shown. The structural behaviour considering materially non-linear analysis is briefly explained.

In the third chapter, geometrical non-linear behaviour, $P-\Delta$ and $P-\delta$ effects are investigated. Second order analysis is represented through stability functions, geometrical stiffness matrices, and some iterative approximate methods.

In the fourth chapter, material and geometrical non-linear analysis methods, which are explained briefly in chapter two and chapter three are discussed. Calculation process and non-linear analysis procedures are also explained.

In the fifth chapter, linear and non-linear analysis procedures are applied on the sample frame structures using matrix methods. The application processes are also shown step-by-step and in detail. Various load increment methods are investigated and the advantages of these methods to each other are presented.

In the sixth chapter, the calculation results obtained by non-linear analysis methods from the previous chapter are compared and discussed. The results of the study are also shown in this chapter.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İçindekiler	IV
Tablo Listesi.....	XV
Şekil Listesi.....	XX

Bölüm 1

GİRİŞ

1.1 Giriş.....	1
1.2 Konu ile İlgili Mevcut Çalışmalar.....	5
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	7

Bölüm 2

MALZEME BAKIMINDAN NON-LİNEER DAVRANIŞ

2.1 Malzemenin Şekildeğiştirme Özellikleri.....	8
2.2 Şekil Değiştirme Türleri.....	9
2.2.1 Yük Deformasyon Eğrilerinin İdealleştirilmesi.....	11
2.2.2 İdealleştirilmiş Elastoplastik Malzeme İçin Yük Deformasyon İlişkisi..	13
2.3 Yön Değiştirmeyen Yükler Altında Kesit Tesiri – Şekildeğiştirme Bağınıtları ve Akma (Kırılma) Şartlarının İncelenmesi.....	14

2.3.1.1 Yanlız Normal Kuvvet Etkisi ($M=0$) Hali.....	16
2.3.1.2 Yalnıız Eğilme Moment Etkisi ($N=0$) Hali.....	17
2.4 Kesit Tesiri – Şekildeğiştirme Bağıntılarının Çıkarılması.....	19
2.4.1 Normal Kuvvet Etkisindeki Çubuklar.....	21
2.4.2 Eğilme Momenti Etkisindeki Çubuklar.....	22
2.5 Dikdörtgen ve I Kesitler İçin Plastik Moment Değerlerinin Eldesi.....	26
2.5.1 Dikdörtgen Kesitler.....	26
2.5.2 I Kesitler.....	27
2.6 Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Etkisindeki Çubuklar.....	29
2.6.1 Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Etkisindeki Dikdörtgen Kesitli Çubuklar İçin Akma Bağıntılarının Eldesi.....	31
2.6.2 Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Etkisindeki x-x Eksenine Göre Eğilen Çift Simetirili I Kesitli Çubuklar İçin Akma Bağıntılarının Eldesi.....	33
2.6.2.1 Tarafsız Eksenin Gövdeden Geçmesi Durumu.....	33
2.6.2.2 Tarafsız Eksenin Başlıklardan Birinden Geçmesi Durumu.....	35

Bölüm 3

GEOMETRİ BAKIMINDAN NON-LİNEER DAVRANIŞ

3.1 Geometri Bakımından Non-Linear Davranış Çeşitleri.....	38
3.1.1 P-Δ Etkisi.....	39
3.1.2 P-δ Etkisi.....	40
3.2 Geometri Bakımından Non-Linear Analiz Yöntemleri.....	40
3.2.1 Stabilite Fonksiyonlarının İkinci Mertebe Analize Dahil Edilmesi.....	40
3.2.1.1 Stabilite Fonksiyonlarının Rijitlik Matrisine Dahil Edilmesi.....	48
3.2.2 Sonlu Elemanlar (Enerji Denklemi) ile İkinci Mertebe Geometrik Rijitlik Matrisinin Elde Edilmesi.....	54
3.2.2.1 Basit Kirişin Birinci Mertebe Etkiler İçin Enerji Denkleminin İncelenmesi.....	56

3.2.2.2 Basit Kirişin İkinci Mertebe Etkiler İçin Enerji Denkleminin İncelenmesi.....	61
3.2.3 Basitleştirilmiş İkinci Mertebe Yöntemleri.....	64
3.2.3.1 İteratif Yatay Yük Yöntemi.....	64
3.2.3.2 İteratif Düşey Yük Yöntemi.....	66

Bölüm 4

ÇELİK ÇERÇEVELERİN NON-LİNEER ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE İNCELENMESİ

4.1 Çelik Çerçevelerin Non-Linear Analizinde Yapılan Kabuller.....	69
4.2 Birinci Mertebe Elastoplastik Analiz.....	70
4.2.1 Birinci Mertebe Elastoplastik Analiz İçin Gerekli Bazı Matrislerin Eldesi.....	70
4.2.1.1 Elemanın j. Ucunda Mafsal Olması Durumu İçin Rijitlik Matrisi.....	71
4.2.1.2 Elemanın k. Ucunda Mafsal Olması Durumu İçin Rijitlik Matrisi.....	74
4.2.1.3 Elemanın Her İki Ucunda Mafsal Olması Durumu İçin Rijitlik Matrisi.....	77
4.2.2 Birinci Mertebe Elastoplastik Analiz İçin Nümerik Prosedür.....	77
4.2.2.1 Yanlız Eğilme Moment Etkisi ($N=0$) Hali İçin Akma Şartı ve Yük Parametresi Artışı Formülünün Eldesi.....	79
4.2.2.2 Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Etkisi Hali İçin Akma Şartı ve Yük Parametresi Artışı Formülünün Eldesi.....	79
4.3 İkinci Mertebe Elastoplastik Analiz.....	80
4.4 Düşey Yüklerin Sabit ve Yatay Yüklerin Arttırılması ile İkinci Mertebe Elastoplastik Analiz.....	81
4.4.1 Yanlız Eğilme Moment Etkisi ($N=0$) Hali İçin Akma Şartı ve Yatay Yük Parametresi Artışı Formülünün Eldesi.....	82

4.4.2 Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Etkisi Hali İçin Akma Şartı ve Yatay Yük Parametresi Artışı Formülünün Eldesi.....	82
4.5 Burkulma Sınır Yükünün Hesaplanması.....	83
4.6 Rankine-Merchant Yaklaşık Yük Parametresi Yöntemi.....	84
4.7 Göçme Yükünün Belirlenmesi.....	85
4.7.1 Göçme Yükünün Belirlenmesinde Uygulanacak Adımlar.....	86

Bölüm 5

NON-LİNEER ÇÖZÜM YÖNTEMLERİNİN SAYISAL UYGULAMALARI

5.1 Sayısal Uygulamanın Kapsamı.....	87
5.1.1 Sayısal Uygulamada Yapılan Kabuller.....	87
5.2 Sayısal Uygulamada Kullanılan Çerçevenin Özellikleri.....	88
5.2.1 Sayısal Uygulamada Kullanılan Çerçevenin Geometrik Özellikleri.....	88
5.2.2 Sayısal Uygulamada Kullanılan Çerçevenin Malzeme Özellikleri.....	89
5.2.2.1 Kiriş ve Kolonların Moment ve Normal Kuvvet Taşıma Kapasitelerinin Bulunması.....	90
5.3 Lineer ve Lineer Olmayan Sistem Çözümleri.....	92
5.3.1 I. Mertebe Lineer Elastik Hesap.....	92
5.3.1.1 Elemanların Kesit Değerleri ve Uygulanan Yükleme Durumu.	93
5.3.1.2 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	93
5.3.1.3 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri.....	96
5.3.1.4 Düzlem Çerçevenin I. Mertebe Lineer Elastik Hesabı İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	97
5.3.1.5 Kritik Kesitlerin Belirlenmesi.....	98
5.3.2 I. Mertebe Elastoplastik $K(M)=0$ Hesap.....	99
5.3.2.1 Birinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İlk Yük Parametresinin Belirlenmesi.....	99
5.3.2.2 Birinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	100

5.3.2.3 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	101
5.3.2.4 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri.....	102
5.3.2.5 Birinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	103
5.3.2.6 İkinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İkinci Yük Parametresinin Belirlenmesi.....	106
5.3.2.7 İkinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	107
5.3.2.8 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	107
5.3.2.9 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri.....	111
5.3.2.10 İkinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	112
5.3.2.11 Üçüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Üçüncü Yük Parametresinin Belirlenmesi.....	113
5.3.2.12 Üçüncü Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	114
5.3.2.13 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü..	114
5.3.2.14 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri.....	119
5.3.2.15 Üçüncü Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	120
5.3.2.16 Dördüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Dördüncü Yük Parametresinin (Göçme Parametresinin) Belirlenmesi.....	121
5.3.3 I. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap.....	124
5.3.3.1 Birinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İlk Yük Parametresinin Belirlenmesi.....	124
5.3.3.2 Birinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	126
5.3.3.3 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	127

5.3.3.4 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri	
Vektörleri.....	130
5.3.3.5 Birinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	131
5.3.3.6 İkinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İkinci Yük Parametresinin Belirlenmesi.....	132
5.3.3.7 İkinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	134
5.3.3.8 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	134
5.3.3.9 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri	
Vektörleri.....	138
5.3.3.10 İkinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	139
5.3.3.11 Üçüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Üçüncü Yük Parametresinin Belirlenmesi.....	140
5.3.3.12 Üçüncü Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	142
5.3.3.13 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü..	142
5.3.3.14 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri	
Vektörleri.....	146
5.3.3.15 Üçüncü Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	147
5.3.3.16 Dördüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Dördüncü Yük Parametresinin (Göçme Parametresinin) Belirlenmesi.....	148
5.3.4 II. Mertebe Lineer Elastik Hesap.....	151
5.3.4.1 II. Mertebe Lineer Elastik Hesap Adımları.....	151
5.3.4.2 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü...	152
5.3.4.3 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri	
Vektörleri.....	156
5.3.4.4 II. Mertebe Lineer Elastik Çözülen Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	157

5.3.4.5 II. Mertebe Lineer Elastik Analiz ile Çerçevenin Burkulma	
Yükünün Eldesi.....	158
5.3.4.6 Kolon Elemanların Burkulma Boylarının Hesabı.....	159
5.3.5 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$	160
5.3.5.1 İlk Plastik Mafsalın Yerinin ve İlk Yük Parametresinin	
Belirlenmesi.....	160
5.3.5.2 Birinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin	
Çözümü.....	164
5.3.5.3 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	165
5.3.5.4 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri	
Vektörleri.....	169
5.3.5.5 Birinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet	
ve Moment Diyagramları.....	170
5.3.5.6 İkinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İkinci Yük Parametresinin	
Belirlenmesi.....	171
5.3.5.7 İkinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin	
Çözümü.....	174
5.3.5.8 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	174
5.3.5.9 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri	
Vektörleri.....	179
5.3.5.10 İkinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet	
ve Moment Diyagramları.....	180
5.3.5.11 Üçüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Üçüncü Yük	
Parametresinin Belirlenmesi.....	181
5.3.5.12 Üçüncü Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin	
Çözümü.....	184
5.3.5.13 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü..	184
5.3.5.14 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri	
Vektörleri.....	189
5.3.5.15 Üçüncü Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal	
Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	190

5.3.5.16 Dördüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Dördüncü Yük Parametresinin (Göçme Parametresinin) Belirlenmesi.....	191
5.3.6 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$	197
5.3.6.1 Birinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İlk Yük Parametresinin Belirlenmesi.....	197
5.3.6.2 Birinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	202
5.3.6.3 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	203
5.3.6.4 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri....	207
5.3.6.5 Birinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	208
5.3.6.6 İkinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İkinci Yük Parametresinin Belirlenmesi.....	209
5.3.6.7 İkinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	213
5.3.6.8 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	213
5.3.6.9 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri.....	218
5.3.6.10 İkinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	219
5.3.6.11 Üçüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Üçüncü Yük Parametresinin Belirlenmesi.....	220
5.3.6.12 Üçüncü Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	224
5.3.6.13 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü..	224
5.3.6.14 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri.....	229
5.3.6.15 Üçüncü Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	230
5.3.6.16 Dördüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Dördüncü Yük Parametresinin (Göçme Parametresinin) Belirlenmesi.....	231

5.3.7 Sabit Düşey Yük Parametresi Altında Artan Yatay Yük İçin II.	
Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$	238
5.3.7.1 Düşey Yüklerin Düşey Yük Parametresi ile Arttırılması ve	
I. Mertebe Hesap.....	238
5.3.7.2 Düşey Yüklerin Düşey Yük Parametresi ile Arttırılması ve	
II. Mertebe Hesap.....	239
5.3.7.3 Birinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İlk Yatay Yük	
Parametresinin Belirlenmesi.....	240
5.3.7.4 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	241
5.3.7.5 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri	
Vektörleri.....	245
5.3.7.6 Sadece Yatay Yük Etkisi Altında Çözülmüş Düzlem	
Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	246
5.3.7.7 Birinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin	
Çözümü.....	249
5.3.7.8 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	249
5.3.7.9 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri	
Vektörleri.....	253
5.3.7.10 Bir Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve	
Moment Diyagramları.....	254
5.3.7.11 İkinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İkinci Yük Parametresinin	
Belirlenmesi.....	255
5.3.7.12 İkinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin	
Çözümü.....	257
5.3.7.13 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü..	257
5.3.7.14 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri	
Vektörleri.....	262
5.3.7.15 İkinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet	
ve Moment Diyagramları.....	263
5.3.7.16 Üçüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Üçüncü Yük	
Parametresinin Belirlenmesi.....	264

5.3.7.17 Üçüncü Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	266
5.3.7.18 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü..	266
5.3.7.19 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri.....	271
5.3.7.20 Üçüncü Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları.....	272
5.3.7.21 Dördüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Dördüncü Yük Parametresinin (Göçme Parametresinin) Belirlenmesi.....	273
5.3.8 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap.....	276
5.3.8.1 Birinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İlk Yük Parametresinin Belirlenmesi.....	276
5.3.8.2 Birinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	278
5.3.8.3 İkinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İkinci Yük Parametresinin Belirlenmesi.....	279
5.3.8.4 İkinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	280
5.3.8.5 Üçüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Üçüncü Yük Parametresinin Belirlenmesi.....	281
5.3.8.6 Üçüncü (Yük Parametresi) Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü.....	282
5.3.8.7 Dördüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Dördüncü Yük Parametresinin (Göçme Parametresinin) Belirlenmesi.....	283
5.3.9 Rankine-Merchant Yaklaşık Yük Parametresi Yöntemi.....	286
5.4 Geometrik Non-Lineer ve Yaklaşık II. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Yöntemleri ile Çok Katlı Örnek Çelik Çerçevenin İncelenmesi.....	287
5.4.1 Sayısal Uygulamada Kullanılan Çerçevenin Özellikleri.....	287
5.4.2 Sayısal Uygulamada Kullanılan Çerçevenin Geometrik Özellikleri.....	287
5.4.3 Sayısal Uygulamada Kullanılan Çerçevenin Malzeme Özellikleri ve Yükleme Durumu.....	288

5.4.4 I. Mertebe Lineer Elastik Hesap.....	289
5.4.4.1 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	289
5.4.4.2 Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri.....	294
5.4.5 Stabilite Fonksiyonları ile II. Mertebe Lineer Elastik Hesap.....	295
5.4.5.1 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü...	295
5.4.5.2 Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri.....	299
5.4.6 Geometrik Rijitlik Matrisi ile II. Mertebe Lineer Elastik Hesap.....	300
5.4.6.1 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	300
5.4.7 P-Δ Geometrik Rijitlik Matrisi Analizi ile II. Mertebe Lineer Elastik Hesap.....	304
5.4.7.1 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü....	304
5.4.7.2 Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri.....	308
5.4.8 İteratif Yatay Yük Yöntemi Artımı Yöntemi ile Yaklaşık II. Mertebe Analiz.....	309
5.4.9 İteratif Düşey Yük Artımı Yöntemi ile Yaklaşık II. Mertebe Analiz....	312

Bölüm 6

NON-LİNEER ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ İLE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

6.1 Lineer ve Lineer Olmayan Çözüm Yöntemleri ile İncelenen Tek Katlı ve Tek Açıklıklı Örnek Çerçevenin Hesap Sonuçları.....	315
6.2 Geometrik Non-Lineer ve Yaklaşık II. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Yöntemleri ile İncelenen Çok Katlı Örnek Çelik Çerçevenin Hesap Sonuçları.....	324
6.3 Lineer Olmayan Çözüm Yöntemleri Sonuçları.....	327

KAYNAKLAR

Kaynaklar.....	329
----------------	-----

TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 5.1 Seçilen Kolon ve Kiriş Elemanların Kesit Özellikleri.....	89
Tablo 5.2 Seçilen Kolon ve Kiriş Elemanların Mukavemet Özellikleri.....	90
Tablo 5.3 Kolon ve Kiriş Elemanların Hesaplarda Kullanılacak Kesit Özellikleri.....	93
Tablo 5.4 Çerçeveye Uygulanan Yük Değerleri.....	93
Tablo 5.5 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	97
Tablo 5.6 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci Yük Parametresi.....	99
Tablo 5.7 Çubuk Elemanların Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	105
Tablo 5.8 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci Yük Parametresi.....	106
Tablo 5.9 Çubuk Elemanların Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	112
Tablo 5.10 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üçüncü Yük Parametresi..	113
Tablo 5.11 Çubuk Elemanların Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	120
Tablo 5.12 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Dördüncü Yük Parametresi.....	121
Tablo 5.13 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	125
Tablo 5.14 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	131
Tablo 5.15 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	132

Tablo 5.16 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	132
Tablo 5.17 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	139
Tablo 5.18 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	140
Tablo 5.19 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	140
Tablo 5.20 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	147
Tablo 5.21 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	148
Tablo 5.22 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	148
Tablo 5.23 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	157
Tablo 5.24 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin İlk İterasyon.....	161
Tablo 5.25 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon.....	162
Tablo 5.26 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Üçüncü İterasyon.....	163
Tablo 5.27 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	170
Tablo 5.28 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon.....	171
Tablo 5.29 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon.....	172
Tablo 5.30 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	180
Tablo 5.31 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon.....	181

Tablo 5.32 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon.....	182
Tablo 5.33 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	190
Tablo 5.34 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon.....	191
Tablo 5.35 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon.....	192
Tablo 5.36 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Üçüncü İterasyon.....	194
Tablo 5.37 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon ve Kontrol Değerleri.....	198
Tablo 5.38 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon ve Kontrol Değerleri.....	200
Tablo 5.39 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Üçüncü İterasyon ve Yük Parametresi.....	201
Tablo 5.40 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	208
Tablo 5.41 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	209
Tablo 5.42 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	209
Tablo 5.43 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	211
Tablo 5.44 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	211
Tablo 5.45 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	219
Tablo 5.46 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	220
Tablo 5.47 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	220

Tablo 5.48 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	222
Tablo 5.49 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	222
Tablo 5.50 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	230
Tablo 5.51 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	231
Tablo 5.52 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon Yük Parametresi Ve Kontrol Değerleri.....	231
Tablo 5.53 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	233
Tablo 5.54 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	233
Tablo 5.55 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Üçüncü İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	235
Tablo 5.56 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Üçüncü İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	235
Tablo 5.57 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	246
Tablo 5.58 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	247
Tablo 5.59 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	247
Tablo 5.60 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	254
Tablo 5.61 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri...	255
Tablo 5.62 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	255
Tablo 5.63 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri	263

Tablo 5.64 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri	264
Tablo 5.65 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	264
Tablo 5.66 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri.....	272
Tablo 5.67 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	273
Tablo 5.68 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	273
Tablo 5.69 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	277
Tablo 5.70 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri...	279
Tablo 5.71 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	279
Tablo 5.72 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri	281
Tablo 5.73 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	281
Tablo 5.74 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri.....	283
Tablo 5.75 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri.....	283
Tablo 5.76 Seçilen Kolon ve Kiriş Elemanların Kesit Özellikleri.....	288
Tablo 6.1 Çeşitli II. Mertebe Analiz Yöntemleri İçin Beş Katlı Tek Açıklıklı Örnek Çelik Çerçevenin Kat Deplasman Değerleri.....	325

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Yük Parametresi – Deplasman Grafiği.....	2
Şekil 2.1 Dış Kuvvetler Etkisindeki Katı Cisim.....	8
Şekil 2.2 p-ΔL Diyagramı.....	9
Şekil 2.3 Şekildeğiştirme Türleri.....	10
Şekil 2.4 Elastoplastik Malzeme p-ΔL Diyagramı.....	11
Şekil 2.5 İdealleştirilmiş Malzeme Deformasyon Türleri.....	12
Şekil 2.6 İdealleştirilmiş Elastoplastik Malzeme İçin Gerilme Şekildeğiştirme İlişkisi.....	13
Şekil 2.7 ds Elemanı İçin Kesit Tesirleri ve Şekildeğiştirmeler.....	14
Şekil 2.8 Yalnız Normal Kuvvet Etkisi Altında Lineer ve Lineer Olmayan Şekildeğiştirmeler.....	16
Şekil 2.9 Yalnız Eğilme Momenti Etkisi Altında Lineer ve Lineer Olmayan Şekildeğiştirmeler.....	18
Şekil 2.10 Lineer Olmayan Malzemenin Gerilme – Şekildeğiştirme Diyagramı...	19
Şekil 2.11 Kesit Tesirlerinden Dolayı Kesitte Meydana Gelen Gerilme ve Şekildeğiştirme Yayılışları.....	20
Şekil 2.12 Yalnız Normal Kuvvet Tesiri Altındaki Kesitlerde Gerilme Yayılışı.....	22
Şekil 2.13 Eğilme Momenti Tesiri Altındaki Kesitlerde Gerilme Yayılışı.....	23
Şekil 2.14 Eğilme Momenti Tesiri Altındaki Kesitlerde Gerilme Yayılışı.....	25
Şekil 2.15 Eğilme Momenti Tesiri Altındaki Dikdörtgen Kesitlerde Gerilme Yayılışı.....	26

Şekil 2.16 Eğilme Momenti Tesiri Altındaki I Kesitlerde Gerilme Yayılışı.....	27
Şekil 2.17 Eksenel Kuvvet ve Eğilme Momenti Tesiri Altındaki Kesitlerde Gerilme Yayılışı.....	29
Şekil 2.18 Akma (Kırılma) Eğrisi.....	31
Şekil 2.19 Eksenel Kuvvet ve Eğilme Momenti Tesiri Altında Dikdörtgen Kesitlerde Plastik Gerilme Dağılımı.....	31
Şekil 2.20 Eksenel Kuvvet ve Eğilme Momenti Tesiri Altında x-x Eksenine Göre Eğilen Çift Simetrlili I Kesitlerde Plastik Gerilme Dağılımı.....	33
Şekil 2.21 I Kesitler İçin Gerçek Akma Eğrisi ve TS 4561, LRFD gibi Yönetmeliklerce İdealleştirilmiş Akma Eğrileri.....	37
Şekil 3.1 P- δ ve P- Δ Etkileri.....	38
Şekil 3.2 Sadece Yatay Yük Etkisi Altında Δ_1 Deplasmanı.....	39
Şekil 3.3 Düşey ve Yatay Yük Etkisi Altında Δ Deplasmanı.....	39
Şekil 3.4 Stabilite Fonksiyonları Eldesi İçin Moment ve Normal Kuvvet Etkisindeki Eleman.....	40
Şekil 3.5 Eğilme Etkisi Altındaki Basit Kiriş.....	54
Şekil 3.6 Eğilme Etkisindeki Basit Kirişten Alınan ds Parçası.....	55
Şekil 3.7 P- Δ Etkisini Temsil Eden Fiktif Kesme Kuvvetleri.....	65
Şekil 3.8 P- Δ Etkisini Temsil Eden Konsol Eleman.....	66
Şekil 3.9 Yatay Yük ve Daha Sonra İteratif Düşey Yükün Yapıya Etkitilmesi.....	67
Şekil 3.10 Yapıya Fiktif Açıklık Eklenmesi.....	68
Şekil 4.1 j. Ucunda Mafsal Bulunan Eleman.....	71
Şekil 4.2 k. Ucunda Mafsal Bulunan Eleman.....	74
Şekil 5.1 Çerçevenin Yükleme Durumu ve Çubukların Konumu.....	88
Şekil 5.2 Çerçevenin Kesit Özellikleri.....	89
Şekil 5.3 Plastik Taşıma Gücüne Erişmiş IPB800v Kiriş Elemanın Gerilme ve Şekildeğiştirme Diyagramı.....	90
Şekil 5.4 Plastik Taşıma Gücüne Erişmiş IPB900v Kolon Elemanın Gerilme ve Şekildeğiştirme Diyagramı.....	91

Şekil 5.5 Birinci Mertebe Lineer Elastik Hesap Normal Kuvvet Diyagramı.....	97
Şekil 5.6 Birinci Mertebe Lineer Elastik Hesap Moment Diyagramı.....	97
Şekil 5.7 Lineer Olmayan Hesaplarda Kullanılacak Kritik Kesitler.....	98
Şekil 5.8 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İçin Çerçevenin Yükleme Durumu ve Kritik Kesitler.....	99
Şekil 5.9 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı.....	100
Şekil 5.10 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı.....	105
Şekil 5.11 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Moment Diyagramı.....	105
Şekil 5.12 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı.....	107
Şekil 5.13 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı.....	112
Şekil 5.14 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Moment Diyagramı.....	112
Şekil 5.15 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı.....	114
Şekil 5.16 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı.....	120
Şekil 5.17 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Moment Diyagramı.....	120
Şekil 5.18 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Dördüncü (Göçme) Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı.....	122
Şekil 5.19 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi.....	123
Şekil 5.20 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İçin Çerçevenin Yükleme Durumu ve Kritik Kesitler.....	124

Şekil 5.21 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı.....	125
Şekil 5.22 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı.....	131
Şekil 5.23 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Moment Diyagramı.....	131
Şekil 5.24 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı.....	133
Şekil 5.25 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı.....	139
Şekil 5.26 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Moment Diyagramı.....	139
Şekil 5.27 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı.....	141
Şekil 5.28 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı.....	147
Şekil 5.29 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Moment Diyagramı.....	147
Şekil 5.30 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı.....	149
Şekil 5.31 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi.....	150
Şekil 5.32 II. Mertebe Lineer Elastik Hesap İçin Çerçevenin Yükleme Durumu ve Kritik Kesitler.....	151
Şekil 5.33 Birinci Mertebe Lineer Elastik Çözümünden Elde Edilen Normal Kuvvet Diyagramı.....	151
Şekil 5.34 İkinci Mertebe Lineer Elastik Hesap Normal Kuvvet Diyagramı.....	157
Şekil 5.35 İkinci Mertebe Lineer Elastik Hesap Moment Diyagramı.....	157
Şekil 5.36 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İçin Çerçevenin Yükleme Durumu ve Kritik Kesitler.....	160
Şekil 5.37 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci İterasyon İçin Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı.....	161

Şekil 5.38 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci İterasyon İçin Çerçevenin Moment Diyagramı.....	162
Şekil 5.39 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci İterasyon İçin Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı.....	163
Şekil 5.40 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci İterasyon İçin Çerçevenin Moment Diyagramı.....	163
Şekil 5.41 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı.....	164
Şekil 5.42 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	170
Şekil 5.43 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Moment Diyagramı.....	170
Şekil 5.44 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	172
Şekil 5.45 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Moment Diyagramı.....	172
Şekil 5.46 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı.....	173
Şekil 5.47 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	180
Şekil 5.48 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Moment Diyagramı.....	180
Şekil 5.49 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	182
Şekil 5.50 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Moment Diyagramı.....	182
Şekil 5.51 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı.....	183
Şekil 5.52 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	190
Şekil 5.53 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Moment Diyagramı.....	190

Şekil 5.54 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	192
Şekil 5.55 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Moment Diyagramı.....	192
Şekil 5.56 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Üçüncü İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	193
Şekil 5.57 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Üçüncü İterasyon Moment Diyagramı.....	194
Şekil 5.58 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı.....	195
Şekil 5.59 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi.....	196
Şekil 5.60 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İçin Çerçevenin Yükleme Durumu ve Kritik Kesitler.....	197
Şekil 5.61 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci İterasyon İçin Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı.....	199
Şekil 5.62 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci İterasyon İçin Çerçevenin Moment Diyagramı.....	199
Şekil 5.63 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci İterasyon İçin Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı.....	200
Şekil 5.64 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci İterasyon İçin Çerçevenin Moment Diyagramı.....	201
Şekil 5.65 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı.....	202
Şekil 5.66 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	208
Şekil 5.67 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Moment Diyagramı.....	209
Şekil 5.68 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	210
Şekil 5.69 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Moment Diyagramı.....	211

Şekil 5.70 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı.....	212
Şekil 5.71 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	219
Şekil 5.72 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Moment Diyagramı.....	219
Şekil 5.73 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	221
Şekil 5.74 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Moment Diyagramı.....	221
Şekil 5.75 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı.....	223
Şekil 5.76 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	230
Şekil 5.77 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Moment Diyagramı.....	230
Şekil 5.78 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	232
Şekil 5.79 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Moment Diyagramı.....	232
Şekil 5.80 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Üçüncü İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı.....	234
Şekil 5.81 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Üçüncü İterasyon Moment Diyagramı.....	234
Şekil 5.82 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı.....	236
Şekil 5.83 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi.....	237
Şekil 5.84 Düşey Yük Parametresi $p_d=1.5$ İle Arttırılmış Düşey Kuvvetler.....	238
Şekil 5.85 Düşey Yük Parametresi $p_d=1.5$ İle Arttırılmış Düşey Kuvvetler Altında I. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Sonucu Elde Edilen Normal Kuvvet Diyagramı.....	239

Şekil 5.86 Düşey Yük Parametresi $p_d=1.5$ İle Arttırılmış Düşey Kuvvetler Altında I. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Sonucu Elde Edilen Moment Diyagramı.....	239
Şekil 5.87 Düşey Yük Parametresi $p_d=1.5$ İle Arttırılmış Düşey Kuvvetler Altında II. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Sonucu Elde Edilen Normal Kuvvet Diyagramı.....	240
Şekil 5.88 Düşey Yük Parametresi $p_d=1.5$ İle Arttırılmış Düşey Kuvvetler Altında II. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Sonucu Elde Edilen Moment Diyagramı.....	240
Şekil 5.89 Yatay Yük Parametresi $p_y=1.00$ İçin Yatay Kuvvetler.....	241
Şekil 5.90 Sadece Yatay Yük Parametresi ile II. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Sonucu Elde Edilen Normal Kuvvet Diyagramı.....	246
Şekil 5.91 Sadece Yatay Yük Parametresi ile II. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Sonucu Elde Edilen Moment Diyagramı.....	246
Şekil 5.92 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İçin Birinci Yük Parametresi Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı..	248
Şekil 5.93 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Normal Kuvvet Diyagramı.....	254
Şekil 5.94 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Moment Diyagramı.....	254
Şekil 5.95 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İçin İkinci Yük Parametresi Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı....	256
Şekil 5.96 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Normal Kuvvet Diyagramı.....	263
Şekil 5.97 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Moment Diyagramı.....	263
Şekil 5.98 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İçin Üçüncü Yük Parametresi Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı.	265
Şekil 5.99 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Normal Kuvvet Diyagramı.....	272
Şekil 5.100 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Moment Diyagramı.....	272

Şekil 5.101 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap	
$K(M,N)=0$ İçin Dördüncü Yük Parametresi Normal Kuvvet ve Moment	
Diyagramı.....	274
Şekil 5.102 Sabit Düşey Yük Parametresi Altında Artan Yatay Yük İçin II.	
Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi..	275
Şekil 5.103 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I Mertebe Elastoplastik Hesap	
$K(M,N)=0$ İçin Çerçevenin Yükleme Durumu ve Kritik Kesitler.....	276
Şekil 5.104 LRFD Etkileşim Eğrileri ile Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap	
$K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı..	278
Şekil 5.105 LRFD Etkileşim Eğrileri ile Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap	
$K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı....	280
Şekil 5.106 LRFD Etkileşim Eğrileri ile Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap	
$K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı	282
Şekil 5.107 LRFD Etkileşim Eğrileri ile Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap	
$K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment	
Diyagramı.....	284
Şekil 5.108 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap	
$K(M,N)=0$ Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi.....	285
Şekil 5.109 Çerçevenin Yükleme Durumu ve Çubukların Konumu.....	308
Şekil 5.110 Çerçevenin Kesit Özellikleri.....	309
Şekil 5.111 Tek Açıklıklı Beş Katlı Örnek Çelik Çerçevenin 2 ve 10 Numaralı	
Düğüm Noktaları.....	309
Şekil 5.112 İteratif Yatay Yük Artımı Yöntemi 2 Numaralı Düğüm Noktası	
Moment Değerleri.....	312
Şekil 5.113 İteratif Yatay Yük Artımı Yöntemi 10 Numaralı Düğüm Noktası	
Moment Değerleri.....	312
Şekil 5.114 İteratif Düşey Yük Artımı Yöntemi 2 Numaralı Düğüm Noktası	
Moment Değerleri.....	314
Şekil 5.115 İteratif Düşey Yük Artımı Yöntemi 10 Numaralı Düğüm Noktası	
Moment Değerleri.....	314
Şekil 6.1 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ ve $K(M,N)=0$ Akma	
Şartları İçin Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi.....	316

Şekil 6.2 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ ve $K(M,N)=0$ Akma Şartları İçin Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi.....	317
Şekil 6.3 Birinci ve İkinci Mertebe Elastoplastik $K(M)=0$ ve $K(M,N)=0$ Hesap İçin Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi.....	319
Şekil 6.4 Sap2000 Non Linear Programı ile Birinci ve İkinci Mertebe Elastoplastik $K(M)=0$ ve $K(M,N)=0$ Hesap İçin Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi.....	320
Şekil 6.5 Artan Düşey ve Yatay Yük Parametresi ve Sabit Düşey, Artan Yatay Yük Parametresi İçin İkinci Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap İçin Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi.....	321
Şekil 6.6 TS 4561 ve LRFD Akma Şartları İçin Birinci Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap İçin Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi.....	322
Şekil 6.7 Rankine-Merchant Yaklaşık İkinci Mertebe Göçme Yüğü Yöntemi ile İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap Sonuçları İçin Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi.....	323
Şekil 6.8 Çeşitli II. Mertebe Analiz Yöntemleri İçin Beş Katlı Tek Açıklıklı Önek Çelik Çerçevenin 2 Numaralı Düğüm Noktası Moment Değerleri.....	326
Şekil 6.9 Çeşitli II. Mertebe Analiz Yöntemleri İçin Beş Katlı Tek Açıklıklı Önek Çelik Çerçevenin 10 Numaralı Düğüm Noktası Moment Değerleri.....	326

BÖLÜM BİR

NON-LİNEER DAVRANIŞA

GİRİŞ

1.1 Giriş

Çelik yapıların dış etkiler altındaki gerçek davranışlarının daha yakından izlenebilmesi, lineer olmayan teoriyi esas alan hesap ve boyutlandırma yöntemlerinin incelenmesiyle mümkün olmaktadır. Aynı zamanda bu yöntemler ile pratik mühendislik uygulamalarında ilave kolaylıklar sağlanabilmektedir.

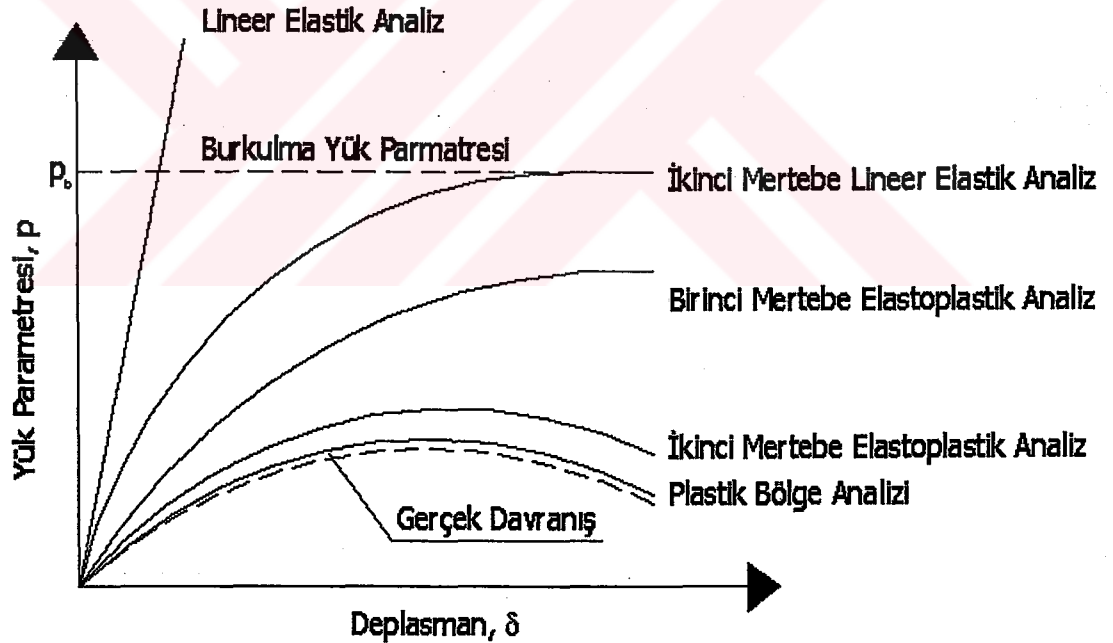
Yapıları estetik, ekonomik ve fonksiyonel olarak boyutlandırmak için yapı sistemlerinin daha narin ve yüksek yapılabilmesi isteği her geçen gün artmaktadır. Bu isteği karşılamak amacıyla malzemelerin orantı sınırı üstündeki taşıma kapasitelerini de hesaba katan plastik hesap yöntemlerinden yararlanılabilir. Ancak narin ve yüksek yapılarda yerdeğiştirmeler önem kazanmakta ve geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin gözönüne alınması gerekmektedir. Bunun sonucu olarak, hem malzeme, hem de geometri değişimleri bakımından lineer olmayan sistemlerin hesap ve boyutlandırma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Genel olarak, yapılarda non-lineer davranış iki ana başlık altında toplanabilir. Bunlar, geometrik olarak lineer olmayan davranış ve malzeme bakımından lineer olmayan davranıştır (Chen et al., 2001).

Çelik çerçevelerde geometrik olarak lineer olmayan davranış P-Delta etkilerini ifade etmekte ve genel olarak ikinci mertebe analiz olarak adlandırılmaktadır. Geometrik bakımından lineer olmayan davranış stabilite fonksiyonları ve geometrik

rijitlik matrisinin kullanılması gibi bazı yöntemler ile hesaplara dahil edilebilir (Chen, & Lui, 1991).

Malzeme bakımından lineer olmayan davranış malzemenin akma davranışı ile ilgilidir. Malzeme bakımından lineer olmayan davranış iki model ile incelenebilir (King et al., 1992). Birinci model, plastik mafsallardır. Bu model ile akma davranışının plastik mafsallarda verilen belirli kesitlerde toplandığını varsayılırken akma davranışının eleman boyunca olan etkisi terk edilir. İkinci model ise yayılı hacimsel plastikleşme veya plastik bölge ile adlandırılan modeldir. Bu model, kesit ve eleman boyunca meydana gelen akma davranışını göz önüne almaktadır. Plastik bölge metodu işlem adımlarının fazla olması nedeniyle pratik olarak uygulama görmemektedir. Ancak plastik bölge metoduyla çözülmüş bazı çelik çerçeveler plastik mafsallarda yapılan çözümlerin yaklaşıklığının tespiti için bir karşılaştırma olanağı sağlamaktadır (Chan & Chui, 2000).



Şekil 1.1 Yük Parametresi - Deplasman Grafiği

Lineer olmayan malzemeden yapılmış bir çerçeve sisteminin, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisini gözönüne alan ikinci mertebe teorisine göre hesabı ile elde edilen şematik yük parametresi – yerdeğiştirme bağıntısı Şekil 1.1’de gösterilmiştir.

Yüksek mukavemetli malzemelerin kullanılması ile narinleşen yapılarda deplasmanlar birçok durumda yeterince küçük değildir. İkinci merteye analizin bu durumda uygulanması önem kazanmaktadır. Geometri değişimlerinin denge denklemlerine olan etkisinin ihmal edilmediği durumlarda geometrik olarak lineer olmayan davranış incelenmiş olur.

Bir başka durum ise, malzemenin lineer olmayan davranışdır. Malzeme davranışının lineer olduğu durumda, deplasmanların küçük ve gerilme deformasyon bağıntısını orantı sınırı adı verilen değerin altında olmaktadır. Lineer sistemlerde gerilmelerin sınır değer olan emniyet gerilmesi değerini aşmayacak şekilde boyutlandırılır. Ancak, yapılar orantı sınırından sonra da yük taşımaya devam eder. Bir başka deyişle, gerilmelerin orantı sınırına erişmesi ile yapının taşıma kapasitesi sona ermez. Yük parametresi arttıkça iç kuvvetlerin de artarak akma şartını sağlayan değerlere eriştiğinde kesitler plastikleşir. Her plastikleşen kesitin oluşumundan sonra yükler artmaya devam ettiğinde, plastikleşen kesitlerdeki iç kuvvetlerin değerlerinde değişimler olur. Ancak bileşik iç kuvvet durumu akma şartının belirlediği sınır durumun dışına çıkamaz. Buna karşılık iç kuvvetler doğrultusunda, geometrik uygunluk şartlarını sağlayan sonlu plastik şekil değiştirmeler meydana gelir (Arda & Uzgider, 1986).

Birçok yapı sisteminde, hem lineer olmayan elastik deformasyonlar ve hem de geometri değişimleri çözüm üzerine birlikte etki etmektedir. Yük parametresi arttıkça sistemdeki iç kuvvetlerin değerleri de artarak belirli bazı kesitlerde lineer elastik sınırı aşmakta ve lineer olmayan şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Bununla birlikte, malzeme bakımından lineer olmayan şekildeğiştirmelere bağlı olarak artan yerdeğiştirmeler nedeniyle ikinci merteye etkileri de dolaylı olarak artmaktadır (Chan, 2001). Böylece sistemin rijitliği daha da azalmakta ve artan yük parametresine karşı giderek daha da artan yerdeğiştirmeler meydana gelmektedir.

Bazı durumlarda sistem göçme yüküne ulaşmadan artan yüklerden dolayı burkulma sebebiyle de göçebilir. Yük parametresi bir p_B değerine ulaştığında $P-\Delta$ bağıntısı maksimumdan geçer ve bundan sonra yerdeğiştirmelere azalan yük

parametresi karşılık gelir. Sistemin daha büyük yükleri taşıyamayacağını belirten bu duruma burkulma, p_B yük parametresine ise burkulma yükü denilmektedir. Bazen yük parametresi p_B değerine erişmeden önce, büyük şekil değiştirmeler ve yerdeğiştirmeler (betonarme sistemlerde büyük çatlaklar) ve kırılmalar nedeniyle sistem taşıma gücünü kaybederek kullanılamaz hale gelebilir. Sistemi kullanılamaz hale getiren bu durumların hepsine birden göçme, göçmenin meydana geldiği p_g yük parametresine ise göçme yükü denilmektedir (Özer, 1969).

Yapı sistemlerinin lineer olmayan teoriye göre hesap yöntemlerinin başlıca kullanım alanları şunlardır:

a- Boyutlandırılan yapıların göçme güvenliğinin belirlenmesi

Bunun için önce boyutları belli olan sistemin yük parametresi – yerdeğiştirme bağıntısı elde edilerek göçme yükü hesaplanır. Bu göçme yükü parametresinin işletme yüküne oranı göçme güvenliğini verir. Böylece yapı sisteminin istenen göçme güvenliğine sahip olup olmadığı kontrol edilebilir. Göçme güvenliği iki yolla belirlenebilir.

a1- Sistemin orantılı olarak artan dış yükleri (düşey ve yatay yükler) hesaplanarak bu yükler için ortak bir göçme güvenliği elde edilir.

a2- Önce düşey yük gurubu, bu yükler için öngörülen bir güvenlik katsayısı ile çarpılarak sisteme etkilir. Daha sonra sistem artan yatay yükler için hesaplanarak göçme yükü parametresi belirlenir. Böylece düşey yükler için öngörülen belirli bir güvenlik altında sistemin yatay yük taşıma kapasitesi elde edilir.

Büyük oranda yapı ağırlığından oluşan düşey yüklerin daha belirli olduğu, buna karşılık rüzgar ve deprem gibi etkileri karakterize eden yatay yüklerin değişme olasılığının daha fazla olduğu gözönüne alındığında (a2) de önerilen yolla hesaplanan göçme güvenliğinin daha gerçekçi sonuç verdiği görülmektedir (Özer, 1969).

b- Yapıların göçme yükü esasına göre boyutlandırılması

Yapıların göçme yükü esasına göre boyutlandırılmalarında uygulanan genel yol bir ardışık yaklaşım yöntemidir. Buna göre önce sistemin boyutları tahmin edilir. Göçme yükü hesaplandıktan sonra işletme yükleri ile karşılaştırılarak sistemin göçme güvenliği belirlenir. Bu değer, öngörülen güvenliğe kabul edilebilir bir yaklaşıklıkla eşit değil ise sistemin boyutlarında uygun değişiklikler yapılarak hesaplar tekrarlanır.

Sonuç olarak, gerek boyutlandırılan yapıların göçme güvenliklerinin belirlenmesinde, gerekse yapıların belirli bir göçme güvenliğine sahip olacak şekilde boyutlandırılmasında lineer olmayan teoriye göre hesap yapılarak yük parametresi-yerdeğiştirme bağıntısının elde edilmesi ve göçme yükünün hesaplanması büyük önem taşır.

1.2 Konu ile İlgili Mevcut Çalışmalar

Çelik yapılarda geometrik ve malzeme bakımından doğrusal olmayan çözüm yöntemleri ile ilgili belli başlı bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Majid (1972) yapıların non-lineer davranışın incelenmesinin önemini belirtmiş ve kitabında non-lineer elastik ve plastik davranışı matris deplasman yöntemini kullanarak açıklamıştır.

King, White ve Chen (1992) çelik çerçeve dizaynında ikinci mertebe elastoplastik analiz yöntemlerini açıklamıştır. Lineer olmayan çözümleme yöntemleri için geliştirilen programların kıyaslanmasında kullanılmak üzere hazırlanmış olan El-Zanaty'nin tek katlı ve tek açıklıklı düzlem çerçevesi ile Vogel'in altı katlı ve iki açıklıklı olan düzlem çerçevesinde yük parametresi ve tepe noktası deplasman değerlerini sunmuştur.

Liew, White ve Chen (1993) ikinci mertebeye ve yayılan gerilmeyi gözönüne alan plastik analizi çerçeve dizaynında kullanmıştır. İki kısımdan oluşan çalışmanın ilk kısmında plastikleşmenin yayılması sonucu meydana gelen aşamalı rijitlik azalmasının rijitlik matrislerine olan etkisi teorik olarak incelenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise birçok düzlem çerçeve yayılı plastik analiz ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Kruger, Rensburg ve Plessis (1995) çelik çerçevelerin lineer olmayan analizi üzerinde çalışmıştır. Malzeme, geometri ve giriş kolon birleşimlerinin non-lineer davranışlarını dikkate alan matris deplasman yöntemini kullanarak bir bilgisayar programı geliştirmiştir.

Kim ve Chen (1996) pratik plastik analiz metodunu geliştirmiş ve bu metod ile bulunan sonuçlar LRFD yönetmeliğindeki denklemlerle karşılaştırılmıştır.

Moy (1996) çelik ve betonarme yapılar için plastik davranışı ve göçme yük parametrelerinin bulunması için mevcut teknikleri incelemiş ve çalışmalarını bir kitap altında toplamıştır.

Nethercot (2000) çelik çerçevelerin statik yükler altındaki non-lineer davranışını incelemiş ve stabilitenin önemini de içeren bir rapor sunmuştur.

Chan (2001a) çelik yapılarda non-lineer davranış ve dizayn üzerine yapılmış çalışmaları makalesinde özetlemiş ve non-lineer hesap yöntemlerindeki tarihsel gelişmeleri çalışmasında sunmuştur.

Chan (2001b) yarı-rijit çelik çerçevelerin non-lineer statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışını incelemiş ve çalışmalarını bir kitap altında toplamıştır.

Chen, Kim, Choi (2001) çelik yapılar için üç boyutlu ikinci mertebeye inelastik analiz uygulamıştır. $P-\Delta$ ve $P-\delta$ etkilerini gözönüne alan ve plastik mafsallara hipotezine

dayanan üç boyutlu bir program geliştirmiştir. Söz konusu programla altı ve yirmi iki katlı iki üç boyutlu yapıyı çözerek mevcut programlarla karşılaştırmıştır.

Davies (2001) düzlem çerçevelerin ikinci mertebe plastik analizini incelemiş ve Eurocode 3'e göre gerekli stabilite kontrollerini yapmıştır.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, çelik yapıların malzeme ve geometri bakımından lineer olmayan çözüm yöntemleri incelenecektir.

Malzemenin non-lineer davranışı akma şartları gözönüne alınarak incelenecektir. Sadece malzeme bakımından lineer olmayan davranışın gözlenebilmesi amacıyla geometri bakımından lineer olmayan davranış hesaplara dahil edilmemiştir. Akma davranışının normal kuvvetin ihmal edilmesi ile sadece moment etkisi altındaki ve normal kuvvet ile birlikte moment etkisi altında olduğu durumlar için ayrı ayrı inceleme yapılmıştır.

Geometrik non-lineer davranış, diğer bir deyişle, ikinci mertebe çözümleme yapılacaktır. Sadece geometri bakımından lineer olmayan davranışın gözlenebilmesi için malzeme bakımından lineer olmayan davranış hesaplara dahil edilmemiştir. $P-\Delta$ ve $P-\delta$ etkilerinin çelik çerçevelere olan etkisi araştırılmıştır.

Hem malzeme, hem de geometrik non-lineer davranışın birlikte hesaplara dahil edildiği durum ayrıca incelenmiştir.

Çalışmada kiriş ve kolon birleşimlerinin doğrusal olmayan davranışına değinilmeyecektir. Mevcut çalışma iki boyutlu çelik çerçevelerle sınırlandırılmış ve yanal torsiyonel burkulma vb. etkiler dikkate alınmamıştır. Ayrıca, çalışmada statik yükler kullanılmış, dinamik ve tekrarlı yükler gözönüne alınmamıştır.

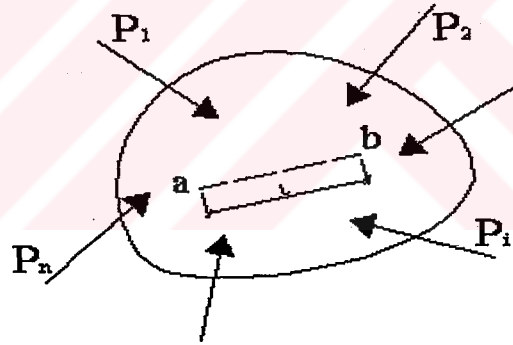
BÖLÜM İKİ

MALZEME BAKIMINDAN NONLİNEER

DAVRANIŞ

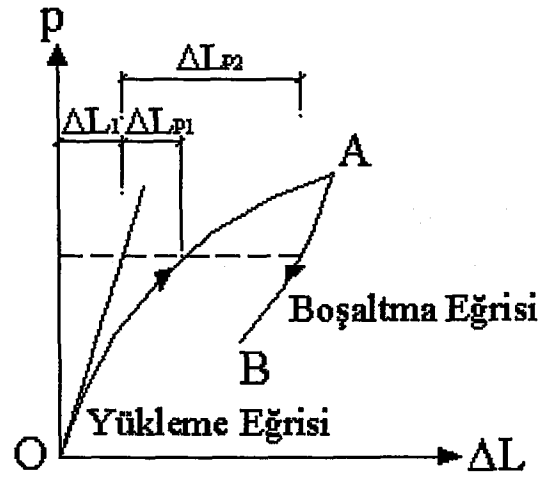
2.1 Malzemenin Şekildeğiştirme Özellikleri

Şekil 2.1 de görülen katı cisim, P_i dış kuvvetler etkisi altında denge halindedir. Bu kuvvetler, yük parametresi adı verilen bir p parametresi ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Dış kuvvetlerin orantı sabitleri sırasıyla $p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n$ dir. Bu sebeple yük parametresi bilinirse bütün dış kuvvetler $P_1 = p_1 \cdot p, P_2 = p_2 \cdot p, \dots, P_i = p_i \cdot p, \dots, P_n = p_n \cdot p$ şeklinde hesaplanabilmektedir (Çakıroğlu & Özer, 1980).



Şekil 2.1 Dış Kuvvetler Etkisindeki Katı Cisim

Yük parametresi p düşey eksene, dış kuvvetlerden dolayı katı cismin a ve b noktaları arasındaki L uzunluğunun ΔL değişimi yatay eksene taşınarak elde edilen p - ΔL diyagramı Şekil 2.2’de verilmiştir. Bu diyagramın, artan yük parametresi için elde edilen OA bölümü yükleme eğrisi, azalan yük parametresi için elde edilen AB bölümü ise boşaltma eğrisi olarak adlandırılır. p - ΔL diyagramında O_p ekseni ile eğri başlangıç teğeti arasında kalan ΔL_1 şekildeğiştirmelerine lineer şekildeğiştirmeler, başlangıç teğeti ile yükleme boşaltma eğrileri arasında kalan $\Delta L_{p1}, \Delta L_{p2}$ şekildeğiştirmelerine de lineer olmayan şekildeğiştirmeler adı verilir.



Şekil 2.2 p- ΔL Diyagramı

2.2 Şekil Değiştirme Türleri

Uygulamada karşılaşılan şekildeğiştirme türleri elastik, içsel sürtünmeli elastik, plastik, viskoelastik olmak üzere dörde ayrılır:

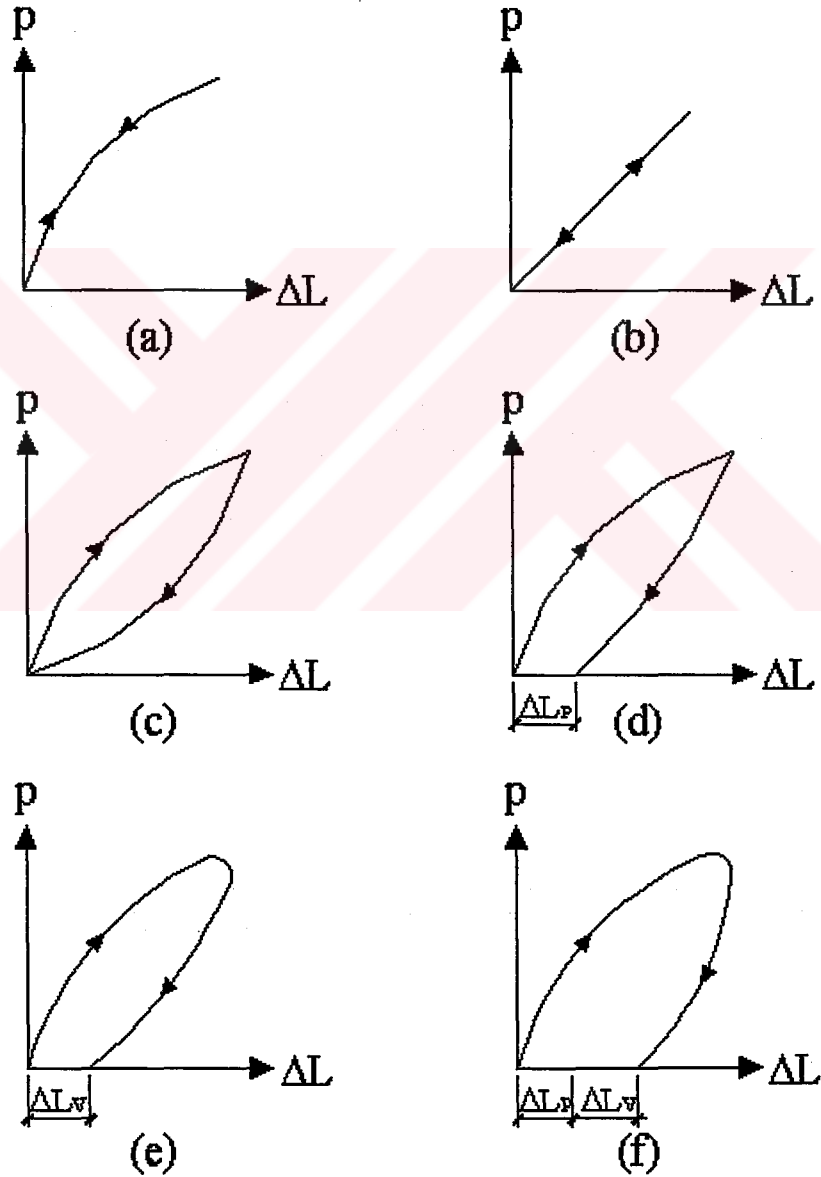
Elastik Şekildeğiştirme: Bu tür deformasyonda, yükleme ve boşaltma eğrileri çakışiktır. Elastik deformasyonlar lineer elastik ve lineer olmayan elastik deformasyonlar olmak üzere Şekil 2.3.a ve 2.3.b'de görüldüğü gibi bölümlere ayrılabilir. Yükleme ve boşaltma eğrileri lineer ise lineer elastik olarak tanımlanır. Bu eğriler non-lineer ise davranış non-lineer elastik olacaktır.

İçsel Sürtünmeli Elastik Şekildeğiştirme: Yükleme ve boşaltma farklı eğriler üzerinde meydana gelir ve yükleme eğrisinin başlangıcı ile boşaltma eğrisinin sonu çakışırsa, zamana bağlı olmayan bu tür şekildeğiştirmeye içsel sürtünmeli elastik şekildeğiştirme denir. Şekil 2.3.c'de gösterilmiştir.

Plastik Şekildeğiştirme: Yükleme ve boşaltma eğrileri farklı olan ve yükleme başlangıcı ile boşaltma sonu çakışmayan şekildeğiştirmelere plastik şekildeğiştirmeler denir. Şekil 2.3.d'de görüldüğü gibi ΔL_p plastik (kalıcı) şekildeğiştirmeyi ifade etmektedir.

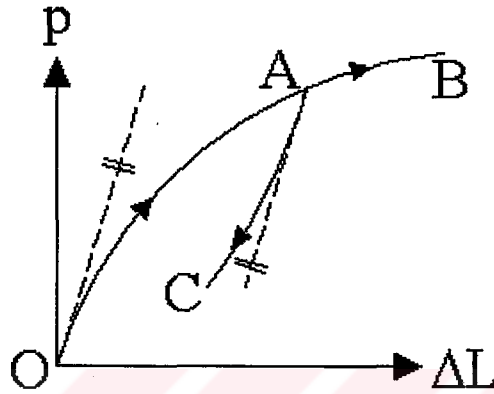
Viskoelastik Şekildeğiştirme: Boşaltma sonunda kalan şekildeğiştirme zamanla sıfıra inerse viskoelastik şekildeğiştirme adını alır. Şekil 2.3.e’de görüldüğü üzere ΔL_v ile temsil edilir.

Bazı durumlarda, boşaltma sonunda kalan şekildeğiştirme zamanla azalmakla beraber tamamen sıfıra inmez. Burada ΔL_v viskoz şekildeğiştirmenin geri dönen kısmını, ΔL_p ise kalıcı şekildeğiştirmeyi göstermektedir. Şekil 2.3.f’de görülmektedir.



Şekil 2.3 Şekildeğiştirme Türleri

Yukarıda bahsedilen şekildeğiştirme türlerine ek olarak; elastik ve plastik davranışın bir kısım özelliklerini taşıyan, yükleme ve boşaltma eğrileri çakışmayan, fakat boşaltma eğrisinin başlangıç teğeti, yükleme eğrisinin başlangıç teğetine paralel olan, malzeme davranışına elastoplastik malzeme davranışı denir. Şekil 2.4 ile gösterilen ve özellikle çelik yapı davranışının modellenmesinde elastoplastik davranış nispeten daha gerçekçi olmaktadır (Arda & Uzgider, 1986).



Şekil 2.4 Elastoplastik Malzeme $p-\Delta L$ Diyagramı

2.2.1 Yük Deformasyon Eğrilerinin İdealleştirilmesi

Yapı analizinde, yapıda kullanılan malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekir. Ancak yapı sistemlerinde kullanılan gerçek malzemelerin şekildeğiştirme özellikleri, $p-\Delta L$ bağıntısının ancak bir bölgesinde, bir önceki kısımda bahsedilen şekildeğiştirmelerden birine yaklaşık olarak benzeyebilir (Özer, 1969). Bu nedenle, yapı sistemlerinin hesabında bazı idealleştirmeler yapılarak ideal malzemenin tanımlanması gerekmektedir.

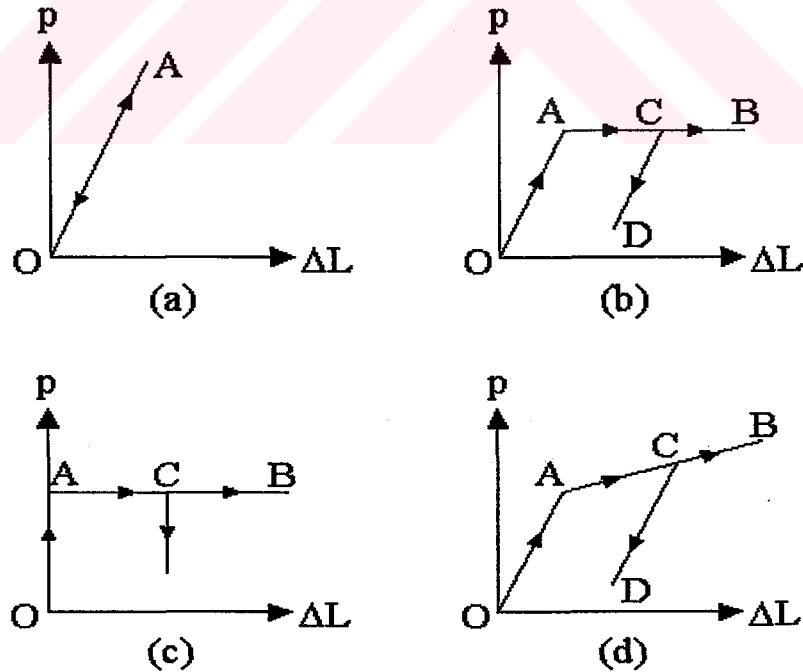
İdealleştirilmiş Lineer Elastik Malzeme: Şekil 2.5.a'daki yük deformasyon diyagramında görüldüğü üzere yükleme boşaltma eğrisi tam lineer ve birbirine çakışık bulunmaktadır.

İdealleştirilmiş Elastoplastik Malzeme: Şekil 2.5.b'de görüldüğü üzere yük deformasyon eğrisi OA ve AB doğru parçalarından oluştuğu varsayılmaktadır. OA doğru parçası lineer elastik kısmı temsil etmekte ve malzemenin akma noktasında

sonlanmaktadır. AB kısmı ise akma noktasından başlayan ve sonsuza doğru deformasyon eksenine paralel olarak ilerleyen plastik davranışı temsil etmektedir. CD ise boşaltma davranışını temsil eden doğru parçası olup OA doğru parçasına paraleldir.

İdealleştirilmiş Rijit Plastik Malzeme: Yükleme kısmının OA ve AB doğru parçalarından oluştuğu Şekil 2.5.c'de görülmektedir. Lineer elastik şekildeğiştirmelerin terk edildiği bu tür malzemelerde ilk kısım akma noktasına kadar olan düşey eksen üzerindeki malzeme davranışını, ikinci kısım ise deformasyon eksenine paralel olan kısmı temsil etmektedir. Boşaltma eğrisi ise ilk kısma paralel olan CD doğru parçası kullanılarak idealleştirilmiştir.

İdealleştirilmiş Elastik ve Lineer Pekleşme Gösteren Malzeme: Bu malzeme davranışı Şekil 2.5.d'de gösterilmiştir. OA ve AB doğru parçaları pekleşme davranışını da göz önüne alan yükleme kısmını temsil etmektedir. CD kısmı ise boşaltma kısmını göstermektedir.



Şekil 2.5 İdealleştirilmiş Malzeme Deformasyon Türleri

2.2.2 İdealleştirilmiş Elastoplastik Malzeme İçin Yük Deformasyon İlişkisi

Gerilme ve şekil değiştirme ilişkisini incelemek amacıyla Şekil 2.6'da eksenel yük etkisi altındaki bir çubuğun gerilme şekil değiştirme eğrisi verilmiştir. İdealleştirilmiş elastoplastik malzeme tanımına göre, gerilme şekil değiştirme diyagramının ilk kısmını oluşturan OA doğru parçası Hooke kanununa uygun davranmaktadır. İkinci kısım olan AB doğru parçası ise şekil değiştirme eksenine paralel ve gerilme değeri, malzemenin akma gerilmesi değerine eşittir.

OA doğru parçası için gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişki ($0 \leq \epsilon \leq \epsilon_e$) :

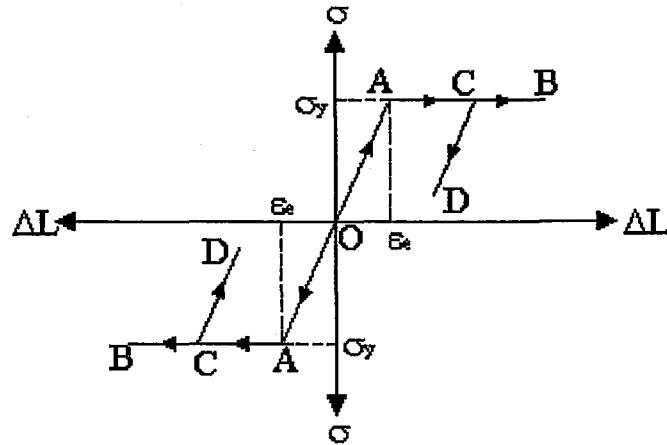
$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.1)$$

AB doğru parçası için gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişki ($\epsilon_e \leq \epsilon < \infty$):

$$\sigma = \sigma_y \quad (2.2)$$

Burada ϵ şekil değiştirme, ϵ_e elastik şekil değiştirme, σ gerilme, E elastite modülünü ve σ_y 'de malzemenin akma gerilmesini göstermektedir.

Elastoplastik malzeme davranışında Şekil 2.6'dan da görüleceği üzere çekme ve basınç gerilmeleri aynı özelliklere sahiptir. Yükleme sıfıra düştüğünde, gerilmedeki düşüşü gösteren doğru parçası yükleme esnasındaki doğru parçasına paralel olacaktır.



Şekil 2.6 İdealleştirilmiş Elastoplastik Malzeme İçin Gerilme Şekil Değiştirme İlişkisi

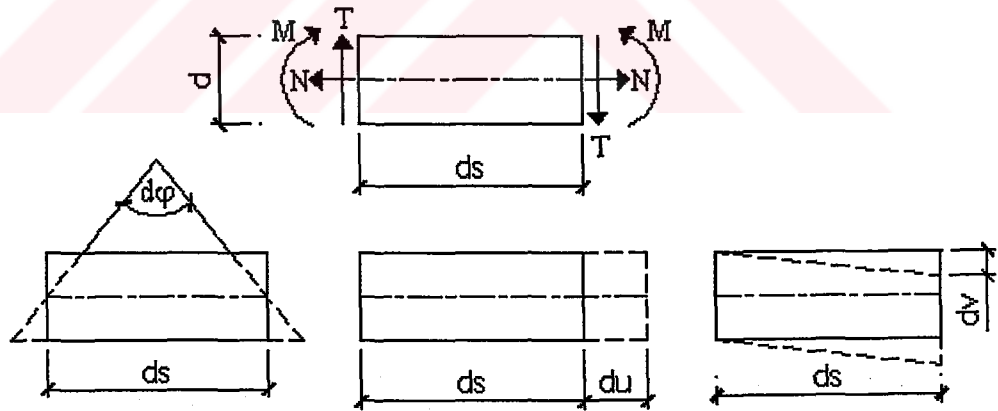
2.3 Yön Değiştirmeyen Yükler Altında Kesit Tesiri – Şekildeğiştirme Bağlıları ve Akma (Kırılma) Şartlarının İncelenmesi

Düzlem çubuk sistemlerde, düzlem içindeki kuvvetlerin etkisi altında kesit tesirleri (M) eğilme momenti, (N) normal kuvveti ve (T) kesme kuvvetidir. Çubuk üzerinde ds uzunluğundaki elemanın bir yüzünün diğer yüzüne göre rölatif yerdeğiştirmelerinin kesit tesirleri doğrultusundaki bileşenleri, ds elemanının şekildeğiştirmeleridir. Bunlar, ϕ kesit dönmesini, u ve v kesitin çubuk eksenini ve ona dik doğrultudaki yerdeğiştirmelerini gösterir. Şekil 2.7’de kesit tesirleri ve şekildeğiştirmeler pozitif yönleri ile gösterilmiştir.

$$\frac{d\phi}{ds} = \chi : \text{Birim dönme (Eğrilik)} \quad (2.3)$$

$$\frac{du}{ds} : \text{Birim boy değişmesi} \quad (2.4)$$

$$\frac{dv}{ds} = \gamma : \text{Birim kayma} \quad (2.5)$$



Şekil 2.7 ds Elemanı İçin Kesit Tesirleri ve Şekildeğiştirmeler

Düzlem çubuk sistemlerde kesit tesirleri ile şekildeğiştirmeler arasındaki bağıntılar sıcaklık değişimi vb. etkiler ihmal edildiğinde genel olarak aşağıdaki gibi yazılabilir. Bu bağıntılarda ki F_1, F_2, F_3 ifadeleri kesit tesirlerine bağlı fonksiyonları göstermektedir (Çakıroğlu & Özer 1980).

$$\frac{d\varphi}{ds} = \chi = F_1(M, N, T) \quad (2.6)$$

$$\frac{du}{ds} = F_2(M, N, T) \quad (2.7)$$

$$\frac{dv}{ds} = \gamma = F_3(M, N, T) \quad (2.8)$$

Kesit tesirlerinin artarak belirli bir sınır değere erişmesi halinde kırılma, akma veya büyük şekildeğiştirmeler nedeniyle kesitin taşıma gücü sona erer. Kesitin daha büyük kesit tesirlerini taşıyamayacağını belirten bu durum, kısaca kırılma olarak tanımlanır (Özer, 1969). Kırılmaya karşı gelen kesit tesirlerine de kesitin taşıma gücü adı verilir. Kırılma durumunu kesit tesirlerine veya şekildeğiştirmelere bağlı olarak ifade eden $K_1(M, N, T)=0$ veya $K_2\left(\frac{d\varphi}{ds}, \frac{du}{ds}, \frac{dv}{ds}\right)=0$ bağıntılarına kırılma (akma) şartı denir.

Kayma şekildeğiştirmeleri, eğilme ve uzama şekildeğiştirmelerine göre ihmal edilir ve kesme kuvvetinin birim dönme ile birim boy değişimine etkisi de ihmal edilirse, kesit tesiri şekildeğiştirme bağıntıları aşağıdaki gibi olur (Çakıroğlu & Özer, 1980):

$$\frac{d\varphi}{ds} = \chi = F_1(M, N) \quad (2.9)$$

$$\frac{du}{ds} = F_2(M, N) \quad (2.10)$$

$$\frac{dv}{ds} = \gamma = 0 \quad (2.11)$$

Kırılma şartı denklem 2.12 veya denklem 2.13 gibi ifade edilebilir:

$$K_1(M, N)=0 \quad (2.12)$$

$$K_2\left(\frac{d\varphi}{ds}, \frac{du}{ds}\right)=0 \quad (2.13)$$

2.3.1 Özel Haller

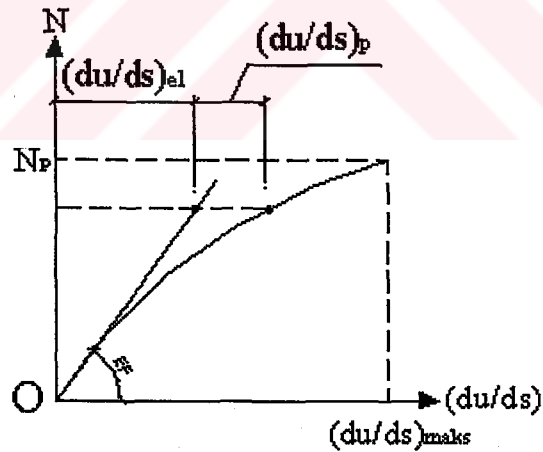
2.3.1.1 Yalnız Normal Kuvvet Etkisi ($M=0$) Hali

Yalnız normal kuvvet etkisi altındaki kesitlerde, kesit tesirleri ile şekildeğiştirmeler arasındaki bağıntılar aşağıdaki gibi yazılabilir (Çakıroğlu & Özer, 1980):

$$\frac{d\phi}{ds} = \chi = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{du}{ds} = F_2(N) \quad (N \leq N_p) \quad (2.15)$$

Kırılma şartı yalnız normal kuvvet etkisi altındaki kesit için $N - N_p = 0$ veya $\frac{du}{ds} - \left(\frac{du}{ds}\right)_{\max} = 0$ olarak ifade edilebilir. Burada N_p kesitin taşıyabileceği en büyük normal kuvveti, $\left(\frac{du}{ds}\right)_{\max}$ ise kabul edilen en büyük birim boy değişimini göstermektedir.



Şekil 2.8 Yalnız Normal Kuvvet Etkisi Altında Lineer ve Lineer Olmayan Şekildeğiştirmeler

N ile du/ds arasındaki bağıntının başlangıç teğeti ile ordinat eksenini ile eğri arasındaki kalan $(du/ds)_{el}$ ve $(du/ds)_p$ şekildeğiştirmeleri lineer ve lineer olmayan şekildeğiştirmeler adını alır (Arda & Uzgider, 1986). Buradan herhangi bir noktadaki birim boy değişimi denklem 2.16 gibi yazılabilir:

$$\frac{du}{ds} = \left(\frac{du}{ds} \right)_{el} + \left(\frac{du}{ds} \right)_p \quad (2.16)$$

Lineer elastik kısım aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\left(\frac{du}{ds} \right)_{el} = \frac{N}{EF} \quad (EF: \text{Uzama Rijitliği}) \quad (2.17)$$

Denklem 2.16 ve denklem 2.17 birlikte yazılırsa denklem 2.18 elde edilmiş olur:

$$\frac{du}{ds} = \frac{N}{EF} + \left(\frac{du}{ds} \right)_p \quad (2.18)$$

2.3.1.2 Yalnız Eğilme Moment Etkisi (N=0) Hali

Kesite etkiyen normal kuvvetin sıfır olması özel halinde, kesit tesiri şekildeğiştirme bağıntıları aşağıdaki gibi yazılabilir (Çakıroğlu & Özer, 1980):

$$\frac{d\phi}{ds} = \chi = F_1(M) \quad (M \leq M_p) \quad (2.19)$$

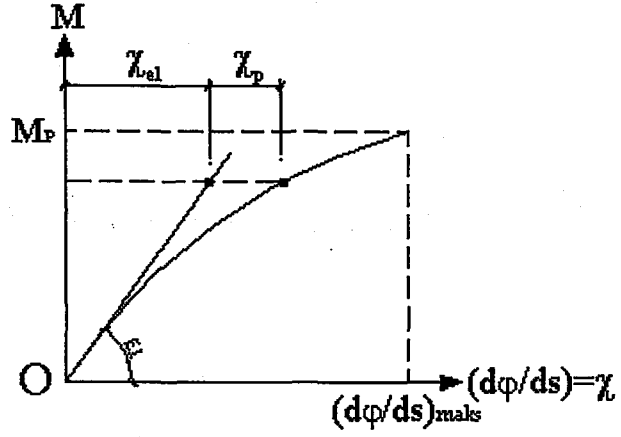
$$\frac{du}{ds} = 0 \quad (2.20)$$

Burada eğilme momentinden dolayı meydana gelen (du/ds) şekildeğiştirmeleri ihmal edilmektedir. Kırılma şartı yalnız moment etkisi altındaki kesit için $M - M_p = 0$

veya $\frac{d\phi}{ds} - \left(\frac{d\phi}{ds} \right)_{maks} = 0$ olarak ifade edilebilir. Burada M_p kesitin taşıyabileceği en

büyük eğilme momentini, $\left(\frac{d\phi}{ds} \right)_{maks}$ ise en büyük eğilme momentine karşı gelen en

büyük birim boy değişimini göstermektedir. Şekil 2.9'da görülen $M - \chi$ diyagramının başlangıç teğeti ile ordinat eksen ve eğri arasında kalan χ_{el} ve χ_p şekildeğiştirmelerine sırasıyla lineer ve lineer olmayan şekildeğiştirmeler denir.



Şekil 2.9 Yanlız Eğilme Momenti Etkisi Altında Lineer ve Lineer Olmayan Şekildeğiştirmeler

Buradan herhangi bir noktadaki birim boy değışimi yazılabilir:

$$\frac{d\varphi}{ds} = \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)_{el} + \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)_p \quad (2.21)$$

Lineer elastik kısım aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\left(\frac{d\varphi}{ds} \right)_{el} = \frac{M}{EI} = \chi_{el} \quad (EI: \text{Eğilme Rijitliği}) \quad (2.22)$$

Denklem 2.21 ve denklem 2.22 birlikte yazılırsa denklem 2.23 elde edilmiş olur:

$$\frac{du}{ds} = \chi = \frac{M}{EI} + \chi_p \quad (2.23)$$

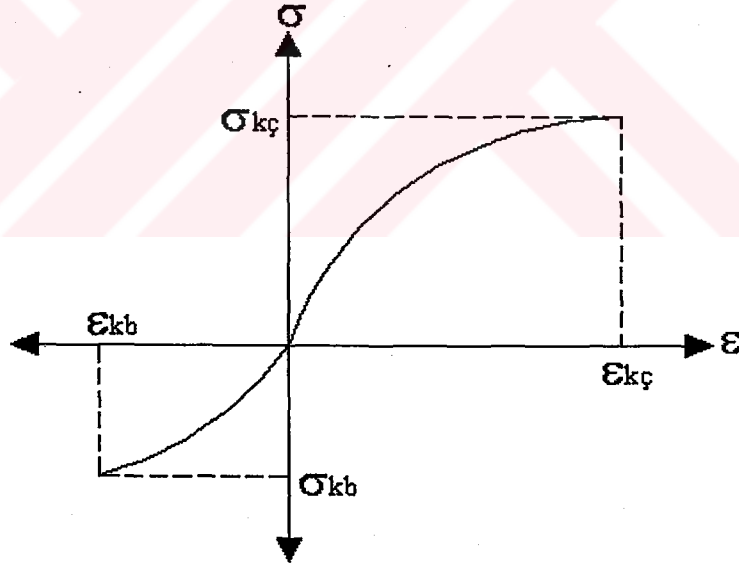
Kırılma sırasındaki toplam şekildeğiştirmenin lineer şekildeğiştirmeye oranına süneklik (düktilite) oranı denir. Bu oranın büyük değerleri kesitin süneklik özelliğini, küçük değerleri ise kesitin gevreklik özelliğini belirtir (Çakıroğlu & Özer, 1980).

2.4 Kesit Tesiri - Şekildeğiştirme Bağıntılarının Çıkarılması

Lineer olmayan malzemeden yapılmış kesitler için kesit tesiri ile şekildeğiştirme bağıntıları için aşağıdaki kabuller yapılmalıdır:

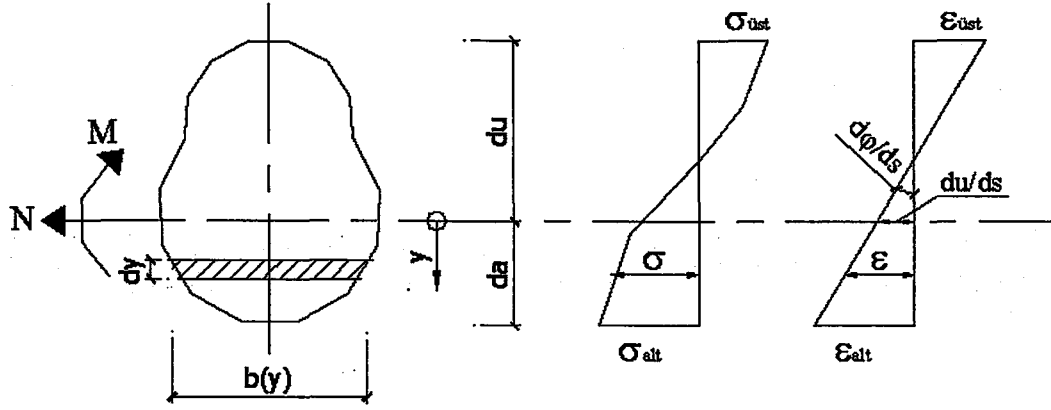
- a- Çubuk elemanın en az bir simetri düzlemi vardır ve kesit tesirleri bu düzleme etkimektedir.
- b- Dik kesit şekildeğiştirdikten sonra da düzlem kalmaktadır. (Bernoulli – Navier Hipotezi)
- a- Çubuk elemanın iki boyutu uzunluğunun yanında yeteri derecede küçüktür. Dolayısıyla kesme kuvvetinin eğilme ve uzama şekildeğiştirmelerine etkisi ihmal edilmektedir.

Lineer olmayan malzemeden yapılmış, birbirinden farklı çekme ve basınç mukavemetine sahip bir kesitin Şekil 2.10 da $\sigma - \epsilon$ diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.10 Lineer Olmayan Malzemenin Gerilme – Şekildeğiştirme Diyagramı

Kesit tesirlerinden dolayı kesitte meydana gelen gerilme ve şekildeğiştirme yayılışları Şekil 2.11’de görülmektedir. Burada, σ gerilmesi ve ϵ birim boy değıştirmesi ilişkisi denklem 2.24 ile verilmiştir.



Şekil 2.11 Kesit Tesirlerinden Dolayı Kesitte Meydana Gelen Gerilme ve Şekildeğiştirme Yayıllıkları

$$\sigma = \sigma(\epsilon) \quad (2.24)$$

Diğer taraftan kesitteki ϵ yayılışı lineerdir ve $d\phi/ds$ birim dönmesi ile kesitin ağırlık merkezinden geçen yatay eksen üzerindeki du/ds birim boy değişmesine bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\epsilon(y) = \frac{du}{ds} + \frac{d\phi}{ds} y \quad (2.25)$$

Kesite ait moment ve normal kuvvet denge denklemlerinden yararlanılır:

$$M = \int_{-d_u}^{d_u} \sigma(\epsilon) y dF \quad (2.26)$$

$$N = \int_{-d_u}^{d_u} \sigma(\epsilon) dF \quad (2.27)$$

$\epsilon(y)$ nin değeri $\sigma(\epsilon)$ fonksiyonunda yerine konur ve dF alanının $dF = b(y).dy$ olduğu gözönünde tutularak denge denklemleri yeniden yazılabilir.

$$M = \int_{-d_u}^{d_u} \sigma \left(\frac{du}{ds} + \frac{d\phi}{ds} y \right) b(y) y dy \quad (2.28)$$

$$N = \int_{-d_u}^{d_u} \sigma \left(\frac{du}{ds} + \frac{d\varphi}{ds} y \right) b(y) dy \quad (2.29)$$

Kesit tesirleri ile şekildeğiştirmeler arasındaki bağıntıların sayısal olarak elde edilebilmesi için, $d\varphi/ds$ ve du/ds 'ye çeşitli değerler verilerek yukarıdaki integrallerin doğrudan doğruya veya sayısal integrasyonla hesaplanması gerekmektedir. Kesite etkiyen eğilme momenti veya normal kuvvetten birinin sıfır olması özel halinde denge denklemleri denklem 2.30 ve denklem 2.31 ile ifade edilir:

$$N = \int_{-d_u}^{d_u} \sigma \left(\frac{du}{ds} \right) b(y) dy \quad (M=0) \quad (2.30)$$

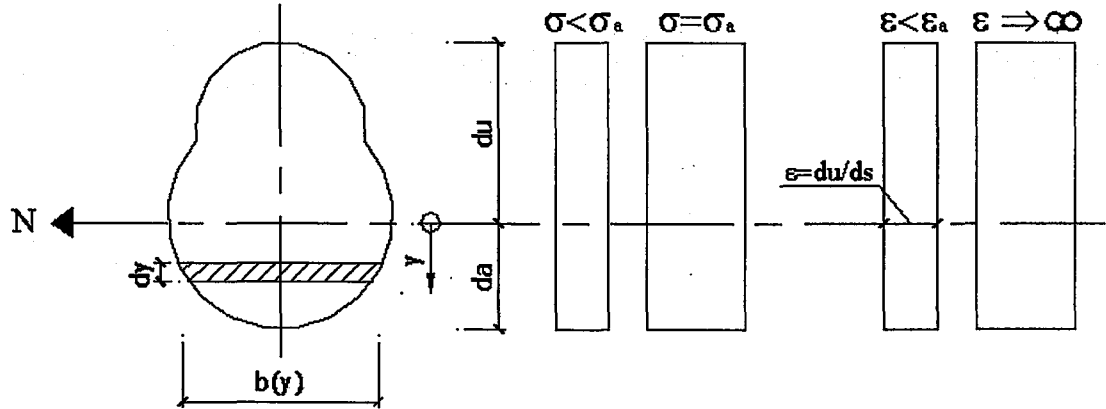
$$M = \int_{-d_u}^{d_u} \sigma \left(\frac{d\varphi}{ds} y \right) b(y) y dy \quad (N=0) \quad (2.31)$$

Elastoplastik malzemeden yapılmış sistemlerde ise, bir kesit tesiri durumuna birden fazla şekildeğiştirme durumu karşı geleceğinden, yüklemenin her küçük adımında, kesitteki gerilme yayılışına ait ε birim boy değişimlerinin bilinmesi gerekmektedir. Ancak yüklemenin başlangıcından itibaren kesit tesirleri daima aynı yönde değişiyorsa, veya en azından bu şart kesit tesirlerinin önemli olduğu bölgelerde sağlanıyorsa kesit tesiri şekildeğiştirme bağıntısının yalnız yükleme eğrisini izleyeceği söylenebilir (Çakıroğlu & Özer, 1980). Bu durumda elastik sistemler için elde edilen denklemler, yukarıdaki şartları sağlayan elastoplastik sistemlere de uygulanabilir (Arda & Uzgider, 1986).

2.4.1 Normal Kuvvet Etkisindeki Çubuklar

Yalnız normal kuvvet ile zorlanan kesitlerde Şekil 2.12'den de görülebileceği gibi sabit gerilme yayılışı meydana gelir. Bu duruma ait izdüşüm denge denklemi F kesit alanı olmak üzere aşağıdaki gibidir (Arda & Uzgider, 1986):

$$N = \int_{-d_u}^{d_u} \sigma dF = \sigma \int_{-d_u}^{d_u} dF = \sigma F \quad (2.32)$$



Şekil 2.12 Yalnız Normal Kuvvet Tesiri Altındaki Kesitlerde Gerilme Yayılışı

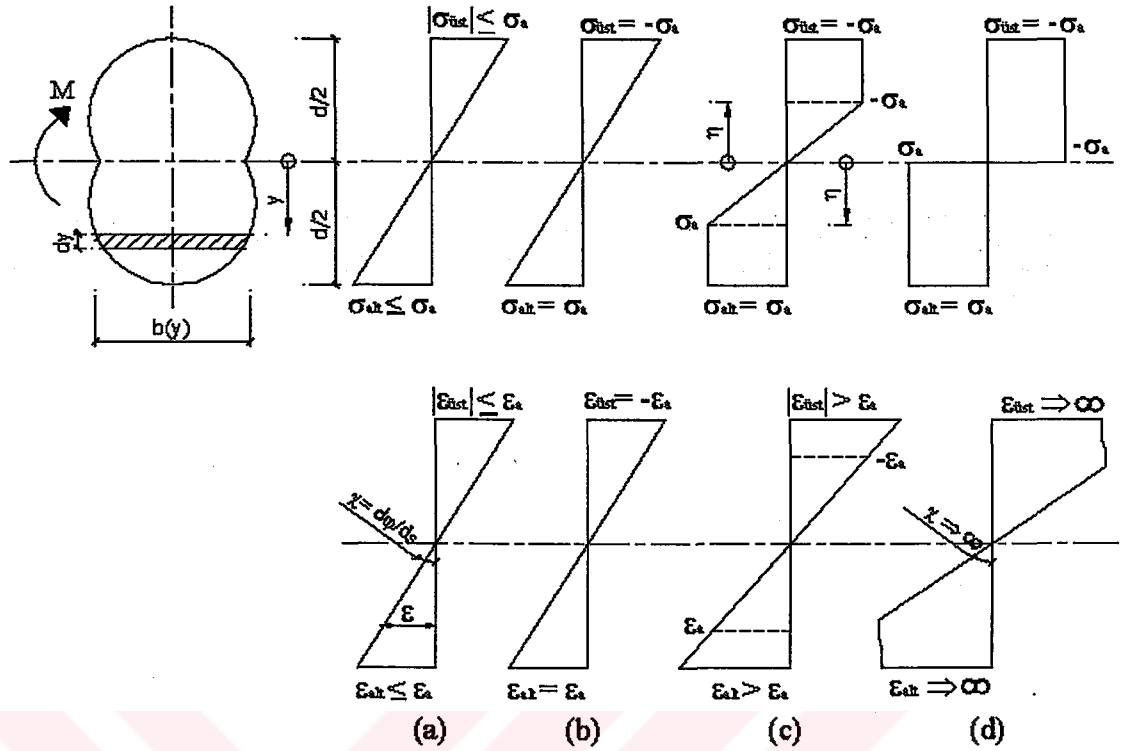
Gerilmenin $\sigma \leq \sigma_a$ değerleri için birim boy değişimi ile normal kuvvet arasında $du/ds = N/EF$ bağıntısının geçerli olduğu lineer elastik teoriden bilinmektedir. Kesite etkiyen normal kuvvetin artan değerleri için gerilmelerde artarak $\sigma = \sigma_a$ sınır değerine erişince du/ds şekildeğiştirmesi sonsuza gider, yani kesit akar. Bu sınır durumu belirleyen akma şartının normal kuvvete ve birim boy değişimine bağlı ifadesi $N - N_p = 0$ veya $du/ds - \infty = 0$ 'dır.

Kesitin taşıyabileceği en büyük N_p normal kuvveti, kesitin lineer elastik olarak taşıyabileceği en büyük N_e normal kuvvetine eşittir ve denklem 2.33 ile hesaplanır:

$$N_p = \sigma_a F \quad (2.33)$$

2.4.2 Eğilme Momenti Etkisindeki Çubuklar

Birbirine dik iki simetri düzlemi olan çubuklarda eğilme momenti ile eğrilik arasındaki bağıntılar aşağıda görülmektedir. İki dik düzleme göre simetrik olan bir çubuk kesitinde eğilme momentinden meydana gelen gerilme ve birim boy değişmesi yayılışları Şekil 2.13'de verilmiştir.



Şekil 2.13 Eğilme Momenti Tesiri Altındaki Kesitlerde Gerilme Yayılımı

Eğilme momentinin küçük değerleri için kenar liflerdeki gerilmeler σ_a akma gerilmesinden küçüktür. Şekildeğiştirmenin lineer elastik olduğu durumlarda M - χ bağıntısı $\frac{d\phi}{ds} = \chi = \frac{M}{EI}$ şeklindedir. Eğilme momenti artarak; $M = M_a$ olunca alt ve üst kenar liflerdeki gerilmeler σ_a sınır gerilmesine eşit olur. Burada M_a kesitin lineer elastik olarak taşıyabileceği varsayılan en büyük eğilme momentidir ve değeri W kesitin mukavemet momentini göstermek üzere; $M_a = \sigma_a W$ formülü ile hesaplanır. Eğilme momentinin daha büyük değerleri için kesitte plastik şekil değiştirmeler meydana gelir. Bu duruma ait gerilme yayılımı aşağıda verilmektedir:

$$\sigma = -\sigma_a \quad (y < -\eta) \quad (2.34)$$

$$\sigma = E \varepsilon(y) \quad (-\eta \leq y \leq \eta) \quad (2.35)$$

$$\sigma = \sigma_a \quad (\eta < y) \quad (2.36)$$

ε birim boy değiştirmesinin $\varepsilon(y) = \frac{d\varphi}{ds} y$ olduğu gözönünde tutularak, σ gerilmelerinin değerleri aşağıdaki denge denkleminde yerine konulursa;

$$M = \int_{-d_u}^{d_u} \sigma y dF = \int_{-d_u}^{d_u} \sigma b(y) y dy \quad (2.37)$$

eğilme momenti için denklem 2.38 elde edilir.

$$M = E \frac{d\varphi}{ds} \int_{-\eta}^{\eta} b(y) y^2 dy + 2 \sigma_a \int_{\eta}^{d/2} b(y) y dy \quad (2.38)$$

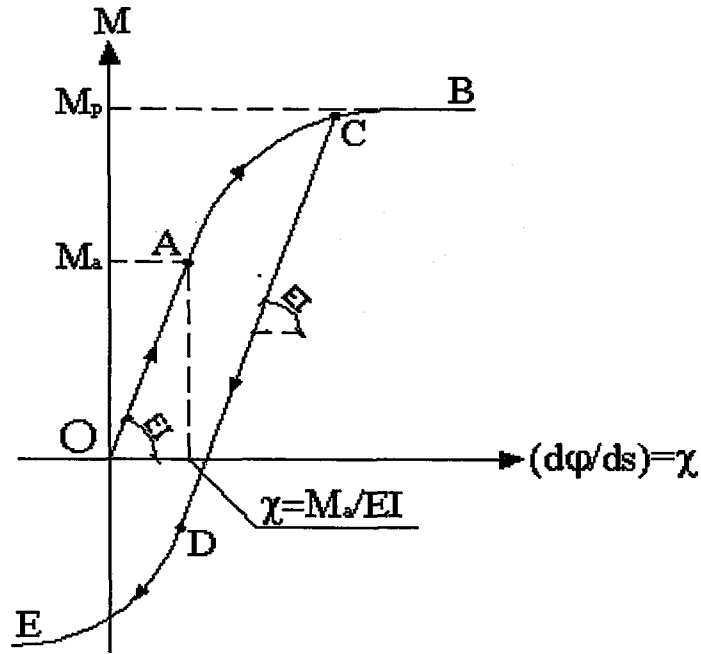
Bu bağıntıdaki η , plastik şekildeğiştirmelerin başladığı liflerin kesitin ağırlık merkezinden geçen yatay eksene olan uzaklıklarını göstermektedir.

Kesite etkiyen eğilme momenti daha da artarak M_p sınır değerine eşit olunca χ eğriliği sonsuza gider, diğer bir deyişle kesit akar. Akma (kırılma) şartının eğilme momenti ve eğrilik cinsinden ifadesi $M - M_p = 0$ veya $d\varphi/ds - \infty = 0$ şeklindedir. Kesitin elastoplastik olarak taşıyabileceği en büyük M_p eğilme momenti yukarıdaki formölde $\eta = 0$ konulmasıyla aşağıdaki şeklinde hesaplanır:

$$M_p = 2 \sigma_a \int_0^{d/2} b(y) y dy = \sigma_a W_p \quad (2.39)$$

Burada W_p çekme ve basınç bölgelerinin kesitin ağırlık merkezinden geçen yatay eksene göre statik momentleri toplamını göstermekte ve plastik mukavemet momenti adını almaktadır.

İdeal elastoplastik malzemeden yapılmış kesitlere ait şematik $M - \chi$ diyagramı şekil 2.14'de verilmiştir. Diyagramdan görüldüğü gibi, yükleme eğrisi O-A doğru parçası ile A-B eğrisinden oluşmaktadır.



Şekil 2.14 Eğilme Momenti Tesiri Altındaki Kesitlerde Gerilme Yayılışı

Kesitin elastoplastik şekildeğiştirmesine karşı gelen A-B eğrisi $M = M_p$ doğrusuna asimptot olmaktadır. Diyagramın C gibi bir noktasından sonra kesite ters yönde eğilme momenti uygulanırsa; $M - \chi$ diyagramı C-D-E boşaltma eğrisini izler. Boşaltma eğrisi C-D bölgesinde bir doğru parçası şeklinde iken, D noktasından sonra eğrisel olarak devam etmektedir.

İdeal elastoplastik malzemedan yapılmış bazı sistemlerde şekildeğiştirmelerin sonsuza kadar artmasına izin verilmeyebilir. Bu gibi hallerde, yukarıda elde edilen eğilme momenti eğrilik bağıntısı aynen kullanılabilirle beraber, akma şartının

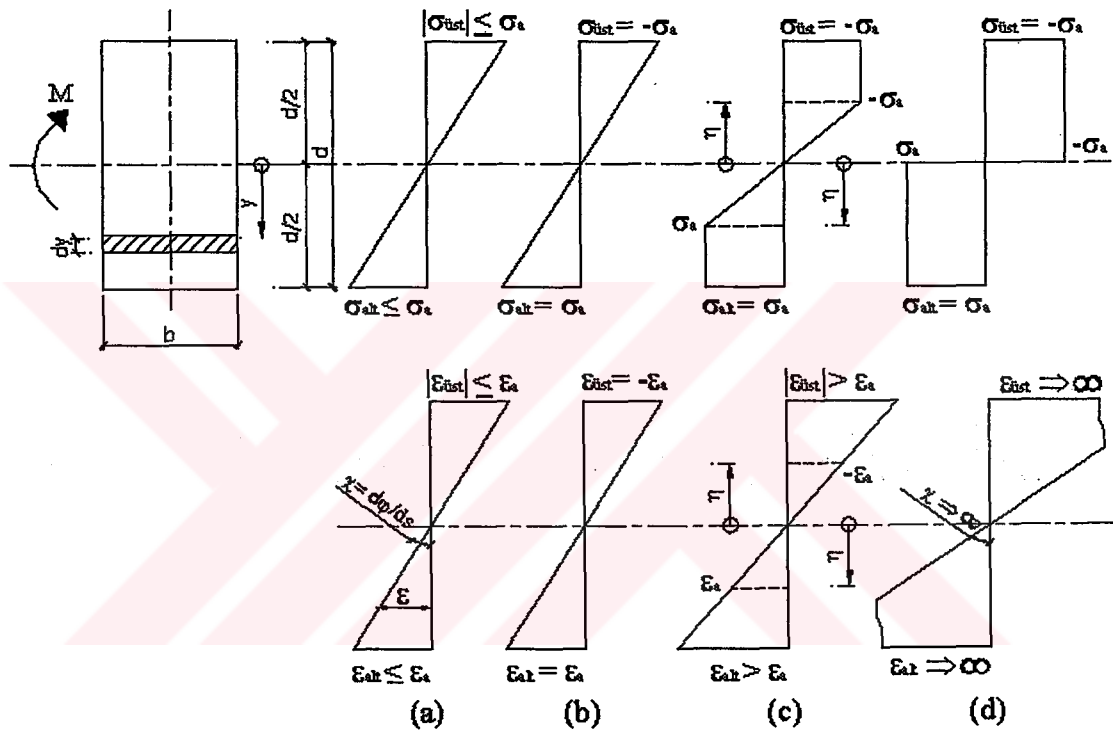
$$\frac{d\varphi}{ds} - \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)_{\text{maks}} = 0 \quad (2.40)$$

şeklinde olduğu ve $M - \chi$ bağıntısının bu sınıra kadar yürürlükte olduğu dikkate alınmalıdır. Burada $\left(\frac{d\varphi}{ds} \right)_{\text{maks}}$ kabul edilebilen en büyük eğrilği göstermektedir.

2.5 Dikdörtgen ve I Kesitler İçin Plastik Moment Değerlerinin Eldesi

2.5.1 Dikdörtgen Kesitler

İdeal elastoplastik malzemeden yapılmış bir dikdörtgen kesitte, eğilme momentinden meydana gelen σ ve ε yayılışları Şekil 2.15’ de görülmektedir (Arda & Uzgider, 1986).



Şekil 2.15 Eğilme Momenti Tesiri Altındaki Dikdörtgen Kesitlerde Gerilme Yayılışı

Eğilme momentinin küçük değerleri için kenar liflerdeki gerilmeler σ_a akma gerilmesinden küçük olduğu Şekil 2.15.a’da görülmektedir. Bu durumda kesitin şekildeğiştirmesi lineer elastiktir ve eğrilik için denklem 2.22 geçerlidir. M_a elastik sınır momenti dikdörtgen kesitler için denklem 2.41 ile hesaplanır;

$$M_a = \sigma_a W = \sigma_a \frac{b d^2}{6} \quad (2.41)$$

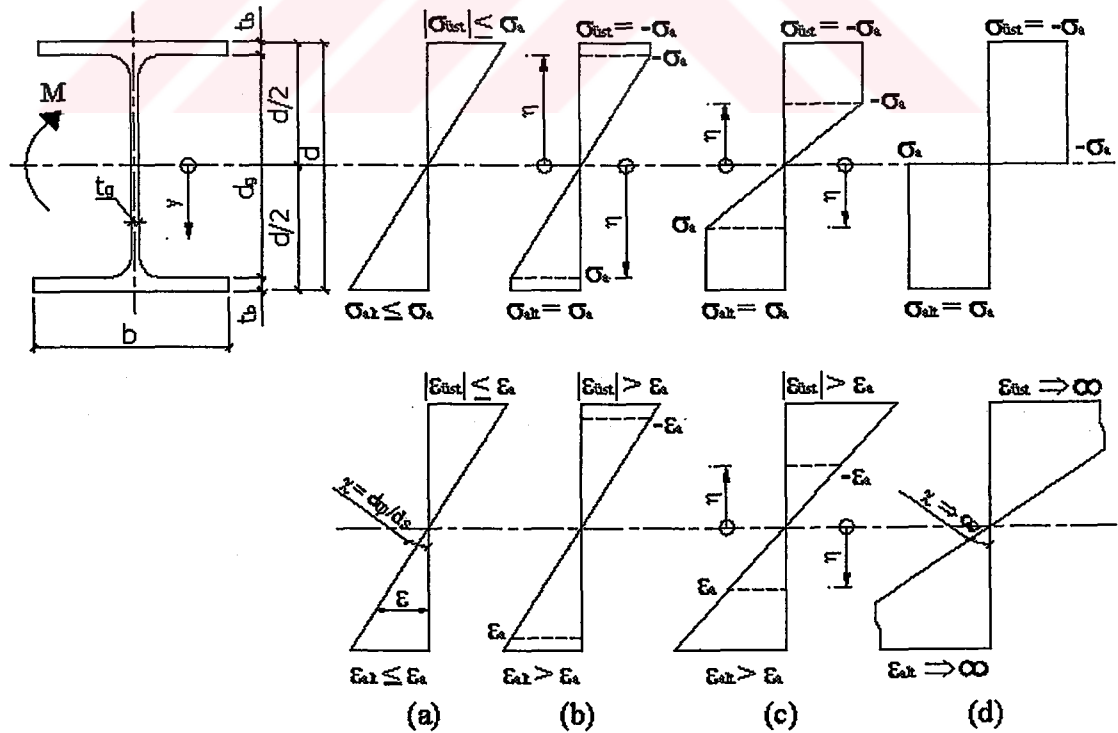
$M > M_a$ için kesitin alt ve üst liflerinde plastik şekil değiştirmelerin oluşması Şekil 2.15.c'de, Şekil 2.15.d'de ise; eğilme momenti artmaya devam ederek plastik moment adı verilen sınır değere erişince $\chi \rightarrow \infty$ olduğu ve kesitin moment taşıma kapasitesi sona erdiği görülmektedir. Dikdörtgen kesit için plastik moment değeri denklem 2.39 kullanılarak elde edilebilir:

$$M_p = 2 \sigma_a \int_0^{d/2} b y dy = 2 \sigma_a b \frac{(d/2)^2}{2} = \sigma_a \frac{b d^2}{4} \quad (2.42)$$

İşlemler sonucu $M_p = \sigma_a \frac{b d^2}{4}$ şeklinde bulunur. Burada, W_p dikdörtgen kesit için plastik mukavemet momenti değeri; $W_p = \frac{b d^2}{4}$ şeklinde ifade edilir.

2.5.2 I Kesitler

Gövde levhası düzlemindeki eğilme momenti ile zorlanan, ideal elastoplastik malzemeden yapılmış simetrik I kesitli çubuklarda meydana gelen σ ve ϵ yayılışları Şekil 2.16'da görülmektedir (Arda & Uzgider, 1986).



Şekil 2.16 Eğilme Momenti Tesiri Altındaki I Kesitlerde Gerilme Yayılışı

Şekildeğiştirmelerin lineer elastik olduğu değerler için kenar liflerdeki gerilmeler σ_a akma gerilmesinden küçük olduğu Şekil 2.16.a'da görülmektedir. Bu durumda eğrilik için denklem 2.22 geçerlidir. M_a elastik sınır momenti, I kesitler için; $I = \frac{1}{12} [b d^3 - (b - t_g)(b - 2t_b)^3]$ ve $W = \frac{I}{(d/2)} = \frac{2I}{d}$ olmak üzere denklem 2.43 ile hesaplanır:

$$M_a = \sigma_a W = \sigma_a \frac{2I}{d} \quad (2.43)$$

$M > M_a$ için kesitin alt ve üst liflerinde plastik şekildeğiştirmeler oluşur. Şekil 2.16.b'de görüldüğü gibi önce üst ve alt başlık plastikleşir ve moment arttıkça plastikleşmenin gövdeye yayıldığı da Şekil 2.16.c'de görülmektedir. Eğilme momenti artmaya devam ederek I kesiti için plastik moment sınır değerine erişince $\chi \rightarrow \infty$ olmasıyla kesitin moment taşıma kapasitesi sona erer. Bu olay Şekil 2.16.d'de gösterilmiştir. I kesitler için plastik moment değeri denklem 2.39 kullanılarak elde edilebilir:

$$M_p = 2 \sigma_a \left(\int_0^{d_g/2} t_g y dy + \int_{d_g/2}^{d/2} b y dy \right) \quad (2.44)$$

$$M_p = 2 \sigma_a \left[t_g \left(\frac{1}{2} \left(\frac{d_g}{2} \right)^2 - 0 \right) + b \left(\frac{1}{2} \left(\frac{d}{2} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{d_g}{2} \right)^2 \right) \right] \quad (2.45)$$

$$M_p = \sigma_a \left[t_g \frac{d_g^2}{4} + b \left(\frac{d^2}{4} - \frac{d_g^2}{4} \right) \right] \quad (2.46)$$

Burada, W_p I kesitler için plastik mukavemet momenti değerini vermektedir ve

$$W_p = \left[t_g \frac{d_g^2}{4} + b \left(\frac{d^2}{4} - \frac{d_g^2}{4} \right) \right] \quad (2.47)$$

şeklinde ifade edilir.

2.6 Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Etkisindeki Çubuklar

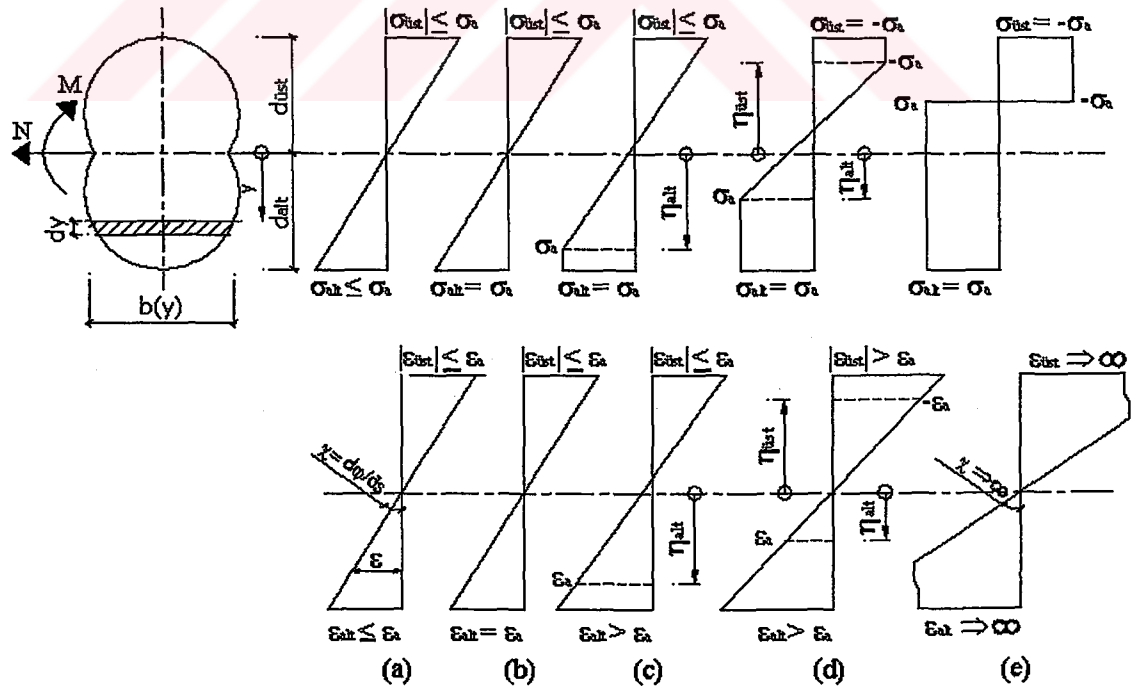
Eğilme momenti ve normal kuvvetin birlikte etki ettiği, ideal elastoplastik malzemeden yapılmış çubuklarda, kesit tesirlerinin değerlerine bağlı olarak; Şekil 2.17 a,b,c'deki gibi üç farklı gerilme yayılımı meydana gelebilir (Çakıroğlu & Özer, 1980).

Kesit tesirlerinin küçük değerleri için şekildeğiştirmeler lineer elastiktir. Bütün liflerdeki gerilmenin σ_a akma gerilmesine eşit veya daha küçük olduğu, bu duruma ait kesit tesiri şekildeğiştirme bağıntıları aşağıdaki gibidir:

$$\frac{du}{ds} = \frac{N}{EF} \quad (2.48)$$

$$\frac{d\phi}{ds} = \chi = \frac{M}{EI} \quad (2.49)$$

Eğilme momenti ve normal kuvvet artarak alt veya üst kenar liflerinin birinde $\sigma = \sigma_a$ olur ve birinci gerilme yayılımı sona erer. Bu durum Şekil 2.17.b'de görülmektedir.



Şekil 2.17 Eksenel Kuvvet ve Eğilme Momenti Tesiri Altındaki Kesitlerde Gerilme Yayılımı

Kesit tesirlerinin daha büyük değerleri için, önce alt veya üst kenar liflerin birinde, sonra her iki kenar lifte plastik şekildeğiştirmeler meydana gelir. Bu iki duruma ait gerilme yayılımı genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\sigma = -\sigma_a \quad (y < -\eta) \quad (2.50)$$

$$\sigma = E \varepsilon(y) \quad (-\eta \leq y \leq \eta) \quad (2.51)$$

$$\sigma = \sigma_a \quad (\eta < y) \quad (2.52)$$

ε birim boy değişimlerinin; $\varepsilon(y) = \frac{du}{ds} + \frac{d\varphi}{ds} y$ olduğu göz önünde tutularak

$$N = \int \sigma dF = \int_{-d_{üst}}^{d_{alt}} \sigma b(y) dy \quad (2.53)$$

$$M = \int \sigma y dF = \int_{-d_{üst}}^{d_{alt}} \sigma b(y) y dy \quad (2.54)$$

denge denkleminde yerine konursa, kesit tesirleri için aşağıdaki bağıntılar elde edilir:

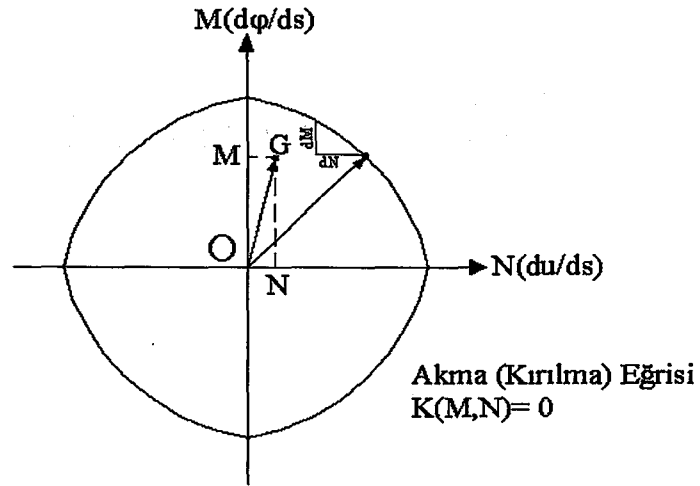
$$N = -\sigma_a \int_{-d_{üst}}^{\eta_{üst}} b(y) dy + E \int_{-\eta_{üst}}^{\eta_{alt}} \left(\frac{du}{ds} + \frac{d\varphi}{ds} y \right) b(y) dy + \sigma_a \int_{\eta_{alt}}^{d_{alt}} b(y) dy \quad (2.55)$$

$$M = -\sigma_a \int_{-d_{üst}}^{\eta_{üst}} b(y) y dy + E \int_{-\eta_{üst}}^{\eta_{alt}} \left(\frac{du}{ds} + \frac{d\varphi}{ds} y \right) b(y) y dy + \sigma_a \int_{\eta_{alt}}^{d_{alt}} b(y) y dy \quad (2.56)$$

Bu bağıntılardaki η_{alt} ve $\eta_{üst}$, plastik şekildeğiştirmelerin başladığı üst ve alt liflerin kesitin ağırlık merkezinden geçen yatay eksene olan uzaklıklarını göstermektedir. Yukarıda elde edilen ifadelerde, eğilme momenti alt liflerde uzama meydana getirecek yönde olduğu gözönünde tutulmuştur. Bu durum Şekil 2.17'de görülmektedir. Kesite etkiyen tesirler daha da artarak $K_1(M,N)=0$ sınır değerlere eşit olunca şekildeğiştirmeler sonsuza gider, diğer bir deyişle kesit akar.

Kesit tesiri ve şekildeğiştirme durumlarının geometrik olarak gösterilmesi için $M\left(\frac{d\varphi}{ds}\right), N\left(\frac{du}{ds}\right)$ dik koordinat sisteminden yararlanılır. Bu koordinat sisteminde

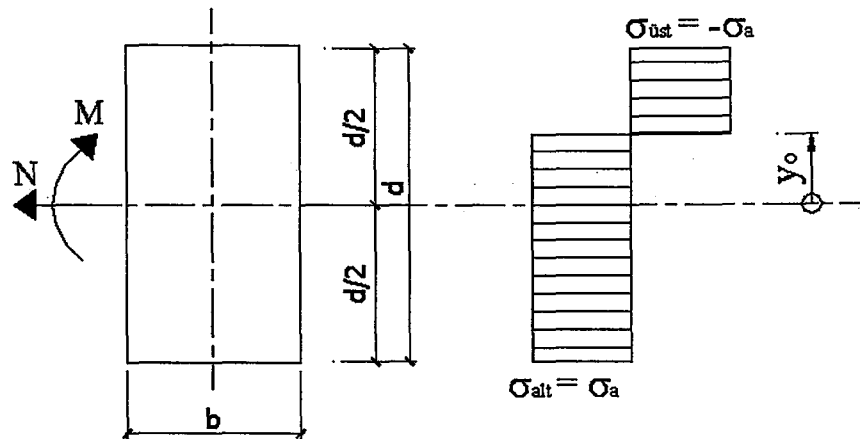
$K_1(M,N)=0$ akma şartı kapalı bir eğri göstermektedir. Bu eğriye akma (kırılma) eğrisi adı verilir (Arda & Uzgider, 1986).



Şekil 2.18 Akma (Kırılma) Eğrisi

Şekil 2.18'de G noktası ile temsil edilen koordinatları M ve N olan bir kesit tesiri durumu verilmiştir. G noktasının akma eğrisi içinde bulunması plastik şekil değişmelerin sonlu olduğunu ifade eder. G noktası akma eğrisi üzerinde olursa, kesitte sonsuz plastik şekildeğiştirmeler meydana gelecektir. Kesit tesiri durumunun akma eğrisinin dışına çıkması söz konusu değildir (Çakıroğlu & Özer, 1980).

2.6.1 Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Etkisindeki Dikdörtgen Kesitli Çubuklar İçin Akma Bağıntılarının Eldesi



Şekil 2.19 Eksenel Kuvvet ve Eğilme Momenti Tesiri Altında Dikdörtgen Kesitlerde Plastik Gerilme Dağılımı

Normal kuvvet ve eğilme momenti etkisindeki ideal elastoplastik malzemenin yapılmış dikdörtgen kesitlere ait akma (kırılma) bağıntıları denklem 2.53 ve denklem 2.54 kullanılarak elde edilebilir. Plastikleşme momentini veren diyagram iki birleşene ayrılabilir. Diyagramın bir parçası yalnız eğilme momentini, diğeri yalnız normal kuvveti vermektedir.

Normal kuvvet için; $N_u = 2 \sigma_a \int_0^{y_0} b dy$ işlemi yapılırsa; N_u kesit zoru değeri denklem 2.57 ile gösterilebilir. Benzer şekilde eğilme momenti için $M_u = 2 \sigma_a \int_0^{d/2} b y dy$ işlemi yapılırsa; M_u kesit zoru değeri denklem 2.58 ile gösterilebilir.

$$N_u = 2 \sigma_a b y_0 \quad (2.57)$$

$$M_u = \sigma_a b \left(\frac{d^2}{4} - y_0^2 \right) \quad (2.58)$$

İdeal elastoplastik malzemenin yapılmış dikdörtgen kesit için plastikleşme normal kuvveti ve plastikleşme eğilme momenti değerleri denklem 2.33 ve denklem 2.42 kullanılarak elde edilmiştir. Buradan; N_u/N_p oranlanır:

$$\frac{N_u}{N_p} = \frac{2 \sigma_a b y_0}{\sigma_a b d} = \frac{2 y_0}{d} \quad (2.59)$$

$$y_0 = \frac{d}{2} \left(\frac{N_u}{N_p} \right) \quad (2.60)$$

Benzer şekilde M_u/M_p oranı kurulur ve y_0 yerine denklem 2.60 yazılır:

$$\frac{M_u}{M_p} = \frac{\sigma_a b d}{\sigma_a \frac{b d^2}{4}} = \frac{d^2 - 4 y_0^2}{d^2} = 1 - \frac{4 y_0^2}{d^2} \quad (2.61)$$

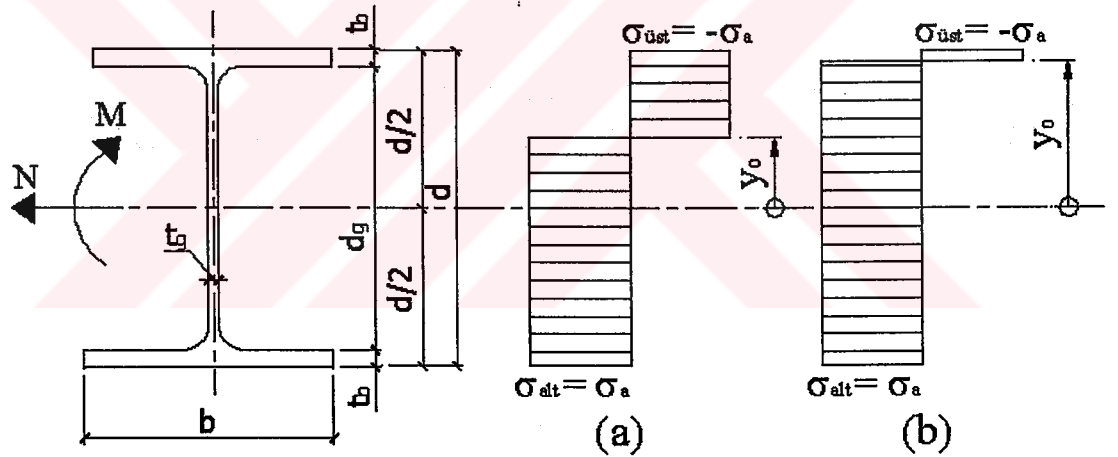
Kesitin taşıyabileceği M_u ve N_u kesit zorlarını bağlayan etkileşim eğrisinin denklemi

$\frac{M_u}{M_p} = 1 - \left(\frac{N_u}{N_p} \right)^2$ elde edilir. Dikdörtgen kesitler için akma (kırılma) şartını ifadesi denklem 2.62 şeklinde yazılabilir:

$$\frac{M_u}{M_p} + \left(\frac{N_u}{N_p} \right)^2 - 1 = 0 \quad (2.62)$$

2.6.2 Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Etkisindeki x-x Eksenine Göre Eğilen Çift Simetrlili I Kesitli Çubuklar İçin Akma Bağntılarının Eldesi

x-x eksenine göre eğilen çift simetrlili I kesitlerinde kesit geometrisinin süreksiz olması nedeniyle akma şartı iki ayrı fonksiyonla ifade edilebilmektedir (Arda & Uzgider, 1986).



Şekil 2.20 Eksenel Kuvvet ve Eğilme Momenti Tesiri Altında x-x Eksenine Göre Eğilen Çift Simetrlili I Kesitlerde Plastik Gerilme Dağılımı

2.6.2.1 Tarafsız Eksenin Gövdeden Geçmesi Durumu

Şekil 2.20.a'da görüldüğü üzere; normal kuvvetin küçük, eğilme momentinin büyük olduğu hallerde tarafsız eksen gövde üzerindedir (Çakıroğlu & Özer, 1980). Bu durumda aşağıdaki denklemler kullanılabilir:

$$N_u = 2 \sigma_a t_g \int_0^{y_0} dy \quad (2.63)$$

$$N_u = 2 \sigma_a t_g y_0 \quad (2.64)$$

$$M_u = 2 \sigma_a \int_{y_0}^{d_g/2} t_g y dy + 2 \sigma_a \int_{d_g/2}^{d/2} b y dy \quad (2.65)$$

$$M_u = \sigma_a \left[t_g \left(\frac{d_g^2}{4} - y_0^2 \right) + b \left(\frac{d^2}{4} - \frac{d_g^2}{4} \right) \right] \quad (2.66)$$

x-x eksenine göre eğilen çift simetrlili I kesitin plastikleşme normal kuvvet değeri ve plastik eğilme momenti değeri $N_p = \sigma_a F$ ve $M_p = \sigma_a W_p$ ifadeleri kullanılarak elde edilir:

$$N_p = \sigma_a (2 b t_b + t_g d_g) \quad (2.67)$$

$$M_p = \sigma_a \left[\frac{t_g d_g^2}{4} + b \left(\frac{d^2}{4} - \frac{d_g^2}{4} \right) \right] \quad (2.68)$$

N_u/N_p oranı F alanına bağlı olarak yazılır ve y_0 bu orandan çekilir:

$$\frac{N_u}{N_p} = \frac{2 \sigma_a t_g y_0}{\sigma_a F} = \frac{2 t_g y_0}{F} \quad (2.69)$$

$$y_0 = \frac{F}{2 t_g} \frac{N_u}{N_p} \quad (2.70)$$

Bu denklemden elde edilen y_0 ifadesi M_u denkleminde yazılır:

$$M_u = \sigma_a \left[b \left(\frac{d^2}{4} - \frac{d_g^2}{4} \right) + t_g \left(\frac{d_g^2}{4} - \frac{F^2}{4 t_g^2} \frac{N_u^2}{N_p^2} \right) \right] \quad (2.71)$$

M_u denklemini ile M_p denklemini taraf tarafa çıkartırsak;

$$M_u - M_p = -\sigma_a \frac{t_g d_g^2}{4} + \sigma_a t_g \left[\frac{d_g^2}{4} - \frac{F^2}{4 t_g^2} \left(\frac{N_u}{N_p} \right)^2 \right] \quad (2.72)$$

elde edilir. Denklem düzenlenirse tarafsız eksenin I kesitini gövdeden kestiği durum için akma (kırılma) denklemi olan denklem 2.74 elde edilmiş olur:

$$M_u = M_p - \sigma_a \frac{F^2}{4t_g} \left(\frac{N_u}{N_p} \right)^2 \quad (2.73)$$

$$\frac{M_u}{M_p} = 1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_a W_p} \frac{F^2}{4t_g} \left(\frac{N_u}{N_p} \right)^2 \quad (2.74)$$

2.6.2.2 Tarafsız Eksenin Başlıklardan Birinden Geçmesi Durumu

Şekil 2.20.b'de görüldüğü üzere; normal kuvvetin büyük, eğilme momentinin küçük olduğu hallerde tarafsız eksen başlık üzerindedir (Çakıroğlu & Özer, 1980). Bu durumda aşağıdaki denklemler kullanılabilir:

$$N_u = 2 \sigma_a t_g \int_0^{d_g/2} dy + \sigma_a b \int_{d_g/2}^{y_0} dy \quad (2.75)$$

$$N_u = 2 \sigma_a t_g \frac{d_g}{2} + 2 \sigma_a b \left(y_0 - \frac{d_g}{2} \right) \quad (2.76)$$

$$N_u = \sigma_a (t_g d_g + 2 b y_0 - b d_g) \quad (2.77)$$

Elde edilen N_u denklemi profil kesit alanı F cinsinden yazılır:

$$N_u = \sigma_a [F - b(d - d_g) + 2 b y_0 - b d_g] \quad (2.78)$$

$$N_u = \sigma_a \left[F - 2 b \left(\frac{d}{2} - y_0 \right) \right] \quad (2.79)$$

$$M_u = 2 \sigma_a \int_{y_0}^{d/2} t_g y dy \quad (2.80)$$

$$M_u = \sigma_a b \left(\frac{d^2}{4} - y_0^2 \right) \quad (2.81)$$

x-x eksenine göre eğilen çift simetrlili I kesitin plastikleşme normal kuvvet ve plastik eğilme momenti değerleri $N_p = \sigma_a F$ ve $M_p = \sigma_a W_p$ ifadeleri kullanılarak elde edilir. N_u/N_p oranı F alanına bağlı olarak yazılır ve y_0 bu orandan çekilir:

$$\frac{N_u}{N_p} = \frac{\sigma_a \left[F - 2b \left(\frac{d}{2} - y_0 \right) \right]}{\sigma_a F} = 1 - \frac{2b}{F} \left(\frac{d}{2} - y_0 \right) \quad (2.82)$$

$$y_0 = \frac{d}{2} - \frac{F}{2b} \left(1 - \frac{N_u}{N_p} \right) \quad (2.83)$$

Bu denklemden elde edilen y_0 ifadesi M_u denkleminde yazılır:

$$M_u = \sigma_a b \left[\frac{d^2}{4} - \left(\frac{d}{2} - \frac{F}{2b} \left(1 - \frac{N_u}{N_p} \right) \right)^2 \right] \quad (2.84)$$

M_u/M_p oranı W_p plastik mukavemet momentine bağlı olarak yazılabilir:

$$\frac{M_u}{M_p} = \frac{\sigma_a b \left[\frac{d^2}{4} - \left(\frac{d}{2} - \frac{F}{2b} \left(1 - \frac{N_u}{N_p} \right) \right)^2 \right]}{\sigma_a W_p} \quad (2.85)$$

$$\frac{M_u}{M_p} = \frac{1}{W_p} \left\{ \frac{bd^2}{4} - \left[b \left(\frac{d^2}{4} - 2 \frac{d}{2} \frac{F}{2b} \left(1 - \frac{N_u}{N_p} \right) + \frac{F^2}{4b^2} \left(1 - \frac{N_u}{N_p} \right)^2 \right) \right] \right\} \quad (2.86)$$

$$\frac{M_u}{M_p} = \frac{F}{2 W_p} \left(1 - \frac{N_u}{N_p} \right) \left[d - \frac{F}{2b} \left(1 - \frac{N_u}{N_p} \right) \right] \quad (2.87)$$

Tarafsız eksenin I kesitini alt veya üst başlıklardan birinden kestiği durum için akma bağıntısı denklem 2.87 ile elde edilmiş olur. Her iki durumda elde edilen eğrilerin birleştirilmesiyle çift simetri eksenli I kesitlerin akma (kırılma) eğrisi çizilebilir.

Şekil 2.21’de çift simetri eksenli I kesitin gerçek akma davranışı ve TS 4561 ile LRFD yönetmeliklerince yapılan idealleştirmelere göre elde edilen eğriler gösterilmiştir.

TS 4561’de I kesitler için verilen akma şartları (TS 4561, 1985):

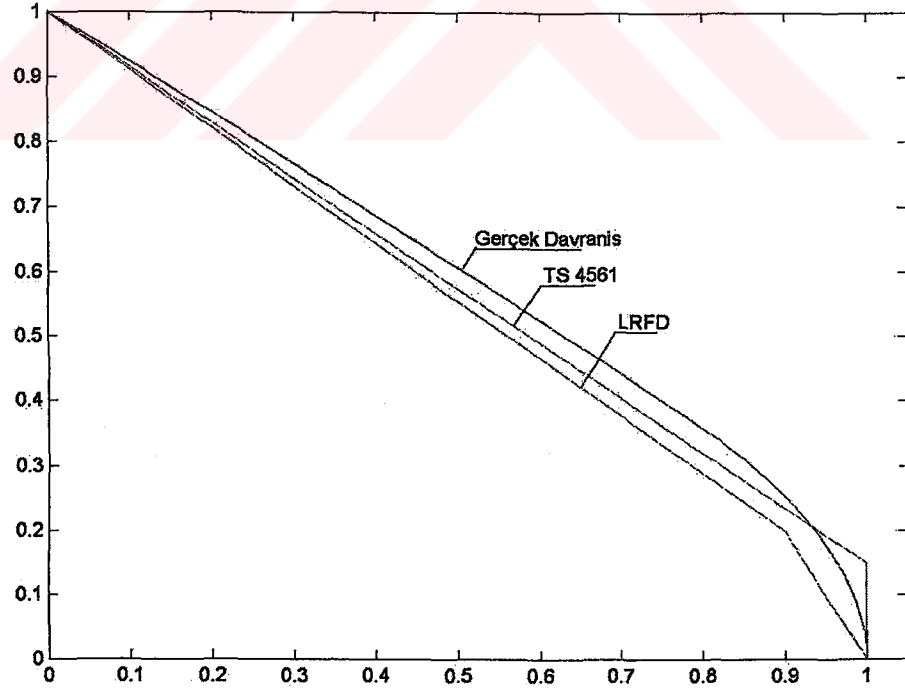
$$\frac{M}{M_p} = 1 \quad \left(\frac{N}{N_p} \leq 0.15 \right) \quad (2.88)$$

$$\frac{N}{N_p} + 0.85 \times \frac{M}{M_p} = 1 \quad \left(\frac{N}{N_p} > 0.15 \right) \quad (2.89)$$

LRFD’de I kesitler için verilen akma şartları (AISC, 1999):

$$\frac{N}{2N_p} + \frac{M}{M_p} = 1 \quad \left(\frac{N}{N_p} \leq 0.20 \right) \quad (2.90)$$

$$\frac{N}{N_p} + \frac{8}{9} \frac{M}{M_p} = 1 \quad \left(\frac{N}{N_p} > 0.20 \right) \quad (2.91)$$



Şekil 2.21 I Kesitler İçin Gerçek Akma Eğrisi ve TS 4561, LRFD gibi Yönetmeliklerce İdealleştirilmiş Akma Eğrileri

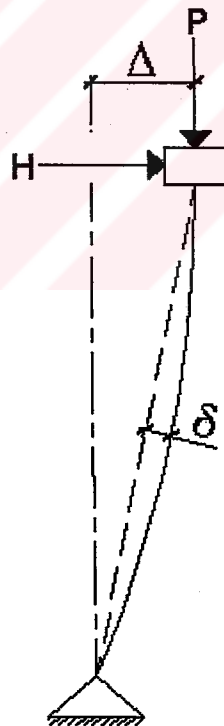
BÖLÜM ÜÇ

GEOMETRİ BAKIMINDAN NON-LİNEER

DAVRANIŞ

3.1 Geometri Bakımından Non-Linear Davranış Çeşitleri

Çelik, yüksek ve narin yapı sistemlerinde kullanılmasından dolayı geometri bakımından non-lineer davranış gösterir. Geometri bakımından lineer olmayan analiz ikinci mertebe analiz olarak da adlandırılır (Nethercot, 2000).

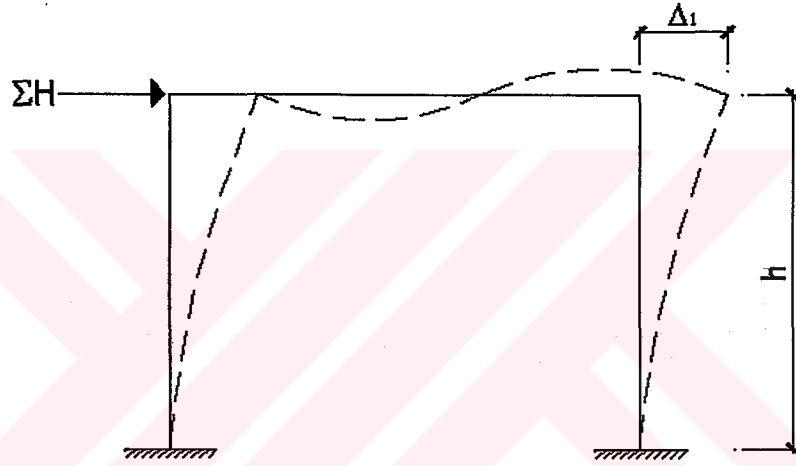


Şekil 3.1 P- δ ve P- Δ Etkileri

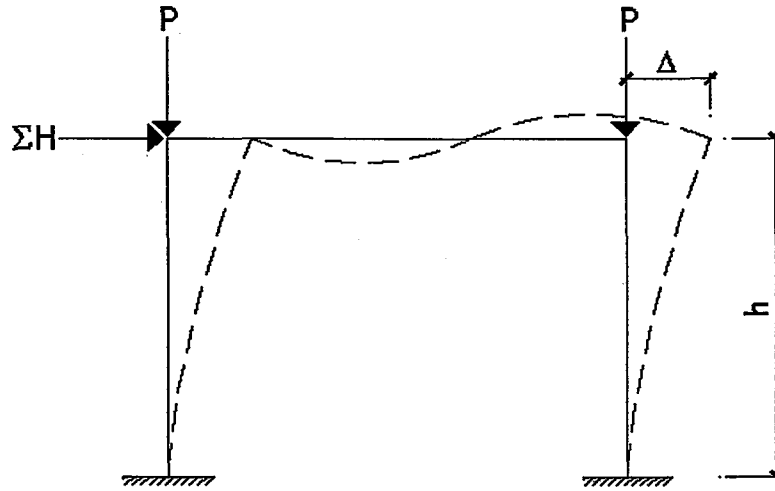
Şekil 3.1'den de görüldüğü gibi geometri bakımından lineer olmayan davranış iki ayrı kısımda incelenebilir.

3.1.1 P-Δ Etkisi

Bir çerçeveye etkiyen yatay kuvvetlerin toplamı ΣH ise, çerçeve bir denge konuma ulaşıncaya kadar ötelenir. Orjinal konuma göre oluşan bu ötelenme, birinci mertebe ötelenmedir ve Δ_1 olarak gösterilebilir (Şekil 3.2). Bu ΣH kuvvetlerine ek olarak, düşey ΣP kuvvetleri mevcutsa, bu kuvvetler ile Δ_1 deplasmanın birlikte mevcut olmasından dolayı çerçevede ek deplasman oluşmasına neden olacaktır. Son durum için olan ötelenme Δ ile gösterilir (Şekil 3.3). Yatay deplasmanın düşey yüklerin mevcut olmasından dolayı artmasına P-Δ etkisi adı verilir. P-Δ etkisi yapının rijitliğini ve stabilitesini önemli ölçüde etkiler (Chen & Lui, 1991).



Şekil 3.2 Sadece Yatay Yük Etkisi Altında Δ_1 Deplasmanı



Şekil 3.3 Düşey ve Yatay Yük Etkisi Altında Δ Deplasmanı

P-Δ etkisinin hesaplara dahil edilmesi, ikinci mertebe analiz veya yaklaşık P-Δ analizlerinden birinin uygulanmasıyla yapılabilir.

3.1.2 P- δ Etkisi

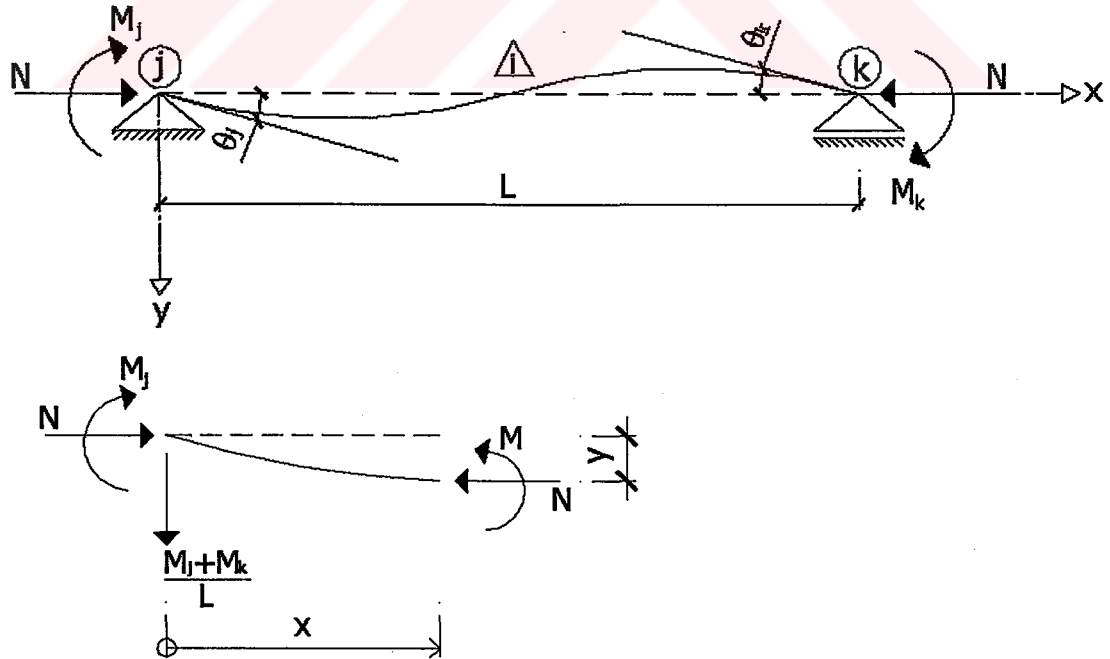
Düğüm noktası deplasmanları engellenmiş bir kiriş veya kolon elemanı göz önüne alındığında, elemana etkiyen yüklerden dolayı birinci mertebe deplasman ve moment oluşacaktır. Elemana etkiyen eksenel kuvvet birinci mertebe deplasmandan dolayı ek moment oluşmasına neden olur. Bu ek moment veya ikinci mertebe moment ile oluşan deplasman P- δ etkisi olarak adlandırılır (Chen & Lui, 1991).

3.2 Geometri Bakımından Non-Linear Analiz Yöntemleri

Geometrik non-lineer etkiler, kiriş ve kolon denklemlerinde kullanılan stabilite fonksiyonlarının veya sonlu elemanlar formülasyonu ile elde edilen geometrik rijitlik matrisinin kullanılması ile hesaplara dahil edilebilir (Chan, 2000).

3.2.1 Stabilite Fonksiyonlarının İkinci Mertebe Analize Dahil Edilmesi

Şekil 3.4'de elemanındaki "y" deplasman değeri ihmal edilebilecek kadar küçük olduğunda I. mertebe teorisi geçerli olmaktadır (Chen & Sohal, 2000).



Şekil 3.4 Stabilite Fonksiyonları Eldesi İçin Moment ve Normal Kuvvet Etkisindeki Eleman

$$M(x) = M_j - \frac{M_j + M_k}{L_i} x \quad (3.1)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI_i} \quad (3.2)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M_j}{EI_i} + \frac{M_j + M_k}{L_i} x \quad (3.3)$$

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{M_j}{EI_i} x + \frac{M_j + M_k}{EI_i L_i} \frac{x^2}{2} + c_1 \quad (3.4)$$

$$y = -\frac{M_j}{EI_i} \frac{x^2}{2} + \frac{M_j + M_k}{EI_i L_i} \frac{x^3}{6} + c_1 x + c_2 \quad (3.5)$$

Sınır koşulları $y(0) = y(L_i) = 0$ yazılabilir :

$$c_2 = 0 \quad (3.6)$$

$$c_1 = \frac{M_j}{EI_i} \frac{L_i}{2} - \frac{M_j + M_k}{EI_i} \frac{L_i}{6} \quad (3.7)$$

Her iki uç için $\theta_j = y'(0)$ ve $\theta_k = y'(L_i)$ yazılabilir:

$$\theta_j = \frac{M_j}{EI_i} \frac{L_i}{3} - \frac{M_k}{EI_i} \frac{L_i}{6} \quad (3.8)$$

$$\theta_k = -\frac{M_j}{EI_i} \frac{L_i}{6} + \frac{M_k}{EI_i} \frac{L_i}{3} \quad (3.9)$$

Elde edilen ifadeler matris formda gösterilebilir:

$$\begin{Bmatrix} M_j \\ M_k \end{Bmatrix} = \frac{EI_i}{L_i} \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_j \\ \theta_k \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

Eksenel kuvvet ve eksenel deformasyon arasındaki ilişki gözönüne alındığında i. elemanın temel kuvvetler vektörü ile temel deplasmanlar vektörü arasındaki temel rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur:

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{M}_j \\ \mathbf{M}_k \\ \mathbf{N} \end{Bmatrix} = \frac{\mathbf{E} \mathbf{I}_i}{\mathbf{L}_i} \begin{bmatrix} 4 & 2 & 0 \\ 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & A/I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_j \\ \theta_k \\ \delta \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

Burada; j ucundaki dönmeyi θ_j , k ucundaki dönmeyi θ_k ve δ eleman uç deplasmanını ifade etmektedir.

Temel kuvvetler vektörü $\{\mathbf{P}_i^T\}$ ile temel deplasmanlar vektörü $\{\delta_i^T\}$ arasındaki bağıntı temel rijitlik matrisi $[\mathbf{K}^T]$ olmak üzere elde edilen bağıntı kapalı formda aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\{\mathbf{P}_i^T\} = [\mathbf{K}^T] \times \{\delta_i^T\} \quad (3.12)$$

Düzlem çerçevenin i. elemanının temel kuvvetler vektörü $\{\mathbf{P}_i^T\}$ ile lokal kuvvetler vektörü $\{\mathbf{P}_i^L\}$ arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi yazılır:

$$\{\mathbf{P}_i^L\} = [\mathbf{L}_i] \times \{\mathbf{P}_i^T\} \quad (3.13)$$

Burada, $\mathbf{L}_i$ i. eleman boyunu göstermek üzere aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$[\mathbf{L}_i] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1/L & 1/L & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1/L & -1/L & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Aynı şekilde, düzlem çerçevenin i. elemanının temel deplasmanlar vektörü $\{\delta_i^T\}$ ile lokal deplasmanlar vektörü $\{\delta_i^L\}$ arasında aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

$$\{\delta_i^T\} = [\mathbf{L}_i]^T \times \{\delta_i^L\} \quad (3.15)$$

Denklem 3.12 ve denklem 3.13 bağıntıları ile denklem 3.15 birlikte yazılırsa lokal kuvvetler vektörü $\{P^L\}$ ile lokal deplasmanlar vektörü $\{\delta^L\}$ arasında aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$\{P_i^L\} = [L_i] \times [K^T] \times [L_i]^T \times \{\delta_i^L\} \quad (3.16)$$

Elde edilen bağıntı, $[K^L]$ lokal rijitlik matrisini göstermek üzere denklem 3.17 gibi yazılırsa, lokal kuvvetler $\{P_i^L\}$ ve lokal deplasmanlar $\{\delta_i^L\}$ arasındaki bağıntı elde edilmiş olur:

$$\{K^L\} = [L_i] \times [K^T] \times [L_i]^T \quad (3.17)$$

$$\{P_i^L\} = [K^L] \times \{\delta_i^L\} \quad (3.18)$$

Düzlem çerçevenin i. elemanının lokal ekseni ile global ekseni arasındaki açı α_i olmak üzere; lokal kuvvetlerden global kuvvetlere ve lokal deplasmanlardan global deplasmanlara, matris denklemlerle geçilmektedir (Çatal, 2002):

$$\{P_i\} = [\alpha_i] \times \{P_i^L\} \quad (3.19)$$

$$\{\delta_i\} = [\alpha_i] \times \{\delta_i^L\} \quad (3.20)$$

Burada $[\alpha_i]$, i. düzlem çerçeve elemanının transformasyon matrisi olup denklem 3.21 gibi yazılır:

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Denklem 3.18 ve denklem 3.19 bağıntıları ile denklem 3.20 birlikte yazılırsa; global kuvvetler vektörü $\{P_i\}$ ile global deplasmanlar vektörü $\{\delta_i\}$ arasında aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$\{P_i\} = [\alpha_i] \times [K^L] \times [\alpha_i]^T \times \{\delta_i\} \quad (3.22)$$

Elde edilen bağıntı, $[K]$ global rijitlik matrisini göstermek üzere; global kuvvetler $\{P_i\}$ ve global deplasmanlar $\{\delta_i\}$ arasındaki bağıntı elde edilmiş olur:

$$\{K\} = [\alpha_i] \times [K^L] \times [\alpha_i]^T \quad (3.23)$$

$$\{P_i\} = [K] \times \{\delta_i\} \quad (3.24)$$

$c = \cos \alpha_i$ ve $s = \sin \alpha_i$ olmak üzere; düzlem çerçevenin i. elemanının global rijitlik matrisi $[K]$ aşağıdaki gibi yazılır (Çatal, 2002):

$$\begin{aligned}
 [K] = & \begin{bmatrix}
 \frac{AE}{L_1}c^2 + \frac{12EI_x}{L_1^3}s^2 & \frac{AE}{L_1}c - \frac{12EI_x}{L_1^3}sc & -\frac{6EI_x}{L_1^2}s & -\frac{AE}{L_1}c^2 - \frac{12EI_x}{L_1^3}s^2 & -\frac{AE}{L_1}sc + \frac{12EI_x}{L_1^3}sc & -\frac{6EI_x}{L_1^2}s \\
 \frac{12EI_x}{L_1^3} & \frac{12EI_x}{L_1^3}c^2 & \frac{4EI_x}{L_1} & \frac{12EI_x}{L_1^3}s^2 & \frac{12EI_x}{L_1^3}sc & \frac{2EI_x}{L_1} \\
 -\frac{6EI_x}{L_1^2}s & \frac{6EI_x}{L_1^2}c & \frac{4EI_x}{L_1} & \frac{6EI_x}{L_1^2}s & \frac{6EI_x}{L_1^2}sc & \frac{2EI_x}{L_1} \\
 -\frac{AE}{L_1}c^2 - \frac{12EI_x}{L_1^3}s^2 & -\frac{AE}{L_1}sc + \frac{12EI_x}{L_1^3}sc & -\frac{AE}{L_1}c^2 - \frac{12EI_x}{L_1^3}s^2 & \frac{AE}{L_1}c^2 + \frac{12EI_x}{L_1^3}s^2 & -\frac{AE}{L_1}c^2 + \frac{12EI_x}{L_1^3}sc & \frac{AE}{L_1}sc - \frac{12EI_x}{L_1^3}sc \\
 -\frac{AE}{L_1}c + \frac{12EI_x}{L_1^3}sc & \frac{AE}{L_1}s^2 - \frac{12EI_x}{L_1^3}c^2 & -\frac{AE}{L_1}sc + \frac{12EI_x}{L_1^3}sc & \frac{AE}{L_1}sc - \frac{12EI_x}{L_1^3}sc & -\frac{AE}{L_1}s^2 + \frac{12EI_x}{L_1^3}c^2 & -\frac{AE}{L_1}c + \frac{12EI_x}{L_1^3}sc \\
 -\frac{6EI_x}{L_1^2}s & \frac{6EI_x}{L_1^2}c & \frac{6EI_x}{L_1^2} & \frac{6EI_x}{L_1^2}s & \frac{6EI_x}{L_1^2}c & \frac{4EI_x}{L_1}
 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{3.25}$$

Şekil 3.4’de kiriş elemanın için “ y ” deplasman değeri ihmal edilmez ise,
II. mertebe teorisi geçerli olur (Chen & Sohal, 2000):

$$M(x) = M_j - \frac{M_j + M_k}{L_i} x + P y \quad (3.26)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M(x)}{E I_i} \quad (3.27)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M_j}{E I_i} + \frac{M_j + M_k}{L_i} x - \frac{N y}{E I_i} \quad (3.28)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{N}{E I_i} y = -\frac{M_j}{E I_i} + \frac{M_j + M_k}{E I_i L_i} x \quad (3.29)$$

$$\alpha^2 = \frac{N}{E I_i} \quad (3.30)$$

$$\rho = L_i \sqrt{\frac{N}{E I_i}} \quad (3.31)$$

$$y = A \sin(\rho x) + B \cos(\rho x) - \frac{M_j}{E I_i \rho^2} + \frac{M_j + M_k}{E I_i L_i \cdot \rho^2} x \quad (3.32)$$

Sınır koşulları $y(0) = y(L_i) = 0$ yazılabilir :

$$A = -\frac{1}{E I_i \rho^2 \sin(\rho L_i)} [M_j \cos(\rho L_i) + M_k] \quad (3.33)$$

$$B = \frac{M_j}{E I_i \rho^2} \quad (3.34)$$

İfadeler düzenlenir:

$$y = -\frac{1}{E I_i \rho^2} \left[\frac{\cos(\rho L_i)}{\sin(\rho L_i)} \sin(\rho x) - \cos(\rho x) - \frac{x}{L_i} + 1 \right] M_j - \frac{1}{E I_i \rho^2} \left[\frac{1}{\sin(\rho L_i)} \cdot \sin(\rho x) - \frac{x}{L_i} \right] M_k \quad (3.35)$$

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1}{E I_i \rho^2} \left[\frac{\cos(\rho L_i)}{\sin(\rho L_i)} \cos(\rho x) + \sin(\rho x) - \frac{1}{\rho L_i} \right] M_j - \frac{1}{E I_i \rho} \left[\frac{1}{\sin(\rho L_i)} \cos(\rho x) - \frac{1}{\rho L_i} \right] M_k \quad (3.36)$$

Her iki uç için $\theta_j = y'(0)$ ve $\theta_k = y'(L_i)$ yazılabilir:

$$\theta_j = \frac{L_i}{E I_i} \left[\frac{\sin(\rho L_i) - \rho L_i \cos(\rho L_i)}{(\rho L_i)^2 \sin(\rho L_i)} \right] M_j + \frac{L_i}{E I_i} \left[\frac{\sin(\rho L_i) - \rho L_i}{(\rho L_i)^2 \sin(\rho L_i)} \right] M_k \quad (3.37)$$

$$\theta_k = \frac{L_i}{E I_i} \left[\frac{\sin(\rho L_i) - \rho L_i}{(\rho L_i)^2 \sin(\rho L_i)} \right] M_j + \frac{L_i}{E I_i} \left[\frac{\sin(\rho L_i) - \rho L_i \cos(\rho L_i)}{(\rho L_i)^2 \sin(\rho L_i)} \right] M_k \quad (3.38)$$

Elde edilen ifadeler matris formda gösterilebilir:

$$\begin{Bmatrix} M_j \\ M_k \end{Bmatrix} = \frac{E I_i}{L_i} \begin{bmatrix} m_j & m_k \\ m_k & m_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_j \\ \theta_k \end{Bmatrix} \quad (3.39)$$

Eksenel kuvvet ve eksenel deformasyon arasındaki ilişkisi gözönüne alındığında i. elemanın temel kuvvetler vektörü ile temel deplasmanlar vektörü arasındaki temel rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur:

$$\begin{Bmatrix} M_j \\ M_k \\ N \end{Bmatrix} = \frac{E I_i}{L_i} \begin{bmatrix} m_j & m_k & 0 \\ m_k & m_j & 0 \\ 0 & 0 & A/I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_j \\ \theta_k \\ \delta \end{Bmatrix} \quad (3.40)$$

Uygulanan kuvvetlerin basınç olması durumu için m_j ve m_k denklem 3.41 ve denklem 3.42'deki değerleri alır. Uygulanan kuvvetlerin çekme olması durumunda ise m_j ve m_k denklem 3.43 ve denklem 3.44'deki değerleri alır:

$$m_j = \frac{\rho \sin \rho - \rho^2 \cos \rho}{2 - 2 \cos \rho - \rho \sin \rho} \quad (N < 0) \quad (3.41)$$

$$m_k = \frac{\rho^2 - \rho \sin \rho}{2 - 2 \cos \rho - \rho \sin \rho} \quad (N < 0) \quad (3.42)$$

$$m_j = \frac{-\rho \sinh \rho + \rho^2 \cosh \rho}{2 - 2 \cosh \rho + \rho \sinh \rho} \quad (N > 0) \quad (3.43)$$

$$m_k = \frac{-\rho^2 + \rho \sinh \rho}{2 - 2 \cosh \rho + \rho \sinh \rho} \quad (N > 0) \quad (3.44)$$

Stabilite fonksiyonlarına göre elde edilen temel rijitlik matrisinden lokal ve global rijitlik matrisleri denklem 3.17 ve denklem 3.23 kullanılarak elde edilebilir.

3.2.1.1 Stabilite Fonksiyonlarının Rijitlik Matrisine Dahil Edilmesi

Stabilite fonksiyonları cinsinden yazılmış eleman rijitlik matrisi aşağıda gösterilmiştir (Chen & Lui, 1991):

$$[K] = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} \frac{A}{I} & 0 & 0 & -\frac{A}{I} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12}{L^2}\varphi_1 & \frac{6}{L}\varphi_2 & 0 & -\frac{12}{L^2}\varphi_1 & \frac{6}{L}\varphi_2 \\ 0 & \frac{6}{L}\varphi_2 & 4\varphi_3 & 0 & -\frac{6}{L}\varphi_2 & 2\varphi_4 \\ -\frac{A}{I} & 0 & 0 & \frac{A}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12}{L^2}\varphi_1 & -\frac{6}{L}\varphi_2 & 0 & \frac{12}{L^2}\varphi_1 & -\frac{6}{L}\varphi_2 \\ 0 & \frac{6}{L}\varphi_2 & 2\varphi_4 & 0 & -\frac{6}{L}\varphi_2 & 4\varphi_3 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

N kuvvetinin negatif olması durumunda;

$$\varphi_1 = \frac{(\alpha L)^3 \sin(\alpha L)}{12 \varphi_c} \quad (3.46)$$

$$\varphi_2 = \frac{(\alpha L)^2 (1 - \cos(\alpha L))}{6 \varphi_c} \quad (3.47)$$

$$\varphi_3 = \frac{(\alpha L)(\sin(\alpha L) - (\alpha L) \cos(\alpha L))}{4 \varphi_c} \quad (3.48)$$

$$\varphi_4 = \frac{(\alpha L)((\alpha L) - \sin(\alpha L))}{2 \varphi_c} \quad (3.49)$$

$$\varphi_c = 2 - 2 \cos(\alpha L) - (\alpha L) \sin(\alpha L) \quad (3.50)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{N}{EI}} \quad (3.51)$$

N kuvvetinin pozitif olması durumunda;

$$\varphi_1 = \frac{(\alpha L)^3 \sinh(\alpha L)}{12 \varphi_t} \quad (3.52)$$

$$\varphi_2 = \frac{(\alpha L)^2 (\cosh(\alpha L) - 1)}{6 \varphi_t} \quad (3.53)$$

$$\varphi_3 = \frac{(\alpha L) ((\alpha L) \cosh(\alpha L) - \sinh(\alpha L))}{4 \varphi_t} \quad (3.54)$$

$$\varphi_4 = \frac{(\alpha L) ((\alpha L) - \sin(\alpha L))}{2 \varphi_t} \quad (3.55)$$

$$\varphi_t = 2 - 2 \cosh(\alpha L) + (\alpha L) \sinh(\alpha L) \quad (3.56)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{N}{EI}} \quad (3.57)$$

alınabilir. Stabilité fonksiyonları, eksenel kuvvetin mevcut olduğu durumlarda elemandaki rijitlik değişiminin gözönüne alınmasını sağlar.

Elemandaki eksenel kuvvet sıfır ise; L'Hospital kuralının uygulanması ile $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = 1$ olur. Ancak küçük eksenel kuvvet değerleri için, stabilité fonksiyonları sayısal olarak anlamsız hale gelir (Kruger et al., 1995). Bu durumla karşılaşmamak ve de basınç ile çekme kuvvetleri için farklı matrisler kullanmamak için kuvvet seri açılımı kullanılabilir (Goto & Chen, 1987):

$$\varphi_1 = \frac{\left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)!} [(\alpha L)^2]^n \right\}}{12 \varphi_g} \quad (3.58)$$

$$\varphi_2 = \frac{\left\{ \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+2)!} [(\alpha L)^2]^n \right\}}{6 \varphi_g} \quad (3.59)$$

$$\varphi_3 = \frac{\left\{ \frac{1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(n+1)}{(2n+3)!} [(\alpha L)^2]^n \right\}}{4 \varphi_g} \quad (3.60)$$

$$\varphi_4 = \frac{\left\{ \frac{1}{6} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+3)!} [(\alpha L)^2]^n \right\}}{2 \varphi_g} \quad (3.61)$$

$$\varphi_g = \left\{ \frac{1}{12} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(n+1)}{(2n+4)!} [(\alpha L)^2]^n \right\} \quad (3.62)$$

Bu denklemlerdeki $(\alpha L)^2 = \frac{N L^2}{E I}$ ifadesi çekme için pozitif, basınç için negatif olmaktadır. Seriler ilk 10 terim için açılıp, sonuçlar stabilite fonksiyonları ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında aralarında önemli bir fark bulunmamaktadır (Chen & Lui, 1991).

Eğer eksenel kuvvet $-2 \leq \frac{N}{N_E} \leq 2$ (N_E : kolon elemanlardaki Euler yükü olmak üzere) sınırları arasında ise; φ_i parametreleri daha da basit fonksiyonlara indirgenebilir (Goto & Chen, 1987):

$$\varphi_1 = 1 + \frac{1}{10} (\alpha L^2) - \left[\frac{1.35110^{-4} (\alpha L)^2 + 0.095}{8.183 \pi^4 + \pi^2 (\alpha L)^2} \right] \quad (3.63)$$

$$\varphi_2 = 1 + \frac{1}{60} (\alpha L^2) - \left[\frac{1.35110^{-4} (\alpha L)^2 + 0.095}{8.183 \pi^4 + \pi^2 (\alpha L)^2} \right] \quad (3.64)$$

$$\varphi_3 = 1 + \frac{1}{30} (\alpha L^2) - \left[\frac{2.53310^{-4} (\alpha L)^2 + 0.136}{4 \pi^4 + \pi^2 (\alpha L)^2} + \frac{1.01310^{-4} (\alpha L)^2 + 0.071}{8.183 \pi^4 + \pi^2 (\alpha L)^2} \right] (\alpha L)^4 \quad (3.65)$$

$$\varphi_3 = 1 - \frac{1}{60} (\alpha L^2) - \left[\frac{5.06610^{-4} (\alpha L)^2 + 0.272}{4 \pi^4 + \pi^2 (\alpha L)^2} - \frac{2.02610^{-4} (\alpha L)^2 + 0.143}{8.183 \pi^4 + \pi^2 (\alpha L)^2} \right] (\alpha L)^4 \quad (3.66)$$

Bu denklemlerde de $(\alpha L)^2 = \frac{N L^2}{E I}$ ifadesi çekme için pozitif, basınç için negatif olmaktadır.

Yukarıdaki açılımlara alternatif olarak φ_i fonksiyonları Taylor Serisine açılabilir (Chen & Lui, 1991):

$$\varphi_1 = 1 + \frac{(\alpha L)^2}{10} - \frac{(\alpha L)^4}{8400} + \frac{(\alpha L)^6}{756000} - \frac{37(\alpha L)^8}{2328480000} + K \quad (3.67)$$

$$\varphi_2 = 1 + \frac{(\alpha L)^2}{60} - \frac{(\alpha L)^4}{8400} + \frac{(\alpha L)^6}{756000} - \frac{37(\alpha L)^8}{2328480000} + K \quad (3.68)$$

$$\varphi_3 = 1 + \frac{(\alpha L)^2}{30} - \frac{11(\alpha L)^4}{25200} + \frac{(\alpha L)^6}{108000} - \frac{509(\alpha L)^8}{2328480000} + K \quad (3.69)$$

$$\varphi_4 = 1 - \frac{(\alpha L)^2}{60} - \frac{13(\alpha L)^4}{25200} + \frac{11(\alpha L)^6}{756000} - \frac{907(\alpha L)^8}{2328480000} + K \quad (3.70)$$

Rijitlik matrisi P-delta etkilerini içerecek şekilde stabilite fonksiyonu cinsinden yazılır ve matris elemanları Taylor seri açılımının ilk iki terimi ile oluşturulabilir:

$$[K] = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} \frac{A}{I} & 0 & 0 & -\frac{A}{I} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12}{L^2} \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{10} \right) & \frac{6}{L} \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{60} \right) & 0 & -\frac{12}{L^2} \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{10} \right) & \frac{6}{L} \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{60} \right) \\ 0 & \frac{6}{L} \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{60} \right) & 4 \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{30} \right) & 0 & -\frac{6}{L} \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{60} \right) & 2 \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{60} \right) \\ \frac{A}{I} & 0 & 0 & -\frac{A}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12}{L^2} \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{10} \right) & -\frac{6}{L} \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{60} \right) & 0 & \frac{12}{L^2} \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{10} \right) & -\frac{6}{L} \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{60} \right) \\ 0 & \frac{6}{L} \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{60} \right) & 2 \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{60} \right) & 0 & -\frac{6}{L} \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{60} \right) & 4 \left(1 + \frac{(\alpha L)^2}{30} \right) \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

Denklem 3.71 ile gösterilen matris K_0 ve K_p gibi iki matris toplamı ($K = K_0 + K_p$) olarak gösterilebilir:

$$[K_0] = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} \frac{A}{I} & 0 & 0 & -\frac{A}{I} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & 0 & -\frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ 0 & \frac{6}{L} & 4 & 0 & -\frac{6}{L} & 2 \\ -\frac{A}{I} & 0 & 0 & \frac{A}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} & 0 & \frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} \\ 0 & \frac{6}{L} & 2 & 0 & -\frac{6}{L} & 4 \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

$$[K_p] = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6N}{5L} & \frac{N}{10} & 0 & -\frac{6N}{5L} & \frac{N}{10} \\ 0 & \frac{N}{10} & \frac{2NL}{15} & 0 & -\frac{N}{10} & -\frac{NL}{30} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6N}{5L} & -\frac{N}{10} & 0 & \frac{6N}{5L} & -\frac{N}{10} \\ 0 & \frac{N}{10} & -\frac{NL}{30} & 0 & -\frac{N}{10} & \frac{2NL}{15} \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

Burada denklem 3.72 ile ifade edilen matris birinci mertebe rijitlik matrisini temsil ederken, denklem 3.73 ile ifade edilen matris geometrik rijitlik matrisini temsil eder. İkinci matris olan K_p matrisi de iki alt matrise ayrılabilir:

$$[K_{p1}] = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N}{5L} & \frac{N}{10} & 0 & -\frac{N}{5L} & \frac{N}{10} \\ 0 & \frac{N}{10} & \frac{2NL}{15} & 0 & -\frac{N}{10} & -\frac{NL}{30} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{N}{5L} & -\frac{N}{10} & 0 & \frac{N}{5L} & -\frac{N}{10} \\ 0 & \frac{N}{10} & -\frac{NL}{30} & 0 & -\frac{N}{10} & \frac{2NL}{15} \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

$$[K_{p2}] = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N}{L} & 0 & 0 & -\frac{N}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{N}{L} & 0 & 0 & \frac{N}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

P- δ etkisi K_{p1} matrisi ile temsil edilirken, P- Δ etkisi ise; K_{p2} matrisi ile temsil edilmiştir (Chen & Lui, 1991). Daha ileri bir inceleme için K_{p1} matrisi iki matris toplamı ($K_{p1} = K'_{p1} + K''_{p1}$) şeklinde ifade edilebilir:

$$[K'_{p1}] = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N}{5L} & \frac{N}{10} & 0 & -\frac{N}{5L} & \frac{N}{10} \\ 0 & \frac{N}{10} & \frac{NL}{15} & 0 & -\frac{N}{10} & \frac{NL}{30} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{N}{5L} & -\frac{N}{10} & 0 & \frac{N}{5L} & -\frac{N}{10} \\ 0 & \frac{N}{10} & \frac{NL}{30} & 0 & -\frac{N}{10} & \frac{NL}{15} \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

$$[K''_{p1}] = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{NL}{15} & 0 & 0 & -\frac{NL}{15} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{NL}{15} & 0 & 0 & \frac{NL}{15} \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

Elde edilen rijitlik matrisi $K = K_0 + K_{p1}' + K_{p1}'' + K_{p2}$ şeklinde yazılabilir. Bu gösterimdeki ilk iki matris birlikte yazılır ve düzenlenirse denklem 3.78 elde edilir:

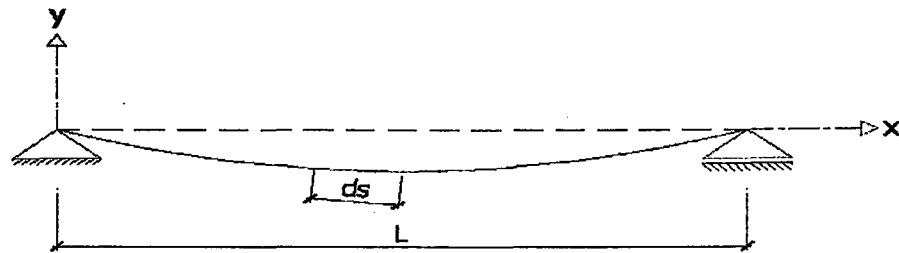
$$[K_0] + [K_{p1}'] = \frac{E \left[I \left(1 + \frac{NL^2}{60EI} \right) \right]}{L} \begin{bmatrix} \frac{A}{I} & 0 & 0 & -\frac{A}{I} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & 0 & -\frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ 0 & \frac{6}{L} & 4 & 0 & -\frac{6}{L} & 2 \\ -\frac{A}{I} & 0 & 0 & \frac{A}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} & 0 & \frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} \\ 0 & \frac{6}{L} & 2 & 0 & -\frac{6}{L} & 4 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

Eğer eleman, denk uç dönmelerine sahip ($\delta_3 \cong \delta_6$) çift eğrilikli bir eleman ise, elemandaki K_{p1}'' den oluşacak uç momentleri ihmal edilebilir. Denklem 3.78 ile ifade edilen matris, $P-\delta$ etkilerini kabul edilebilecek yaklaşıklıkta hesaplanmasını sağlarken; aynı zamanda işlemlerin basit ve hızlı bir yaklaşım sağlar (Chen & Lui, 1991).

$P-\Delta$ etkileri rijitlik matrisi kullanmadan, yaklaşık yöntemlerle hesaplanabildiğinden, denklem 3.78 ile ifade edilen matris ile yaklaşık $P-\delta$ etkilerinin hesaplanması yaklaşık ikinci mertebe analiz için yeterli olacaktır.

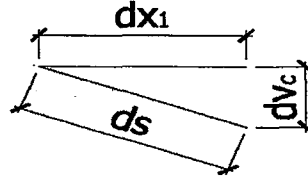
3.2.2 Sonlu Elemanlar (Enerji Denklemi) ile İkinci Mertebe Geometrik Rijitlik Matrisinin Elde Edilmesi

Şekil 3.5'de görüldüğü üzere basit bir kiriş eğilme etkisi altındadır.



Şekil 3.5 Eğilme Etkisi Altındaki Basit Kiriş

Şekil 3.5'deki basit kirişten ds büyüklüğünde bir diferansiyel parça alınırsa; Şekil 3.6'de görüldüğü gibi ds parçasının iki ucu arası yatay yönde dx_1 ve düşey yönde dv_c olacaktır.



Şekil 3.6 Eğilme Etkisindeki Basit Kirişten Alınan ds Parçası

Şekil 3.6'dan denklem 3.79 elde edilebilir:

$$ds = dx \sqrt{1 + \left(\frac{dv_c}{dx}\right)^2} \quad (3.79)$$

Küçük eğimler için $\frac{dv_c}{dx} \ll 1$ olduğundan dolayı denklemin $\sqrt{1 + \left(\frac{dv_c}{dx}\right)^2}$ ifadesine binom açılımı uygulanabilir. İfadede $\left(\frac{dv_c}{dx_1}\right)^4$ gibi yüksek mertebeli terimler ihmal edilirse $ds \approx dx_1 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dv_c}{dx_1}\right)^2\right]$ elde edilir. İfadelerin integrali alınırsa $\int ds \approx \int dx_1 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dv_c}{dx_1}\right)^2\right]$ elde edilir.

AB eğri parçası = $\int ds$ ve AB doğru parçası = $\int dx_1$ ile gösterilebilir:

$$\delta_y = \int ds - \int dx_1 \approx \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{dv_c}{dx_1}\right)^2 dx_1 \quad (3.80)$$

Küçük deplasmanlar için $dx_1 \approx dx$ olduğu düşünülebilir:

$$\delta_y = \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{dv_c}{dx}\right)^2 dx \quad (3.81)$$

Şekildeğiştirme enerjisindeki artış, kesme etkileri ihmal edildiğinde, eksenel ve eğilme şekildeğiştirme enerjisindeki artış ile karşılanır (Budynas, 1998):

$$\pi = U_a + U_b = \frac{1}{2} EI \int_0^L \left(\frac{d^2 v_c}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} N \int_0^L \left(\frac{dv_c}{dx} \right)^2 dx \quad (3.82)$$

Denklem 3.82, birinci mertebe etkilere karşılık gelen ilk kısım ve ikinci mertebe etkilere karşılık gelen ikinci kısım olarak ayrı ayrı incelenebilir.

3.2.2.1 Basit Kirişin Birinci Mertebe Etkiler İçin Enerji Denkleminin İncelenmesi

Basit kirişin deplasmanını ifade etmek için üçüncü dereceden bir fonksiyon seçilmiştir. Bu fonksiyonun türevi alındığında elde edilen ifade ise dönmeyi verir:

$$v(x) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 x^3 \quad (3.83)$$

$$\theta = \frac{dv}{dx} = a_2 + 2 a_3 x + 3 a_4 x^2 \quad (3.84)$$

Sınır şartları olan $x=0$ için $v(x)=0$; $\frac{dv}{dx}=0$ ve $x=L_i$ için $v(x)=0$; $\frac{dv}{dx}=0$ denklem yazılabilir:

$$v_j = a_1 \quad (3.85)$$

$$\theta_j = a_2 \quad (3.86)$$

$$v_k = a_1 + a_2 L_i + a_3 L_i^2 + a_4 L_i^3 \quad (3.87)$$

$$\theta_k = a_2 + 2 a_3 L_i + 3 a_4 L_i^2 \quad (3.88)$$

Denklem 3.85 ve denklem 3.86 ifadeleri denklem 3.87 ve denklem 3.88'de yazılabilir:

$$v_j = v_j + \theta_j L_i + a_3 L_i^2 + a_4 L_i^3 \quad (3.89)$$

$$\theta_k = \theta_j + 2 a_3 L_i + 3 a_4 L_i^2 \quad (3.90)$$

Denklemler a_3 ve a_4 için düzenlenebilir:

$$a_3 = \frac{3}{L_i^2} (v_k - v_j) + \frac{1}{L_i} (2\theta_j + \theta_k) \quad (3.91)$$

$$a_4 = \frac{2}{L_i} (v_j - v_k) + \frac{1}{L_i^2} (\theta_j + \theta_k) \quad (3.92)$$

Genel $v(x)$ denklemine a_1 , a_2 , a_3 ve a_4 terimleri yazılabilir:

$$v(x) = v_j + \theta_j x + \left[\frac{3}{L_i^2} (v_k - v_j) - \frac{1}{L_i} (2\theta_j + \theta_k) \right] x^2 + \left[\frac{2}{L_i^3} (v_j - v_k) + \frac{1}{L_i^2} (\theta_j + \theta_k) \right] x^3 \quad (3.93)$$

Denklem 3.93 açılır ve ifadeler düzenlenir:

$$v(x) = v_j + x \theta_j + \frac{3}{L_i^2} x^2 v_k - \frac{3}{L_i^2} x^2 v_j - \frac{2}{L_i} x^2 \theta_j - \frac{1}{L_i} x^2 \theta_k + \frac{2}{L_i^3} x^3 v_j - \frac{2}{L_i^3} x^3 v_k + \frac{1}{L_i^2} x^3 \theta_j + \frac{1}{L_i^2} x^3 \theta_k \quad (3.94)$$

$$v(x) = \left[1 - \frac{3}{L_i^2} x^2 + \frac{2}{L_i^3} x^3 \right] v_j + \left[x - \frac{2}{L_i} x^2 + \frac{1}{L_i^2} x^3 \right] \theta_j + \left[\frac{3}{L_i^2} x^2 - \frac{2}{L_i^3} x^3 \right] v_k + \left[\frac{1}{L_i^2} x^3 - \frac{1}{L_i} x^2 \right] \theta_k \quad (3.95)$$

Yerdeğiştirme genel denklemini şekil fonksiyonlarının da içerecek şekilde düzenlenir:

$$v(x) = (N_v)_j v_j + (N_\theta)_j \theta_j + (N_v)_k v_k + (N_\theta)_k \theta_k \quad (3.96)$$

$$(N_v)_j = 1 - \frac{3}{L_i^2} x^2 + \frac{2}{L_i^3} x^3 \quad (3.97)$$

$$(N_\theta)_j = x - \frac{2}{L_i} x^2 + \frac{1}{L_i^2} x^3 \quad (3.98)$$

$$(N_v)_k = \frac{3}{L_i^2} x^2 - \frac{2}{L_i^3} x^3 \quad (3.99)$$

$$(N_\theta)_k = \frac{1}{L_i^2} x^3 - \frac{1}{L_i} x^2 \quad (3.100)$$

Şekil fonksiyonları kiriş eleman için elde edilmiş olur. Denklemler matris formda yazılabilir:

$$v(x) = \begin{Bmatrix} (N_v)_j & (N_\theta)_j & (N_v)_k & (N_\theta)_k \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} v_j \\ \theta_j \\ v_k \\ \theta_k \end{Bmatrix} \quad (3.101)$$

Burada; $\{N\}$ şekil fonksiyonları vektörünü ve $\{u\}$ deplasman vektörünü göstermektedir.

Kirişlerdeki şekildeğiştirme enerjisinin birinci mertebe etkileri temsil eden ilk kısmı denklem 3.82'den yazılabilir:

$$U_a = \frac{1}{2} EI \int_0^L \left(\frac{d^2 v}{dx^2} \right)^2 dx \quad (3.102)$$

Genel yerdeğiştirme denklemi şekil fonksiyonlarını da içerecek biçimde yazılır:

$$v(x) = (N_v)_j v_j + (N_\theta)_j \theta_j + (N_v)_k v_k + (N_\theta)_k \theta_k \quad (3.103)$$

Kirişin birinci mertebe şekildeğiştirme enerjisi denkleminin elde edilebilmesi için, genel yerdeğiştirme denkleminin ikinci türevi alınır.

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \left\{ \begin{array}{cccc} \frac{d^2(N_v)_j}{dx^2} & \frac{d^2(N_\theta)_j}{dx^2} & \frac{d^2(N_v)_k}{dx^2} & \frac{d^2(N_\theta)_k}{dx^2} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} v_j \\ \theta_j \\ v_k \\ \theta_k \end{array} \right\} \quad (3.104)$$

Genel yerdeğiştirme fonksiyonunun ikinci türevi alındıktan sonra fonksiyonun elemanları düzenlenir:

$$B_1 = \frac{d^2(N_v)_j}{dx^2} = -\frac{6}{L_i^2} + \frac{12}{L_i^3}x \quad (3.105)$$

$$B_2 = \frac{d^2(N_\theta)_j}{dx^2} = -\frac{4}{L_i} + \frac{6}{L_i^2}x \quad (3.106)$$

$$B_3 = \frac{d^2(N_v)_k}{dx^2} = \frac{6}{L_i^2} - \frac{12}{L_i^3}x \quad (3.107)$$

$$B_4 = \frac{d^2(N_\theta)_k}{dx^2} = -\frac{2}{L_i} + \frac{6}{L_i^2}x \quad (3.108)$$

Elde edilen ifade kapalı formlarda yeniden yazılabilir:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \{ B_1 \quad B_2 \quad B_3 \quad B_4 \} \left\{ \begin{array}{c} v_j \\ \theta_j \\ v_k \\ \theta_k \end{array} \right\} \quad (3.109)$$

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \{B\}\{u\} \quad (3.110)$$

Denklem 3.110'un karesi alınırsa denklem 3.111'deki gibi gösterilebilir:

$$\left(\frac{d^2v}{dx^2} \right)^2 = \{u\}^T \{B\}^T \{B\} \{u\} \quad (3.111)$$

Şekildeğiştirme enerjisinin ilk kısmını ifade eden denklem 3.102 denkleminde denklem 3.111 ifadesi konur ve (EI) eleman için sabit olduğu kabul edilir ise denklem 3.112 elde edilir:

$$U_a = \frac{1}{2} (EI) \int_{L_i} \{u\}^T \{B\}^T \{B\} \{u\} dx \quad (3.112)$$

$\{u\}$ x'in fonksiyonu olmadığından denklem yeniden düzenlenebilir:

$$U_a = \frac{1}{2} \{u\}^T \left[(EI) \int_{L_i} \{B\}^T \{B\} dx \right] \{u\} \quad (3.113)$$

Şekildeğiştirme enerjisinin $U = \frac{1}{2} \{u\}^T [k]_e \{u\}$ olduğunu ve $[k]_e$ 'nin eleman rijitlik matrisini ifade ettiği düşünülebilir:

$$[k]_e = (EI) \int_{L_i} \{B\}^T \{B\} dx \quad (3.114)$$

İfade açık yazılır ve matris çarpımı yapılır:

$$[k]_e = (EI) \int_{L_i} \begin{Bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{Bmatrix} \{B_1 \quad B_2 \quad B_3 \quad B_4\} dx \quad (3.115)$$

$$[k]_e = (EI) \int_{L_i} \begin{bmatrix} B_1^2 & B_1 B_2 & B_1 B_3 & B_1 B_4 \\ B_1 B_2 & B_2^2 & B_2 B_3 & B_2 B_4 \\ B_1 B_3 & B_2 B_3 & B_3^2 & B_3 B_4 \\ B_1 B_4 & B_2 B_4 & B_3 B_4 & B_4^2 \end{bmatrix} dx \quad (3.116)$$

B_i terimleri x'in fonksiyonu olduğundan matrisin tüm elemanları integre edildiğinde basit kirişin rijitlik matrisinin terimleri elde edilmiş olur:

$$[k]_e = \frac{(EI)}{L_i} \begin{bmatrix} 12 & 6L_i & -12 & 6L_i \\ 6L_i & 4L_i^2 & -6L_i & 2L_i^2 \\ -12 & -6L_i & 12 & -6L_i \\ 6L_i & 2L_i^2 & -6L_i & 4L_i^2 \end{bmatrix} \quad (3.117)$$

3.2.2.2 Basit Kirişin İkinci Mertebe Etkiler İçin Enerji Denkleminin İncelenmesi

Kirişlerdeki şekildeğiştirme enerjisinin ikinci mertebe etkileri temsil eden ikinci kısmı denklem 3.82'den yazılabilir:

$$U_b = \frac{1}{2} N \int_0^L \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 dx \quad (3.118)$$

Genel yerdeğiştirme denklemi şekil fonksiyonlarını da içerecek biçimde gösterilebilir:

$$v(x) = (N_v)_j v_j + (N_\theta)_j \theta_j + (N_v)_k v_k + (N_\theta)_k \theta_k \quad (3.119)$$

Kirişin ikinci mertebe şekildeğiştirme enerjisi denkleminin eldesi için genel yerdeğiştirme denkleminin birinci türevi alınır:

$$\frac{dv}{dx} = \left\{ \frac{d(N_v)_j}{dx} \quad \frac{d(N_\theta)_j}{dx} \quad \frac{d(N_v)_k}{dx} \quad \frac{d(N_\theta)_k}{dx} \right\} \begin{Bmatrix} v_j \\ \theta_j \\ v_k \\ \theta_k \end{Bmatrix} \quad (3.120)$$

Genel yerdeğiştirme fonksiyonunun birinci türevi alındıktan sonra fonksiyonun elemanları düzenlenebilir:

$$C_1 = \frac{d(N_v)_j}{dx} = -\frac{6}{L_i^2}x + \frac{6}{L_i^3}x^2 \quad (3.121)$$

$$C_2 = \frac{d(N_\theta)_j}{dx} = 1 - \frac{4}{L_i}x + \frac{3}{L_i^2}x^2 \quad (3.122)$$

$$C_3 = \frac{d(N_v)_k}{dx} = \frac{6}{L_i^2}x - \frac{6}{L_i^3}x^2 \quad (3.123)$$

$$C_4 = \frac{d(N_\theta)_k}{dx} = -\frac{2}{L_i}x + \frac{3}{L_i^2}x^2 \quad (3.124)$$

Elde edilen ifade kapalı formlarda yeniden yazılabilir:

$$\frac{dv}{dx} = \{C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad C_4\} \begin{Bmatrix} v_j \\ \theta_j \\ v_k \\ \theta_k \end{Bmatrix} \quad (3.125)$$

$$\frac{dv}{dx} = \{C\}\{u\} \quad (3.126)$$

Denklem 3.126'nın karesi alınırsa denklem 3.127'deki gibi gösterilebilir:

$$\left(\frac{dv}{dx}\right)^2 = \{u\}^T \{C\}^T \{C\}\{u\} \quad (3.127)$$

Şekildeğiştirme enerjisinin ikinci kısmını ifade eden denklem 3.118 denklemine denklem 3.127 ifadesi konur ve (EI)'yi eleman için sabit olduğu kabul edilir ise denklem 3.128 elde edilir:

$$U_b = \frac{1}{2} N \int_{L_i} \{u\}^T \{C\}^T \{C\}\{u\} dx \quad (3.128)$$

$\{u\}$ x'in fonksiyonu olmadığından denklem yeniden düzenlenebilir:

$$U = \frac{1}{2} \{u\}^T \left[N \int_{L_i} \{C\}^T \{C\} dx \right] \{u\} \quad (3.129)$$

Şekildeğiştirme enerjisinin $U_b = \frac{1}{2} \{u\}^T [k]_g \{u\}$ olduğunu ve $[k]_g$ 'nin eleman geometrik rijitlik matrisini ifade ettiği düşünülebilir:

$$[k]_g = N \int_{L_i} \{C\}^T \{C\} dx \quad (3.130)$$

İfade açık yazılır ve matris çarpımı yapılır:

$$[k]_g = N \int_{L_i} \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{Bmatrix} \{C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad C_4\} dx \quad (3.131)$$

$$[k]_g = N \int_{L_i} \begin{bmatrix} C_1^2 & C_1 C_2 & C_1 C_3 & C_1 C_4 \\ C_1 C_2 & C_2^2 & C_2 C_3 & C_2 C_4 \\ C_1 C_3 & C_2 C_3 & C_3^2 & C_3 C_4 \\ C_1 C_4 & C_2 C_4 & C_3 C_4 & C_4^2 \end{bmatrix} dx \quad (3.132)$$

C_i terimleri x 'in fonksiyonu olduğundan, matrisin tüm elemanları integre edildiğinde basit kirişin geometrik rijitlik matrisinin terimleri elde edilmiş olur.

$$[k]_g = \left(\frac{N}{30 L_i} \right) \begin{bmatrix} 36 & 3L_i & -36 & 3L_i \\ 3L_i & 4L_i^2 & -3L_i & -L_i^2 \\ -36 & -3L_i & 36 & -3L_i \\ 3L_i & -L_i^2 & -3L_i & 4L_i^2 \end{bmatrix} \quad (3.133)$$

3.2.3 Basitleştirilmiş İkinci Mertebe Yöntemleri

Deforme olmuş bir yapıya etkiyen yükler ikinci mertebe etkileri adı verilen etkilere neden olmaktadır (Kılıc & Krawinkler, 1998). İkinci mertebe etkilerin

hesaplara dahil edilmesi bazı durumlarda uzun işlemler ve zaman gerektirmektedir. Zaman kaybını azaltmak ve uzun işlem adımlarından kurtulmak amacıyla, bazı yaklaşık ikinci mertebe analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları aşağıda verilmiştir.

3.2.3.1 İteratif Yatay Yük Yöntemi

İteratif yatay yük yöntemi, denk yükler yöntemi veya P-Δ iteratif fiktif yöntem olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntem sadece çerçeve stabilitesini dikkate alan P-Δ etkilerini gözönüne alırken, eleman stabilitesini dikkate alan P-δ etkileri ihmal edilir (Chen & Lui, 1991).

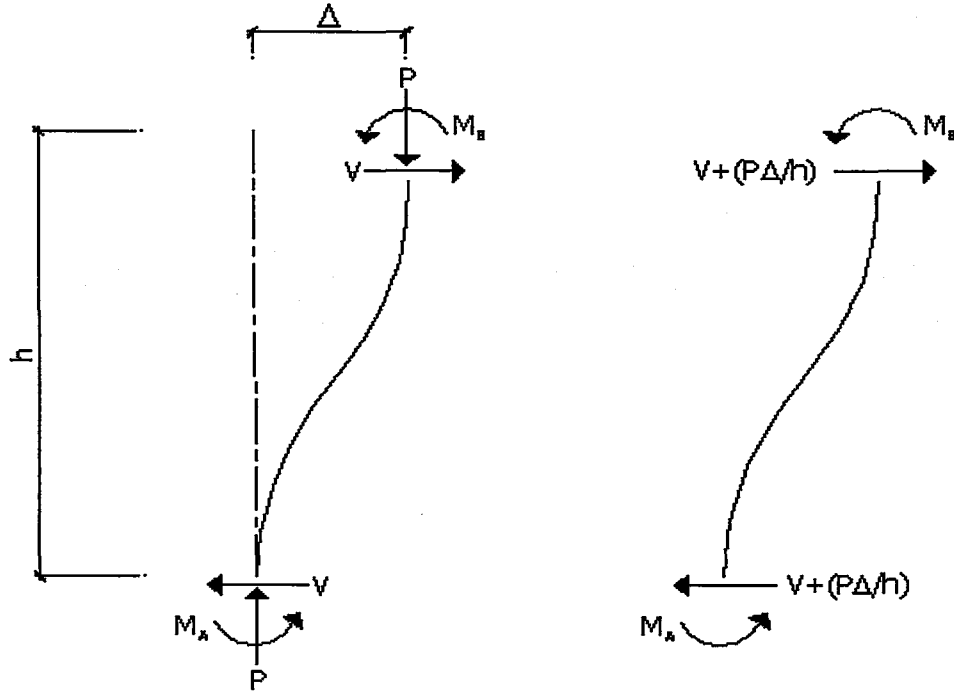
Bu yöntem P-Δ etkilerini temsil etmek amacıyla, fiktif yatay yükün yapıya etkilmesi prensibine dayanır. Eleman uçlarındaki momentlerin toplamı ($M = M_A + M_B$) P-Δ etkilerini de içerecek biçimde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$M = V \times h + P \times \Delta \quad (3.134)$$

Burada, V; eleman uçlarındaki kesme kuvvetini, h eleman uzunluğunu, P; elemandaki mevcut eksenel kuvveti ve Δ; eleman rölatif deplasmanını simgelemektedir. Denklem düzenlenebilir:

$$M = V \times h + \left(\frac{P \times \Delta}{h} \right) \times h = (V + \bar{V}) \times h \quad (3.135)$$

Burada $\bar{V} = \frac{P \times \Delta}{h}$ fiktif veya bir başka deyişle denk kesme kuvvetini verir. Fiktif kesme ve gerçek kesme kuvvetlerinin birlikte uygulanması ile yeni uç momentler elde edilir.



Şekil 3.7 P-Δ Etkisini Temsil Eden Fiktif Kesme Kuvvetleri

Yukarıda bahsedilen yöntem çok katlı ve çok açıklıklı yapılara da uygulanabilir. Bu yapılar için i. kattaki kesme aşağıdaki denklemden hesaplanır.

$$\bar{V} = \frac{\sum P_i}{h_i} \times (\Delta_{i+1} - \Delta_i) \quad (3.136)$$

Burada, $\sum P_i$; i. kattaki tüm kolonlardaki eksenel kuvvetlerin toplamı, h_i ; i. kattaki kat yüksekliği, Δ_{i+1} ; i+1. kattaki yatay kat deplasmanı ve Δ_i ; i. kattaki yatay kat deplasmanıdır.

P-Δ etkisini temsil etmek amacıyla i. kata uygulanacak fiktif yatay yük, iki kat arasındaki fiktif kesme kuvvetlerinin farkından elde edilir.

$$\bar{H}_i = \bar{V}_{i-1} - \bar{V}_i \quad (3.137)$$

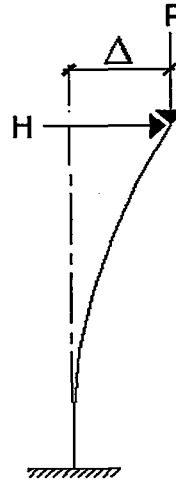
Daha doğru sonuçlar elde etmek için uygulanan fiktif yatay yük yöntemi iteratif olarak uygulanmalıdır. Bunun başlıca nedeni, kat deplasmanları olan Δ değerlerinin başlangıçta bilinmemesidir. İşlemler çerçevenin birinci mertebe analizi ile başlar.

Kat deplasmanları bu birinci merteye analizden elde edilir. Fiktif kesme kuvvetleri ve dolayısıyla fiktif yatay yükler hesaplanır. Fiktif yatay yüklerin yapıya etkiyen mevcut yatay yüklerle birlikte uygulamasıyla yapıya tekrar birinci merteye analiz uygulanır. Bu işlem, iki iterasyon arasında elde edilen kat deplasmanlarının arasındaki farkın ihmal edilebilecek mertebeye gelmesine kadar sürdürülür.

Yöntem genel olarak hemen yakınsamakta ve elemanları çok narin olmayan, aynı zamanda çok açıklıklı olmayan sistemlerde gerçek ikinci merteye analiz sonuçlarına oldukça yakın sonuçlar vermektedir (Chen & Lui, 1991). Eğer elemanlar çok narin ise, P- δ etkisi önemli olacak ve bu yöntemde P- δ etkileri ihmal edildiğinden gerçekçi sonuçlar elde edilemeyecektir. Benzer şekilde, çerçevedeki açıklıkların sayısı fazla olduğu takdirde kat içindeki kolonlardaki aksel kuvvetler büyük farklılıklar gösterebilir. Bu durumda yöntem bazı kolonlardaki momentleri olduğundan daha büyük, bazı kolonlardaki momentleri ise olduğundan daha küçük bulunmasına neden olur.

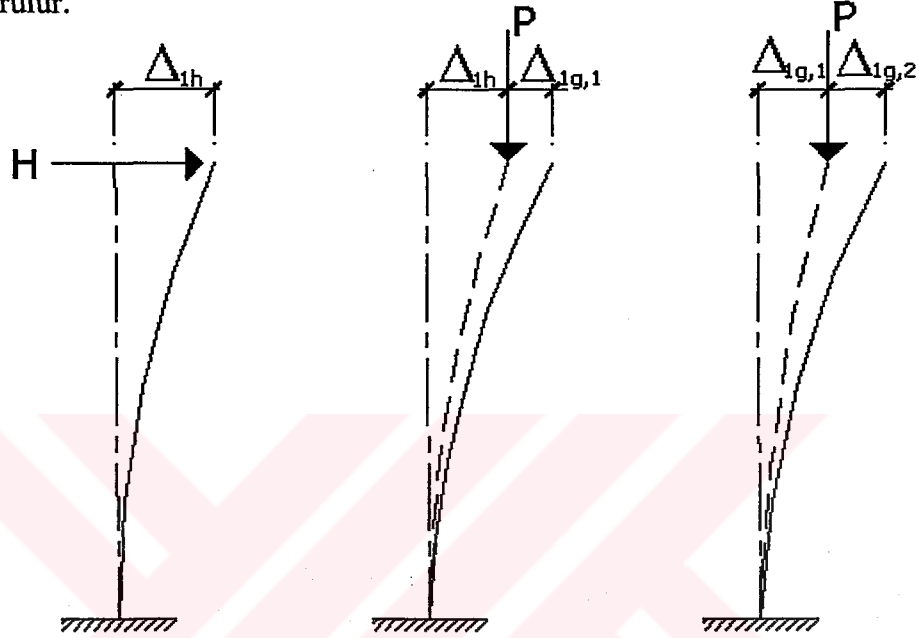
3.2.3.2 İteratif Düşey Yük Yöntemi

İteratif düşey yük yöntemi de sadece P- Δ etkisini göz önüne alır. İteratif düşey yük yöntemi yapının deforme olmuş şekline direk olarak düşey yüklerin etkilmesi prensibine dayanır. Yapının deforme olmuş şekli önceden bilinmediğinden dolayı yöntem iteratif olarak uygulanır.



Şekil 3.8 P- Δ Etkisini Temsil Eden Konsol Eleman

İşlem ilk olarak sadece yatay yüklerin yapıya etkitilmesi ile başlar. Daha sonra düşey yükler yatay yüklerden dolayı deforme olmuş yapıya etkitilir. Yeni bir düşey yük analizi bir önceki düşey yük analizinden elde edilen deplasman artışlarının kullanılmasıyla modellenmiş olan deforme yapıya uygulanır. Düşey yük analizi deplasman artışlarının ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu duruma kadar sürdürülür.



Şekil 3.9 Yatay Yük ve Daha Sonra İteratif Düşey Yükün Yapıya Etkitilmesi

Eğer n. düşey yük analizinde istenilen kadar yakınsama sağlanmış ise, son deplasman aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta = \Delta_{1h} + \sum_{i=1}^n (\Delta_{1g})_i \quad (3.138)$$

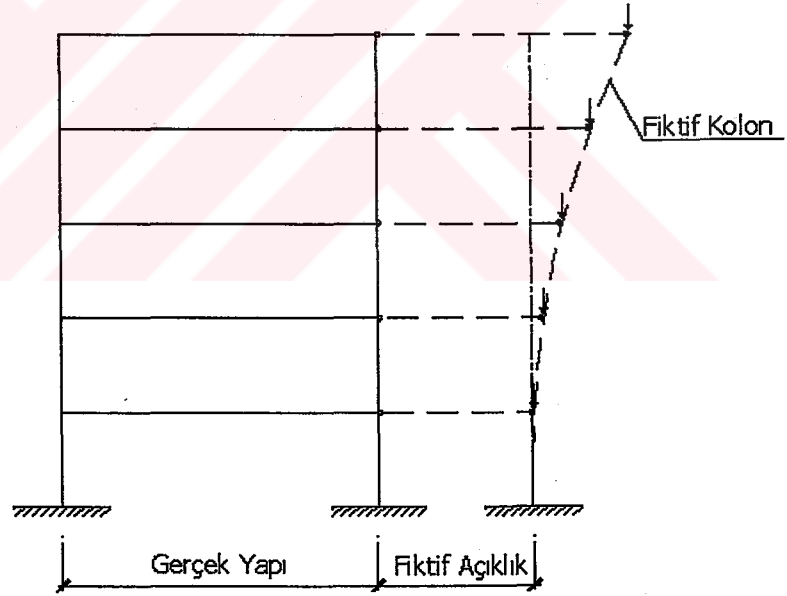
Burada; Δ_{1h} ; birinci mertebe yatay yük etkisi altındaki deplasman, Δ_{1g} ; birinci mertebe düşey yük etkisi altındaki iterasyon adımları için deplasman artışını göstermektedir. Benzer olarak P- Δ etkisini içeren moment ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$M = M_{1h} + \sum_{i=1}^n (M_{1g})_i \quad (3.139)$$

Burada; M_{1h} ; birinci mertebe yatay yük etkisi altındaki birinci mertebe momenti, M_{1g} ; birinci mertebe düşey yük etkisi altındaki iterasyon adımları için birinci mertebe moment artışını göstermektedir.

İteratif düşey yük metodu uygulanırken, düğüm noktalarının koordinatlarını her analiz adımında güncellemek gerekir. Yeni koordinatlar deplasman artışlarının orjinal koordinatlara eklenmesi ile bulunur.

Yapıyı her adımda modellememek için, kolonları eksenel rijitliğe sahip ancak eğilme rijitliği sıfır olan fiktif bir açıklık yapıya eklenebilir. Fiktif açıklık orjinal yapıya eksenel rijitliğe sahip elemanlarla kat hizalarından bağlanır. Her kattaki toplam düşey yükler, daha önce bahsedilen iteratif yöntem doğrultusunda, fiktif açıklığın bahsedilen kattaki kolonuna etkitilmesiyle analiz gerçekleştirilebilir. Bu sayede, sadece fiktif açıklığın koordinatlarının güncellenmesi yeterli olacaktır.



Şekil 3.10 Yapıya Fiktif Açıklık Eklenmesi

Bu yöntem ile elde edilen sonuçlar fiktif yatay yük metodu ile elde edilen sonuçlara oldukça yakındır (Chen & Lui, 1991). İkinci mertebe hesabın yapılmasının güç olduğu durumlarda, yaklaşık ikinci mertebe hesap yöntemleri kullanılması yaklaşık yöntemlerin pratik olduğu için avantajlıdır.

BÖLÜM DÖRT

ÇELİK ÇERÇEVELERİN NON-LİNEER ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE İNCELENMESİ

4.1 Çelik Çerçevelerin Non-Linear Analizinde Yapılan Kabuller

Kiriş ve kolon elemanların modellenmesinde yapılan genel varsayımlar;

- 1- Tüm elemanlar prizmatik ve çizgiseldir.
- 2- Düzlem kesitler deformasyondan sonra da düzlem kalırlar.
- 3- Malzeme homojen ve izotropiktir.
- 4- Tüm eleman kesitleri tamamen elastoplastik davranır ve lokal burkulma vb. etkiler ihmal edilmiştir.
- 5- Tüm elemanlar düzlem dışında yeterli derecede stabiliteye sahiptir. Düzlem dışı eğilme ve yanal torsiyonel burkulma etkileri elemanın göçmesi için etken olmamalıdır.
- 6- Eleman deformasyonları ve şekildeğişirmelerin küçük olduğu varsayılır, ancak büyük rijit sistem deplasmanlarına izin verilmiştir.
- 7- Eleman kesme deformasyon etkileri ihmal edilmiştir.
- 8- Eleman eğilmesinden dolayı eksenel kısalma ihmal edilmiştir.
- 9- Elemanlardaki elastoplastik davranış sıfır uzunluktaki plastik mafsalların kullanılmasıyla göz önüne alındığı varsayılmıştır.
- 10- Plastik mafsalları hipotezi kullanılarak hesaplar yapılacaktır. Plastik mafsalların sadece eleman uçlarında oluşmasına izin verilmiş ve plastik mafsallar sadece plastik dönmeye izin verilmiştir.
- 11- Kesitte plastik mafsalları oluştuğu zaman, kesit kuvvetlerinin plastik dayanım yüzeyine (akma yüzeyine) eriştiği varsayılır. Bu yüzeyden yükün azalması etkisi gözönüne alınmaz.

12- TS 5461'de I kesitler için verilen akma şartları plastik mafsal oluşumu için kullanılmıştır ve aşağıda sunulmuştur.

$$\frac{M}{M_p} = 1 \quad \left(\frac{N}{N_p} \leq 0.15 \right) \quad (4.1)$$

$$\frac{N}{N_p} + 0.85 \times \frac{M}{M_p} = 1 \quad \left(\frac{N}{N_p} > 0.15 \right) \quad (4.2)$$

4.2 Birinci Mertebe Elastoplastik Analiz

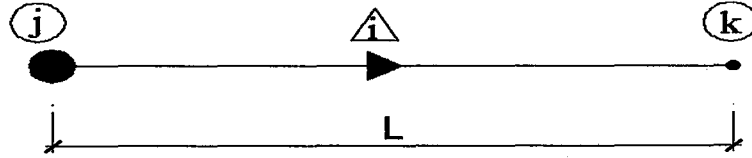
Birinci mertebe elastoplastik analiz, bir bakıma elastik analizin yapıya seriler halinde uygulanmasıdır. Her hangi bir elemandaki maksimum moment eleman plastik moment kapasitesine eriştiğinde maksimum momentin bulunduğu noktada plastik mafsal oluşur (Kruger et al.,1995). Daha sonraki yüklemelerde, plastik mafsal oluştuğu noktaya adi bir mafsal konarak yeni yapı bundan sonraki işlemlerde dikkate alınır. Tekrar elastik analiz yenilenmiş yapıya uygulanır. Elastik analiz mevcut sisteme uygulanması ve oluşacak yeni plastik mafsalın yerinin belirlenmesi ve daha sonra plastik mafsalın adi mafsalla değiştirilmesi işlemi göçme mekanizmasının oluşmasını sağlayacak kadar sayıda plastik mafsalın oluşmasıyla sona erer.

Bu bölümde ikinci mertebe etkiler göz önüne alınmayacaktır. İkinci mertebe etkiler göz önüne alınmadan yapılan birinci mertebe analiz sonuçları gerçek yük taşıma kapasitesinin üzerinde sonuçlar verir. Ancak, bu fark az katlı çerçevelerde çok katlı ve narin çerçevelere nazaran daha küçük olmaktadır (Chen & Kim, 1997).

4.2.1 Birinci Mertebe Elastoplastik Analiz İçin Gerekli Bazı Matrislerin Eldesi

Birinci mertebe elastoplastik analiz adımlarında adi mafsalların oluşması sonucu yapı her adımdan sonra yenilenerek çözülür. Bu yenilenme işlemi çubuk elemanların bir ucunda veya her iki ucunda mafsalların oluşması sonucu eleman rijitlik matrislerinin tekrar hazırlanması işlemidir.

4.2.1.1 Elemanın j. Ucunda Mafsal Olması Durumu İçin Rijitlik Matrisi



Şekil 4.1 j. Ucunda Mafsal Bulunan Eleman

Herhangi bir çubuk elemanın lokal koordinatlara göre lokal deplasman ve lokal kuvvetlere bağlı olarak rijitlik matrisi aşağıdaki gibi gösterilebilir (Budynas, 1998):

$$\begin{Bmatrix} N_j \\ T_j \\ M_j \\ P_k \\ T_k \\ M_k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \delta_{jx} \\ \delta_{jy} \\ \delta_{jz} \\ \delta_{kx} \\ \delta_{ky} \\ \delta_{kz} \end{Bmatrix} \quad (4.3)$$

Elemanın j. ucunda mafsal olması durumunda $M_j = 0$ olmalıdır:

$$M_j = k_{31} \times \delta_{jx} + k_{32} \times \delta_{jy} + k_{33} \times \delta_{jz} + k_{34} \times \delta_{kx} + k_{35} \times \delta_{ky} + k_{36} \times \delta_{kz} = 0 \quad (4.4)$$

$$\delta_{jz} = -\frac{k_{31}}{k_{33}} \times \delta_{jx} - \frac{k_{32}}{k_{33}} \times \delta_{jy} - \frac{k_{34}}{k_{33}} \times \delta_{kx} - \frac{k_{35}}{k_{33}} \times \delta_{ky} - \frac{k_{36}}{k_{33}} \times \delta_{kz} \quad (4.5)$$

Lokal kuvvetler yazılır ve δ_{jz} işlemlerde yerine konur:

$$N_j = k_{11} \times \delta_{jx} + k_{12} \times \delta_{jy} + k_{13} \times \delta_{jz} + k_{14} \times \delta_{kx} + k_{15} \times \delta_{ky} + k_{16} \times \delta_{kz} \quad (4.6)$$

$$N_j = k_{11} \times \delta_{jx} + k_{12} \times \delta_{jy} + k_{14} \times \delta_{kx} + k_{15} \times \delta_{ky} + k_{16} \times \delta_{kz} + k_{13} \times \left(-\frac{k_{31}}{k_{33}} \times \delta_{jx} - \frac{k_{32}}{k_{33}} \times \delta_{jy} - \frac{k_{34}}{k_{33}} \times \delta_{kx} - \frac{k_{35}}{k_{33}} \times \delta_{ky} - \frac{k_{36}}{k_{33}} \times \delta_{kz} \right) \quad (4.7)$$

$$N_j = \left(k_{11} - \frac{k_{13}^2}{k_{33}} \right) \times \delta_{jx} + \left(k_{12} - \frac{k_{13} \times k_{23}}{k_{33}} \right) \times \delta_{jy} + \left(k_{14} - \frac{k_{13} \times k_{34}}{k_{33}} \right) \times \delta_{kx} + \left(k_{15} - \frac{k_{13} \times k_{35}}{k_{33}} \right) \times \delta_{ky} + \left(k_{16} - \frac{k_{13} \times k_{36}}{k_{33}} \right) \times \delta_{kz} \quad (4.8)$$

$$T_j = k_{21} \times \delta_{jx} + k_{22} \times \delta_{jy} + k_{23} \times \delta_{jz} + k_{24} \times \delta_{kx} + k_{25} \times \delta_{ky} + k_{26} \times \delta_{kz} \quad (4.9)$$

$$T_j = k_{21} \times \delta_{jx} + k_{22} \times \delta_{jy} + k_{24} \times \delta_{kx} + k_{25} \times \delta_{ky} + k_{26} \times \delta_{kz} + \\ k_{23} \times \left(-\frac{k_{31}}{k_{33}} \times \delta_{jx} - \frac{k_{32}}{k_{33}} \times \delta_{jy} - \frac{k_{34}}{k_{33}} \times \delta_{kx} - \frac{k_{35}}{k_{33}} \times \delta_{ky} - \frac{k_{36}}{k_{33}} \times \delta_{kz} \right) \quad (4.10)$$

$$T_j = \left(k_{21} - \frac{k_{23} \times k_{31}}{k_{33}} \right) \times \delta_{jx} + \left(k_{22} - \frac{k_{23}^2}{k_{33}} \right) \times \delta_{jy} + \left(k_{24} - \frac{k_{23} \times k_{34}}{k_{33}} \right) \times \delta_{kx} + \\ \left(k_{25} - \frac{k_{23} \times k_{35}}{k_{33}} \right) \times \delta_{ky} + \left(k_{26} - \frac{k_{23} \times k_{36}}{k_{33}} \right) \times \delta_{kz} \quad (4.11)$$

$$N_k = k_{41} \times \delta_{jx} + k_{42} \times \delta_{jy} + k_{43} \times \delta_{jz} + k_{44} \times \delta_{kx} + k_{45} \times \delta_{ky} + k_{46} \times \delta_{kz} \quad (4.12)$$

$$N_k = k_{41} \times \delta_{jx} + k_{42} \times \delta_{jy} + k_{44} \times \delta_{kx} + k_{45} \times \delta_{ky} + k_{46} \times \delta_{kz} + \\ k_{43} \times \left(-\frac{k_{31}}{k_{33}} \times \delta_{jx} - \frac{k_{32}}{k_{33}} \times \delta_{jy} - \frac{k_{34}}{k_{33}} \times \delta_{kx} - \frac{k_{35}}{k_{33}} \times \delta_{ky} - \frac{k_{36}}{k_{33}} \times \delta_{kz} \right) \quad (4.13)$$

$$N_k = \left(k_{41} - \frac{k_{43} \times k_{31}}{k_{33}} \right) \times \delta_{jx} + \left(k_{42} - \frac{k_{43} \times k_{32}}{k_{33}} \right) \times \delta_{jy} + \left(k_{44} - \frac{k_{43}^2}{k_{33}} \right) \times \delta_{kx} + \\ \left(k_{45} - \frac{k_{43} \times k_{35}}{k_{33}} \right) \times \delta_{ky} + \left(k_{46} - \frac{k_{43} \times k_{36}}{k_{33}} \right) \times \delta_{kz} \quad (4.14)$$

$$T_k = k_{51} \times \delta_{jx} + k_{52} \times \delta_{jy} + k_{53} \times \delta_{jz} + k_{54} \times \delta_{kx} + k_{55} \times \delta_{ky} + k_{56} \times \delta_{kz} \quad (4.15)$$

$$T_k = k_{51} \times \delta_{jx} + k_{52} \times \delta_{jy} + k_{54} \times \delta_{kx} + k_{55} \times \delta_{ky} + k_{56} \times \delta_{kz} + \\ k_{53} \times \left(-\frac{k_{31}}{k_{33}} \times \delta_{jx} - \frac{k_{32}}{k_{33}} \times \delta_{jy} - \frac{k_{34}}{k_{33}} \times \delta_{kx} - \frac{k_{35}}{k_{33}} \times \delta_{ky} - \frac{k_{36}}{k_{33}} \times \delta_{kz} \right) \quad (4.16)$$

$$T_k = \left(k_{51} - \frac{k_{53} \times k_{31}}{k_{33}} \right) \times \delta_{jx} + \left(k_{52} - \frac{k_{53} \times k_{32}}{k_{33}} \right) \times \delta_{jy} + \left(k_{54} - \frac{k_{53} \times k_{34}}{k_{33}} \right) \times \delta_{jz} + \left(k_{55} - \frac{k_{53}^2}{k_{33}} \right) \times \delta_{ky} + \left(k_{56} - \frac{k_{35} \times k_{36}}{k_{33}} \right) \times \delta_{kz} \quad (4.17)$$

$$M_k = k_{61} \times \delta_{jx} + k_{62} \times \delta_{jy} + k_{63} \times \delta_{jz} + k_{64} \times \delta_{kx} + k_{65} \times \delta_{ky} + k_{66} \times \delta_{kz} \quad (4.18)$$

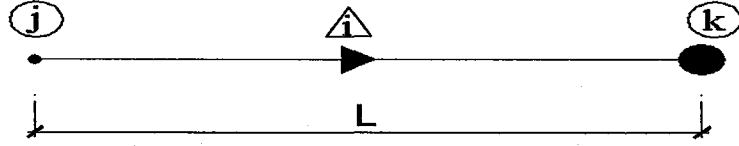
$$M_k = k_{61} \times \delta_{jx} + k_{62} \times \delta_{jy} + k_{64} \times \delta_{kx} + k_{65} \times \delta_{ky} + k_{66} \times \delta_{kz} + k_{63} \times \left(-\frac{k_{31}}{k_{33}} \times \delta_{jx} - \frac{k_{32}}{k_{33}} \times \delta_{jy} - \frac{k_{34}}{k_{33}} \times \delta_{jz} - \frac{k_{35}}{k_{33}} \times \delta_{ky} - \frac{k_{36}}{k_{33}} \times \delta_{kz} \right) \quad (4.19)$$

$$M_k = \left(k_{61} - \frac{k_{63} \times k_{31}}{k_{33}} \right) \times \delta_{jx} + \left(k_{62} - \frac{k_{63} \times k_{32}}{k_{33}} \right) \times \delta_{jy} + \left(k_{64} - \frac{k_{63} \times k_{34}}{k_{33}} \right) \times \delta_{jz} + \left(k_{65} - \frac{k_{63} \times k_{35}}{k_{33}} \right) \times \delta_{ky} + \left(k_{66} - \frac{k_{63} \times k_{36}}{k_{33}} \right) \times \delta_{kz} \quad (4.20)$$

Lokal rijitlik matrisi elemanın j. ucunda mafsall olduğu durum için tekrar yazılacak olursa denklem 4.21 elde edilir:

$$[k_{j,m}] = \begin{bmatrix} \left(k_{11} - \frac{k_{13}^2}{k_{33}} \right) & \left(k_{12} - \frac{k_{13} \times k_{23}}{k_{33}} \right) & \left(k_{14} - \frac{k_{13} \times k_{34}}{k_{33}} \right) & \left(k_{15} - \frac{k_{13} \times k_{35}}{k_{33}} \right) & \left(k_{16} - \frac{k_{13} \times k_{36}}{k_{33}} \right) \\ \left(k_{21} - \frac{k_{23} \times k_{13}}{k_{33}} \right) & \left(k_{22} - \frac{k_{23}^2}{k_{33}} \right) & \left(k_{24} - \frac{k_{23} \times k_{34}}{k_{33}} \right) & \left(k_{25} - \frac{k_{23} \times k_{35}}{k_{33}} \right) & \left(k_{26} - \frac{k_{23} \times k_{36}}{k_{33}} \right) \\ \left(k_{41} - \frac{k_{43} \times k_{13}}{k_{33}} \right) & \left(k_{42} - \frac{k_{43} \times k_{23}}{k_{33}} \right) & \left(k_{44} - \frac{k_{43}^2}{k_{33}} \right) & \left(k_{45} - \frac{k_{43} \times k_{35}}{k_{33}} \right) & \left(k_{46} - \frac{k_{43} \times k_{36}}{k_{33}} \right) \\ \left(k_{51} - \frac{k_{53} \times k_{13}}{k_{33}} \right) & \left(k_{52} - \frac{k_{53} \times k_{23}}{k_{33}} \right) & \left(k_{54} - \frac{k_{53} \times k_{34}}{k_{33}} \right) & \left(k_{55} - \frac{k_{53}^2}{k_{33}} \right) & \left(k_{56} - \frac{k_{53} \times k_{36}}{k_{33}} \right) \\ \left(k_{61} - \frac{k_{63} \times k_{13}}{k_{33}} \right) & \left(k_{62} - \frac{k_{63} \times k_{23}}{k_{33}} \right) & \left(k_{64} - \frac{k_{63} \times k_{34}}{k_{33}} \right) & \left(k_{65} - \frac{k_{63} \times k_{35}}{k_{33}} \right) & \left(k_{66} - \frac{k_{63}^2}{k_{33}} \right) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

4.2.1.2 Elemanın k. Ucunda Mafsali Olması Durumu İçin Rijitlik Matrisi



Şekil 4.2 k. Ucunda Mafsali Bulunan Eleman

Herhangi bir çubuk elemanın lokal koordinatlara göre lokal deplasman ve lokal kuvvetlere bağlı olarak rijitlik matrisi aşağıdaki gibi gösterilebilir (Budynas, 1998):

$$\begin{Bmatrix} N_j \\ T_j \\ M_j \\ P_k \\ T_k \\ M_k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \delta_{jx} \\ \delta_{jy} \\ \delta_{jz} \\ \delta_{kx} \\ \delta_{ky} \\ \delta_{kz} \end{Bmatrix} \quad (4.22)$$

Elemanın k. ucunda mafsali olması durumunda $M_k = 0$ olmalıdır.

$$M_k = k_{61} \times \delta_{jx} + k_{62} \times \delta_{jy} + k_{63} \times \delta_{jz} + k_{64} \times \delta_{kx} + k_{65} \times \delta_{ky} + k_{66} \times \delta_{kz} = 0 \quad (4.23)$$

$$\delta_{kz} = -\frac{k_{61}}{k_{66}} \times \delta_{jx} - \frac{k_{62}}{k_{66}} \times \delta_{jy} - \frac{k_{63}}{k_{66}} \times \delta_{jz} - \frac{k_{64}}{k_{66}} \times \delta_{kx} - \frac{k_{65}}{k_{66}} \times \delta_{ky} \quad (4.24)$$

Lokal kuvvetler yazılır ve δ_{kz} yerine konur:

$$N_j = k_{11} \times \delta_{jx} + k_{12} \times \delta_{jy} + k_{13} \times \delta_{jz} + k_{14} \times \delta_{kx} + k_{15} \times \delta_{ky} + k_{16} \times \delta_{kz} \quad (4.25)$$

$$N_j = k_{11} \times \delta_{jx} + k_{12} \times \delta_{jy} + k_{13} \times \delta_{jz} + k_{14} \times \delta_{kx} + k_{15} \times \delta_{ky} + k_{16} \times \left(-\frac{k_{61}}{k_{66}} \times \delta_{jx} - \frac{k_{62}}{k_{66}} \times \delta_{jy} - \frac{k_{63}}{k_{66}} \times \delta_{jz} - \frac{k_{64}}{k_{66}} \times \delta_{kx} - \frac{k_{65}}{k_{66}} \times \delta_{ky} \right) \quad (4.26)$$

$$N_j = \left(k_{11} - \frac{k_{16}^2}{k_{66}} \right) \times \delta_{jx} + \left(k_{12} - \frac{k_{16} \times k_{26}}{k_{66}} \right) \times \delta_{jy} + \left(k_{13} - \frac{k_{16} \times k_{36}}{k_{66}} \right) \times \delta_{jz} + \left(k_{14} - \frac{k_{16} \times k_{46}}{k_{66}} \right) \times \delta_{kx} + \left(k_{15} - \frac{k_{16} \times k_{56}}{k_{66}} \right) \times \delta_{ky} \quad (4.27)$$

$$T_j = k_{21} \times \delta_{jx} + k_{22} \times \delta_{jy} + k_{23} \times \delta_{jz} + k_{24} \times \delta_{kx} + k_{25} \times \delta_{ky} + k_{26} \times \delta_{kz} \quad (4.28)$$

$$T_j = k_{21} \times \delta_{jx} + k_{22} \times \delta_{jy} + k_{23} \times \delta_{jz} + k_{24} \times \delta_{kx} + k_{25} \times \delta_{ky} + k_{26} \times \left(-\frac{k_{61}}{k_{66}} \times \delta_{jx} - \frac{k_{62}}{k_{66}} \times \delta_{jy} - \frac{k_{63}}{k_{66}} \times \delta_{jz} - \frac{k_{64}}{k_{66}} \times \delta_{kx} - \frac{k_{65}}{k_{66}} \times \delta_{ky} \right) \quad (4.29)$$

$$T_j = \left(k_{21} - \frac{k_{16} \times k_{26}}{k_{66}} \right) \times \delta_{jx} + \left(k_{22} - \frac{k_{26}^2}{k_{66}} \right) \times \delta_{jy} + \left(k_{23} - \frac{k_{26} \times k_{36}}{k_{66}} \right) \times \delta_{jz} + \left(k_{24} - \frac{k_{26} \times k_{46}}{k_{66}} \right) \times \delta_{kx} + \left(k_{25} - \frac{k_{26} \times k_{56}}{k_{66}} \right) \times \delta_{ky} \quad (4.30)$$

$$M_j = k_{31} \times \delta_{jx} + k_{32} \times \delta_{jy} + k_{33} \times \delta_{jz} + k_{34} \times \delta_{kx} + k_{35} \times \delta_{ky} + k_{36} \times \delta_{kz} \quad (4.31)$$

$$M_j = k_{31} \times \delta_{jx} + k_{32} \times \delta_{jy} + k_{33} \times \delta_{jz} + k_{34} \times \delta_{kx} + k_{35} \times \delta_{ky} + k_{36} \times \left(-\frac{k_{61}}{k_{66}} \times \delta_{jx} - \frac{k_{62}}{k_{66}} \times \delta_{jy} - \frac{k_{63}}{k_{66}} \times \delta_{jz} - \frac{k_{64}}{k_{66}} \times \delta_{kx} - \frac{k_{65}}{k_{66}} \times \delta_{ky} \right) \quad (4.32)$$

$$M_j = \left(k_{31} - \frac{k_{16} \times k_{36}}{k_{66}} \right) \times \delta_{jx} + \left(k_{32} - \frac{k_{36} \times k_{26}}{k_{66}} \right) \times \delta_{jy} + \left(k_{33} - \frac{k_{36}^2}{k_{66}} \right) \times \delta_{jz} + \left(k_{34} - \frac{k_{36} \times k_{46}}{k_{66}} \right) \times \delta_{kx} + \left(k_{35} - \frac{k_{36} \times k_{56}}{k_{66}} \right) \times \delta_{ky} \quad (4.33)$$

$$N_k = k_{41} \times \delta_{jx} + k_{42} \times \delta_{jy} + k_{43} \times \delta_{jz} + k_{44} \times \delta_{kx} + k_{45} \times \delta_{ky} + k_{46} \times \delta_{kz} \quad (4.34)$$

$$N_k = k_{41} \times \delta_{jx} + k_{42} \times \delta_{jy} + k_{43} \times \delta_{jz} + k_{44} \times \delta_{kx} + k_{45} \times \delta_{ky} + k_{46} \times \left(-\frac{k_{61}}{k_{66}} \times \delta_{jx} - \frac{k_{62}}{k_{66}} \times \delta_{jy} - \frac{k_{63}}{k_{66}} \times \delta_{jz} - \frac{k_{64}}{k_{66}} \times \delta_{kx} - \frac{k_{65}}{k_{66}} \times \delta_{ky} \right) \quad (4.35)$$

$$N_k = \left(k_{41} - \frac{k_{46} \times k_{16}}{k_{66}} \right) \times \delta_{jx} + \left(k_{42} - \frac{k_{46} \times k_{26}}{k_{66}} \right) \times \delta_{jy} + \left(k_{43} - \frac{k_{46} \times k_{36}}{k_{66}} \right) \times \delta_{jz} +$$

$$\left(k_{44} - \frac{k_{46}^2}{k_{66}} \right) \times \delta_{kx} + \left(k_{45} - \frac{k_{46} \times k_{56}}{k_{66}} \right) \times \delta_{ky}$$
(4.36)

$$T_k = k_{51} \times \delta_{jx} + k_{52} \times \delta_{jy} + k_{53} \times \delta_{jz} + k_{54} \times \delta_{kx} + k_{55} \times \delta_{ky} + k_{56} \times \delta_{kz}$$
(4.37)

$$T_k = k_{51} \times \delta_{jx} + k_{52} \times \delta_{jy} + k_{53} \times \delta_{jz} + k_{54} \times \delta_{kx} + k_{55} \times \delta_{ky} +$$

$$k_{56} \times \left(-\frac{k_{61}}{k_{66}} \times \delta_{jx} - \frac{k_{62}}{k_{66}} \times \delta_{jy} - \frac{k_{63}}{k_{66}} \times \delta_{jz} - \frac{k_{64}}{k_{66}} \times \delta_{kx} - \frac{k_{65}}{k_{66}} \times \delta_{ky} \right)$$
(4.38)

$$T_k = \left(k_{51} - \frac{k_{56} \times k_{16}}{k_{66}} \right) \times \delta_{jx} + \left(k_{52} - \frac{k_{56} \times k_{26}}{k_{66}} \right) \times \delta_{jy} + \left(k_{53} - \frac{k_{56} \times k_{36}}{k_{66}} \right) \times \delta_{jz} +$$

$$\left(k_{54} - \frac{k_{56} \times k_{46}}{k_{66}} \right) \times \delta_{kx} + \left(k_{55} - \frac{k_{56}^2}{k_{66}} \right) \times \delta_{ky}$$
(4.39)

Lokal rijitlik matrisi elemanın k. ucunda mafsals olduğu durum için tekrar yazılacak olursa denklem 4.40 elde edilir:

$$[k_{qm}] = \begin{bmatrix} \left(k_{11} - \frac{k_{16}^2}{k_{66}} \right) & \left(k_{12} - \frac{k_{16} \times k_{26}}{k_{66}} \right) & \left(k_{13} - \frac{k_{16} \times k_{36}}{k_{66}} \right) & \left(k_{14} - \frac{k_{16} \times k_{46}}{k_{66}} \right) & \left(k_{15} - \frac{k_{16} \times k_{56}}{k_{66}} \right) \\ \left(k_{21} - \frac{k_{26} \times k_{16}}{k_{66}} \right) & \left(k_{22} - \frac{k_{26}^2}{k_{66}} \right) & \left(k_{23} - \frac{k_{26} \times k_{36}}{k_{66}} \right) & \left(k_{24} - \frac{k_{26} \times k_{46}}{k_{66}} \right) & \left(k_{25} - \frac{k_{26} \times k_{56}}{k_{66}} \right) \\ \left(k_{31} - \frac{k_{36} \times k_{16}}{k_{66}} \right) & \left(k_{32} - \frac{k_{36} \times k_{26}}{k_{66}} \right) & \left(k_{33} - \frac{k_{36}^2}{k_{66}} \right) & \left(k_{34} - \frac{k_{36} \times k_{46}}{k_{66}} \right) & \left(k_{35} - \frac{k_{36} \times k_{56}}{k_{66}} \right) \\ \left(k_{41} - \frac{k_{46} \times k_{16}}{k_{66}} \right) & \left(k_{42} - \frac{k_{46} \times k_{26}}{k_{66}} \right) & \left(k_{43} - \frac{k_{46} \times k_{36}}{k_{66}} \right) & \left(k_{44} - \frac{k_{46}^2}{k_{66}} \right) & \left(k_{45} - \frac{k_{46} \times k_{56}}{k_{66}} \right) \\ \left(k_{51} - \frac{k_{56} \times k_{16}}{k_{66}} \right) & \left(k_{52} - \frac{k_{56} \times k_{26}}{k_{66}} \right) & \left(k_{53} - \frac{k_{56} \times k_{36}}{k_{66}} \right) & \left(k_{54} - \frac{k_{56} \times k_{46}}{k_{66}} \right) & \left(k_{55} - \frac{k_{56}^2}{k_{66}} \right) \end{bmatrix}$$
(4.40)

4.2.1.3 Elemanın Her İki Ucunda Mafsalsal Olması Durumu İçin Rijitlik Matrisi

Elemanın her iki ucunda da mafsalsal olması durumunda elemanın rijitlik matrisi düzlem kafes elemanın rijitlik matrisi ile aynı olacaktır (Tezcan, 1970). Bu durum için rijitlik matrisinin eldesi gösterilmeyecektir.

4.2.2 Birinci Mertebe Elastoplastik Analiz İçin Nümerik Prosedür

Birinci mertebe elastoplastik analiz, birinci mertebe elastik analizin orijinal ve daha sonra yük parametresinin arttırılmasıyla mafsalların oluşması ile değişerek modifiye olan yapıya seri işlemler halinde uygulanmasıdır (Chen & Sohal, 2000). Plastik mafsalların sadece eleman uçlarında oluştuğu kabul edilir. Yayılı yükler ve bazı yanal yüklere maruz elemanlarda, plastik mafsalsal elemanın uçlarında değil de iç kısmında oluşabilir. Bu istenmeyen durum, mevcut elemanların birçok küçük elemana bölmek ve yayılı yükler yerine belirli noktalara belirli sayıda konsantre yük koyulması suretiyle aşılmaya çalışılmıştır.

Prosedür aşağıda adım adım açıklanmıştır;

1. Yapıya uygulanan mevcut yüklere referans yükleri denir. Uygulanan referans yükleri altında yapı çözülür ve moment diyagramı çizilir. Mevcut yükler, maksimum taşıma yüklerine göre daha küçüktür. Ters bir durumda yapı bu yükleri taşıyamaz.
2. İncelenen her kesitteki yük faktörü (akma diyagramı da göz önüne alınarak) plastik moment kapasitesinin o noktadaki referans yüklerinden oluşan moment değerine bölünmesi ile elde edilir. Matematiksel olarak ilk plastik mafsalsal oluşmasını sağlayacak ilk yük faktörü p_1 basit olarak $p_1 = \text{Min} (|M_p/M|)$ şeklinde ifade edilebilir.
3. İncelene kesitlerdeki en küçük yük faktörünün yeri ilk plastik mafsalsal yerini belirler ve o kesitteki yük faktörü de yapının ilk yük faktörü olur.

4. Yapıdaki deplasmanlar, iç kuvvetler ve referans kuvvetleri önceki adımda bulunmuş olan yapının yük faktörü ile çarpılarak yapının yük faktörü altındaki davranışı hesaplanır. Bu mafsaldan mafsala analizin ilk adımının tamamlandığını gösterir.
5. Orijinal yapıda, ilk plastik mafsalın oluşacağı yere bir mafsal koymak suretiyle yapı modifiye edilir. Bu, o kesitin plastik moment kapasitesine eriştikten sonra daha fazla moment taşıyamayacağını gösterir.
6. Modifiye olmuş yapının moment diyagramı çizilir.
7. Her noktadaki yük faktörü p_i geriye kalan moment kapasitesini o noktadaki moment değerine bölünmesi ile bulunur. İkinci plastik mafsal en küçük yük faktörünün bulunduğu kesite konacaktır.
8. Deplasmanlar ve iç kuvvetler yeni yük faktörü ile çarpılır.
9. İncelenen her kesit için kümülatif yük faktörü, deplasmanlar ve iç kuvvetler hesaplanır.
10. Yapıya mafsal konarak yapı tekrar modifiye edilir.
11. 6-10 adımları yapıda mekanizma davranışı veya stabilitesini kaybedinceye kadar sürer. Yapı için göçme yük faktörü ve göçme deplasman değerleri belirlenmiş olur.

Birinci mertebe elastoplastik analiz için bahsedilen adımların uygulanmasında akma şartlarının dikkate alınarak hesap yapılması çok önemlidir.

4.2.2.1 Yanlız Eğilme Moment Etkisi (N=0) Hali İçin Akma Şartı ve Yük Parametresi Artışı Formülünün Eldesi

Yanlız eğilme momentinin etkisinin dikkate alındığı durum için yük parametresi akma şartına göre elde edilmiştir. TS 4561'e göre denklem 4.41'deki gibi yazılabilir:

$$\frac{M}{M_p} = 1 \quad \left(\frac{N}{N_p} \leq 0.15 \right) \quad (4.41)$$

Moment ifadesi yük parametresine göre yazılabilir:

$$M_{i+1} = M_i + \Delta p \times \Delta M \quad (4.42)$$

Elde edilen değerler akma şartında yerine konur:

$$\frac{M_i + \Delta p \times \Delta M}{M_p} = 1 \quad (4.43)$$

Yük parametresi elde edilir:

$$\Delta p = \frac{(M_p - M_i)}{(\Delta M)} \quad (4.44)$$

4.2.2.2 Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Etkisi Hali İçin Akma Şartı ve Yük Parametresi Artışı Formülünün Eldesi

Eğilme momenti ile birlikte normal kuvvet etkisinin de dikkate alındığı durum için yük parametresi akma şartına göre elde edilmiştir. TS 4561'e göre denklem 4.45'deki gibi yazılabilir:

$$\frac{N}{N_p} + 0.85 \times \frac{M}{M_p} = 1 \quad \left(\frac{N}{N_p} > 0.15 \right) \quad (4.45)$$

Moment ve normal kuvvet ifadeleri yük parametresine göre yazılır:

$$M_{i+1} = M_i + \Delta p \times \Delta M \quad (4.46)$$

$$N_{i+1} = N_i + \Delta p \times \Delta N \quad (4.47)$$

Elde edilen değerler akma şartında yerine konur:

$$\frac{N_i + \Delta p \times \Delta N}{N_p} + 0.85 \times \frac{M_i + \Delta p \times \Delta M}{M_p} = 1 \quad (4.48)$$

$$\Delta p = \frac{\left(1 - \frac{N_i}{N_p} - \frac{0.85 \times M_i}{M_p} \right)}{\left(\frac{\Delta N}{N_p} + 0.85 \times \frac{\Delta M}{M_p} \right)} \quad (4.49)$$

Yük parametresi elde edilir:

$$\Delta p = \frac{(M_p \times N_p - M_p \times N_i - 0.85 \times M_i \times N_p)}{(\Delta N \times M_p + 0.85 \times \Delta M \times N_p)} \quad (4.50)$$

4.3 İkinci Mertebe Elastoplastik Analiz

Denge denklemleri deforme olmuş yapı geometrisine göre yazılırsa bu analize ikinci mertebe analiz denilmektedir (Chan & Chui, 2000). İkinci mertebe elastoplastik analiz ise birinci mertebe elastoplastik analizin P- Δ ve P- δ etkilerinde hesaplarda göz önüne alınması ile gerçekleştirilir. İkinci mertebe elastoplastik analiz her elemana ayrı ayrı uygulanır ve yapının bütünü davranışı yeteri derece doğrulukta temsil edilmeye çalışılır. İkinci mertebe analiz birçok plastik yönetmelik tarafından tavsiye edilmektedir (Chen & Kim, 1997).

İkinci mertebe elastoplastik hesaba başlarken karşılaşılan problem ikinci mertebe etkilerin hesaplanacağı elemanlardaki eksenel kuvvet değerinin başlangıçta bilinmemesidir. Bundan dolayı ikinci mertebe etkilerin hesaplanacağı elemanlar için başlangıç normal kuvvet değeri olarak aynı elemanın birinci mertebe analiz sonucu elde edilen normal kuvvet değeri alınmalıdır. Elemanın birinci mertebe hesabından elde edilen normal kuvvet ile ikinci mertebe hesap yapılır ve eleman için yeni bir normal kuvvet değeri bulunmuş olur. Bu normal kuvvet değeri birinci mertebe hesaptan alınan normal kuvvet değerine yakınsa işleme son verilir, diğer bir deyişle elemanın ikinci mertebe etkiler altındaki davranışı elde edilmiş olur. Ancak bu değerler birbirlerine yakın değil ise ikinci mertebe hesaptan bulunan normal kuvvet başlangıç değeri olarak alınır ve hesap tekrar yapılır. Benzer bir durum yük parametrelerinin hesabında da söz konusudur. İkinci mertebe elastoplastik işlem sonucu elde edilen yük parametresi değerleri iteratif olarak birbirine yakın yük parametresi değeri elde edene kadar tekrarlanır. Bu iki durum, birinci ve ikinci mertebe hesap arasındaki temel farklılıktır. Birinci mertebe elastoplastik işlem adımları yukarıda bahsedilen farklılıklar göz önüne alınarak ikinci mertebe elastoplastik analiz için de geçerlidir.

4.4 Düşey Yüklerin Sabit ve Yatay Yüklerin Arttırılması ile İkinci Mertebe Elastoplastik Analiz

Bir başka analiz yöntemi de düşey yüklerin belirli bir yük emniyet katsayısıyla arttırılıp sabit tutulması ve yatay yüklerin yapı göçene kadar arttırılmasıdır. Buradaki asıl amaç yapıya etkiyen yatay yük parametresinin elde edilmesidir. Yapıdaki tüm yüklerin arttırılması yerine sadece yatay yüklerin arttırılması daha gerçekçi bir yaklaşımdır.

Düşey yüklerin sabit ve yatay yüklerin arttırılması ile yapılan ikinci mertebe elastoplastik ile tüm düşey ve yatay yüklerin birlikte arttırıldığı ikinci mertebe hesap arasındaki fark işlem adımlarındadır. Düşey yüklerin sabit ve yatay yüklerin arttırılması ile yapılan ikinci mertebe elastoplastik hesapta ilk olarak düşey yükler bir emniyet katsayısıyla çarpılarak düşey yüklere göre sistem çözümü elde edilir. Daha

sonra aşağıdaki alt bölümlerde verilen yük parametresi ve akma şartları göz önüne alınarak yatay yük parametreleri elde edilir. Yapı göçme mekanizmasına ulaşincaya kadar işleme devam edilir.

4.4.1 Yanlız Eğilme Moment Etkisi (N=0) Hali İçin Akma Şartı ve Yatay Yük Parametresi Artışı Formülünün Eldesi

Yanlız eğilme momentinin etkisinin dikkate alındığı durum için yük parametresi akma şartına göre elde edilmiştir. TS 4561'e göre denklem 4.51'deki gibi yazılabilir:

$$\frac{M}{M_p} = 1 \quad \left(\frac{N}{N_p} \leq 0.15 \right) \quad (4.51)$$

Moment ifadesi yük parametresine göre yazılır:

$$M = M_D + \Delta p \times \Delta M_Y \quad (4.52)$$

Elde edilen değerler akma şartında yerine konur:

$$\frac{M_D + \Delta p \times \Delta M_Y}{M_p} = 1 \quad (4.53)$$

Yük parametresi elde edilir:

$$\Delta p = \frac{(M_p - M_D)}{(\Delta M_Y)} \quad (4.54)$$

4.4.2 Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Etkisi Hali İçin Akma Şartı ve Yatay Yük Parametresi Artışı Formülünün Eldesi

Eğilme momenti ile birlikte normal kuvvet etkisinin de dikkate alındığı durum için yük parametresi akma şartına göre elde edilmiştir. TS 4561'e göre denklem 4.55'deki gibi yazılabilir:

$$\frac{N}{N_p} + 0.85 \times \frac{M}{M_p} = 1 \quad \left(\frac{N}{N_p} > 0.15 \right) \quad (4.55)$$

Moment ve normal kuvvet ifadeleri yük parametresine göre yazılır:

$$M = M_D + \Delta p \times \Delta M_Y \quad (4.56)$$

$$N = N_D + \Delta p \times \Delta N_Y \quad (4.57)$$

Elde edilen değerler akma şartında yerine konur:

$$\frac{N_D + \Delta p \times \Delta N_Y}{N_p} + 0.85 \times \frac{M_D + \Delta p \times \Delta M_Y}{M_p} = 1 \quad (4.58)$$

Yük parametresi elde edilir:

$$\Delta p = \frac{\left(1 - \frac{N_D}{N_p} - \frac{0.85 \times M_D}{M_p} \right)}{\left(\frac{\Delta N_Y}{N_p} + 0.85 \times \frac{\Delta M_Y}{M_p} \right)} \quad (4.59)$$

$$\Delta p = \frac{(M_p \times N_p - M_p \times N_D - 0.85 \times M_D \times N_p)}{(\Delta N_Y \times M_p + 0.85 \times \Delta M_Y \times N_p)} \quad (4.60)$$

4.5 Burkulma Sınır Yükünün Hesaplanması

Çelik yapıların birinci ve ikinci mertebe analizlerinde dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri burkulma davranışıdır. Non-lineer analizler yapılırken burkulma sınır yükleri bulunarak sistemin davranışı gözlenmelidir (Chen, 2000). Burkulma sınır yüküne ikinci mertebe limit yük de denilmektedir.

Burkulma, plastikleşen kesitlerin sayısının artmasıyla gittikçe rijitliği azalan sistemin kritik yükünün dış yük parametresinin altına düşmesi ile meydana gelir. Bu

durumda sistemin katsayılar matrisinin determinant değeri negatif olmakta ve yük parametresi deplasman diyagramında artan yerdeğiştirmelere azalan yük parametresi karşılık gelmektedir (Livesley, 1975).

Burkulma limit yükü iki şekilde belirlenebilir:

- a- Uygulanan yük parametresi artımı yönteminin her adımında katsayılar matrisin determinant değeri hesaplanır ve bu değerin negatif olduğu yük parametresi için sistemin burkulduğu anlaşılır.
- b- Uygulanan yük parametresi artımı yönteminin her adımında hesaplanan yerdeğiştirme ve plastik şekildeğiştirmeler önceki adımdaki toplam değerleri ile karşılaştırılır. Artan yüklere karşılık bu büyüklüklerin bir önceki adımdaki değerlerle ters işaretli olması artan yerdeğiştirmelere karşılık azalan yük parametresinin karşılık geldiğini, diğer bir deyişle, sistemin burkulduğu anlamına gelir.

İkinci mertebe etkilerin önemli olmadığı durumlarda sistem burkulmadan önce mekanizma durumuna gelerek göçebilir (Özer, 1969).

4.6 Rankine-Merchant Yaklaşık Yük Parametresi Yöntemi

Eksenel kuvvet ve deplasmanın etkili olduğu, diğer bir deyişle geometrik non-lineer etkilerin ihmal edilemediği yapılarda sadece birinci mertebe elastoplastik göçme yükünü belirlemek yeterli olmamaktadır.

Genelde rijit yapıların göçme davranışında birinci mertebe elastoplastik davranış önemli iken, daha narin yapılarda burkulmadan dolayı göçme önem taşır (Majid, 1972). Yaklaşık yük parametresinin bulunması için bu iki durumdan elde edilen yük parametreleri aşağıda belirtilen denklem yardımıyla bulunabilir:

$$\frac{1}{P_R} = \frac{1}{P_c} + \frac{1}{P_e} \quad (4.61)$$

p_R : Yaklaşık göçme yük parametresi

p_c : Birinci mertebe elastoplastik göçme yük parametresi

p_e : Burkulma yük parametresi.

Yapılan çalışmalar sonucu Rankine-Merchant yaklaşık yük parametresi ikinci mertebe elastoplastik analize yakın, ancak daha küçük yük parametresi değerleri vermiştir (Moy, 1996).

Bir başka yaklaşık yük parametresi olan Wood yaklaşık yük parametresi formülü Rankine-Merchant yaklaşık yük parametresi formülünü esas alır (Moy, 1996).

$$p_w = p_c \quad \frac{p_e}{p_c} \geq 10 \quad (4.62)$$

$$\frac{1}{p_w} = \frac{0.9}{p_c} + \frac{1}{p_e} \quad 4 \leq \frac{p_e}{p_c} < 10 \quad (4.63)$$

Wood yaklaşık yük parametresi formülüne göre $\frac{p_e}{p_c} < 4$ ise ikinci mertebe elastoplastik analizin yapılması zorunludur.

4.7 Göçme Yükünün Belirlenmesi

Yapıların göçmesine diğer bir deyişle kullanılamaz hale gelmesine neden olan yükleme şiddetine göçme yükü denilmektedir (Özer, 1969). Sistemin göçmesine neden olan durumlar aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- i- Sistemin mekanizma durumuna gelmesi,
- ii- Plastikleşen kesitlerin biri veya birkaçından sonlu plastik şekildeğiştirmelerin kabul edilebilir sınır değerleri aşması,
- iii- Sistemde büyük yerdeğiştirmelerin meydana gelmesi,
- iv- Burkulma durumlarıdır.

Çeşitli etkenlere bağlı olarak, yüklerin mekanizma veya burkulma yüklerinden herhangi birine erişmesi halinde sistem göçecektir.

4.7.1 Göçme Yükünün Belirlenmesinde Uygulanacak Adımlar

Doğrusal olmayan sistemlerin hesabında, yüklerin burkulma veya kırılma yüklerinden herhangi birine erişmesi halinde sistem göçer. Bundan dolayı göçme, sistemin ve malzemenin özellikleri ve yüklemenin şekli gibi etkenlere bağlı olarak kırılma veya burkulma şeklinde meydana gelmektedir (Davies, 2002). Genel olarak, bu durumlardan hangisinin daha önce meydana geldiğinin hesabın başlangıcında bilinmesi güç olduğundan, göçme yükünün hesabı için aşağıdaki yol uygulanır.

Sistem her yük parametresi artımı değeri için kırılma ve burkulma kontrolü yapılır. Bunun için, her adımda sistemin deplasman ve deformasyonları sınır değer ile karşılaştırılır. Bu büyüklüklerin sınır değeri aşılması durumunda göçme yükü hesaplanabilir. Diğer bir yöntem, yük parametresi deplasman diyagramının eğiminin bulunmasıdır. Eğimin negatif olması sistemin burkulma konumundan geçtiğini ifade ettiğinden, burkulma yükü hesaplanarak göçme yükü elde edilir.

Göçme yükünün doğrudan doğruya hesaplanması ile işlemlerin kısılması mümkündür. Bunun için önce sistemin kırılma yükü hesaplanır. Daha sonra yük parametresi deplasman grafiği çizilir ve eğrinin kırılma yükü civarındaki eğimi incelenir. Eğimin pozitif olması halinde kırılma yükü sistemin göçme yüküne eşittir. Eğimin negatif olması ise sistemin kırılma yüküne erişmeden daha önce bir yük parametresinde burkulduğunu ifade ettiğinden burkulma yükü hesaplanarak göçme yükü elde edilmiş olur.

BÖLÜM BEŞ

NON-LİNEER ÇÖZÜM YÖNTEMLERİNİN

SAYISAL UYGULAMALARI

5.1 Sayısal Uygulamanın Kapsamı

Non-linear çözüm yöntemlerinin bir örnek üzerinde karşılaştırmalı ve kapsamlı olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Çerçeve matris yöntemler kullanılmak suretiyle çözülmüş ve aşağıda belirtilen non-linear çözüm yöntemleri irdelenmiştir.

- I. Mertebe Lineer Elastik Hesap
- I. Mertebe Elastoplastik $K(M)=0$ Hesap
- I. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap
- II. Mertebe Lineer Elastik Hesap
- Burkulma Parametresinin Hesabı
- II. Mertebe Elastoplastik $K(M)=0$ Hesap
- II. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap
- Sabit Düşey Yük Parametresi Altında Artan Yatay Yük İçin II. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap
- LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap
- Rankine-Merchant Yaklaşık Yük Parametresi Yöntemi

5.1.1 Sayısal Uygulamada Yapılan Kabuller

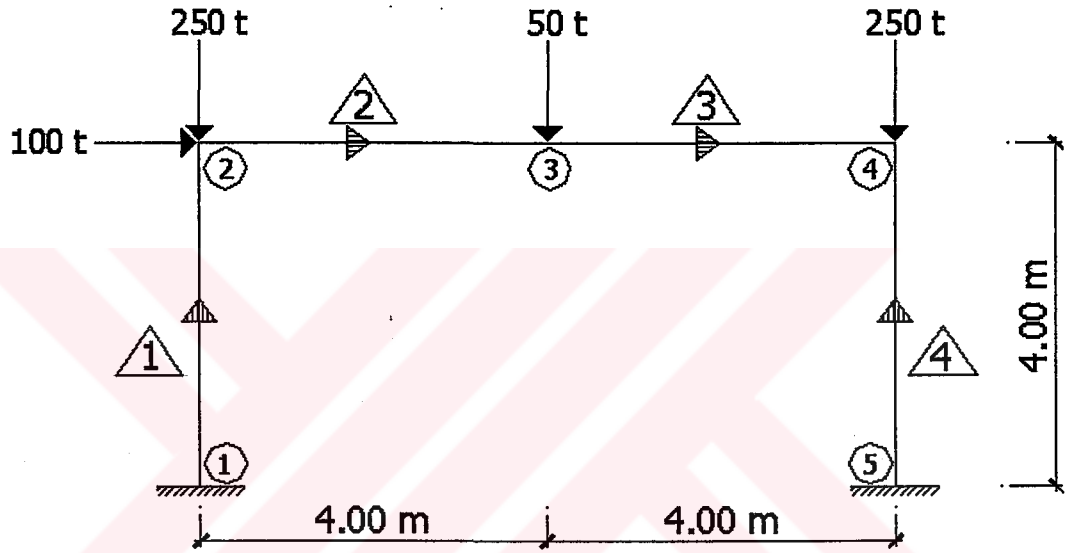
Sayısal uygulamada Bölüm 4'de lineer olmayan hesap yöntemleri için yapılan kabullere ek olarak ikinci mertebe elastoplastik hesap aşamalarında giriş elemanlarında ikinci mertebe etkiler ihmal edilmiştir.

5.2 Sayısal Uygulamada Kullanılan Çerçevenin Özellikleri

Non-linear çözüm yöntemlerinin bir örnek üzerinde karşılaştırmalı olarak incelenmesi amacıyla tek katlı ve tek açıklıklı çelik bir çerçeve seçilmiştir.

5.2.1 Sayısal Uygulamada Kullanılan Çerçevenin Geometrik Özellikleri

Bu çerçevenin yükleme durumu ve çubukların konumları aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.1 Çerçevenin Yükleme Durumu ve Çubukların Konumu

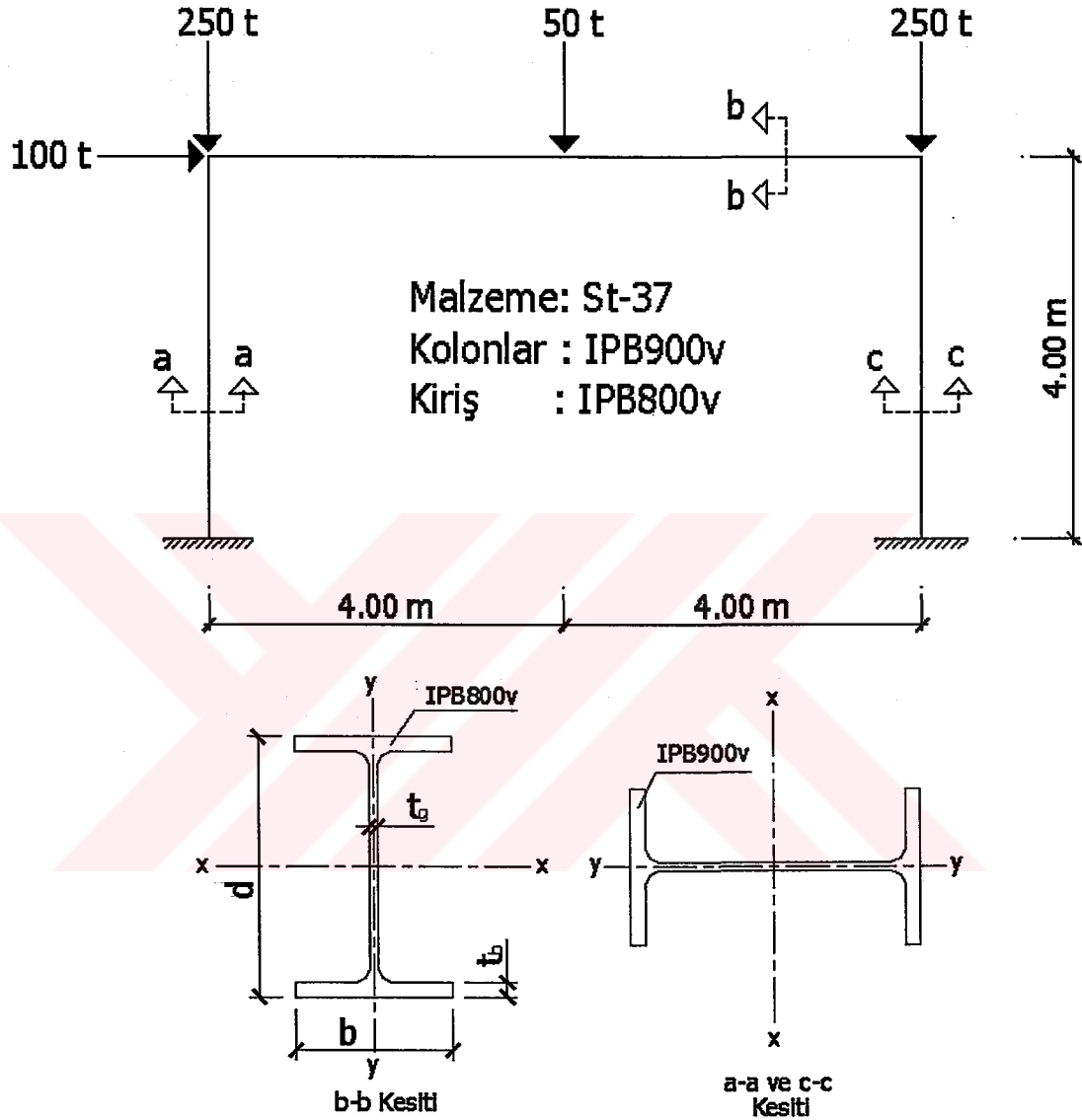
Şekil 5.1'den de görüldüğü gibi 8 metre açıklıklı ve 4 metre yüksekliğinde bir çerçeve seçilmiştir. Her iki kolonun üzerine 250 tonluk ve kiriş açıklığının ortasına 50 tonluk düşey tekil yük yerleştirilmiştir. Aynı esnada çerçeve sistemi kat hizasında bulunan 100 tonluk yatay yük etkisi altındadır.

Çubukların numaralandırılması için aşağıdaki sıra izlenmiştir;

- 1 Numaralı Eleman Kolon Elemanı olup 1 ve 2 No'lu düğüm noktaları arasında,
- 2 Numaralı Eleman Kiriş Elemanı olup 2 ve 3 No'lu düğüm noktaları arasında,
- 3 Numaralı Eleman Kiriş Elemanı olup 3 ve 4 No'lu düğüm noktaları arasında,
- 4 Numaralı Eleman Kolon Elemanı olup 4 ve 5 No'lu düğüm noktaları arasındadır.

5.2.2 Sayısal Uygulamada Kullanılan Çerçevenin Malzeme Özellikleri

Bu çerçevenin yükleme durumu ve profillerin konumları aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.2 Çerçevenin Kesit Özellikleri

Sistemde kullanılan profiller IPB profilleri olup malzeme ST 37 seçilmiştir. Bu profillerin kesit özellikleri Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1 Seçilen Kolon ve Kiriş Elemanların Kesit Özellikleri

Eleman	Malzeme	Seçilen Profil	d (mm)	b (mm)	t _g (mm)	t _b (mm)
Kolonlar	St 37	IPB 900v	910	302	21	40
Kiriş	St 37	IPB 800v	814	303	21	40

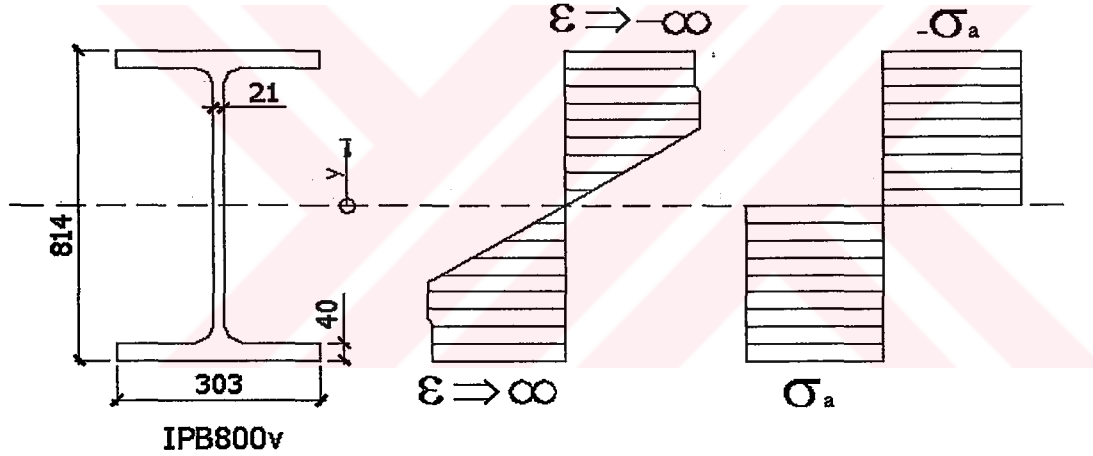
Tablo 5.2’de kolon ve kiriş elemanlarının mukavemet özelliklerinden sadece bir kısmı verilmiştir. Plastik normal kuvvet ve moment taşıma kapasiteleri Bölüm 5.2.2.1’de hesaplanmış ve bu değerler non-lineer hesap aşamalarında kullanılmıştır.

Tablo 5.2 Seçilen Kolon ve Kiriş Elemanların Mukavemet Özellikleri

Eleman	Profil	F (cm ²)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)	i _x (cm)
Kolonlar	IPB 900v	424	570400	12540	36,7
Kiriş	IPB 800v	404	442600	10870	33,1

5.2.2.1 Kiriş ve Kolonların Moment ve Normal Kuvvet Taşıma Kapasitelerinin Bulunması

Kiriş IPB 800v elemanın normal kuvvet ve moment taşıma kapasiteleri N_p ve M_p ile gösterilir:



Şekil 5.3 Plastik Taşıma Gücüne Erişmiş IPB800v Kiriş Elemanın Gerilme ve Şekildeğiştirme Diyagramı

Normal kuvvet taşıma kapasitesi için;

$$N_p = \int \sigma dF = \int_{-d_{dst}}^{d_{ast}} \sigma_a b(y) dy$$

$$N_p = \int_{-d/2}^{-d/2+t_b} \sigma_a b dy + \int_{-d/2+t_b}^{d/2-t_b} \sigma_a t_g dy + \int_{d/2-t_b}^{d/2} \sigma_a b dy$$

$$N_p = \int_{-40,7}^{-40,7+4} \sigma_a 30.3 dy + \int_{-40,7+4}^{40,7-4} \sigma_a 2.1 dy + \int_{40,7-4}^{40,7} \sigma_a 30.3 dy$$

$N_p = 951.696 \text{ t.}$ elde edilmiştir.

Plastik moment taşıma kapasitesi için ise Bölüm 2’de elde edildiği üzere;

$$M_p = \int \sigma y dF = \int_{-d_{\text{dst}}}^{d_{\text{alt}}} \sigma_a b(y) y dy$$

$$M_p = 2 \sigma_a \left(\int_0^{d/2-t_b} t_g y dy + \int_{d/2-t_b}^{d/2} b y dy \right)$$

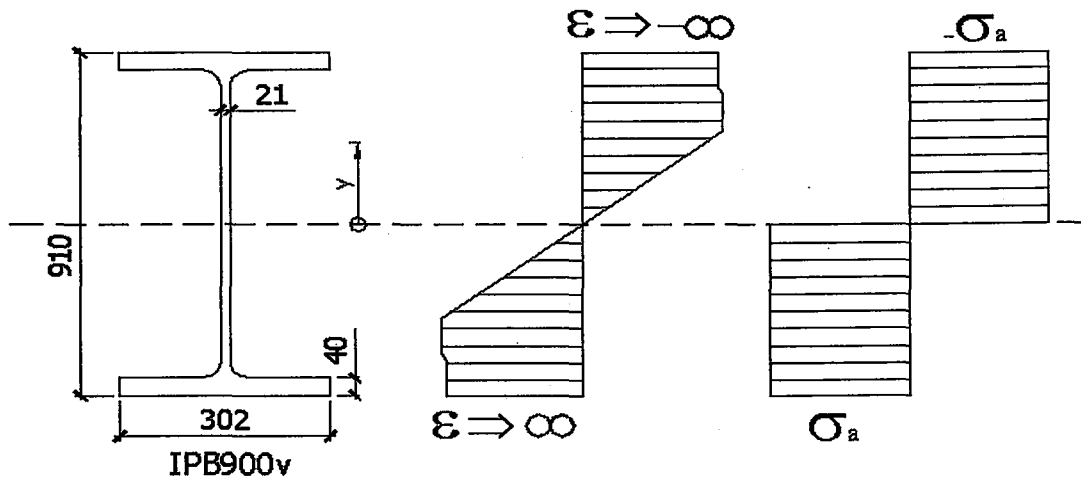
$$M_p = 2 \sigma_a \left[t_g \left(\frac{1}{2} \left(\frac{d-2t_b}{2} \right)^2 - 0 \right) + b \left(\frac{1}{2} \left(\frac{d}{2} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{d-2t_b}{2} \right)^2 \right) \right]$$

$$M_p = \sigma_a \left[t_g \frac{(d-2t_b)^2}{4} + b \left(\frac{d^2}{4} - \frac{(d-2t_b)^2}{4} \right) \right]$$

$$M_p = \sigma_a \left[2.1 \frac{(81.4-8.0)^2}{4} + 30.3 \left(\frac{81.4^2}{4} - \frac{(81.4-8.0)^2}{4} \right) \right] \text{ ara işlemleri sonucu}$$

$M_p = 293.024 \text{ tm.}$ bulunur.

Kolon IPB 900v elemanın normal kuvvet ve moment taşıma kapasiteleri N_p ve M_p ile gösterilir:



Şekil 5.4 Plastik Taşıma Gücüne Erişmiş IPB900v Kolon Elemanın Gerilme ve Şekildeğiştirme Diyagramı

Normal kuvvet taşıma kapasitesi için;

$$N_p = \int \sigma dF = \int_{-d_{ust}}^{d_{alt}} \sigma_a b(y) dy$$

$$N_p = \int_{-d/2}^{-d/2+t_b} \sigma_a b dy + \int_{-d/2+t_b}^{d/2-t_b} \sigma_a t_g dy + \int_{d/2-t_b}^{d/2} \sigma_a b dy$$

$$N_p = \int_{-45,5}^{-45,5+4} \sigma_a 30.2 dy + \int_{-45,5+4}^{45,5-4} \sigma_a 2.1 dy + \int_{45,5-4}^{45,5} \sigma_a 30.2 dy$$

$$N_p = 998.160 \text{ t. elde edilmiştir.}$$

Plastik moment taşıma kapasitesi için ise Bölüm 2’de elde edildiği üzere;

$$M_p = \int \sigma y dF = \int_{-d_{ust}}^{d_{alt}} \sigma_a b(y) y dy$$

$$M_p = 2 \sigma_a \left(\int_0^{d/2-t_b} t_g y dy + \int_{d/2-t_b}^{d/2} b y dy \right)$$

$$M_p = 2 \sigma_a \left[t_g \left(\frac{1}{2} \left(\frac{d-2t_b}{2} \right)^2 - 0 \right) + b \left(\frac{1}{2} \left(\frac{d}{2} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{d-2t_b}{2} \right)^2 \right) \right]$$

$$M_p = \sigma_a \left[t_g \frac{(d-2t_b)^2}{4} + b \left(\frac{d^2}{4} - \frac{(d-2t_b)^2}{4} \right) \right]$$

$$M_p = \sigma_a \left[2.1 \frac{(91.0-8.0)^2}{4} + 30.2 \left(\frac{91.0^2}{4} - \frac{(91.0-8.0)^2}{4} \right) \right] \text{ ara işlemleri sonucu}$$

$$M_p = 339.032 \text{ tm. bulunur.}$$

5.3 Lineer ve Lineer Olmayan Sistem Çözümleri

5.3.1 I. Mertebe Lineer Elastik Hesap

Birinci mertebe lineer elastik hesap yapılacaktır.

5.3.1.1 Elemanların Kesit Değerleri ve Uygulanan Yükleme Durumu

Elemanların çeşitli kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.3 Kolon ve Kiriş Elemanların Hesaplarda Kullanılacak Kesit Özellikleri

Eleman No	1 Eleman	2 Eleman	3 Eleman	4 Eleman
Eleman Uzunluğu (m)	4	4	4	4
Kesit Alanı (m ²)	0,0424	0,0404	0,0404	0,0424
Atalet Momenti (m ⁴)	0,005704	0,004426	0,004426	0,005704
Elastite Modülü (t/m ²)	21000000	21000000	21000000	21000000

Tablo 5.4 Çerçeveye Uygulanan Yük Değerleri

Uygulanan Dış Kuvvet Değerleri	P ₁ (ton)	P ₂ (ton)	P ₃ (ton)	P ₄ (ton)
	250	250	50	100

5.3.1.2 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 22460 & 0 & -44919 & -22460 & 0 & -44919 & 1 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 2 \\ -44919 & 0 & 119784 & 44919 & 0 & 59892 & 3 \\ -22460 & 0 & 44919 & 22460 & 0 & 44919 & 4 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 5 \\ -44919 & 0 & 59892 & 44919 & 0 & 119784 & 6 \end{bmatrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_4] = \begin{bmatrix} 13 & 14 & 15 & 10 & 11 & 12 \\ 22460 & 0 & -44919 & -22460 & 0 & -44919 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ -44919 & 0 & 119784 & 44919 & 0 & 59892 \\ -22460 & 0 & 44919 & 22460 & 0 & 44919 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -44919 & 0 & 59892 & 44919 & 0 & 119784 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 234560 & 0 & 44919 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 44919 & 34855 & 212730 & 0 & -34855 & 46473 & 185892 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -34855 & 46473 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 234560 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & 240027 & -34855 & 44919 & -34855 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 44919 & -34855 & 212730 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$[K_s] =$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 4.487 & 0.078 & -1.088 & 4.260 & -0.142 & 0.479 & 4.034 & -0.078 & -0.946 & 4 \\ 0.078 & 0.448 & -0.039 & 0.078 & 0.225 & -0.064 & 0.078 & 0.001 & -0.039 & 5 \\ -1.088 & -0.039 & 0.881 & -1.017 & 0.744 & -0.240 & -0.946 & 0.039 & 0.137 & 6 \\ 4.260 & 0.078 & -1.017 & 4.496 & 0.000 & 0.479 & 4.260 & -0.078 & -1.017 & 7 \\ -0.142 & 0.225 & 0.744 & 0.000 & 4.582 & 0.000 & 0.142 & 0.225 & -0.744 & 8 \\ 0.479 & -0.064 & -0.240 & 0.479 & 0.000 & 0.682 & 0.479 & 0.064 & -0.240 & 9 \\ 4.034 & 0.078 & -0.946 & 4.260 & 0.142 & 0.479 & 4.487 & -0.078 & -1.088 & 10 \\ -0.078 & 0.001 & 0.039 & -0.078 & 0.225 & 0.064 & -0.078 & 0.448 & 0.039 & 11 \\ -0.940 & -0.039 & 0.137 & -1.017 & -0.744 & -0.240 & -1.088 & 0.039 & 0.881 & 12 \end{bmatrix}$$

$[K_s^{-1}] = 10^{-5}$

5.3.1.3 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 4.559 \quad -1.157 \quad -1.460 \quad 4.260 \quad -3.556 \quad 0.479 \quad 3.962 \quad -1.314 \quad -0.574 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.004585 \quad -0.001157 \quad -0.001460 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.004585 \quad -0.001157 \quad -0.001460 \quad 0.004260 \quad -0.003556 \quad -0.000479 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.004260 \quad -0.003556 \quad -0.000479 \quad 0.003962 \quad -0.001314 \quad -0.000574 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.003962 \quad -0.001314 \quad -0.000574 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -36.785 \quad 257.615 \quad 117.302 \quad 36.785 \quad -257.615 \quad -29.840 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 63.215 \quad 7.615 \quad -29.840 \quad -63.215 \quad -7.615 \quad -60.299 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 63.215 \quad -42.385 \quad -60.299 \quad -63.215 \quad 42.385 \quad -109.243 \rangle$$

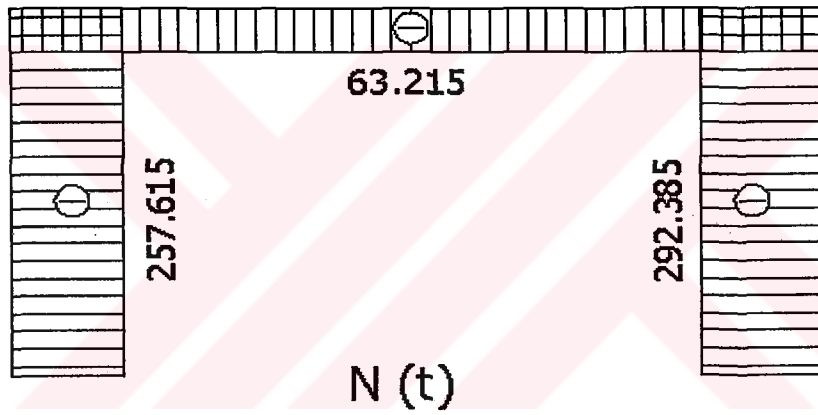
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle -63.215 \quad 292.385 \quad 143.615 \quad 63.215 \quad -292.385 \quad 109.243 \rangle$$

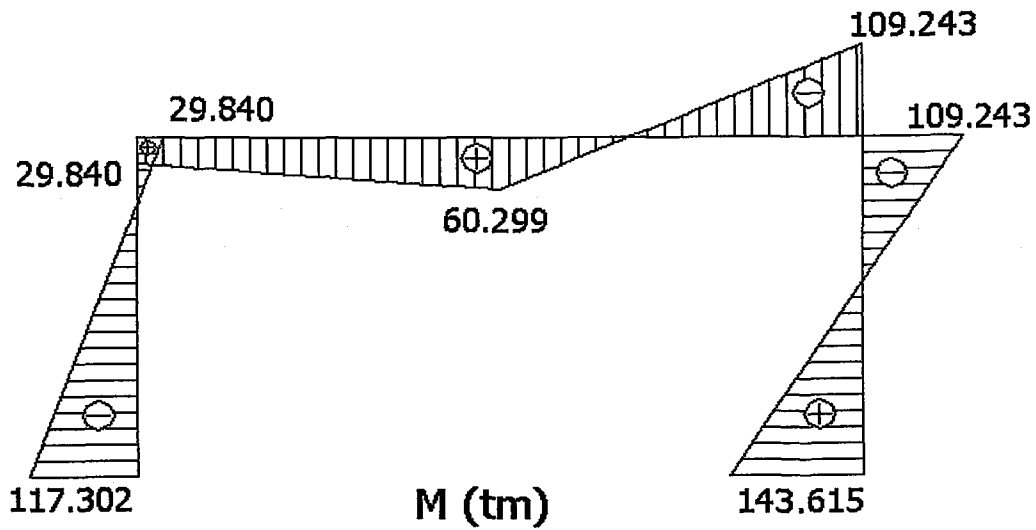
Tablo 5.5 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_i(t)$	257.615	63.215	63.215	292.385
$T_i(t)$	-36.785	7.615	-42.385	-63.215
$M_i(tm)$	117.302	-29.840	-60.299	143.615
$N_k(t)$	-257.615	-63.215	-63.215	-292.385
$T_k(t)$	36.785	-7.615	42.385	63.215
$M_k(tm)$	29.840	60.299	-109.243	109.243

5.3.1.4 Düzlem Çerçevenin I. Mertebe Lineer Elastik Hesabı İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.5 Birinci Mertebe Lineer Elastik Hesap Normal Kuvvet Diyagramı

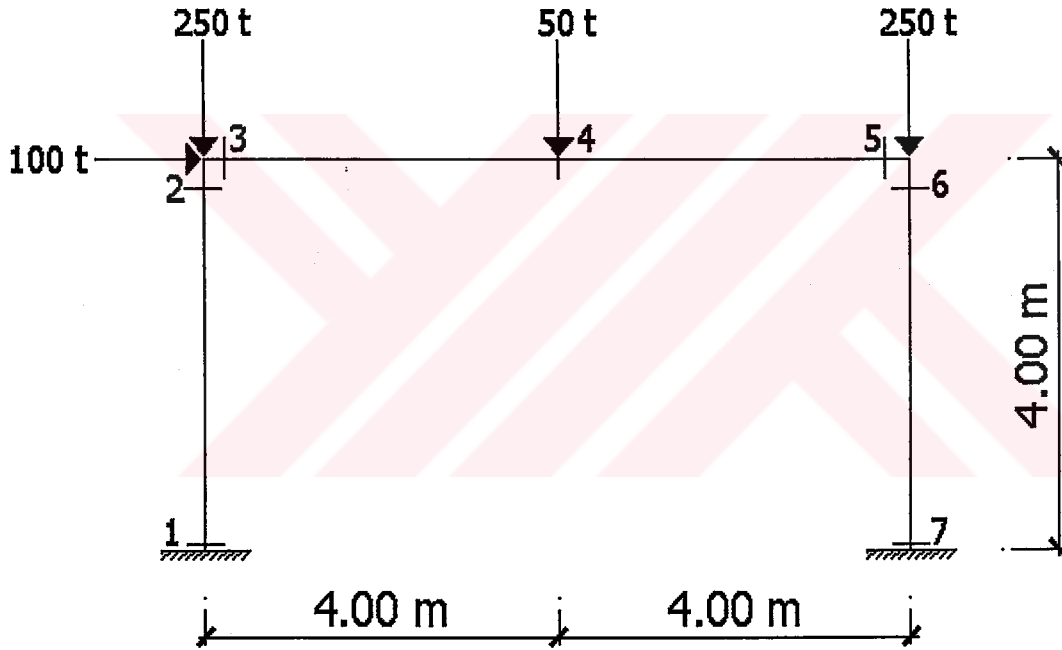


Şekil 5.6 Birinci Mertebe Lineer Elastik Hesap Moment Diyagramı

5.3.1.5 Kritik Kesitlerin Belirlenmesi

I. mertebe lineer elastik hesap sonucunda elde edilen normal kuvvet ve moment diyagramlarından plastik mafsallara nispeten diğer kesitlerden daha yakın olan kesitler belirlenmiştir. Bu işlemin amacı tüm kesitleri kontrol etmek suretiyle harcanacak zaman ve işlemlerden tasarruf etmektir.

Örnek çerçeve üzerinde aşağıda gösterildiği üzere 7 kritik kesit seçilmiş ve Şekil 5.7 üzerinde gösterilmiştir. Bu seçilen kesitler lineer olmayan hesaplar sırasında kontrol edilecektir.

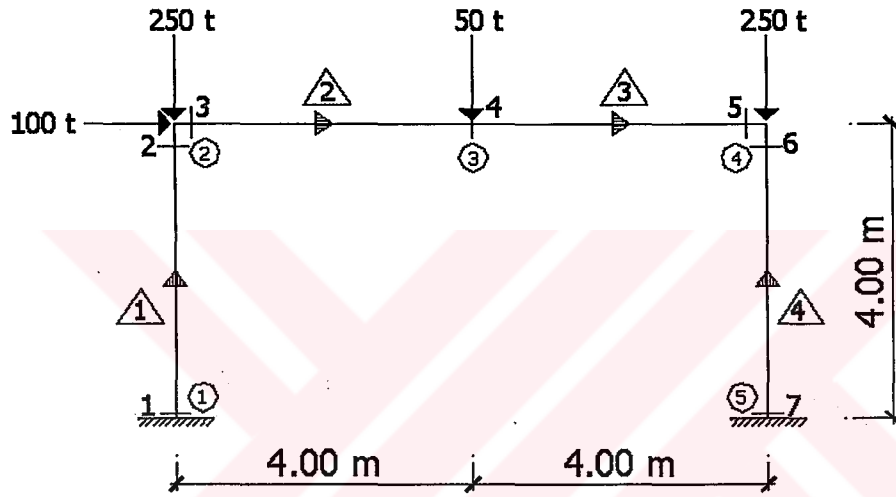


Şekil 5.7 Lineer Olmayan Hesaplarda Kullanılacak Kritik Kesitler

5.3.2 I. Mertebe Elastoplastik $K(M)=0$ Hesap

I. mertebe lineer elastik hesap sonucunda bulunan kritik kesitler gözönüne alınarak I. mertebe elastoplastik hesap yapılacaktır.

Denge denklemleri şekildeğiştirmemiş eksen üzerinden yazılacağından I. mertebe teorisi bu kısımda geçerlidir. Malzemenin lineer olmayan davranışının incelenmesi bu hesapta esastır. Yanlız moment etkisi altındaki akma davranışı, $K(M)=0$, dikkate alınacaktır. Normal kuvvetin akma davranışına olan etkisi ihmal edilmektedir.



Şekil 5.8 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İçin Çerçevenin Yükleme Durumu ve Kritik Kesitler

5.3.2.1 Birinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İlk Yük Parametresinin Belirlenmesi

I. mertebe lineer elastik hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.6 yazılır:

Tablo 5.6 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci Yük Parametresi

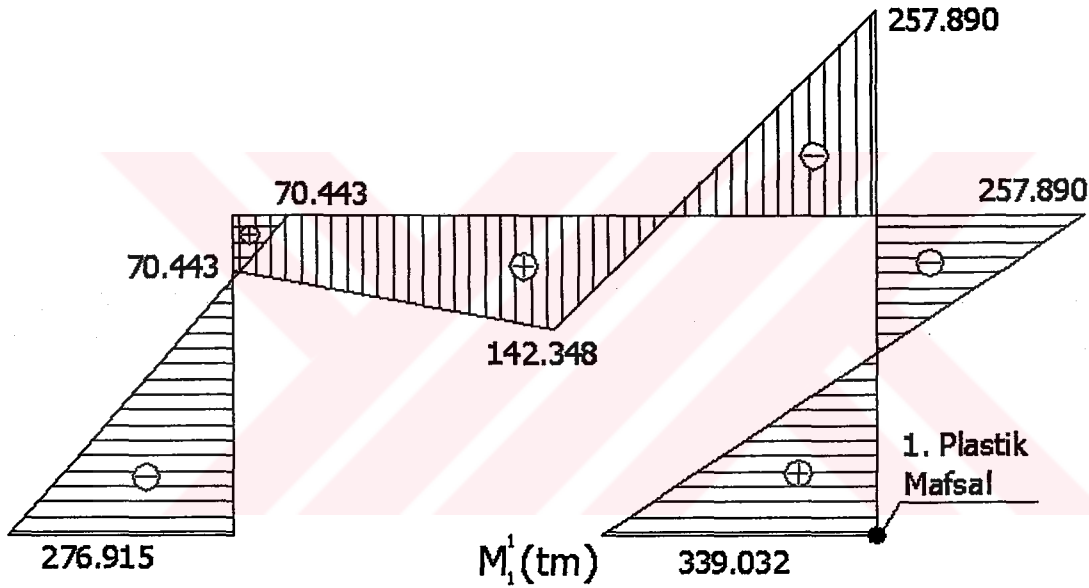
Kesit No	M_p	ΔM_1	Δp_1
1	-339.032	-117.302	2.890
2	339.032	29.840	11.362
3	293.024	29.840	9.820
4	293.024	60.299	4.860
5	-293.024	-109.243	2.682
6	-339.032	-109.243	3.103
7	339.032	143.615	2.361

Yük parametresi $p_1 = 2.361$ değerinde (7) numaralı kesitte ilk plastik mafsall oluşur. Yüklerin $p_1 = 2.361$ kat artırılması sonucu ilk plastik mafsall oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_1^1 = \Delta p_1^1 \delta_{x,1}$$

$$\delta_1^1 = 2.361 \times 0.004559 = 0.010764 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_1 = 2.361$ olduğunda ilk plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.010764 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış moment değerleri Şekil 5.9'da sunulmuştur.



Şekil 5.9 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı

Kesit (7) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (7) numaralı kesite ilk plastik mafsall konulmuştur.

5.3.2.2 Birinci Plastik Mafsallın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların çeşitli kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme durumu Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'de verilmiştir.

5.3.2.3 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_1] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 22460 & 0 & -44919 & -22460 & 0 & -44919 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ -44919 & 0 & 119784 & 44919 & 0 & 59892 \\ -22460 & 0 & 44919 & 22460 & 0 & 44919 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -44919 & 0 & 59892 & 44919 & 0 & 119784 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix} \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix} \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Sol ucunda mafsall bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsal}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5615 & 0 & 0 & -5615 & 22460 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5615 & 0 & 0 & 5615 & 22460 \\ 0 & 22460 & 0 & 0 & -22460 & 89838 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsall bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K_{\text{Sol,mafsal}}][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} & 13 & 14 & 15 & 10 & 11 & 12 \\ \begin{bmatrix} 5615 & 0 & 0 & -5615 & 0 & -22460 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5615 & 0 & 0 & 5615 & 0 & 22460 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22460 & 0 & 0 & 22460 & 0 & 89838 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 234560 & 0 & 44919 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 44919 & 34855 & 212730 & 0 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & 0 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 185892 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & -34855 & 46473 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 217715 & 0 & 240027 & -34855 & 22460 & 182784 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 0 & 240027 & -34855 & 22460 & 182784 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 46473 & 22460 & -34855 & 182784 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 7.246 & 0.104 & -1.848 & 7.150 & 0.988 & 0.638 & 7.055 & -0.104 & -0.861 & 4 \\ 0.104 & 0.448 & -0.046 & 0.105 & 0.217 & -0.063 & 0.106 & 0.001 & -0.038 & 5 \\ -1.848 & -0.046 & 1.090 & -1.813 & 0.977 & -0.283 & 7.425 & -0.783 & -0.106 & 6 \\ 7.150 & 0.105 & -1.813 & 7.525 & -0.885 & 0.646 & 7.425 & -0.105 & -0.928 & 7 \\ -0.988 & 0.217 & 0.977 & -0.885 & 4.841 & -0.049 & -0.783 & 0.233 & -0.770 & 8 \\ 0.638 & -0.063 & -0.283 & 0.646 & -0.049 & 0.691 & 0.653 & 0.063 & -0.235 & 9 \\ 7.055 & 0.106 & -1.778 & 7.425 & -0.783 & 0.653 & 7.796 & -0.106 & -0.995 & 10 \\ -0.104 & 0.001 & 0.046 & -0.105 & 0.233 & 0.063 & -0.106 & 0.448 & 0.038 & 11 \\ -0.861 & -0.038 & 0.113 & -0.928 & -0.770 & -0.235 & -0.995 & 0.038 & 0.883 & 12 \end{bmatrix}$$

5.3.2.4 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 7.740 \quad -1.127 \quad -2.337 \quad 7.593 \quad -4.531 \quad 0.663 \quad 7.446 \quad -1.343 \quad -0.476 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.007740 \quad -0.001127 \quad -0.002337 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.007740 \quad -0.001127 \quad -0.002337 \quad 0.007593 \quad -0.004531 \quad 0.000663 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.007593 \quad -0.004531 \quad 0.000663 \quad 0.007446 \quad -0.001343 \quad -0.000476 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.007446 \quad -0.001343 \quad -0.000476 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -68.871 \quad 250.965 \quad 207.718 \quad 68.871 \quad -250.965 \quad 67.765 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 31.129 \quad 0.965 \quad -67.765 \quad -31.129 \quad -0.965 \quad 71.624 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 31.129 \quad -49.035 \quad -71.624 \quad -31.129 \quad 49.035 \quad -124.518 \rangle$$

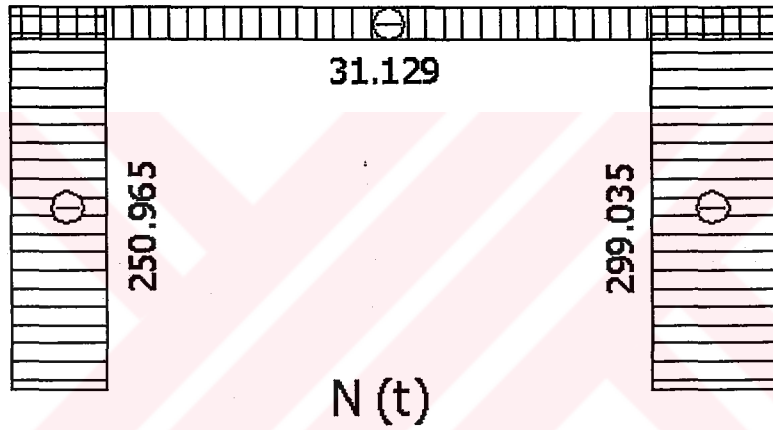
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle -31.129 \quad 299.035 \quad 0.000 \quad 31.129 \quad -299.035 \quad 124.518 \rangle$$

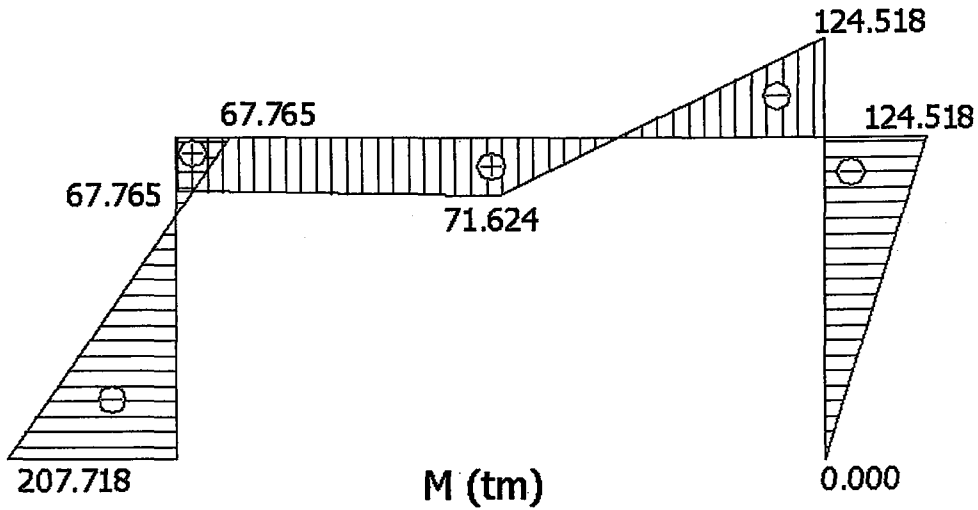
Tablo 5.7 Çubuk Elemanların Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_j(t)$	250.965	31.129	31.129	299.035
$T_j(t)$	-68.871	0.965	-49.035	-31.129
$M_j(tm)$	207.718	-67.765	-71.624	0.000
$N_k(t)$	-250.965	-31.129	-31.129	-299.035
$T_k(t)$	68.871	-0.965	49.035	31.129
$M_k(tm)$	67.765	71.624	-124.518	124.518

5.3.2.5 Birinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.10 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.11 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Moment Diyagramı

5.3.2.6 İkinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İkinci Yük Parametresinin Belirlenmesi

I. mertebe hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.8 hazırlanır:

Tablo 5.8 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci Yük Parametresi

Kesit No	M_p	M_1	ΔM_2	Δp_2
1	-339.032	-276.915	-207.718	0.299
2	339.032	70.443	67.765	3.964
3	293.024	70.443	67.765	3.285
4	293.024	142.348	71.624	2.104
5	-293.024	-257.890	-124.518	0.282
6	-339.032	-257.890	-124.518	0.652
7	339.032	339.032	-	-

Yük parametresi $\Delta p_2 = 0.282$ artırıldığında (5) no'lu kesitte ikinci plastik mafsal oluşur. İkinci yük parametresi;

$$p_2 = p_1 + \Delta p_2$$

$$p_2 = 2.361 + 0.282 = 2.643 \text{ elde edilir.}$$

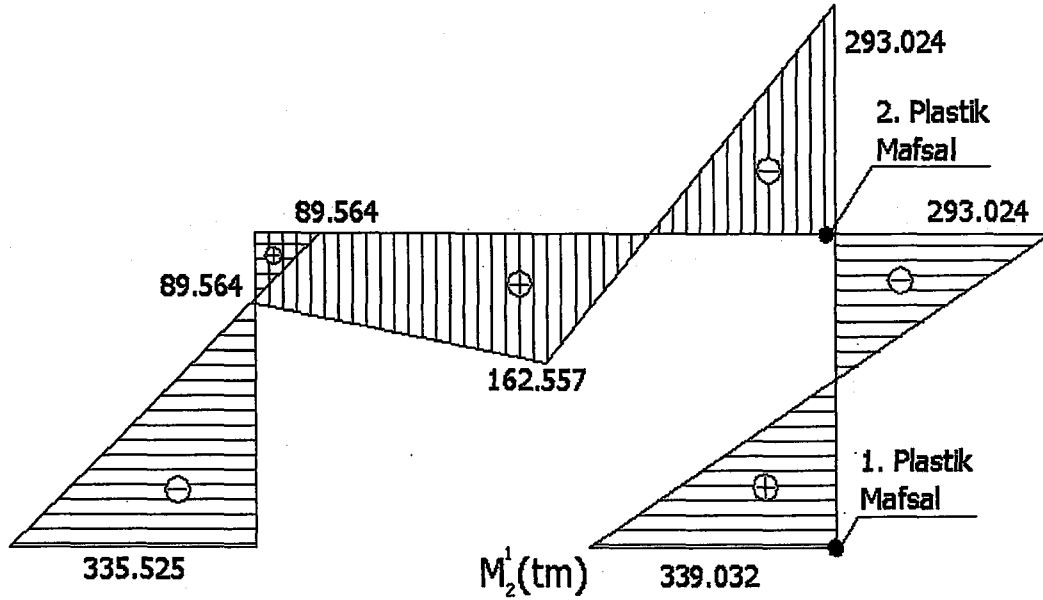
Yüklerin $p_2 = 2.643$ kat artırılması sonucu ikinci plastik mafsal oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_2^I = \delta_1^I + \Delta p_2^I \delta_{x,1}$$

$$\delta_2^I = 0.010764 + 0.282 \times 0.007740 = 0.012946 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_2 = 2.643$ olduğunda ikinci plastik mafsal oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.012946 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış moment değerleri Şekil 5.12'de sunulmuştur.

Kesit (5) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (5) numaralı kesite ikinci plastik mafsal konulmuştur.



Şekil 5.12 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı

5.3.2.7 İkinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların çeşitli kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme durumu Tablo 5.3 ve Tablo 5.4’de verilmiştir.

5.3.2.8 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \begin{bmatrix} 22460 & 0 & -44919 & -22460 & 0 & -44919 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ -44919 & 0 & 119784 & 44919 & 0 & 59892 \\ -22460 & 0 & 44919 & 22460 & 0 & 44919 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -44919 & 0 & 59892 & 44919 & 0 & 119784 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Sağ ucunda mafsalsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sağ Mafsalsal}}] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 4357 & 17427 & 0 & -4357 & 0 \\ 0 & 17427 & 69710 & 0 & -17427 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -4357 & -17427 & 0 & 4357 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Sağ ucunda mafsalsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_3] = [\alpha_3][K_{\text{Sağ mafsalsal}}][\alpha_3]^T$ işleminden 3. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 4357 & 17427 & 0 & -4357 & 0 \\ 0 & 17427 & 69710 & 0 & -17427 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -4357 & -17427 & 0 & 4357 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Sol ucunda mafsalsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsals}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5615 & 0 & 0 & -5615 & 22460 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5615 & 0 & 0 & 5615 & 22460 \\ 0 & 22460 & 0 & 0 & -22460 & 89838 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsalsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K_{\text{Sol,mafsals}}][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} & 13 & 14 & 15 & 10 & 11 & 12 \\ 5615 & 0 & 0 & -5615 & 0 & -22460 & 13 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 \\ -5615 & 0 & 0 & 5615 & 0 & 22460 & 10 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 11 \\ -22460 & 0 & 0 & 22460 & 0 & 89838 & 12 \end{bmatrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 234560 & 0 & 44919 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 44919 & 34855 & 212730 & 0 & -34855 & 46473 & -17427 & 162656 & 0 & -17427 & -4357 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 21784 & -17427 & 0 & 0 & 0 & -4357 & 0 & 0 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -17427 & 162656 & 0 & 0 & -17427 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 217715 & 0 & 0 & 0 & 22460 & 22460 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4357 & -17427 & 0 & 226957 & 0 & 0 & 89838 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 10.641 & 0.060 & -3.094 & 10.641 & -4.619 & 0.370 & 10.641 & -0.060 & -2.660 \\ 0.060 & 0.449 & -0.030 & 0.060 & 0.263 & -0.059 & 0.060 & 0.001 & -0.015 \\ -3.094 & -0.030 & 1.547 & -3.094 & 2.310 & -0.185 & -3.094 & 0.030 & 0.774 \\ 10.641 & 0.060 & -3.094 & 11.113 & -4.619 & 0.370 & 11.113 & -0.060 & -2.778 \\ -4.619 & 0.263 & 2.310 & -4.619 & 8.724 & 0.238 & -4.619 & 0.186 & 1.155 \\ 0.370 & -0.059 & -0.185 & 0.370 & 0.238 & 0.712 & 0.370 & -0.059 & -0.092 \\ 10.641 & 0.060 & -3.094 & 11.113 & -4.619 & 0.370 & 11.584 & -0.060 & -2.896 \\ -0.060 & 0.001 & 0.030 & -0.060 & 0.186 & 0.059 & -0.060 & 0.449 & 0.015 \\ -2.660 & -0.015 & 0.774 & -2.778 & 1.155 & -0.092 & -2.896 & 0.015 & 1.837 \end{bmatrix}$$

5.3.2.9 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 12.951 \quad -1.195 \quad -4.249 \quad 12.951 \quad -10.104 \quad 0.251 \quad 12.951 \quad -1.276 \quad -3.238 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.012951 \quad -0.001195 \quad -0.004249 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.01295 \quad -0.001195 \quad -0.004249 \quad 0.012951 \quad -0.010104 \quad 0.000251 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.012951 \quad -0.010104 \quad 0.000251 \quad 0.012951 \quad -0.001276 \quad -0.003238 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.012951 \quad -0.001276 \quad -0.003238 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -100.000 \quad 265.906 \quad 327.249 \quad 100.000 \quad -265.906 \quad 72.751 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 0.000 \quad 15.906 \quad -72.751 \quad 0.000 \quad -15.906 \quad 136.376 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 0.000 \quad -34.094 \quad -136.376 \quad -0.000 \quad 34.094 \quad 0.000 \rangle$$

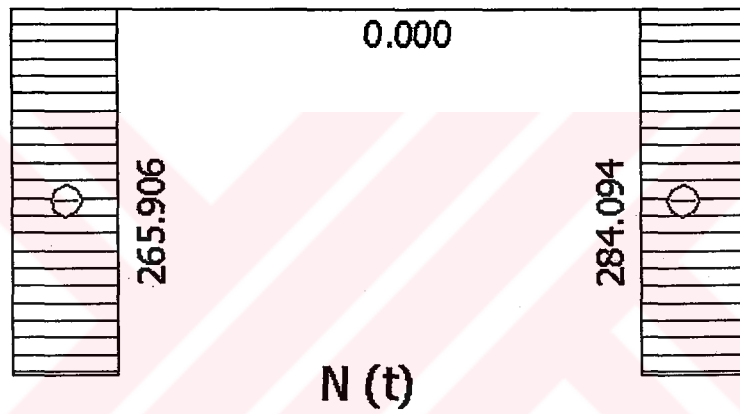
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle 0.000 \quad 284.094 \quad 0.000 \quad 0.000 \quad -284.094 \quad 0.000 \rangle$$

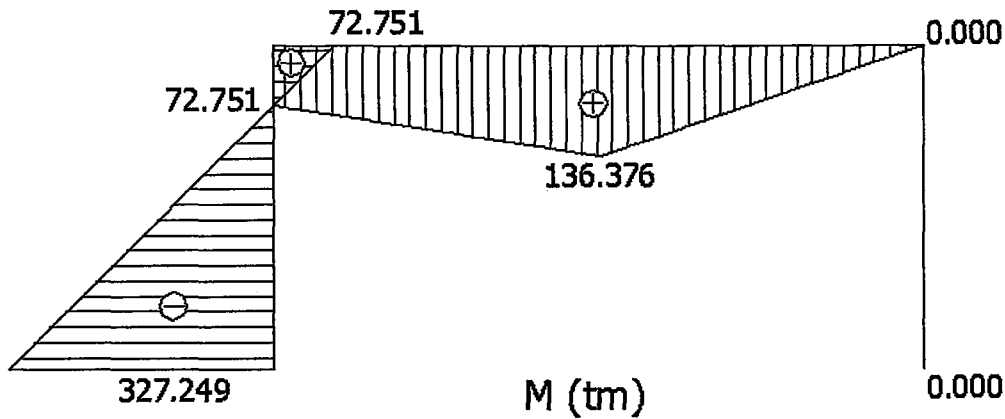
Tablo 5.9 Çubuk Elemanların Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_j(t)$	265.906	0.000	0.000	284.094
$T_j(t)$	-100.000	15.906	-34.094	0.000
$M_j(tm)$	327.249	-72.751	-136.376	0.000
$N_k(t)$	-265.906	0.000	0.000	-284.094
$T_k(t)$	100.000	-15.906	34.094	0.000
$M_k(tm)$	72.751	136.376	0.000	0.000

5.3.2.10 İkinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.13 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.14 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Moment Diyagramı

5.3.2.11 Üçüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Üçüncü Yük Parametresinin Belirlenmesi

I. mertebe hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.10 hazırlanır:

Tablo 5.10 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üçüncü Yük Parametresi

Kesit No	M_p	M_2	ΔM_3	Δp_3
1	-339.032	-335.525	-327.249	0.011
2	339.032	89.564	72.751	3.429
3	293.024	89.564	72.751	2.797
4	293.024	162.557	136.376	0.957
5	-293.024	-293.024	-	-
6	-339.032	-293.024	-	-
7	339.032	339.032	-	-

Yük parametresi $\Delta p_3 = 0.011$ artırıldığında (1) numaralı kesitte üçüncü plastik mafsal oluşur. Üçüncü yük parametresi;

$$p_3 = p_2 + \Delta p_3$$

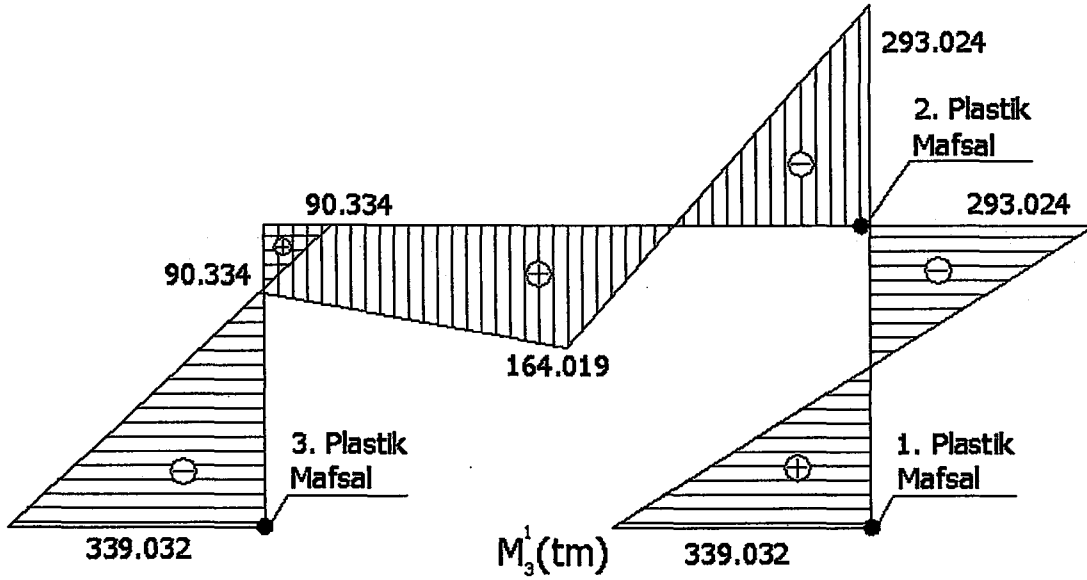
$$p_3 = 2.643 + 0.011 = 2.654 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_3 = 2.654$ kat artırılması sonucu üçüncü plastik mafsal oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_3^1 = \delta_2^1 + \Delta p_3^1 \delta_{x,1}$$

$$\delta_3^1 = 0.012946 + 0.011 \times 0.012951 = 0.013089 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_3 = 2.654$ olduğunda üçüncü plastik mafsal oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.013089 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış moment değerleri Şekil 5.15'de sunulmuştur.



Şekil 5.15 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı

Kesit (1) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (1) numaralı kesite üçüncü plastik mafsalları konulmuştur.

5.3.2.12 Üçüncü Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların çeşitli kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme durumu Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'de verilmiştir.

5.3.2.13 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Sol ucunda mafsalları bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsal}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5615 & 0 & 0 & -5615 & 22460 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5615 & 0 & 0 & 5615 & 22460 \\ 0 & 22460 & 0 & 0 & -22460 & 89838 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K_{\text{Sol,mafsal}}][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 5615 & 0 & 0 & -5615 & 0 & -22460 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5615 & 0 & 0 & 5615 & 0 & 22460 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22460 & 0 & 0 & 22460 & 0 & 89838 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Sağ ucunda mafsalsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sag Mafsal}}] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 4357 & 17427 & 0 & -4357 & 0 \\ 0 & 17427 & 69710 & 0 & -17427 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -4357 & -17427 & 0 & 4357 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Sağ ucunda mafsalsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_3] = [\alpha_3][K_{\text{Sag mafsals}}][\alpha_3]^T$ işleminden 3. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 4357 & 17427 & 0 & -4357 & 0 \\ 0 & 17427 & 69710 & 0 & -17427 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -4357 & -17427 & 0 & 4357 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Sol ucunda mafsalsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsal}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5615 & 0 & 0 & -5615 & 22460 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5615 & 0 & 0 & 5615 & 22460 \\ 0 & 22460 & 0 & 0 & -22460 & 89838 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K_{\text{Sol,mafsal}}][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} 5615 & 0 & 0 & -5615 & 0 & -22460 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5615 & 0 & 0 & 5615 & 0 & 22460 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22460 & 0 & 0 & 22460 & 0 & 89838 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 217715 & 0 & 22460 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & -4357 & -17427 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 22460 & 34855 & 182784 & 0 & 46473 & 162656 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 21784 & -17427 & 0 & -4357 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -17427 & 162656 & 0 & -17427 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 217715 & 0 & 0 & 22460 & 0 & 22460 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & 0 & 226957 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4357 & -17427 & 0 & 0 & 226957 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22460 & 0 & 0 & 89838 & 0 & 89838 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 63.939 & 0.225 & -11.532 & 63.939 & -17.214 & 1.378 & 63.939 & -0.225 & -15.985 & 4 & 4 \\ 0.225 & 0.449 & -0.056 & 0.225 & 0.225 & -0.056 & 0.225 & 0.000 & -0.056 & 5 & 5 \\ -11.532 & -0.056 & 2.883 & -11.532 & 4.304 & -0.345 & -11.532 & 0.056 & 2.883 & 6 & 6 \\ 63.939 & 0.225 & -11.532 & 64.411 & -17.214 & 1.378 & 64.411 & -0.225 & -16.103 & 7 & 7 \\ -17.214 & 0.225 & 4.304 & -17.214 & 11.701 & 0.000 & -17.214 & 0.225 & -4.304 & 8 & 8 \\ 1.378 & -0.056 & -0.345 & 1.378 & 0.000 & 0.731 & 1.378 & 0.056 & -0.345 & 9 & 9 \\ 63.939 & 0.225 & -11.532 & 64.411 & -17.214 & 1.378 & 64.882 & -0.225 & -16.221 & 10 & 10 \\ -0.225 & 0.000 & 0.056 & -0.225 & 0.225 & 0.056 & -0.225 & 0.449 & 0.056 & 11 & 11 \\ -15.985 & -0.056 & 2.883 & -16.103 & 4.304 & -0.345 & -16.221 & 0.056 & 5.168 & 12 & 12 \end{bmatrix}$$

5.3.2.14 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 72.546 \ -1.011 \ -13.684 \ 72.546 \ -24.188 \ 1.378 \ 72.546 \ -1.460 \ -18.137 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \ 0 \ 0 \ 0.072546 \ -0.001011 \ -0.013684 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.072546 \ -0.001011 \ -0.013684 \ 0.072546 \ -0.024188 \ 0.001379 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.072546 \ -0.024188 \ 0.001379 \ 0.072546 \ -0.001460 \ -0.018137 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \ 0 \ 0 \ 0.072546 \ -0.001460 \ -0.018137 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -100.000 \ 225.000 \ 0.000 \ 100.000 \ -225.000 \ 400.000 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 0.000 \ -25.000 \ -400.000 \ 0.000 \ 25.000 \ 300.000 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 0.000 \ -75.000 \ -300.000 \ -0.000 \ 75.000 \ 0.000 \rangle$$

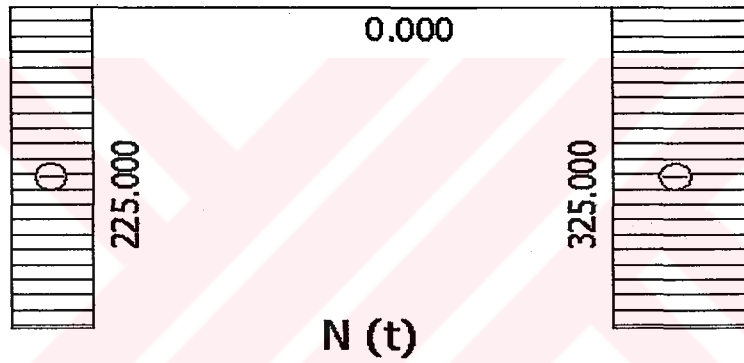
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle 0.000 \ 325.000 \ 0.000 \ 0.000 \ -325.000 \ 0.000 \rangle$$

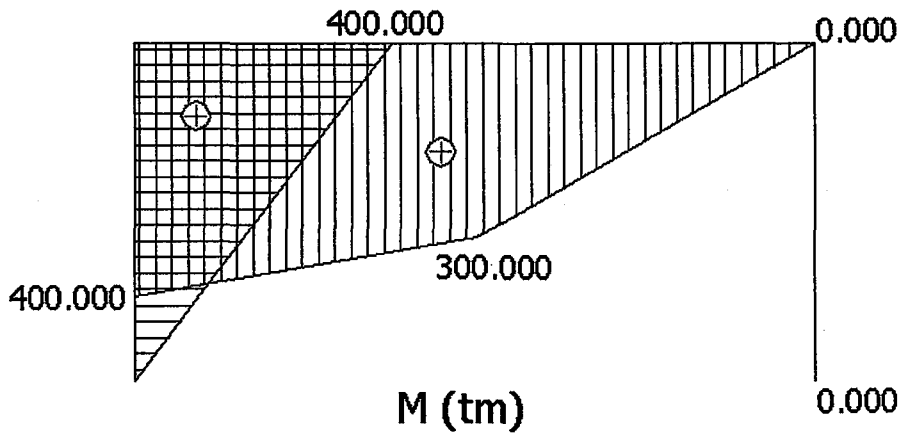
Tablo 5.11 Çubuk Elemanların Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_i(t)$	225.000	0.000	0.000	325.000
$T_i(t)$	-100.000	-25.000	-75.000	0.000
$M_i(tm)$	0.000	-400.000	-300.000	0.000
$N_k(t)$	-225.000	0.000	0.000	-325.000
$T_k(t)$	100.000	25.000	75.000	0.000
$M_k(tm)$	400.000	300.000	0.000	0.000

5.3.2.15 Üçüncü Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.16 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.17 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Moment Diyagramı

5.3.2.16 Dördüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Dördüncü Yük Parametresinin (Göçme Parametresinin) Belirlenmesi

I. mertebe hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.12 hazırlanır:

Tablo 5.12 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Dördüncü Yük Parametresi

Kesit No	M_p	M_3	ΔM_4	Δp_4
1	-339.032	-339.032	-	-
2	339.032	90.344	400	0.622
3	293.024	90.344	400	0.507
4	293.024	164.019	300	0.430
5	-293.024	-293.024	-	-
6	-339.032	-293.024	-	-
7	339.032	339.032	-	-

Yük parametresi $\Delta p_3 = 0.430$ artırıldığında (4) No'lu kesitte dördüncü plastik mafsal oluşur. Dördüncü (Göçme) yük parametresi;

$$p_4 = p_3 + \Delta p_4$$

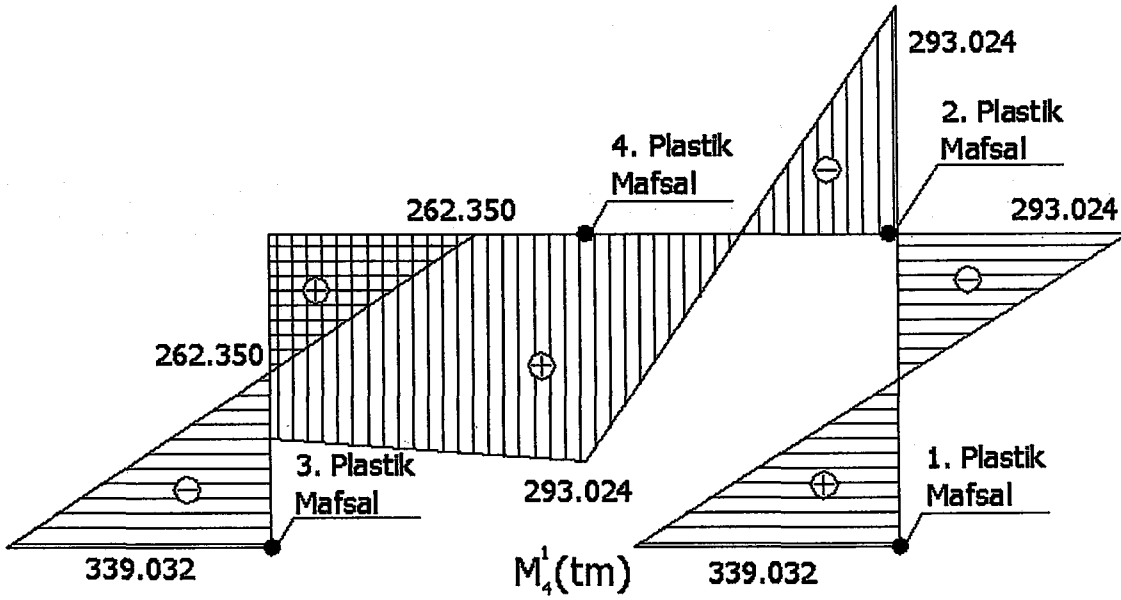
$$p_4 = 2.654 + 0.430 = 3.084 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_4 = 3.084$ kat artırılması sonucu dördüncü plastik mafsal oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_4^I = \delta_3^I + \Delta p_4^I \delta_{x,I}$$

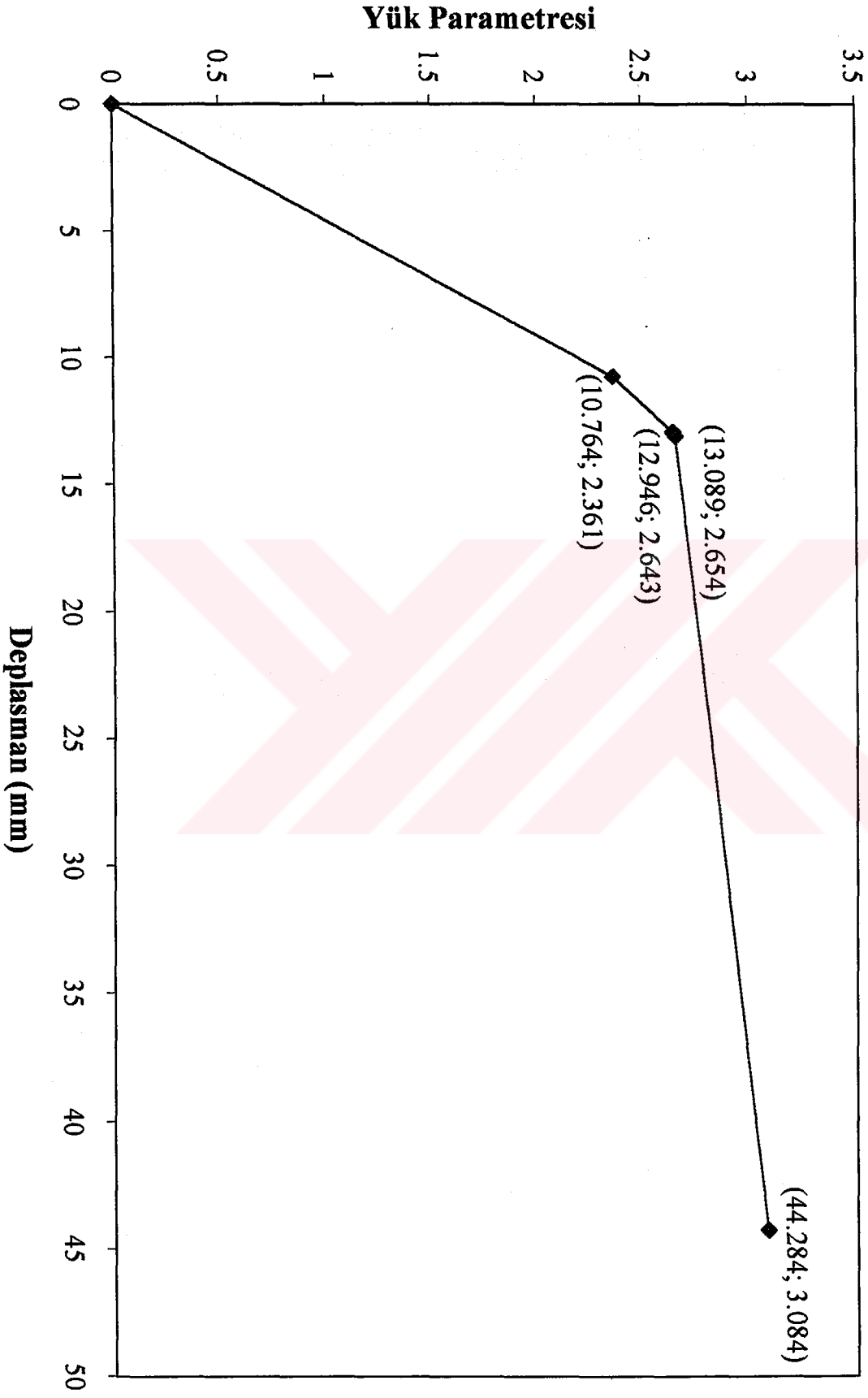
$$\delta_4^I = 0.013089 + 0.430 \times 0.072546 = 0.044284 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_4 = 3.084$ olduğunda dördüncü plastik mafsal oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.044284 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış moment değerleri Şekil 5.18'de sunulmuştur.



Şekil 5.18 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Dördüncü (Göçme) Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı

Kesit (4) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (4) Nolu kesite dördüncü plastik mafsal konulmuştur. Göçme halindeki değerler elde edilmiş olur.



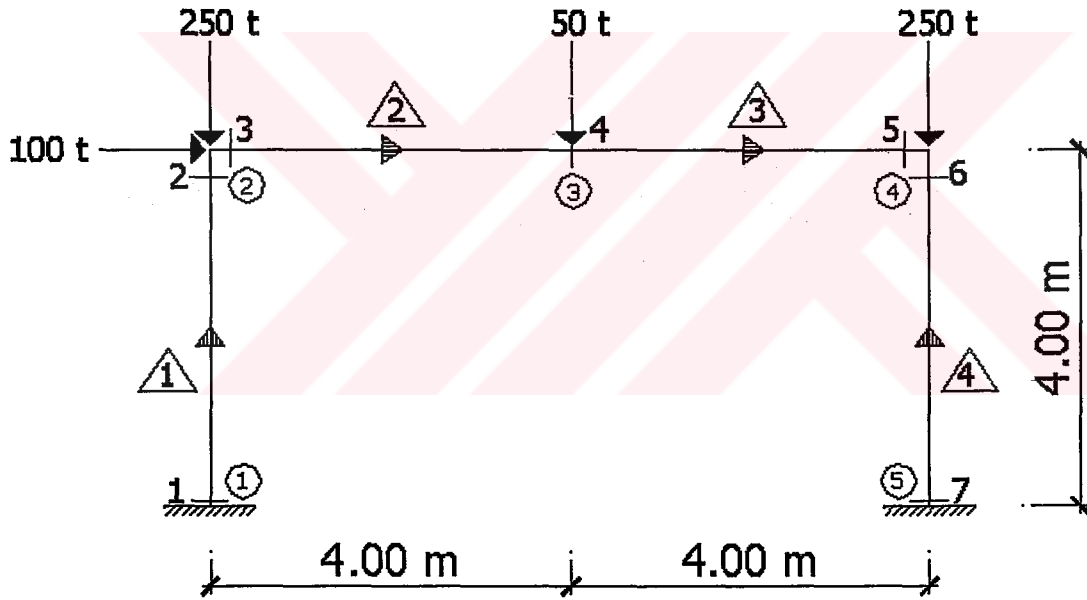
Şekil 5.19 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi

5.3.3 I. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap

I. mertebe lineer elastik hesap sonucunda bulunan kritik kesitler gözönüne alınarak I. mertebe elastoplastik hesap yapılacaktır.

Denge denklemleri şekildeğiştirmemiş eksen üzerinden yazılacağından I. mertebe teorisi bu kısımda geçerlidir. Malzemenin doğrusal olmayan davranışının incelenmesi bu hesapta esastır. Moment ve normal kuvvet etkisi altında akma davranışı $K(M,N)=0$ gözönüne alınacaktır.

Bu hesapta, bir önceki hesaptan farklı olarak normal kuvvetin akma davranışına olan etkisi de gözönüne alınacaktır.



Şekil 5.20 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İçin Çerçevenin Yükleme Durumu ve Kritik Kesitler

5.3.3.1 Birinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İlk Yük Parametresinin Belirlenmesi

I. mertebe hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.13 hazırlanır.

Tablo 5.13 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	ΔM_1 (tm)	ΔN_1 (t)	N/N_p	0.15	Δp_1
1	-339.032	-998.160	-117.302	-257.615	0.258	>0,15	1.811
2	339.032	-998.160	29.840	-257.615	0.258	>0,15	3.004
3	293.024	-951.696	29.840	-63.215	0.066	<0,15	9.820
4	293.024	-951.696	60.299	-63.215	0.066	<0,15	4.860
5	-293.024	-951.696	-109.243	-63.215	0.066	<0,15	3.103
6	-339.032	-998.160	-109.243	-292.385	0.293	>0,15	1.764
7	339.032	-998.160	143.615	-292.385	0.293	>0,15	1.531

Akma Şartı $K(M,N)=0$ için:

- 3, 4 ve 5 No'lu kesitlerde $N/N_p \leq 0.15$ olduğundan normal kuvvetin etkisi ihmal edilmiş ve yük parametresinin bulunmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$\Delta p = \frac{M_p}{M}$$

- 1,2,6 ve 7 No'lu kesitlerde ise $N/N_p > 0.15$ olduğundan normal kuvvetin etkisi ihmal edilmemiş ve yük parametresinin bulunmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

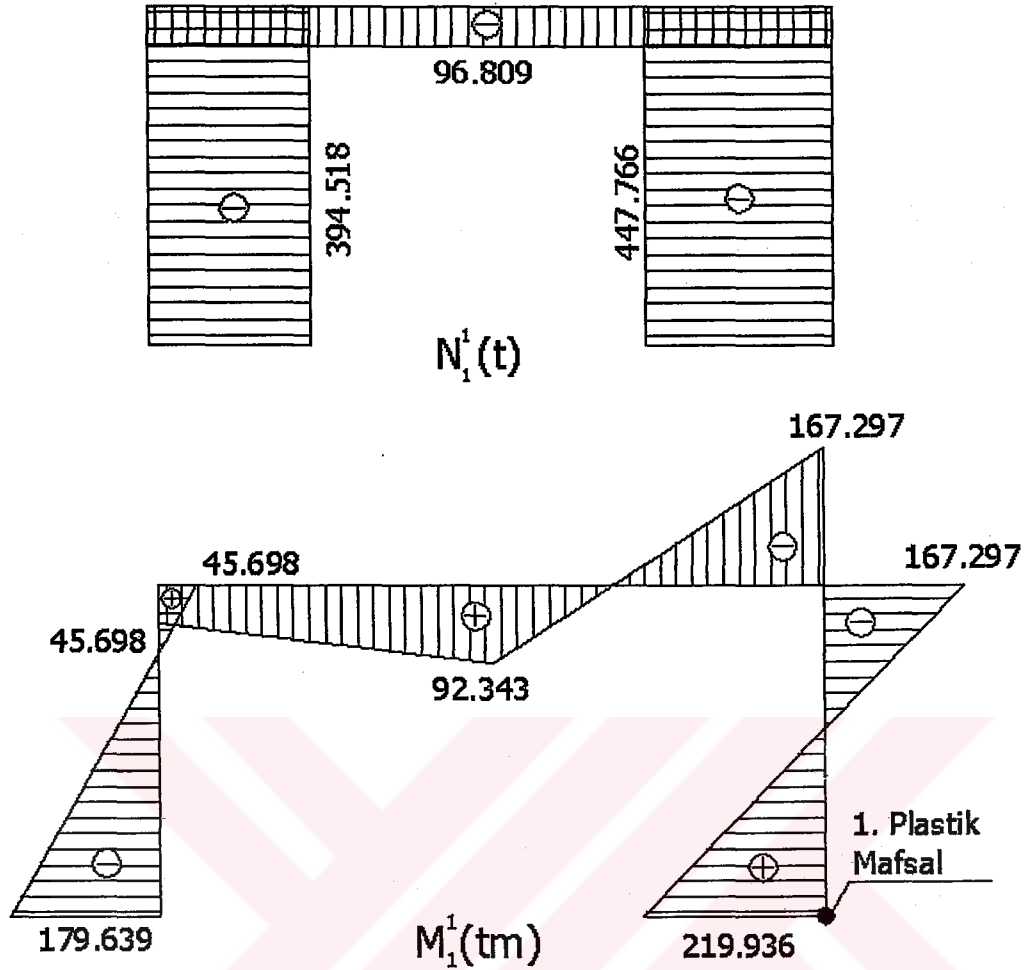
$$\Delta p = \frac{M_p N_p - N_1 M_p - 0.85 M_1 N_p}{\Delta N M_p + 0.85 \Delta M N_p}$$

Yük parametresi $p_1 = 1.531$ değerinde (7) numaralı kesitte ilk plastik mafsall oluşmuştur. Yüklerin $p_1 = 1.531$ kat arttırılması sonucu ilk plastik mafsall oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_1^1 = \Delta p_1^1 \delta_{x,1}$$

$$\delta_1^1 = 1.531 \times 0.004559 = 0.006980 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_1 = 1.531$ olduğunda ilk plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.006980 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.21'de sunulmuştur.



Şekil 5.21 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (7) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (7) numaralı kesite ilk plastik mafsall konulmuştur. Bu kesit plastik hale geldikten sonraki kesit tesiri dağılımını bulmak için bu kesite adi mafsall konarak sistem aynı yükler altında tekrar çözülür.

5.3.3.2 Birinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların çeşitli kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme durumu Tablo 5.3 ve Tablo 5.4’de verilmiştir.

5.3.3.3 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_1] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 22460 & 0 & -44919 & -22460 & 0 & -44919 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ -44919 & 0 & 119784 & 44919 & 0 & 59892 \\ -22460 & 0 & 44919 & 22460 & 0 & 44919 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -44919 & 0 & 59892 & 44919 & 0 & 119784 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix} \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix} \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Sol ucunda mafsall bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{Sol,Mafsal}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5615 & 0 & 0 & -5615 & 22460 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5615 & 0 & 0 & 5615 & 22460 \\ 0 & 22460 & 0 & 0 & -22460 & 89838 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsall bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere

$$[K_4] = [\alpha_4][K_{Sol,mafsal}][\alpha_4]^T$$

işlemden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} 5615 & 0 & 0 & -5615 & 0 & -22460 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5615 & 0 & 0 & 5615 & 0 & 22460 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22460 & 0 & 0 & 22460 & 0 & 89838 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 234560 & 0 & 44919 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 44919 & 34855 & 212730 & 0 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & 0 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 185892 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 217715 & 0 & 22460 & -34855 & 182784 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 0 & 240027 & -34855 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 7.246 & 0.104 & -1.848 & 7.150 & 0.988 & 0.638 & 7.055 & -0.104 & -0.861 \\ 0.104 & 0.448 & -0.046 & 0.105 & 0.217 & -0.063 & 0.106 & 0.001 & -0.038 \\ -1.848 & -0.046 & 1.090 & -1.813 & 0.977 & -0.283 & -1.778 & 0.046 & 0.113 \\ 7.150 & 0.105 & -1.813 & 7.525 & -0.885 & 0.646 & 7.425 & -0.105 & -0.928 \\ -0.988 & 0.217 & 0.977 & -0.885 & 4.841 & -0.049 & -0.783 & 0.233 & -0.770 \\ 0.638 & -0.063 & -0.283 & 0.646 & -0.049 & 0.691 & 0.653 & -0.235 & 0.995 \\ 7.055 & 0.106 & -1.778 & 7.425 & -0.783 & 0.653 & 7.796 & -0.106 & -0.995 \\ -0.104 & 0.001 & 0.046 & -0.105 & 0.233 & 0.063 & -0.106 & 0.448 & 0.038 \\ -0.861 & -0.038 & 0.113 & -0.928 & -0.770 & -0.235 & -0.995 & 0.038 & 0.883 \end{bmatrix}$$

5.3.3.4 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 7.740 \quad -1.127 \quad -2.337 \quad 7.593 \quad -4.531 \quad 0.663 \quad 7.446 \quad -1.343 \quad -0.476 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.007740 \quad -0.001127 \quad -0.002337 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.007740 \quad -0.001127 \quad -0.002337 \quad 0.007593 \quad -0.004531 \quad 0.000663 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.007593 \quad -0.004531 \quad 0.000663 \quad 0.007446 \quad -0.001343 \quad -0.000476 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.007446 \quad -0.001343 \quad -0.000476 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -68.871 \quad 250.965 \quad 207.718 \quad 68.871 \quad -250.965 \quad 67.765 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 31.129 \quad 0.965 \quad -67.765 \quad -31.129 \quad -0.965 \quad 71.624 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 31.129 \quad -49.035 \quad -71.624 \quad -31.129 \quad 49.035 \quad -124.518 \rangle$$

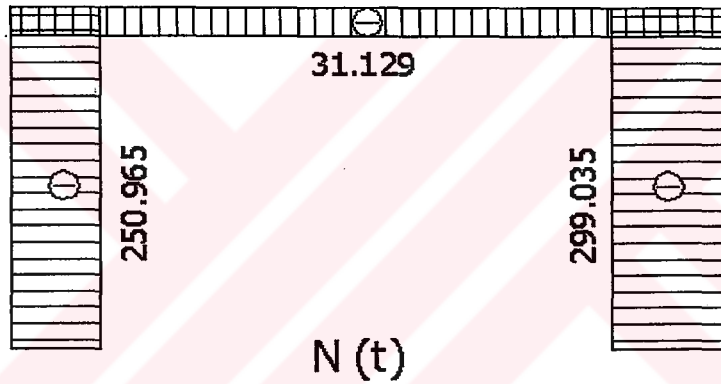
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle -31.129 \quad 299.035 \quad 0.000 \quad 31.129 \quad -299.035 \quad 124.518 \rangle$$

Tablo 5.14 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

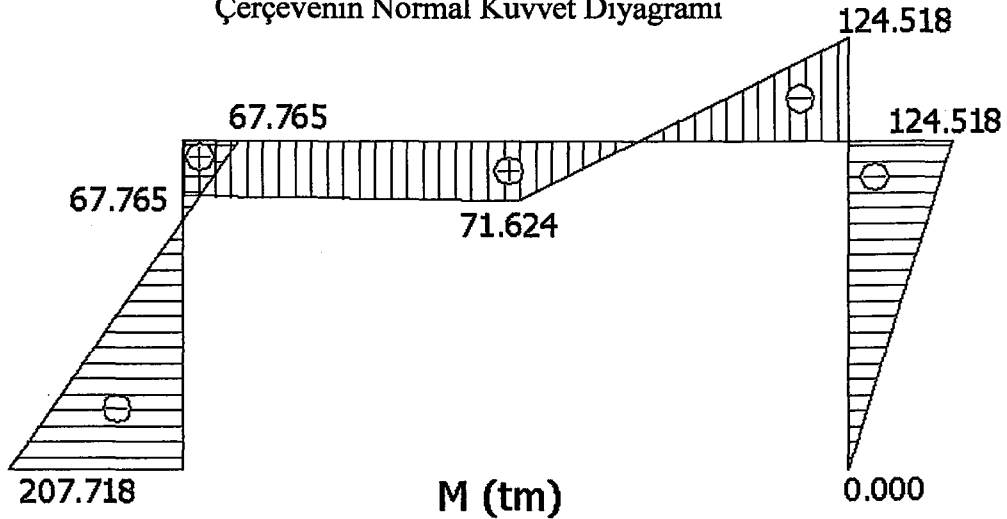
Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_j(t)$	250.965	31.129	31.129	299.035
$T_j(t)$	-68.871	0.965	-49.035	-31.129
$M_j(tm)$	207.718	-67.765	-71.624	0.000
$N_k(t)$	-250.965	-31.129	-31.129	-299.035
$T_k(t)$	68.871	-0.965	49.035	31.129
$M_k(tm)$	67.765	71.624	-124.518	124.518

5.3.3.5 Birinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.22 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş

Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.23 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş

Çerçevenin Moment Diyagramı

5.3.3.6 İkinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İkinci Yük Parametresinin Belirlenmesi

I. mertebe hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.15 hazırlanır.

Tablo 5.15 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_1 (tm)	N_1 (t)	ΔM_2 (tm)	ΔN_2 (t)
1	-339.032	-998.160	-179.639	-394.518	-207.718	-250.965
2	339.032	-998.160	45.698	-394.518	67.765	-250.965
3	293.024	-951.696	45.698	-96.809	67.765	-31.129
4	293.024	-951.696	92.343	-96.809	71.624	-31.129
5	-293.024	-951.696	-167.297	-96.809	-124.518	-31.129
6	-339.032	-998.160	-167.297	-447.766	-124.518	-299.035
7	339.032	-998.160	219.936	-447.766	0.000	-299.035

Tablo 5.16 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{2,D}$	$N_{2,D}$	$N_{2,D}/N_p$	0.15	Δp_2	N_2	N/N_p	0.15	Δp_2
1	0.767	-587.096	0.588	>0,15	0.200	-444.689	0.446	>0,15	0.200
2	4.329	-587.096	0.588	>0,15	1.163	-444.689	0.446	>0,15	1.163
3	3.650	-120.696	0.127	<0,15	3.650	-103.032	0.108	<0,15	3.650
4	2.802	-120.696	0.127	<0,15	2.802	-103.032	0.108	<0,15	2.802
5	1.010	-120.696	0.127	<0,15	1.010	-103.032	0.108	<0,15	1.010
6	1.379	-677.231	0.678	>0,15	0.216	-507.547	0.508	>0,15	0.216
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi $\Delta p_2 = 0.200$ artırıldığında (1) numaralı kesitte ikinci plastik mafsal oluşur. İkinci yük parametresi;

$$p_2 = p_1 + \Delta p_2$$

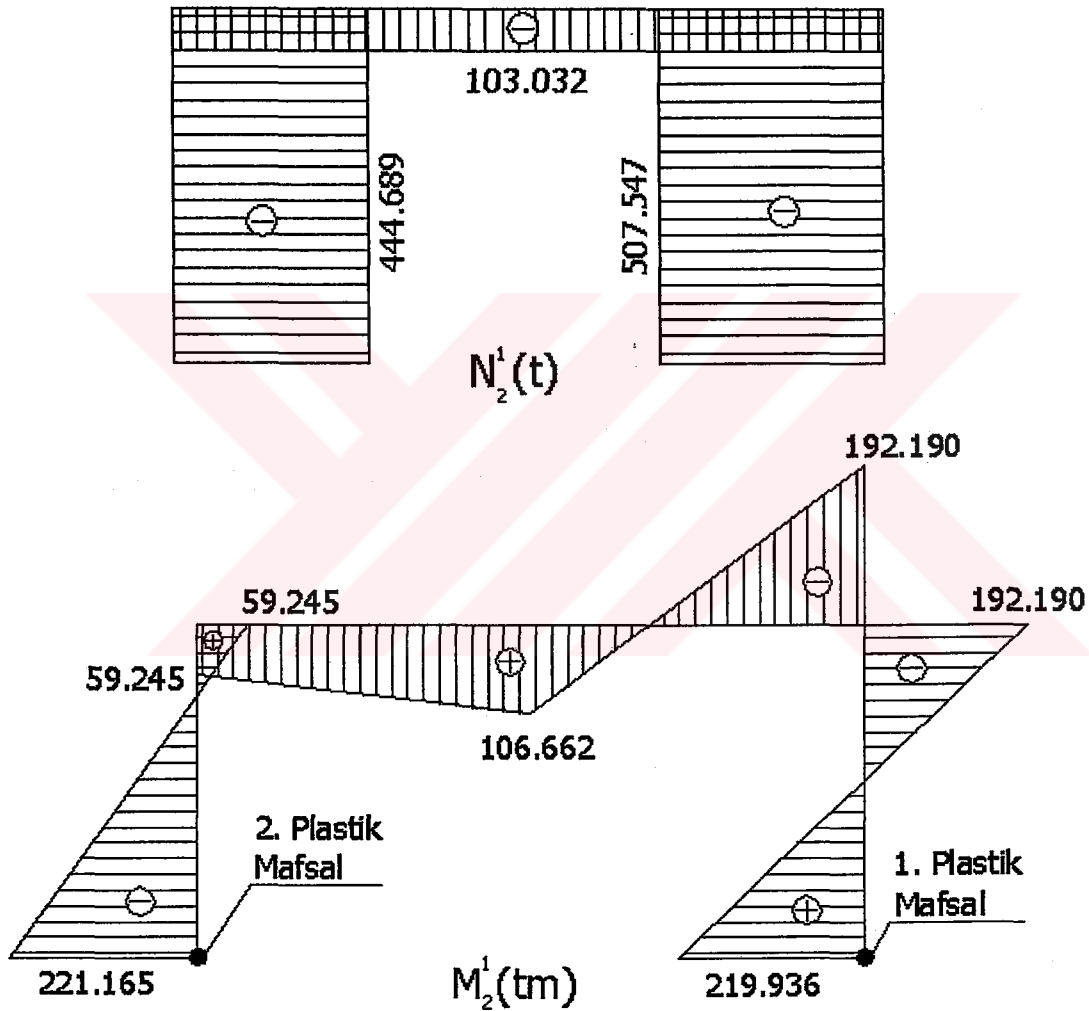
$$p_2 = 1.531 + 0.200 = 1.731 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_2 = 1.731$ kat artırılması sonucu ikinci plastik mafsal oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_2^I = \delta_1^I + \Delta p_2^I \delta_{x,1}$$

$$\delta_2^I = 0.006980 + 0.200 \times 0.007740 = 0.008528 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_2 = 1.731$ olduğunda ikinci plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.008528 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.24'de sunulmuştur.



Şekil 5.24 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (1) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (1) numaralı kesite ikinci plastik mafsall konulmuştur.

5.3.3.7 İkinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların çeşitli kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme durumu Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'de verilmiştir.

5.3.3.8 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Sol ucunda mafsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsal}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5615 & 0 & 0 & -5615 & 22460 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5615 & 0 & 0 & 5615 & 22460 \\ 0 & 22460 & 0 & 0 & -22460 & 89838 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K_{\text{Sol,mafsal}}][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 5615 & 0 & 0 & -5615 & 0 & -22460 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5615 & 0 & 0 & 5615 & 0 & 22460 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22460 & 0 & 0 & 22460 & 0 & 89838 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Sol ucunda mafsallı bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsal}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5615 & 0 & 0 & -5615 & 22460 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5615 & 0 & 0 & 5615 & 22460 \\ 0 & 22460 & 0 & 0 & -22460 & 89838 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K_{\text{Sol,mafsal}}][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} 5615 & 0 & 0 & -5615 & 0 & -22460 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5615 & 0 & 0 & 5615 & 0 & 22460 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22460 & 0 & 0 & 22460 & 0 & 89838 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 217715 & 0 & 22460 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 22460 & 34855 & 182784 & 0 & -34855 & 46473 & 185892 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 217715 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 185892 & 0 & 0 & -34855 & 46473 & 22460 & 182784 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 217715 & 0 & 240027 & -34855 & 22460 & 182784 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 0 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 22460 & -34855 & 182784 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 20.840 & 0.225 & -2.972 & 20.606 & -0.093 & 1.378 & 20.371 & -0.225 & -2.879 & 4 \\ 0.225 & 0.449 & -0.056 & 0.225 & 0.225 & -0.056 & 0.225 & 0.000 & -0.056 & 5 \\ -2.972 & -0.056 & 1.183 & -2.925 & 0.903 & -0.345 & -2.879 & 0.056 & 0.280 & 6 \\ 20.606 & 0.225 & -2.925 & 20.841 & 0.000 & 1.378 & 20.606 & -0.225 & -2.925 & 7 \\ -0.093 & 0.225 & 0.903 & 0.000 & 4.899 & 0.000 & 0.093 & 0.225 & -0.903 & 8 \\ 1.378 & -0.056 & -0.345 & 1.378 & 0.000 & 0.731 & 1.378 & 0.056 & -0.345 & 9 \\ 20.371 & 0.225 & -2.879 & 20.606 & 0.093 & 1.378 & 20.840 & -0.225 & -2.972 & 10 \\ -0.225 & 0.000 & 0.056 & -0.225 & 0.225 & 0.056 & -0.225 & 0.449 & 0.056 & 11 \\ -2.879 & -0.056 & 0.280 & -2.925 & -0.903 & -0.345 & -2.972 & 0.056 & 1.183 & 12 \end{bmatrix}$$

5.3.3.9 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 20.887 \quad -1.011 \quad -3.423 \quad 20.606 \quad -3.666 \quad 1.378 \quad 20.325 \quad -1.460 \quad -2.427 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.020887 \quad -0.001011 \quad -0.003423 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.020887 \quad -0.001011 \quad -0.003423 \quad 0.020606 \quad -0.003666 \quad 0.001378 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.020606 \quad -0.003666 \quad 0.001378 \quad 0.020325 \quad -0.001460 \quad -0.002427 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.020325 \quad -0.001460 \quad -0.002427 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -40.393 \quad 225.000 \quad 0.000 \quad 40.393 \quad -225.000 \quad 161.572 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 59.607 \quad 25.000 \quad -161.572 \quad -59.607 \quad -25.000 \quad 61.572 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 59.607 \quad -75.000 \quad -61.572 \quad -59.607 \quad 75.000 \quad -238.428 \rangle$$

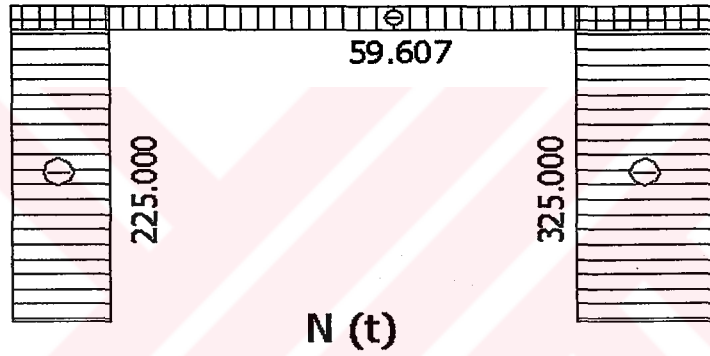
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle -59.607 \quad 325.000 \quad 0.000 \quad 59.325 \quad -325.000 \quad 238.428 \rangle$$

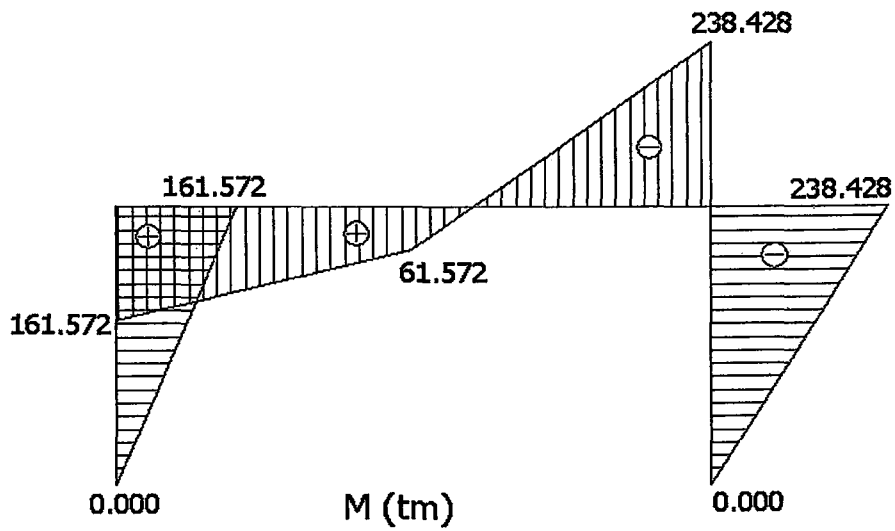
Tablo 5.17 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_i(t)$	225.000	59.607	59.607	325.000
$T_i(t)$	-40.393	-25.000	-75.000	-59.607
$M_i(tm)$	0.000	-161.572	-61.572	0.000
$N_k(t)$	-225.000	-59.607	-59.607	-325.000
$T_k(t)$	40.393	25.000	75.000	59.607
$M_k(tm)$	161.572	61.572	-238.428	238.428

5.3.3.10 İkinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.25 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.26 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Moment Diyagramı

5.3.3.11 Üçüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Üçüncü Yük Parametresinin Belirlenmesi

I. mertebe hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.18 hazırlanır.

Tablo 5.18 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_2 (tm)	N_2 (t)	ΔM_3 (tm)	ΔN_3 (t)
1	-339.032	-998.160	-221.165	-444.689	0.000	-225.000
2	339.032	-998.160	59.245	-444.689	161.572	-225.000
3	293.024	-951.696	59.245	-103.032	161.572	-59.607
4	293.024	-951.696	106.662	-103.032	61.572	-59.607
5	-293.024	-951.696	-192.190	-103.032	-238.428	-59.607
6	-339.032	-998.160	-192.190	-507.547	-238.428	-325.000
7	339.032	-998.160	219.936	-507.547	0.000	-325.000

Tablo 5.19 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{3,D}$	$N_{3,D}$	$N_{3,D}/N_p$	0.15	Δp_3	N_3	N/N_p	0.15	Δp_3
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1.732	-539.844	0.541	>0,15	0.644	-447.046	0.448	>0,15	0.644
3	1.447	-128.241	0.135	<0,15	1.447	-103.656	0.109	<0,15	1.447
4	3.027	-128.241	0.135	<0,15	3.027	-103.656	0.109	<0,15	3.027
5	0.423	-128.241	0.135	<0,15	0.423	-103.656	0.109	<0,15	0.423
6	0.616	-644.993	0.646	>0,15	0.010	-510.950	0.512	>0,15	0.010
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi $\Delta p_2 = 0.010$ arttırıldığında (6) numaralı kesitte üçüncü plastik mafsall oluşur. Üçüncü yük parametresi;

$$p_3 = p_2 + \Delta p_3$$

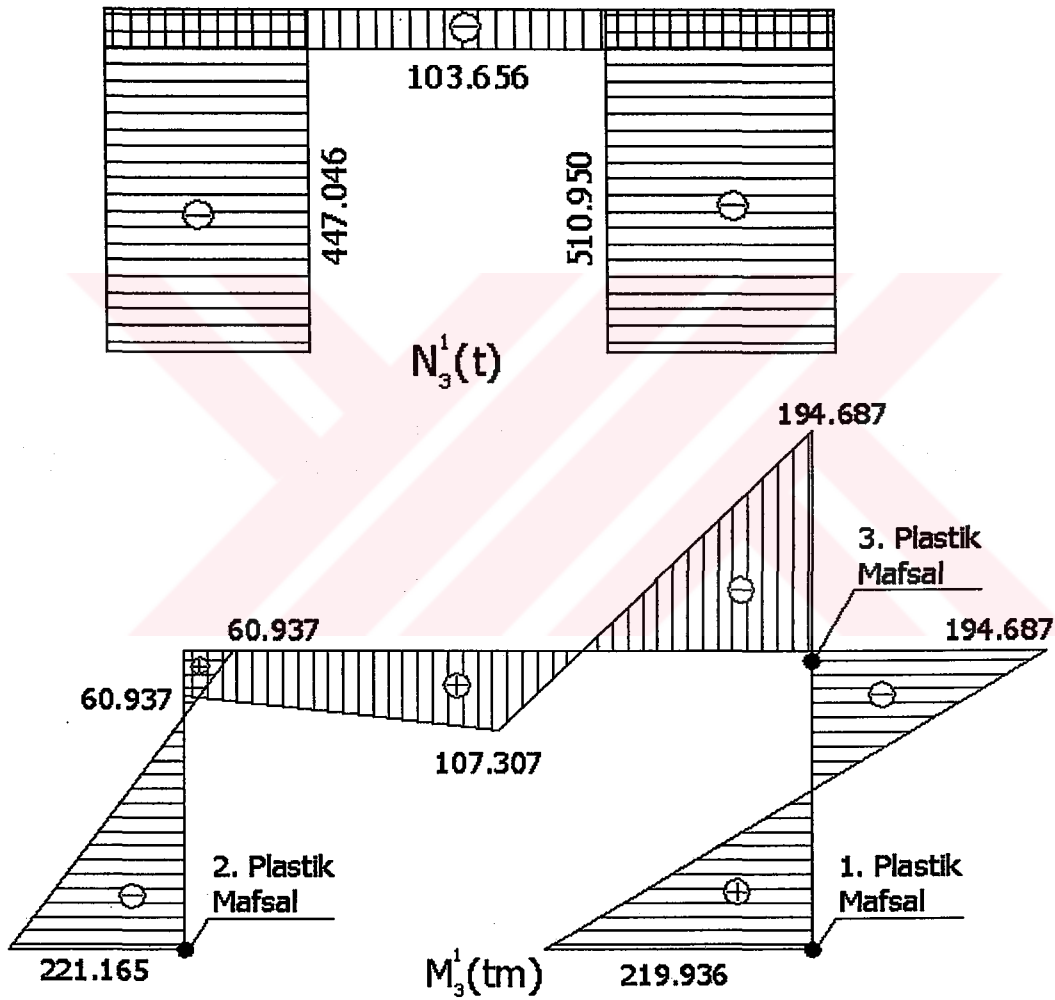
$$p_3 = 1.731 + 0.010 = 1.741 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_3 = 1.741$ kat arttırılması sonucu üçüncü plastik mafsall oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_3^1 = \delta_2^1 + \Delta p_3^1 \delta_{x,1}$$

$$\delta_3^1 = 0.008528 + 0.010 \times 0.020887 = 0.008737 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_3 = 1.741$ olduğunda üçüncü plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.008737 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.27’de sunulmuştur.



Şekil 5.27 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (6) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (6) numaralı kesite üçüncü plastik mafsall konulmuştur.

5.3.3.12 Üçüncü Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların çeşitli kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme durumu Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'de verilmiştir.

5.3.3.13 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Sol ucunda mafsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsal}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5615 & 0 & 0 & -5615 & 22460 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5615 & 0 & 0 & 5615 & 22460 \\ 0 & 22460 & 0 & 0 & -22460 & 89838 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K_{\text{Sol,mafshal}}][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 5615 & 0 & 0 & -5615 & 0 & -22460 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5615 & 0 & 0 & 5615 & 0 & 22460 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22460 & 0 & 0 & 22460 & 0 & 89838 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabı elemanın hem sol hem de sağ ucunda plastik mafsallı olduğu gözönüne alınacaktır. Her iki ucunda da mafsallı bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{ikiUcu,Mafsal}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Her iki ucunda da mafsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K_{\text{iki Ucu, mafsal}}][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 217715 & 0 & 22460 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 \\ 22460 & 34855 & 182784 & 0 & 0 & 46473 & 185892 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & -17427 & 34855 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 & 185892 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 0 & 240027 & -34855 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 63.939 & 0.225 & -11.532 & 63.939 & -17.214 & 1.378 & 63.939 & -0.225 & 5.682 & 4 \\ 0.225 & 0.449 & -0.056 & 0.225 & 0.225 & -0.056 & 0.225 & 0.000 & -0.056 & 5 \\ -11.532 & -0.056 & 2.883 & -11.532 & 4.304 & -0.345 & -11.532 & 0.056 & -1.420 & 6 \\ 63.939 & 0.225 & -11.532 & 64.411 & -17.214 & 1.378 & 64.411 & -0.225 & 5.682 & 7 \\ -17.214 & 0.225 & 4.304 & -17.214 & 11.701 & 0.000 & -17.214 & 0.225 & -4.304 & 8 \\ 1.378 & -0.056 & -0.345 & 1.378 & 0.000 & 0.731 & 1.378 & 0.056 & -0.345 & 9 \\ 63.939 & 0.225 & -11.532 & 64.411 & -17.214 & 1.378 & 64.882 & -0.225 & 5.682 & 10 \\ -0.225 & 0.000 & 0.056 & -0.225 & 0.225 & 0.056 & -0.225 & 0.449 & 0.056 & 11 \\ 5.682 & -0.056 & -1.420 & 5.682 & -4.304 & -0.345 & 5.682 & 0.056 & 2.883 & 12 \end{bmatrix}$$

5.3.3.14 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 72.546 \quad -1.011 \quad -13.684 \quad 72.546 \quad -24.188 \quad 1.378 \quad 72.546 \quad -1.460 \quad -7.834 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.072546 \quad -0.001011 \quad -0.013684 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.072546 \quad -0.001011 \quad -0.013684 \quad 0.072546 \quad -0.024188 \quad 0.001378 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.072546 \quad -0.024188 \quad 0.001378 \quad 0.072546 \quad -0.001460 \quad -0.007834 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.072546 \quad -0.001460 \quad -0.007834 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -100.000 \quad 225.000 \quad 0.000 \quad 100.000 \quad -225.000 \quad 400.000 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 0.000 \quad -25.000 \quad -400.000 \quad 0.000 \quad 25.000 \quad 300.000 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 0.000 \quad -75.000 \quad -300.000 \quad 0.000 \quad 75.000 \quad 0.000 \rangle$$

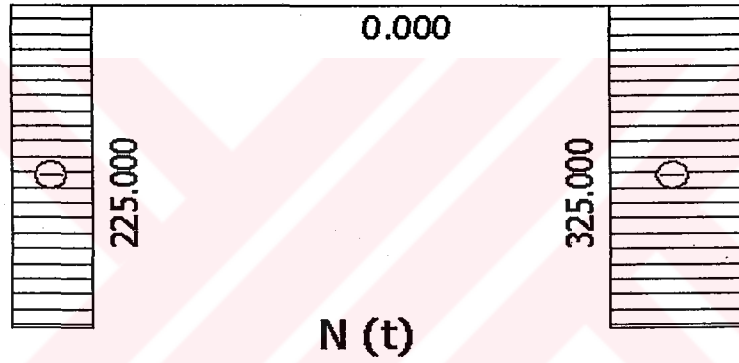
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle 0.000 \quad 325.000 \quad 0.000 \quad 0.000 \quad -325.000 \quad 0.000 \rangle$$

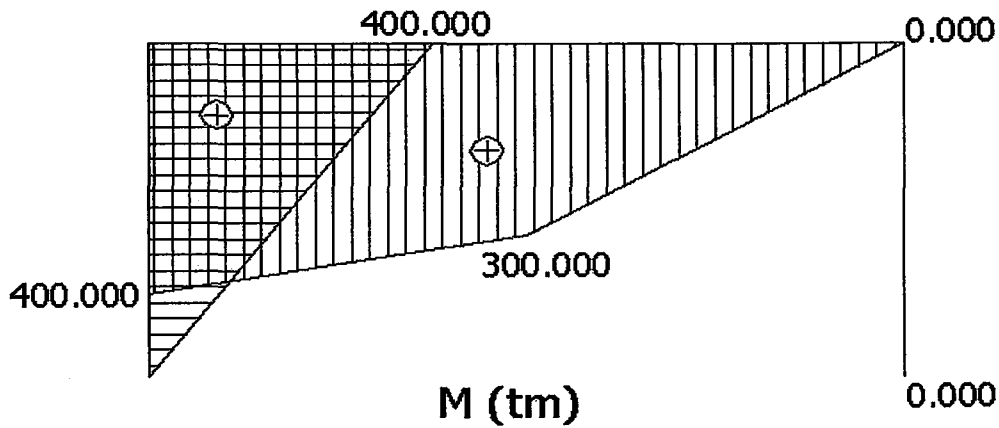
Tablo 5.20 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_j(t)$	225.000	0.000	0.000	325.000
$T_j(t)$	-100.000	-25.000	-75.000	0.000
$M_j(tm)$	0.000	-400.000	-300.000	0.000
$N_k(t)$	-225.000	0.000	0.000	-325.000
$T_k(t)$	100.000	25.000	75.000	0.000
$M_k(tm)$	400.000	300.000	0.000	0.000

5.3.3.15 Üçüncü Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.28 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.29 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçevenin Moment Diyagramı

5.3.3.16 Dördüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Dördüncü Yük Parametresinin (Göçme Parametresinin) Belirlenmesi

I. mertebe hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.21 hazırlanır.

Tablo 5.21 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_3 (tm)	N_3 (t)	ΔM_4 (tm)	ΔN_4 (t)
1	-339.032	-998.160	-221.165	-447.046	0.000	-225.000
2	339.032	-998.160	60.937	-447.046	400.000	-225.000
3	293.024	-951.696	60.937	-103.656	400.000	0.000
4	293.024	-951.696	107.307	-103.656	300.000	0.000
5	-293.024	-951.696	-194.687	-103.656	0.000	0.000
6	-339.032	-998.160	-194.687	-510.950	0.000	-325.000
7	339.032	-998.160	219.936	-510.950	0.000	-325.000

Tablo 5.22 I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{4,D}$	$N_{4,D}$	$N_{4,D}/N_p$	0.15	Δp_4	N_4	N/N_p	0.15	Δp_4
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.695	-577.595	0.579	>0,15	0.325	-520.201	0.521	>0,15	0.325
3	<u>0.580</u>	-103.656	0.109	<0,15	0.580	-103.656	0.109	<0,15	0.580
4	0.619	-103.656	0.109	<0,15	0.619	-103.656	0.109	<0,15	0.619
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi $\Delta p_3 = 0.430$ arttırıldığında (4) numaralı kesitte dördüncü plastik mafsal oluşur. Dördüncü (Göçme) yük parametresi;

$$p_4 = p_3 + \Delta p_4$$

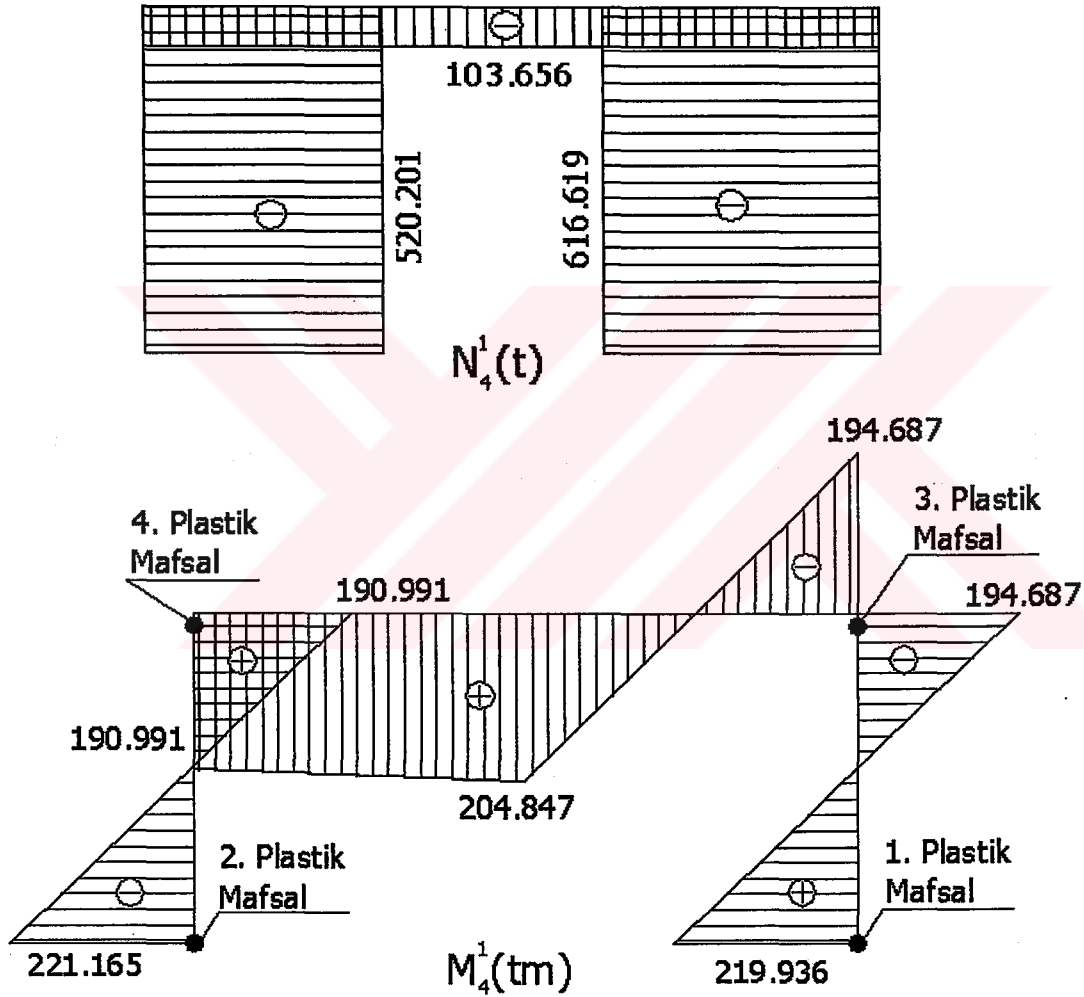
$$p_4 = 1.741 + 0.325 = 2.066 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_4 = 2.066$ kat arttırılması sonucu dördüncü plastik mafsal oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_4^1 = \delta_3^1 + \Delta p_4^1 \delta_{x,1}$$

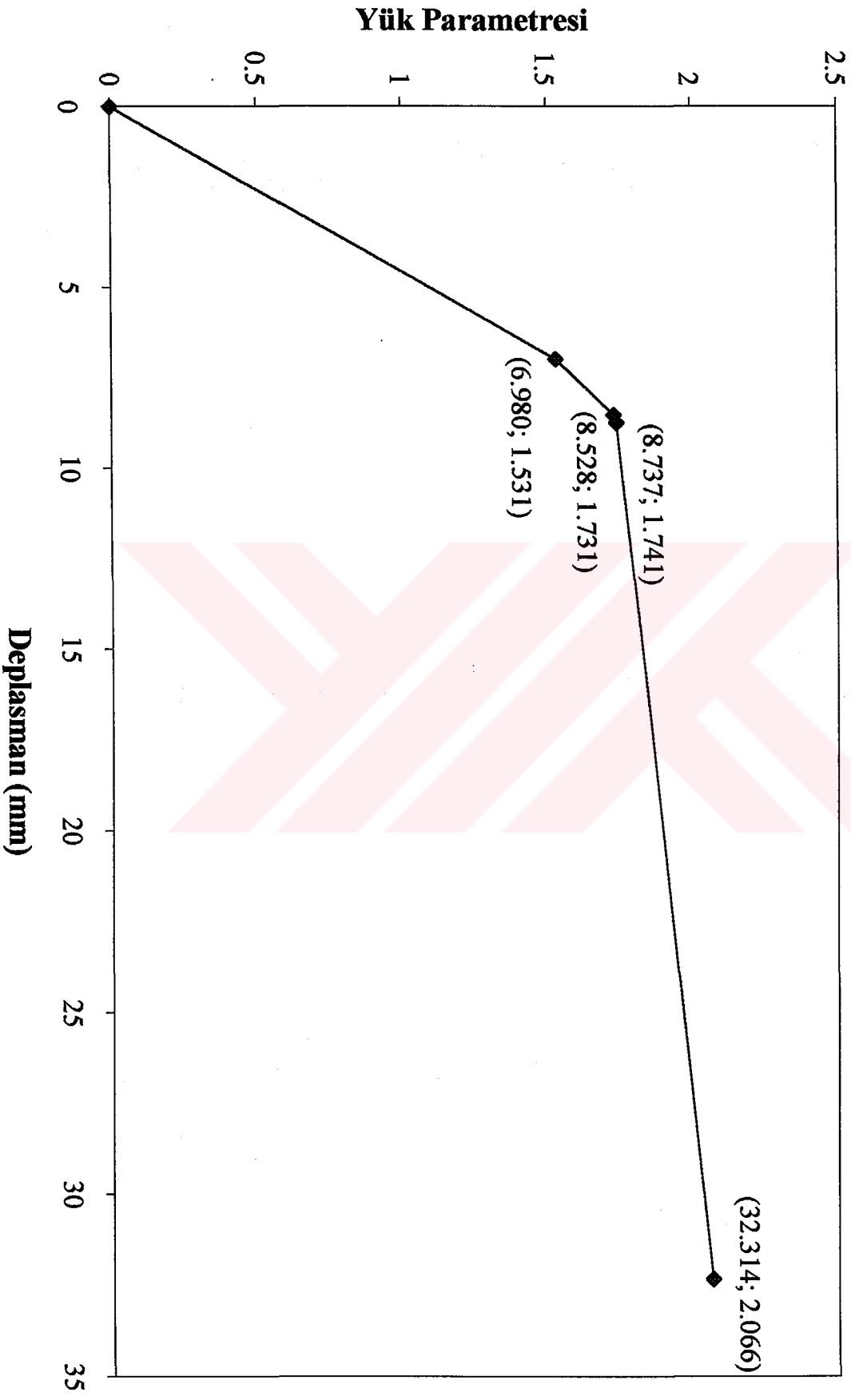
$$\delta_4^1 = 0.008737 + 0.325 \times 0.072546 = 0.032314 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_4 = 2.066$ olduğunda dördüncü plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.032314 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.30'da sunulmuştur.



Şekil 5.30 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

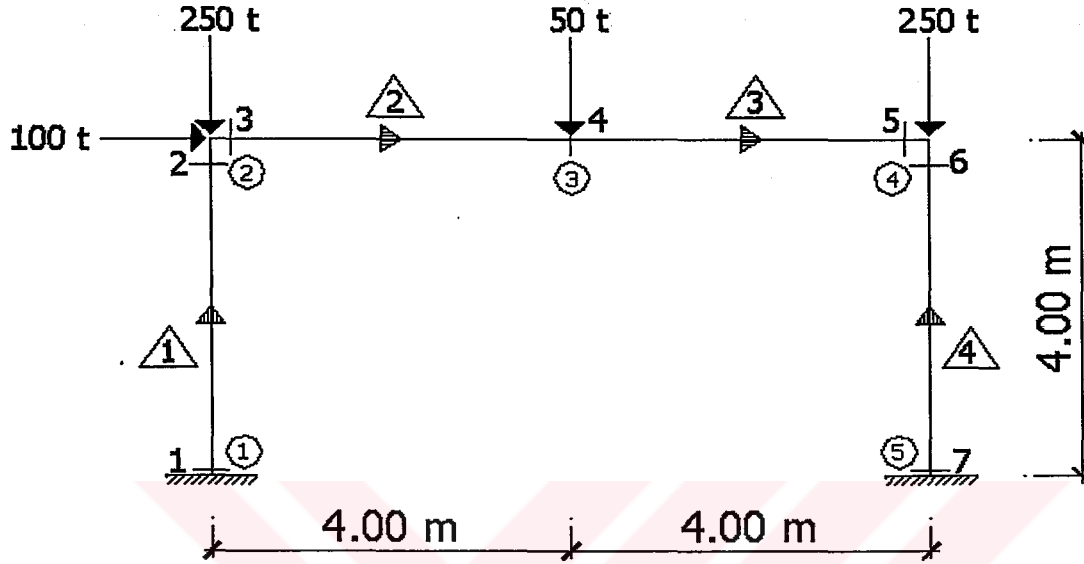
Kesit (2) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (2) Nolu kesite dördüncü plastik mafsall konulmuştur. Göçme halindeki değerler elde edilmiş olur.



Şekil 5.31 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi

5.3.4 II. Mertebe Lineer Elastik Hesap

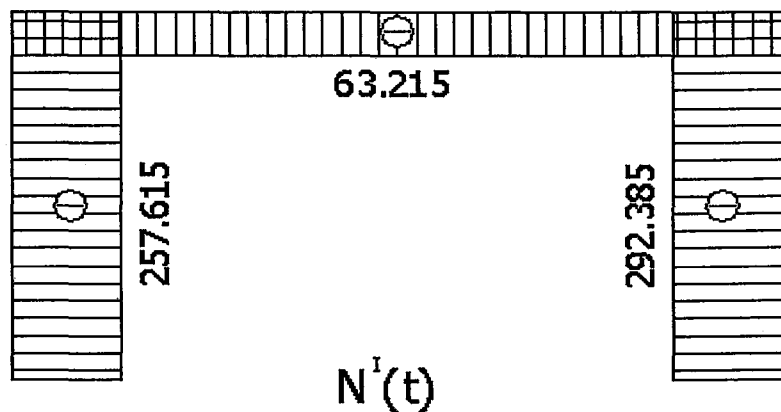
Denge denklemleri şekildeğiştirmiş eksen üzerinden yazılacağından II. mertebe teorisi bu kısımda geçerlidir. Malzemenin lineer elastik davrandığı kabul edilecektir.



Şekil 5.32 II. Mertebe Lineer Elastik Hesap İçin Çerçevenin Yükleme Durumu ve Kritik Kesitler

5.3.4.1 II. Mertebe Lineer Elastik Hesap Adımları

I. mertebe lineer elastik hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan normal kuvvet değerleri alınır:



Şekil 5.33 Birinci Mertebe Lineer Elastik Çözümünden Elde Edilen Normal Kuvvet Diyagramı

Kiriş elemanındaki normal kuvvet değerleri ihmal edilecek ve sadece kolonlardaki normal kuvvet etkisi dikkate alınarak sistem ikinci mertebe çözülecektir.

I. mertebe linner elastik hesap sonucu bulunmuş olan kolon elemanlarındaki normal kuvvetler yazılır:

$$N_1^I = -257.615 \text{ t.}$$

$$N_4^I = -292.385 \text{ t.}$$

5.3.4.2 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 1 No'lu elemanda $N_1^I = 257.615 \text{ t.}$ aksenal basınç kuvveti mevcuttur.

$$\alpha^2 = \frac{N_1^I}{E I_1} \text{ formülünden; } \alpha^2 = 0.002151 \text{ ve dolayısıyla } \alpha L = 0.185501 \text{ elde edilir. Bu}$$

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denkemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.995410$ ve $m_k = 2.001148$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^{II}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22382 & 44893 & 0 & -22382 & 44893 \\ 0 & 44893 & 119647 & 0 & -44893 & 59926 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22382 & -44893 & 0 & 22382 & -44893 \\ 0 & 44893 & 59926 & 0 & -44893 & 119647 \end{bmatrix}$$

Elemanın II. mertebe global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K^II][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 22382 & 0 & -44893 & -22382 & 0 & -44893 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ -44893 & 0 & 119647 & 44893 & 0 & 59926 \\ -22382 & 0 & 44893 & 22382 & 0 & 44893 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -44893 & 0 & 59926 & 44893 & 0 & 119647 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 4 No'lu elemanda $N_4^1 = 257.615$ t. aksenal basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_4^1}{E I_4}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.002441$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.197623$ elde edilir. Bu

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denkemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.994790$ ve $m_k = 2.001303$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^II] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22372 & 44890 & 0 & -22372 & 44890 \\ 0 & 44890 & 119628 & 0 & -44890 & 59931 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22372 & -44890 & 0 & 22372 & -44890 \\ 0 & 44890 & 59931 & 0 & -44890 & 119628 \end{bmatrix}$$

Elemanın II. mertebe global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K^II][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} & 13 & 14 & 15 & 10 & 11 & 12 \\ 22372 & 0 & -44890 & -22372 & 0 & -44890 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ -44890 & 0 & 119628 & 44890 & 0 & 59931 \\ -22372 & 0 & 44890 & 22372 & 0 & 44890 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -44890 & 0 & 59931 & 44890 & 0 & 119628 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 234482 & 0 & 44893 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 \\ 44893 & 34855 & 212593 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 185892 & 0 & -34855 & 46473 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 234472 & 0 & 44893 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 0 & 240027 & -34855 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 44893 & -34855 & 212593 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 4.516 & 0.079 & -1.095 & 4.289 & -0.143 & 0.483 & 4.062 & -0.079 & -0.953 \\ 0.079 & 0.448 & -0.036 & 0.079 & 0.225 & -0.064 & 0.079 & 0.001 & -0.039 \\ -1.095 & -0.039 & 0.883 & -1.024 & 0.745 & -0.241 & -0.953 & 0.039 & 0.138 \\ 4.289 & 0.079 & -1.024 & 4.525 & 0.000 & 0.483 & 4.289 & -0.079 & -1.024 \\ -0.143 & 0.225 & 0.745 & 0.000 & 4.583 & 0.000 & 0.143 & 0.225 & 0.064 \\ 0.483 & -0.064 & -0.241 & 0.483 & 0.000 & 0.682 & 0.483 & 0.064 & -0.241 \\ 4.062 & 0.079 & -0.953 & 4.289 & 0.143 & 0.483 & 4.516 & -0.079 & -1.095 \\ -0.079 & 0.001 & 0.039 & -0.079 & 0.225 & 0.064 & -0.079 & 0.448 & 0.039 \\ -0.953 & -0.039 & 0.138 & -1.024 & -0.745 & -0.241 & -1.095 & 0.039 & 0.883 \end{bmatrix}$$

5.3.4.3 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 4.587 \quad -1.157 \quad -1.468 \quad 4.289 \quad -3.557 \quad 0.483 \quad 3.991 \quad -1.314 \quad -0.580 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.004587 \quad -0.001157 \quad -0.001468 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.004587 \quad -0.001157 \quad -0.001468 \quad 0.004289 \quad -0.003557 \quad 0.000483 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.004289 \quad -0.003557 \quad 0.000483 \quad 0.003991 \quad -0.001314 \quad -0.000580 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.003991 \quad -0.001314 \quad -0.000580 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -36.778 \quad 257.496 \quad 117.971 \quad 36.778 \quad -257.496 \quad 30.323 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 63.222 \quad 7.496 \quad -30.323 \quad -63.222 \quad -7.496 \quad 60.307 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 63.222 \quad -42.504 \quad -60.307 \quad -63.222 \quad 42.504 \quad -109.708 \rangle$$

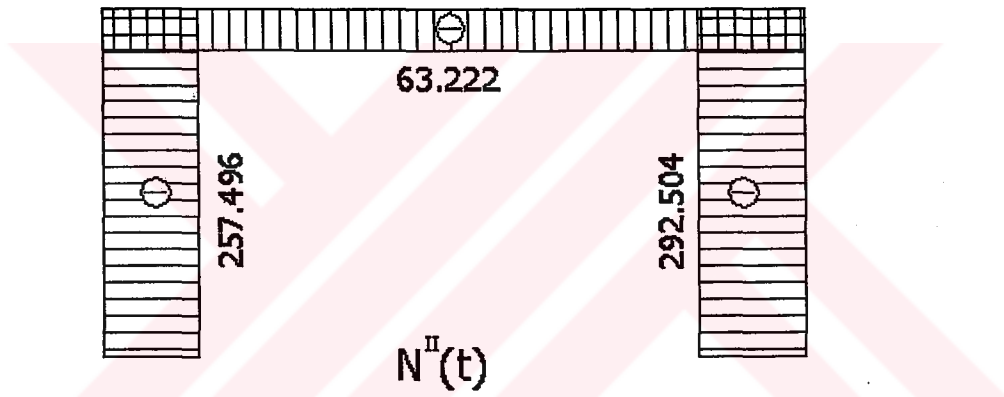
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle -63.263 \quad 292.504 \quad 144.374 \quad 63.263 \quad -292.504 \quad 109.708 \rangle$$

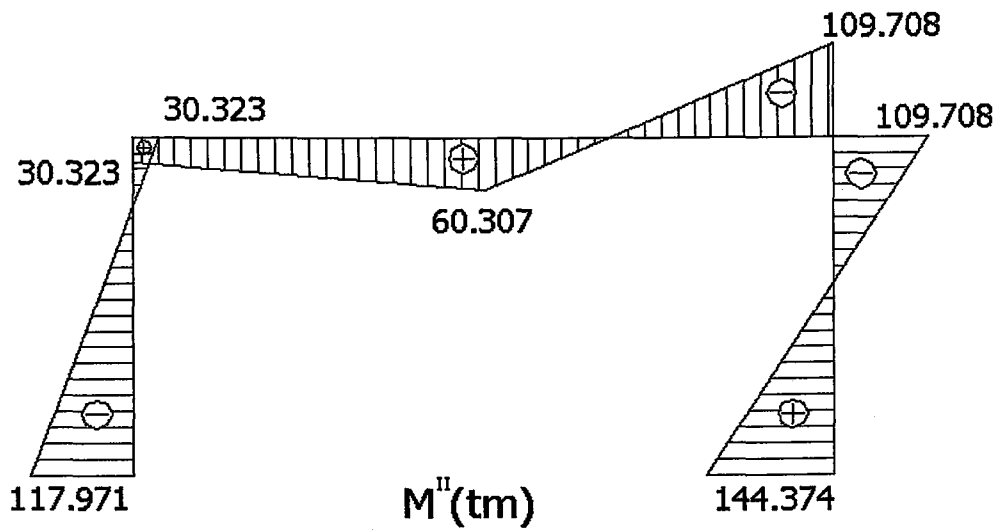
Tablo 5.23 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_j(t)$	257.496	63.222	63.222	292.504
$T_j(t)$	-36.778	7.496	-42.504	-63.263
$M_j(tm)$	117.971	-30.323	-60.307	144.374
$N_k(t)$	-257.496	-63.222	-63.222	-292.504
$T_k(t)$	36.778	7.496	42.504	63.263
$M_k(tm)$	30.323	60.307	-109.708	109.708

5.3.4.4 II. Mertebe Lineer Elastik Çözülen Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.34 İkinci Mertebe Lineer Elastik Hesap Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.35 İkinci Mertebe Lineer Elastik Hesap Moment Diyagramı

5.3.4.5 II. Mertebe Lineer Elastik Analiz ile Çerçevenin Burkulma Yükünün Eldesi

Determinant kriteri yöntemi ile sistemin burkulma yükü ve çubukların burkulma boyları bulunacaktır. II. mertebe katsayılar matrisi matris deplasman yöntemi ile çerçevenin II. mertebe elastik analizinden bulunmuştur.

Sistemin rijitlik matrisinin determinantını sıfır yapan yük parametresi belirlenecek ve sistemin burkulma yükü bulunacaktır.

Aşağıda bazı yük parametrelerine karşı global rijitlik matrisinin determinant değerleri verilmiştir.

p= 1	→	$ K_{Global} = 9.583268 \times 10^{45}$
p= 10	→	$ K_{Global} = 8.839303 \times 10^{45}$
p= 20	→	$ K_{Global} = 8.037829 \times 10^{45}$
p= 50	→	$ K_{Global} = 5.790626 \times 10^{45}$
p= 100	→	$ K_{Global} = 2.559044 \times 10^{45}$
p= 150	→	$ K_{Global} = -4.965528 \times 10^{43}$
p= 145	→	$ K_{Global} = 1.838449 \times 10^{44}$
p= 149	→	$ K_{Global} = -3.435553 \times 10^{42}$
p= 148.7	→	$ K_{Global} = 1.047714 \times 10^{43}$
p= 148.9	→	$ K_{Global} = 1.199607 \times 10^{43}$

Yük parametresi değeri 148.9 ile 149 arasındaki bir değer için kritik burkulma yük parametresi belirlenmiş olacaktır.

$$p = 148.9 < p_b < p = 149$$

Yük parametresinin tam değeri yukarıdaki sınırlar arasında iterasyonlar sonucu bulunabilir. Ancak iterasyon işlemi uygulanmadan $p_b \approx 148$ alarak emniyetli bir kritik burkulma yük parametresi sınır değeri seçilmiştir.

5.3.4.6 Kolon Elemanların Burkulma Boylarının Hesabı

Burkulma yük parametresi $p_b = 148$ olduğundan;

1. Eleman için;

$$N_1 = p_b \times N_1^I$$

$$N_1 = 148 \times 257.615 = 38127.02 \text{ t.}$$

4. Eleman için;

$$N_4 = p_b \times N_4^I$$

$$N_4 = 148 \times 292.385 = 43282.98 \text{ t.}$$

Eksenel kuvvet değerleri elde edilmiş olur. Burkulma boylarını bulmak için;

$$N_k = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2}$$

formülünden L_k değerini çekersek;

$$L_k = \pi \sqrt{\frac{EI}{N_k}}$$

elde edilir.

1. Eleman için kritik burkulma boyu;

$$L_{k,1} = \pi \sqrt{\frac{2.1 \times 10^7 \times 0.005704}{38127.02}} = 5.568 \text{ m.}$$

$$k_1 = \frac{L_{k,1}}{L} = \frac{5.568}{4} = 1.392 \text{ bulunur.}$$

4. Eleman için kritik burkulma boyu;

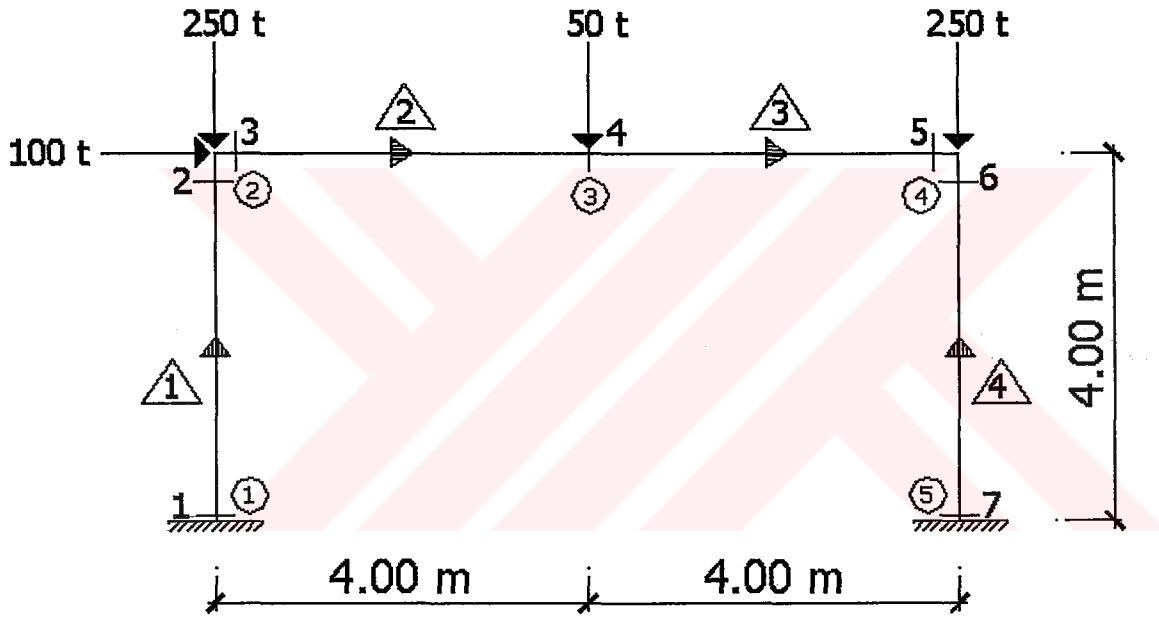
$$L_{k,4} = \pi \sqrt{\frac{2.1 \times 10^7 \times 0.005704}{43282.98}} = 5.226 \text{ m.}$$

$$k_4 = \frac{L_{k,4}}{L} = \frac{5.226}{4} = 1.307 \text{ bulunur.}$$

5.3.5 II. Mertebe Elastoplastik $K(M)=0$ Hesap

I. mertebe lineer elastik hesap sonucunda bulunan kritik kesitler gözönüne alınarak II. mertebe elastoplastik hesap yapılacaktır.

Denge denklemleri şekildegıştırmış eksen üzerinden yazılacağından II. mertebe teorisi bu kısımda geçerlidir. Malzemenin doğrusal olmayan davranışı ve II. mertebe etkiler bu hesapta incelenecektir. Yanlız moment etkisi altında akma davranışı $K(M)=0$ gözönüne alınacaktır. Normal kuvvetin akma davranışına olan etkisi ihmal edilmektedir.



Şekil 5.36 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İçin Çerçevenin Yükleme Durumu ve Kritik Kesitler

5.3.5.1 İlk Plastik Mafsalın Yerinin ve İlk Yük Parametresinin Belirlenmesi

II. mertebe lineer elastik hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.24 hazırlanır:

Tablo 5.24 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin İlk İterasyon

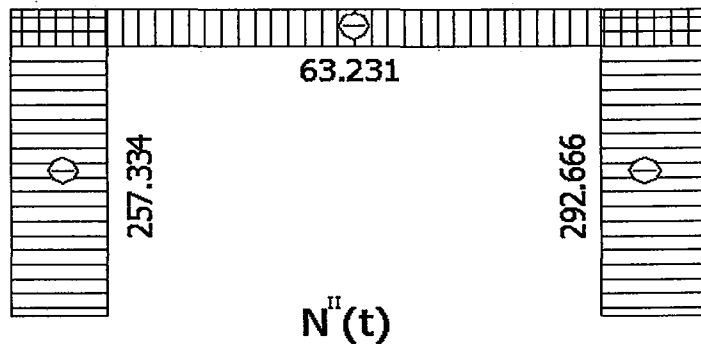
Kesit No	M_p	ΔM_1	Δp_1
1	-339.032	-117.971	2.874
2	339.032	30.323	11.181
3	293.024	30.323	9.663
4	293.024	60.307	4.859
5	-293.024	-109.708	2.671
6	-339.032	-109.708	3.090
7	339.032	144.374	2.348

İlk plastik mafsalları (7) numaralı kesitte ve $\Delta p_1 = 2.348$ yük parametresi değerinde oluşabilir. Ancak II. mertebe hesap için bu yük parametresinde kesit tesirleri değişeceğinden yük parametresi de değişecektir. Bundan dolayı ardışık yaklaşım yolu izlenecektir. Ardışık yaklaşım yolunda bir önceki yük parametresine yeter yakın derecede bir yük parametresi değeri buluncaya kadar hesaba devam edilir. Eleman uç moment değerleri II. mertebe hesapta normal kuvvetlere göre hesap edileceğinden yeni normal kuvvetlere göre II. mertebe hesap yenilenir. $\Delta p_1 = 2.348$ olduğundan;

$$N_1^2 = 2.348 \times 257.496 = 604.601 \text{ t.}$$

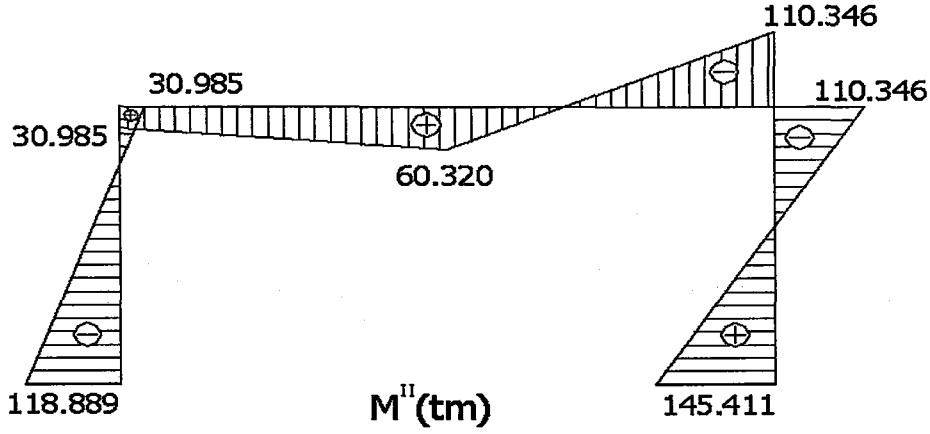
$$N_4^2 = 2.348 \times 292.504 = 686.799 \text{ t.}$$

Normal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik hesaptan bulunan kolon normal kuvvet değerleri ve yük parametresinin çarpılmasından elde edilmiştir. Bu elde edilen normal kuvvet değerleri ile hesap tekrarlanacak olursa elde edilen normal kuvvet ve moment diyagramları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.37 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci İterasyon İçin

Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.38 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci İterasyon İçin Çerçevenin Moment Diyagramı

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için tablo tekrar hazırlanır:

Tablo 5.25 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon

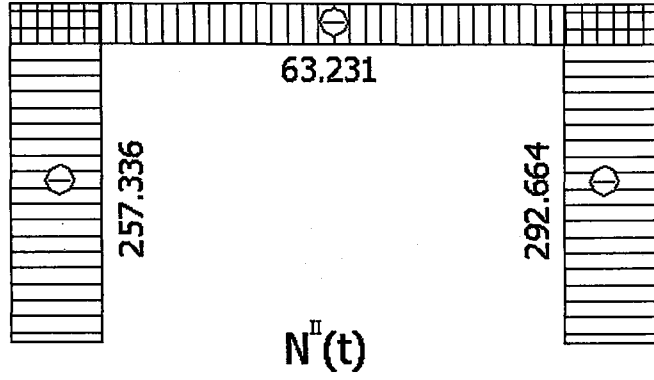
Kesit No	M_p	ΔM_1	Δp_1
1	-339.032	-118.889	2.852
2	339.032	30.985	10.942
3	293.024	30.985	9.457
4	293.024	60.320	4.858
5	-293.024	-110.346	2.656
6	-339.032	-110.346	3.072
7	339.032	145.411	2.332

Yük parametresi değeri $\Delta p_1 = 2.332$ bulunmuştur. İlk iterasyon adımında $\Delta p_1 = 2.348$ idi. Aradaki fark ihmal edilemeyecek büyüklükte olduğundan bir iterasyon adımı daha uygulanmalıdır. Yük parametresi değeri $\Delta p_1 = 2.332$ alınarak işlemler tekrar edilecektir. $\Delta p_1 = 2.332$ olduğundan;

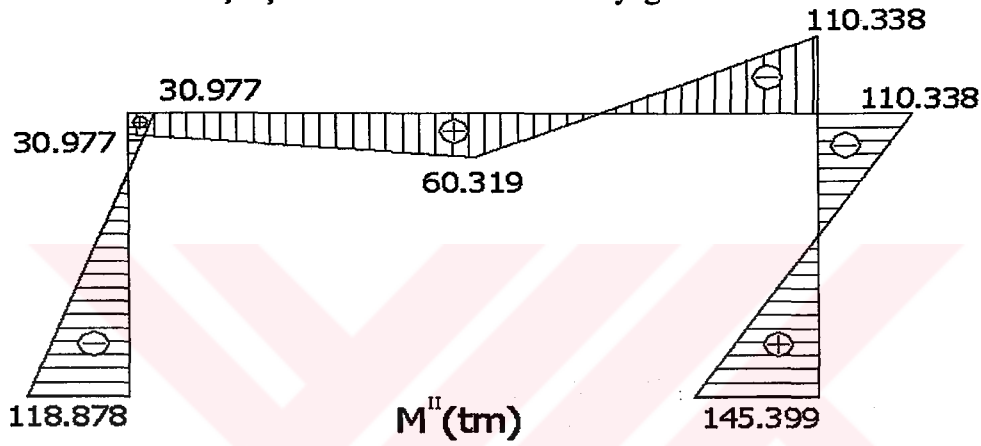
$$N_1^2 = 2.332 \times 257.496 = 600.481 \text{ t.}$$

$$N_4^2 = 2.332 \times 292.504 = 682.119 \text{ t.}$$

Normal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik hesaptan bulunan kolon normal kuvvet değerleri ve bu adımdaki yük parametresinin çarpılmasından elde edilmiştir. Bu elde edilen normal kuvvet değerleri ile hesap tekrarlanacak olursa elde edilen normal kuvvet ve moment diyagramları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.39 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci İterasyon İçin
Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.40 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci İterasyon İçin
Çerçevenin Moment Diyagramı

Tablo 5.26 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin
Üçüncü İterasyon

Kesit No	M_p	ΔM_1	Δp_1
1	-339.032	-118.878	2.852
2	339.032	30.977	10.945
3	293.024	30.977	9.459
4	293.024	60.319	4.858
5	-293.024	-110.338	2.656
6	-339.032	-110.338	3.073
7	339.032	145.399	2.332

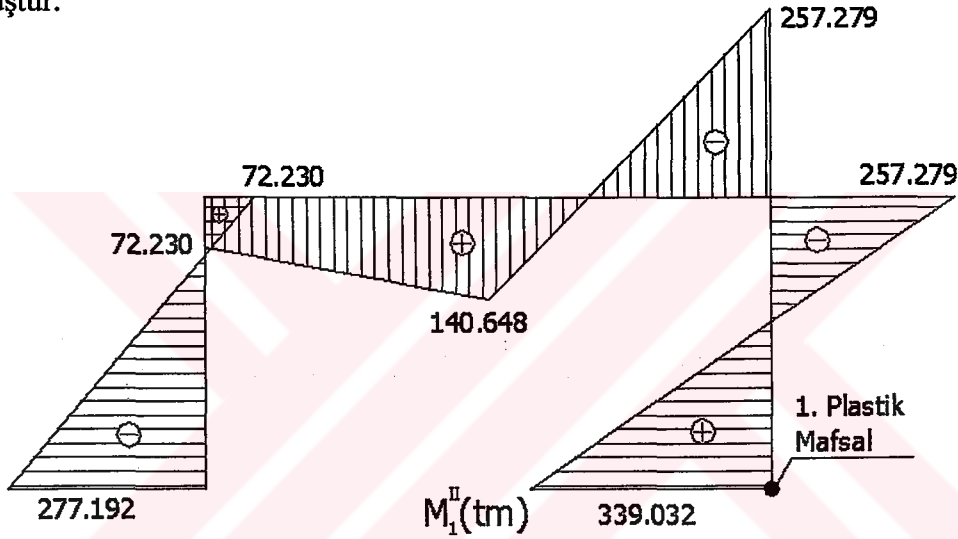
Yük parametresi değeri $\Delta p_1 = 2.332$ bulunmuştur. İkinci iterasyon adımında $\Delta p_1 = 2.332$ bulunmuştu. Arada fark bulunmadığından iterasyon sonlandırılır ve yük parametresi $p_1 = 2.332$ olarak alınır.

Yük parametresi $p_1 = 2.332$ değerinde (7) numaralı kesitte ilk plastik mafsall oluşur. Yüklerin $p_1 = 2.332$ kat arttırılması sonucu ilk plastik mafsall oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_1^{\text{II}} = \Delta p_1^{\text{II}} \delta_{x,1}$$

$$\delta_1^{\text{II}} = 2.332 \times 0.004625 = 0.010786 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_1 = 2.332$ olduğunda ilk plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.010786 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış moment değerleri Şekil 5.41'de sunulmuştur.



Şekil 5.41 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı

Kesit (7) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (7) numaralı kesite ilk plastik mafsall konmuştur.

5.3.5.2 Birinci Plastik Mafsallın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme değişmemektedir. Sadece kolonlardaki eksenel kuvvetlerin değişiminden dolayı hesaplar iteratif olmaktadır. İterasyona başlangıç değeri olması açısından I. mertebe eksenel kuvvet değerleri ilk plastik mafsallın oluştuğu durum için yazılacak olursa;

$$N_1 = -250.965 \text{ t.}$$

$$N_4 = -299.035 \text{ t.}$$

5.3.5.3 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 1 No'lu elemanda $N_1^1 = 250.965 \text{ t.}$ aksenal basınç kuvveti mevcuttur.

$$\alpha^2 = \frac{N_1^1}{E I_1} \text{ formülünden; } \alpha^2 = 0.002095 \text{ ve dolayısıyla } \alpha L = 0.183091 \text{ elde edilir.}$$

Bu değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denkemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.995528$ ve $m_k = 2.001119$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22384 & 44894 & 0 & -22384 & 44894 \\ 0 & 44894 & 119650 & 0 & -44894 & 59925 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22384 & -44894 & 0 & 22384 & -44894 \\ 0 & 44894 & 59925 & 0 & -44894 & 119650 \end{bmatrix}$$

Elemanın II. mertebe global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K^{\text{II}}][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 22384 & 0 & -44894 & -22384 & 0 & -44894 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ -44894 & 0 & 119650 & 44894 & 0 & 59925 \\ -22384 & 0 & 44894 & 22384 & 0 & 44894 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -44894 & 0 & 59925 & 44894 & 0 & 119650 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabı elemanın sol ucunda plastik mafsallı olduğu ve II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 4 numaralı elemanda $N_4^I = 299.035$ t. eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_4^I}{EI_4}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.002496$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.199858$ elde edilir. Bu

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denkemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.994671$ ve $m_k = 2.001333$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^II] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22370 & 44889 & 0 & -22370 & 44889 \\ 0 & 44889 & 119624 & 0 & -44889 & 59932 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22370 & -44889 & 0 & 22370 & -44889 \\ 0 & 44889 & 59932 & 0 & -44889 & 119624 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsalsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{Sol,Mafsals}^{II}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5525 & 0 & 0 & -5525 & 22400 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5625 & 0 & 0 & 5525 & 22400 \\ 0 & 22400 & 0 & 0 & -22460 & 89598 \end{bmatrix}$$

II. mertebe etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsalsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_4] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K_{Sol,Mafsals}^{II}][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} 13 & 14 & 15 & 10 & 11 & 12 \\ 5625 & 0 & 0 & -5625 & 0 & -22400 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5625 & 0 & 0 & 5625 & 0 & 22400 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22400 & 0 & 0 & 22400 & 0 & 89598 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 234484 & 0 & 44894 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 \\ 44894 & 34855 & 212596 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 4224200 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 185892 & 0 & -34855 & 46473 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 217725 & 0 & 22400 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 0 & 240027 & -34855 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 22400 & -34855 & 182544 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 7.323 & 0.105 & -1.869 & 7.229 & -1.000 & 0.645 & 7.135 & -0.105 & -0.869 \\ 0.105 & 0.448 & -0.046 & 0.106 & 0.217 & -0.063 & 0.108 & 0.001 & -0.038 \\ -1.869 & -0.046 & 1.096 & -1.834 & 0.981 & -0.285 & -1.799 & 0.046 & 0.115 \\ 7.229 & 0.106 & -1.834 & 7.604 & -0.898 & 0.653 & 7.507 & -0.106 & 0.038 \\ -1.000 & 0.217 & 0.981 & -0.898 & 4.845 & -0.050 & -0.795 & -0.108 & -1.004 \\ 0.645 & -0.063 & -0.285 & 0.653 & -0.050 & 0.692 & 0.660 & -0.108 & -1.004 \\ 7.135 & 0.108 & -1.799 & 7.507 & -0.795 & 0.660 & 7.880 & -0.108 & -1.004 \\ -0.105 & 0.001 & 0.046 & -0.106 & 0.233 & 0.063 & -0.108 & 0.448 & 0.038 \\ -0.869 & -0.038 & 0.115 & -0.936 & -0.770 & -0.236 & -1.004 & 0.038 & 0.885 \end{bmatrix}$$

5.3.5.4 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 7.823 \quad -1.126 \quad -2.359 \quad 7.678 \quad -4.545 \quad 0.670 \quad 7.533 \quad -1.345 \quad -0.484 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.007823 \quad -0.001126 \quad -0.002359 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.007823 \quad -0.001126 \quad -0.002359 \quad 0.007678 \quad -0.004545 \quad 0.000670 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.007678 \quad -0.004545 \quad 0.000670 \quad 0.007533 \quad -0.001345 \quad -0.000484 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.007553 \quad -0.001345 \quad -0.000484 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -69.215 \quad 250.705 \quad 209.856 \quad 69.215 \quad -250.705 \quad 68.967 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 30.785 \quad 0.705 \quad -68.967 \quad -30.785 \quad -0.705 \quad 71.787 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 30.785 \quad -49.295 \quad -71.787 \quad -30.785 \quad 49.298 \quad -125.393 \rangle$$

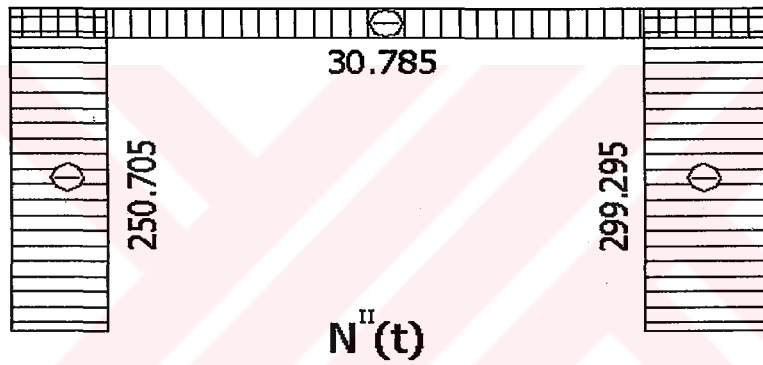
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle -30.785 \quad 299.295 \quad 0.000 \quad 30.785 \quad -299.295 \quad 125.393 \rangle$$

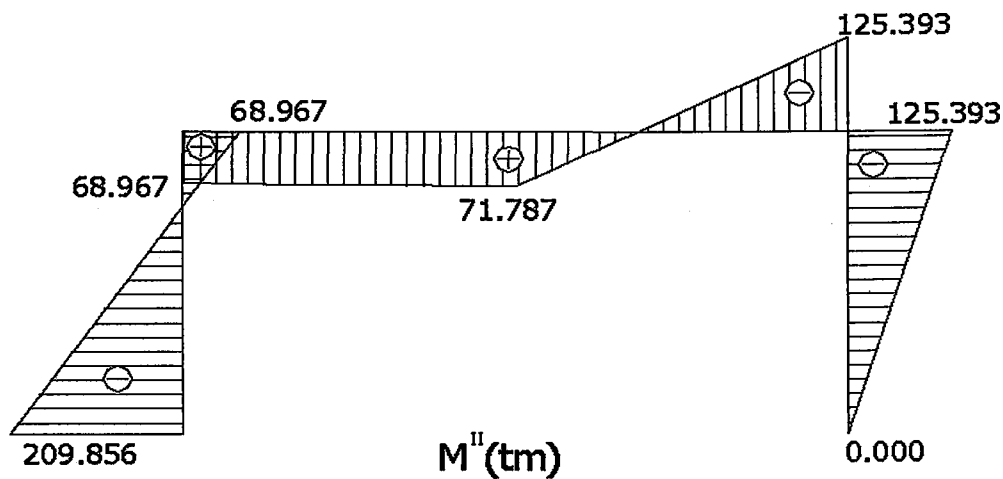
Tablo 5.27 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_j(t)$	250.705	30.785	30.785	299.295
$T_j(t)$	-69.215	0.705	-49.295	-30.785
$M_j(tm)$	209.856	-68.967	-71.787	0.000
$N_k(t)$	-250.705	-30.785	-30.785	-299.295
$T_k(t)$	69.215	-0.705	49.295	30.785
$M_k(tm)$	68.967	71.787	-125.393	125.393

5.3.5.5 Birinci Mafsall Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.42 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Bir Mafsall Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.43 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Bir Mafsall Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Moment Diyagramı

5.3.5.6 İkinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İkinci Yük Parametresinin Belirlenmesi

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için Tablo 5.28 hazırlanır:

Tablo 5.28 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon

Kesit No	M_p	M_1	ΔM_2	Δp_2
1	-339.032	-277.192	-209.856	0.295
2	339.032	72.230	68.967	3.869
3	293.024	72.230	68.967	3.201
4	293.024	140.648	71.787	2.123
5	-293.024	-257.279	-125.393	0.285
6	-339.032	-257.279	-125.393	0.652
7	339.032	339.032	-	-

Yük parametresi değeri ilk iterasyonda $\Delta p_2 = 0.285$ bulunmuştur. Ardışık yaklaşım yolunda bir önceki yük parametresine yeter yakın derecede bir yük parametresi değeri buluncaya kadar hesaba devam edilmelidir.

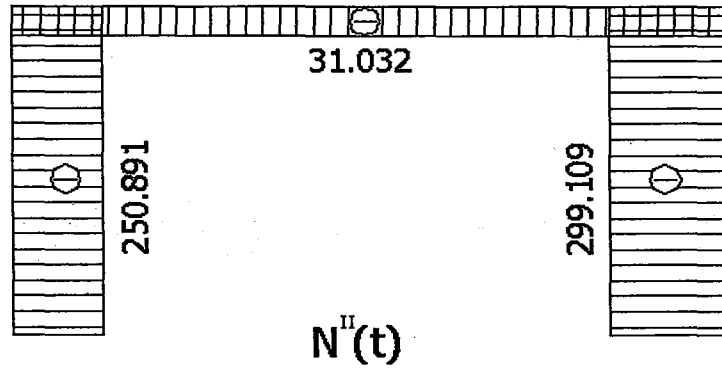
Eleman uç moment değerleri II. mertebe hesapta normal kuvvetlere göre hesap edileceğinden yeni normal kuvvetlere göre II. mertebe hesap yenilenir. $\Delta p_2 = 0.285$ olduğundan;

$$N_1^2 = 0.285 \times 250.965 = 71.525 \text{ t.}$$

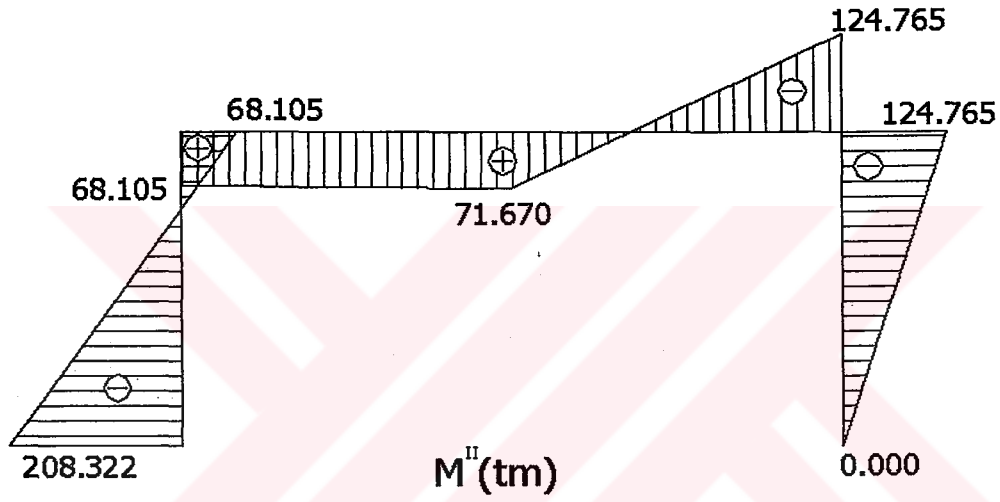
$$N_4^2 = 0.285 \times 299.035 = 85.225 \text{ t.}$$

Normal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik hesaptan bulunan kolon normal kuvvet değerleri ve yük parametresinin çarpılmasından elde edilmiştir. Bu elde edilen normal kuvvet değerleri ile hesap tekrarlanacaktır.

Ara matris işlemleri bir önceki işlemlerin aynısı olduğundan tekrar edilmeyecektir. Sadece eksenel kuvvet değerinin değişmesinden dolayı elde edilecek olan yeni normal kuvvet ve moment diyagramları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.44 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.45 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Moment Diyagramı

Tablo 5.29 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon

Kesit No	M_p	M_1	ΔM_2	Δp_2
1	-339.032	-277.192	-208.322	0.297
2	339.032	72.230	68.105	3.918
3	293.024	72.230	68.105	3.242
4	293.024	140.648	71.670	2.126
5	-293.024	-257.279	-124.765	0.286
6	-339.032	-257.279	-124.765	0.655
7	339.032	339.032	-	-

Yük parametresi değeri $\Delta p_2 = 0.286$ bulunmuştur. Birinci iterasyon adımımda $\Delta p_2 = 0.285$ bulunmuştu. Aradaki fark ihmal edilebilecek büyüklükte olduğundan iterasyon sonlandırılır ve yük parametresi $\Delta p_2 = 0.286$ olarak alınır. İkinci yük parametresi;

$$p_2 = p_1 + \Delta p_2$$

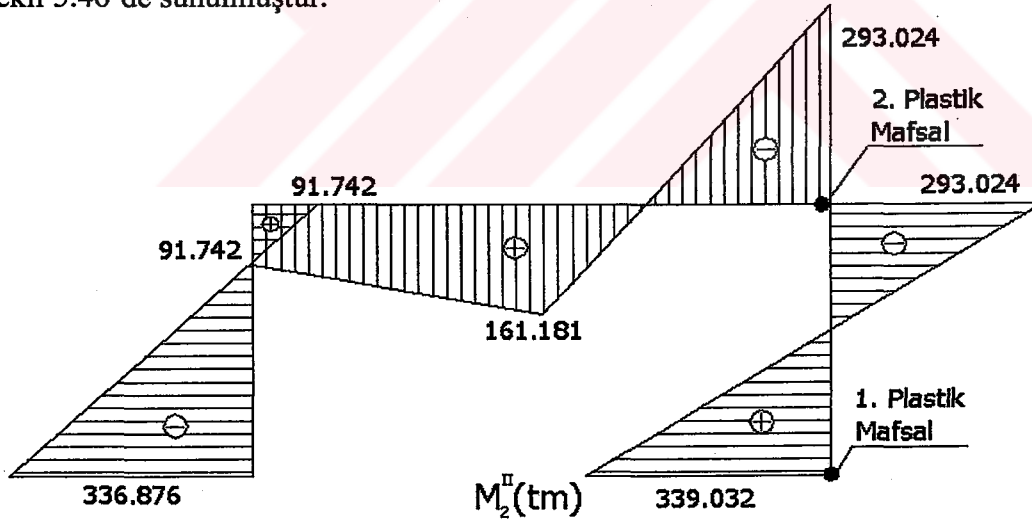
$$p_2 = 2.332 + 0.286 = 2.618 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_2 = 2.618$ kat artırılması sonucu ikinci plastik mafsall oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_2^{\text{II}} = \delta_1^{\text{II}} + \Delta p_2^{\text{II}} \delta_{x,1}$$

$$\delta_2^{\text{II}} = 0.010786 + 0.286 \times 0.007764 = 0.013007 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_2 = 2.618$ olduğunda ikinci plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.013007 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış moment değerleri Şekil 5.46'de sunulmuştur.



Şekil 5.46 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı

Kesit (5) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (5) numaralı kesite ikinci plastik mafsall konulmuştur.

5.3.5.7 İkinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme değişmemektedir. Sadece kolonlardaki eksenel kuvvetlerin değişiminden dolayı hesaplar iteratif olmaktadır. İterasyona başlangıç değeri olması açısından eksenel kuvvet değerleri I. mertebe ikinci plastik mafsalın oluştuğu durum için yazılacak olursa;

$$N_1 = -265.906 \text{ t.}$$

$$N_4 = -284.094 \text{ t.}$$

5.3.5.8 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 1 numaralı elemanda $N_1^1 = 265.906 \text{ t.}$ eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$$\alpha^2 = \frac{N_1^1}{E I_1} \text{ formülünden; } \alpha^2 = 0.002220 \text{ ve dolayısıyla } \alpha L = 0.188462 \text{ elde edilir. Bu}$$

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denkemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.995262$ ve $m_k = 2.001185$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^II] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22380 & 44892 & 0 & -22380 & 44893 \\ 0 & 44892 & 119642 & 0 & -44892 & 59927 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22380 & -44892 & 0 & 22380 & -44892 \\ 0 & 44892 & 59927 & 0 & -44892 & 119642 \end{bmatrix}$$

Elemanın II. mertebe global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K^II][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 22380 & 0 & -44892 & -22380 & 0 & -44892 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ -44892 & 0 & 119652 & 44892 & 0 & 59927 \\ -22380 & 0 & 44892 & 22380 & 0 & 44892 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -44892 & 0 & 59927 & 44892 & 0 & 119642 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Sağ ucunda mafsalları bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sağ Mafsal}}] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 4357 & 17427 & 0 & -4357 & 0 \\ 0 & 17427 & 69710 & 0 & -17427 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -4357 & -17427 & 0 & 4357 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Sağ ucunda mafsalsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_3] = [\alpha_3][K_{\text{sağ mafsalsal}}][\alpha_3]^T$ işleminden 3. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 4357 & 17427 & 0 & -4357 & 0 \\ 0 & 17427 & 69710 & 0 & -17427 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -4357 & -17427 & 0 & 4357 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

I. mertebe analiz sonucunda 4 No'lu elemanda $N_4^1 = 284.094$ t. aksenal basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_4^1}{EI_4}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.002372$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.194801$ elde edilir. Bu

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.994938$ ve $m_k = 2.001266$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^{II}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22374 & 44891 & 0 & -22374 & 44891 \\ 0 & 44891 & 119632 & 0 & -44891 & 59930 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22374 & -44891 & 0 & 22374 & -44891 \\ 0 & 44891 & 59930 & 0 & -44891 & 119632 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsalsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsal}}^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5530 & 0 & 0 & -5530 & 22403 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5630 & 0 & 0 & 5530 & 22403 \\ 0 & 22403 & 0 & 0 & -22403 & 89610 \end{bmatrix}$$

II. mertebe etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[a_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [a_4][K_{\text{Sol,Mafsal}}^{\text{II}}][a_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{array}{ccccc} \begin{matrix} 13 & 14 & 15 & 10 & 11 & 12 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 5530 & 0 & 0 & -5630 & 0 & -22403 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5530 & 0 & 0 & 5630 & 0 & 22403 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22403 & 0 & 0 & 22403 & 0 & 89610 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix} \end{array}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 234480 & 0 & 44892 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 \\ 44892 & 34855 & 212588 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 21784 & -17427 & 0 & -4357 & 0 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -17427 & 162656 & 0 & -17427 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 217630 & 0 & 22403 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4357 & -17427 & 0 & 226957 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22403 & 0 & 89610 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 10.811 & 0.061 & -3.145 & 10.815 & -4.694 & 0.376 & 10.818 & -0.061 & -2.705 \\ 0.061 & 0.449 & -0.030 & 0.061 & 0.263 & -0.059 & 0.061 & 0.001 & -0.015 \\ -3.145 & -0.030 & 1.563 & -3.146 & 2.333 & -0.187 & -3.147 & 0.030 & 0.787 \\ 10.815 & 0.061 & -3.146 & 11.290 & -4.696 & 0.376 & 11.294 & -0.010 & -2.823 \\ -4.694 & 0.263 & 2.333 & -4.696 & 8.759 & 0.236 & -4.697 & 0.186 & -1.174 \\ 0.376 & -0.059 & -0.187 & 0.376 & 0.236 & 0.712 & 0.376 & 0.059 & -0.094 \\ 10.8181 & 0.061 & -3.147 & 11.294 & -4.697 & 0.376 & 11.769 & -0.061 & -2.942 \\ -0.061 & 0.001 & 0.030 & -0.061 & 0.186 & 0.059 & -0.061 & 0.449 & 0.015 \\ -2.705 & -0.015 & 0.787 & -2.823 & 1.174 & -0.094 & -2.942 & 0.015 & 1.852 \end{bmatrix}$$

5.3.5.9 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 denklem kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 13.158 \quad -1.193 \quad -4.311 \quad 13.163 \quad -10.197 \quad 0.258 \quad 13.167 \quad -1.277 \quad -3.292 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.013158 \quad -0.001193 \quad -0.004311 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.013158 \quad -0.001193 \quad -0.004311 \quad 0.013163 \quad -0.010197 \quad 0.000258 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.013163 \quad -0.010197 \quad 0.000258 \quad 0.013167 \quad -0.001277 \quad -0.003292 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.013167 \quad -0.001277 \quad -0.003292 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -100.000 \quad 265.638 \quad 332.340 \quad 100.935 \quad -265.638 \quad 74.899 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle -0.935 \quad 15.638 \quad -74.899 \quad 0.935 \quad -15.638 \quad 137.450 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 0.935 \quad -34.362 \quad -137.450 \quad 0.935 \quad 34.362 \quad 0.000 \rangle$$

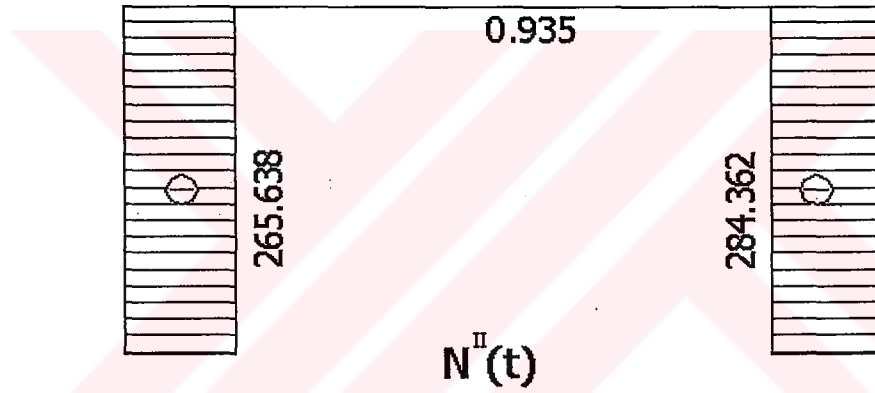
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle 0.935 \quad 284.362 \quad 0.000 \quad -0.935 \quad -284.362 \quad 0.000 \rangle$$

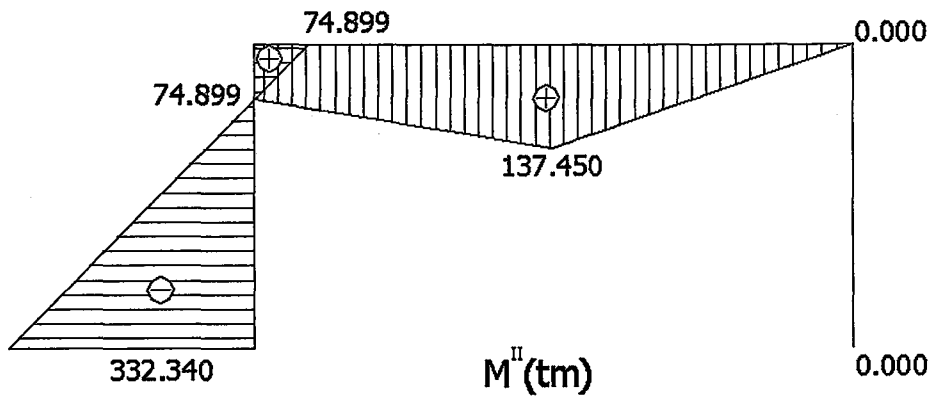
Tablo 5.30 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_i(t)$	265.638	-0.935	-0.935	284.362
$T_i(t)$	-100.935	15.638	-34.362	0.935
$M_i(tm)$	332.340	-74.899	-137.450	0.000
$N_k(t)$	-265.638	0.935	0.935	-284.362
$T_k(t)$	100.935	-15.638	34.362	-0.935
$M_k(tm)$	74.899	137.450	0.000	0.000

5.3.5.10 İkinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.47 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.48 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Moment Diyagramı

5.3.5.11 Üçüncü Plastik Mafsallın Yerinin ve Üçüncü Yük Parametresinin Belirlenmesi

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için Tablo 5.31 hazırlanır:

Tablo 5.31 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon

Kesit No	M_p	M_2	ΔM_3	Δp_3
1	-339.032	-336.876	-332.340	0.006
2	339.032	91.742	74.899	3.302
3	293.024	91.742	74.889	2.688
4	293.024	161.181	137.450	0.959
5	-293.024	-293.024	-	-
6	-339.032	-293.024	-	-
7	339.032	339.032	-	-

Yük parametresi değeri ilk iterasyonda $\Delta p_3 = 0.006$ bulunmuştur. Ardışık yaklaşım yolunda bir önceki yük parametresine yeter yakın derecede bir yük parametresi değeri buluncaya kadar hesaba devam edilmelidir.

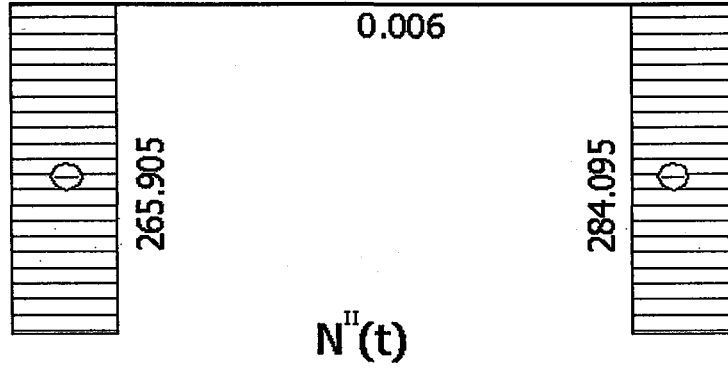
Eleman uç moment değerleri II. mertebe hesapta normal kuvvetlere göre hesap edileceğinden yeni normal kuvvetlere göre II. mertebe hesap yenilenir. $\Delta p_3 = 0.006$ olduğundan;

$$N_1^2 = 0.006 \times 265.906 = 1.595 \text{ t.}$$

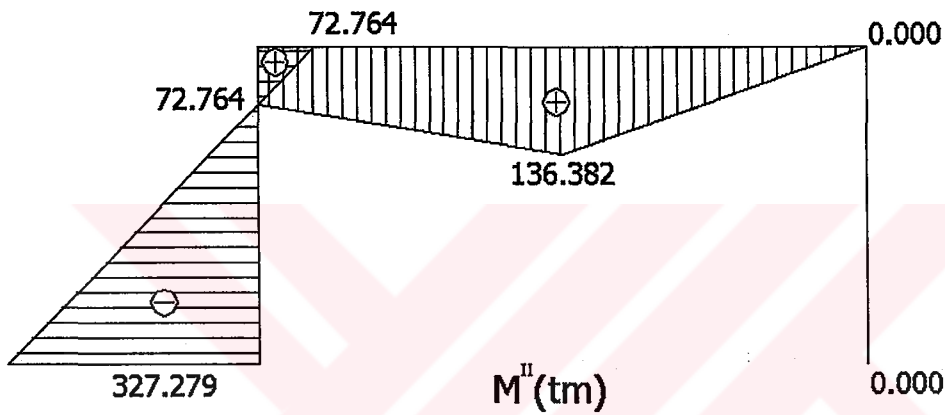
$$N_4^2 = 0.006 \times 284.094 = 1.705 \text{ t.}$$

Normal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik hesaptan bulunan kolon normal kuvvet değerleri ve yük parametresinin çarpılmasından elde edilmiştir. Bu elde edilen normal kuvvet değerleri ile hesap tekrarlanacaktır.

Ara matris işlemleri bir önceki işlemlerin aynısı olduğundan tekrar edilmeyecektir. Sadece eksenel kuvvet değerinin değişmesinden dolayı elde edilecek olan yeni normal kuvvet ve moment diyagramları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.49 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.50 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Moment Diyagramı

Tablo 5.32 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon

Kesit No	M_p	M_2	ΔM_3	Δp_3
1	-339.032	-336.876	-327.279	0.007
2	339.032	91.742	72.764	3.399
3	293.024	91.742	72.764	2.766
4	293.024	161.181	136.382	0.967
5	-293.024	-293.024	-	-
6	-339.032	-293.024	-	-
7	339.032	339.032	-	-

Yük parametresi değeri $\Delta p_3 = 0.007$ bulunmuştur. Birinci iterasyon adımında $\Delta p_3 = 0.006$ bulunmuştu. Aradaki fark ihmal edilebilecek büyüklükte olduğundan iterasyon sonlandırılır ve yük parametresi $\Delta p_3 = 0.007$ olarak alınır.

Üçüncü yük parametresi;

$$p_3 = p_2 + \Delta p_3$$

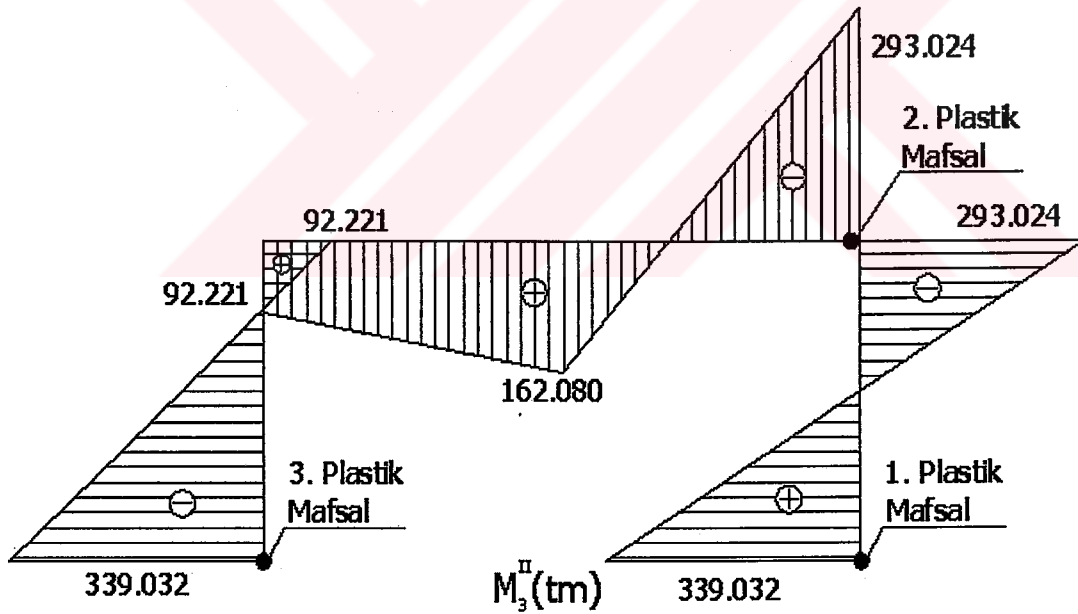
$$p_3 = 2.618 + 0.007 = 2.625 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_3 = 2.625$ kat artırılması sonucu üçüncü plastik mafsall oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_3^{\text{II}} = \delta_2^{\text{II}} + \Delta p_3^{\text{II}} \delta_{x,1}$$

$$\delta_3^{\text{II}} = 0.013007 + 0.007 \times 0.012952 = 0.013098 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_3 = 2.625$ olduğunda üçüncü plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.013098 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış moment değerleri Şekil 5.51'de sunulmuştur.



Şekil 5.51 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı

Kesit (1) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (1) numaralı kesite üçüncü plastik mafsall konulmuştur.

5.3.5.12 Üçüncü Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme değişmemektedir. Sadece kolonlardaki eksenel kuvvetlerin değişiminden dolayı hesaplar iteratif olmaktadır. İterasyona başlangıç değeri olması açısından eksenel kuvvet değerleri I. mertebe üçüncü plastik mafsalın oluştuğu durum için yazılacak olursa;

$$N_1 = -225.000 \text{ t.}$$

$$N_4 = -225.000 \text{ t.}$$

5.3.5.13 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

I. mertebe analiz sonucunda 4 numaralı elemanda $N_4^I = 225.000 \text{ t.}$ eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$$\alpha^2 = \frac{N_4^I}{E I_4} \text{ formülünden; } \alpha^2 = 0.001878 \text{ ve dolayısıyla } \alpha L = 0.173361 \text{ elde edilir. Bu}$$

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denkemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.995991$ ve $m_k = 2.001003$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^u] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22392 & 44896 & 0 & -22392 & 44896 \\ 0 & 44896 & 119664 & 0 & -44896 & 59922 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22392 & -44896 & 0 & 22392 & -44896 \\ 0 & 44896 & 59922 & 0 & -44896 & 119664 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsal}}^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5547 & 0 & 0 & -5547 & 22414 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5547 & 0 & 0 & 55347 & 22414 \\ 0 & 22414 & 0 & 0 & -22414 & 89658 \end{bmatrix}$$

II. merteye etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K_{\text{Sol,Mafsal}}^{\text{II}}][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 5547 & 0 & 0 & -5547 & 0 & -22414 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5547 & 0 & 0 & 5547 & 0 & 22414 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22414 & 0 & 0 & 22414 & 0 & 89658 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Sağ ucunda mafsallı bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sağ Mafsal}}] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 4357 & 17427 & 0 & -4357 & 0 \\ 0 & 17427 & 69710 & 0 & -17427 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -4357 & -17427 & 0 & 4357 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Sağ ucunda mafsallı bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_3] = [\alpha_3][K_{\text{Sağ mafsallı}}][\alpha_3]^T$ işleminden 3. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 4357 & 17427 & 0 & -4357 & 0 \\ 0 & 17427 & 69710 & 0 & -17427 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -4357 & -17427 & 0 & 4357 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

I. mertebe analiz sonucunda 4 numaralı elemanda $N_4^1 = 325.000$ t. aksenal basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_4^1}{EI_4}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.002713$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.208354$ elde edilir. Bu

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.994209$ ve $m_k = 2.001449$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^II] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22362 & 44886 & 0 & -22362 & 44886 \\ 0 & 44886 & 119611 & 0 & -44886 & 59935 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22362 & -44886 & 0 & 22362 & -44886 \\ 0 & 44886 & 59935 & 0 & -44886 & 119611 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsalsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{Sol,Mafsals}^{II}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5517 & 0 & 0 & -5517 & 22394 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5517 & 0 & 0 & 5517 & 22394 \\ 0 & 22394 & 0 & 0 & -22394 & 89578 \end{bmatrix}$$

II. merteye etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsalsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K_{Sol,Mafsals}^{II}][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} 5517 & 0 & 0 & -5517 & 0 & -22394 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5517 & 0 & 0 & 5517 & 0 & 22394 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22394 & 0 & 0 & 22394 & 0 & 89578 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 217647 & 0 & 22414 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 \\ 22414 & 34855 & 182604 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 21784 & -17427 & 0 & -4357 & 0 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -17427 & 162656 & 0 & -17427 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 217715 & 0 & 22394 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4357 & -17427 & 0 & 226957 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22394 & 0 & 89578 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 70.148 & 0.246 & -12.645 & 70.175 & -18.875 & 1.511 & 70.202 & -0.246 & -17.551 \\ 0.246 & 0.449 & -0.060 & 0.246 & 0.219 & -0.056 & 0.246 & 0.000 & -0.061 \\ -12.645 & -0.060 & 3.084 & -12.650 & 4.603 & -0.369 & -12.665 & 0.060 & 3.164 \\ 70.175 & 0.246 & -12.650 & 70.674 & -18.883 & 1.512 & 70.665 & -0.246 & -17.675 \\ -18.875 & 0.219 & 4.603 & -18.883 & 12.148 & -0.036 & -18.890 & 0.230 & 4.722 \\ 1.511 & -0.056 & -0.369 & 1.512 & -0.036 & 0.734 & 1.513 & 0.056 & -0.378 \\ 70.202 & 0.246 & -12.655 & 70.701 & -18.890 & 1.513 & 71.200 & -0.246 & -17.800 \\ -0.246 & 0.000 & 0.060 & -0.246 & 0.230 & 0.056 & -0.246 & 0.449 & 0.062 \\ -17.551 & -0.062 & 3.164 & -17.675 & 4.722 & -0.378 & -17.800 & 0.062 & 5.566 \end{bmatrix}$$

5.3.5.14 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 79.586 \ -0.986 \ -14.947 \ 79.617 \ -26.072 \ 1.529 \ 79.647 \ -1.485 \ -19.912 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \ 0 \ 0 \ 0.079586 \ -0.000986 \ -0.014947 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.079586 \ -0.000986 \ -0.014947 \ 0.079617 \ -0.026072 \ 0.001529 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.079617 \ -0.026072 \ 0.001529 \ 0.079647 \ -0.001485 \ -0.019912 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \ 0 \ 0 \ 0.079647 \ -0.001485 \ -0.019912 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -106.471 \ 219.526 \ 0.000 \ 106.471 \ -219.526 \ 443.792 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle -6.471 \ -30.474 \ -443.792 \ 6.471 \ 30.474 \ 321.896 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle -6.471 \ -80.474 \ -321.896 \ 6.471 \ 80.474 \ 0.000 \rangle$$

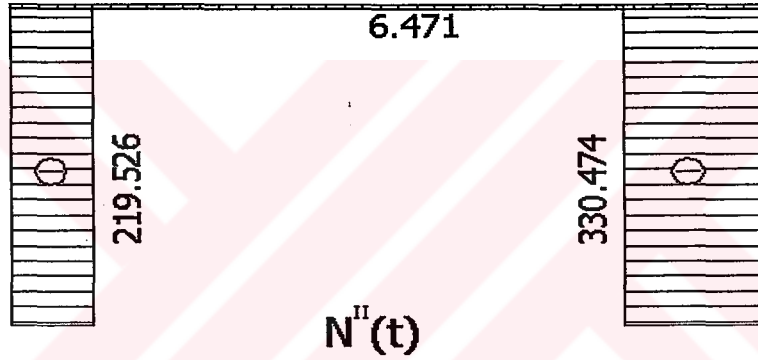
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle 6.471 \ 330.474 \ 0.000 \ -6.471 \ -330.474 \ 0.000 \rangle$$

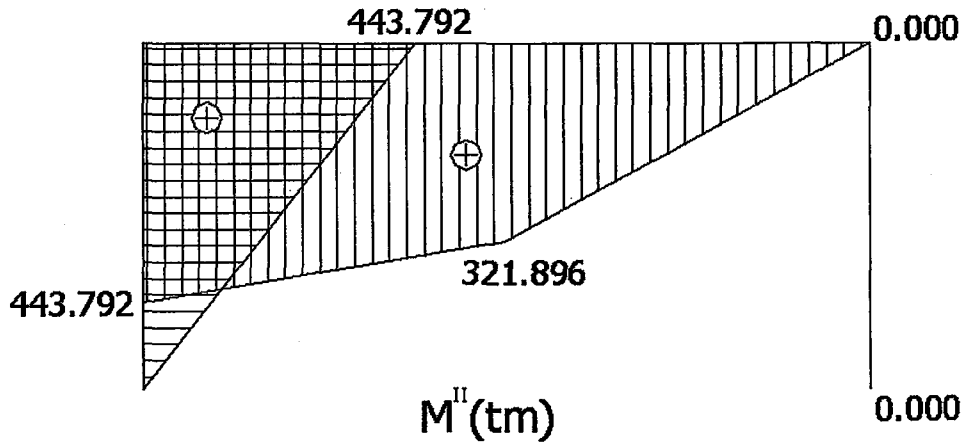
Tablo 5.33 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_j(t)$	219.526	-6.471	-6.471	330.474
$T_j(t)$	-106.471	-30.474	-80.474	6.471
$M_j(tm)$	0.000	-443.792	-321.896	0.000
$N_k(t)$	-219.526	6.471	6.471	-330.474
$T_k(t)$	106.471	30.474	80.474	-6.471
$M_k(tm)$	443.792	321.896	0.000	0.000

5.3.5.15 Üçüncü Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.52 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.53 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Moment Diyagramı

5.3.5.16 Dördüncü Plastik Mafsallın Yerinin ve Dördüncü Yük Parametresinin (Göçme Parametresinin) Belirlenmesi

II. mertebe hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.34 hazırlanır:

Tablo 5.34 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon

Kesit No	M_p	M_3	ΔM_4	Δp_4
1	-339.032	-339.032	-	-
2	339.032	92.221	443.792	0.556
3	293.024	92.221	443.792	0.452
4	293.024	162.080	321.896	0.407
5	-293.024	-293.024	-	-
6	-339.032	-293.024	-	-
7	339.032	339.032	-	-

Yük parametresi değeri ilk iterasyonda $\Delta p_4 = 0.407$ bulunmuştur. Ardışık yaklaşım yolunda bir önceki yük parametresine yeter yakın derecede bir yük parametresi değeri buluncaya kadar hesaba devam edilmelidir.

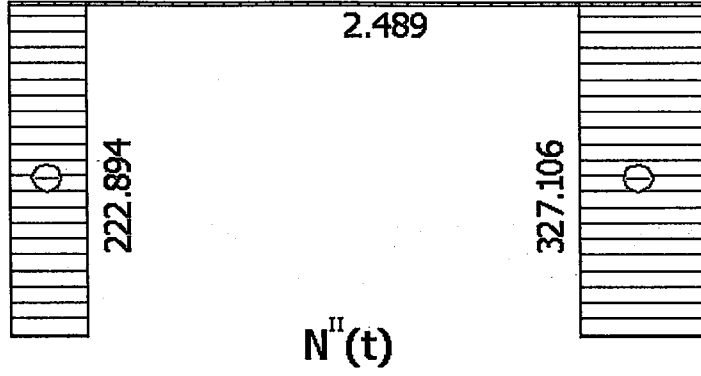
Eleman uç moment değerleri II. mertebe hesapta normal kuvvetlere göre hesap edileceğinden yeni normal kuvvetlere göre II. mertebe hesap yenilenir. $\Delta p_4 = 0.407$ olduğundan;

$$N_1^2 = 0.407 \times 225.000 = 91.575 \text{ t.}$$

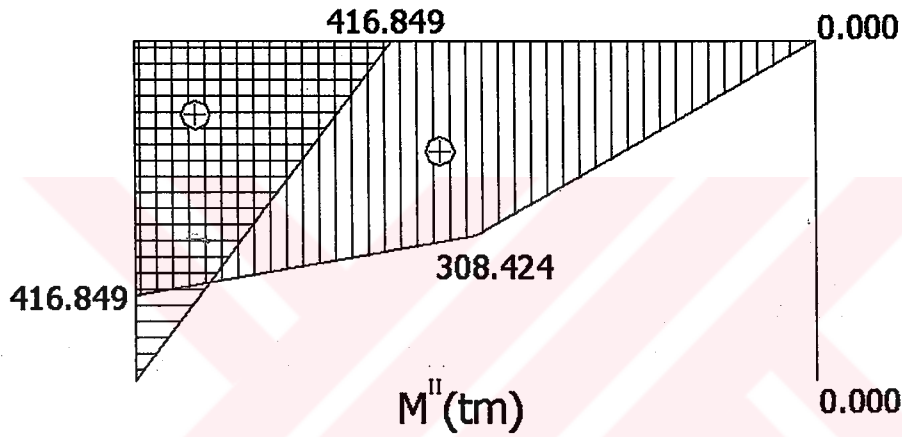
$$N_4^2 = 0.407 \times 325.000 = 132.275 \text{ t.}$$

Normal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik hesaptan bulunan kolon normal kuvvet değerleri ve yük parametresinin çarpılmasından elde edilmiştir. Bu elde edilen normal kuvvet değerleri ile hesap tekrarlanacaktır.

Ara matris işlemleri bir önceki işlemlerin aynısı olduğundan tekrar edilmeyecektir. Sadece eksenel kuvvet değerinin değişmesinden dolayı elde edilecek olan yeni normal kuvvet ve moment diyagramları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.54 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.55 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Moment Diyagramı

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için tablo tekrar hazırlanır:

Tablo 5.35 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon

Kesit No	M_p	M_3	ΔM_4	Δp_4
1	-339.032	-339.032	-	-
2	339.032	92.221	416.849	0.592
3	293.024	92.221	416.849	0.482
4	293.024	162.080	308.424	0.425
5	-293.024	-293.024	-	-
6	-339.032	-293.024	-	-
7	339.032	339.032	-	-

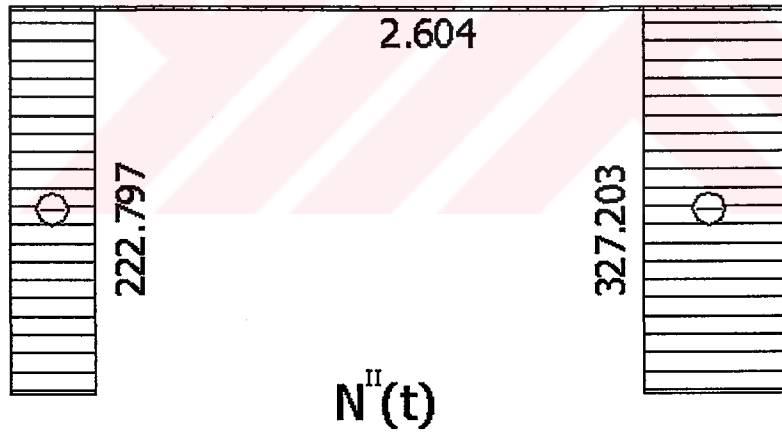
Yük parametresi değeri $\Delta p_4 = 0.425$ bulunmuştur. İlk iterasyon adımında $\Delta p_4 = 0.407$ idi. Aradaki fark ihmal edilemeyecek büyüklükte olduğundan bir iterasyon adımı daha uygulanmalıdır. Yük parametresi değeri $\Delta p_4 = 0.425$ alınarak işlemler tekrar edilecektir. $\Delta p_4 = 0.425$ olduğundan;

$$N_1^2 = 0.425 \times 225.000 = 95.625 \text{ t.}$$

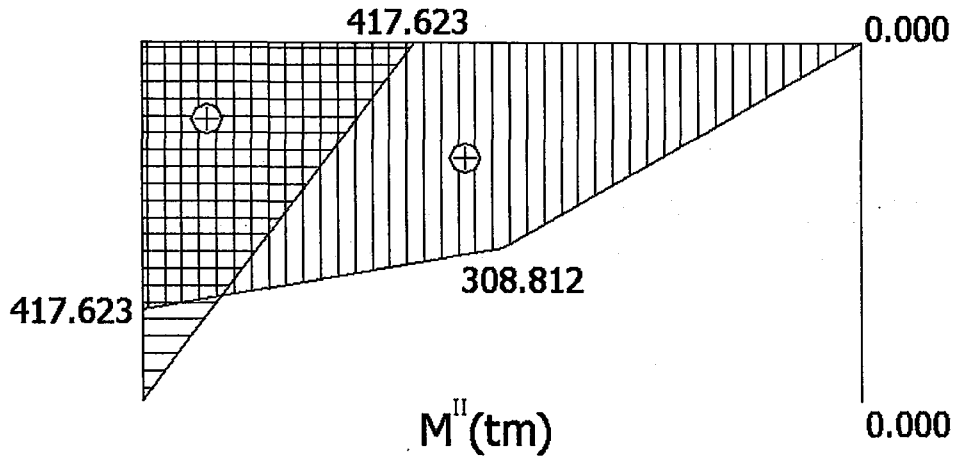
$$N_4^2 = 0.425 \times 325.000 = 138.125 \text{ t.}$$

Normal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik hesaptan bulunan kolon normal kuvvet değerleri ve yük parametresinin çarpılmasından elde edilmiştir. Bu elde edilen normal kuvvet değerleri ile hesap tekrarlanacaktır.

Ara matris işlemleri bir önceki işlemlerin aynısı olduğundan tekrar edilmeyecektir. Sadece eksenel kuvvet değerinin değişmesinden dolayı elde edilecek olan yeni normal kuvvet ve moment diyagramları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.56 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsallı Oluşmuş Çerçeve İçin Üçüncü İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.57 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Üçüncü İterasyon Moment Diyagramı

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için tablo tekrar hazırlanacak olursa;

Tablo 5.36 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Üçüncü İterasyon

Kesit No	M_p	M_3^{II}	ΔM_4^{II}	Δp_4
1	-339.032	-339.032	-	-
2	339.032	92.221	417.623	0.591
3	293.024	92.221	417.623	0.481
4	293.024	162.080	308.812	0.424
5	-293.024	-293.024	-	-
6	-339.032	-293.024	-	-
7	339.032	339.032	-	-

Yük parametresi değeri $\Delta p_4 = 0.424$ bulunmuştur. Bir önceki iterasyon adımında $\Delta p_4 = 0.425$ bulunmuştu. Aradaki fark ihmal edilebilecek büyüklükte olduğundan iterasyon sonlandırılır ve yük parametresi $\Delta p_4 = 0.424$ olarak alınır. Dördüncü yük parametresi;

$$p_4 = p_4 + \Delta p_4$$

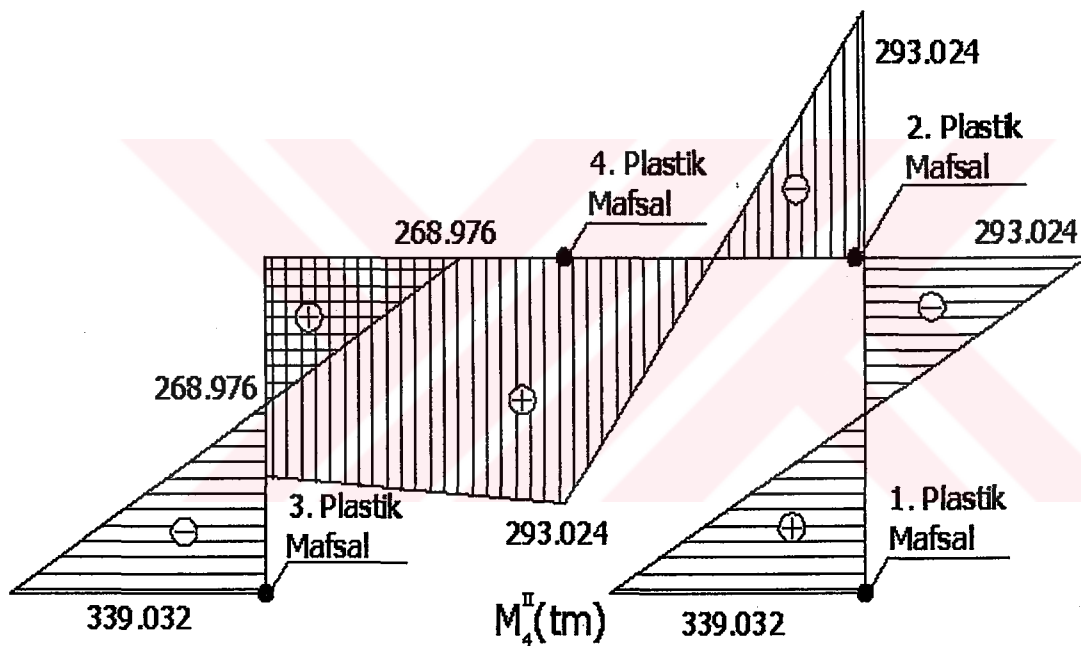
$$p_4 = 2.625 + 0.424 = 3.049 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_4 = 3.049$ kat arttırılması sonucu dördüncü plastik mafsall oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_4^{\text{II}} = \delta_4^{\text{I}} + \Delta p_4^{\text{II}} \delta_{x,1}$$

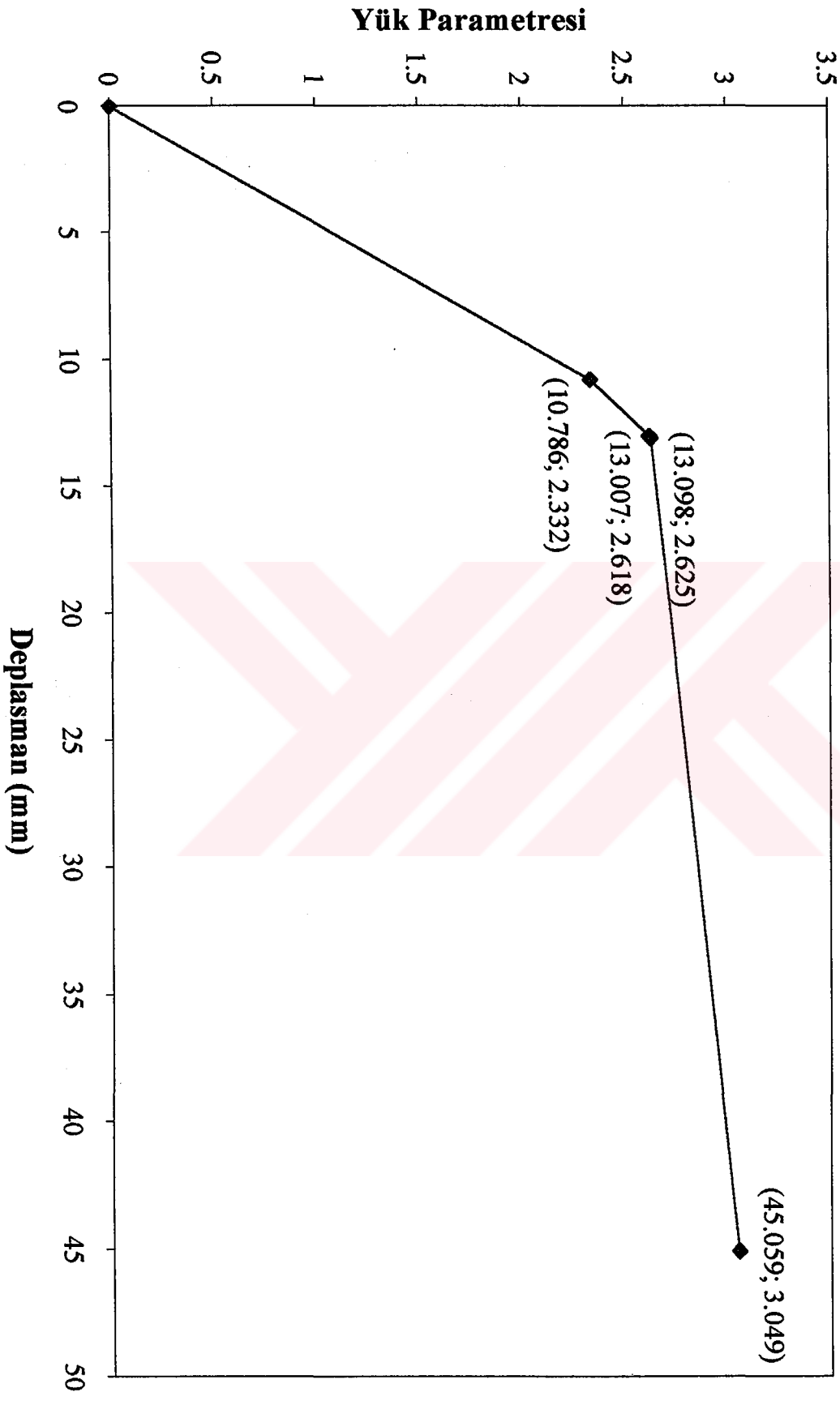
$$\delta_4^{\text{II}} = 0.013098 + 0.424 \times 0.0757379 = 0.045059 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_4 = 3.049$ olduğunda dördüncü plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.045059 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış moment değerleri Şekil 5.58'de sunulmuştur.



Şekil 5.58 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Moment Diyagramı

Kesit (4) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (4) numaralı kesite dördüncü plastik mafsall konulmuştur. Göçme halindeki değerler elde edilmiş olur.



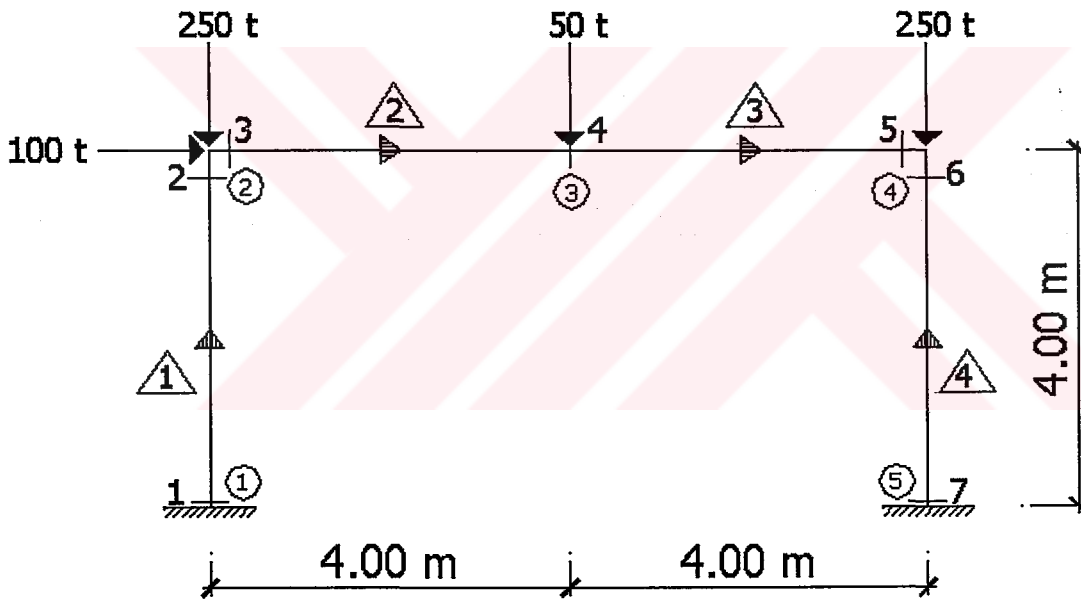
Şekil 5.59 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi

5.3.6 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$

I. mertebe lineer elastik hesap sonucunda bulunan kritik kesitler gözönüne alınarak II. mertebe elastoplastik hesap yapılacaktır.

Denge denklemleri şekildegıştırmış eksen üzerinden yazılacağından II. mertebe teorisi bu kısımda geçerlidir. Malzemenin doğrusal olmayan davranışı bu hesapta incelenecektir. Moment ve normal kuvvet etkisi altında akma davranışı $K(M,N)=0$ gözönüne alınacaktır.

Bu hesapta, bir önceki hesaptan farklı olarak normal kuvvetin akma davranışına olan etkisi de gözönüne alınacaktır.



Şekil 5.60 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İçin Çerçevenin Yükleme Durumu ve Kritik Kesitler

5.3.6.1 Birinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İlk Yük Parametresinin Belirlenmesi

II. mertebe lineer elastik hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.37 yazılır:

Tablo 5.37 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon ve Kontrol Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	ΔM_1 (tm)	ΔN_1 (t)	N/N_p	0.15	Δp_1
1	-339.032	-998.160	-117.971	-257.496	0.258	>0,15	1.806
2	339.032	-998.160	30.323	-257.496	0.258	>0,15	2.994
3	293.024	-951.696	30.323	-63.222	0.066	<0,15	6.477
4	293.024	-951.696	60.307	-63.222	0.066	<0,15	4.143
5	-293.024	-951.696	-109.708	-63.222	0.066	<0,15	2.600
6	-339.032	-998.160	-109.708	-292.504	0.293	>0,15	1.760
7	339.032	-998.160	143.374	-292.504	0.293	>0,15	1.533

Akma Şartı $K(M,N)=0$ için:

- 3, 4 ve 5 No'lu kesitlerde $N/N_p \leq 0.15$ olduğundan normal kuvvetin etkisi ihmal edilmiş ve yük parametresinin bulunmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$\Delta p = \frac{M_p}{M}$$

- 1,2,6 ve 7 No'lu kesitlerde ise $N/N_p > 0.15$ olduğundan normal kuvvetin etkisi ihmal edilmemiş ve yük parametresinin bulunmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

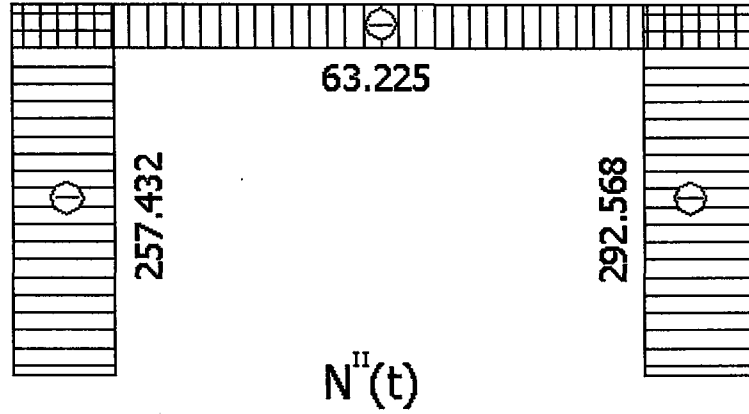
$$\Delta p = \frac{M_p N_p - N_1 M_p - 0.85 M_1 N_p}{\Delta N M_p + 0.85 \Delta M N_p}$$

İlk plastik mafsalları (7) numaralı kesitte ve $\Delta p_1 = 1.533$ yük parametresi değerinde oluşabilir. Ancak II. mertebe hesap için bu yük parametresinde kesit tesirleri değişeceğinden yük parametresi de değişecektir. Bundan dolayı ardışık yaklaşım yolu izlenecektir. Ardışık yaklaşım yolunda bir önceki yük parametresine yeter yakın derecede bir yük parametresi değeri buluncaya kadar hesaba devam edilir. Eleman uç moment değerleri II. mertebe hesaba normal kuvvetlere göre hesap edileceğinden yeni normal kuvvetlere göre II. mertebe hesap yenilenir. $\Delta p_1 = 1.533$ olduğundan;

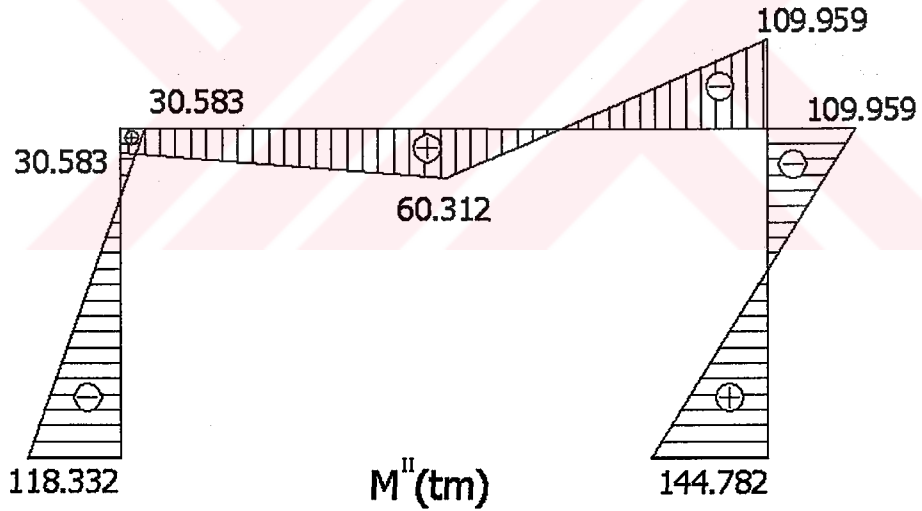
$$N_1^2 = 1.533 \times 257.496 = 394.741 \text{ t.}$$

$$N_4^2 = 1.533 \times 292.504 = 448.409 \text{ t.}$$

Normal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik hesaptan bulunan kolon normal kuvvet değerleri ve yük parametresinin çarpılmasından elde edilmiştir. Bu elde edilen normal kuvvet değerleri ile hesap tekrarlanacak olursa elde edilen normal kuvvet ve moment diyagramları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.61 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci İterasyon İçin Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.62 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci İterasyon İçin Çerçevenin Moment Diyagramı

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için tablo tekrar hazırlanır:

Tablo5.38 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon ve Kontrol Değerleri

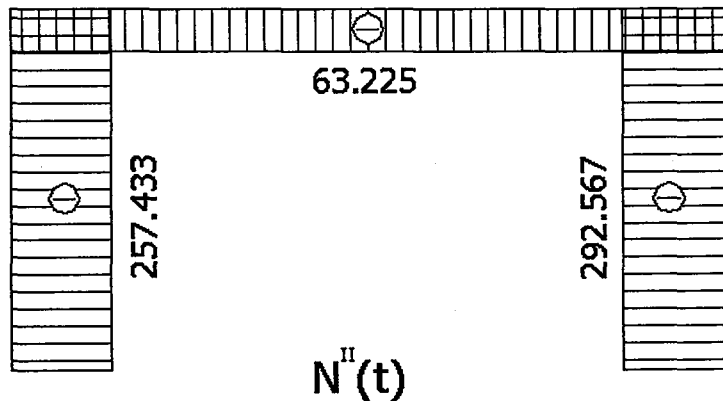
Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	ΔM_1 (tm)	ΔN_1 (t)	N/N_p	0.15	Δp_1
1	-339.032	-998.160	-118.332	-257.432	0.258	>0,15	1.803
2	339.032	-998.160	30.583	-257.432	0.258	>0,15	2.989
3	293.024	-951.696	30.583	-63.225	0.066	<0,15	6.445
4	293.024	-951.696	60.312	-63.225	0.066	<0,15	4.143
5	-293.024	-951.696	-109.959	-63.225	0.066	<0,15	2.595
6	-339.032	-998.160	-109.959	-292.568	0.293	>0,15	1.758
7	339.032	-998.160	144.782	-292.568	0.293	>0,15	1.524

Yük parametresi değeri $\Delta p_1 = 1.524$ bulunmuştur. İlk iterasyon adımı $\Delta p_1 = 1.524$ idi. Aradaki fark ihmal edilemeyecek büyüklükte olduğundan bir iterasyon adımı daha uygulanmalıdır. Yük parametresi değeri $\Delta p_1 = 1.524$ alınarak işlemler tekrar edilecektir. $\Delta p_1 = 1.524$ olduğundan;

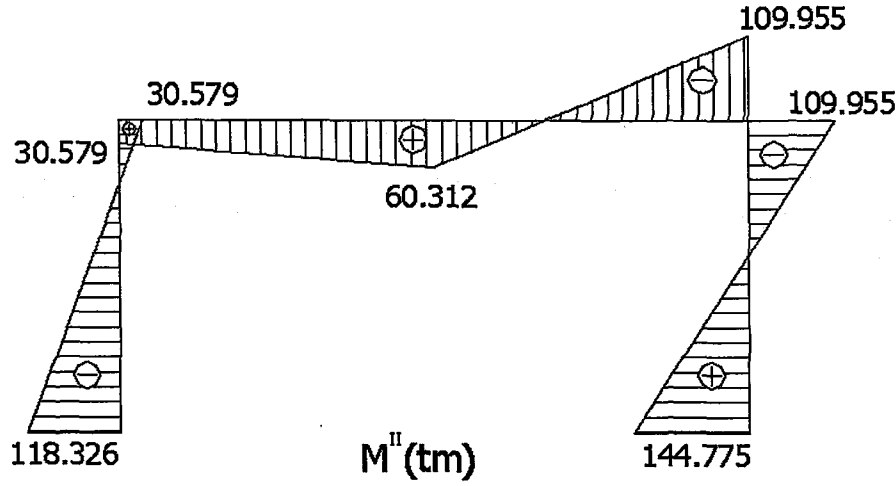
$$N_1^2 = 1.524 \times 257.496 = 392.424 \text{ t.}$$

$$N_4^2 = 1.524 \times 292.504 = 445.776 \text{ t.}$$

Normal kuvvet değerleri, II. mertebe lineer elastik hesapta bulunan kolon normal kuvvet değerleri ve bu adımdaki yük parametresinin çarpılmasından elde edilmiştir. Bu elde edilen normal kuvvet değerleri ile hesap tekrarlanacak olursa elde edilen normal kuvvet ve moment diyagramları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.63 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci İterasyon İçin Çerçevenin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.64 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ İkinci İterasyon İçin Çerçevenin Moment Diyagramı

Tablo.5.39 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Üçüncü İterasyon ve Yük Parametresi

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	ΔM_1 (tm)	ΔN_1 (t)	N/N_p	0.15	Δp_1
1	-339.032	-998.160	-118.326	-257.433	0.258	>0,15	1.803
2	339.032	-998.160	30.579	-257.433	0.258	>0,15	2.989
3	293.024	-951.696	30.579	-63.225	0.066	<0,15	6.446
4	293.024	-951.696	60.312	-63.225	0.066	<0,15	4.143
5	-293.024	-951.696	-109.955	-63.225	0.066	<0,15	2.595
6	-339.032	-998.160	-109.955	-292.567	0.293	>0,15	1.758
7	339.032	-998.160	144.775	-292.567	0.293	>0,15	1.524

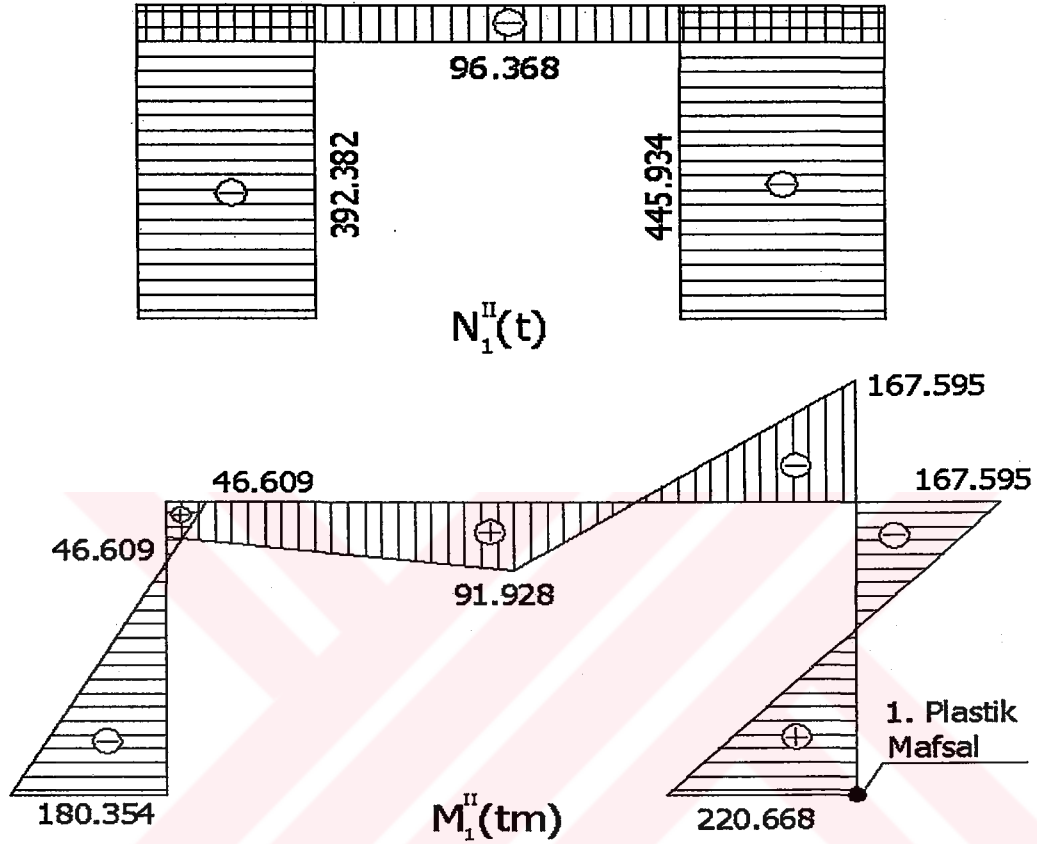
Yük parametresi değeri $\Delta p_1 = 1.524$ bulunmuştur. İkinci iterasyon adımımda $\Delta p_1 = 1.524$ bulunmuştu. Arada fark bulunmadığından dolayı iterasyon sonlandırılır ve yük parametresi $p_1 = 1.524$ olarak alınır.

Yük parametresi $p_1 = 1.524$ değerinde (7) numaralı kesitte ilk plastik mafsall oluşur. Yüklerin $p_1 = 1.524$ kat arttırılması sonucu ilk plastik mafsall oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_1'' = \Delta p_1'' \delta_{x,1}$$

$$\delta_1'' = 1.524 \times 0.004625 = 0.007013 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_1 = 1.524$ olduğunda ilk plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.007013 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.65’de sunulmuştur.



Şekil 5.65 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (7) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (7) numaralı kesite ilk plastik mafsall konulmuştur.

5.3.6.2 Birinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme değişmemektedir. Sadece kolonlardaki eksenel kuvvetlerin değişiminden dolayı hesaplar iteratif olmaktadır. İterasyona başlangıç değeri olması açısından eksenel kuvvet değerleri I. mertebe ilk plastik mafsallın oluştuğu durum için yazılacak olursa;

$$N_1 = -250.965 \text{ t.}$$

$$N_4 = -299.035 \text{ t.}$$

5.3.6.3 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 1 numaralı elemanda $N_1^1 = 250.965 \text{ t.}$ aksenal basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_1^1}{E I_1}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.002095$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.183091$ elde edilir. Bu değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.995528$ ve $m_k = 2.001119$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^u] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22384 & 44894 & 0 & -22384 & 44894 \\ 0 & 44894 & 119650 & 0 & -44894 & 59925 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22384 & -44894 & 0 & 22384 & -44894 \\ 0 & 44894 & 59925 & 0 & -44894 & 119650 \end{bmatrix}$$

Elemanın II. mertebe global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K^u][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 22384 & 0 & -44894 & -22384 & 0 & -44894 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ -44894 & 0 & 119650 & 44894 & 0 & 59925 \\ -22384 & 0 & 44894 & 22384 & 0 & 44894 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -44894 & 0 & 59925 & 44894 & 0 & 119650 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabı elemanın sol ucunda plastik mafsallı olduğu ve II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 4 numaralı elemanda $N_4^1 = 299.035$ t. eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_4^1}{EI_4}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.002496$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.199858$ elde edilir. Bu

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.994671$ ve $m_k = 2.001333$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^II] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22370 & 44889 & 0 & -22370 & 44889 \\ 0 & 44889 & 119624 & 0 & -44889 & 59932 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22370 & -44889 & 0 & 22370 & -44889 \\ 0 & 44889 & 59932 & 0 & -44889 & 119624 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsalsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{Sol,Mafsals}^{II}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5525 & 0 & 0 & -5525 & 22400 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5625 & 0 & 0 & 5525 & 22400 \\ 0 & 22400 & 0 & 0 & -22400 & 89598 \end{bmatrix}$$

II. mertebe etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsalsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K_{Sol,Mafsals}^{II}][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} 13 & 14 & 15 & 10 & 11 & 12 \\ 5625 & 0 & 0 & -5625 & 0 & -22400 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5625 & 0 & 0 & 5625 & 0 & 22400 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22400 & 0 & 0 & 22400 & 0 & 89598 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 234484 & 0 & 44894 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 \\ 44894 & 34855 & 212596 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 185892 & 0 & -34855 & 46473 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 217725 & 0 & 22400 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 0 & 240027 & -34855 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 22400 & -34855 & 182544 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 7.323 & 0.105 & -1.869 & 7.229 & -1.000 & 0.645 & 7.135 & -0.105 & -0.869 \\ 0.105 & 0.448 & -0.046 & 0.106 & 0.217 & -0.063 & 0.108 & 0.001 & -0.038 \\ -1.869 & -0.046 & 1.096 & -1.834 & 0.981 & -0.285 & -1.799 & 0.046 & 0.115 \\ 7.229 & 0.106 & -1.834 & 7.604 & -0.898 & 0.653 & 7.507 & -0.106 & -0.936 \\ -1.000 & 0.217 & 0.981 & -0.898 & 4.845 & -0.050 & -0.795 & 0.063 & -0.236 \\ 0.645 & -0.063 & -0.285 & 0.653 & -0.050 & 0.692 & 0.660 & -1.004 & 0.885 \\ 7.135 & 0.108 & -1.799 & 7.507 & -0.795 & 0.660 & 7.880 & -0.108 & 0.038 \\ -0.105 & 0.001 & 0.046 & -0.106 & 0.233 & 0.063 & -0.108 & 0.448 & 0.038 \\ -0.869 & -0.038 & 0.115 & -0.936 & -0.770 & -0.236 & -1.004 & 0.038 & 0.885 \end{bmatrix}$$

5.3.6.4 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 7.823 \quad -1.126 \quad -2.359 \quad 7.678 \quad -4.545 \quad 0.670 \quad 7.533 \quad -1.345 \quad -0.484 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.007823 \quad -0.001126 \quad -0.002359 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.007823 \quad -0.001126 \quad -0.002359 \quad 0.007678 \quad -0.004545 \quad 0.000670 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.007678 \quad -0.004545 \quad 0.000670 \quad 0.007533 \quad -0.001345 \quad -0.000484 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.007553 \quad -0.001345 \quad -0.000484 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -69.215 \quad 250.705 \quad 209.856 \quad 69.215 \quad -250.705 \quad 68.967 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 30.785 \quad 0.705 \quad -68.967 \quad -30.785 \quad -0.705 \quad 71.787 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 30.785 \quad -49.295 \quad -71.787 \quad -30.785 \quad 49.295 \quad -125.393 \rangle$$

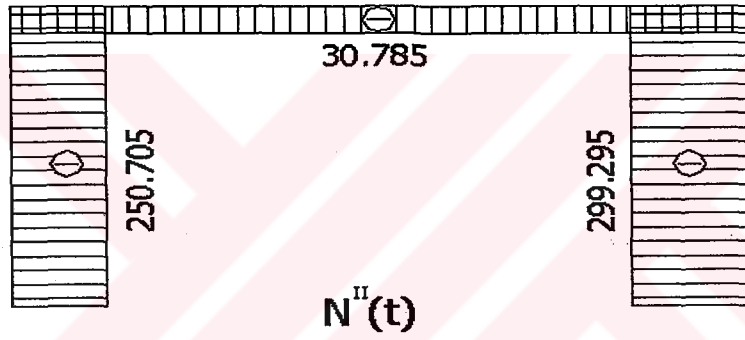
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle -30.785 \quad 299.295 \quad 0.000 \quad 30.785 \quad -299.295 \quad 125.393 \rangle$$

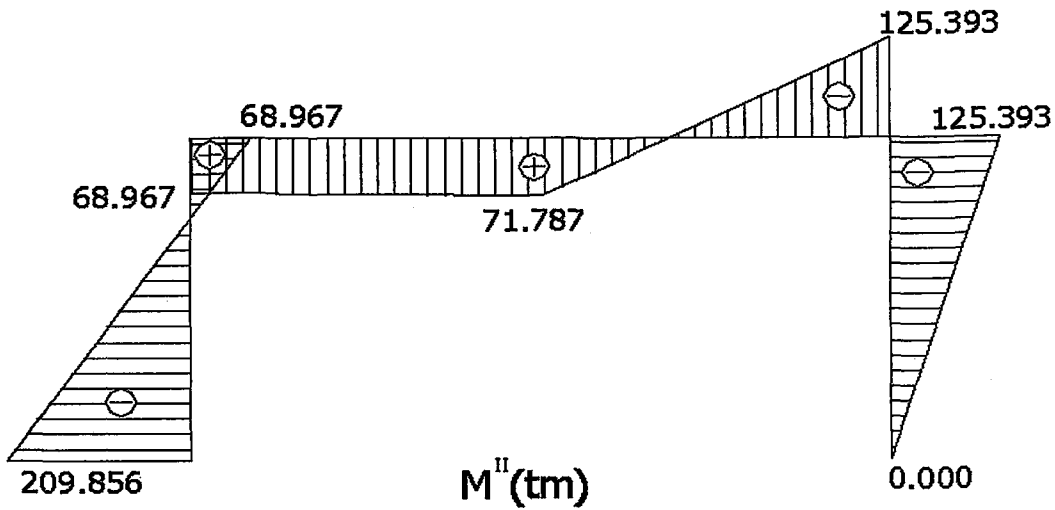
Tablo 5.40 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_j(t)$	250.705	30.785	30.785	299.295
$T_j(t)$	-69.215	0.705	-49.295	-30.785
$M_j(tm)$	209.856	-68.967	-71.787	0.000
$N_k(t)$	-250.705	-30.785	-30.785	-299.295
$T_k(t)$	69.215	-0.705	49.295	30.785
$M_k(tm)$	68.967	71.787	-125.393	125.393

5.3.6.5 Birinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.66 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.67 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Moment Diyagramı

5.3.6.6 İkinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İkinci Yük Parametresinin Belirlenmesi

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için Tablo 5.41 hazırlanır:

Tablo 5.41 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_1 (tm)	N_1 (t)	ΔM_2 (tm)	ΔN_2 (t)
1	-339.032	-998.160	-180.354	-392.382	-209.856	-250.705
2	339.032	-998.160	46.609	-392.382	68.967	-250.705
3	293.024	-951.696	46.609	-96.368	68.967	-30.785
4	293.024	-951.696	91.928	-96.368	71.787	-30.785
5	-293.024	-951.696	-167.595	-96.368	-125.393	-30.785
6	-339.032	-998.160	-167.595	-445.934	-125.393	-299.295
7	339.032	-998.160	220.668	-445.934	0.000	-299.295

Tablo 5.42 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{2,D}$	$N_{2,D}$	$N_{2,D}/N_p$	0.15	Δp_2	N_2	N/N_p	0.15	Δp_2
1	0.756	-581.948	0.583	>0,15	0.199	-442.285	0.443	>0,15	0.199
2	4.240	-581.948	0.583	>0,15	1.156	-442.285	0.443	>0,15	1.156
3	3.573	-119.646	0.126	<0,15	3.573	-102.496	0.108	<0,15	3.573
4	2.801	-119.646	0.126	<0,15	2.801	-102.496	0.108	<0,15	2.801
5	1.000	-119.646	0.126	<0,15	1.000	-102.496	0.108	<0,15	1.000
6	1.367	-672.239	0.673	>0,15	0.217	-505.509	0.506	>0,15	0.217
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi değeri ilk iterasyonda $\Delta p_2 = 0.199$ bulunmuştur. Ardışık yaklaşım yolunda bir önceki yük parametresine yeter yakın derecede bir yük parametresi değeri buluncaya kadar hesaba devam edilmelidir.

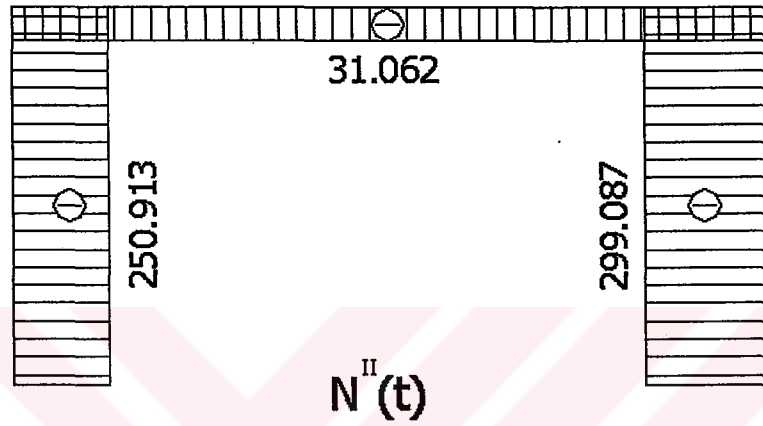
Eleman uç moment değerleri II. mertebe hesapta normal kuvvetlere göre hesap edileceğinden yeni normal kuvvetlere göre II. mertebe hesap yenilenir. $\Delta p_2 = 0.199$ olduğundan;

$$N_1^2 = 0.199 \times 250.965 = 49.942 \text{ t.}$$

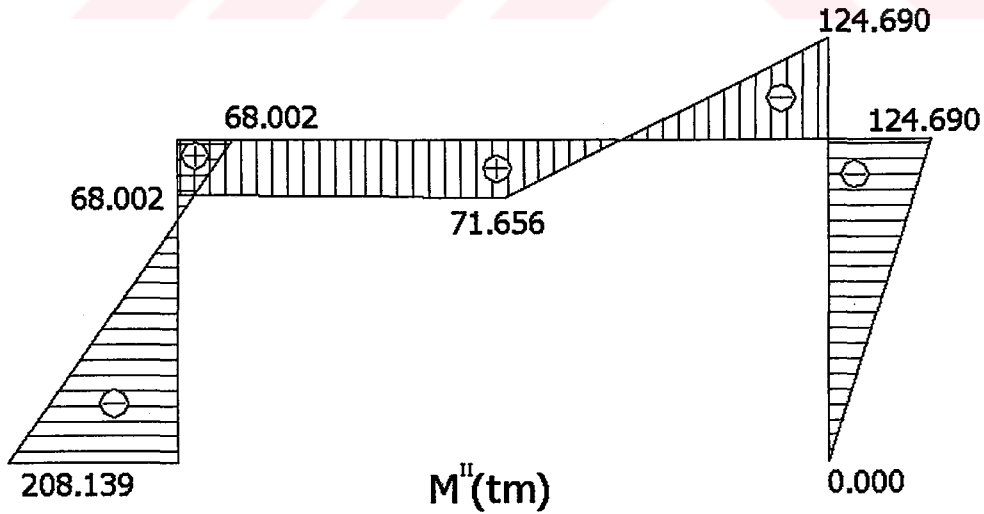
$$N_4^2 = 0.199 \times 299.035 = 59.508 \text{ t.}$$

Normal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik hesaptan bulunan kolon normal kuvvet değerleri ve yük parametresinin çarpılmasından elde edilmiştir. Bu elde edilen normal kuvvet değerleri ile hesap tekrarlanacaktır.

Ara matris işlemleri bir önceki işlemlerin aynısı olduğundan tekrar edilmeyecektir. Sadece eksenel kuvvet değerinin değişmesinden dolayı elde edilecek olan yeni normal kuvvet ve moment diyagramları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.68 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.69 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Moment Diyagramı

Tablo 5.43 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_1 (tm)	N_1 (t)	ΔM_2 (tm)	ΔN_2 (t)
1	-339.032	-998.160	-180.354	-392.382	-208.139	-250.913
2	339.032	-998.160	46.609	-392.382	68.002	-250.913
3	293.024	-951.696	46.609	-96.368	68.002	-31.062
4	293.024	-951.696	91.928	-96.368	71.656	-31.062
5	-293.024	-951.696	-167.595	-96.368	-124.690	-31.062
6	-339.032	-998.160	-167.595	-445.934	-124.690	-299.087
7	339.032	-998.160	220.668	-445.934	0.000	-299.087

Tablo 5.44 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{2,D}$	$N_{2,D}$	$N_{2,D}/N_p$	0.15	Δp_2	N_2	N/N_p	0.15	Δp_2
1	0.762	-583.511	0.585	>0,15	0.200	-442.563	0.443	>0,15	0.200
2	4.300	-583.511	0.585	>0,15	1.162	-442.563	0.443	>0,15	1.162
3	3.624	-119.838	0.126	<0,15	3.624	-102.530	0.108	<0,15	3.624
4	2.806	-119.838	0.126	<0,15	2.806	-102.530	0.108	<0,15	2.806
5	1.006	-119.838	0.126	<0,15	1.006	-102.530	0.108	<0,15	1.006
6	1.375	-674.106	0.675	>0,15	0.217	-505.840	0.507	>0,15	0.217
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi değeri $\Delta p_2 = 0.200$ bulunmuştur. Birinci iterasyon adımında $\Delta p_2 = 0.199$ bulunmuştu. Aradaki fark ihmal edilebilecek büyüklükte olduğundan iterasyon sonlandırılır ve yük parametresi $\Delta p_2 = 0.200$ olarak alınır. İkinci yük parametresi;

$$p_2 = p_1 + \Delta p_2$$

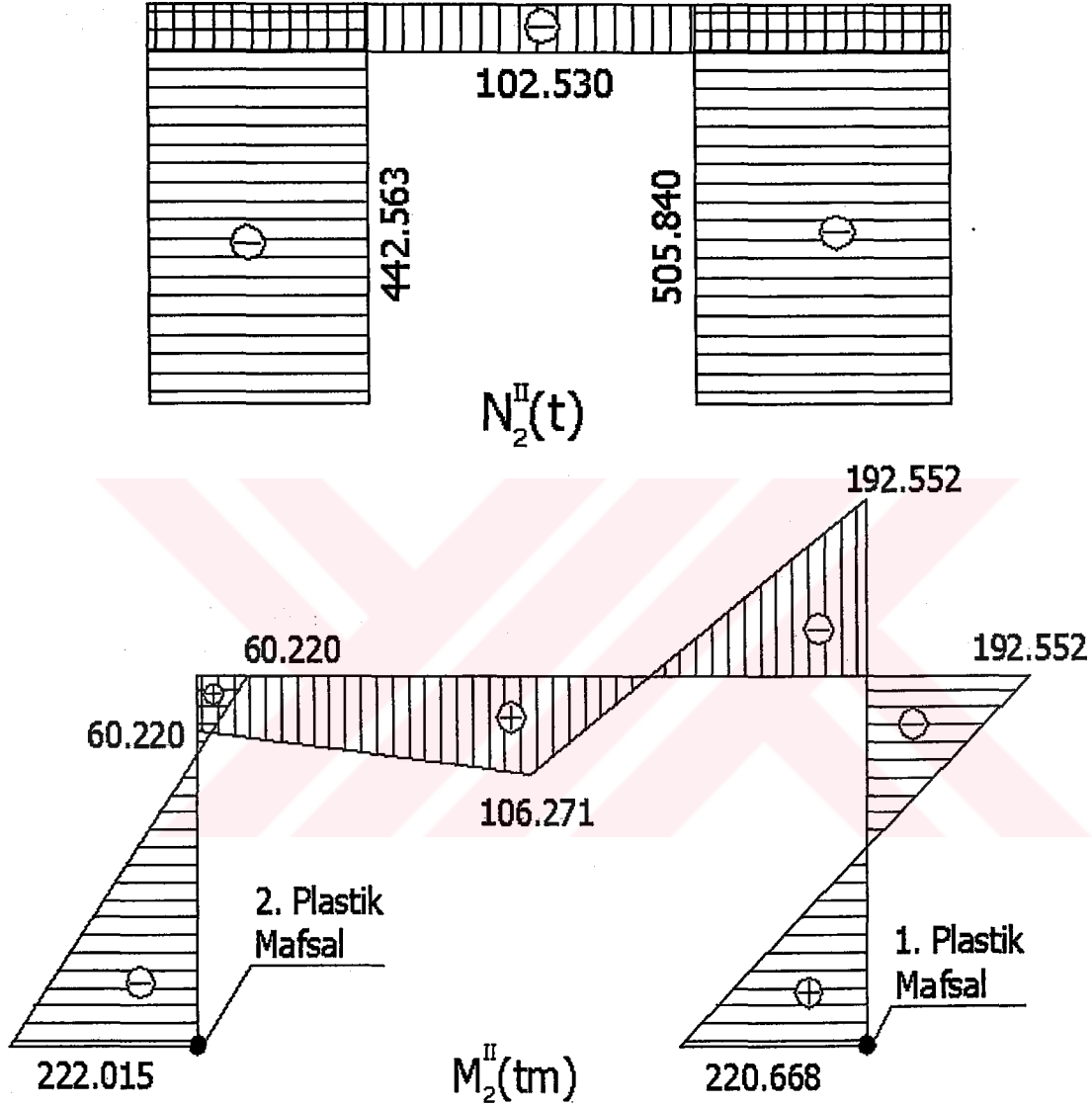
$$p_2 = 1.524 + 0.200 = 1.724 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_2 = 1.724$ kat artırılması sonucu ikinci plastik mafsallı oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_2^{\text{II}} = \delta_1^{\text{II}} + \Delta p_2^{\text{II}} \delta_{x,1}$$

$$\delta_2^{\text{II}} = 0.007013 + 0.200 \times 0.007756 = 0.008564 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_2 = 1.724$ olduğunda ikinci plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.008564 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.70'de sunulmuştur.



Şekil 5.70 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (1) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (1) numaralı kesite ikinci plastik mafsall konulmuştur.

5.3.6.7 İkinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme değişmemektedir. Sadece kolonlardaki eksenel kuvvetlerin değişiminden dolayı hesaplar iteratif olmaktadır. İterasyona başlangıç değeri olması açısından eksenel kuvvet değerleri I. mertebe ikinci plastik mafsalın oluştuğu durum için yazılacak olursa;

$$N_1 = -225.000 \text{ t.}$$

$$N_4 = -325.000 \text{ t.}$$

5.3.6.8 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 1 numaralı elemanda $N_1^1 = 225.000 \text{ t.}$ eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_1^1}{E I_1}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.001878$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.173361$ elde edilir. Bu

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.995991$ ve $m_k = 2.001003$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^u] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22392 & 44896 & 0 & -22392 & 44896 \\ 0 & 44896 & 119664 & 0 & -44896 & 59922 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22392 & -44896 & 0 & 22392 & -44896 \\ 0 & 44896 & 59922 & 0 & -44896 & 119664 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{Sol,Mafsal}^{II}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5547 & 0 & 0 & -5547 & 22414 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5547 & 0 & 0 & 5547 & 22414 \\ 0 & 22414 & 0 & 0 & -22414 & 89658 \end{bmatrix}$$

II. mertebe etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsalsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_i][K_{Sol,Mafsal}^{II}][\alpha_i]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 5547 & 0 & 0 & -5547 & 0 & -22414 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5547 & 0 & 0 & 5547 & 0 & 22414 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22414 & 0 & 0 & 22414 & 0 & 89658 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

I. mertebe analiz sonucunda 4 numaralı elemanda $N_4^1 = 325.000$ t. eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_4^1}{EI_4}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.002713$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.208354$ elde edilir. Bu

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.994209$ ve $m_k = 2.001449$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22362 & 44886 & 0 & -22362 & 44886 \\ 0 & 44886 & 119611 & 0 & -44886 & 59935 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22362 & -44886 & 0 & 22362 & -44886 \\ 0 & 44886 & 59935 & 0 & -44886 & 119611 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsallı bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsal}}^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5517 & 0 & 0 & -5517 & 22394 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5517 & 0 & 0 & 5517 & 22394 \\ 0 & 22394 & 0 & 0 & -22394 & 89578 \end{bmatrix}$$

II. mertebe etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsallı bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K_{\text{Sol,Mafsai}}^{\text{II}}][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} 5517 & 0 & 0 & -5517 & 0 & -22394 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5517 & 0 & 0 & 5517 & 0 & 22394 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22394 & 0 & 0 & 22394 & 0 & 89587 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 217647 & 0 & 22414 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 \\ 22414 & 34855 & 182604 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 185892 & 0 & -34855 & 46473 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 217617 & 0 & 22394 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 0 & 240027 & -34855 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 22394 & -34855 & 182524 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 22394 & -34855 & 182524 \end{bmatrix}$$

$$[K_o^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 21.462 & 0.231 & -3.058 & 21.228 & -0.094 & 1.419 & 20.995 & -0.231 & -2.963 \\ 0.231 & 0.449 & -0.057 & 0.231 & 0.225 & -0.056 & 0.231 & 0.000 & -0.057 \\ -3.058 & -0.057 & 1.196 & -3.011 & 0.905 & -0.350 & -2.965 & 0.057 & 0.291 \\ 21.228 & 0.231 & -3.011 & 21.466 & -0.001 & 1.419 & 21.231 & -0.231 & -3.010 \\ -0.094 & 0.225 & 0.905 & -0.001 & 4.903 & 0.00 & 0.092 & 0.225 & -0.350 \\ 1.419 & -0.056 & -0.350 & 1.419 & 0.000 & 0.734 & 1.419 & 0.056 & -0.350 \\ 20.995 & 0.231 & -2.965 & 21.231 & 0.092 & 1.419 & 21.467 & -0.231 & -3.057 \\ -0.231 & 0.000 & 0.057 & -0.231 & 0.225 & 0.056 & -0.231 & 0.449 & 0.057 \\ -2.963 & -0.057 & 0.291 & -3.010 & -0.905 & -0.350 & -3.057 & 0.057 & 1.196 \end{bmatrix}$$

5.3.6.9 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 21.509 \quad -1.004 \quad -3.510 \quad 21.229 \quad -3.669 \quad 1.419 \quad 20.949 \quad -1.467 \quad -2.511 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.021509 \quad -0.001004 \quad -0.003510 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.021509 \quad -0.001004 \quad -0.003510 \quad 0.021229 \quad -0.003669 \quad 0.0001419 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.021229 \quad -0.003669 \quad 0.001419 \quad 0.020949 \quad -0.001467 \quad -0.002511 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.020949 \quad -0.001467 \quad -0.002511 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -40.647 \quad 223.544 \quad 0.000 \quad 40.647 \quad -223.544 \quad 167.429 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 59.353 \quad -26.456 \quad -167.429 \quad 59.353 \quad 26.456 \quad 61.605 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 59.353 \quad -76.456 \quad -61.605 \quad -59.353 \quad 76.456 \quad -244.219 \rangle$$

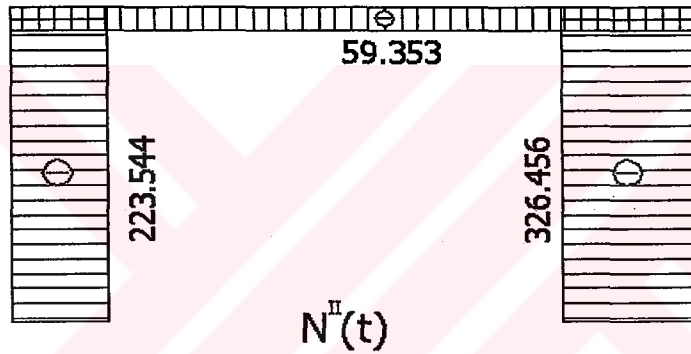
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle 59.353 \quad 326.456 \quad 0.000 \quad 59.353 \quad -326.456 \quad 244.219 \rangle$$

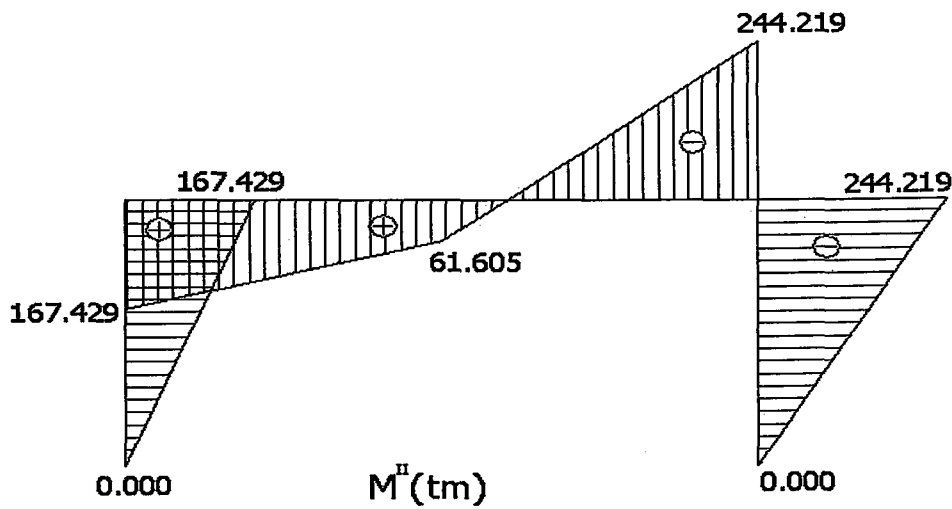
Tablo 5.45 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_i(t)$	223.544	59.353	59.353	326.456
$T_i(t)$	-40.647	-26.456	-76.456	-59.353
$M_i(tm)$	0.000	-161.429	-61.605	0.000
$N_k(t)$	-223.544	-59.353	-59.353	-326.456
$T_k(t)$	40.647	26.456	76.456	59.353
$M_k(tm)$	167.429	61.605	-244.219	244.219

5.3.6.10 İkinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.71 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.72 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Moment Diyagramı

5.3.6.11 Üçüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Üçüncü Yük Parametresinin Belirlenmesi

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için tablo tekrar hazırlanır:

Tablo 5.46 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_2 (tm)	N_2 (t)	ΔM_3 (tm)	ΔN_3 (t)
1	-339.032	-998.160	-222.015	-442.563	0.000	-223.544
2	339.032	-998.160	60.220	-442.563	167.429	-223.544
3	293.024	-951.696	60.220	-102.530	167.429	-59.353
4	293.024	-951.696	106.271	-102.530	61.605	-59.353
5	-293.024	-951.696	-192.552	-102.530	-244.219	-59.353
6	-339.032	-998.160	-192.552	-505.840	-244.219	-326.456
7	339.032	-998.160	220.668	-505.840	0.000	-326.456

Tablo 5.47 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{3,D}$	$N_{3,D}$	$N_{3,D}/N_p$	0.15	Δp_3	N_3	N/N_p	0.15	Δp_3
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1.665	-534.529	0.536	>0,15	0.630	-445.055	0.446	>0,15	0.630
3	1.390	-126.948	0.133	<0,15	1.390	-103.192	0.108	<0,15	1.390
4	3.031	-126.948	0.133	<0,15	3.031	-103.192	0.108	<0,15	3.031
5	0.411	-126.948	0.133	<0,15	0.411	-103.192	0.108	<0,15	0.411
6	0.600	-640.144	0.641	>0,15	0.011	-509.480	0.510	>0,15	0.011
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi değeri ilk iterasyonda $\Delta p_3 = 0.011$ bulunmuştur. Ardışık yaklaşım yolunda bir önceki yük parametresine yeter yakın derecede bir yük parametresi değeri buluncaya kadar hesaba devam edilmelidir.

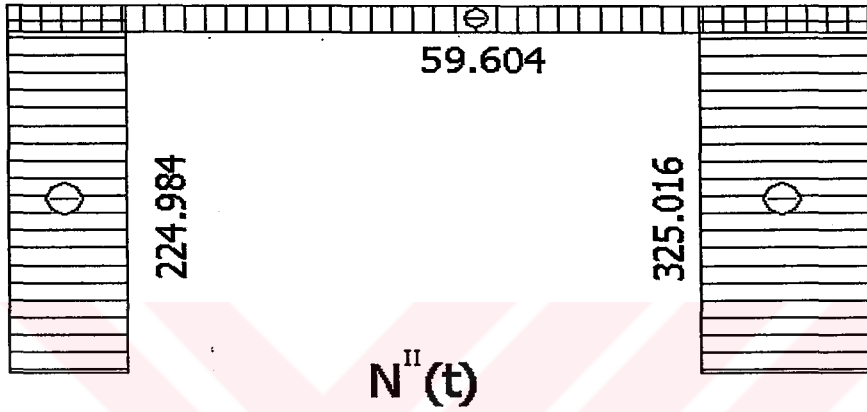
Eleman uç moment değerleri II. mertebe hesapta normal kuvvetlere göre hesap edileceğinden yeni normal kuvvetlere göre II. mertebe hesap yenilenir. $\Delta p_3 = 0.0011$ olduğundan;

$$N_1^2 = 0.011 \times 225.000 = 2.475 \text{ t.}$$

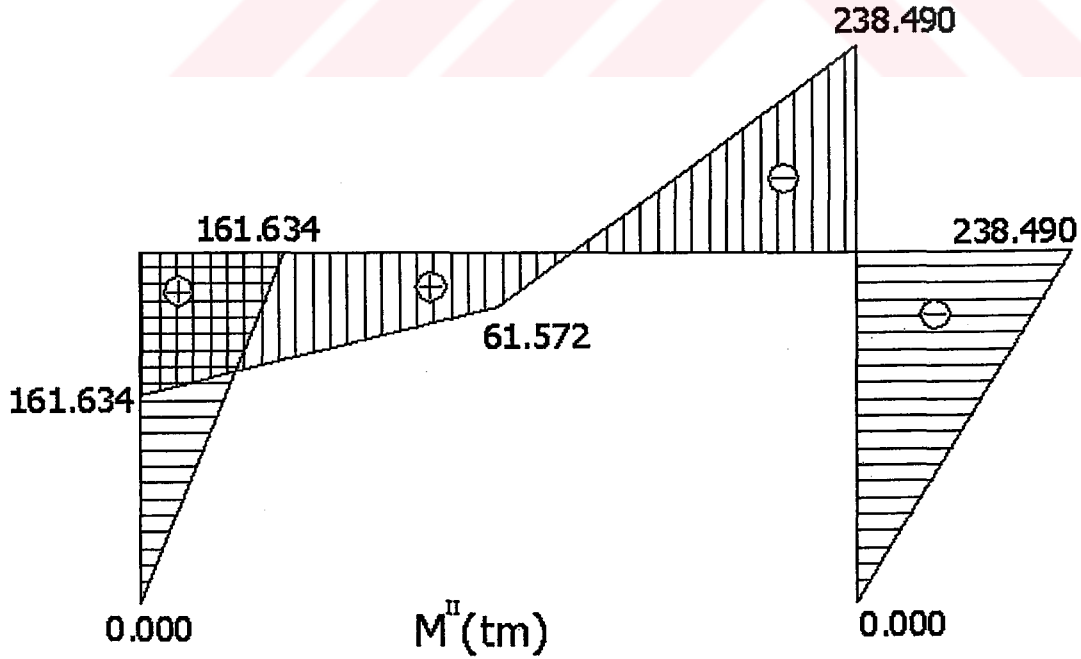
$$N_4^2 = 0.011 \times 325.000 = 3.575 \text{ t.}$$

Normal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik hesaptan bulunan kolon normal kuvvet değerleri ve yük parametresinin çarpılmasından elde edilmiştir. Bu elde edilen normal kuvvet değerleri ile hesap tekrarlanacaktır.

Ara matris işlemleri bir önceki işlemlerin aynısı olduğundan tekrar edilmeyecektir. Sadece eksenel kuvvet değerinin değişmesinden dolayı elde edilecek olan yeni normal kuvvet ve moment diyagramları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.73 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.74 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Moment Diyagramı

Tablo 5.48 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_2 (tm)	N_2 (t)	ΔM_3 (tm)	ΔN_3 (t)
1	-339.032	-998.160	-222.015	-442.563	0.000	-224.984
2	339.032	-998.160	60.220	-442.563	161.634	-224.984
3	293.024	-951.696	60.220	-102.530	161.634	-59.604
4	293.024	-951.696	106.271	-102.530	61.572	-59.604
5	-293.024	-951.696	-192.552	-102.530	-238.490	-59.604
6	-339.032	-998.160	-192.552	-505.840	-238.490	-325.016
7	339.032	-998.160	220.668	-505.840	0.000	-325.016

Tablo 5.49 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{3,D}$	$N_{3,D}$	$N_{3,D}/N_p$	0.15	Δp_3	N_3	N/N_p	0.15	Δp_3
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1.725	-537.345	0.538	>0,15	0.643	-445.114	0.446	>0,15	0.643
3	1.440	-127.640	0.134	<0,15	1.440	-103.206	0.108	<0,15	1.440
4	3.033	-127.640	0.134	<0,15	3.033	-103.206	0.108	<0,15	3.033
5	0.421	-127.640	0.134	<0,15	0.421	-103.206	0.108	<0,15	0.421
6	0.614	-642.764	0.644	>0,15	0.011	-509.526	0.510	>0,15	0.011
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi değeri $\Delta p_3 = 0.011$ bulunmuştur. Birinci iterasyon adımında $\Delta p_3 = 0.011$ bulunmuştu. Arada fark olmadığından dolayı iterasyon sonlandırılır ve yük parametresi $\Delta p_3 = 0.011$ olarak alınır. İkinci yük parametresi;

$$p_3 = p_2 + \Delta p_3$$

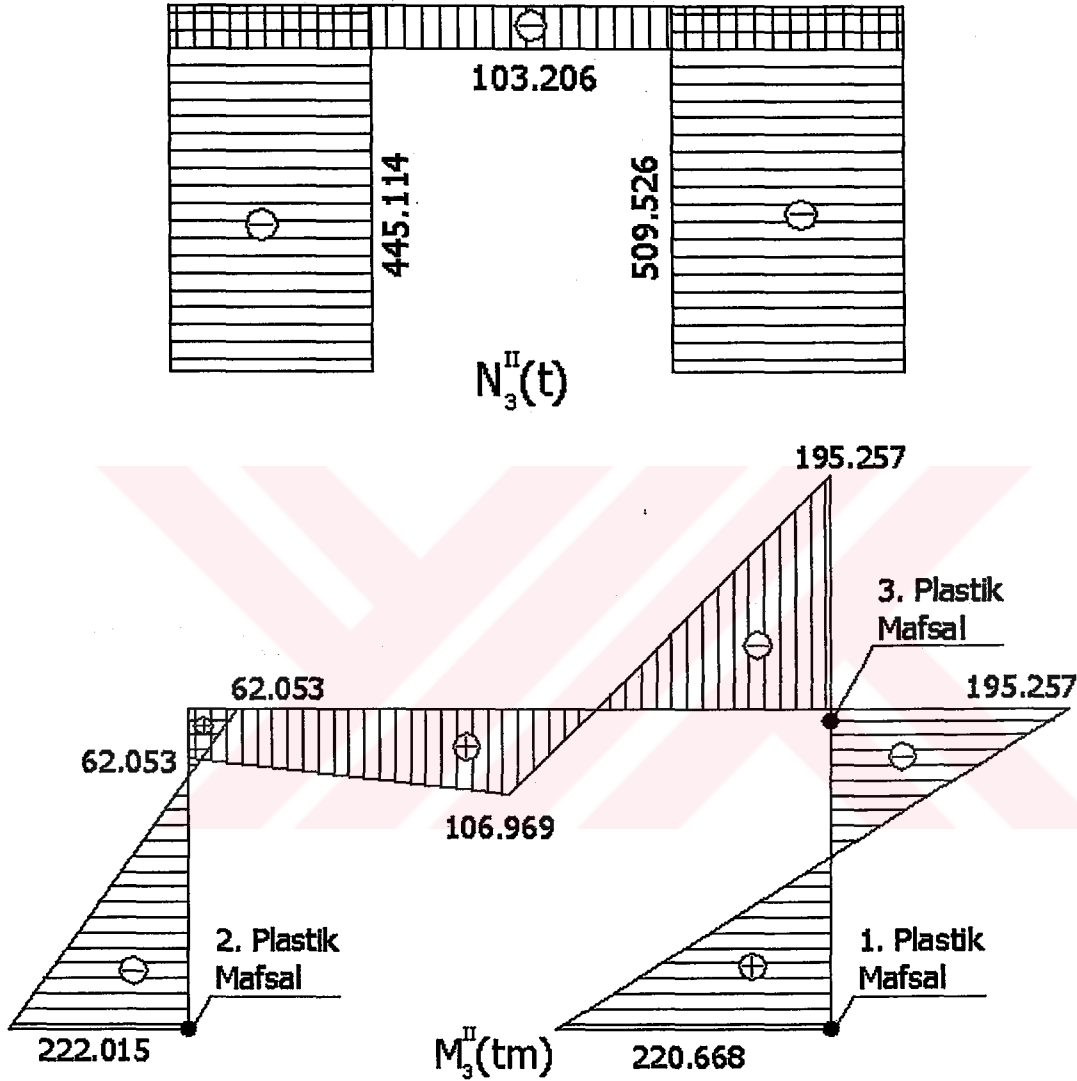
$$p_3 = 1.724 + 0.011 = 1.736 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_3 = 1.736$ kat artırılması sonucu üçüncü plastik mafsall oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_3^{\text{II}} = \delta_2^{\text{II}} + \Delta p_3^{\text{II}} \delta_{x,1}$$

$$\delta_3^{\text{II}} = 0.08564 + 0.011 \times 0.020893 = 0.008794 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_3 = 1.736$ olduğunda üçüncü plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.008794 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.75'de sunulmuştur.



Şekil 5.75 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (6) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (6) numaralı kesite üçüncü plastik mafsall konulmuştur.

5.3.6.12 Üçüncü Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme değişmemektedir. Sadece kolonlardaki eksenel kuvvetlerin değişiminden dolayı hesaplar iteratif olmaktadır. İterasyona başlangıç değeri olması açısından eksenel kuvvet değerleri I. mertebe üçüncü plastik mafsalın olduğu durum için yazılacak olursa;

$$N_1 = -225.000 \text{ t.}$$

$$N_4 = -325.000 \text{ t.}$$

5.3.6.13 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

I. mertebe analiz sonucunda 1 numaralı elemanda $N_1^1 = 225.000 \text{ t.}$ eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_4^1}{EI_4}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.001878$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.173361$ elde edilir. Bu

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.995991$ ve $m_k = 2.001003$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^{II}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22392 & 44896 & 0 & -22392 & 44896 \\ 0 & 44896 & 119664 & 0 & -44896 & 59922 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22392 & -44896 & 0 & 22392 & -44896 \\ 0 & 44896 & 59922 & 0 & -44896 & 119664 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{Sol,Mafsal}^{II}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5547 & 0 & 0 & -5547 & 22414 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5547 & 0 & 0 & 55347 & 22414 \\ 0 & 22414 & 0 & 0 & -22414 & 89658 \end{bmatrix}$$

II. mertebe etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsals bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K_{Sol,Mafsal}^{II}][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 5547 & 0 & 0 & -5547 & 0 & -22414 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5547 & 0 & 0 & 5547 & 0 & 22414 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22414 & 0 & 0 & 22414 & 0 & 89658 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

I. mertebe analiz sonucunda 4 numaralı elemanda $N_4^I = 325.000$ t. eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_4^I}{EI_4}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.002713$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.208354$ elde edilir. Bu değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.994209$ ve $m_k = 2.001449$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^II] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22362 & 44886 & 0 & -22362 & 44886 \\ 0 & 44886 & 119611 & 0 & -44886 & 59935 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22362 & -44886 & 0 & 22362 & -44886 \\ 0 & 44886 & 59935 & 0 & -44886 & 119611 \end{bmatrix}$$

Her iki ucunda da mafsallı bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{İkiUcu} \setminus \text{Mafsallı}}^{II}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

II. mertebe etkileri gözönüne alınan ve iki ucunda mafsallı bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K_{\text{iki Ucu,Mafsal}}^{\text{II}}][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$[K_4] = \begin{array}{ccccc} & \begin{matrix} 13 & 14 & 15 & 10 & 11 & 12 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad -250 \quad 0 \quad 0 \quad -50 \quad 0 \quad 0 \quad -250 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 217647 & 0 & 22414 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 22414 & 34855 & 182604 & 0 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & 0 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 185892 & 0 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 0 & 240027 & -34855 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 66.363 & 0.233 & -11.963 & 66.363 & -17.857 & 1.430 & 66.363 & -0.233 & 5.894 & 4 & 4 \\ 0.233 & 0.449 & -0.058 & 0.233 & 0.222 & -0.056 & 0.233 & 0.000 & -0.055 & 5 & 5 \\ -11.963 & -0.058 & 2.961 & -11.963 & 4.419 & -0.354 & -11.963 & 0.058 & -1.459 & 6 & 6 \\ 66.363 & 0.233 & -11.963 & 66.835 & -17.857 & 1.430 & 66.835 & -0.233 & 5.894 & 7 & 7 \\ -17.857 & 0.222 & 4.419 & -17.963 & 11.874 & -0.014 & -17.857 & 0.227 & -4.361 & 8 & 8 \\ 1.430 & -0.056 & -0.354 & 1.430 & -0.014 & 0.732 & 1.430 & 0.056 & -0.340 & 9 & 9 \\ 66.363 & 0.233 & -11.963 & 66.835 & -17.857 & 1.430 & 67.306 & -0.233 & 5.894 & 10 & 10 \\ -0.233 & 0.000 & 0.058 & -0.233 & 0.227 & 0.056 & -0.233 & 0.449 & 0.055 & 11 & 11 \\ 5.894 & -0.055 & 1.459 & 5.894 & 4.361 & -0.340 & 5.894 & 0.055 & 2.902 & 12 & 12 \end{bmatrix}$$

5.3.6.14 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 75.292 \ -1.001 \ -14.173 \ 75.292 \ -24.917 \ 1.437 \ 75.292 \ -1.470 \ -8.074 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \ 0 \ 0 \ 0.075292 \ -0.001001 \ -0.014173 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.075292 \ -0.001001 \ -0.014173 \ 0.075292 \ -0.024917 \ 0.001437 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.075292 \ -0.024917 \ 0.001437 \ 0.075292 \ -0.001470 \ -0.008074 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \ 0 \ 0 \ 0.075292 \ -0.001470 \ -0.008074 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -100.000 \ 222.882 \ 0.000 \ 100.000 \ -222.882 \ 416.941 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 0.000 \ -27.118 \ -416.941 \ 0.000 \ 27.118 \ 308.470 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 0.000 \ -77.118 \ -308.470 \ 0.000 \ 77.118 \ 0.000 \rangle$$

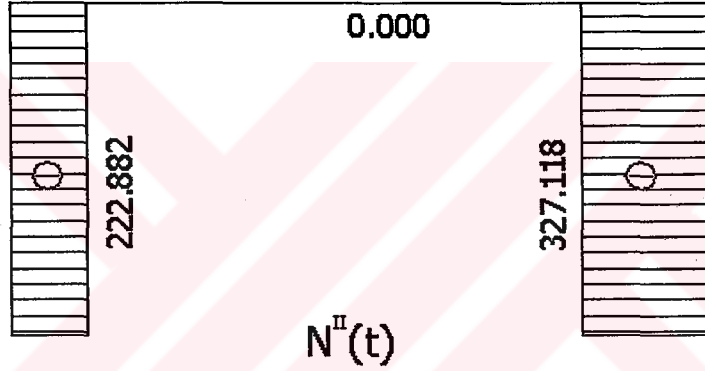
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle 0.000 \ 327.118 \ 0.000 \ 0.000 \ -327.118 \ 0.000 \rangle$$

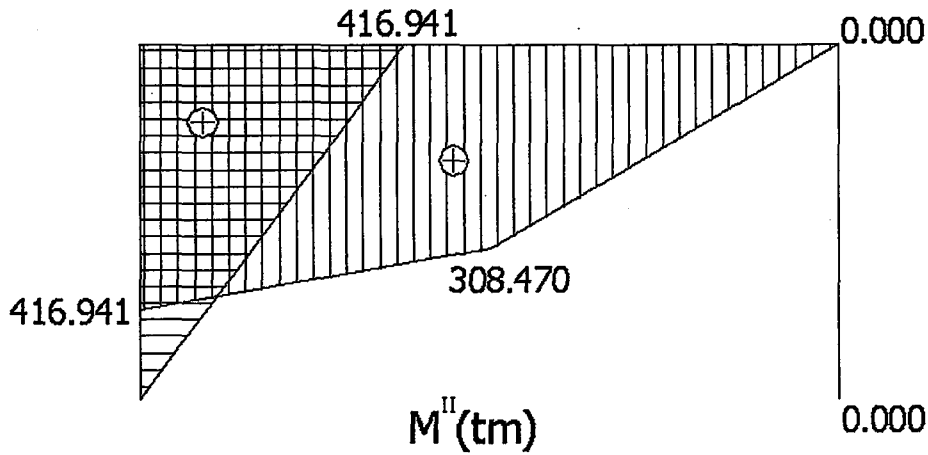
Tablo 5.50 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_j(t)$	222.882	0.000	0.000	327.118
$T_j(t)$	-100.000	-27.118	-77.118	0.000
$M_j(tm)$	0.000	-416.941	-308.470	0.000
$N_k(t)$	-222.882	0.000	0.000	-327.118
$T_k(t)$	100.000	27.118	77.118	0.000
$M_k(tm)$	416.941	308.470	0.000	0.000

5.3.6.15 Üçüncü Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.76 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.77 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Birinci İterasyon Moment Diyagramı

5.3.6.16 Dördüncü Plastik Mafsalsın Yerinin ve Dördüncü Yük Parametresinin (Göçme Parametresinin) Belirlenmesi

II. mertebe hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.51 hazırlanır:

Tablo 5.51 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_3 (tm)	N_3 (t)	ΔM_4 (tm)	ΔN_4 (t)
1	-339.032	-998.160	-222.015	-445.114	0.000	-222.882
2	339.032	-998.160	62.053	-445.114	416.941	-222.882
3	293.024	-951.696	62.053	-103.206	416.941	0.000
4	293.024	-951.696	106.969	-103.206	308.470	0.000
5	-293.024	-951.696	-195.257	-103.206	0.000	0.000
6	-339.032	-998.160	-195.257	-509.526	0.000	-327.118
7	339.032	-998.160	220.668	-509.526	0.000	-327.118

Tablo 5.52 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Birinci İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{4,D}$	$N_{4,D}$	$N_{4,D}/N_p$	0.15	Δp_4	N_4	N/N_p	0.15	Δp_4
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.664	-568.583	0.570	>0,15	0.314	-515.124	0.516	>0,15	0.314
3	<u>0.554</u>	-103.206	0.108	<0,15	0.554	-103.206	0.108	<0,15	0.554
4	0.603	-103.206	0.108	<0,15	0.603	-103.206	0.108	<0,15	0.603
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi değeri ilk iterasyonda $\Delta p_4 = 0.314$ bulunmuştur. Ardışık yaklaşım yolunda bir önceki yük parametresine yeter yakın derecede bir yük parametresi değeri buluncaya kadar hesaba devam edilmelidir.

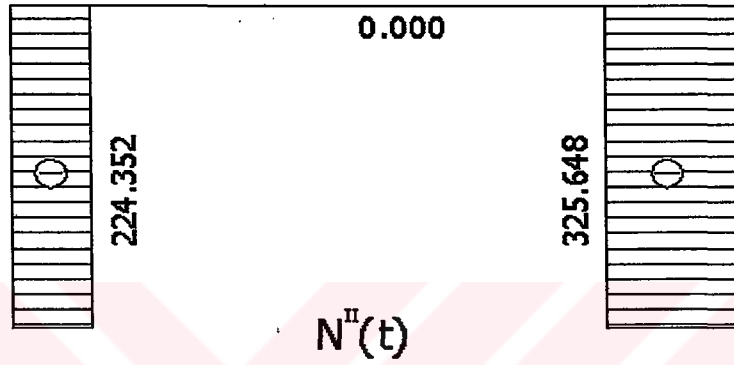
Eleman uç moment değerleri II. mertebe hesapta normal kuvvetlere göre hesap edileceğinden yeni normal kuvvetlere göre II. mertebe hesap yenilenir. $\Delta p_4 = 0.314$ olduğundan;

$$N_1^2 = 0.314 \times 225.000 = 70.650 \text{ t.}$$

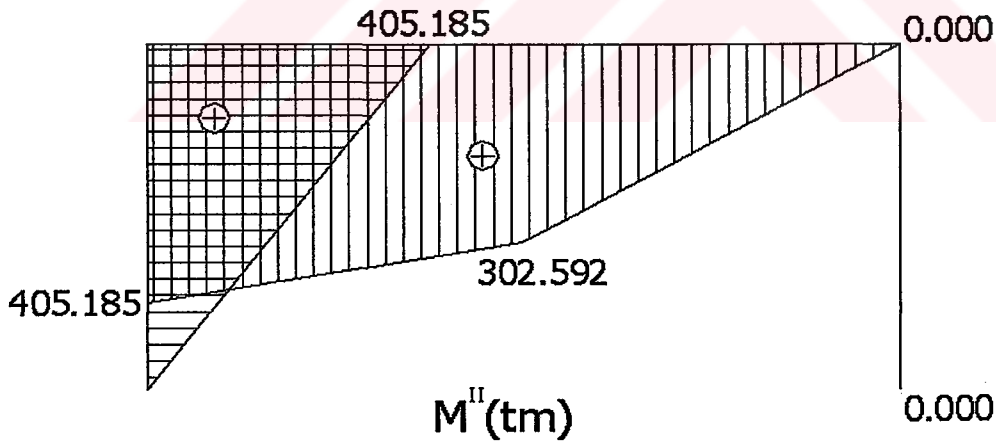
$$N_4^2 = 0.314 \times 325.000 = 102.050 \text{ t.}$$

Normal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik hesaptan bulunan kolon normal kuvvet değerleri ve yük parametresinin çarpılmasından elde edilmiştir. Bu elde edilen normal kuvvet değerleri ile hesap tekrarlanacaktır.

Ara matris işlemleri bir önceki işlemlerin aynısı olduğundan tekrar edilmeyecektir. Sadece eksenel kuvvet değerinin değişmesinden dolayı elde edilecek olan yeni normal kuvvet ve moment diyagramları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.78 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.79 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin İkinci İterasyon Moment Diyagramı

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için tablo tekrar hazırlanır:

Tablo 5.53 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_3 (tm)	N_3 (t)	ΔM_4 (tm)	ΔN_4 (t)
1	-339.032	-998.160	-222.015	-445.114	0.000	-224.352
2	339.032	-998.160	62.053	-445.114	405.185	-224.352
3	293.024	-951.696	62.053	-103.206	405.185	0.000
4	293.024	-951.696	106.969	-103.206	302.592	0.000
5	-293.024	-951.696	-195.257	-103.206	0.000	0.000
6	-339.032	-998.160	-195.257	-509.526	0.000	-325.648
7	339.032	-998.160	220.668	-509.526	0.000	-325.648

Tablo 5.54 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin İkinci İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{4,D}$	$N_{4,D}$	$N_{4,D}/N_p$	0,15	Δp_4	N_4	N/N_p	0,15	Δp_4
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.684	-573.003	0.574	>0,15	0.321	-517.176	0.518	>0,15	0.321
3	<u>0.570</u>	-103.206	0.108	<0,15	0.570	-103.206	0.108	<0,15	0.570
4	0.615	-103.206	0.108	<0,15	0.615	-103.206	0.108	<0,15	0.615
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

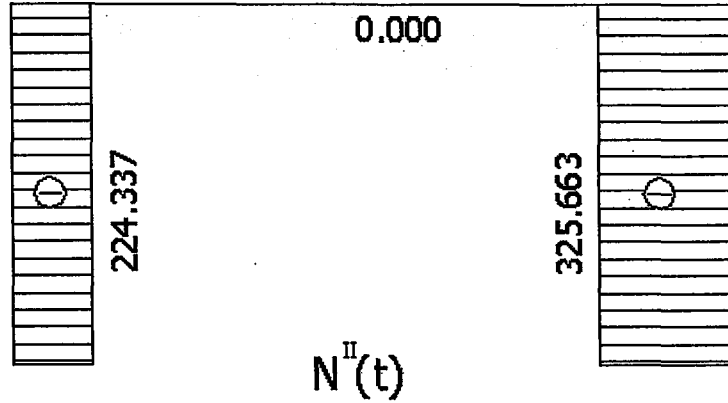
Yük parametresi değeri $\Delta p_4 = 0.321$ bulunmuştur. İlk iterasyon adımında $\Delta p_4 = 0.314$ idi. Aradaki fark ihmal edilemeyecek büyüklükte olduğundan bir iterasyon adımı daha uygulanmalıdır. Yük parametresi değeri $\Delta p_4 = 0.321$ alınarak işlemler tekrar edilecektir. $\Delta p_4 = 0.321$ olduğundan;

$$N_1^2 = 0.321 \times 225.000 = 72.225 \text{ t.}$$

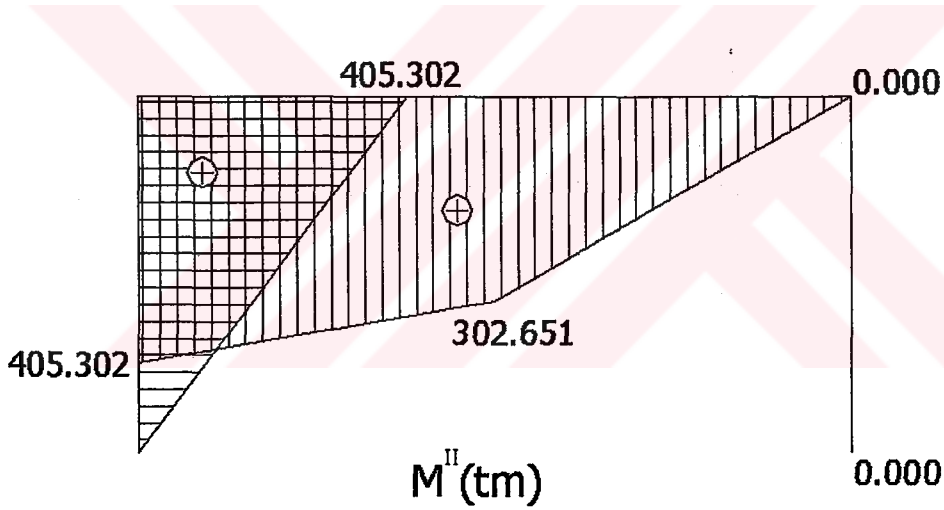
$$N_4^2 = 0.425 \times 325.000 = 104.325 \text{ t.}$$

Normal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik hesaptan bulunan kolon normal kuvvet değerleri ve yük parametresinin çarpılmasından elde edilmiştir. Bu elde edilen normal kuvvet değerleri ile hesap tekrarlanacaktır.

Ara matris işlemleri bir önceki işlemlerin aynısı olduğundan tekrar edilmeyecek sadece eksenel kuvvet değerinin değişmesinden dolayı elde edilecek olan yeni normal kuvvet ve moment diyagramları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.80 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Üçüncü İterasyon Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.81 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Üçüncü İterasyon Moment Diyagramı

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için tablo tekrar hazırlanır:

Tablo 5.55 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Üçüncü İterasyon Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_3 (tm)	N_3 (t)	ΔM_4 (tm)	ΔN_4 (t)
1	-339.032	-998.160	-222.015	-445.114	0.000	-224.337
2	339.032	-998.160	62.053	-445.114	405.302	-224.337
3	293.024	-951.696	62.053	-103.206	405.302	0.000
4	293.024	-951.696	106.969	-103.206	302.651	0.000
5	-293.024	-951.696	-195.257	-103.206	0.000	0.000
6	-339.032	-998.160	-195.257	-509.526	0.000	-325.663
7	339.032	-998.160	220.668	-509.526	0.000	-325.663

Tablo 5.56 II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Üçüncü İterasyon Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{4,D}$	$N_{4,D}$	$N_{4,D}/N_p$	0.15	Δp_4	N_4	N/N_p	0.15	Δp_4
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.683	-572.958	0.574	>0,15	0.321	-517.155	0.518	>0,15	0.321
3	0.570	-103.206	0.108	<0,15	0.570	-103.206	0.108	<0,15	0.570
4	0.615	-103.206	0.108	<0,15	0.615	-103.206	0.108	<0,15	0.615
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi değeri $\Delta p_4 = 0.321$ bulunmuştur. Bir önceki iterasyon adımında $\Delta p_4 = 0.321$ bulunmuştu. Arada fark olmadığından dolayı iterasyon sonlandırılır ve yük parametresi $\Delta p_4 = 0.321$ olarak alınır. Dördüncü yük parametresi;

$$p_4 = p_4 + \Delta p_4$$

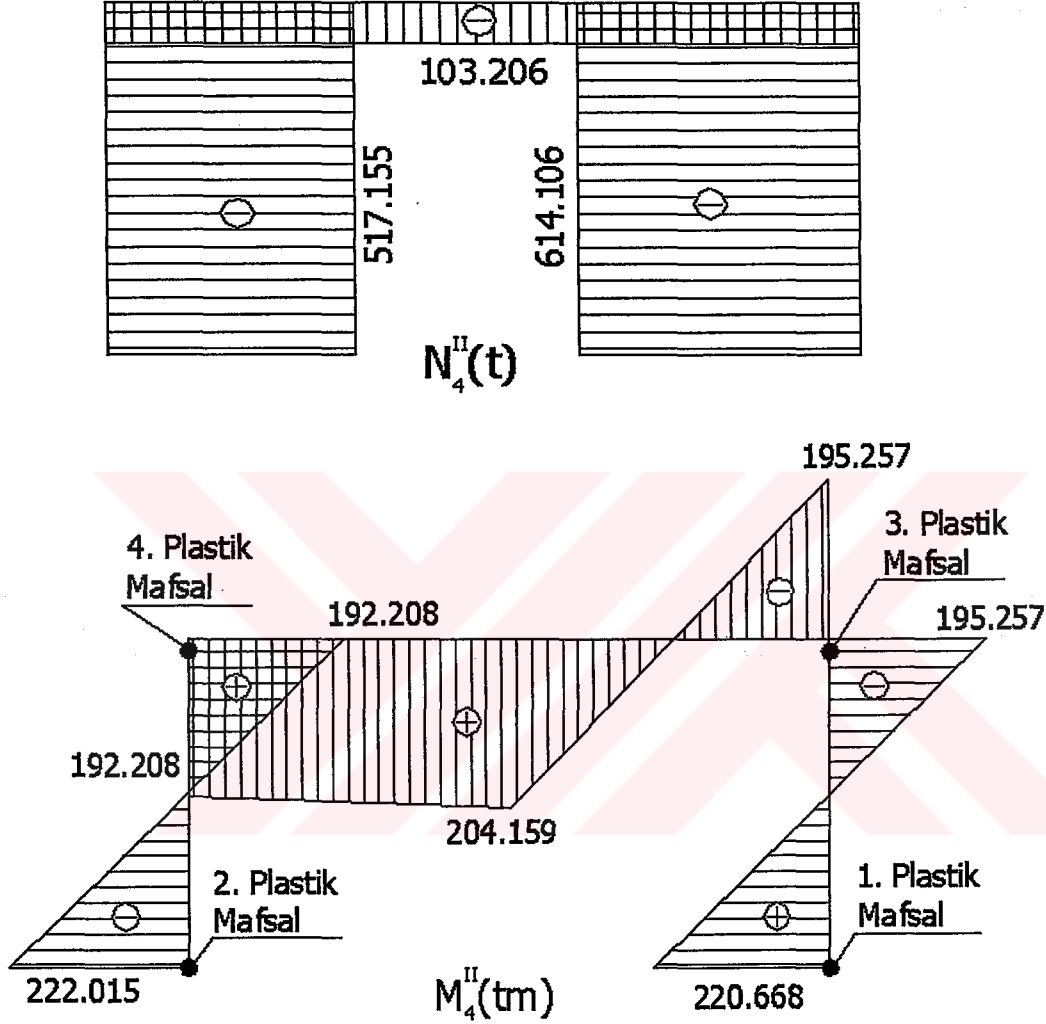
$$p_4 = 1.736 + 0.321 = 2.057 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_4 = 2.057$ kat artırılması sonucu dördüncü plastik mafsallı olduğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_4^{\text{II}} = \delta_4^{\text{II}} + \Delta p_4^{\text{II}} \delta_{x,1}$$

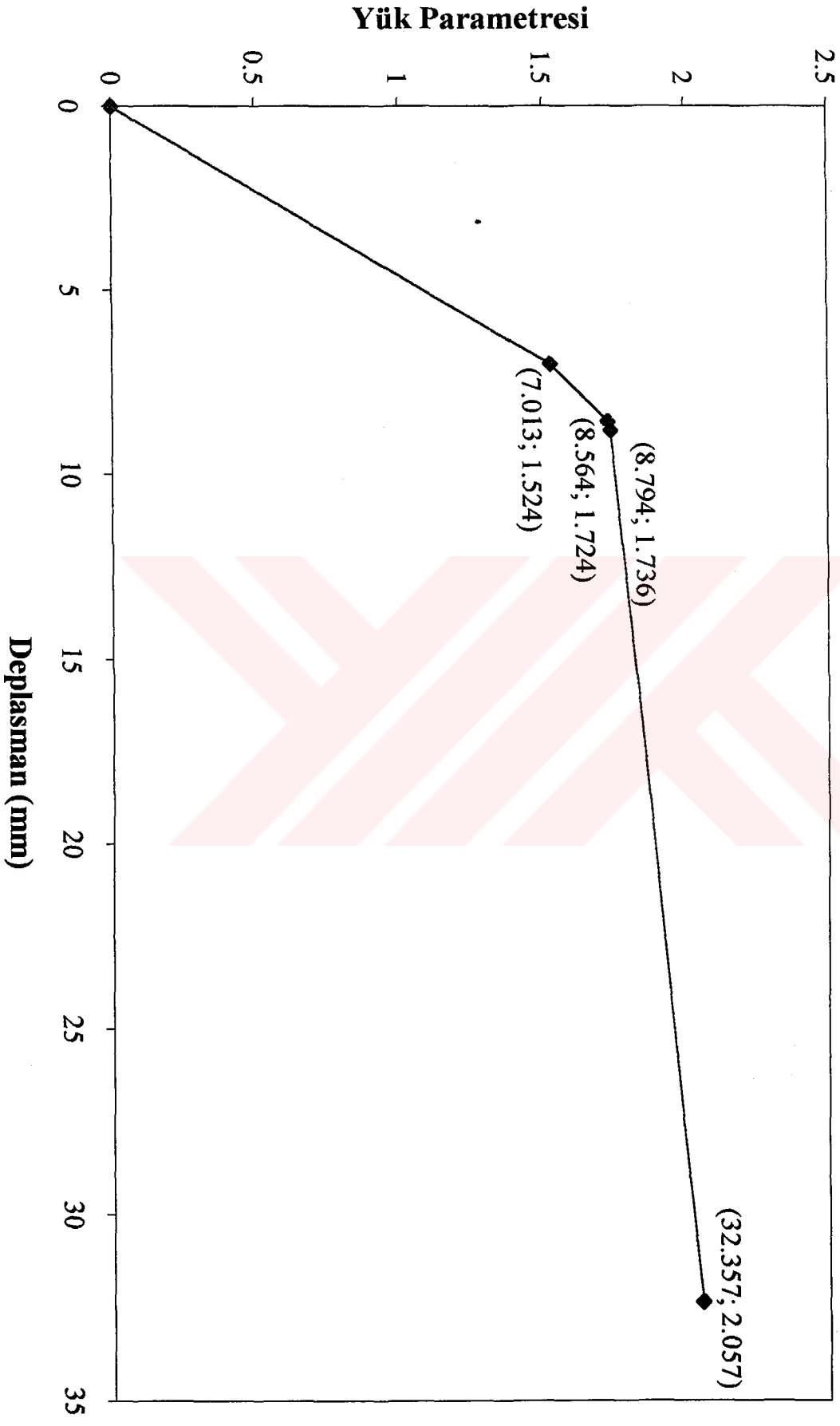
$$\delta_4^{\text{II}} = 0.008794 + 0.321 \times 0.073405 = 0.032357 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_4 = 2.057$ olduğunda dördüncü plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.032357 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.82’de sunulmuştur.



Şekil 5.82 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (2) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (2) numaralı kesite dördüncü plastik mafsall konulmuştur. Göçme halindeki değerler elde edilmiş olur.



Şekil 5.83 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi

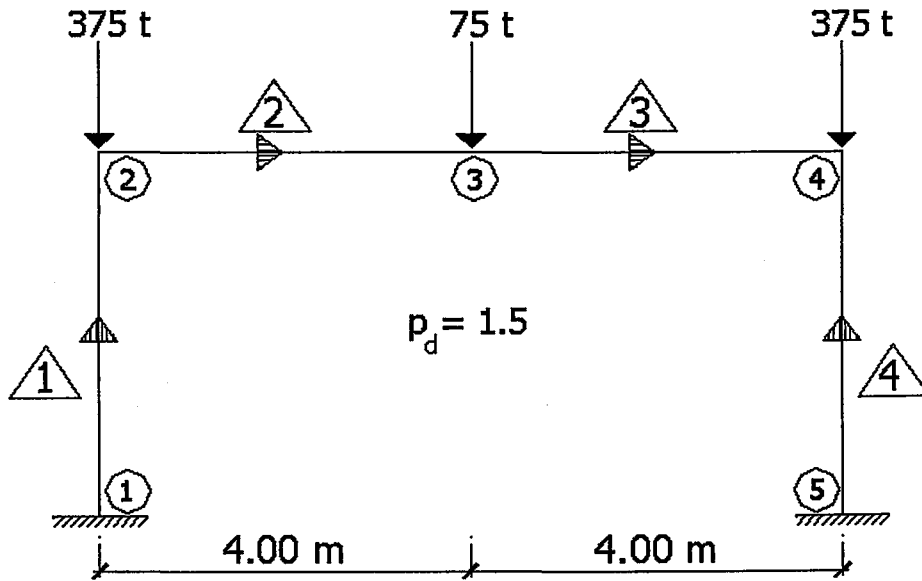
5.3.7 Sabit Düşey Yük Parametresi Altında Artan Yatay Yük İçin II. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap

II. mertebe elastoplastik hesap yapılarak aşağıdaki sistemin yatay göçme yükü parametresi bulunacaktır. Düşey yükler 1.5 kat artırılarak sabit tutulacak, yatay yük artımı ile yapıyı mekanizma durumuna getiren yatay yük parametresi belirlenecektir.

Malzeme elastoplastik şekil değiştirmektedir. Akma bağıntısı olarak $K(M,N)=0$ kullanılacaktır. Moment ve normal kuvvet etkisi altında akma davranışı $K(M,N)=0$ gözönüne alınacaktır. Denge denklemleri şekil değiştirmiş eksen üzerinden yazılacağından II. mertebe teorisi bu kısımda geçerlidir.

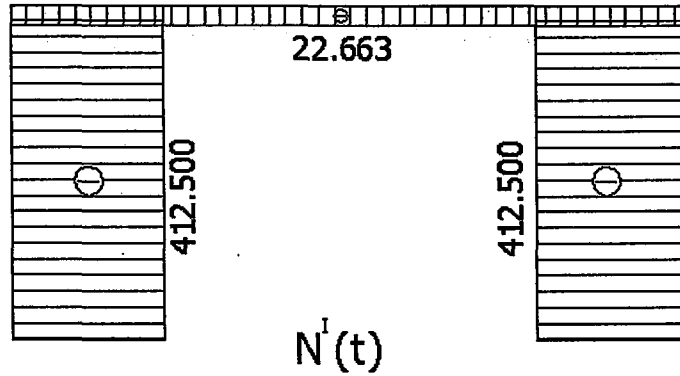
İlk olarak, sistem için yalnız düşey yükler etkisi altında bulunacak kesit tesirleri 1.5 kat arttırılacaktır. Bu kesit tesirleri yalnız yatay yük etkisi altında bulunan sistemin kesit tesirleri ile süperpoze edilecek ve düşey yük parametresi sabit, $p_D=1.5$ iken sistemi mekanizma durumuna getiren yatay yük parametresi p_Y bulunacaktır.

5.3.7.1 Düşey Yüklerin Düşey Yük Parametresi ile Arttırılması ve I. Mertebe Hesap

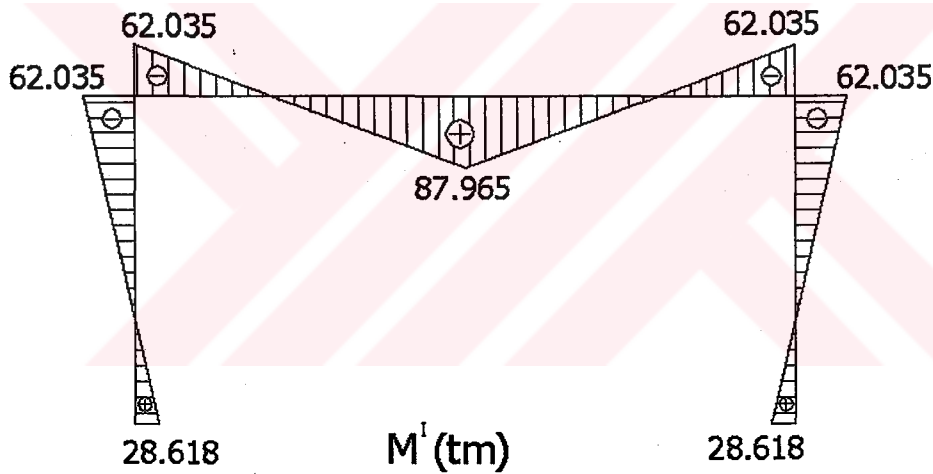


Şekil 5.84 Düşey Yük Parametresi $p_d=1.5$ İle Arttırılmış Düşey Kuvvetler

Tüm düşey yükler $p_D=1.5$ ile arttırılacaktır. Düşey yükler $p_D=1.5$ arttırıldıktan sonra birinci mertebe lineer elastik olarak çözülmüş ve ikinci mertebe elastik hesap için gerekli olan başlangıç normal kuvvet değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.85 Düşey Yük Parametresi $p_d=1.5$ İle Arttırılmış Düşey Kuvvetler Altında I. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Sonucu Elde Edilen Normal Kuvvet Diyagramı



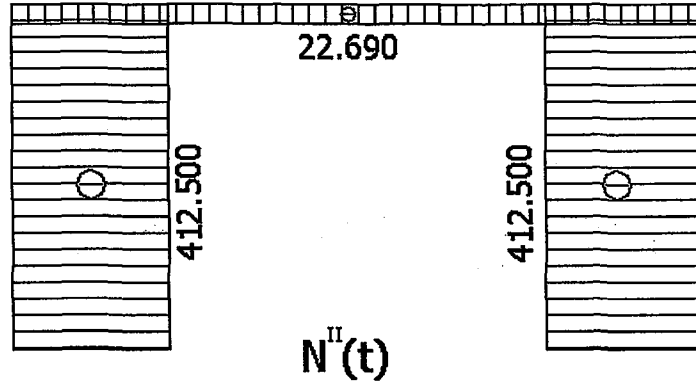
Şekil 5.86 Düşey Yük Parametresi $p_d=1.5$ İle Arttırılmış Düşey Kuvvetler Altında I. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Sonucu Elde Edilen Moment Diyagramı

5.3.7.2 Düşey Yüklerin Düşey Yük Parametresi ile Arttırılması ve II. Mertebe Hesap

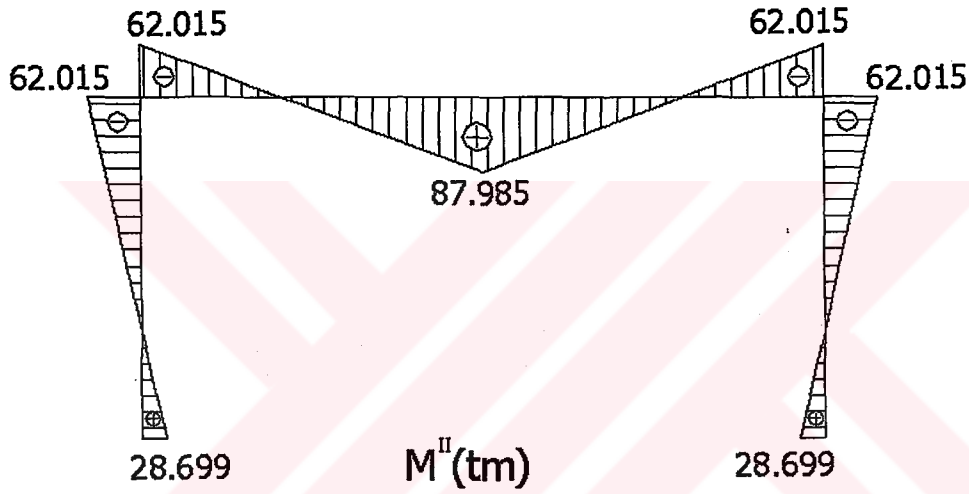
I. mertebe lineer elastik hesap sonucu bulunan normal kuvvet değerleri ikinci mertebe hesap için başlangıç değerleri olarak kullanılmıştır.

$$N_1^I = 412.500 \text{ t.}$$

$$N_4^I = 412.500 \text{ t.}$$



Şekil 5.87 Düşey Yük Parametresi $p_d=1.5$ İle Arttırılmış Düşey Kuvvetler Altında II. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Sonucu Elde Edilen Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.88 Düşey Yük Parametresi $p_d=1.5$ İle Arttırılmış Düşey Kuvvetler Altında II. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Sonucu Elde Edilen Moment Diyagramı

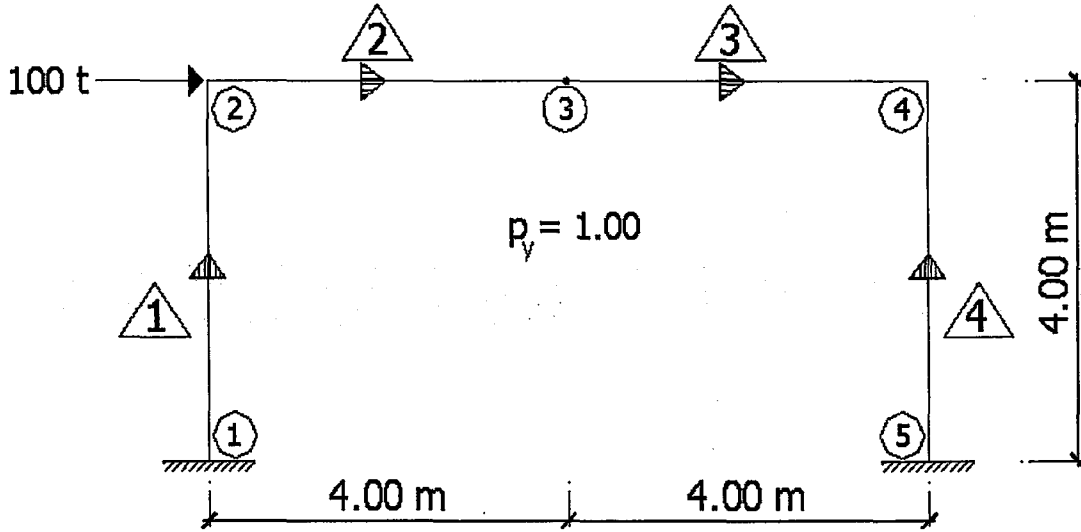
5.3.7.3 Birinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İlk Yatay Yük Parametresinin Belirlenmesi

Yatay göçme yükü parametresi arandığından sadece yatay yüklü sistem çözülmelidir.

II. mertebe lineer elastik hesapta kullanılmak üzere I. mertebe lineer elastik hesaptan normal kuvvet değerleri alınır:

$$N_1^I = 412.500 \text{ t.}$$

$$N_4^I = 412.500 \text{ t.}$$



Şekil 5.89 Yatay Yük Parametresi $p_y=1.00$ İçin Yatay Kuvvetler

5.3.7.4 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 1 No'lu elemanda $N_1^1 = 412.500$ t. eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_1^1}{E I_1}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.003444$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.234732$ elde edilir.

Bu değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.992648$ ve $m_k = 2.001840$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^u] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22336 & 44878 & 0 & -22336 & 44878 \\ 0 & 44878 & 119564 & 0 & -44878 & 59947 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22336 & -44878 & 0 & 22336 & -44878 \\ 0 & 44878 & 59947 & 0 & -44878 & 119564 \end{bmatrix}$$

Elemanın II. mertebe global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K^II][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 22336 & 0 & -44878 & -22336 & 0 & -44878 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ -44878 & 0 & 119564 & 44878 & 0 & 59947 \\ -22336 & 0 & 44878 & 22336 & 0 & 44878 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -44878 & 0 & 59947 & 44878 & 0 & 119564 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 4 No'lu elemanda $N_4^1 = 412.500$ t. eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$$\alpha^2 = \frac{N_1^1}{E I_1} \text{ formülünden; } \alpha^2 = 0.003444 \text{ ve dolayısıyla } \alpha L = 0.234732 \text{ elde edilir. Bu}$$

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.992648$ ve $m_k = 2.001840$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^{\Pi}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22336 & 44878 & 0 & -22336 & 44878 \\ 0 & 44878 & 119564 & 0 & -44878 & 59947 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22336 & -44878 & 0 & 22336 & -44878 \\ 0 & 44878 & 59947 & 0 & -44878 & 119564 \end{bmatrix}$$

Elemanın II. mertebe global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K^{\Pi}][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} 22336 & 0 & -44878 & -22336 & 0 & -44878 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ -44878 & 0 & 119564 & 44878 & 0 & 59947 \\ -22336 & 0 & 44878 & 22336 & 0 & 44878 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -44878 & 0 & 59947 & 44878 & 0 & 119564 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkileyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 234436 & 0 & 44878 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 0 & 34855 & 0 & 0 & 0 & -17427 & 34855 \\ 44878 & 34855 & 212510 & 0 & -34855 & 0 & 0 & 185892 & 0 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 0 & 34855 & 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 & 185892 & 0 & 0 & -34855 & 46473 & 212510 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 234436 & 0 & 0 & 0 & 44878 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 240027 & -34855 & -34855 & 212510 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 44878 & -34855 & 212510 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 4.530 & 0.079 & -1.099 & 4.303 & -0.143 & 0.484 & 4.076 & -0.079 & -0.956 & 4 \\ 0.079 & 0.448 & -0.039 & 0.079 & 0.225 & -0.064 & 0.079 & 0.001 & -0.039 & 5 \\ -1.099 & -0.039 & 0.884 & -1.028 & 0.745 & -0.241 & -0.956 & 0.039 & 0.139 & 6 \\ 4.303 & 0.079 & -1.028 & 4.539 & 0.000 & 0.484 & 4.303 & -0.079 & -1.028 & 7 \\ -0.143 & 0.225 & 0.745 & 0.000 & 4.584 & 0.000 & 0.143 & 0.225 & -0.745 & 8 \\ 0.484 & -0.064 & -0.241 & 0.484 & 0.000 & 0.682 & 0.484 & 0.064 & -0.241 & 9 \\ 4.076 & 0.079 & -0.956 & 4.303 & 0.143 & 0.484 & 4.530 & -0.079 & -1.099 & 10 \\ -0.079 & 0.001 & 0.039 & -0.079 & 0.225 & 0.064 & -0.079 & 0.448 & 0.039 & 11 \\ -0.956 & -0.039 & 0.139 & -1.028 & -0.745 & -0.241 & -1.099 & 0.039 & 0.884 & 12 \end{bmatrix}$$

5.3.7.5 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 4.530 \ 0.079 \ -1.099 \ 4.303 \ -0.143 \ 0.484 \ 4.076 \ -0.079 \ -0.956 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \ 0 \ 0 \ 0.004530 \ -0.000079 \ -0.001099 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.004530 \ -0.000079 \ -0.001099 \ 0.004303 \ -0.000143 \ 0.000484 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.004303 \ -0.000143 \ 0.000484 \ 0.004076 \ -0.000079 \ -0.000956 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \ 0 \ 0 \ 0.004076 \ -0.000079 \ -0.000956 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -51.868 \ -17.564 \ 137.427 \ 51.868 \ 17.564 \ 71.914 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 48.132 \ -17.564 \ -71.914 \ -48.132 \ 17.564 \ 1.657 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 48.132 \ -17.564 \ -1.657 \ -48.132 \ 17.564 \ -68.600 \rangle$$

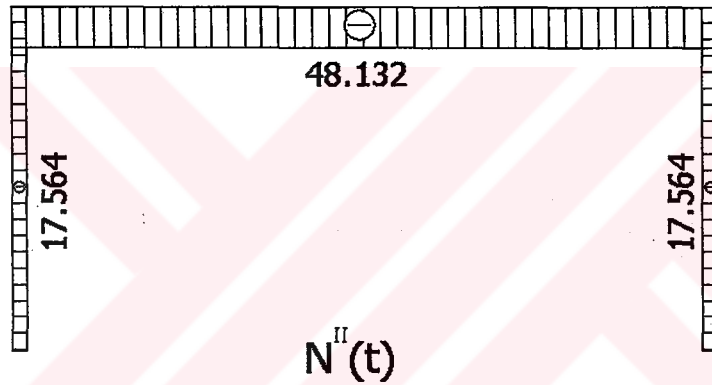
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle -48.132 \ 17.564 \ 125.609 \ 48.132 \ -17.564 \ 68.600 \rangle$$

Tablo 5.57 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

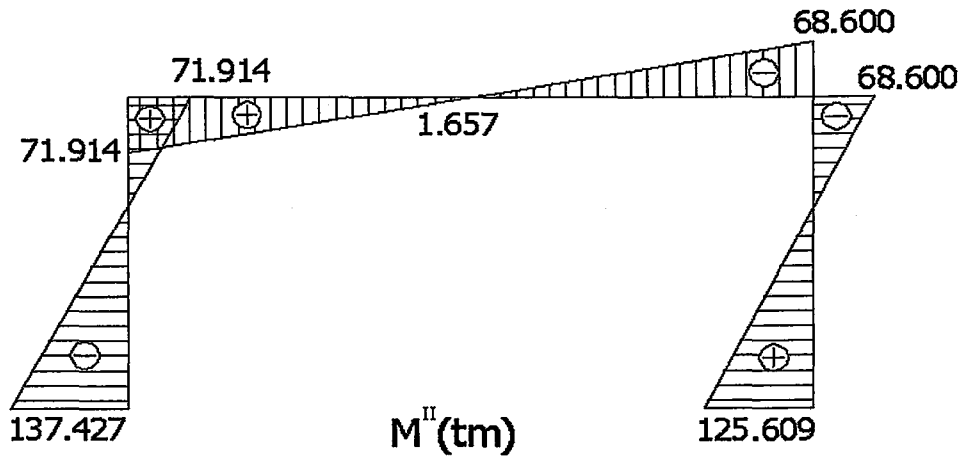
Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_j(t)$	-17.564	48.132	48.132	17.564
$T_j(t)$	-51.868	-17.564	-17.564	-48.132
$M_j(tm)$	137.427	-71.914	-1.657	125.609
$N_k(t)$	17.564	-48.132	-48.132	-17.564
$T_k(t)$	51.868	17.564	17.564	48.132
$M_k(tm)$	71.914	1.657	-68.600	68.600

5.3.7.6 Sadece Yatay Yük Etkisi Altında Çözülmüş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.90 Sadece Yatay Yük Parametresi ile II. Mertebe Lineer Elastik Çözüm

Sonucu Elde Edilen Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.91 Sadece Yatay Yük Parametresi ile II. Mertebe Lineer Elastik Çözüm

Sonucu Elde Edilen Moment Diyagramı

II. mertebe lineer elastik hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.58 yazılır:

Tablo 5.58 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	ΔM_D (tm)	ΔN_D (t)	ΔM_Y (tm)	ΔN_Y (t)
1	-339.032	-998.160	28.699	-412.500	-137.427	17.564
2	339.032	-998.160	-62.015	-412.500	71.914	17.564
3	293.024	-951.696	-62.015	-22.690	71.914	-48.132
4	293.024	-951.696	87.985	-22.690	1.657	-48.132
5	-293.024	-951.696	-62.015	-22.690	-68.600	-48.132
6	-339.032	-998.160	-62.015	-412.500	-68.600	-17.564
7	339.032	-998.160	28.699	-412.500	125.609	-17.564

Tablo 5.59 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{1,Y}$	$N_{1,Y}$	$N_{1,Y}/N_p$	0.15	Δp_1	N_1	N_1/N_p	0.15	Δp_1
1	2.676	-369.106	0.370	>0,15	2.015	-385.308	0.386	>0,15	2.015
2	5.577	-369.106	0.370	>0,15	4.562	-385.308	0.386	>0,15	4.562
3	4.937	-141.606	0.149	<0,15	4.937	-97.206	0.102	<0,15	4.937
4	123.741	-141.606	0.149	<0,15	123.741	-97.206	0.102	<0,15	123.741
5	3.367	-141.606	0.149	<0,15	3.367	-97.206	0.102	<0,15	3.367
6	4.038	-455.894	0.457	>0,15	2.275	-439.692	0.441	>0,15	2.275
7	2.471	-455.894	0.457	>0,15	1.548	-439.692	0.441	>0,15	1.548

Akma Şartı $K(M,N)=0$ için:

- 3, 4 ve 5 No'lu kesitlerde $N/N_p \leq 0.15$ olduğundan normal kuvvetin etkisi ihmal edilmiş ve yük parametresinin bulunmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$\Delta p = \frac{(M_p - M_D)}{(\Delta M_Y)}$$

- 1,2,6 ve 7 No'lu kesitlerde ise $N/N_p > 0.15$ olduğundan normal kuvvetin etkisi ihmal edilmemiş ve yük parametresinin bulunmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

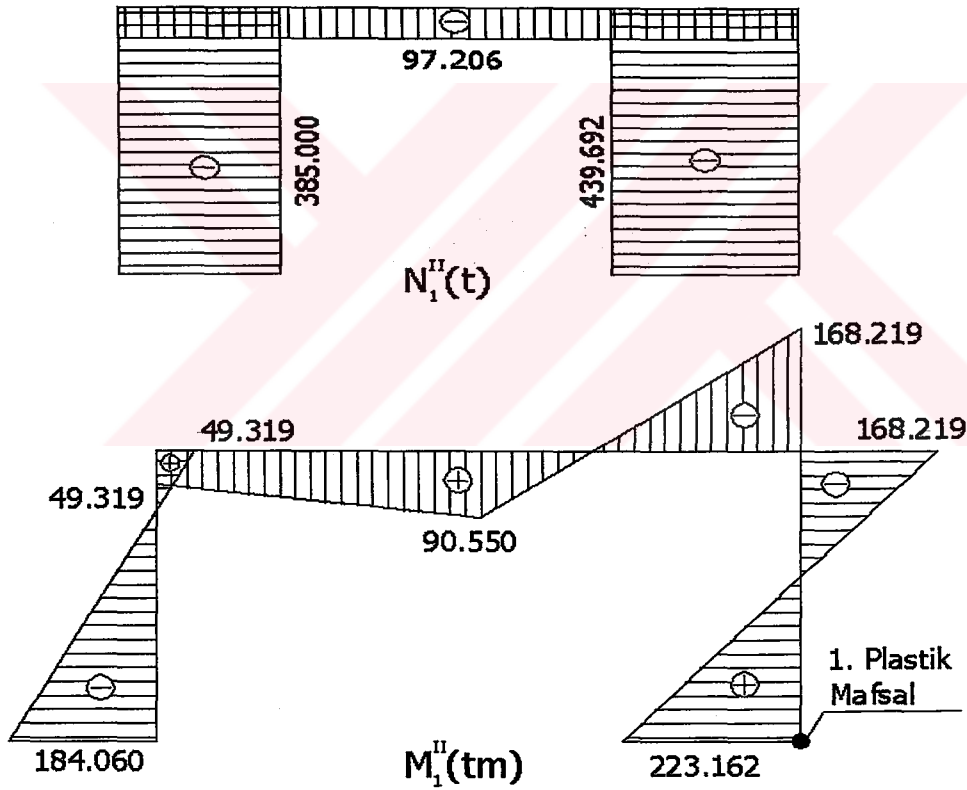
$$\Delta p = \frac{(M_p \times N_p - M_p \times N_D - 0.85 \times M_D \times N_p)}{(\Delta N_Y \times M_p + 0.85 \times \Delta M_Y \times N_p)}$$

İlk plastik mafsal (7) numaralı kesitte ve $p=1.548$ yük parametresi değerinde oluşur. Yüklerin $p_1=1.548$ kat arttırılması sonucu ilk plastik mafsal oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri $p_d=1.5$ olduğu da gözönüne alınarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_1^{\text{II}} = 1.5 \times \delta_{d,x}^{\text{II}} + \Delta p_1^{\text{II}} \delta_{x,1}$$

$$\delta_1^{\text{II}} = 1.5 \times 0.000107 + 1.548 \times 0.004530 = 0.007173 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_1=1.548$ olduğunda ilk plastik mafsal oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.007173 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.92’de sunulmuştur.



Şekil 5.92 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İçin Birinci Yük Parametresi Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (7) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (7) numaralı kesite ilk plastik mafsal konulmuştur.

5.3.7.7 Birinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme değişmemektedir. Başlangıç değeri olması açısından düşey yüklemekten dolayı oluşan aksenal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik kısımdan yazılır:

$$N_1 = -412.500 \text{ t.}$$

$$N_4 = -412.500 \text{ t.}$$

5.3.7.8 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 1 No'lu elemanda $N_1^1 = 412.500 \text{ t.}$ aksenal basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_1^1}{E I_1}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.003444$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.234732$ elde edilir. Bu

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.992648$ ve $m_k = 2.001840$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^n] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22336 & 44878 & 0 & -22336 & 44878 \\ 0 & 44878 & 119564 & 0 & -44878 & 59947 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22336 & -44878 & 0 & 22336 & -44878 \\ 0 & 44878 & 59947 & 0 & -44878 & 119564 \end{bmatrix}$$

Elemanın II. mertebe global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K^u][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 22336 & 0 & -44878 & -22336 & 0 & -44878 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ -44878 & 0 & 119564 & 44878 & 0 & 59947 \\ -22336 & 0 & 44878 & 22336 & 0 & 44878 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -44878 & 0 & 59947 & 44878 & 0 & 119564 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 4 numaralı elemanda $N_4^I = 412.500$ t. eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$$\alpha^2 = \frac{N_4^I}{E I_1} \text{ formülünden; } \alpha^2 = 0.003444 \text{ ve dolayısıyla } \alpha L = 0.234732 \text{ elde edilir.}$$

Bu değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.992648$ ve $m_k = 2.001840$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22336 & 44878 & 0 & -22336 & 44878 \\ 0 & 44878 & 119564 & 0 & -44878 & 59947 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22336 & -44878 & 0 & 22336 & -44878 \\ 0 & 44878 & 59947 & 0 & -44878 & 119564 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsallı bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsal}}^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5491 & 0 & 0 & -5491 & 22377 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5491 & 0 & 0 & 5491 & 22377 \\ 0 & 22377 & 0 & 0 & -22377 & 89507 \end{bmatrix}$$

II. mertebe etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsallı bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4] [K_{\text{Sol,Mafsal}}^{\text{II}}] [\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{bmatrix} 5491 & 0 & 0 & -5491 & 0 & -22377 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5491 & 0 & 0 & 5491 & 0 & 22377 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22377 & 0 & 0 & 22377 & 0 & 89507 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 234436 & 0 & 44878 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 44878 & 34855 & 212510 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 185892 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & 0 & -17427 & 0 & -17427 & 34855 & 0 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 185892 & 0 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 217591 & 0 & 22377 & 0 & 22377 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 240027 & -34855 & -34855 & 182453 & 182453 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 22377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 7.363 & 0.106 & -1.879 & 7.270 & -1.006 & 0.648 & 7.176 & -0.106 & -0.873 & 4 \\ 0.106 & 0.448 & -0.047 & 0.107 & 0.216 & -0.063 & 0.108 & 0.001 & -0.038 & 5 \\ -1.879 & -0.047 & 1.099 & -1.845 & 0.983 & -0.286 & -1.810 & 0.047 & 0.116 & 6 \\ 7.270 & 0.107 & -1.845 & 7.645 & -0.904 & 0.656 & 7.549 & -0.107 & -0.941 & 7 \\ -1.006 & 0.216 & 0.983 & -0.904 & 4.847 & -0.050 & -0.802 & 0.233 & -0.770 & 8 \\ 0.648 & -0.063 & -0.286 & 0.656 & -0.050 & 0.692 & 0.664 & 0.063 & -0.236 & 9 \\ 7.176 & 0.108 & -1.810 & 7.549 & -0.802 & 0.664 & 7.922 & -0.108 & -1.008 & 10 \\ -0.106 & 0.001 & 0.047 & -0.107 & 0.233 & 0.063 & -0.108 & 0.448 & 0.038 & 11 \\ -0.873 & -0.038 & 0.116 & -0.941 & -0.770 & -0.236 & -1.008 & 0.038 & 0.886 & 12 \end{bmatrix}$$

5.3.7.9 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 7.363 \quad -0.106 \quad -1.879 \quad 7.270 \quad -1.006 \quad 0.648 \quad 7.176 \quad -0.106 \quad -0.873 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.007363 \quad -0.000106 \quad -0.001879 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.007363 \quad -0.000106 \quad -0.001879 \quad 0.007270 \quad -0.001006 \quad 0.000648 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.007270 \quad -0.001006 \quad 0.000648 \quad 0.007176 \quad -0.000106 \quad -0.000873 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.007176 \quad -0.000106 \quad -0.000873 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -80.138 \quad 23.524 \quad 217.808 \quad 80.138 \quad 23.524 \quad 105.780 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 19.862 \quad -23.524 \quad -105.780 \quad -19.862 \quad 23.524 \quad 11.658 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 19.862 \quad -23.524 \quad -11.685 \quad -19.862 \quad 23.524 \quad -82.410 \rangle$$

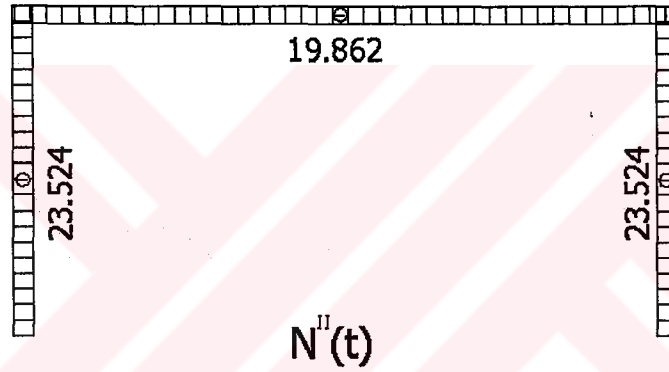
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle -19.862 \quad 23.524 \quad 0.000 \quad 19.862 \quad -23.524 \quad 82.410 \rangle$$

Tablo 5.60 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

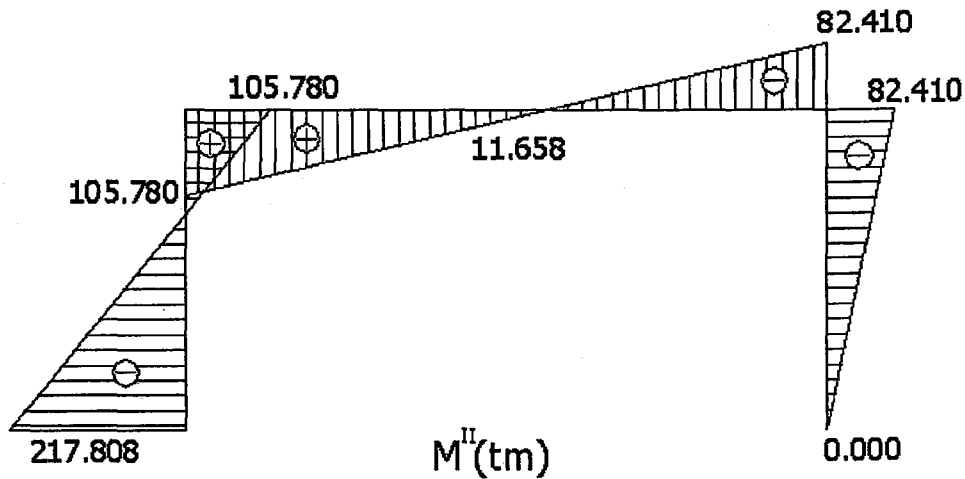
Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_j(t)$	-23.524	19.862	19.862	23.524
$T_j(t)$	-80.138	-23.524	-23.524	-19.862
$M_j(tm)$	217.808	-105.780	-11.685	0.000
$N_k(t)$	23.524	-19.862	-19.862	-23.524
$T_k(t)$	80.138	23.524	23.524	19.862
$M_k(tm)$	105.780	11.685	-82.410	82.410

5.3.7.10 Bir Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.93 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap

$K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.94 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap

$K(M,N)=0$ Bir Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Moment Diyagramı

5.3.7.11 İkinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İkinci Yük Parametresinin Belirlenmesi

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için Tablo 5.61 hazırlanır:

Tablo 5.61 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	ΔM_1 (tm)	ΔN_1 (t)	$\Delta M_{Y,2}$ (tm)	$\Delta N_{Y,2}$ (t)
1	-339.032	-998.16	-184.06	-385.308	-217.808	23.524
2	339.032	-998.16	49.319399	-385.308	105.780	23.524
3	293.024	-951.696	49.319399	-97.2061	105.780	-19.862
4	293.024	-951.696	90.550302	-97.2061	11.685	-19.862
5	-293.024	-951.696	-168.2188	-97.2061	-82.410	-19.862
6	-339.032	-998.16	-168.2188	-439.692	-82.410	-23.524
7	339.032	-998.16	223.16187	-439.692	0.000	-23.524

Tablo 5.62 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{2,D}$	$N_{2,D}$	$N_{2,D}/N_p$	0.15	Δp_2	N_2	N/N_p	0.15	Δp_2
1	0.712	-368.571	0.369	>0,15	0.292	-378.442	0.379	>0,15	0.292
2	2.739	-368.571	0.369	>0,15	2.029	-378.442	0.379	>0,15	2.029
3	2.304	-111.338	0.117	<0,15	2.304	-103.004	0.108	<0,15	2.304
4	17.328	-111.338	0.117	<0,15	17.328	-103.004	0.108	<0,15	17.328
5	1.514	-111.338	0.117	<0,15	1.514	-103.004	0.108	<0,15	1.514
6	2.073	-456.429	0.457	>0,15	0.598	-446.558	0.447	>0,15	0.598
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi değeri $\Delta p_2 = 0.292$ bulunmuştur. İkinci yük parametresi;

$$p_2 = p_1 + \Delta p_2$$

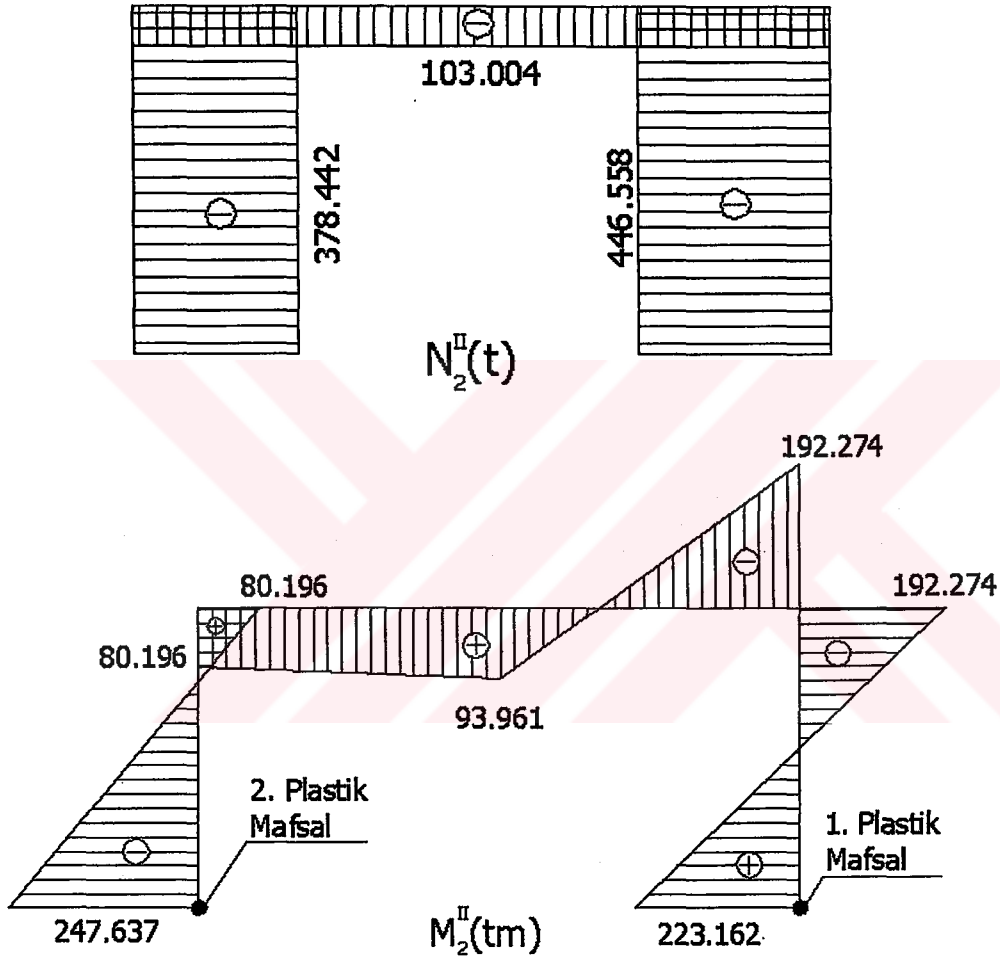
$$p_2 = 1.548 + 0.292 = 1.840 \text{ elde edilir}$$

Yüklerin $p_2 = 1.840$ kat arttırılması sonucu ikinci plastik mafsal oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_2^{\text{II}} = \delta_1^{\text{II}} + \Delta p_2^{\text{II}} \delta_{x,1}$$

$$\delta_2^{\text{II}} = 0.007173 + 0.292 \times 0.007363 = 0.009323 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_2 = 1.840$ olduğunda ikinci plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.009323 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.95’de sunulmuştur.



Şekil 5.95 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İçin İkinci Yük Parametresi Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (1) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (1) numaralı kesite ikinci plastik mafsall konulmuştur.

5.3.7.12 İkinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme değişmemektedir. Başlangıç değeri olması açısından düşey yüklemekten dolayı oluşan aksenal kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik kısımdan yazılacak olursa;

$$N_1 = -412.500 \text{ t.}$$

$$N_4 = -412.500 \text{ t.}$$

5.3.7.13 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 1 No'lu elemanda $N_1^1 = 412.500 \text{ t.}$ aksenal basınç kuvveti mevcuttur.

$$\alpha^2 = \frac{N_1^1}{E I_1} \text{ formülünden; } \alpha^2 = 0.003444 \text{ ve dolayısıyla } \alpha L = 0.234732 \text{ elde edilir. Bu}$$

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.992648$ ve $m_k = 2.001840$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22336 & 44878 & 0 & -22336 & 44878 \\ 0 & 44878 & 119564 & 0 & -44878 & 59947 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22336 & -44878 & 0 & 22336 & -44878 \\ 0 & 44878 & 59947 & 0 & -44878 & 119564 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsal}}^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5491 & 0 & 0 & -5491 & 22377 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5491 & 0 & 0 & 5491 & 22377 \\ 0 & 22377 & 0 & 0 & -22377 & 89507 \end{bmatrix}$$

II. mertebe etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K_{\text{Sol,Mafsal}}^{\text{II}}][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 5491 & 0 & 0 & -5491 & 0 & -22377 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5491 & 0 & 0 & 5491 & 0 & 22377 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22377 & 0 & 0 & 22377 & 0 & 89507 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 4 No'lu elemanda $N_4^1 = 412.500$ t. eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_1^1}{E I_1}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.003444$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.234732$ elde edilir. Bu

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.992648$ ve $m_k = 2.001840$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22336 & 44878 & 0 & -22336 & 44878 \\ 0 & 44878 & 119564 & 0 & -44878 & 59947 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22336 & -44878 & 0 & 22336 & -44878 \\ 0 & 44878 & 59947 & 0 & -44878 & 119564 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsal}}^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5491 & 0 & 0 & -5491 & 22377 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5491 & 0 & 0 & 5491 & 22377 \\ 0 & 22377 & 0 & 0 & -22377 & 89507 \end{bmatrix}$$

II. mertebe etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsalsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_4] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4][K_{Sol,Mafsalsal}^II][\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{array}{ccccc} & \begin{matrix} 13 & 14 & 15 & 10 & 11 & 12 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 5491 & 0 & 0 & -5491 & 0 & -22377 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5491 & 0 & 0 & 5491 & 0 & 22377 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22377 & 0 & 0 & 22377 & 0 & 89507 \end{bmatrix} \end{array}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 217591 & 0 & 22377 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 22377 & 34855 & 182453 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 185892 & 0 & -34855 & 46473 & 22377 & -34855 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 217591 & 0 & 22377 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 0 & 240027 & -34855 & 182453 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34855 & 46473 & 22377 & -34855 & 182453 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s^{-1}] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 21.791 & 0.235 & -3.102 & 21.556 & -0.093 & 1.440 & 21.322 & -0.235 & -3.009 & 0.058 & 1.202 \\ 0.235 & 0.449 & -0.058 & 0.235 & 0.225 & -0.055 & 0.235 & 0.000 & -0.058 & 0.449 & 0.058 \\ -3.102 & -0.058 & 1.202 & -3.055 & 0.905 & -0.353 & -3.009 & 0.058 & 0.449 & 0.058 & 0.058 \\ 21.556 & 0.235 & -3.055 & 21.792 & 0.000 & 1.440 & 21.556 & -0.235 & -3.009 & 0.058 & 0.058 \\ -0.093 & 0.225 & 0.905 & 0.000 & 4.905 & 0.000 & -0.093 & 0.225 & -0.235 & 0.449 & 0.058 \\ 1.440 & -0.055 & -0.353 & 1.440 & 0.000 & 0.735 & 1.440 & 0.055 & -0.353 & -0.353 & 0.058 \\ 21.322 & 0.235 & -3.009 & 21.556 & 0.093 & 1.440 & 21.791 & -0.235 & -3.102 & 0.058 & 0.058 \\ -0.235 & 0.000 & 0.058 & -0.235 & 0.225 & 0.055 & -0.235 & 0.449 & 0.058 & 0.058 & 0.058 \\ -3.009 & -0.058 & 0.297 & -3.055 & -0.905 & -0.353 & -3.102 & 0.058 & 1.202 & 1.202 & 1.202 \end{bmatrix}$$

5.3.7.14 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 21.791 \quad -0.235 \quad -3.102 \quad 21.556 \quad -0.093 \quad 1.440 \quad 21.322 \quad -0.235 \quad -3.009 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.021791 \quad -0.000235 \quad -0.003102 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.021791 \quad -0.000235 \quad -0.003102 \quad 0.021556 \quad -0.000093 \quad 0.001440 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.021556 \quad -0.000093 \quad 0.001440 \quad 0.021322 \quad -0.000235 \quad -0.003009 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.021322 \quad -0.000235 \quad -0.003009 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -50.246 \quad -52.223 \quad 0.000 \quad 50.246 \quad 52.223 \quad 209.974 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 49.754 \quad -52.223 \quad -209.974 \quad -49.754 \quad 52.223 \quad 1.082 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 49.754 \quad -52.223 \quad -1.082 \quad -49.754 \quad 52.223 \quad -207.810 \rangle$$

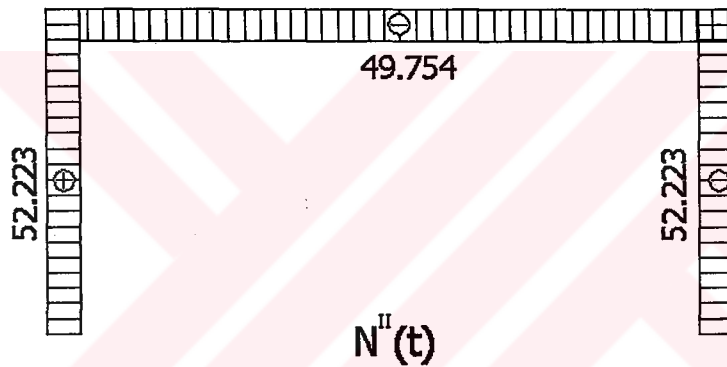
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle 49.754 \quad 52.223 \quad 0.000 \quad 49.754 \quad -52.223 \quad 207.810 \rangle$$

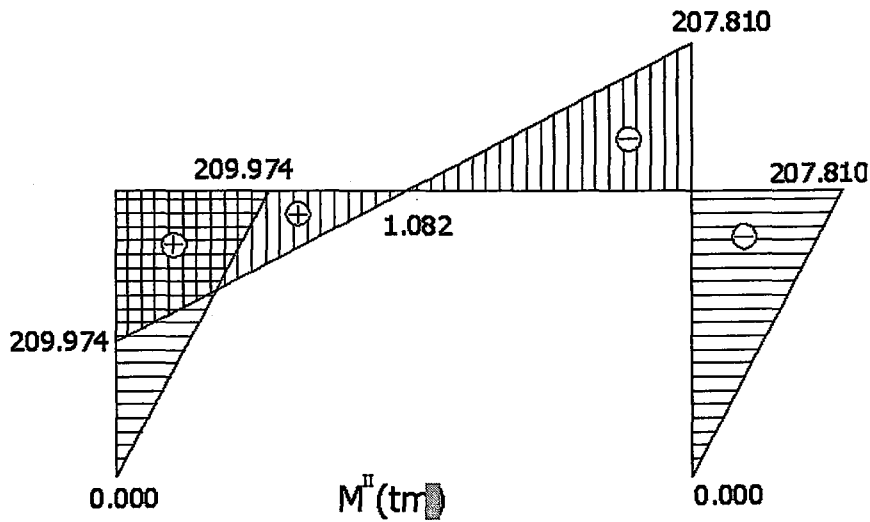
Tablo 5.63 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_i(t)$	-52.223	49.754	49.754	52.223
$T_i(t)$	-50.246	-52.223	-52.223	-49.754
$M_i(tm)$	0.000	-209.974	-1.082	0.000
$N_k(t)$	52.223	-49.754	-49.754	-52.223
$T_k(t)$	50.246	52.223	52.223	49.754
$M_k(tm)$	209.974	1.082	-207.810	207.810

5.3.7.15 İkinci Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.96 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.97 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İki Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Moment Diyagramı

5.3.7.16 Üçüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Üçüncü Yük Parametresinin Belirlenmesi

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için tablo tekrar hazırlanır:

Tablo 5.64 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_2 (tm)	N_2 (t)	ΔM_3 (tm)	ΔN_3 (t)
1	-339.032	-998.160	-247.637	-378.442	0.000	52.223
2	339.032	-998.160	80.196	-378.442	209.974	52.223
3	293.024	-951.696	80.196	-103.004	209.974	-49.754
4	293.024	-951.696	93.961	-103.004	1.082	-49.754
5	-293.024	-951.696	-192.274	-103.004	-207.810	-49.754
6	-339.032	-998.160	-192.274	-446.558	-207.810	-52.223
7	339.032	-998.160	223.162	-446.558	0.000	-52.223

Tablo 5.65 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{3,D}$	$N_{3,D}$	$N_{3,D}/N_p$	0.15	Δp_3	N_3	N/N_p	0.15	Δp_3
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1.233	-353.123	0.354	>0,15	0.885	-372.014	0.373	>0,15	0.885
3	1.014	-127.125	0.134	<0,15	1.014	-109.127	0.115	<0,15	1.014
4	183.977	-127.125	0.134	<0,15	183.977	-109.127	0.115	<0,15	183.977
5	0.485	-127.125	0.134	<0,15	0.485	-109.127	0.115	<0,15	0.485
6	0.706	-471.877	0.473	>0,15	0.123	-452.986	0.454	>0,15	0.123
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi değeri $\Delta p_3 = 0.123$ bulunmuştur. Üçüncü yük parametresi;

$$p_3 = p_2 + \Delta p_3$$

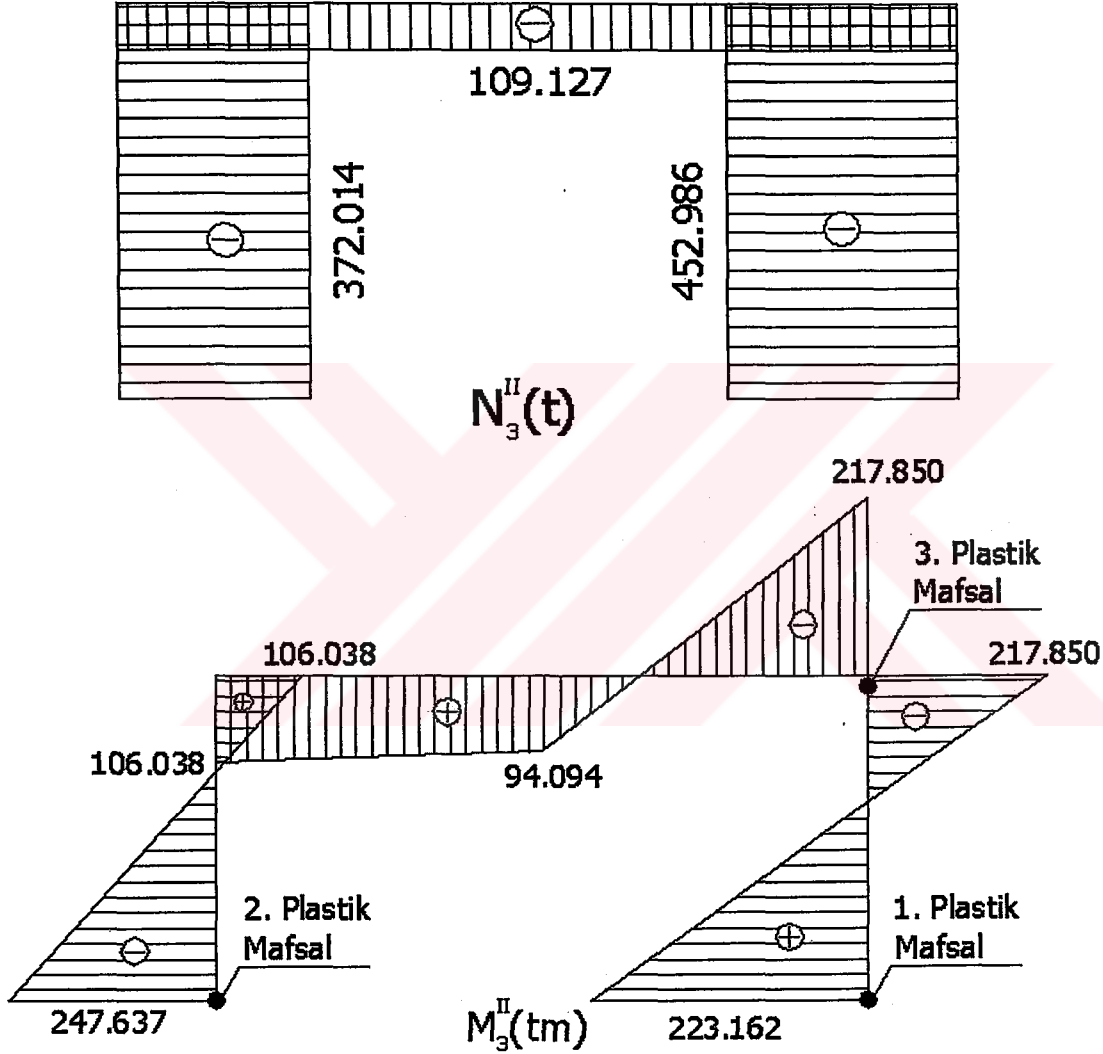
$$p_3 = 1.840 + 0.123 = 1.963 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_3 = 1.963$ kat arttırılması sonucu ikinci plastik mafsal oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_3^{\text{II}} = \delta_2^{\text{II}} + \Delta p_3^{\text{II}} \delta_{x,1}$$

$$\delta_3^{\text{II}} = 0.009323 + 0.123 \times 0.021791 = 0.012003 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_3 = 1.963$ olduğunda üçüncü plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.012003 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.98’de sunulmuştur.



Şekil 5.98 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İçin Üçüncü Yük Parametresi Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (6) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (6) numaralı kesite üçüncü plastik mafsall konulmuştur.

5.3.7.17 Üçüncü Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

Elemanların kesit özellikleri ve çerçeveye uygulanan yükleme değişmemektedir. Başlangıç değeri olması açısından düşey yüklemekten dolayı oluşan eksenel kuvvet değerleri II. mertebe lineer elastik kısımdan yazılacak olursa;

$$N_1 = -412.500 \text{ t.}$$

$$N_4 = -412.500 \text{ t.}$$

5.3.7.18 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 1 numaralı elemanda $N_1^1 = 412.500 \text{ t.}$ eksenel basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_1^1}{E I_1}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.003444$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.234732$ elde edilir. Bu

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.992648$ ve $m_k = 2.001840$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^u] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22336 & 44878 & 0 & -22336 & 44878 \\ 0 & 44878 & 119564 & 0 & -44878 & 59947 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22336 & -44878 & 0 & 22336 & -44878 \\ 0 & 44878 & 59947 & 0 & -44878 & 119564 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsal bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{Sol,Mafsal}^{II}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 5491 & 0 & 0 & -5491 & 22377 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -5491 & 0 & 0 & 5491 & 22377 \\ 0 & 22377 & 0 & 0 & -22377 & 89507 \end{bmatrix}$$

II. mertebe etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsalsal bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_1] = [\alpha_1][K_{Sol,Mafsal}^{II}][\alpha_1]^T$ işleminden 1. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 5491 & 0 & 0 & -5491 & 0 & -22377 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5491 & 0 & 0 & 5491 & 0 & 22377 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ -22377 & 0 & 0 & 22377 & 0 & 89507 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 212100 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & 17427 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 92946 & 0 & -34855 & 46473 \\ -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 17427 & -34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & -34855 & 92946 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

Eleman global rijitlik matrisinin hesabında II. mertebe etkiler gözönüne alınacaktır. I. mertebe analiz sonucunda 4 numaralı elemanda $N_4^1 = 412.500$ t. aksenal basınç kuvveti mevcuttur.

$\alpha^2 = \frac{N_1^1}{E I_1}$ formülünden; $\alpha^2 = 0.003444$ ve dolayısıyla $\alpha L = 0.234732$ elde edilir. Bu

değer denklem 3.41 ve denklem 3.42 denklemlerinde yazılırsa; $m_j = 3.992648$ ve $m_k = 2.001840$ değerleri elde edilir. Bu değerler rijitlik matrisinde yerine konursa;

$$[K^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 22336 & 44878 & 0 & -22336 & 44878 \\ 0 & 44878 & 119564 & 0 & -44878 & 59947 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & -22336 & -44878 & 0 & 22336 & -44878 \\ 0 & 44878 & 59947 & 0 & -44878 & 119564 \end{bmatrix}$$

Sol ucunda mafsallı bulunan bir elemanın lokal koordinatlara göre rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K_{\text{Sol,Mafsallı}}^{\text{II}}] = \begin{bmatrix} 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

II. mertebe etkileri gözönüne alınan ve sol ucunda mafsallı bulunan elemanın global rijitlik matrisini yazmak için;

$$[\alpha_4] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere $[K_4] = [\alpha_4] [K_{Sol, Mafsal}^II] [\alpha_4]^T$ işleminden 4. elemanın global rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$[K_4] = \begin{array}{ccccc} & \begin{matrix} 13 & 14 & 15 & 10 & 11 & 12 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 222600 & 0 & 0 & -222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -222600 & 0 & 0 & 222600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 100 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \rangle$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 217591 & 0 & 22377 & -212100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 240027 & 34855 & 0 & -17427 & 34855 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 22377 & 34855 & 182453 & 0 & 0 & -34855 & 46473 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -212100 & 0 & 0 & 424200 & 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & -212100 & 0 & 0 \\ 0 & -17427 & -34855 & 0 & 34855 & 0 & 0 & 0 & -17427 & 34855 & -17427 & 34855 \\ 0 & 34855 & 46473 & 0 & 0 & 185892 & 0 & 0 & -34855 & 46473 & -34855 & 46473 \\ 0 & 0 & 0 & -212100 & 0 & 0 & 212100 & 0 & 240027 & -34855 & -34855 & 92946 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -17427 & -34855 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_s] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 68.5281 & 0.240 & -12.347 & 68.528 & -18.431 & 1.476 & 68.528 & -0.240 & 6.083 \\ 0.240 & 0.449 & -0.059 & 0.240 & 0.220 & -0.056 & 0.240 & 0.000 & -0.055 \\ -12.347 & -0.059 & 3.030 & -12.347 & 4.523 & -0.362 & -12.347 & 0.059 & -1.493 \\ 68.528 & 0.240 & -12.347 & 69.000 & -18.431 & 1.476 & 69.000 & -0.240 & 6.083 \\ -18.431 & 0.220 & 4.523 & -18.431 & 12.028 & -0.026 & -18.431 & 0.229 & -4.412 \\ 1.476 & -0.056 & -0.362 & 1.476 & -0.026 & 0.733 & 1.476 & -0.240 & 0.055 \\ 68.528 & 0.240 & -12.347 & 69.000 & -18.431 & 1.476 & 69.7-471 & -0.240 & 6.083 \\ v0.240 & 0.000 & 0.059 & -0.240 & 0.229 & 0.056 & -0.240 & 0.449 & 0.055 \\ 6.083 & -0.055 & -1.493 & 6.083 & -4.412 & -0.336 & 6.083 & 0.055 & 2.919 \end{bmatrix}$$

5.3.7.19 Eleman Uç Deplasmanları ve Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Düğüm noktalarının global deplasmanları denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

$$\langle \delta_g \rangle^T = 10^{-3} \langle 68.528 - 0.240 - 12.347 \ 68.528 - 18.431 \ 1.476 \ 68.528 - 0.240 - 6.083 \rangle$$

Düğüm noktalarının global deplasmanlarından, süreklilik koşulu dikkate alınır ise çerçeve sistem elemanlarının global uç deplasmanları aşağıdaki gibi yazılır.

1 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_1 \rangle^T = \langle 0 \ 0 \ 0 \ 0.068528 \ -0.000240 \ -0.012347 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_2 \rangle^T = \langle 0.068528 \ -0.000240 \ -0.012347 \ 0.068528 \ -0.018431 \ 0.001476 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_3 \rangle^T = \langle 0.068528 \ -0.018431 \ 0.001476 \ 0.068528 \ -0.000240 \ -0.006083 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \delta_4 \rangle^T = \langle 0 \ 0 \ 0 \ 0.068528 \ -0.000240 \ -0.006083 \rangle$$

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -100.000 \ -53.533 \ 0.000 \ 100.000 \ 53.533 \ 428.268 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle 0.000 \ -53.533 \ -428.268 \ 0.000 \ 53.533 \ 214.134 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle 0.000 \ -53.533 \ -214.134 \ 0.000 \ 53.533 \ 0.000 \rangle$$

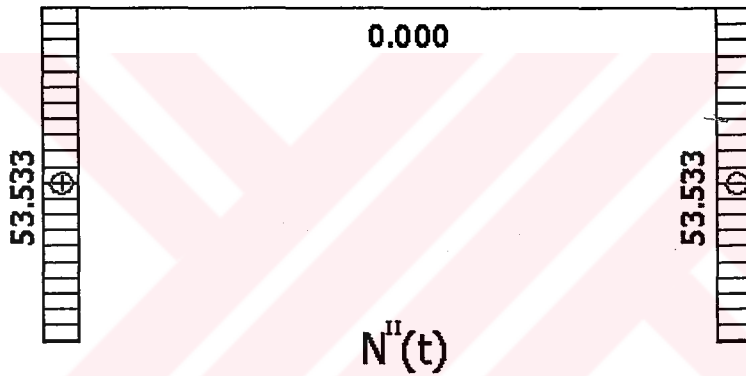
4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle 0.000 \ 53.533 \ 0.000 \ 0.000 \ -53.533 \ 0.000 \rangle$$

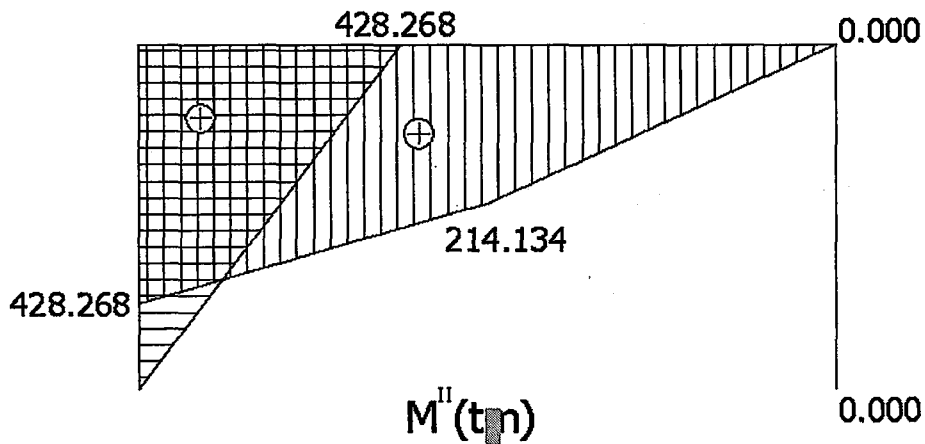
Tablo 5.66 Çerçeve Elemanının Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti ve Moment Değerleri

Elemanların Global Uç Kuvvetleri				
	1. Eleman	2. Eleman	3. Eleman	4. Eleman
$N_j(t)$	-53.533	0.000	0.000	53.533
$T_j(t)$	-100.000	-53.533	-53.333	0.000
$M_j(tm)$	0.000	-428.268	-214.134	0.000
$N_k(t)$	53.533	0.000	0.000	-53.533
$T_k(t)$	100.000	53.533	53.533	0.000
$M_k(tm)$	428.268	214.134	0.000	0.000

5.3.7.20 Üçüncü Mafsal Oluşmuş Düzlem Çerçevenin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramları



Şekil 5.99 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Normal Kuvvet Diyagramı



Şekil 5.100 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üç Mafsal Oluşmuş Çerçeve İçin Moment Diyagramı

5.3.7.21 Dördüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Dördüncü Yük Parametresinin (Göçme Parametresinin) Belirlenmesi

Elde edilen moment diyagramına göre yük parametresini belirlemek için tablo tekrar hazırlanır:

Tablo 5.67 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_2 (tm)	N_2 (t)	ΔM_3 (tm)	ΔN_3 (t)
1	-339.032	-998.160	-247.637	-372.014	0.000	53.533
2	339.032	-998.160	106.038	-372.014	428.268	53.533
3	293.024	-951.696	106.038	-109.127	428.268	0.000
4	293.024	-951.696	94.094	-109.127	214.134	0.000
5	-293.024	-951.696	-217.850	-109.127	0.000	0.000
6	-339.032	-998.160	-217.850	-452.986	0.000	-53.533
7	339.032	-998.160	223.162	-452.986	0.000	-53.533

Tablo 5.68 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{3,D}$	$N_{3,D}$	$N_{3,D}/N_p$	0.15	Δp_3	N_3	N/N_p	0.15	Δp_3
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.544	-348.641	0.349	>0,15	0.354	-353.046	0.354	>0,15	0.354
3	<u>0.437</u>	-109.127	0.115	<0,15	0.437	-109.127	0.115	<0,15	0.437
4	0.929	-109.127	0.115	<0,15	0.929	-109.127	0.115	<0,15	0.929
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi değeri $\Delta p_4 = 0.354$ bulunmuştur. Dördüncü yük parametresi;

$$p_4 = p_3 + \Delta p_4$$

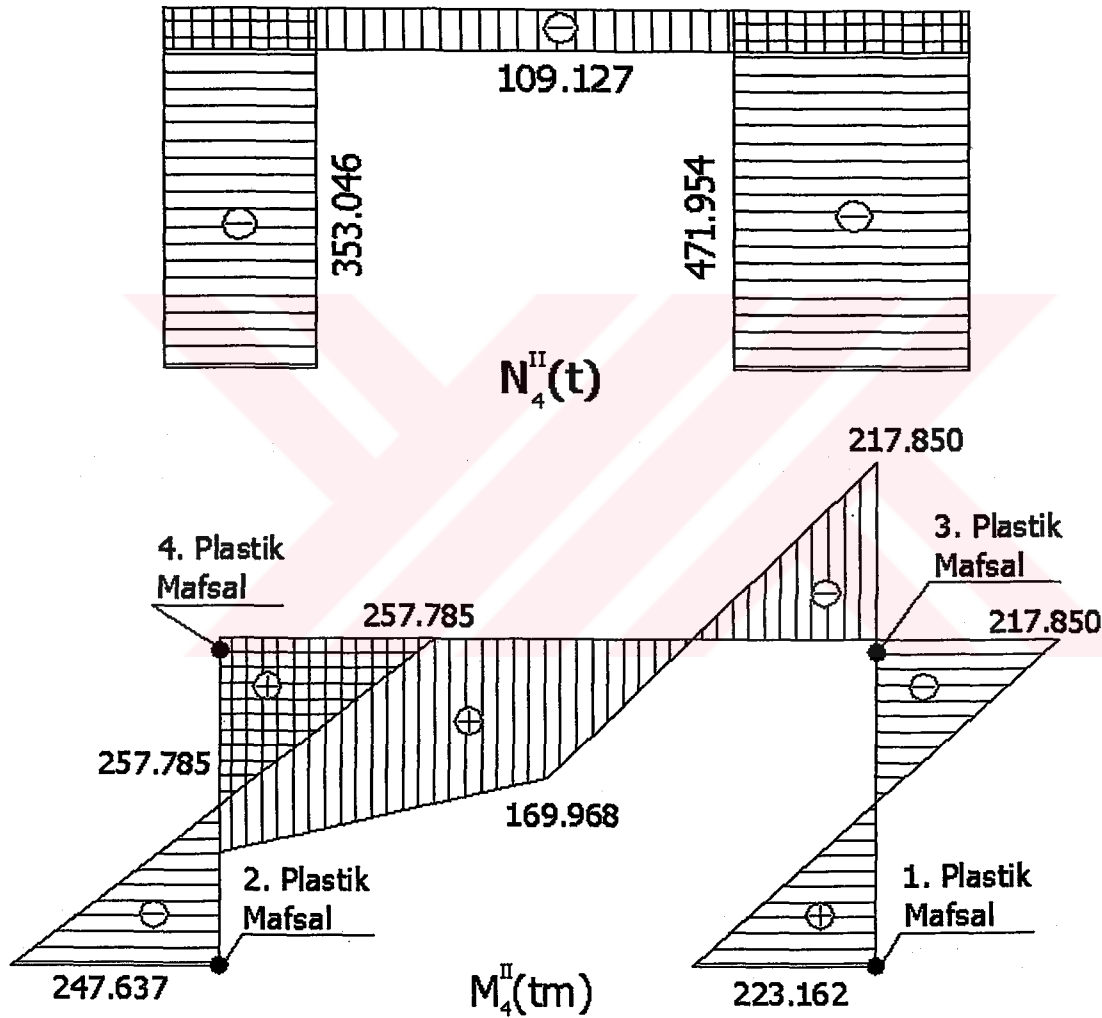
$$p_4 = 1.963 + 0.354 = 2.194 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_4 = 2.194$ kat arttırılması sonucu dördüncü plastik mafsal oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_4^{\text{II}} = \delta_3^{\text{II}} + \Delta p_4^{\text{II}} \delta_{x,1}$$

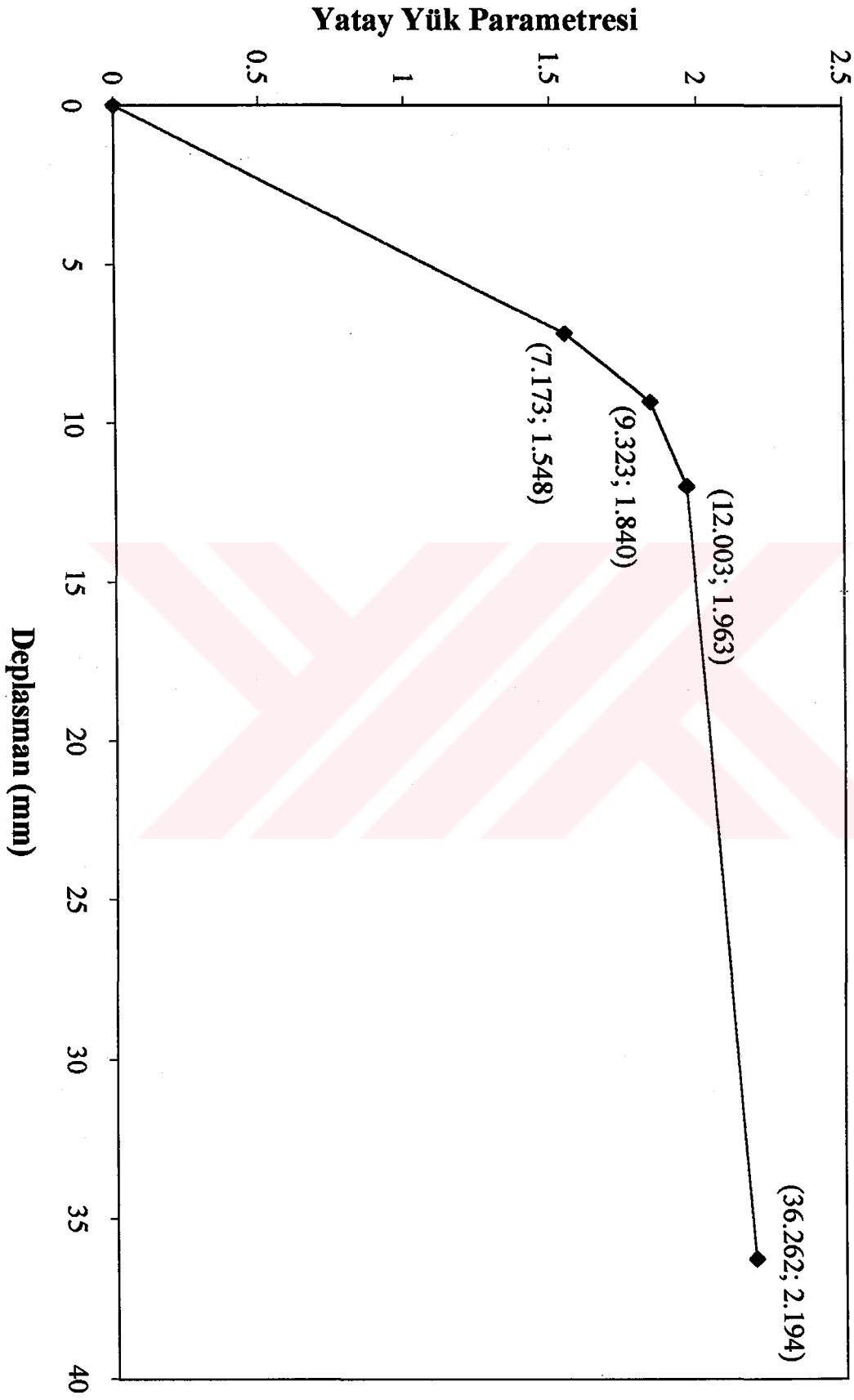
$$\delta_4^{\text{II}} = 0.012003 + 0.354 \times 0.068528 = 0.036262 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_4 = 2.194$ olduğunda dördüncü plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.036262 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.101'de sunulmuştur.



Şekil 5.101 Sadece Yatay Yükün Arttırıldığı İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İçin Dördüncü Yük Parametresi Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (2) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (2) Nolu kesite dördüncü plastik mafsall konulmuştur. Göçme halindeki değerler elde edilmiş olur.



Şekil 5.102 Sabit Düşey Yük Parametresi Altında Artan Yatay Yük İçin II. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$
Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi

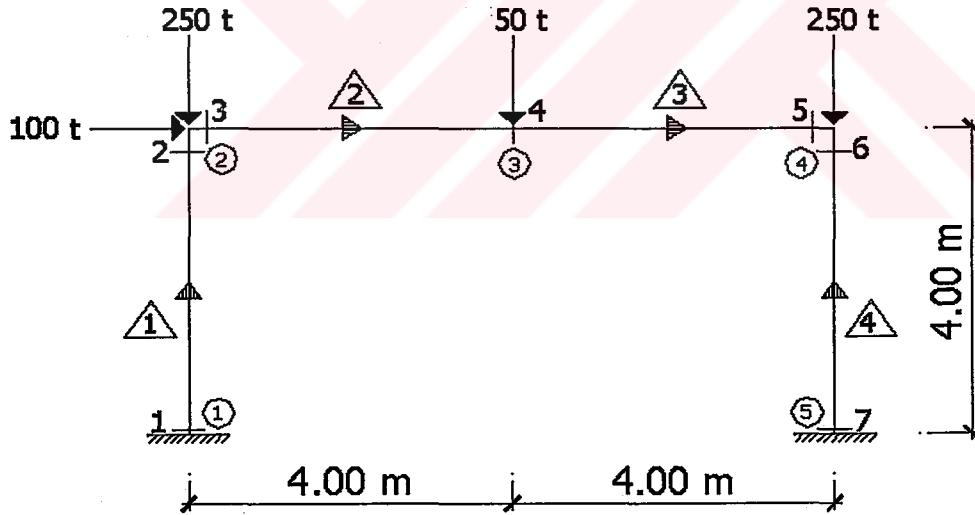
5.3.8 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap

I. mertebe lineer elastik hesap sonucunda bulunan kritik kesitler gözönüne alınarak LRFD etkileşim eğrileri ile I. mertebe elastoplastik hesap yapılacaktır.

- $\frac{N}{2N_p} + \frac{M}{M_p} = 1 \quad N/N_p \leq 0.20$
- $\frac{N}{N_p} + \frac{8}{9} \frac{M}{M_p} = 1 \quad N/N_p > 0.20$

Denge denklemleri şekildeğiştirmemiş eksen üzerinden yazılacağından I. mertebe teorisi bu kısımda geçerlidir. Malzemenin doğrusal olmayan davranışının incelenmesi bu hesapta esastır. Moment ve normal kuvvet etkisi altında akma davranışı LRFD yönetmeliğine göre $K(M,N)=0$ gözönüne alınacaktır (AISC, 1999).

Bu hesapta, diğer hesaplardan farklı olarak normal kuvvetin akma davranışına olan etkisi LRFD yönetmeliğine göre dikkate alınacaktır (Chen & Kim, 1997).



Şekil 5.103 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İçin Çerçevenin Yükleme Durumu ve Kritik Kesitler

5.3.8.1 Birinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İlk Yük Parametresinin Belirlenmesi

I. mertebe lineer elastik hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.69 yazılır:

Tablo 5.69 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	ΔM_1 (tm)	ΔN_1 (t)	N/N_p	0.20	Δp_1
1	-339.032	-998.160	-117.302	-257.615	0.258	>0.20	1.768
2	339.032	-998.160	29.840	-257.615	0.258	>0.20	2.973
3	293.024	-951.696	29.840	-63.215	0.066	<0.20	7.405
4	293.024	-951.696	60.299	-63.215	0.066	<0.20	4.184
5	-293.024	-951.696	-109.243	-63.215	0.066	<0.20	2.463
6	-339.032	-998.160	-109.243	-292.385	0.293	>0.20	1.726
7	339.032	-998.160	143.615	-292.385	0.293	>0.20	1.494

Akma Şartı $K(M,N)=0$ için:

- 3, 4 ve 5 No'lu kesitlerde $N/N_p \leq 0.20$ olduğundan normal kuvvetin etkisi ihmal edilmemiş ve yük parametresinin bulunmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$\Delta p = \frac{2M_p N_p - N_1 M_p - 2M_1 N_p}{2\Delta N M_p + 2\Delta M N_p}$$

- 1,2,6 ve 7 No'lu kesitlerde ise $N/N_p > 0.20$ olduğundan normal kuvvetin etkisi ihmal edilmemiş ve yük parametresinin bulunmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

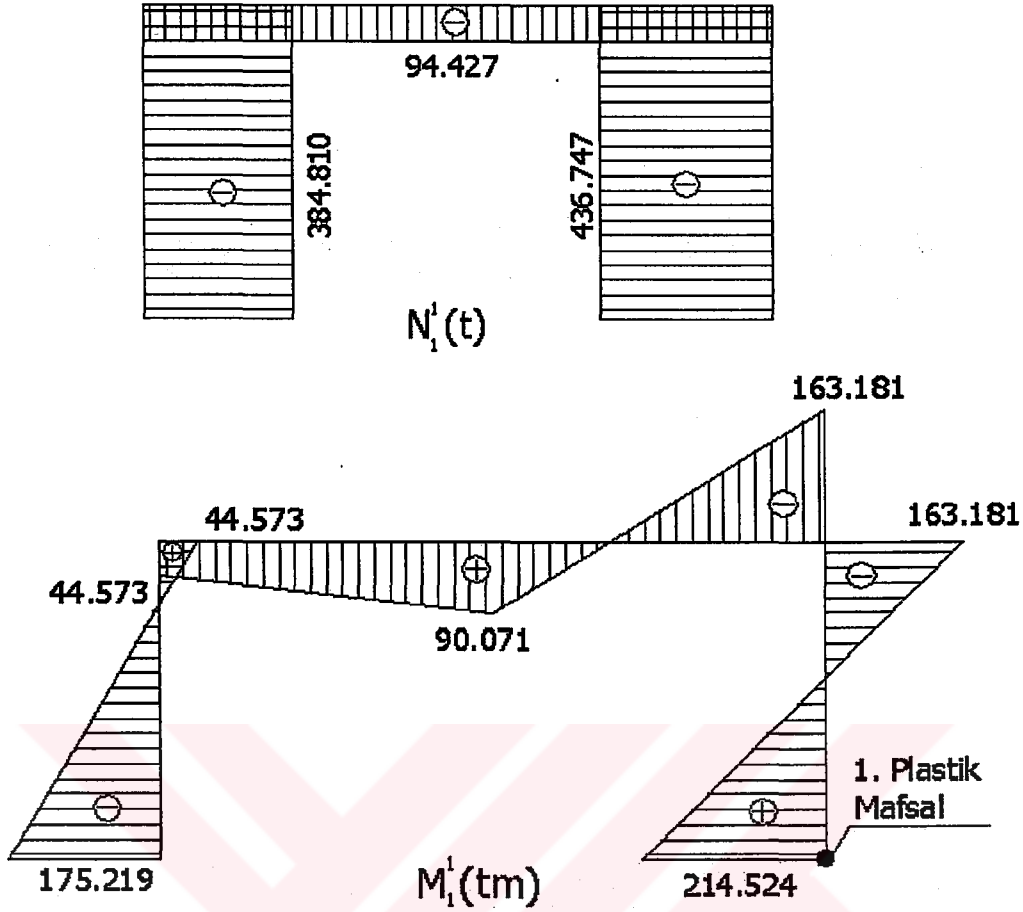
$$\Delta p = \frac{9M_p N_p - 9N_1 M_p - 8M_1 N_p}{9\Delta N M_p + 8\Delta M N_p}$$

Yük parametresi $\Delta p_1 = 1.494$ değerinde (7) numaralı kesitte ilk plastik mafsall oluşur. Yüklerin $\Delta p_1 = 1.494$ kat arttırılması sonucu ilk plastik mafsall oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_1^I = \Delta p_1^I \delta_{x,1}$$

$$\delta_1^I = 1.494 \times 0.004559 = 0.006811 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_1 = 1.494$ olduğunda ilk plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.006811 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.104'de sunulmuştur.



Şekil 5.104 LRFD Etkileşim Eğrileri ile Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Birinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (7) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (7) numaralı kesite ilk plastik mafsall konulmuştur. Bu kesit plastik hale geldikten sonraki kesit tesiri dağılımını bulmak için bu kesite adi mafsall konarak sistem aynı yükler altında tekrar çözülür.

5.3.8.2 Birinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

(7) numaralı kesite ilk mafsalın oluşması durumu için çerçevenin. çözümü Bölüm 5.3.3.2 ile aynı olduğundan tekrar gösterilmeyecek ve bu kısım için gerekli değerler bahsedilen bölümden alınacaktır.

5.3.8.3 İkinci Plastik Mafsalın Yerinin ve İkinci Yük Parametresinin Belirlenmesi

I. mertebe lineer elastik hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.70 hazırlanır:

Tablo 5.70 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_1 (tm)	N_1 (t)	ΔM_2 (tm)	ΔN_2 (t)
1	-339.032	-998.160	-175.219	-384.810	-207.718	-250.965
2	339.032	-998.160	44.573	-384.810	67.765	-250.965
3	293.024	-951.696	44.573	-94.427	67.765	-31.129
4	293.024	-951.696	90.071	-94.427	71.624	-31.129
5	-293.024	-951.696	-163.181	-94.427	-124.518	-31.129
6	-339.032	-998.160	-163.181	-436.747	-124.518	-299.035
7	339.032	-998.160	214.524	-436.747	0.000	-299.035

Tablo 5.71 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{2,D}$	$N_{2,D}$	$N_{2,D}/N_p$	0.20	Δp_2	N_2	N/N_p	0.20	Δp_2
1	0.393	-483.518	0.484	>0.20	0.195	-433.704	0.435	>0.20	0.195
2	2.076	-483.518	0.484	>0.20	1.160	-433.704	0.435	>0.20	1.160
3	3.224	-106.670	0.112	<0.20	3.224	-100.491	0.106	<0.20	3.224
4	2.466	-106.670	0.112	<0.20	2.466	-100.491	0.106	<0.20	2.466
5	0.892	-106.670	0.112	<0.20	0.892	-100.491	0.106	<0.20	0.892
6	0.580	-554.362	0.555	>0.20	0.215	-495.006	0.496	>0.20	0.215
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi $\Delta p_2 = 0.195$ arttırıldığında (1) numaralı kesitte ikinci plastik mafsal oluşur. İkinci yük parametresi;

$$p_2 = p_1 + \Delta p_2$$

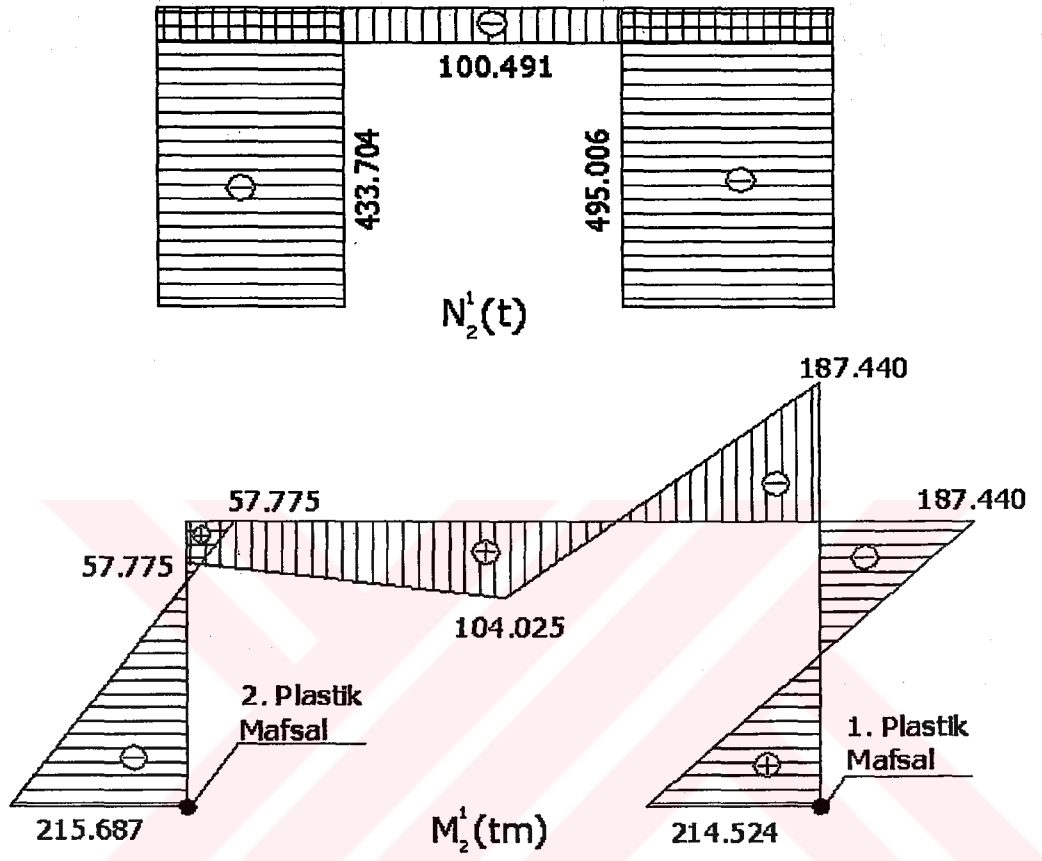
$$p_2 = 1.494 + 0.195 = 1.689 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_2 = 1.689$ kat arttırılması sonucu ikinci plastik mafsal oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_2^I = \delta_1^I + \Delta p_2^I \delta_{x,1}$$

$$\delta_2^I = 0.006811 + 0.195 \times 0.007740 = 0.008320 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_2 = 1.689$ olduğunda ikinci plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.008320 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.105’de sunulmuştur.



Şekil 5.105 LRFD Etkileşim Eğrileri ile Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ İkinci Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (1) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (1) numaralı kesite ikinci plastik mafsall konulmuştur.

5.3.8.4 İkinci Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

(1) numaralı kesite ikinci mafsalın oluşması durumu için çerçevenin çözümü Bölüm 5.3.3.7 ile aynı olduğundan tekrar gösterilmeyecek ve bu kısım için gerekli değerler bahsedilen bölümden alınacaktır.

5.3.8.5 Üçüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Üçüncü Yük Parametresinin Belirlenmesi

I. mertebe lineer elastik hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.72 hazırlanır:

Tablo 5.72 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_2 (tm)	N_2 (t)	ΔM_3 (tm)	ΔN_3 (t)
1	-339.032	-998.160	-215.687	-433.704	0.000	-225.000
2	339.032	-998.160	57.775	-433.704	161.572	-225.000
3	293.024	-951.696	57.775	-100.491	161.572	-59.607
4	293.024	-951.696	104.025	-100.491	61.572	-59.607
5	-293.024	-951.696	-187.440	-100.491	-238.428	-59.607
6	-339.032	-998.160	-187.440	-495.006	-238.428	-325.000
7	339.032	-998.160	214.524	-495.006	0.000	-325.000

Tablo 5.73 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{3,D}$	$N_{3,D}$	$N_{3,D}/N_p$	0.20	Δp_3	N_3	N/N_p	0.20	Δp_3
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1.039	-485.448	0.486	>0.20	0.482	-436.696	0.438	>0.20	0.482
3	1.287	-114.200	0.120	<0.20	1.287	-101.284	0.106	<0.20	1.287
4	2.453	-114.200	0.120	<0.20	2.453	-101.284	0.106	<0.20	2.453
5	0.364	-114.200	0.120	<0.20	0.364	-101.284	0.106	<0.20	0.364
6	<u>0.230</u>	-569.748	0.571	>0.20	0.013	-499.328	0.500	>0.20	0.013
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi $\Delta p_2 = 0.013$ artırıldığında (6) numaralı kesitte üçüncü plastik mafsal oluşur. Üçüncü yük parametresi;

$$p_3 = p_2 + \Delta p_3$$

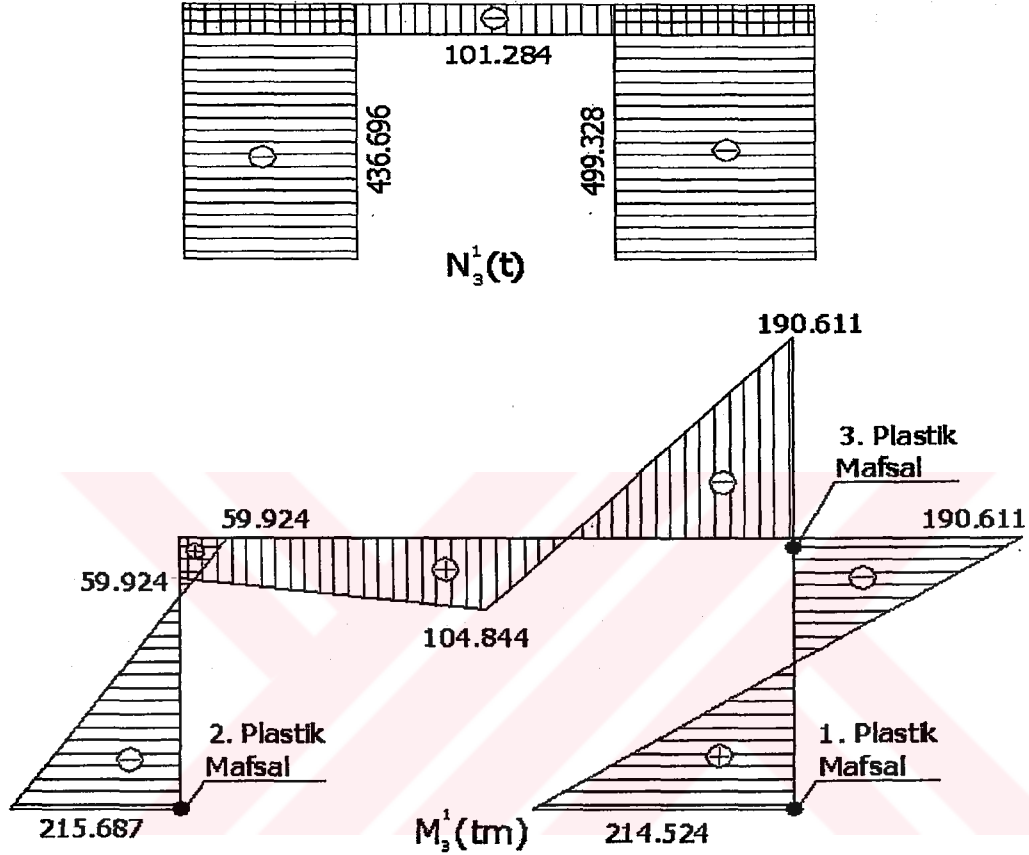
$$p_3 = 1.689 + 0.013 = 1.702 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_3 = 1.702$ kat artırılması sonucu üçüncü plastik mafsal olduğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_3^I = \delta_2^I + \Delta p_3^I \delta_{x,1}$$

$$\delta_3^I = 0.008320 + 0.013 \times 0.020887 = 0.008592 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_3 = 1.702$ olduğunda üçüncü plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.008592 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.106'da sunulmuştur.



Şekil 5.106 LRFD Etkileşim Eğrileri ile Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Üçüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (6) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (6) numaralı kesite üçüncü plastik mafsall konulmuştur.

5.3.8.6 Üçüncü (Yük Parametresi) Plastik Mafsalın Oluşması Hali İçin Çerçevenin Çözümü

(6) numaralı kesite ilk mafsallın oluşması durumu için çerçevenin çözümü Bölüm 5.3.3.12 ile aynı olduğundan tekrar gösterilmeyecek ve bu kısım için gerekli değerler bahsedilen bölümden alınacaktır.

5.3.8.7 Dördüncü Plastik Mafsalın Yerinin ve Dördüncü Yük Parametresinin (Göçme Parametresinin) Belirlenmesi

I. mertebe lineer elastik hesap kısmından mevcut yükler altında çerçevede oluşan moment değerleri alınır ve kesit numaralarına göre Tablo 5.74 hazırlanır:

Tablo 5.74 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Değerleri

Kesit No	M_p (tm)	N_p (t)	M_3 (tm)	N_3 (t)	ΔM_4 (tm)	ΔN_4 (t)
1	-339.032	-998.160	-215.687	-436.696	0.000	-225.000
2	339.032	-998.160	59.924	-436.696	400.000	-225.000
3	293.024	-951.696	59.924	-101.284	400.000	0.000
4	293.024	-951.696	104.844	-101.284	300.000	0.000
5	-293.024	-951.696	-190.611	-101.284	0.000	0.000
6	-339.032	-998.160	-190.611	-499.328	0.000	-325.000
7	339.032	-998.160	214.524	-499.328	0.000	-325.000

Tablo 5.75 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi ve Kontrol Değerleri

Kesit No	$\Delta p_{4,D}$	$N_{4,D}$	$N_{4,D}/N_p$	0.20	Δp_4	N_4	N/N_p	0.15	Δp_4
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.468	-541.925	0.543	>0.20	0.318	-508.282	0.509	>0.20	0.318
3	0.544	-101.284	0.106	<0.20	0.544	-101.284	0.106	<0.20	0.544
4	0.575	-101.284	0.106	<0.20	0.575	-101.284	0.106	<0.20	0.575
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yük parametresi $\Delta p_3 = 0.318$ arttırıldığında (4) numaralı kesitte dördüncü plastik mafsal oluşur.

Dördüncü (Göçme) yük parametresi;

$$p_4 = p_3 + \Delta p_4$$

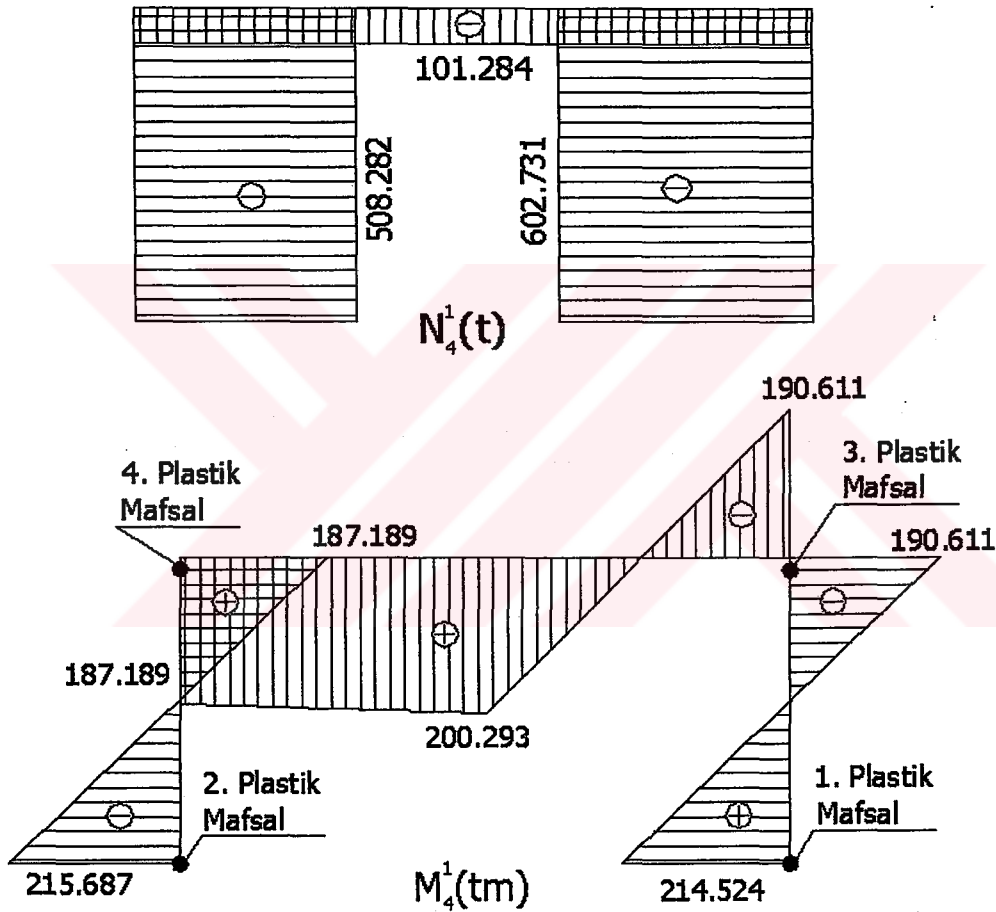
$$p_4 = 1.702 + 0.318 = 2.020 \text{ elde edilir.}$$

Yüklerin $p_4 = 2.020$ kat arttırılması sonucu ikinci plastik mafsal oluştuğu esnada çerçevenin 4. serbestlik derecesinin deplasman değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\delta_4^1 = \delta_3^1 + \Delta p_4^1 \delta_{x,1}$$

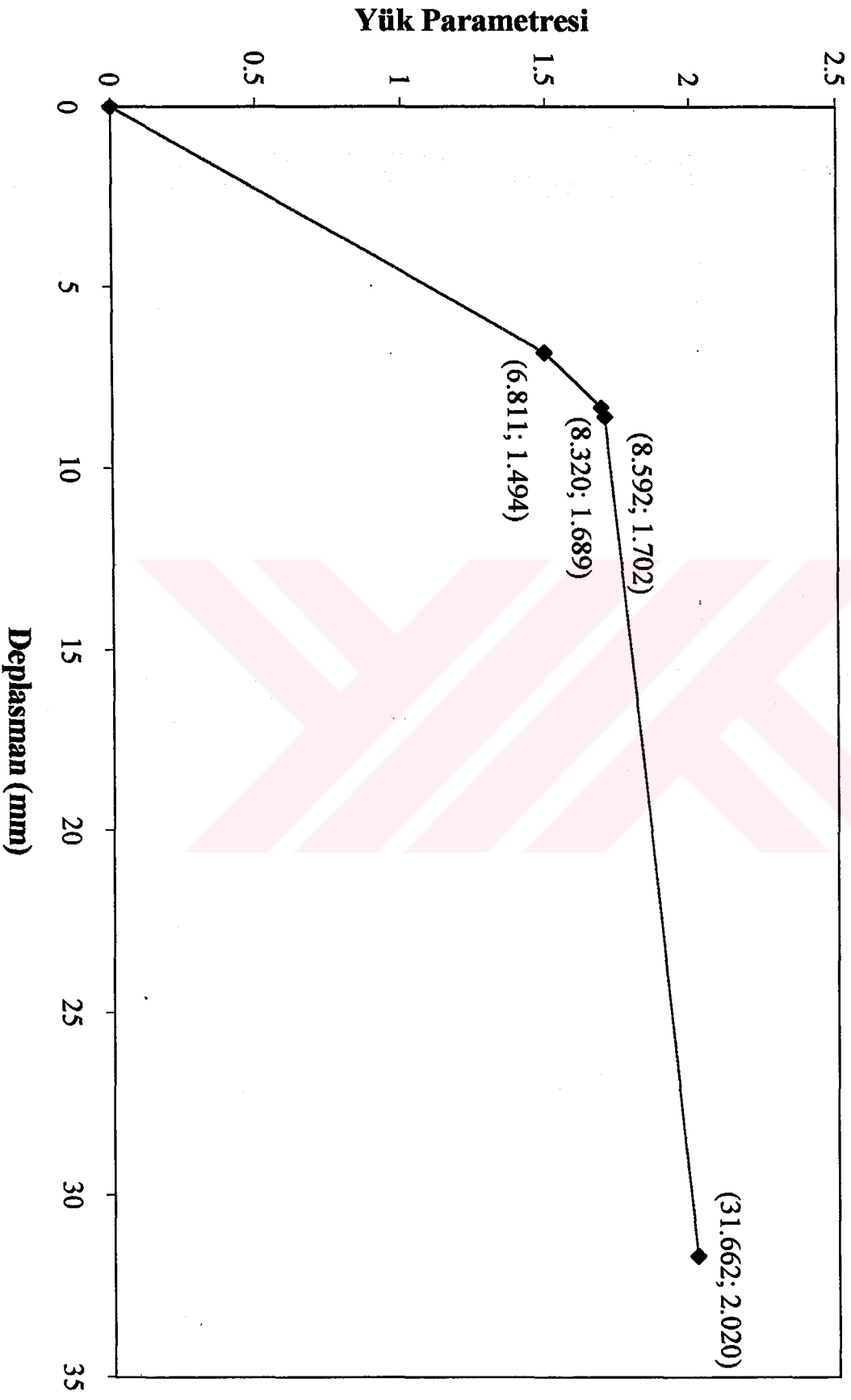
$$\delta_4^1 = 0.008592 + 0.318 \times 0.072546 = 0.031662 \text{ m.}$$

Yük parametresi $p_4 = 2.020$ olduğunda dördüncü plastik mafsall oluşmakta ve çerçevenin tepe noktası deplasmanı (4. serbestlik derecesinin deplasman değeri) 0.031662 m. olmaktadır. Yük parametresi ile çarpılmış normal kuvvet ve moment değerleri Şekil 5.107'de sunulmuştur.



Şekil 5.107 LRFD Etkileşim Eğrileri ile Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Dördüncü Yük Parametresi İçin Normal Kuvvet ve Moment Diyagramı

Kesit (2) plastik moment kapasitesine eriştiğinden dolayı artık daha fazla moment alamayacaktır. Bu durumu temsil etmek amacıyla (2) No'lu kesite dördüncü plastik mafsall konulmuştur. Göçme halindeki değerler elde edilmiş olur.



Şekil 5.108 LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M,N)=0$ Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi

5.3.9 Rankine-Merchant Yaklaşık Yük Parametresi Yöntemi

Rankine-Merchant yöntemi ile yaklaşık göçme yük parametresi bulunacaktır. Rankine-Merchant yöntemi denklem 4.61 kullanılarak uygulanacaktır.

Akma davranışında sadece moment etkisi gözönüne alındığı durum için;

$$\frac{1}{p_R} = \frac{1}{3.084} + \frac{1}{148}$$

$p_R = 3.021$ bulunmuştur.

Akma davranışında moment ve normal kuvvet etkisinin birlikte gözönüne alındığı durum için;

$$\frac{1}{p_R} = \frac{1}{2.066} + \frac{1}{148}$$

$p_R = 2.038$ bulunmuştur.

Bir başka yaklaşık yük parametresi olan Wood yaklaşık yük parametresi ile hesap yapılabilir. Denklem 4.62'den;

$$\frac{148}{3.084} = 47.990 > 10 \text{ olduğundan}$$

$p_w = 3.084$ alınabilir.

5.4 Geometrik Non-Linear ve Yaklaşık II. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Yöntemleri ile Çok Katlı Örnek Çelik Çerçevenin İncelenmesi

Bu bölümde, geometrik non-linear ve yaklaşık II. mertebe lineer elastik çözüm yöntemlerinin bir örnek üzerinde karşılaştırmalı ve kapsamlı olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Çerçeve matris yöntem ve iteratif yöntemler kullanılarak incelenmiş ve aşağıda belirtilen işlemler ile ikinci mertebe çözüm yöntemleri irdelenmiştir.

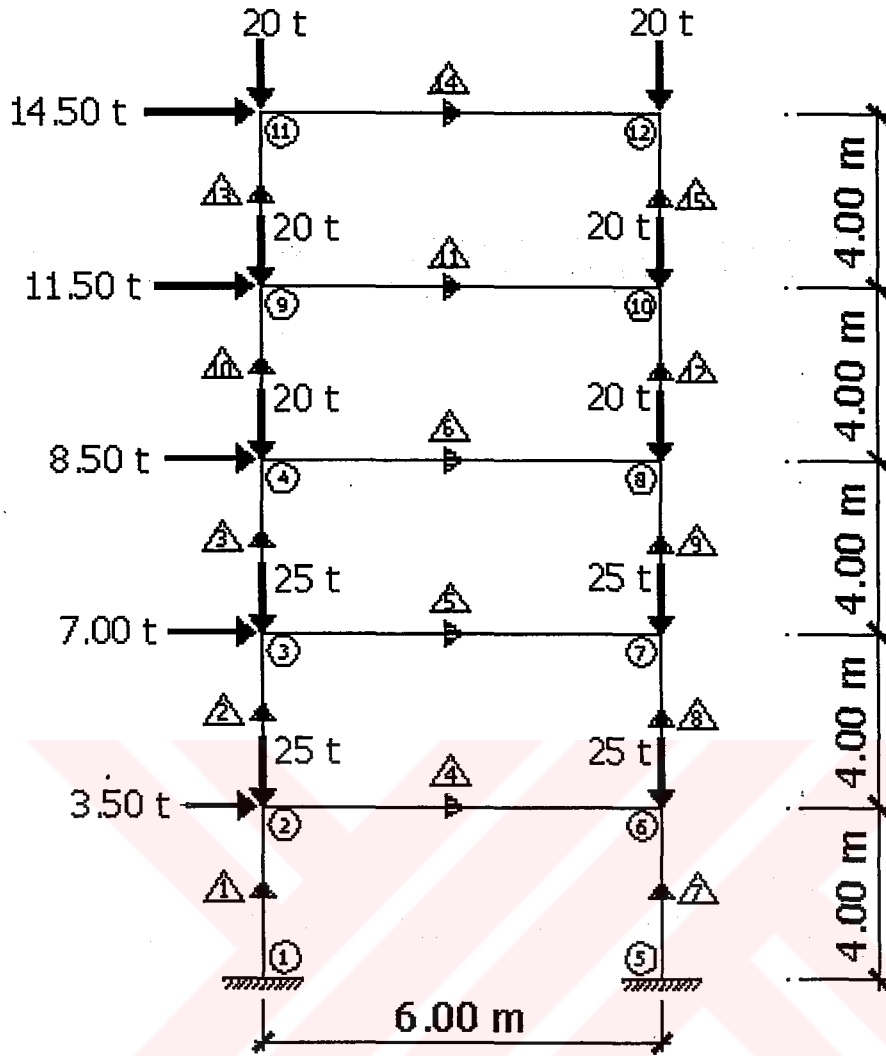
- I. Mertebe Lineer Elastik Hesap
- Stabilitate Fonksiyonları ile II. Mertebe Lineer Elastik Hesap
- Geometrik Rijitlik Matrisi ile II. Mertebe Lineer Elastik Hesap
- P- Δ Geometrik Rijitlik Matrisi Analizi ile II. Mertebe Lineer Elastik Hesap
- İteratif Yatay Yük Artımı Yöntemi ile Yaklaşık II. Mertebe Hesap
- İteratif Düşey Yük Artımı Yöntemi ile Yaklaşık II. Mertebe Hesap

5.4.1 Sayısal Uygulamada Kullanılan Çerçevenin Özellikleri

İkinci mertebe çözüm yöntemlerinin bir örnek üzerinde karşılaştırmalı olarak incelenmesi amacıyla beş katlı ve tek açıklıklı çelik bir çerçeve seçilmiştir.

5.4.2 Sayısal Uygulamada Kullanılan Çerçevenin Geometrik Özellikleri

Bu çerçevenin yükleme durumu ve çubukların konumları aşağıda verilmiştir. Şekil 5.109'dan da görüldüğü gibi 6 metre açıklıklı ve her kat yüksekliği 4 metre olan beş katlı bir çerçeve seçilmiştir. Yükleme ve çubuk elemanların numaralandırılması şekildeki gibidir.



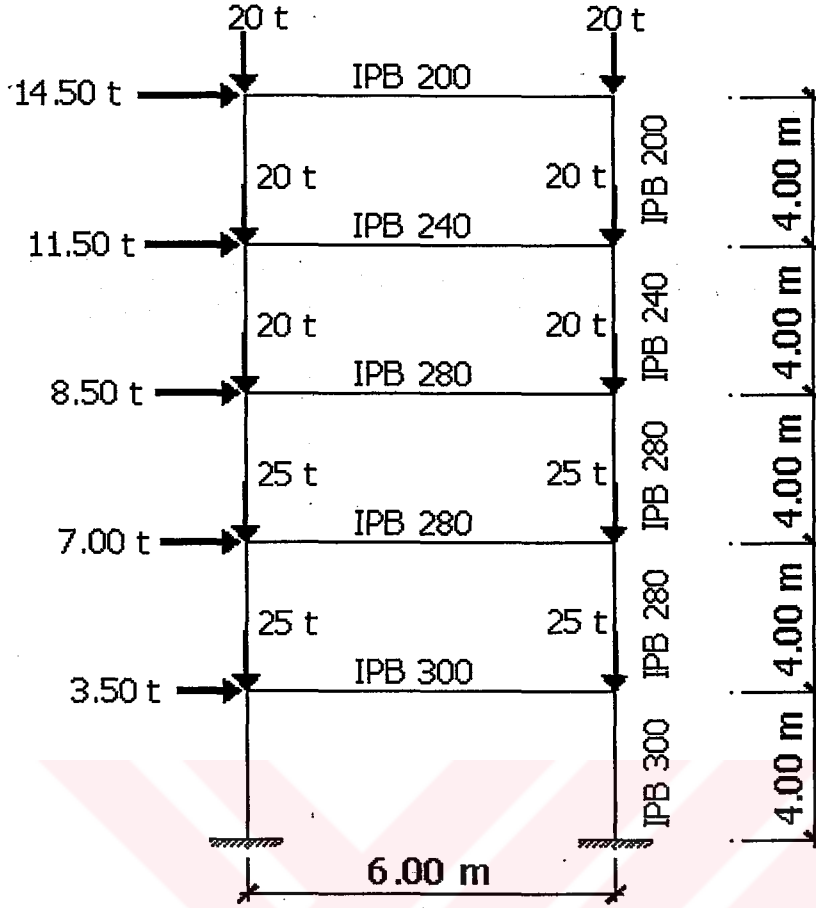
Şekil 5.109 Çerçevenin Yükleme Durumu ve Çubukların Konumu

5.4.3 Sayısal Uygulamada Kullanılan Çerçevenin Malzeme Özellikleri ve Yükleme Durumu

Sistemde kullanılan profiller IPB profilleri olup malzeme ST 37 seçilmiştir. Bu profillerin kesit özellikleri Tablo 5.76’da sunulmuştur.

Tablo 5.76 Seçilen Kolon ve Kiriş Elemanların Kesit Özellikleri

Profil	F (cm ²)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)	i _x (cm)
IPB 300v	303	59200	3482	13.9
IPB 280v	240	39550	2552	12.8
IPB 240v	200	24290	1799	11.0
IPB 200v	131	10639	967	9.0



Şekil 5.110 Çerçevenin Kesit Özellikleri

5.4.4 I. Mertebe Lineer Elastik Hesap

5.4.4.1 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Eleman global rijitlik matrisleri denklem 3.25 ile aşağıda hesaplanmıştır. Eleman global rijitlik matrislerinin satır ve sütunlarına serbestlik dereceleri yazılmıştır.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \begin{bmatrix} 2331 & 0 & -4662 & -2331 & 0 & -4662 \\ 0 & 159075 & 0 & 0 & -159075 & 0 \\ -4662 & 0 & 12432 & 4662 & 0 & 6216 \\ -2331 & 0 & 4662 & 2331 & 0 & 4662 \\ 0 & -159075 & 0 & 0 & 159075 & 0 \\ -4662 & 0 & 6216 & 4662 & 0 & 12432 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1557 & 0 & -3115 & -1557 & 0 & -3115 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 8306 & 3115 & 0 & 4153 \\ -1557 & 0 & 3115 & 1557 & 0 & 3115 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 4153 & 3115 & 0 & 8306 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 1557 & 0 & -3115 & -1557 & 0 & -3115 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 8306 & 3115 & 0 & 4153 \\ -1557 & 0 & 3115 & 1557 & 0 & 3115 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 4153 & 3115 & 0 & 8306 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

4. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_4] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 16 & 17 & 18 \\ 106050 & 0 & 0 & -106050 & 0 & 0 \\ 0 & 691 & 2072 & 0 & -691 & 2072 \\ 0 & 2072 & 8288 & 0 & -2072 & 4144 \\ -106050 & 0 & 0 & 106050 & 0 & 0 \\ 0 & -691 & -2072 & 0 & 691 & -2072 \\ 0 & 2072 & 4144 & 0 & -2072 & 8288 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \end{matrix}$$

5. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_5] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 19 & 20 & 21 \\ 84000 & 0 & 0 & -84000 & 0 & 0 \\ 0 & 461 & 1384 & 0 & -461 & 1384 \\ 0 & 1384 & 5537 & 0 & -1384 & 2769 \\ -84000 & 0 & 0 & 84000 & 0 & 0 \\ 0 & -461 & -1384 & 0 & 461 & -1384 \\ 0 & 1384 & 2769 & 0 & -1384 & 5537 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 19 \\ 20 \\ 21 \end{matrix}$$

6. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_6] = \begin{bmatrix} 10 & 11 & 12 & 22 & 23 & 24 \\ 84000 & 0 & 0 & -84000 & 0 & 0 \\ 0 & 461 & 1384 & 0 & -461 & 1384 \\ 0 & 1384 & 5537 & 0 & -1384 & 2769 \\ -84000 & 0 & 0 & 84000 & 0 & 0 \\ 0 & -461 & -1384 & 0 & 461 & -1384 \\ 0 & 1384 & 2769 & 0 & -1384 & 5537 \end{bmatrix} \begin{matrix} 10 \\ 11 \\ 12 \\ 22 \\ 23 \\ 24 \end{matrix}$$

7. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_7] = \begin{bmatrix} 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 \\ 2331 & 0 & -4662 & -2331 & 0 & -4662 \\ 0 & 159075 & 0 & 0 & -159075 & 0 \\ -4662 & 0 & 12432 & 4662 & 0 & 6216 \\ -2331 & 0 & 4662 & 2331 & 0 & 4662 \\ 0 & -159075 & 0 & 0 & 159075 & 0 \\ -4662 & 0 & 6216 & 4662 & 0 & 12432 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \end{matrix}$$

8. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_8] = \begin{bmatrix} 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \\ 1557 & 0 & -3115 & -1557 & 0 & -3115 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 8306 & 3115 & 0 & 4153 \\ -1557 & 0 & 3115 & 1557 & 0 & 3115 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 4153 & 3115 & 0 & 8306 \end{bmatrix} \begin{matrix} 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \\ 20 \\ 21 \end{matrix}$$

9. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_9] = \begin{bmatrix} 19 & 20 & 21 & 22 & 23 & 24 \\ 1557 & 0 & -3115 & -1557 & 0 & -3115 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 8306 & 3115 & 0 & 4153 \\ -1557 & 0 & 3115 & 1557 & 0 & 3115 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 4153 & 3115 & 0 & 8306 \end{bmatrix} \begin{matrix} 19 \\ 20 \\ 21 \\ 22 \\ 23 \\ 24 \end{matrix}$$

10. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_{10}] = \begin{bmatrix} 10 & 11 & 12 & 25 & 26 & 27 \\ 956 & 0 & -1919 & -956 & 0 & -1913 \\ 0 & 105000 & 0 & 0 & -105000 & 0 \\ -1913 & 0 & 5101 & 1913 & 0 & 2550 \\ -956 & 0 & 1913 & 956 & 0 & 1913 \\ 0 & -105000 & 0 & 0 & 105000 & 0 \\ -1913 & 0 & 2550 & 1913 & 0 & 5101 \end{bmatrix} \begin{matrix} 10 \\ 11 \\ 12 \\ 25 \\ 26 \\ 27 \end{matrix}$$

11. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_{11}] = \begin{bmatrix} 25 & 26 & 27 & 28 & 29 & 30 \\ 7000 & 0 & 0 & -7000 & 0 & 0 \\ 0 & 283 & 850 & 0 & -283 & 850 \\ 0 & 850 & 3401 & 0 & -850 & 1700 \\ -7000 & 0 & 0 & 7000 & 0 & 0 \\ 0 & -283 & -850 & 0 & 283 & -850 \\ 0 & 850 & 1700 & 0 & -850 & 3401 \end{bmatrix} \begin{matrix} 25 \\ 26 \\ 27 \\ 28 \\ 29 \\ 30 \end{matrix}$$

12. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_{12}] = \begin{bmatrix} 22 & 23 & 24 & 28 & 29 & 30 \\ 956 & 0 & -1919 & -956 & 0 & -1913 \\ 0 & 105000 & 0 & 0 & -105000 & 0 \\ -1913 & 0 & 5101 & 1913 & 0 & 2550 \\ -956 & 0 & 1913 & 956 & 0 & 1913 \\ 0 & -105000 & 0 & 0 & 105000 & 0 \\ -1913 & 0 & 2550 & 1913 & 0 & 5101 \end{bmatrix} \begin{matrix} 22 \\ 23 \\ 24 \\ 28 \\ 29 \\ 30 \end{matrix}$$

13. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_{13}] = \begin{bmatrix} 25 & 26 & 27 & 31 & 32 & 33 \\ 419 & 0 & -838 & -419 & 0 & -838 \\ 0 & 68775 & 0 & 0 & -68775 & 0 \\ -838 & 0 & 2234 & 838 & 0 & 1117 \\ -419 & 0 & 838 & 419 & 0 & 838 \\ 0 & -68775 & 0 & 0 & 68775 & 0 \\ -838 & 0 & 1117 & 838 & 0 & 2234 \end{bmatrix} \begin{matrix} 25 \\ 26 \\ 27 \\ 31 \\ 32 \\ 33 \end{matrix}$$

14. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_{14}] = \begin{bmatrix} 31 & 32 & 33 & 34 & 35 & 36 \\ 45850 & 0 & 0 & -45850 & 0 & 0 \\ 0 & 124 & 372 & 0 & -124 & 372 \\ 0 & 372 & 1489 & 0 & -372 & 745 \\ -45850 & 0 & 0 & 45850 & 0 & 0 \\ 0 & -124 & -372 & 0 & 124 & -372 \\ 0 & 372 & 745 & 0 & -372 & 1489 \end{bmatrix} \begin{matrix} 31 \\ 32 \\ 33 \\ 34 \\ 35 \\ 36 \end{matrix}$$

15. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

$$[K_{15}] = \begin{bmatrix} 28 & 29 & 30 & 34 & 35 & 36 \\ 419 & 0 & -838 & -419 & 0 & -838 \\ 0 & 68775 & 0 & 0 & -68775 & 0 \\ -838 & 0 & 2234 & 838 & 0 & 1117 \\ -419 & 0 & 838 & 419 & 0 & 838 \\ 0 & -68775 & 0 & 0 & 68775 & 0 \\ -838 & 0 & 1117 & 838 & 0 & 2234 \end{bmatrix} \begin{matrix} 28 \\ 29 \\ 30 \\ 34 \\ 35 \\ 36 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü ve hesap sonucu elde edilen deplasmanlar vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 4 \quad -25 \quad 0 \quad 7 \quad -25 \quad 0 \quad 9 \quad -20 \quad 0 \quad 0 \quad -25 \quad 0 \quad 0 \quad -25 \quad 0 \\ 0 \quad -20 \quad 0 \quad 12 \quad -20 \quad 0 \quad 0 \quad -20 \quad 0 \quad 15 \quad -20 \quad 0 \quad 0 \quad -20 \quad 0 \rangle$$

$$\langle \delta \rangle^T = \langle 0.021780 \quad -0.000148 \quad -0.006062 \quad 0.064569 \quad -0.000331 \quad -0.008668 \\ 0.108897 \quad -0.000497 \quad -0.007958 \quad 0.021763 \quad -0.001235 \quad -0.006057 \\ 0.064527 \quad -0.002401 \quad -0.008665 \quad 0.108846 \quad -0.003187 \quad -0.007955 \\ 0.154940 \quad -0.000705 \quad -0.008266 \quad 0.154858 \quad -0.003741 \quad -0.008256 \\ 0.203342 \quad -0.000923 \quad -0.007277 \quad 0.203186 \quad -0.004105 \quad -0.007260 \rangle$$

5.4.4.2 Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur:

1 No'lu Eleman;

$$\langle \mathbf{P}_1 \rangle^T = \langle -22.506 \quad 23.611 \quad 63.854 \quad 22.506 \quad -23.611 \quad 26.171 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle \mathbf{P}_2 \rangle^T = \langle -20.755 \quad 22.971 \quad 46.921 \quad 20.755 \quad -22.971 \quad 36.099 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle \mathbf{P}_3 \rangle^T = \langle -17.247 \quad 21.009 \quad 33.019 \quad 17.247 \quad -21.009 \quad 35.968 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle \mathbf{P}_4 \rangle^T = \langle 1.749 \quad -24.360 \quad -73.092 \quad -1.749 \quad 24.360 \quad -73.069 \rangle$$

5 No'lu Eleman;

$$\langle \mathbf{P}_5 \rangle^T = \langle 3.492 \quad -23.038 \quad -69.118 \quad -3.492 \quad 23.038 \quad -69.108 \rangle$$

6 No'lu Eleman;

$$\langle \mathbf{P}_6 \rangle^T = \langle 4.255 \quad -20.787 \quad -62.366 \quad -4.255 \quad 20.787 \quad -62.358 \rangle$$

7 No'lu Eleman;

$$\langle \mathbf{P}_7 \rangle^T = \langle -22.494 \quad 196.389 \quad -63.812 \quad 22.494 \quad -196.389 \quad 26.164 \rangle$$

8 No'lu Eleman;

$$\langle \mathbf{P}_8 \rangle^T = \langle -20.745 \quad 147.029 \quad 46.905 \quad 20.745 \quad -147.029 \quad 36.075 \rangle$$

9 No'lu Eleman;

$$\langle \mathbf{P}_9 \rangle^T = \langle -17.253 \quad 98.991 \quad 33.033 \quad 17.253 \quad -98.991 \quad 35.979 \rangle$$

10 No'lu Eleman;

$$\langle \mathbf{P}_{10} \rangle^T = \langle -13.002 \quad 21.796 \quad 26.397 \quad 13.002 \quad -21.796 \quad 25.611 \rangle$$

11 No'lu Eleman;

$$\langle \mathbf{P}_{11} \rangle^T = \langle 5.752 \quad -13.186 \quad -39.567 \quad -5.752 \quad 13.186 \quad -39.548 \rangle$$

12 No'lu Eleman;

$$\langle P_{12} \rangle^T = \langle -12.998 \quad -58.204 \quad 26.379 \quad 12.998 \quad -58.204 \quad 25.613 \rangle$$

13 No'lu Eleman;

$$\langle P_{13} \rangle^T = \langle -7.254 \quad 14.982 \quad 13.956 \quad 7.254 \quad -14.982 \quad 15.061 \rangle$$

14 No'lu Eleman;

$$\langle P_{14} \rangle^T = \langle 7.246 \quad -5.018 \quad -15.061 \quad -7.246 \quad 5.018 \quad -15.048 \rangle$$

15 No'lu Eleman;

$$\langle P_{15} \rangle^T = \langle -7.246 \quad 25.018 \quad 13.936 \quad 7.246 \quad -25.018 \quad 15.048 \rangle$$

5.4.5 Stabilite Fonksiyonları ile II. Mertebe Lineer Elastik Hesap

5.4.5.1 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Bu kısımda ikinci mertebe lineer elastik hesap için stabilite fonksiyonları ile hesaplanmış kolon rijitlik matrisleri verilecektir. Kiriş eleman global rijitlik matrislerinde bir değişiklik olmadığından birinci mertebe lineer elastik hesapta kullanılan matrisler kullanılacak ve bu kısımda hesabı gösterilmeyecektir.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

1. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_1 = -23.611$ t.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 2324 & 0 & -4660 & -2324 & 0 & -4660 \\ 0 & 159075 & 0 & 0 & -159075 & 0 \\ -4660 & 0 & 12419 & 4660 & 0 & 6219 \\ -2324 & 0 & 4660 & 2324 & 0 & 4660 \\ 0 & -159075 & 0 & 0 & 159075 & 0 \\ -4660 & 0 & 6219 & 4660 & 0 & 12419 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

2. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_2 = -22.971$ t.

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1550 & 0 & -3112 & -1550 & 0 & -3112 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3112 & 0 & 8293 & 3112 & 0 & 4156 \\ -1550 & 0 & 3112 & 1550 & 0 & 3112 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3112 & 0 & 4156 & 3112 & 0 & 8293 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

3. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_3 = -21.009$ t.

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 1551 & 0 & -3112 & -1551 & 0 & -3112 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3112 & 0 & 8294 & 3112 & 0 & 4156 \\ -1551 & 0 & 3112 & 1551 & 0 & 3112 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3112 & 0 & 4156 & 3112 & 0 & 8294 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

7. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

7. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_7 = -196.389$ t.

$$[K_7] = \begin{bmatrix} 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 \\ 2372 & 0 & -4642 & -2272 & 0 & -4642 \\ 0 & 159075 & 0 & 0 & -159075 & 0 \\ -4642 & 0 & 12327 & 4642 & 0 & 6242 \\ -2272 & 0 & 4642 & 2272 & 0 & 4642 \\ 0 & -159075 & 0 & 0 & 159075 & 0 \\ -4642 & 0 & 6242 & 4642 & 0 & 12327 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \end{matrix}$$

8. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

8. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_8 = -147.029$ t.

$$[K_8] = \begin{bmatrix} 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \\ 1513 & 0 & -3100 & -1513 & 0 & -3100 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3100 & 0 & 8227 & 3100 & 0 & 4173 \\ -1513 & 0 & 3100 & 1513 & 0 & 3100 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3100 & 0 & 4173 & 3100 & 0 & 8227 \end{bmatrix} \begin{matrix} 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \\ 20 \\ 21 \end{matrix}$$

9. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

9. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_9 = -98.991$ t.

$$[K_9] = \begin{bmatrix} 19 & 20 & 21 & 22 & 23 & 24 \\ 1528 & 0 & -3105 & -1528 & 0 & -3105 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3105 & 0 & 8253 & 3105 & 0 & 4166 \\ -1528 & 0 & 3105 & 1528 & 0 & 3105 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3105 & 0 & 4166 & 3105 & 0 & 8253 \end{bmatrix} \begin{matrix} 19 \\ 20 \\ 21 \\ 22 \\ 23 \\ 24 \end{matrix}$$

10. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

10. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_{10} = -21.769$ t.

$$[K_{10}] = \begin{bmatrix} 10 & 11 & 12 & 25 & 26 & 27 \\ 950 & 0 & -1911 & -950 & 0 & -1911 \\ 0 & 105000 & 0 & 0 & -105000 & 0 \\ -1911 & 0 & 5089 & 1911 & 0 & 2553 \\ -950 & 0 & 1911 & 950 & 0 & 1911 \\ 0 & -105000 & 0 & 0 & 105000 & 0 \\ -1911 & 0 & 2553 & 1911 & 0 & 5089 \end{bmatrix} \begin{matrix} 10 \\ 11 \\ 12 \\ 25 \\ 26 \\ 27 \end{matrix}$$

12. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

12. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_{12} = -58.204$ t.

$$[K_{12}] = \begin{bmatrix} 22 & 23 & 24 & 28 & 29 & 30 \\ 939 & 0 & -1907 & -939 & 0 & -1907 \\ 0 & 105000 & 0 & 0 & -105000 & 0 \\ -1907 & 0 & 5070 & 1907 & 0 & 2558 \\ -939 & 0 & 1907 & 939 & 0 & 1907 \\ 0 & -105000 & 0 & 0 & 105000 & 0 \\ -1907 & 0 & 2558 & 1907 & 0 & 5070 \end{bmatrix} \begin{matrix} 22 \\ 23 \\ 24 \\ 28 \\ 29 \\ 30 \end{matrix}$$

13. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

13. Eleman birinci merteye analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_{13} = -14.982$ t.

$$[K_{13}] = \begin{bmatrix} 25 & 26 & 27 & 31 & 32 & 33 \\ 414 & 0 & -836 & -414 & 0 & -836 \\ 0 & 68775 & 0 & 0 & -68775 & 0 \\ -836 & 0 & 2226 & 836 & 0 & 1119 \\ -414 & 0 & 836 & 414 & 0 & 836 \\ 0 & -68775 & 0 & 0 & 68775 & 0 \\ -836 & 0 & 1119 & 836 & 0 & 2226 \end{bmatrix} \begin{matrix} 25 \\ 26 \\ 27 \\ 31 \\ 32 \\ 33 \end{matrix}$$

15. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

15. Eleman birinci merteye analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_{15} = -25.018$ t.

$$[K_{15}] = \begin{bmatrix} 28 & 29 & 30 & 34 & 35 & 36 \\ 411 & 0 & -835 & -411 & 0 & -835 \\ 0 & 68775 & 0 & 0 & -68775 & 0 \\ -835 & 0 & 2221 & 835 & 0 & 1120 \\ -411 & 0 & 835 & 411 & 0 & 835 \\ 0 & -68775 & 0 & 0 & 68775 & 0 \\ -835 & 0 & 1120 & 835 & 0 & 2221 \end{bmatrix} \begin{matrix} 28 \\ 29 \\ 30 \\ 34 \\ 35 \\ 36 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü ve hesap sonucu elde edilen deplasmanlar vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 4 \quad -25 \quad 0 \quad 7 \quad -25 \quad 0 \quad 9 \quad -20 \quad 0 \quad 0 \quad -25 \quad 0 \quad 0 \quad -25 \quad 0 \\ 0 \quad -20 \quad 0 \quad 12 \quad -20 \quad 0 \quad 0 \quad -20 \quad 0 \quad 15 \quad -20 \quad 0 \quad 0 \quad -20 \quad 0 \rangle$$

$$\begin{aligned} \langle \delta \rangle^T = & \langle 0.022541 \quad -0.000127 \quad -0.006299 \quad 0.067187 \quad -0.000290 \quad -0.009041 \\ & 0.113346 \quad -0.000445 \quad -0.008273 \quad 0.022522 \quad -0.001256 \quad -0.006291 \\ & 0.067149 \quad -0.002442 \quad -0.009034 \quad 0.113298 \quad -0.003240 \quad -0.008262 \\ & 0.161148 \quad -0.000646 \quad -0.008572 \quad 0.161068 \quad -0.003800 \quad -0.008557 \\ & 0.211309 \quad -0.000862 \quad -0.007534 \quad 0.211152 \quad -0.004167 \quad -0.007511 \rangle \end{aligned}$$

5.4.5.2 Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur:

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -23.031 \quad 20.206 \quad 65.856 \quad 23.031 \quad -20.206 \quad 26.799 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle -21.477 \quad 20.513 \quad 49.138 \quad 21.477 \quad -20.513 \quad 37.794 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle -17.700 \quad 19.540 \quad 34.297 \quad 17.700 \quad -19.540 \quad 37.474 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle 1.946 \quad -25.306 \quad -75.937 \quad -1.946 \quad 25.306 \quad -75.901 \rangle$$

5 No'lu Eleman;

$$\langle P_5 \rangle^T = \langle 3.224 \quad -24.027 \quad -72.091 \quad -3.224 \quad 24.027 \quad -72.072 \rangle$$

6 No'lu Eleman;

$$\langle P_6 \rangle^T = \langle 4.020 \quad -21.599 \quad -64.814 \quad -4.020 \quad 21.599 \quad -64.782 \rangle$$

7 No'lu Eleman;

$$\langle P_7 \rangle^T = \langle -21.969 \quad 199.794 \quad -65.288 \quad 21.969 \quad -199.794 \quad 27.013 \rangle$$

8 No'lu Eleman;

$$\langle P_8 \rangle^T = \langle -20.023 \quad 149.487 \quad 48.889 \quad 20.023 \quad -149.487 \quad 37.766 \rangle$$

9 No'lu Eleman;

$$\langle P_9 \rangle^T = \langle -16.800 \quad 100.460 \quad 34.305 \quad 16.800 \quad -100.460 \quad 37.461 \rangle$$

10 No'lu Eleman;

$$\langle P_{10} \rangle^T = \langle -13.221 \quad 21.139 \quad 27.340 \quad 13.221 \quad -21.139 \quad 26.583 \rangle$$

11 No'lu Eleman;

$$\langle P_{11} \rangle^T = \langle 5.597 \quad -13.669 \quad -41.019 \quad -5.597 \quad 13.669 \quad -40.994 \rangle$$

12 No'lu Eleman;

$$\langle P_{12} \rangle^T = \langle -12.779 \quad -58.861 \quad 27.320 \quad 12.779 \quad -58.861 \quad 26.578 \rangle$$

13 No'lu Eleman;

$$\langle P_{13} \rangle^T = \langle -7.317 \quad 14.808 \quad 14.436 \quad 7.317 \quad -14.808 \quad 15.585 \rangle$$

14 No'lu Eleman;

$$\langle P_{14} \rangle^T = \langle 7.183 \quad -5.192 \quad -15.585 \quad -7.183 \quad 5.192 \quad -15.568 \rangle$$

15 No'lu Eleman;

$$\langle P_{15} \rangle^T = \langle -7.183 \quad 25.192 \quad 14.416 \quad 7.183 \quad -25.192 \quad 15.568 \rangle$$

5.4.6 Geometrik Rijitlik Matrisi ile II. Mertebe Lineer Elastik Hesap

5.4.6.1 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Bu kısımda ikinci mertebe lineer elastik hesap için geometrik rijitlik matrisi ile hesaplanmış kolon rijitlik matrisleri verilecektir. Kiriş eleman global rijitlik matrislerinde bir değişiklik olmadığından birinci mertebe lineer elastik hesapta kullanılan matrisler kullanılacak ve bu kısımda hesabı gösterilmeyecektir.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

1. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_1 = -23.611$ t.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 2324 & 0 & -4660 & -2324 & 0 & -4660 \\ 0 & 159075 & 0 & 0 & -159075 & 0 \\ -4660 & 0 & 12419 & 4660 & 0 & 6219 \\ -2324 & 0 & 4660 & 2324 & 0 & 4660 \\ 0 & -159075 & 0 & 0 & 159075 & 0 \\ -4660 & 0 & 6219 & 4660 & 0 & 12419 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

2. Eleman birinci merteye analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_2 = -22.971$ t.

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1550 & 0 & -3112 & -1550 & 0 & -3112 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3112 & 0 & 8293 & 3112 & 0 & 4156 \\ -1550 & 0 & 3112 & 1550 & 0 & 3112 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3112 & 0 & 4156 & 3112 & 0 & 8293 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

3. Eleman birinci merteye analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_3 = -21.009$ t.

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 1551 & 0 & -3112 & -1551 & 0 & -3112 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3112 & 0 & 8294 & 3112 & 0 & 4156 \\ -1551 & 0 & 3112 & 1551 & 0 & 3112 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3112 & 0 & 4156 & 3112 & 0 & 8294 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

7. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

7. Eleman birinci merteye analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_7 = -196.389$ t.

$$[K_7] = \begin{bmatrix} 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 \\ 2372 & 0 & -4642 & -2272 & 0 & -4642 \\ 0 & 159075 & 0 & 0 & -159075 & 0 \\ -4642 & 0 & 12327 & 4642 & 0 & 6242 \\ -2272 & 0 & 4642 & 2272 & 0 & 4642 \\ 0 & -159075 & 0 & 0 & 159075 & 0 \\ -4642 & 0 & 6242 & 4642 & 0 & 12327 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \end{matrix}$$

8. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

8. Eleman birinci merteye analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_8 = -147.029$ t.

$$[K_8] = \begin{bmatrix} 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \\ 1513 & 0 & -3100 & -1513 & 0 & -3100 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3100 & 0 & 8227 & 3100 & 0 & 4173 \\ -1513 & 0 & 3100 & 1513 & 0 & 3100 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3100 & 0 & 4173 & 3100 & 0 & 8227 \end{bmatrix} \begin{matrix} 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \\ 20 \\ 21 \end{matrix}$$

9. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

9. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_9 = -98.991$ t.

$$[K_9] = \begin{bmatrix} 19 & 20 & 21 & 22 & 23 & 24 \\ 1528 & 0 & -3105 & -1528 & 0 & -3105 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3105 & 0 & 8253 & 3105 & 0 & 4166 \\ -1528 & 0 & 3105 & 1528 & 0 & 3105 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3105 & 0 & 4166 & 3105 & 0 & 8253 \end{bmatrix} \begin{matrix} 19 \\ 20 \\ 21 \\ 22 \\ 23 \\ 24 \end{matrix}$$

10. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

10. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_{10} = -21.769$ t.

$$[K_{10}] = \begin{bmatrix} 10 & 11 & 12 & 25 & 26 & 27 \\ 950 & 0 & -1911 & -950 & 0 & -1911 \\ 0 & 105000 & 0 & 0 & -105000 & 0 \\ -1911 & 0 & 5089 & 1911 & 0 & 2553 \\ -950 & 0 & 1911 & 950 & 0 & 1911 \\ 0 & -105000 & 0 & 0 & 105000 & 0 \\ -1911 & 0 & 2553 & 1911 & 0 & 5089 \end{bmatrix} \begin{matrix} 10 \\ 11 \\ 12 \\ 25 \\ 26 \\ 27 \end{matrix}$$

12. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

12. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_{12} = -58.204$ t.

$$[K_{12}] = \begin{bmatrix} 22 & 23 & 24 & 28 & 29 & 30 \\ 939 & 0 & -1907 & -939 & 0 & -1907 \\ 0 & 105000 & 0 & 0 & -105000 & 0 \\ -1907 & 0 & 5070 & 1907 & 0 & 2558 \\ -939 & 0 & 1907 & 939 & 0 & 1907 \\ 0 & -105000 & 0 & 0 & 105000 & 0 \\ -1907 & 0 & 2558 & 1907 & 0 & 5070 \end{bmatrix} \begin{matrix} 22 \\ 23 \\ 24 \\ 28 \\ 29 \\ 30 \end{matrix}$$

13. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

13. Eleman birinci merteye analizden elde edilen aksenal kuvvet: $N_{13} = -14.982$ t.

$$[K_{13}] = \begin{bmatrix} 25 & 26 & 27 & 31 & 32 & 33 \\ 414 & 0 & -836 & -414 & 0 & -836 \\ 0 & 68775 & 0 & 0 & -68775 & 0 \\ -836 & 0 & 2226 & 836 & 0 & 1119 \\ -414 & 0 & 836 & 414 & 0 & 836 \\ 0 & -68775 & 0 & 0 & 68775 & 0 \\ -836 & 0 & 1119 & 836 & 0 & 2226 \end{bmatrix} \begin{matrix} 25 \\ 26 \\ 27 \\ 31 \\ 32 \\ 33 \end{matrix}$$

15. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

15. Eleman birinci merteye analizden elde edilen aksenal kuvvet: $N_{15} = -25.018$ t.

$$[K_{15}] = \begin{bmatrix} 28 & 29 & 30 & 34 & 35 & 36 \\ 411 & 0 & -835 & -411 & 0 & -835 \\ 0 & 68775 & 0 & 0 & -68775 & 0 \\ -835 & 0 & 2221 & 835 & 0 & 1120 \\ -411 & 0 & 835 & 411 & 0 & 835 \\ 0 & -68775 & 0 & 0 & 68775 & 0 \\ -835 & 0 & 1120 & 835 & 0 & 2221 \end{bmatrix} \begin{matrix} 28 \\ 29 \\ 30 \\ 34 \\ 35 \\ 36 \end{matrix}$$

Geometrik rijitlik matrisi yöntemi ile elde edilen tüm matrisler stabilite fonksiyonları ile ikinci merteye analizinde elde edilen matrislerle aynı değerlere sahiptir. Sisteme etkiyen dış kuvvetler değişmediğinden, elde edilen deplasmanlar ve eleman uç kuvvetleri stabilite fonksiyonları ile elde edilen değerlerle aynı olacaktır. Deplasman vektörü ve eleman uç kuvvetlerinin hesapları tekrarlanmamıştır.

5.4.7 P-Δ Geometrik Rijitlik Matrisi Analizi ile II. Mertebe Lineer Elastik Hesap

İkinci mertebe lineer elastik hesap sadece P-Δ geometrik rijitlik matrisi kullanılarak yapılacaktır.

5.4.7.1 Eleman Global Rijitlik Matrisleri ve Dış Kuvvetler Vektörü

Bu kısımda ikinci mertebe lineer elastik hesap için P-Δ analizi geometrik rijitlik matrisi ile hesaplanmış kolon rijitlik matrisleri verilecektir. Kiriş eleman global rijitlik matrislerinde bir değişiklik olmadığından birinci mertebe lineer elastik hesapta kullanılan matrisler kullanılacak ve bu kısımda hesabı gösterilmeyecektir.

1. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

1. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen aksenal kuvvet: $N_1 = -23.611$ t.

$$[K_1] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 2325 & 0 & -4662 & -2325 & 0 & -4662 \\ 0 & 159075 & 0 & 0 & -159075 & 0 \\ -4662 & 0 & 12432 & 4662 & 0 & 6216 \\ -2325 & 0 & 4662 & 2325 & 0 & 4662 \\ 0 & -159075 & 0 & 0 & 159075 & 0 \\ -4662 & 0 & 6216 & 4662 & 0 & 12432 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}$$

2. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

2. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen aksenal kuvvet: $N_2 = -22.971$ t.

$$[K_2] = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1552 & 0 & -3115 & -1552 & 0 & -3115 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 8306 & 3115 & 0 & 4153 \\ -1552 & 0 & 3115 & 1552 & 0 & 3115 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 4153 & 3115 & 0 & 8306 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix}$$

3. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

3. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_3 = -21.009$ t.

$$[K_3] = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 1552 & 0 & -3115 & -1552 & 0 & -3115 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 8306 & 3115 & 0 & 4153 \\ -1552 & 0 & 3115 & 1552 & 0 & 3115 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 4153 & 3115 & 0 & 8306 \end{bmatrix} \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix}$$

7. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

7. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_7 = -196.389$ t.

$$[K_7] = \begin{bmatrix} 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 \\ 2382 & 0 & -4662 & -2282 & 0 & -4662 \\ 0 & 159075 & 0 & 0 & -159075 & 0 \\ -4662 & 0 & 12432 & 4662 & 0 & 6216 \\ -2282 & 0 & 4662 & 2282 & 0 & 4662 \\ 0 & -159075 & 0 & 0 & 159075 & 0 \\ -4662 & 0 & 6216 & 4662 & 0 & 12432 \end{bmatrix} \begin{matrix} 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \end{matrix}$$

8. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

8. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_8 = -147.029$ t.

$$[K_8] = \begin{bmatrix} 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \\ 1521 & 0 & -3115 & -1521 & 0 & -3115 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 8306 & 3115 & 0 & 4153 \\ -1521 & 0 & 3115 & 1521 & 0 & 3115 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 4153 & 3115 & 0 & 8306 \end{bmatrix} \begin{matrix} 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \\ 20 \\ 21 \end{matrix}$$

9. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

9. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_9 = -98.991$ t.

$$[K_9] = \begin{bmatrix} 19 & 20 & 21 & 22 & 23 & 24 \\ 1533 & 0 & -3115 & -1533 & 0 & -3115 \\ 0 & 126000 & 0 & 0 & -126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 8306 & 3115 & 0 & 4153 \\ -1533 & 0 & 3115 & 1533 & 0 & 3115 \\ 0 & -126000 & 0 & 0 & 126000 & 0 \\ -3115 & 0 & 4153 & 3115 & 0 & 8306 \end{bmatrix} \begin{matrix} 19 \\ 20 \\ 21 \\ 22 \\ 23 \\ 24 \end{matrix}$$

10. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

10. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_{10} = -21.769$ t.

$$[K_{10}] = \begin{bmatrix} 10 & 11 & 12 & 25 & 26 & 27 \\ 951 & 0 & -1913 & -951 & 0 & -1913 \\ 0 & 105000 & 0 & 0 & -105000 & 0 \\ -1913 & 0 & 5101 & 1913 & 0 & 2550 \\ -951 & 0 & 1913 & 951 & 0 & 1913 \\ 0 & -105000 & 0 & 0 & 105000 & 0 \\ -1913 & 0 & 2550 & 1913 & 0 & 5101 \end{bmatrix} \begin{matrix} 10 \\ 11 \\ 12 \\ 25 \\ 26 \\ 27 \end{matrix}$$

12. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

12. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_{12} = -58.204$ t.

$$[K_{12}] = \begin{bmatrix} 22 & 23 & 24 & 28 & 29 & 30 \\ 942 & 0 & -1913 & -942 & 0 & -1913 \\ 0 & 105000 & 0 & 0 & -105000 & 0 \\ -1913 & 0 & 5101 & 1913 & 0 & 2550 \\ -942 & 0 & 1913 & 942 & 0 & 1913 \\ 0 & -105000 & 0 & 0 & 105000 & 0 \\ -1913 & 0 & 2550 & 1913 & 0 & 5101 \end{bmatrix} \begin{matrix} 22 \\ 23 \\ 24 \\ 28 \\ 29 \\ 30 \end{matrix}$$

13. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

13. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_{13} = -14.982$ t.

$$[K_{13}] = \begin{bmatrix} 25 & 26 & 27 & 31 & 32 & 33 \\ 415 & 0 & -838 & -415 & 0 & -838 \\ 0 & 68775 & 0 & 0 & -68775 & 0 \\ -838 & 0 & 2234 & 838 & 0 & 1117 \\ -415 & 0 & 838 & 415 & 0 & 838 \\ 0 & -68775 & 0 & 0 & 68775 & 0 \\ -838 & 0 & 1117 & 838 & 0 & 2234 \end{bmatrix} \begin{matrix} 25 \\ 26 \\ 27 \\ 31 \\ 32 \\ 33 \end{matrix}$$

15. Eleman Global Rijitlik Matrisi;

15. Eleman birinci mertebe analizden elde edilen eksenel kuvvet: $N_{15} = -25.018$ t.

$$[K_{15}] = \begin{bmatrix} 28 & 29 & 30 & 34 & 35 & 36 \\ 413 & 0 & -838 & -413 & 0 & -838 \\ 0 & 68775 & 0 & 0 & -68775 & 0 \\ -838 & 0 & 2234 & 838 & 0 & 1117 \\ -413 & 0 & 838 & 413 & 0 & 838 \\ 0 & -68775 & 0 & 0 & 68775 & 0 \\ -838 & 0 & 1117 & 838 & 0 & 2234 \end{bmatrix} \begin{matrix} 28 \\ 29 \\ 30 \\ 34 \\ 35 \\ 36 \end{matrix}$$

Çerçeve sistemin düğüm noktalarına serbestlik dereceleri doğrultusunda etkiyen dış kuvvet vektörü ve hesap sonucu elde edilen deplasmanlar vektörü aşağıda sunulmuştur.

$$\langle P \rangle^T = \langle 4 \quad -25 \quad 0 \quad 7 \quad -25 \quad 0 \quad 9 \quad -20 \quad 0 \quad 0 \quad -25 \quad 0 \quad 0 \quad -25 \quad 0 \\ 0 \quad -20 \quad 0 \quad 12 \quad -20 \quad 0 \quad 0 \quad -20 \quad 0 \quad 15 \quad -20 \quad 0 \quad 0 \quad -20 \quad 0 \rangle$$

$$\langle \delta \rangle^T = \langle 0.022496 \quad -0.000127 \quad -0.006287 \quad 0.067063 \quad -0.000291 \quad -0.009029 \\ 0.113178 \quad -0.000446 \quad -0.008269 \quad 0.0222478 \quad -0.001256 \quad -0.006282 \\ 0.067024 \quad -0.002442 \quad -0.009026 \quad 0.113130 \quad -0.003239 \quad -0.008265 \\ 0.160945 \quad -0.000647 \quad -0.008568 \quad 0.160865 \quad -0.003800 \quad -0.008557 \\ 0.211062 \quad -0.000862 \quad -0.007533 \quad 0.210906 \quad -0.004166 \quad -0.007516 \rangle$$

5.4.7.2 Eleman Uç Kuvvetleri Vektörleri

Çerçeve elemanlarının global uç kuvvetleri hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur:

1 No'lu Eleman;

$$\langle P_1 \rangle^T = \langle -22.994 \quad 20.278 \quad 65.795 \quad 22.994 \quad -20.278 \quad 26.712 \rangle$$

2 No'lu Eleman;

$$\langle P_2 \rangle^T = \langle -21.443 \quad 20.542 \quad 49.092 \quad 21.443 \quad -20.542 \quad 37.706 \rangle$$

3 No'lu Eleman;

$$\langle P_3 \rangle^T = \langle -17.697 \quad 19.542 \quad 34.300 \quad 17.697 \quad -19.542 \quad 37.458 \rangle$$

4 No'lu Eleman;

$$\langle P_4 \rangle^T = \langle 1.950 \quad -25.264 \quad -75.804 \quad -1.950 \quad 25.264 \quad -75.781 \rangle$$

5 No'lu Eleman;

$$\langle P_5 \rangle^T = \langle 3.254 \quad -24.00 \quad -72.005 \quad -3.254 \quad 24.000 \quad -71.997 \rangle$$

6 No'lu Eleman;

$$\langle P_6 \rangle^T = \langle 4.022 \quad -21.598 \quad -64.799 \quad -4.022 \quad 21.598 \quad -64.790 \rangle$$

7 No'lu Eleman;

$$\langle P_7 \rangle^T = \langle -22.006 \quad 199.722 \quad -65.743 \quad 22.006 \quad -199.722 \quad 26.695 \rangle$$

8 No'lu Eleman;

$$\langle P_8 \rangle^T = \langle -20.057 \quad 149.458 \quad 48.086 \quad 20.057 \quad -149.458 \quad 37.690 \rangle$$

9 No'lu Eleman;

$$\langle P_9 \rangle^T = \langle -16.803 \quad 100.458 \quad 34.308 \quad 16.803 \quad -100.458 \quad 37.467 \rangle$$

10 No'lu Eleman;

$$\langle P_{10} \rangle^T = \langle -13.219 \quad 21.140 \quad 27.341 \quad 13.219 \quad -21.140 \quad 26.576 \rangle$$

11 No'lu Eleman;

$$\langle P_{11} \rangle^T = \langle 5.598 \quad -13.666 \quad -41.007 \quad -5.598 \quad 13.666 \quad -40.989 \rangle$$

12 No'lu Eleman;

$$\langle P_{12} \rangle^T = \langle -12.781 \quad -58.860 \quad 27.323 \quad 12.781 \quad -58.860 \quad 26.578 \rangle$$

13 No'lu Eleman;

$$\langle P_{13} \rangle^T = \langle -7.317 \quad 14.806 \quad 14.431 \quad 7.317 \quad -14.806 \quad 15.587 \rangle$$

14 No'lu Eleman;

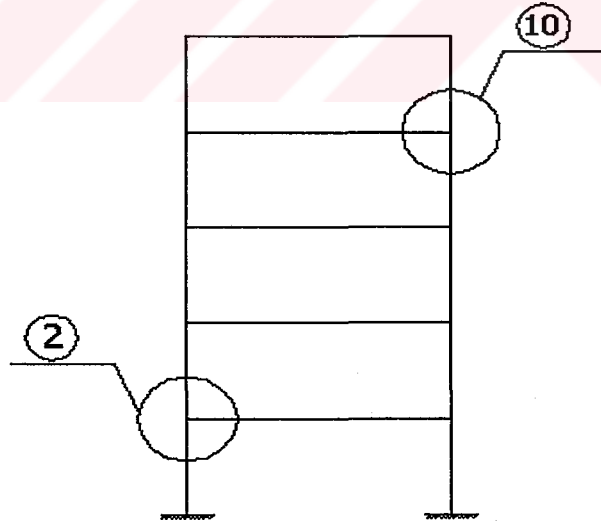
$$\langle P_{14} \rangle^T = \langle 7.183 \quad -5.194 \quad -15.587 \quad -7.183 \quad 5.194 \quad -15.574 \rangle$$

15 No'lu Eleman;

$$\langle P_{15} \rangle^T = \langle -7.183 \quad 25.194 \quad 14.410 \quad 7.183 \quad -25.194 \quad 15.574 \rangle$$

5.4.8 İteratif Yatay Yük Yöntemi Artımı Yöntemi ile Yaklaşık II. Mertebe Analiz

İteratif yatay yük artımı yöntemi ile beş katlı ve tek açıklıklı örnek çerçeve çözülmüştür. Detay hesaplar verilmeyecek, ancak kat yatay deplasmanları (2,3,4,9,11 numaralı düğüm noktalarının yatay deplasman değerleri) ve Şekil 5.111'de gösterilen 2 ve 10 numaralı düğüm noktaları için moment değerleri gösterilecektir.



Şekil 5.111 Tek Açıklıklı Beş Katlı Örnek Çelik Çerçevenin 2 ve 10 Numaralı Düğüm Noktaları

a- Birinci Adım:

Birinci mertebe lineer elastik hesap sonucu elde edilen toplam kat kolon normal kuvvet değerleri aşağıda verilmiştir:

$$\begin{array}{lll}\Sigma N_5 = 40 \text{ t.} & \Sigma N_3 = 120 \text{ t.} & \Sigma N_1 = 220 \text{ t.} \\ \Sigma N_4 = 80 \text{ t.} & \Sigma N_2 = 170 \text{ t.} & \end{array}$$

Birinci merteye lineer elastik hesap sonucu elde edilen kat deplasman değerleri aşağıda verilmiştir:

$$\begin{array}{lll}\Delta_5 = 203.342 \text{ mm.} & \Delta_3 = 108.897 \text{ mm.} & \Delta_1 = 21.780 \text{ mm.} \\ \Delta_4 = 154.940 \text{ mm.} & \Delta_2 = 64.569 \text{ mm.} & \end{array}$$

Rölatif kat deplasmanları $\Omega_i = \Delta_{i+1} - \Delta_i$ olmak üzere aşağıdaki gibidir:

$$\begin{array}{lll}\Omega_5 = 48.402 \text{ mm.} & \Omega_3 = 44.328 \text{ mm.} & \Omega_1 = 21.780 \text{ mm.} \\ \Omega_4 = 46.043 \text{ mm.} & \Omega_2 = 42.789 \text{ mm.} & \end{array}$$

Fiktif kat kesme kuvvetleri $V_i = \Sigma N_i / h_i$ Ω_i olmak üzere aşağıdaki gibidir:

$$\begin{array}{lll}V_5 = 0.484 \text{ t.} & V_3 = 1.330 \text{ t.} & V_1 = -1.198 \text{ t.} \\ V_4 = 0.921 \text{ t.} & V_2 = 1.819 \text{ t.} & \end{array}$$

Fiktif yatay yükler $H_i = V_{i-1} - V_i$ olmak üzere aşağıdaki gibidir:

$$\begin{array}{lll}H_5 = 0.484 \text{ t.} & H_3 = 0.409 \text{ t.} & H_1 = -0.621 \text{ t.} \\ H_4 = 0.437 \text{ t.} & H_2 = 0.489 \text{ t.} & \end{array}$$

b- İkinci adım:

Elde edilen fiktif yatay kuvvetler sisteme uygulanmış ve sistem bu kuvvetler altında çözülmüştür. Elde edilen yeni deplasman değerleri aşağıda verilmiştir:

$$\begin{array}{lll}\Delta_5 = 210.782 \text{ mm.} & \Delta_3 = 113.020 \text{ mm.} & \Delta_1 = 22.469 \text{ mm.} \\ \Delta_4 = 160.725 \text{ mm.} & \Delta_2 = 66.973 \text{ mm.} & \end{array}$$

Rölatif kat deplasmanları ve fiktif kat kesme kuvvetleri bir önceki adımdaki şekilde hesaplanır ve fiktif yatay yükler $H_i = V_{i-1} - V_i$ olmak üzere aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\begin{array}{lll}H_5 = 0.501 \text{ t.} & H_3 = 0.427 \text{ t.} & H_1 = -0.656 \text{ t.} \\ H_4 = 0.454 \text{ t.} & H_2 = 0.5210 \text{ t.} & \end{array}$$

c- Üçüncü adım:

Elde edilen fiktif yatay kuvvetler sisteme uygulanmış ve sistem bu kuvvetler altında çözülmüştür. Elde edilen deplasman değerleri aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned}\Delta_5 &= 211.061 \text{ mm.} & \Delta_3 &= 113.178 \text{ mm.} & \Delta_1 &= 22.493 \text{ mm.} \\ \Delta_4 &= 160.945 \text{ mm.} & \Delta_2 &= 67.065 \text{ mm.}\end{aligned}$$

Rölatif kat deplasmanları ve fiktif kat kesme kuvvetleri bir önceki adımdaki şekilde hesaplanır ve fiktif yatay yükler $H_i = V_{i-1} - V_i$ olmak üzere aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\begin{aligned}H_5 &= 0.501 \text{ t.} & H_3 &= 0.428 \text{ t.} & H_1 &= -0.657 \text{ t.} \\ H_4 &= 0.454 \text{ t.} & H_2 &= 0.511 \text{ t.}\end{aligned}$$

d- Dördüncü adım:

Elde edilen fiktif yatay kuvvetler sisteme uygulanmış ve sistem bu kuvvetler altında çözülmüştür. Elde edilen deplasman değerleri aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned}\Delta_5 &= 211.077 \text{ mm.} & \Delta_3 &= 113.187 \text{ mm.} & \Delta_1 &= 22.495 \text{ mm.} \\ \Delta_4 &= 160.958 \text{ mm.} & \Delta_2 &= 67.070 \text{ mm.}\end{aligned}$$

Üçüncü ve dördüncü adımlar sonucu elde edilen deplasman değerleri arasındaki fark ihmal edilebilecek kadar küçük olduğundan işlem sonlandırılabilir.

Tüm adımlar için 2 ve 10 numaralı düğüm noktaları için moment değerleri aşağıda verilmiştir.

2. Eleman j. Ucu		2	
1. Adım:	46.621 tm.		
2. Adım:	49.018 tm.		
3. Adım:	49.103 tm.		
4. Adım:	49.107 tm.		
1. Eleman k. Ucu		2	
1. Adım:	26.171 tm.		
2. Adım:	26.688 tm.		
3. Adım:	26.700 tm.		
4. Adım:	26.701 tm.		
4. Eleman j. Ucu			
1. Adım:	73.092 tm.		
2. Adım:	75.706 tm.		
3. Adım:	75.803 tm.		
4. Adım:	75.808 tm.		

Şekil 5.112 İteratif Yatay Yük Artımı Yöntemi 2 Numaralı Düğüm Noktası
Moment Değerleri

11. Eleman k. Ucu		10	
1. Adım:	39.548 tm.		
2. Adım:	40.938 tm.		
3. Adım:	40.989 tm.		
4. Adım:	40.992 tm.		
15. Eleman j. Ucu		10	
1. Adım:	13.936 tm.		
2. Adım:	14.394 tm.		
3. Adım:	14.410 tm.		
4. Adım:	14.411 tm.		
12. Eleman k. Ucu			
1. Adım:	25.613 tm.		
2. Adım:	26.543 tm.		
3. Adım:	26.578 tm.		
4. Adım:	26.580 tm.		

Şekil 5.113 İteratif Yatay Yük Artımı Yöntemi 10 Numaralı Düğüm Noktası
Moment Değerleri

5.4.9 İteratif Düşey Yük Artımı Yöntemi ile Yaklaşık II. Mertebe Analiz

İteratif düşey yük artımı yöntemi ile beş katlı ve tek açıklıklı örnek çerçeve çözülmüştür. Detay hesaplar verilmeyecek, ancak kat yatay deplasmanları (2,3,4,9,11 numaralı düğüm noktalarının yatay deplasman değerleri) ve Şekil 5.111’de gösterilen 2 ve 10 numaralı düğüm noktaları için moment değerleri verilecektir.

a- Birinci adım:

Sadece yatay yük etkisi altında çerçeve çözülürse, deplasman değerleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}\Delta_5 &= 203.342 \text{ mm.} & \Delta_3 &= 108.897 \text{ mm.} & \Delta_1 &= 21.780 \text{ mm.} \\ \Delta_4 &= 154.940 \text{ mm.} & \Delta_2 &= 64.569 \text{ mm.}\end{aligned}$$

b- İkinci adım:

Yatay yükler altında elde edilen deplasman değerleri fiktif açıklığa etkilmiştir. Her kattaki düşey yükler toplamı o kattaki fiktif kolona uygulanır;

$$\Sigma P_5 = \Sigma P_4 = \Sigma P_3 = 40 \text{ t.}, \quad \Sigma P_2 = \Sigma P_1 = 50 \text{ t.}$$

Her kattaki düşey yükler toplamı o kattaki fiktif kolona uygulanır ve sistem çözülürse aşağıdaki deplasman değerleri elde edilir:

$$\begin{aligned}\Delta_5 &= 7.439 \text{ mm.} & \Delta_3 &= 4.123 \text{ mm.} & \Delta_1 &= 0.689 \text{ mm.} \\ \Delta_4 &= 5.784 \text{ mm.} & \Delta_2 &= 2.404 \text{ mm.}\end{aligned}$$

c- Üçüncü adım:

Elde edilen deplasmanlara göre fiktif açıklık yenilenir ve çerçeve sadece düşey yük etkisi altında çözülürse, deplasman değerleri aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}\Delta_5 &= 0.276 \text{ mm.} & \Delta_3 &= 0.157 \text{ mm.} & \Delta_1 &= 0.024 \text{ mm.} \\ \Delta_4 &= 0.218 \text{ mm.} & \Delta_2 &= 0.091 \text{ mm.}\end{aligned}$$

d- Dördüncü adım:

Elde edilen deplasmanlara göre fiktif açıklık yenilenir ve çerçeve sadece düşey yük etkisi altında çözülürse, elde edilen deplasman değerleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}\Delta_5 &= 0.010 \text{ mm.} & \Delta_3 &= 0.006 \text{ mm.} & \Delta_1 &= 0.001 \text{ mm.} \\ \Delta_4 &= 0.008 \text{ mm.} & \Delta_2 &= 0.003 \text{ mm.}\end{aligned}$$

e- Beşinci adım:

Yatay ve düşey deplasman adımları toplanır:

$$\Sigma \Delta_5 = 203.342 + 7.439 + 0.276 + 0.010 = 211.067 \text{ mm.}$$

$$\Sigma \Delta_4 = 154.940 + 5.784 + 0.218 + 0.008 = 160.950 \text{ mm.}$$

$$\Sigma\Delta_3 = 108.897 + 4.123 + 0.157 + 0.006 = 113.183 \text{ mm.}$$

$$\Sigma\Delta_2 = 64.569 + 2.404 + 0.091 + 0.003 = 67.067 \text{ mm.}$$

$$\Sigma\Delta_1 = 21.780 + 0.689 + 0.024 + 0.001 = 22.494 \text{ mm.}$$

2. Eleman j. Ucu		2	4. Eleman j. Ucu	
1. Adım:	46.921 tm.		1. Adım:	73.092 tm.
2. Adım:	2.082 tm.		2. Adım:	2.613 tm.
3. Adım:	0.084 tm.		3. Adım:	0.097 tm.
4. Adım:	0.003 tm.		4. Adım:	0.004 tm.
Toplam:	49.090 tm.		Toplam:	75.806 tm.

1. Eleman k. Ucu	
1. Adım:	26.171 tm.
2. Adım:	0.531 tm.
3. Adım:	0.013 tm.
4. Adım:	0
Toplam:	26.715 tm.

Şekil 5.114 İteratif Düşey Yük Artımı Yöntemi 2 Numaralı Düğüm Noktası
Moment Değerleri

11. Eleman k. Ucu		10	15. Eleman j. Ucu	
1. Adım:	39.548 tm.		1. Adım:	13.935 tm.
2. Adım:	1.390 tm.		2. Adım:	0.460 tm.
3. Adım:	0.050 tm.		3. Adım:	0.016 tm.
4. Adım:	0.002 tm.		4. Adım:	0.001 tm.
Toplam:	40.990 tm.		Toplam:	14.412 tm.

12. Eleman k. Ucu	
1. Adım:	25.613 tm.
2. Adım:	0.930 tm.
3. Adım:	0.034 tm.
4. Adım:	0.001 tm.
Toplam:	26.578 tm.

Şekil 5.115 İteratif Düşey Yük Artımı Yöntemi 10 Numaralı Düğüm Noktası
Moment Değerleri

BÖLÜM ALTI

NON-LİNEER ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ İLE

ELDE EDİLEN SONUÇLAR

6.1 Lineer ve Lineer Olmayan Çözüm Yöntemleri ile İncelenen Tek Katlı ve Tek Açıklıklı Örnek Çerçevenin Hesap Sonuçları

Tek katlı ve tek açıklıklı örnek çerçevenin lineer ve lineer olmayan hesap yöntemleri kullanılarak çözülmesi ile elde edilen sonuçlar bu kısımda yorumlanmıştır.

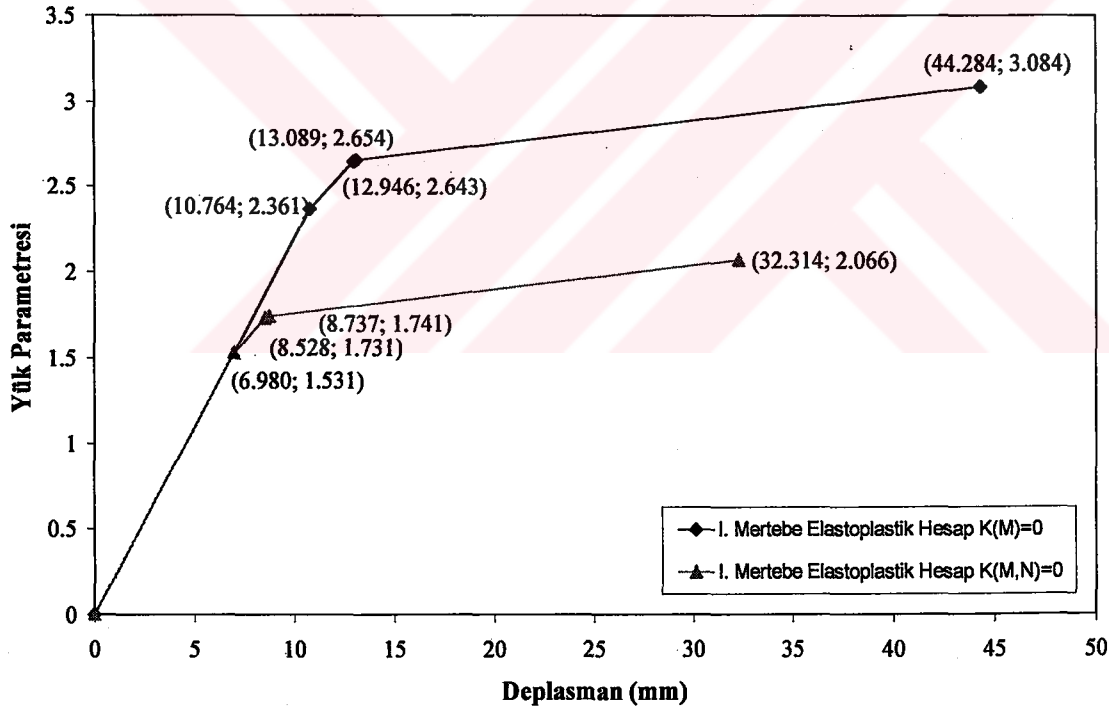
Örnek çerçeve üzerinde on farklı hesap yapılmıştır. Bu hesaplar, çeşitli lineer ve lineer olmayan çözüm yöntemlerinin örnek çerçeveye ayrı ayrı ve birlikte uygulanması ile elde edilmiştir.

Örnek çerçeveye uygulanan hesaplar;

- I. Mertebe Lineer Elastik Hesap
- I. Mertebe Elastoplastik $K(M)=0$ Hesap
- I. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap
- II. Mertebe Lineer Elastik Hesap
- Burkulma Parametresinin Hesabı
- II. Mertebe Elastoplastik $K(M)=0$ Hesap
- II. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap
- Sabit Düşey Yük Parametresi Altında Artan Yatay Yük İçin II. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap
- LRFD Etkileşim Eğrileri ile I. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap
- Rankine-Merchant Yaklaşık Yük Parametresi Yöntemi

Örnek çerçeve birinci mertebe lineer elastik yöntem ile çözülerek mevcut normal kuvvet, moment ve tepe noktası deplasman değerleri gözlenmiştir. İlk olarak, örnek çerçevenin malzeme bakımından lineer olmayan davranışı çeşitli akma şartları dikkate alınarak incelenmiştir. Geometri bakımından lineer olmayan davranış malzeme davranışı incelenirken dikkate alınmamış ve sadece malzemenin lineer olmayan davranışı ve akma şartlarının bu davranışa etkisi gözlenmeye çalışılmıştır.

Birinci mertebe elastoplastik hesap işlemlerinde akma şartına normal kuvvet etkisinin ihmal edildiği, diğer bir deyişle sadece momentin akma şartına etkisinin dikkate alındığı $K(M)=0$ durum ve normal kuvvet ile momentin birlikte akma şartına olan etkisinin gözönüne alındığı $K(M,N)=0$ durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Bu iki durumun yük parametresi-deplasman davranışına olan etkisi Şekil 6.1 ile gösterilmiştir.



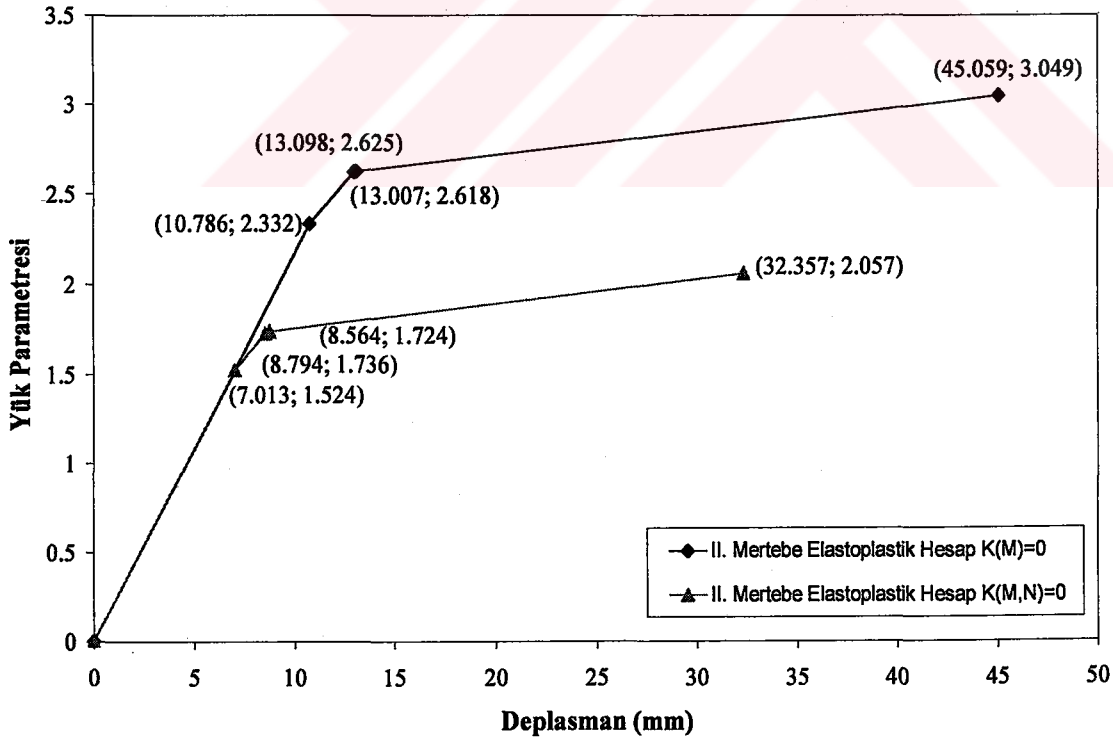
Şekil 6.1 Birinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ ve $K(M,N)=0$ Akma Şartları İçin Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi

Şekil 6.1 incelendiğinde akma davranışında normal kuvvetin ihmal edildiği, diğer bir deyişle sadece moment etkisinin akma şartı olarak kabul edildiği durum için göçme yük parametresi değeri normal kuvvet ve moment değerinin akma şartına

birlikte etkimesi durumuna göre yaklaşık %49 fazla bulunmuştur. Göçme anındaki deplasman değeri de büyük fark göstermektedir. Bu, örnek çerçevenin çözümünde malzemenin lineer olmayan davranışının ve akma şartının önemli rol oynadığını göstermektedir.

Örnek çerçeve, geometri bakımından lineer olmayan davranış da dikkate alınarak çeşitli akma şartları için malzemenin lineer olmayan davranışı ile birlikte Şekil 6.2’de incelenmiştir. Bu hesapta, geometri bakımından lineer olmayan davranışın örnek çerçeve davranışına olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

İkinci mertebe elastoplastik hesap işlemlerinde akma şartına normal kuvvet etkisinin ihmal edildiği, diğer bir deyişle sadece momentin akma şartına etkisinin dikkate alındığı $K(M)=0$ durum ve normal kuvvet ile momentin birlikte akma şartına olan etkisinin gözönüne alındığı $K(M,N)=0$ durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Bu iki durumun yük parametresi-deplasman davranışına olan etkisi Şekil 6.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.2 İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap $K(M)=0$ ve $K(M,N)=0$ Akma Şartları İçin Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi

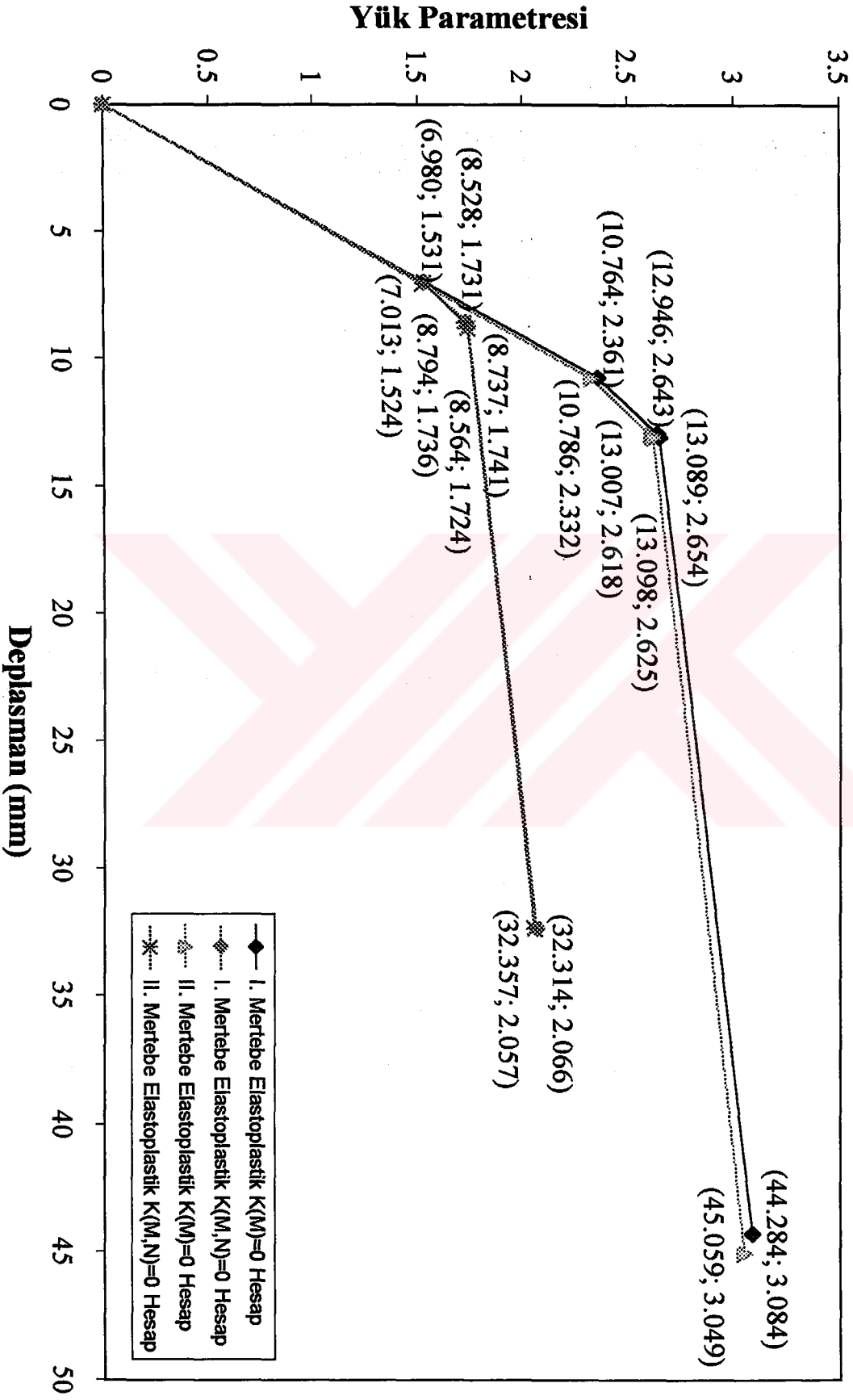
Şekil 6.2 incelendiğinde ikinci mertebe etkilerin de dikkate alınması ile malzemenin lineer olmayan davranışı gözlenmiştir. Akma davranışında sadece moment etkisinin akma şartı olarak kabul edildiği durum için göçme yük parametresi değeri normal kuvvet ve moment değerinin akma şartına birlikte etkimesi durumuna göre yaklaşık %48 fazla bulunmuştur. Göçme anındaki deplasman değeri de bir önceki hesaptaki gibi farklılık göstermektedir. Geometri bakımından lineer olmayan davranışın hesaplara dahil edilmesi çerçeve davranışını fazla etkilememektedir.

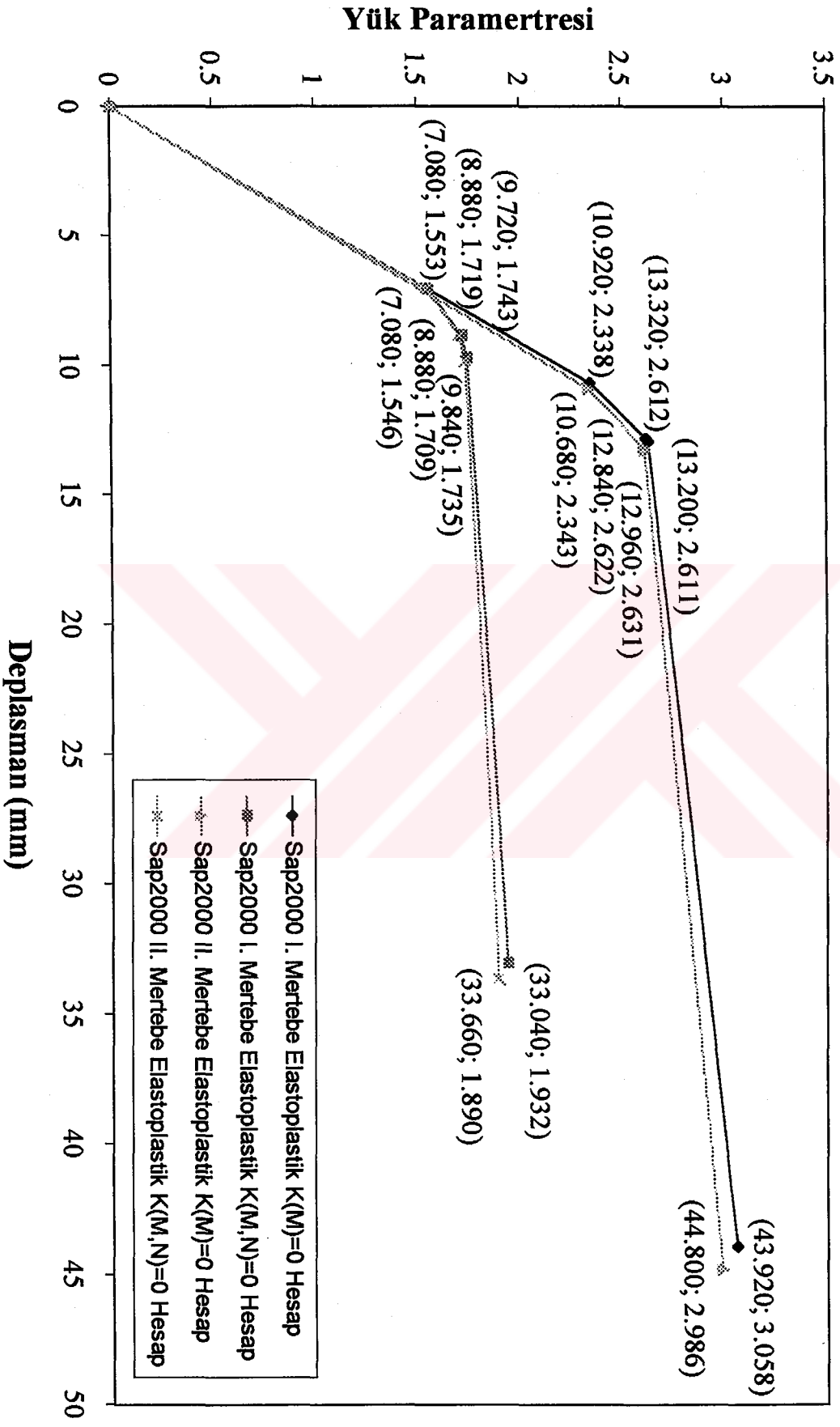
Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 karşılaştırıldığında, diğer bir deyişle geometri bakımından lineer olmayan çözümlemenin malzemenin akma davranışına olan etkisi incelendiğinde; geometri bakımından lineer olmayan davranışın hesaplara dahil edilmesinin çerçevenin göçme durumunda yaptığı deplasman değerini arttırdığı ve göçme yük parametresinin de azalmasına neden olduğu görülebilir. Ancak, incelenen örnek için bu durum oldukça sınırlıdır.

Şekil 6.3'de birinci ve ikinci mertebe elastoplastik hesaplar sonucunda elde edilen eğriler birlikte verilmiştir. Benzer eğriler Sap2000 Non Linear programı kullanılarak da elde edilmiş ve Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Bu eğriler düşey ve yatay yükün birlikte arttırıldığı durumlar içindir. Aşağıda bu durum için yapılan hesaplar, göçme yük parametresi ve tepe noktası deplasman değerleri verilmiştir.

- I.Mertebe Elastoplastik $K(M)=0$ Hesap : $p_{göçme} = 3,084$; $\delta_{göçme} = 44.284$ mm.
- I.Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap: $p_{göçme} = 2,066$; $\delta_{göçme} = 32.314$ mm.
- II.Mertebe Elastoplastik $K(M)=0$ Hesap : $p_{göçme} = 3,049$; $\delta_{göçme} = 45.059$ mm.
- II.Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap: $p_{göçme} = 2,057$; $\delta_{göçme} = 32.357$ mm.

Çerçevenin burkulma yük parametresi yaklaşık hesap edilmiş ve $p_b \approx 148$ bulunmuştur. Bulunan yaklaşık burkulma yük parametresi değeri oldukça büyük olduğundan şekillerde gösterilmemiştir. Ayrıca, hesap aşamalarında yük artım adımları esnasında eleman uç deplasman işaretleri bir önceki adımda elde edilen değerlerle karşılaştırılmış ve burkulma dolaylı olarak kontrol edilmiştir.

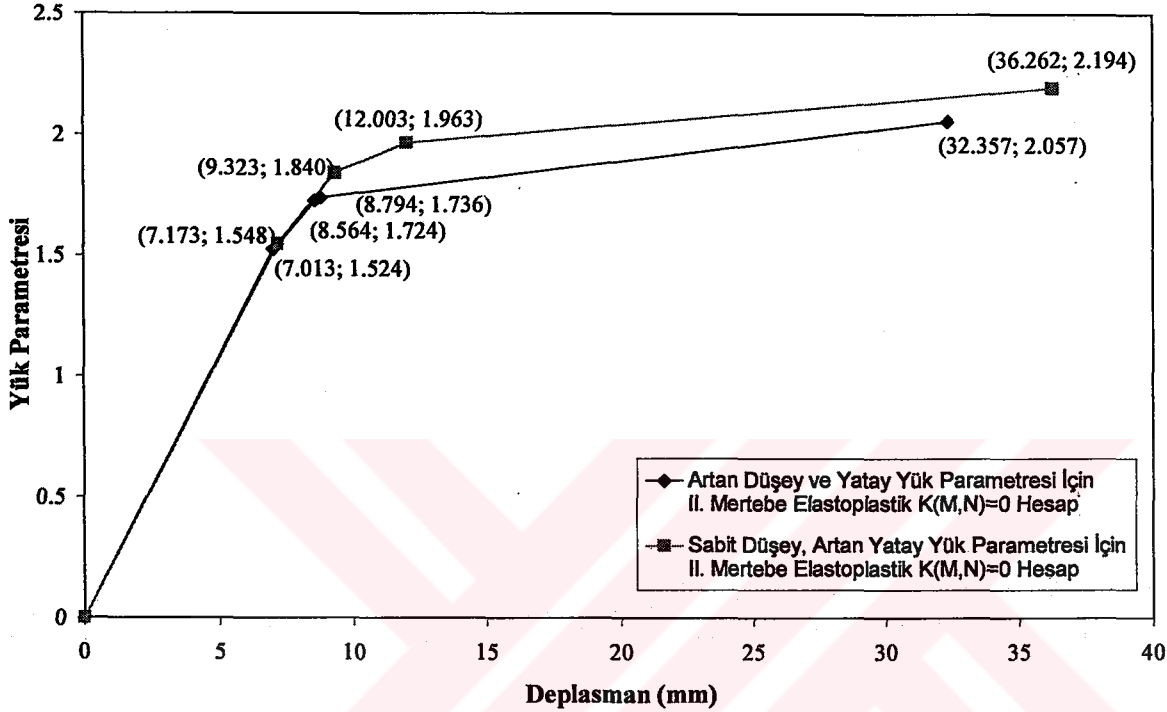




Şekil 6.4 Sarp2000 Non Linear Programı ile Birinci ve İkinci Mertebe Elastoplastik K(M)=0 ve K(M,N)=0 Hesap İçin

Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi

Bir başka yaklaşım olarak; düşey yükün sabit ve yatay yükün artırıldığı durum için ikinci mertebe elastoplastik hesap yapılmıştır. Bu hesapta, düşey yükler sabit bir düşey yük katsayısı $p_D=1.5$ ile artırılarak sabit tutulmuş ve daha sonra yatay yüklerin yapı göçene kadar artırılması işlemi uygulanmıştır. Yapıyı mekanizma durumuna getiren yatay yük parametresi belirlenmiştir.

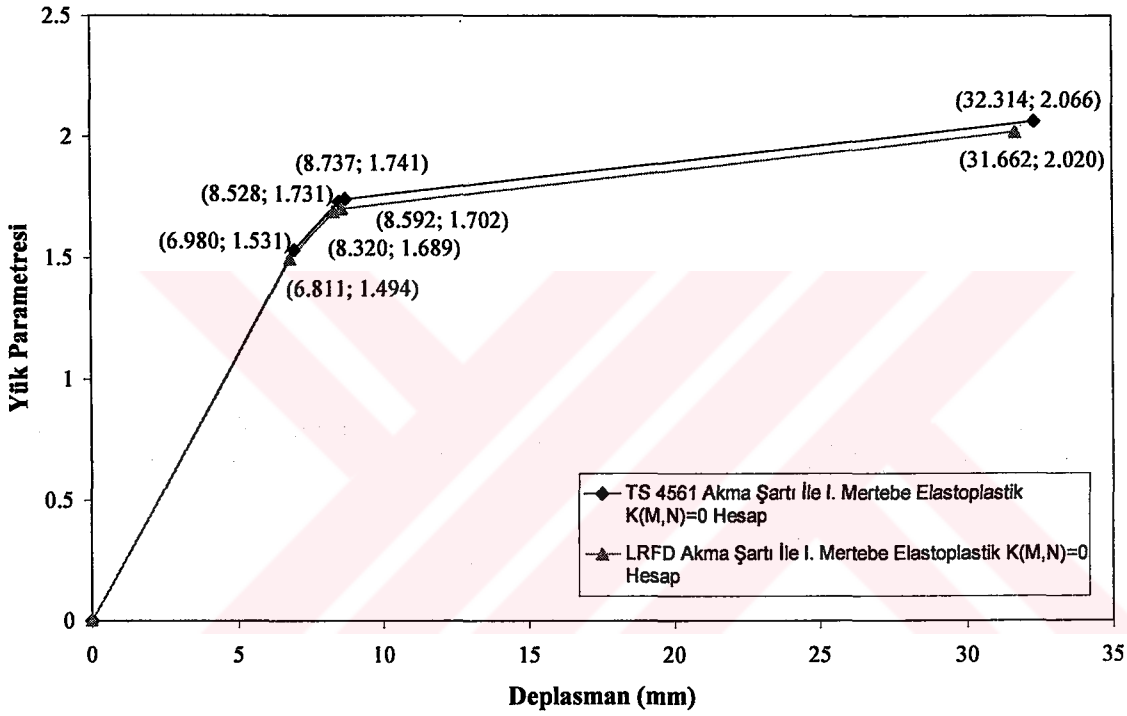


Şekil 6.5 Artan Düşey ve Yatay Yük Parametresi ve Sabit Düşey, Artan Yatay Yük Parametresi İçin İkinci Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap İçin
Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi

Şekil 6.5’de artan düşey ve yatay yük parametresi ve sabit düşey, artan yatay yük parametresi için ikinci mertebe elastoplastik $K(M,N)=0$ hesaplar sonucunda elde edilen eğriler birlikte verilmiştir. Eğriler her iki yaklaşımın farklarını göstermektedir. Aşağıda, sabit düşey ve artan yatay yük parametresi için ikinci mertebe elastoplastik $K(M,N)=0$ hesap için göçme yük parametresi ve tepe noktası deplasman değerleri verilmiştir.

- Sabit düşey, artan yatay yük parametresi II. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap: $p_{göçme,y}=2,194$; $\delta_{göçme}=36.262$ mm.
- Artan düşey, artan yatay yük parametresi II. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap: $p_{göçme}=2,057$; $\delta_{göçme}=32.357$ mm.

İncelenen örnekler TS 4561'de I kesitler için verilen akma şartı kullanılarak çözülmüştür. Çerçevenin bir başka akma kriteri kullanılarak çözülmesi ve yönetmeliklerce I kesitler için yapılan idealleştirmelerin önemini incelemek amacıyla LRFD etkileşim eğrileri kullanılarak örnek çerçeve çözülmüştür. Şekil 6.6'da TS 4561 ve LRFD yönetmeliklerinde I kesitler için verilen akma kriterleri kullanılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Her iki çözümde de düşey ve yatay yükün birlikte arttırıldığı birinci mertebe elastoplastik $K(M,N)=0$ hesap yapılmış ve sadece malzemenin lineer olmayan davranışının incelenmesi amaçlanmıştır.

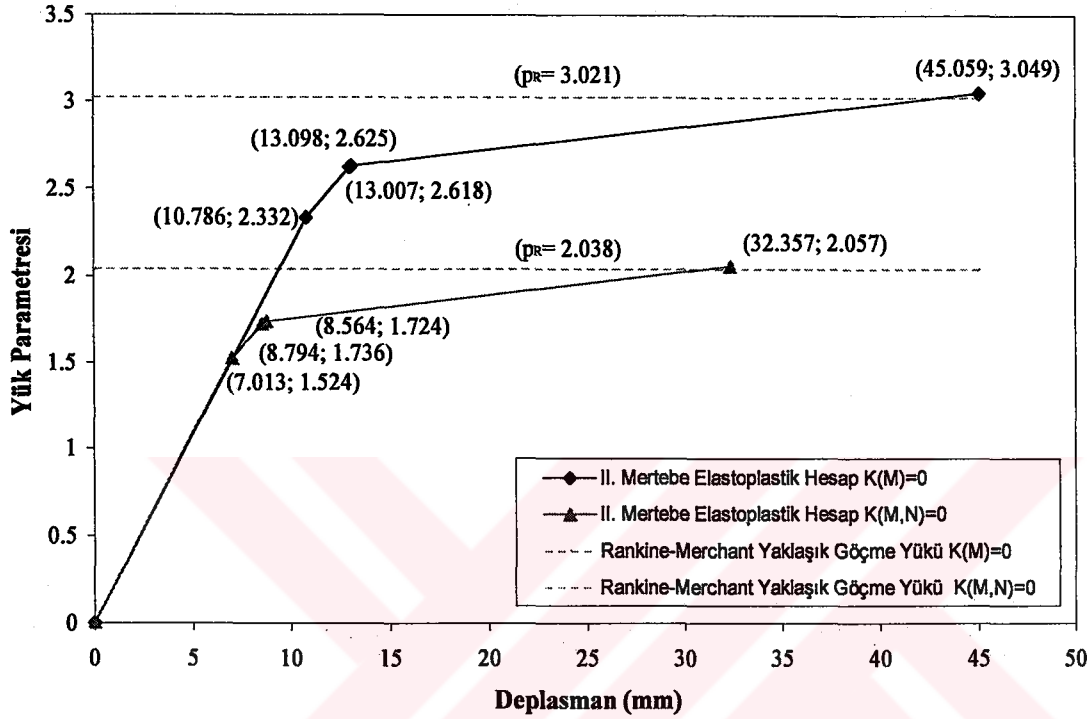


Şekil 6.6 TS 4561 ve LRFD Akma Şartları İçin Birinci Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap İçin Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi

- LRFD Akma Şartı ile I. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap:
 $p_{göçme} = 2,020$; $\delta_{göçme} = 31.662$ mm.
- TS 4561 Akma Şartı ile I. Mertebe Elastoplastik $K(M,N)=0$ Hesap:
 $p_{göçme} = 2,066$; $\delta_{göçme} = 32.314$ mm.

Şekil 6.6 incelendiğinde her iki çözümünde birbirine yakın sonuçlar verildiği görülmüştür. LRFD akma şartına göre bulunan tepe noktası deplasmanı ve göçme parametresi değerleri TS 4561 (ve aynı zamanda FEMA 356) akma şartına göre elde edilen değerlerden bir miktar küçüktür.

Yapının lineer olmayan davranışı non-lineer çözüm yöntemleri ile gözlenebilmektedir. Ancak bazı durumlarda non-lineer çözüm yöntemlerinin uygulanması uzun işlemler gerektirir. Bu gibi durumlarda yaklaşık çözüm yöntemlerinden yararlanılabilir (Majid, 1972).



Şekil 6.7 Rankine-Merchant Yaklaşık İkinci Mertebe Göçme Yüğü Yöntemi ile İkinci Mertebe Elastoplastik Hesap Sonuçları İçin Yük Parametresi – Deplasman İlişkisi

Şekil 6.7’de sunulduğu üzere Rankine-Merchant yaklaşık göçme yük parametresi yöntemi ile yaklaşık ikinci mertebe elastoplastik göçme yük parametresi hesaplanırken sadece momentin akma şartına etkisi olduğu durumda $p_R = 3.021$ bulunmuştur. Bu, sadece momentin akma şartına etkisi olan etkisi gözönüne alınarak yapılan gerçek ikinci mertebe elastoplastik hesap sonucu elde edilen $p_{göçme} = 3.049$ değerine oldukça yakın bir sonuçtur. Akma davranışında moment ve normal kuvvet etkisinin birlikte göz önüne alındığı durum için ise Rankine-Merchant yöntemi ile $p_R = 2.038$ bulunmuştur. Bu, gerçek akma davranışında moment ve normal kuvvet etkisinin birlikte göz önüne alındığı ikinci mertebe elastoplastik hesap sonucu bulunan $p_{göçme} = 2.057$ değerine oldukça yakın bir sonuçtur.

Bir başka yaklaşık ikinci mertebe elastoplastik hesap yöntemi olan Wood yaklaşık göçme yük parametresine göre sistem incelendiğinde, ikinci mertebe etkilerin sistem üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Yönteme göre, ikinci mertebe elastoplastik hesap yük parametresi birinci mertebe elastoplastik hesap yük parametresine yaklaşık eşit alınabilir. Wood yaklaşık göçme yük parametresi yöntemine göre sistemin göçme yükü $p_w = 3.084$ olur.

Yapılan tüm hesaplar karşılaştırıldığında hem malzeme hem de geometri bakımından lineer olmayan çözüm en gerçekçi sonucu göstermektedir. Ayrıca, malzemenin lineer olmayan davranışı dikkate alınırken normal kuvvetin akma şartına olan etkisinin ihmal edilmemesinin önemi görülmüştür. İncelenen örnek çerçeve için malzeme bakımından lineer olmayan davranışın geometri bakımından lineer olmayan davranışa oranla çerçeve davranışına olan etkisi nispeten daha fazladır.

İncelenen çerçevede ikinci mertebe elastoplastik hesap adımları dikkate alındığında plastik mafsallar kolonlarda oluşmaktadır. Bu, seçilen sistemin güçlü kolon ve nispeten zayıf kiriş yaklaşımına uymadığını gösteren bir sonuçtur.

Düşey ve yatay yük parametresinin birlikte arttırılması yerine, düşey yük parametresinin sabit bir değere kadar arttırılıp sabit tutulması ve yatay yük parametresinin yapı göçene kadar arttırılması deprem, rüzgar vb. etkiler düşünüldüğünde daha gerçekçi bir yaklaşımdır.

6.2 Geometrik Non-Linear ve Yaklaşık II. Mertebe Lineer Elastik Çözüm Yöntemleri ile İncelenen Çok Katlı Örnek Çerçevenin Hesap Sonuçları

Geometri bakımından lineer olmayan davranış ve yaklaşık ikinci mertebe lineer elastik çözüm yöntemleri bir örnek üzerinde incelenmiştir. Örnek çerçeveye aşağıdaki hesaplar uygulanmıştır:

- I. Mertebe Lineer Elastik Hesap
- Stabilite Fonksiyonları ile II. Mertebe Lineer Elastik Hesap
- Geometrik Rijitlik Matrisi ile II. Mertebe Lineer Elastik Hesap
- P-Δ Geometrik Rijitlik Matrisi Analizi ile II. Mertebe Lineer Elastik Hesap
- İteratif Yatay Yük Artımı Yöntemi ile Yaklaşık II. Mertebe Hesap
- İteratif Düşey Yük Artımı Yöntemi ile Yaklaşık II. Mertebe Hesap

Beş katlı ve tek açıklıklı olan örnek çerçeve birinci mertebe lineer elastik yöntem ile çözülerek mevcut normal kuvvet, moment ve tepe noktası deplasman değerleri elde edilmiştir. Diğer analizler sırayla çerçeveye uygulanmış ve elde edilen veriler incelenmiştir. Her analizden elde edilen kat deplasmanları (2,3,4,9,11 numaralı düğüm noktalarının yatay deplasman değerleri) Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Çeşitli II. Mertebe Analiz Yöntemleri İçin Beş Katlı Tek Açıklıklı Örnek Çelik Çerçevenin Kat Deplasman Değerleri

	Δ_5 (mm)	Δ_4 (mm)	Δ_3 (mm)	Δ_2 (mm)	Δ_1 (mm)
I. Mertebe Lineer Elastik Analiz	203.342	154.940	108.897	64.569	21.780
Stabilite Fonksiyonları ile II. Mertebe Lineer Elastik Analiz	211.309	161.148	113.346	67.187	22.541
Geometrik Rijitlik Matrisi ile II. Mertebe Lineer Elastik Analiz	211.308	161.148	113.346	67.187	22.541
P-Δ Geometrik Rijitlik Matrisi ile II. Mertebe Lineer Elastik Analiz	211.062	160.945	113.178	67.063	22.496
İteratif Yatay Yük Yöntemi ile II. Mertebe Analizi	211.077	160.958	113.187	67.070	22.495
İteratif Düşey Yük Yöntemi ile II. Mertebe Analizi	211.067	160.950	113.183	67.067	22.494
Sap 2000 Non Linear	211.374	161.181	113.362	67.194	22.542

Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da 2 ve 10 numaralı düğüm noktaları için çeşitli ikinci mertebe lineer elastik çözümler için moment değerleri verilmiştir. Yatay iteratif artım ve düşey iteratif artım yöntemleri ile elde edilen sonuçların stabilite fonksiyonları ve geometrik rijitlik matrisi ile yapılan ikinci mertebe analiz sonuçlarına yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, Sap 2000 bilgisayar programı ile sistem ikinci mertebe etkilerle birlikte çözülmüş ve bulunan sonuçlar kontrol edilmiştir.

		2. Eleman j. Ucu	
		46.921 tm.	
		49.138 tm.	
		49.138 tm.	
		49.092 tm.	
		49.107 tm.	
		49.090 tm.	
		49.145 tm.	
		1. Eleman k. Ucu	
I. Mertebe Lineer Elastik:	26.171 tm.		
Stabilite Fonksiyonları:	26.799 tm.		
Geo. Rijitlik Matrisi:	26.799 tm.		
P-Δ Geo. Rijitlik Matrisi:	26.712 tm.		
Yatay İteratif Artım Yöntemi:	26.701 tm.		
Düşey İteratif Artım Yöntemi :	26.715 tm.		
SAP2000 Non Linear:	26.792 tm.		
		4. Eleman j. Ucu	
		73.092 tm.	
		75.937 tm.	
		75.937 tm.	
		75.804 tm.	
		75.808 tm.	
		75.806 tm.	
		75.938 tm.	

Şekil 6.8 Çeşitli II. Mertebe Analiz Yöntemleri İçin Beş Katlı Tek Açıklıklı Önek Çelik Çerçevenin 2 Numaralı Düğüm Noktası Moment Değerleri

		11. Eleman k. Ucu	
I. Mertebe Lineer Elastik:	39.548 tm.		
Stabilite Fonksiyonları:	40.994 tm.		
Geo. Rijitlik Matrisi:	40.994 tm.		
P-Δ Geo. Rijitlik Matrisi:	40.989 tm.		
Yatay İteratif Artım Yöntemi:	40.992 tm.		
Düşey İteratif Artım Yöntemi :	40.990 tm.		
SAP2000 Non Linear:	40.995 tm.		
		15. Eleman j. Ucu	
		13.935 tm.	
		14.416 tm.	
		14.416 tm.	
		14.410 tm.	
		14.411 tm.	
		14.412 tm.	
		14.42 tm.	
		12. Eleman k. Ucu	
		25.615 tm.	
		26.578 tm.	
		26.578 tm.	
		26.578 tm.	
		26.580 tm.	
		26.578 tm.	
		26.575 tm.	

Şekil 6.9 Çeşitli II. Mertebe Analiz Yöntemleri İçin Beş Katlı Tek Açıklıklı Önek Çelik Çerçevenin 10 Numaralı Düğüm Noktası Moment Değerleri

6.3 Lineer Olmayan Çözüm Yöntemleri Sonuçları

Bu çalışmada, çelik yapılarda non-linear çözüm yöntemlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Lineer ve lineer olmayan çözüm yöntemleri kullanılarak yapı davranışının gözlenebilmesi ve göçme yükünün bulunabilmesi için çeşitli yöntemleri kapsayan bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Lineer hesaplar yapıldığında, herhangi bir nedenle lineer sınırların aşıldığı durumlar için yapı davranışı gözlenemez, ancak non-linear hesap yöntemleri ile bu davranış izlenebilir.
- Malzeme ve geometri bakımından lineer olmayan davranış örnekler üzerinde ayrı ayrı ve birlikte incelenmiştir. Yapılar için lineer olmayan davranış çeşitlerinden nispeten daha etkili olan bulunabilir.
- Yapılarda mevcut bulunan tüm yatay ve düşey yüklerin birlikte göçme parametresine ulaşmaya kadar artırıldığı yöntem ile düşey yüklerin sabit bir düşey yük katsayısıyla artırılıp sabit tutulduğu, yatay yüklerin ise yapı göçme parametresine kadar arttırıldığı yöntem incelenmiş ve bulunan sonuçlar sunulmuştur. İstenilen yük artım yöntemi kullanılarak yapı istenilen şekilde incelenebilmektedir.
- Yapıların göçme yükünün bulunabilmesi önemli olmakta ve emniyet kriterlerinin tüm davranış üzerinden gözlenebilmesi büyük avantaj sağlamaktadır. Bu sayede yapılar istenilen güvenlik faktörüne göre boyutlandırılabilir.
- Yapı sistemleri için güvenlik faktörü, boyutlandırma ve hesap aşamaları için oldukça önemlidir. Yapı için güvenlik faktörü bilinirse yapının süneklik oranı kolaylıkla tahmin edilebilir.
- Yük artımı işlemi süresince yapıda oluşacak mafsalların oluşum sırasının izlenebilmesi oldukça önemlidir. Bu sıranın bilinmesi, yapı lineer sınırlara göre

boyutlandırılmış bile olsa lineer sınırların herhangi bir şekilde aşıldığı durumda muhtemel yapı davranışının önceden bilinmesine olanak sağlar.

- Mafsalların oluşum sırasının yük artımı yöntemleri ile belirlenmesi, yapıdaki kritik bölgelerin belirlenmesi anlamına da gelir. Örnek çerçevenin çözümlerinden de görülebileceği gibi mafsalların kolonlarda oluşması gibi istenmeyen durumlar önceden tahmin edilebilir.
- Tek açıklıklı ve tek katlı örnek çerçeve incelendiğinde, kolonlardaki eksenel kuvvetin yüksek olmasına rağmen ikinci mertebe etkiler kolon davranışı üzerinde etkili olamamıştır. Ancak kolonlardaki yüksek eksenel kuvvet akma kriteri olarak dikkate alındığında yapı davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.
- Burkulma yükleri için yaklaşık burkulma yük parametresi hesabı yapılmıştır. Ayrıca, lineer olmayan adımlarda eleman uç deplasmanlarının işaretleri bir önceki adımdaki değerlerle burkulma durumunun kontrolü amacıyla karşılaştırılmıştır.
- İkinci mertebe etkilerin incelenmesi yüksek ve narin yapılarda önemlidir. Çok katlı örnek çerçevenin incelenmesinde yaklaşık ikinci mertebe hesap yöntemleri de incelenmiştir. Yaklaşık yöntemlerle lineer olmayan davranışın incelenmesi bilinçli bir şekilde yapıldığında zaman, işlem adımlarında tasarruf sağlayacaktır.
- Yapılan hesaplarda, malzeme bakımından lineer olmayan şekilde değişimlere bağlı olarak artan yerdeğiştirmeler nedeniyle ikinci mertebe etkilerin de dolaylı olarak arttığı görülmüştür. Sistemin rijitliğinin daha da azalması, artan yük parametresine karşı giderek daha da artan yerdeğiştirmeler meydana getirmiştir.
- Birçok yapı sisteminde, hem lineer olmayan elastik deformasyonlar ve hem de geometri değişimleri çözüm üzerine birlikte etki etmektedir. Bunun sonucu olarak; hem malzeme, hem de geometri değişimleri bakımından lineer olmayan sistemlerin hesap yöntemlerinin incelenmesi oldukça önemlidir.

KAYNAKLAR

- American Institute of Steel Construction (1999). Load and Resistance Factor Design for Structural Steel Buildings. Chicago.
- Arda, T.S.,& Uzgider, E. (1986). Çelik yapılarda taşıma gücü. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası.
- Budynas, R.G. (1998). Advanced strength and applied stress analysis. New York: McGraw-Hill.
- Chan, S.L. (2000). Non-linear behavior and design of steel structures. Journal of Constructional Steel Research. 57, 1217-1231
- Chan, S.L.,& Chui, P.T. (2000). Non-linear static and cyclic analysis of steel frames with semi-rigid connections. New York: Elsevier Science.
- Chen, W.F. (2000). Structural stability: from theory to practice. Engineering Structures. 22, 116-122
- Chen, W.F.,& Kim, S.E. (1997). LRFD steel design using advanced analysis. Florida: CRC Press.
- Chen, W.F., Kim, S.E.,& Choi, S.H. (2001). Practical second-order inelastic analysis for three-dimensional steel frames. Steel Structures. 1, 213-223
- Chen, W.F.,& Lui, E.M. (1991). Stability design of steel frames. Florida: CRC Press.
- Chen, W.F.,& Sohal, I.S. (2000). Plastic design and second order analysis of steel frames. Berlin: Springer-Verlag.
- Choi, S.H.,& Kim, S.E. (2002). Optimal design of steel frame using practical nonlinear inelastic analysis. Engineering Structures. 24, 1189-1201
- Çakıroğlu, A.,& Özer, E. (1980). Malzeme ve geometri değişimi bakımından lineer olmayan sistemler I. İstanbul: Matbaa teknisyenleri Basımevi.
- Çatal, H.H. (2002). Yapı ve deprem mühendisliğinde matris yöntemler. İzmir, D.E.Ü Mühendislik Fakültesi Yayınları No:294

- Davies, M.J. (2002). Second-order elastic-plastic analysis of plane frames. Journal of Constructional Steel Research. 58, 1315-1330
- Federal Emergency Management Agency, FEMA 356 (2000). Prestandart and Commentary For The Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington.
- Goto, Y., & Chen, W.F. (1987). Second-order elastic analysis for frame design. Journal of Structural Engineering. 113, 1501-1519
- Kılıç, S.A., & Krawinkler, H. (1998). P-Delta effects in portal frames. 11th European Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam.
- Kim, S.E., & Chen, W.F. (1999). Design guide for steel frames using advanced analysis program. Engineering Structures. 21, 352-364
- King, W.S., White, D.W., & Chen, W.F., (1992). Second-order inelastic analysis methods for steel-frame design. Journal of Structural Engineering. 118, 408-428.
- Kruger, T.S., Rensburg, B.W., & Plesis, G.M. (1995). Non-linear analysis of structural steel frames. Journal of Constructional Steel Research. 34, 285-306
- Livesley, R.K. (1975). Matrix methods of structural analysis. Great Britain: Pergamon Press.
- Majid, K.I. (1972). Non-linear structures. USA: Wiley & Sons.
- Moy, S.S.J. (1996). Plastic methods for steel and concrete structures. Great Britain: MacMillan Press.
- Nethercot, D.A. (2000). Frame structures: global performance, static and stability behaviour. Journal of Constructional Steel Research. 55, 109-124
- Özer, E. (1969). Lineer olmayan sistemlerin hesabı için bir metod. Doktora Tezi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sap2000 Nonlinear (2002). Analysis reference manual. Computers & Structures Inc. California.
- Tezcan, S. (1970). Çubuk sistemlerin elektronik hesap makineleri ile çözümü. İstanbul: Arı Kitabevi Matbaası.
- Türk Standartları Enstitüsü. (1985). T.S. 4561 Çelik Yapıların Plastik Teoriye Göre Hesap Kuralları, Ankara.