

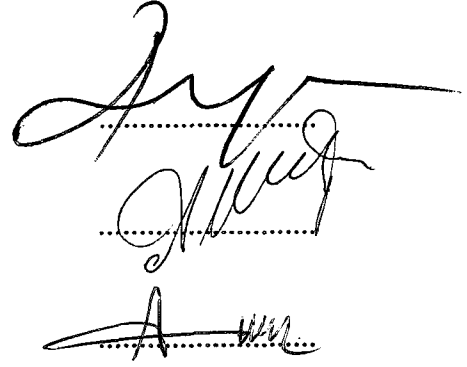
TE. YÜSEKÖĞRETİM KURULU
BİLGİLENDİRME MERKEZİ

JURİ ÜYELERİ

Prof.Dr.Rüstem GÜL

Yrd.Doç.Dr.Ahmet BUDAK

Yrd.Doç.Dr.Ayla AMİL



11/02/2000 tarihinde 03/15 kararla kurulan jürimiz iş bu Y.Lisans
tezini 06. 04. 2000 tarihinde kabul etmiştir.

96389

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DÜZLEM ÇERÇEVELERİN DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ
VE PLASTİK MAFSAL ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

36389

Mehmet Emin ÖNCÜ

Yönetici: Yrd.Doç.Dr. Ahmet BUDAK

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

Düzlem çerçevelerin malzeme davranışı ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan analizi yapılmış, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca betonarme ve çelik için analizin uygulanabilirliği irdelenmiştir.

Malzeme davranışı bakımından doğrusal olmayan analizde, malzeme davranışı için ideal elastoplastik davranış kabul edilmiş ve bir adım adım analiz yöntemi kullanılarak plastik mafsalların gelişimi incelenmiştir. Analizin her adımında, sistem doğrusal teoriye göre çözümlenerek, yeni plastik mafsallın oluşması için gerekli yük parametresi hesaplanmış, daha sonra yük parametresinin bu değeri karşılık gelen yükler için bir ardışık yaklaşım yöntemi kullanılarak normal kuvvetlerin etkisini de dikkate alan II mertebe teorisi ile geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan analiz yapılmıştır.

Kullanılan analiz yöntemi QBasic programlama dilinde kodlanarak bir bilgisayar programı hazırlanmış, çalışmanın sonunda bazı örnekler üzerinde irdemeler yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Matris deplasman yöntemi, doğrusal olmayan analiz, I. mertebe teorisi, II. mertebe teorisi, plastik mafsall, elastoplastik malzeme.

SUMMARY

As general knowledge has been given, which is about methods of linear and non-linear structural analysis, materially and geometrically non-linear structural analysis of plane frames has been used. Moreover, applicability of the analysis for reinforced concrete and steel has been investigated.

It has been assumed that elastic - plastic behavior for material behavior in the analysis of materially non-linear plane frames. As it was used that a step by step method, it has been investigated that the plastic hinges was occurred. Each step of structural analysis, as the system was solved with linear structural analysis, load parameter has been calculated in order that new load parameter occurs. After, as it was used that a method of successive approximations for loads which are equivalent value of load parameter and that second order theory that is consider effect of axial forces, non-linear analysis is obtained.

Method of analysis, which is used, is coded in Quick Basic and it is prepared that a computer programming. In the end of study, some examples are investigated.

Key words: Direct stiffness method, nonlinear analysis, first order theory, second order theory, plastic hinge, elastic - plastic behavior.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başından itibaren tüm aşamalarında, her türlü ilgi, destek ve yardımlarını gördüğüm, aynı zamanda iyi bir çalışma ortamı sunan, danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet BUDAK' a şükran ve saygılarımı sunarım.

Çalışmanın sağlıklı bir şekilde yürütülmesinde her türlü kolaylığı sağlayan ve literatür araştırmasında yardımlarını gördüğüm başta Dicle Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. M. Sedat HAYALİOĞLU olmak üzere Yrd. Doç. Dr. Nizamettin HAMİDİ' ye, Yrd. Doç. Dr. Halil GÖRGÜN' e ve bölümdeki tüm öğretim elemanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca Yüksek Lisans Öğrenimimi sürdürdüğüm Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Rüstem GÜL' e ve bölümdeki tüm öğretim elemanlarına, ilgilerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Heyecanla çalışmanın sonunu bekleyen aileme ve yakınlarıma da sabırlarından dolayı minnettar olduğumu belirtmek isterim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
SUMMARY	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER	ix
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Malzeme Davranışının Doğrusal Olmaması.....	4
1.2.1. Plastik Hesap.....	8
1.2.2. Plastik Hesabın Uygulanabilirliği	9
1.3. Geometri Değişimlerinin Doğrusal Olmaması	15
1.4. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz Yaklaşımlarının Karşılaştırılması.....	16
1.5. Yapı Sistemlerinin Doğrusal Olmayan Teoriye Göre Hesap Yöntemlerinin Başlıca Kullanım Alanları	18
1.6. Konu İle İlgili Çalışmalar	19
2. TEORİK ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Teorik Çalışmanın Amacı	24
2.2. Matris Deplasman Yöntemi İle Yapıların Doğrusal Hesabı.....	25

2.2.1.	Eleman Rijitlik Matrisi	29
2.2.2.	Yer Değiştirme Dönüşüm Matrisi	31
2.2.3.	Yükleme Matrisi.....	33
2.2.4.	Denklem Takımının Çözümü.....	34
2.2.5.	Kesit Tesirlerinin Hesabı	34
2.3.	Yapıların Doğrusal Olmayan Hesabı	34
2.3.1.	Malzeme Davranışına Göre Doğrusal Olmayan Hesap	35
2.3.1.1.	Akma Şartları	38
2.3.2.	Geometri Değişimine Göre Doğrusal Olmayan Hesap	39
2.3.2.1.	II. Mertebe Teorisi.....	40
2.3.2.2.	Geometri Değişimlerinin Büyük Olması Durumu	44
2.4.	Bilgisayar Programı.....	46
2.4.1.	Programın Amacı ve Uygulama Alanı	46
2.4.2.	Verilerin Girilmesi	47
2.4.2.1.	Ekran Formatı	47
2.4.2.2.	Sistem ve Çubuk Özellikleri	47
2.4.2.3.	Diğer Girdiler.....	48
2.4.3.	Çıktıların Alınması	48
2.4.3.1.	Yer Değiştirmeler ve İç Kuvvetler	48
2.4.3.2.	Yük Parametreleri ve Plastik Mafsal Yerleri	48
2.4.4.	Kesit Tesiri Diyagramları	49
2.4.5.	Akış Diyagramı	49
2.4.6.	Akış Diyagramının Açıklanması.....	52

3.	BULGULAR VE İRDELEMELER	55
3.1.	Düzlem Çerçevelerin Doğrusal Olmayan Hesabı	55
3.2.	Betonarme Çerçevelerin Elastik ve Plastik Çözümlerinin İncelenmesi	57
3.2.1.	Elastik ve Plastik Hesap Sonucu Bulunan Donatı Oranlarının Karşılaştırılması	69
3.2.2.	Elastik ve Plastik Hesap Sonucu Bulunan Mafsal Gelişiminin Karşılaştırılması	70
3.2.3.	Elastik ve Plastik Hesap Sonucu Bulunan Yük Parametrelerinin Karşılaştırılması	71
3.3.	Elastoplastik Hesabın Çelik Çerçevede Uygulaması	71
3.4.	İkinci Mertebe Etkileri İçin Bir Uygulama.....	73
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	76
	KAYNAKLAR.....	78

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 St37 çeliği için $\sigma - \epsilon$ diyagramı	7
Şekil 1.2 İdeal elastoplastik malzeme	10
Şekil 1.3 Beton için kısa süreli yükleme durumuna ait $\sigma - \epsilon$ eğrisi	11
Şekil 1.4 Beton için uzun süreli yükleme durumuna ait $\sigma - \epsilon$ eğrisi	11
Şekil 1.5 Betonarme kirişlerde gerçek ve yaklaşık $\sigma - \epsilon$ bağıntıları	13
Şekil 1.6 Yük parametresi – yer değiştirme eğrileri	17
Şekil 2.1 Matris deplasman yönteminde pozitif yönler	27
Şekil 2.2 Çubukta boy değişimi	44
Şekil 2.3 Akış diyagramı	50
Şekil 2.4 Akış diyagramı (devam)	51
Şekil 3.1 Kalıp planı, betonarme çerçeve ve yatay deprem yükleri	58
Şekil 3.2 Düşey yükler ve sağa doğru etkiyen yatay yükler için doğrusal hesaptan bulunan eğilme momenti diyagramı (tcm)	58
Şekil 3.3 Düşey yükler ve sola doğru etkiyen yatay yükler için doğrusal hesaptan bulunan eğilme momenti diyagramı (tcm)	59
Şekil 3.4 Doğrusal hesap sonucu elde edilen donatı oranları	59
Şekil 3.5 Düşey ve sağa doğru etkiyen yatay yükler için doğrusal hesaptan bulunan donatı oranları ile hesaplanan çerçevede plastik mafsalların gelişim sırası ve yük parametreleri	60
Şekil 3.6 Düşey ve sola doğru etkiyen yatay yükler için doğrusal hesaptan bulunan donatı oranları ile hesaplanan çerçevede plastik mafsalların gelişim sırası ve yük parametreleri	61
Şekil 3.7 Elastik teori ile hesaplanan donatı oranlarına ait moment diyagramları.	61
Şekil 3.8 Elastik teori ile hesaplanan donatı oranlarına ait moment diyagramları (devam).	62
Şekil 3.9 Elastik teori ile hesaplanan donatı oranlarına ait moment diyagramları (devam)	63
Şekil 3.10 Plastik hesap için seçilen donatı oranları ve plastik mafsal gelişimi	64

Şekil 3.11	Plastik hesapta yük parametrelerine bağlı olarak eğilme momenti diyagramlarının değişimi.....	65
Şekil 3.12	Plastik hesapta yük parametrelerine bağlı olarak eğilme momenti diyagramlarının değişimi (devam).....	66
Şekil 3.13	Plastik hesapta yük parametrelerine bağlı olarak eğilme momenti diyagramlarının değişimi (devam).....	67
Şekil 3.14	Plastik hesapta yük parametrelerine bağlı olarak eğilme momenti diyagramlarının değişimi (devam).....	68
Şekil 3.15	Plastik hesapta yük parametrelerine bağlı olarak eğilme momenti diyagramlarının değişimi (devam).....	69
Şekil 3.16	Çelik çerçevenin yükleme durumu ve plastik mafsalsal gelişimi.....	72
Şekil 3.17	Yük parametresine bağlı olarak eğilme momenti diyagramlarının değişimi	72
Şekil 3.18	Çelik çerçeve ve boyutları	74
Şekil 3.19	I.mertebe elastoplastik ve akma şartının basit eğilme durumu olması halinde elde edilen plastik mafsalsal gelişimi ve yük parametreleri.....	74
Şekil 3.20	II. mertebe elastoplastik ve akma şartının basit eğilme durumu olması halinde elde edilen plastik mafsalsal gelişimi ve yük parametreleri.....	75
Şekil 3.21	II.mertebe elastoplastik ve akma şartının bileşik mukavemet hali olması durumunda elde edilen plastik mafsalsal gelişimi ve yük parametreleri	75

KISALTMALAR VE SİMGELER

A.C.I	:Amerikan Beton Enstitüsü
C.E.B	:Avrupa Beton Komitesi
A	:Kesit alanı
A_i, A_j, B	:Temel rijitlik sayıları
A_s	:Çekme donatısı alanı
A'_s	:Basınç donatısı alanı
a_i, a_j, b_{ij}	:Temel rijitlik katsayıları
b, h	:Çubuk elemanda kesit genişliği ve kesit yüksekliği
b^1	:Düzeltilmiş kesit genişliği
c	:Beton basınç bölgesinin derinliği
C_i, C_j, D, S	:Yardımcı rijitlik sayıları
E	:Elastisite modülü
e	:Eksantrisite
e_i^1, e_j^1, φ_i	:Çekme durumuna göre düzeltme faktörleri
e_i, e_j, k^2, φ_c	:Basınç durumuna göre düzeltme faktörleri
F_1, F_2, F_3	:Kesit fonksiyonları
F_{cd}	:Betonun basınç hesap dayanımı
F_{yd}	:Çeliğin çekme hesap dayanımı
I	:Atalet momenti
i, j	:Çubuk düğüm noktaları
K_1, K_2	:Akma şartları
L	:Çubuk boyu
M, N, Q	:Kesit tesirleri; eğilme momenti, normal kuvvet, kesme kuvveti
M_p	:Plastik moment
M_{pl}	:Plastik taşıma kapasitesi
N_p	:Plastik normal kuvvet
P	:Yük parametresi

P_{σ}	:Burkulma yükü
P_i	:İşletme yükü
P_{L1}	:I. Mertebe limit yük
P_{L2}	:II. Mertebe limit yük
P_0	:İlk yük
t	:Sıcaklık
q	:Yayılı yük
X, Y	:Sistem eksen takımı
x, y	:Çubuk eksen takımı
Δl	:Şekil değiştirme
Δl_e	:Elastik şekil değiştirme
Δl_p	:Plastik şekil değiştirme
δ	:Yer değiştirme
ϕ, u, v	:Kesitin dönmesi, çubuk eksenindeki ve ona dik doğrultudaki yer değiştirmeleri
ϵ	:Birim şekil değiştirme
ϵ_1	:Betonun kırılma birim kısalması
λ	:Yük katsayısı
λ_p	:Plastik taşıma yüküne karşılık gelen yük katsayısı
λ_1	:Minimum yük katsayısı
ρ	:Donatı oranı
σ_A	:Akma gerilmesi
σ_b	:Basınç gerilmesi
Ψ	:Sapma açısı
$[A]$	:Dönüşüm matrisi
$[k_{ij}]$	:Çubuk rijitlik matrisi
$[L]$	:Yükleme matrisi
$[P]$	:Çubuk uç kuvvetleri matrisi
$[S]$	:Sistem rijitlik matrisi

[X] :Düğüm noktası yer değiştirme matrisi

[Z] :Rölatif yer değiştirme matrisi



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yapı sistemlerinin hesabı genellikle uzun ve yorucu işlemler gerektirmektedir. Bu nedenle yıllar boyunca bazı basitleştirici varsayımlar yapılarak yaklaşık yöntemler geliştirilmiş veya problem daha basite indirgenerek çözülmüştür.

Yapılan basitleştirici varsayımlardan en önemlisi malzemenin doğrusal - elastik davranacağı varsayımıdır. Bu basitleştirmede, yapıdaki gerilmelerin malzemenin elastik davrandığı bölge içinde kalacağı ve bu bölgede malzeme davranışının doğrusal olacağı varsayımı kullanılmaktadır.

Bir diğer önemli varsayım, yapı yer değiştirmelerinin çok küçük olduğu varsayımından hareketle denge denklemlerinin şekil değiştirmemiş sistem üzerinde yazılabileceği varsayımıdır (I. mertebe teorisi).

Bu iki varsayım yapı analizini oldukça kolaylaştırır. Yine yüklerin ve sistemin özelliklerine bağlı olarak yapılan başka bir takım basitleştirmelerden de söz edilebilir. Örneğin yatay yüklü çerçeve hesabında eksensel şekil değiştirmelerin ihmal edilmesi gibi.

Yapı analizinde sözü geçen doğrusallaştırma yoluyla pek çok problemin çözümü mümkün olmuştur. Sistemin davranışı doğrusal davranışa yakın olduğu ölçüde yeterli doğrulukta sonuç veren bu yol, sistemin davranışı doğrusal davranıştan uzaklaştıkça (gerilmeler artıkça) büyük hatalar verebilmektedir. Büyük gerilmeler nedeniyle sistemde ortaya çıkan büyük şekil değiştirmeler de, büyük yer değiştirmelere sebep olmakta ve I. mertebe teorisi geçerli olmaktan çıkmaktadır. Yine yapı elemanlarının burkulması da büyük yer değiştirmelerin oluşumuna sebep olabilmektedir.

Çelik ve alüminyum gibi sünek yapı malzemeleri elastik sınır içinde olandan çok daha büyük şekil değiştirmelere dayanabilmektedir. Bu malzemelerden bazıları akma gerilmesinin üstünde gerilmeler taşıyabilmektedir. Halbuki elastik boyutlandırma metotları bu üstünlükten yararlanamamaktadır. Bu süneklikten dolayı, hiperstatik yapılarda gerilmeler elastik sınırın üstünde yeniden yayılabilmektedir. Bu ikinci dağılımın gerilmeleri çok önemli ek yükler taşıyabilmektedir. Bu yüzden elastik inceleme gereksizce emniyetlidir [1]. Bunun sonucu da malzeme ve ekonomi yönünden kayıptır.

Tüm bu olumsuzluklardan dolayı, özellikle, yüksek dayanımlı malzemelerden yapılan narin yapılar ve temas bölgesinin genişliği yüke bağlı olarak değişen (dolgu duvarlar gibi) yapı elemanları ile ilgili problemler, geometrik sınır şartlarının değişmesinden dolayı doğrusal analizle çözülememektedir. Başvurulacak çözüm ise doğrusal olmayan analiz olmalıdır.

Öte yandan son yıllarda elektronik alanında hızlı gelişme, sayısal hesaplayıcı makinelerin oldukça kullanışlı hale gelmesine imkan sağlamış, her alanda olduğu gibi mühendislik problemlerinde de yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişme, mühendislik problemlerinin analizinde yapılan basitleştirmelerin azaltılmasına ve daha gerçekçi varsayımların analizde kullanılmasına imkan sağlamıştır. Böylece bahsedilen olumsuzlukların bir kısmı önlenebilmiş, yapı analizinin gerçeğe daha yakın elde edilmesi sağlanmış ve daha karmaşık yapı sistemlerinin analizi mümkün olmuştur.

Kırılma, burkulma, büyük yer değiştirme gibi olayların biri veya bir kaçıyla göçme sırasında yapı, genellikle malzeme ve geometri bakımından doğrusal davranış göstermediğinden, sistemin doğrusal olmayan teoriye göre hesap edilmesi gerekmektedir. Böylece göçmeye karşı istenen bir güvenlik sağlanabilmekte ve malzemenin doğrusal elastik sınırın üstündeki taşıma özelliğinden faydalanılabilmektedir.

Ortaya çıkan tablo, doğrusal olmayan analizin gerekliliğini, aynı zamanda uygulanabilirliğini göstermiştir. Ancak yapı sistemlerinin gerçek davranışına göre doğrusal olmayan analizin büyük hacimde bir hesabı gerektireceği de bilinmektedir.

Yapıların yükler altında analizi için yapı taşıyıcı sisteminin düğüm noktalarında birleşen birtakım elemanlardan meydana geldiği düşünülmektedir. Her bir elemanın uçlarındaki düğüm noktalarında meydana gelen iç kuvvet bileşenlerine, uç kuvvetleri; yer değiştirme bileşenlerine de uç yer değiştirmeleri adı verilmektedir. Dış etkiler altında her hangi bir yapının analizinde, yapı elemanlarının uç kuvvetleri ile uç yer değiştirmeleri arasında;

1. Düğüm noktalarının dengesi ile, elemanların dengesinden elde edilen denge denklemleri,
2. Herhangi bir düğüm noktasında birleşen elemanların uç deplasmanları ile mesnetlerdeki geometrik şartlarından elde edilen geometrik uygunluk şartları,
3. Malzemenin yükler altındaki davranışını temsil eden gerilme - şekil değiştirme bağıntılarından oluşan bünye denklemleri,

şeklinde ifade edilen üç şartın gerçekleşmesi gerekmektedir [2]. Bu üç şart, yapının analizi için gerekli denklemlerin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Yine denklemlerin ifade edilebilmesi için çoğu zaman problemin karakteristiğine uygun varsayımlar yapılmaktadır. Çoğunlukla malzeme davranışının doğrusal - elastik olduğu, denge denklemlerinin şekil değiştirmemiş sistem üzerinde yazılabileceği şeklinde yapılan varsayımlar yeterli olmakta (doğrusal analiz), fakat bazı özel problemlerde bu varsayımların geçerliği ortadan kalkmakta ve daha gerçekçi varsayımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda yapıların doğrusal olmayan davranışlarını ifade etmeye yönelik yöntemlerin geliştirilmesi söz konusu olmaktadır ki, bu yöntemler genel olarak doğrusal olmayan analiz olarak adlandırılmaktadır.

Herhangi bir yapının dış yükler altındaki analizinde öncelikle yapı davranışı irdelenerek, yapılabilecek varsayımlar araştırılmalı ve ancak bu şekilde analizde kullanılacak hesap yöntemi tespit edilmelidir. Yapı davranışına ters düşen varsayımları içeren hesap yöntemlerinin kullanılması ise yanlış sonuçların elde edilmesine neden olmaktadır.

Dolayısıyla yapı analizinde, ele alınan sistemin davranışında doğrusal olmamayı doğuracak sebepler araştırılmalıdır. Yapı mekaniği problemlerinde doğrusal olmamaya neden olabilecek çeşitli etkenler sıralanabilmektedir. Yapı sistemlerinin dış etkiler altındaki doğrusal olmayan davranışı, malzeme özellikleri nedeniyle bünye denklemlerinin doğrusal olmamasından ve geometri değişimlerinin denge denklemlerine ve geometrik uygunluk bağıntılarına etkisinden ileri gelmektedir. Bunlardan ilki malzeme davranışının doğrusal olmaması, ikincisi ise geometri değişiminin doğrusal olmaması olarak adlandırılmaktadır. Düşey ve yatay yükler etkisindeki bir yapı sisteminin doğrusal ve doğrusal olmayan teorilerin hesabına göre elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar, Bölüm 1.4 de şematik olarak gösterilmiştir [3].

Malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan yapı analizi aşağıda kısaca açıklanmıştır.

1.2. Malzeme Davranışının Doğrusal Olmaması

Malzeme davranışı bakımından doğrusal olmayan analizde, yapı malzemesinin gerçek gerilme - şekil değiştirme bağıntıları kullanılarak hesap yapılmaktadır. Malzemelerin gerçek gerilme - şekil değiştirme bağıntıları ise doğrusal değildir. Gerçek gerilme - şekil değiştirme bağıntılarının kullanılması nedeniyle yapı sisteminin hesabı da doğrusal olmamaktadır.

Yapı sistemlerinin malzeme bakımından doğrusal olmayan analizinin yapılabilmesi için öncelikle malzemenin gerilme - şekil değiştirme davranışının modellenmesi

gerekmektedir. Malzemelerin yükler altında göstermiş oldukları gerilme - şekil değiştirme davranışının tam olarak modellenmesi ise oldukça zordur. Bu nedenle malzemenin gerçek gerilme - şekil değiştirme eğrisine göre hesap oldukça karmaşıktır.

Örneğin, betonun gerilme - şekil değiştirme eğrisini bir çok değişken etkilemektedir. Deney sonuçları, gevrek bir malzeme olan betonun gerilme - birim kısalma diyagramının doğrusal olmadığını kesinlikle göstermiştir [4].

Betonun $\sigma - \epsilon$ eğrisinin şekli ve maksimum birim kopma uzaması, beton mukavemetine göre değişmektedir. Beton mukavemetinin $\sigma - \epsilon$ eğrisi üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla yapılan deneylerden;

- Farklı mukavemete sahip betonlar için elde edilen farklı $\sigma - \epsilon$ eğrilerinin başlangıç eğimlerinin (elastisite modülü olarak tanımlanabilir), beton kalitesi yükseldikçe arttığı,
- Yüksek mukavemetli betonların tepe noktalarının daha belirgin olduğu,
- Düşük mukavemetli betonların, yüksek mukavemetli olanlara oranla daha fazla sünekliğe (düktilite) sahip olduğu, yani, düşük mukavemetli betonların kırılma anındaki kısalmasının daha büyük olduğu,
- Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalmanın, beton mukavemetinden bağımsız olarak 0.002 mertebesinde olduğu,

gözlenmiştir [4].

Aynı beton numunelerin farklı yükleme hızına maruz bırakılmaları $\sigma - \epsilon$ eğrisinin özelliklerini farklı kılmaktadır. Bu konuda da bir çok deneysel gözlem yapılmış ve yükleme hızı azaldıkça mukavemetin düştüğü, buna karşılık sünekliğin önemli ölçüde

arttığı gözlenmiştir. Bu nedenle, betonun sabit ve ölü yükler altındaki davranışı ile, deprem gibi ani gelen yüklemeler altındaki davranışı oldukça değişiktir [4].

Beton basınç deneyinde, kırılmaya yakın bir noktada yük boşaltıldığı taktirde kalıcı bir şekil değiştirme elde edilmekte, numune tekrar yüklendiğinde, $\sigma - \epsilon$ eğrisinin eğimi değişmektedir. İkinci yüklemde birinci tepe noktasına ulaşamamaktadır. Betonun kırılma anındaki birim kısalmasını, yükleme hızı, kesit boyutları, kesit geometrisi, yükün eksantrisitesi gibi birçok değişken etkilemektedir [4].

Betonun $\sigma - \epsilon$ eğrisini deneysel olarak, gerçeğe bire bir uygunlukta belirlemek zordur. Çünkü, standart basınç deneyinde beton, tek yönlü gerilmeye maruzdur ve yanal yönlerde serbestçe şekil değiştirme yapabilmektedir. Halbuki gerçek yapı elemanlarında etriye ve fretaj, betonun yanal şekil değiştirmesini önleyebilmektedir. Betonun çift veya üç yönlü gerilmeler altındaki davranışını incelemek, deney tekniği açısından oldukça zordur. Bu konuda bir çok deneysel araştırma yapılmışsa da sorun tam olarak çözümlenememiştir.

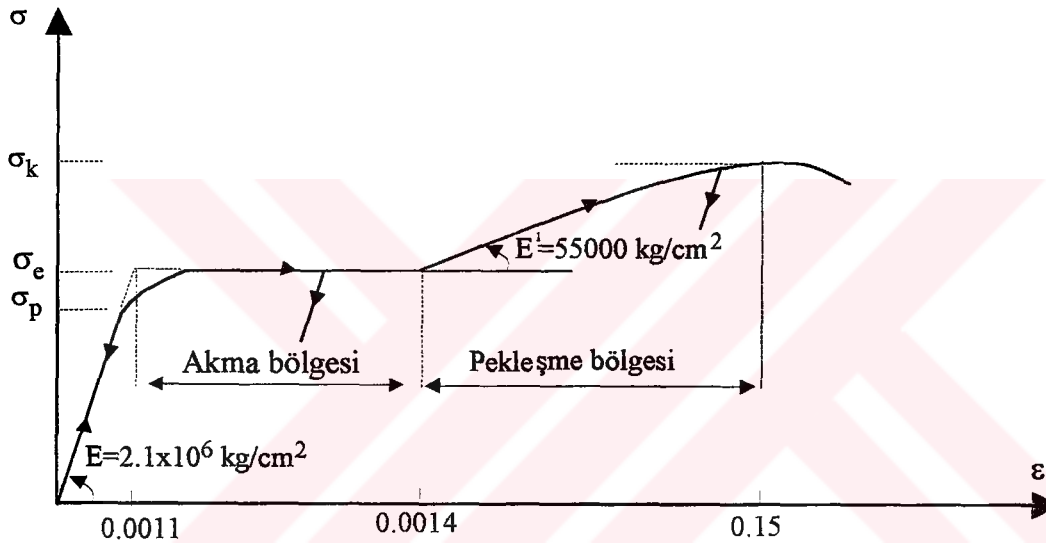
Betonun davranışını doğrusallıktan uzaklaştıran başka iki etken de rötre ve sünmedir. Rötre ve sünme, betonda zamana bağlı şekil değiştirme meydana getirmektedir. Bunlar ihmal edilemeyecek şekil değiştirmelerdir. Rötre şekil değiştirmesi, sıcaklığa, ortamın rutubetine, bu ortama maruz beton alanının genişliğine, beton karışımındaki su - çimento oranına ve betonun kür ediliş şekline bağlıdır. Sünme, betonun sabit yük altındaki şekil değiştirmesine denilmektedir. Bu şekil değiştirme, betonun basınç mukavemetine, ortamın sıcaklık ve rutubetine, betonun yaşına, uygulanan yükün mertebesine ve yükleme süresine bağlıdır. Sünme, beton mukavemetini düşürmektedir. Ancak zamanla beton mukavemeti yükseldiğinden, bu iki zıt etkinin sonucu betonun yük uygulandığı andaki yaşına göre değişmektedir. Beton mukavemetindeki zamana bağlı artış, sünmenin olumsuz etkisinden küçük olduğundan, beton mukavemeti zamanla azalmaktadır. Eski bir beton, aynı yük altında uzun bir süre sonra kırılabilmekte, taze bir beton ise kısa bir süre içinde kırılmazsa, o yükün altında kırılması artık söz konusu olmamaktadır.

Çelik için de doğrusal hesabın ne kadar yetersiz olduğunu daha iyi belirleyebilmek için, Şekil 1.1 de St37 (BÇ I) için $\sigma - \varepsilon$ diyagramı verilmiştir. Şekilde 1.1 de;

$\sigma_p = 1920 \text{ kg/cm}^2$ orantı sınırını,

$\sigma_e = 2400 \text{ kg/cm}^2$ akma sınırını,

$\sigma_k = 3700 - 4000 \text{ kg/cm}^2$ kırılma mukavemetini göstermektedir.



Şekil 1.1 St37 çeliği için $\sigma - \varepsilon$ diyagramı

Gerilme - şekil değiştirme bağıntıları doğrusal olmayan malzemeden yapılan sistemlerde, artan yüklerle birlikte iç kuvvetler de artarak bazı kesitlerde orantı sınırını (doğrusal - elastik sınırı) aşmakta ve bu kesitler dolayında plastik şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Yapı çeliği gibi sünek malzemeden yapılan sistemlerde, plastik şekil değiştirmelerin plastik kesit adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunların dışındaki bölgelerde ise sistemin doğrusal - elastik olarak davrandığı varsayılabilir (elastoplastik davranış). Bilindiği gibi, tek eksenli basit eğilmenin etkin olduğu düzlem sistemlerde bu varsayıma plastik mafsalları teorisi denilmektedir. Yeterli sayıda plastik mafsalları oluştuktan sonra sistem, yükün şiddetindeki herhangi bir

artıma ihtiyaç olmadan yer değiştirme yapabilmektedir. Yani, plastik mafsallar arasında kalan kiriş parçaları yükün şiddetindeki herhangi bir artıma gerek olmadan hareket edebilmektedir. Bu duruma mekanizma adı verilmektedir [5].

1.2.1. Plastik Hesap

Plastik hesap, genel olarak, sistemde elastik sınır dışında plastik yani kalıcı şekil değiştirmelerin olduğu bölgeyi de göz önüne alan hesap yöntemidir. Plastik hesapta bir kesitin taşıma gücüne o kesit bütünüyle plastikleştiğinde erişilmektedir [6]. Bir kesitte plastikleşme olduğunda, taşıyıcı sistemin göçmesi zorunlu değildir. Genellikle sistem yükün daha da artmasına dayanabilmektedir. Plastikleşmiş kesitte şekil değiştirmeler oluşmakta, ancak kesit tesirleri kesit taşıma gücüne eşit kalmaktadır.

Bir kesitin basit ya da bileşik olarak etkiyen kesit tesirlerine dayanması, kesitte bu tesirleri dengeleyen, plastik yönden kabul edilebilir bir gerilme dağılımı bulunduğu sürece mümkündür.

Plastik teoriye göre boyutlandırma, elik yapılarda betonarme yapılara oranla hem daha kolay yapılabilmekte, hem de kesitlerin taşıma gücünün yanı sıra taşıyıcı sistemin plastik davranışının da hesapta göz önüne alınabilmesiyle ekonomik boyutlandırma açısından daha etkin sonuç vermektedir.

Plastik hesap, betonarme yapılarda, plastik mafsalların gelişim sırasını göstermesi ve dolayısıyla göçme durumu hakkında fikir vermesi bakımından kullanışlı olmaktadır. Ancak bu hesabın yapılabilmesi için de, yapının yeterince sünek davranış göstermesi gerekmektedir.

Plastik hesap yöntemlerinin varlığı elastik hesap yöntemlerini ortadan kaldırmaz. Bazı durumlarda plastik hesabın kullanılması daha avantajlıdır, bazılarında ise uygulanamaz ya da elastik hesaba eşdeğer bir boyutlandırmaya götürmektedir.

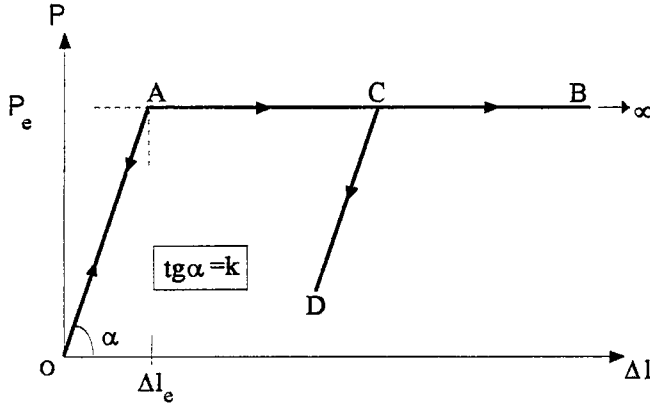
Elastik hesap kurallarında, sistemin taşıma gücüne, kabul edilmiş basitleştirilmiş hesap modelinde ilk lif plastikleşmeye başladığı zaman ulaşıldığı kabul edilmektedir. Gerçekte, artık gerilmeler, gerilme yığılmaları, her türden arızalar düşünülürse, bazı elemanlar hiçbir dış yük yüklenmeden de plastikleşmiş durumdadır. Plastik hesapta ise taşıyıcı sistem taşıma gücüne artık hiçbir ek yük taşıyamadığı durumda ulaşmaktadır.

1.2.2. Plastik Hesabın Uygulanabilirliği

Plastik hesapta kullanılacak çelik, ideal elastoplastik (Şekil 1.2) cisim olarak kabul edilebilmeli, yani elastik sınır gerilmesine eşit sabit gerilmeler altında büyük şekil değiştirmeler yapabilmelidir. Dolayısıyla çelik uzayabilir (düktül) olmalıdır. Bu özellik elastik bölge aşıldığında, sistemdeki kesit tesirlerinin yeniden dağılımına izin vermektedir. Yükler arttığında, sistemin plastikleşmiş elemanları, sabit kesit tesirleri altında şekil değiştirmekte, ancak bu şekil değiştirmeler sistemin henüz elastik kalan kısımları içinde bulunduklarından, sınırlı kalmakta ve ek yükler bu elastik kısımlarca alınmaktadır. Yüklerdeki artma, bir mekanizma oluşturmaya yeterli plastikleşme meydana gelinceye kadar sürmektedir [5].

Plastiklik sahanlığı (akma sahanlığı) göstermeyen yüksek dayanımlı çelikler, plastik hesap kurallarına göre hesaplanamamaktadır.

Ayrıca çelik, akma sahanlığı sonunda, pekleşme modülü küçük de olsa bir pekleşme bölgesi de göstermelidir. Bu pekleşme hesap yöntemlerinde ihmal edilmekle birlikte, güvenlik açısından gereklidir. Pekleşme plastik şekil değiştirmelerin, çubuklarda çok küçük bir bölgede yığılmasını önlemektedir.



Şekil 1.2 İdeal elastoplastik malzeme

İdeal elastoplastik malzemelerde yükleme eğrisinin

OA : $0 \leq \Delta l \leq \Delta l_e$ için $P = k\Delta l$

OB : $\Delta l_e \leq \Delta l \leq \infty$ için $P = P_e$

şeklinde iki doğru parçasından meydana geldiği kabul edilmektedir. Boşaltma eğrisi ise $\Delta l \leq \Delta l_e$ için OA ile çakışan, $\Delta l > \Delta l_e$ için OA ya paralel olan bir doğru parçası ile tanımlanmaktadır. Burada:

Δl_e : elastik şekil değiştirme

Δl_p : plastik şekil değiştirme

olarak tanımlanmaktadır [7].

Plastik (limit) hesabın betonarme yapılara uygulanmasında ise bazı şüpheler vardır. Plastik hesabın geçerli olabilmesi için, plastik mafsal olan kesitlerin çok sünek bir davranış göstermeleri, başka bir ifadeyle taşıma kapasiteleri azalmadan, büyük dönme yeteneğine sahip olmaları gerekmektedir. Çelik yapılarda bu tür süneklik kolaylıkla sağlanabilmekte, betonarmede ise gevrek bir davranışa yol açan kesme kırılması ve aderans çözülmesine kesinlikle engel olunması gerekmektedir. Ayrıca, eksensel yük taşımaları nedeniyle davranışları sünek olmayan kolonların, sargı donatısı ile

Betonun doğrusal olmayan gerilme - birim kısalma diyagramının elastik olmayan özelliği dolayısıyla, yük boşaltıldığı taktirde dönüş eğrisi değişik olacağından dolayı, süperpozisyon prensibi betona uygulanamamaktadır (Şekil 1.3, Şekil 1.4).

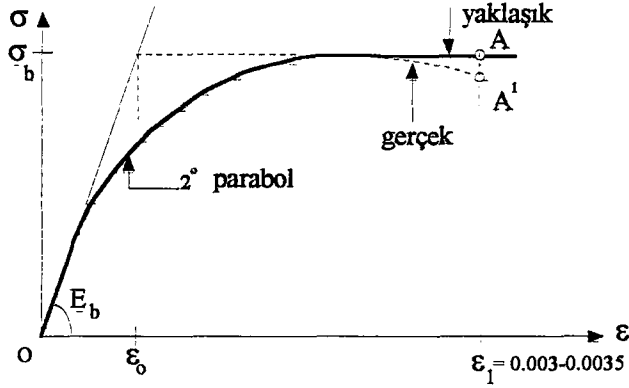
Görüldüğü gibi, değişen yükler altında gerilme değişimleri çok karmaşıktır. Bu yüzden, bu tür doğrusal olmama durumunun göz önüne alınabilmesi için gerilme - şekil değiştirme eğrisinin bir takım basitleştirilmiş şekilleri kolaylık sağlayacaktır.

Doğrusal - elastik varsayımla yapılan hesapta gerilmelerin, bu varsayımın geçerli olmayacağı düzeye ulaşmaları, malzemede plastik şekil değiştirmeler doğurmasa bile, elde edilen sonucun gerçek çözümden uzaklaşması sonucunu doğurmaktadır.

Yapılacak basitleştirmeler doğrusal olmayan hesaptan sapmayacak şekilde düzenlenmelidir. Örnek olarak çeliğin $\sigma - \epsilon$ eğrisini, farklı eğimli üç doğru olarak kabul etmek veya doğrusal elastik bölgeye bir yatay doğru eklemek şeklindeki basitleştirmeler gösterilebilmektedir [8]. En çok uygulananı ise doğrusal elastik tam plastik, yani ideal elastoplastik varsayımdır.

Kendine özgü karmaşık bir davranışı olan betonun, betonarme bir yapı elemanında donatı olarak kullanılan çelik çubuk ile beraber çalışması, çözümü zor sorunlar doğurmaktadır. Sorunun beton davranışının doğrusal - elastik olarak çözümlenmesi gerçek dışı sonuçlar vermektedir.

Bir karşılaştırma olması bakımından, basit eğilme etkisindeki betonarme kirişlerde, basınç liflerindeki gerçek gerilme - şekil değiştirme bağıntıları ile hesaplarda kullanılan yaklaşık $\sigma - \epsilon$ diyagramı Şekil 1.5 de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, basınç bölgesindeki betonun kırılma birim kısalması $\epsilon_1 = 0.003 - 0.0035$ değerinde meydana gelmektedir. Etriyesi fazla olan kirişlerde ϵ_1 değeri 0.01 e kadar yükselmektedir [7].



Şekil 1.5 Betonarme kirişlerde gerçek ve yaklaşık $\sigma - \epsilon$ bağıntıları

Betonarme sistemlerde, eleman kesitlerinde ve elemanlar arasında önemli gerilme, kuvvet ve moment transferi olduğu söylenebilmektedir. Çünkü, betonun artan şekil değiştirme altında bir gerilme azalması yapabilmesi (Şekil 1.5), söz konusu gerilme transferi ile mümkün olabilmektedir. Bu transfer işlemi yapılırken beton dış liflerindeki birim kısalma artmaya devam etmektedir. Bu davranışa, gerilmelerin yeniden dağılımı (gerilme uyumu), denilmektedir. Betonarme kesitin kendi içindeki gerilme ve yük transferlerinin yanı sıra hiperstatik sistemlerde elemandan elemana yük aktarılması söz konusudur. Çerçeve sistemlerde ve sürekli kirişlerde de betonarmenin elastik olmayan davranışı moment ve kesme kuvvetleri transferini sağlamaktadır.

Betonun doğrusal olmayan $\sigma - \epsilon$ özelliği (özellikle belirli bir kısalmadan sonra gerilmedeki azalma özelliği), çelik ve betonun birlikte çalışmaları, betonun çatlaması ve çeliğin akması, bu tür transfer davranışta önemli rol oynamaktadır. Betonarme kesitin bir tek lifi maksimum gerilmeye ulaştığında kesit kırılmayacağı gibi, monolitik bir betonarme sistemdeki bir veya bir kaç elemanın maksimum kapasitelerine ulaşmaları sistemin yıkılmasına neden olmamaktadır. Beton ve betonarmenin kendine özgü bu tür davranışı büyük bir emniyet kaynağıdır [4].

Ayrıca yıkılan veya hasar görmüş bir yapıda hasar veya yıkılmanın nedenlerini elastik teori ile anlamak imkansızdır. Yapının emniyetini elastik teori ile hesaplamaya imkan yoktur.

Betonarme kirişler taşıma gücüne donatının akması ile eriştiklerinden beton mukavemeti ve betonun $\sigma - \varepsilon$ özelliklerinin, mukavemet ve davranış üzerinde önemli etkileri yoktur.

Kolonlarda ise durum değişiktir. Eksantrik basınca maruz bir kolonun kırılma şekli $\frac{M}{N_d}$

(eğilme momenti / normal kuvvet) oranına, yani eksantrisiteye bağlıdır. Bu oran büyük olduğunda, kolon taşıma gücüne donatının akması ile ulaşacak ve davranış kırış davranışına benzer olacaktır. Yani kırılma, sünek bir kırılma olan çekme kırılması şeklinde olacaktır. Eksantrisite küçük olduğunda ise, kırılma, donatı akma limitine ulaşmadan, betonun ezilmesi ile meydana gelecektir. Bu tür kırılmada esas olan betonun davranışdır. O halde kirişlerde ve eksantrisitenin çok büyük olduğu kolonlarda beton davranışı için gerçekçi olmayan bir varsayım (elastik teoride olduğu gibi) yapılırsa bile elde edilen sonuçlar gerçeğe yakın olacaktır, çünkü bu tür kırılmalarda betonun özellikleri önemli bir rol oynamamaktadır. Eksantrisitenin küçük olduğu durumlarda ise, kırılma betonun ezilmesi ile meydana geldiğinden, beton mukavemeti ve $\sigma - \varepsilon$ özelliklerinde yapılan yanlış bir varsayım, sonuçları önemli çapta etkilemektedir.

Kolonlarda zamana bağlı şekil değiştirmeler kirişlere kıyasla çok daha önemlidir. Bundan dolayı kolon betonu veya donatısında elastik teori ile hesaplanan gerilmelerin gerçeğe ilgisi yoktur.

Öte yandan artan yüklerle birlikte iç kuvvetler de artarak bazı kesitlerde doğrusal - elastik sınırı aşmakta ve bu kesitler dolayında plastik şekil değiştirmeler meydana gelebilmektedir. Bu durumun yapı emniyeti açısından sakıncalı olacağı kuşkusuzdur. Yapıda plastik mafsall oluşması ve bunların sayılarının artması, büyük yer değiştirmelere ve geometrik bakımdan doğrusal olmamaya neden olmaktadır.

Plastik mafsall etkilerinin ele alındığı yapı sistemlerinin I. mertebe teorisine göre hesabında, plastik mafsallar oluşarak sistemin bir bölümü veya tümü mekanizma

durumuna gelmekte ve taşıma gücü sona ermektedir. Bu duruma karşı gelen yüke I. mertebe limit yük denilmektedir.

1.3. Geometri Değişimlerinin Doğrusal Olmaması

Bu tür doğrusal olmamanın nedeni, sistemde dış etkilerden meydana gelen geometri değişimlerinin büyük olmasından dolayı, denge denklemlerinin ve geometrik uygunluk bağıntılarının doğrusal olmamasıdır. Bu sistemlerde yapı elemanlarının mesnetlenme şekli yüklere bağlı olarak değişmektedir. Yine, yük belli bir düzeye çıkınca, eleman boyutları dolayısıyla, elemanlardaki eksensel kuvvetler büyük şekil değiştirmelerin (burkulma gibi) doğmasına yol açmaktadır. Böylece ortaya çıkan eksantrisiteden dolayı, normal kuvvetler eğilme momentlerine katkıda bulunarak yapı elemanlarının zorlanmasına etki etmekte ve doğrusal olmayan hesabı gerektirmektedir.

Geometrik bakımdan doğrusal olmayan analize neden olacak sebepler yapının özelliğine göre ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla bu tür bir analizde farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Örneğin; geometri değişimlerinin denge denklemlerine olan etkisinin göz önüne alınıp, geometrik uygunluk bağıntılarına etkisinin ihmal edildiği hesap yöntemi, ikinci mertebe teorisine göre hesap olarak adlandırılmaktadır [9]. Bu hesap yönteminde geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi nedeniyle, yüklerin belli miktardaki artışına karşılık, daha büyük yer değiştirme artışı karşı gelmektedir. Bu artışlar sırasında yükün belli bir değeri için, yer değiştirmeler sonsuz olmakta ve sistemin burkularak göçtüğü söylenmektedir. Bu yük değerine ise elastik burkulma yükü adı verilmektedir [3].

İkinci mertebe teorisinde geometri değişimlerinin, geometrik uygunluk bağıntıları üzerindeki etkisinin hesaba katılmamasına karşın, geometri değişimlerinin büyük olması durumunda, söz konusu etkinin hesaba katılması gerekmektedir. Bu tür hesap, sonlu yer değiştirme teorisi adını almaktadır [9].

Doğrusal olmayan sistemlerde süperpozisyon yapılamayacağı için, yükler çeşitli noktalardaki değerlerinin arasındaki oranlar sabit kalarak artmalıdır. Bundan dolayı, yüklerin şiddeti skaler bir parametre ile tanımlanmakta ve yük parametresi diye adlandırılmaktadır [2]. Bu tür tanımlama, ilerdeki bölümlerde görüleceği ve bu çalışmada da kullanıldığı üzere, yük artımı ve adım adım analiz gibi, doğrusal olmayan analiz yöntemlerinde kullanışlı olmaktadır. II. mertebe teorisine göre hesapta geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi nedeniyle, artan yük parametresine daha hızlı artan yer değiştirmeler karşı gelmektedir.

Dış etkilerin büyük şekil değiştirmeleri doğurduğu narin yapılarda (örneğin gökdelenlerde) I. mertebe teorisiyle hesabın yapının güvenliğini tehlikeye sokması mümkündür. Yüksek mukavemetli malzemelerin kullanılma olanaklarının artması oranında sayıları artan narin yapılar için denge denklemleri yazılırken şekil değiştirmiş eksenin göz önüne alınması gerekmektedir.

Özet olarak, sistemin özelliklerine ve yapılacak varsayımlara bağlı olarak doğrusal olmayan hesabın türü belirlenmelidir. Böylece malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmama durumlarından birinin veya ikisinin birlikte ele alınacağına karar verilebilmektedir.

1.4. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz Yaklaşımlarının Karşılaştırılması

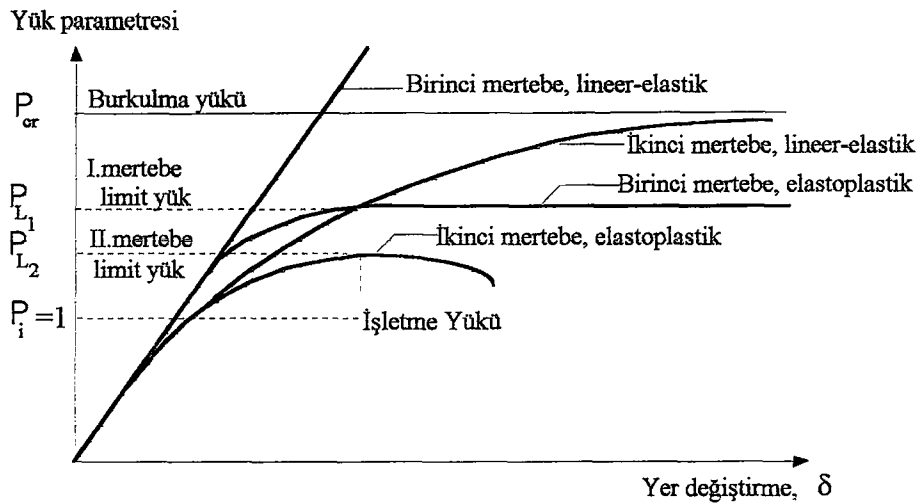
Gerilmelerin büyük olacağı, dolayısıyla elastik sınırın üstüne çıkacağı hesaplar sonucu belirlenen veya öngörülen sistemlerde malzeme davranışının doğrusal olmamasına dayanan bir hesabın gerekeceği, yukarıda söz konusu edilen nedenlerden dolayı kolaylıkla anlaşılmaktadır. Hesap bu tarz yapılırken, şekil değişimlerinin artışında yer yer süreksizlikler ve düzensiz büyümeler gözlemlendiği durumlarda, normal kuvvetlerin doğurduğu ikinci mertebe etkiler dolayısıyla geometri değişimleri doğrusal olmamaktadır. Zaten her iki hesap şekli birbiriyle yakından ilişkilidir. Bir çok sistemde malzeme davranışından dolayı geometri değişimlerinin doğrusal olmaması da hesaba

katılmaktadır. Hesap bu şekilde devam ederken stabilite problemi ve büyük yer değiştirmelerin etkisi de göz önüne alınabilmektedir.

Hem malzeme hem de geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan hesap yöntemlerinde plastik mafsalların oluşmasıyla sistemin rijitliği azalacak, bunun sonucu olarak ta, yük parametresi - yer değiştirme diyagramında (Şekil 1.6), artan yer değiştirmelere azalan yük parametresinin karşı geldiği sınır duruma ikinci mertebe limit yük denilmektedir [3].

Yapı elemanlarının boyutlarına bağlı olarak stabilite probleminin beklenmediği ve büyük ani şekil değiştirmelerin oluşmayacağı kabul edilen sistemlerde sadece bünye özelliklerinin doğrusal olmamasına dayanan hesaplamalar yeterli olmaktadır. Diğer taraftan yüksek mukavemetli malzemeden dolayı gerilmelerin elastik sınırı aşmayacağı beklenen sistemlerde, narinlik nedeniyle geometri değişimlerinin hesaba katılması ve stabilite tahkiki yeterli olup malzeme davranışının doğrusal olmayışı ihmal edilebilmektedir.

Düşey ve yatay yükler etkisindeki bir yapı sisteminin doğrusal ve doğrusal olmayan teorilerin hesabına göre elde edilen yük parametresi - yer değiştirme bağıntıları Şekil 1.6 da şematik olarak gösterilmiştir[3].



Şekil 1.6 Yük parametresi – yer değiştirme eğrileri

1.5. Yapı Sistemlerinin Doğrusal Olmayan Teoriye Göre Hesap Yöntemlerinin Başlıca Kullanım Alanları

Daha sonraki bölümlerde esasları verilecek olan doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin amacını da belirleyecek olan kullanım alanlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu yüzden ilk olarak kullanım alanları belirtilmiştir. Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan teoriye göre hesap yöntemlerinin başlıca kullanım alanlarından biri, boyutlandırılmış yapıların göçme güvenliklerinin belirlenmesidir. Boyutları belli olan sistemin, doğrusal olmayan hesap yöntemlerinden biri ile, yük parametresi - yer değiştirme bağıntısı elde edilerek göçme yükü hesaplanmaktadır. Bu göçme yükü parametresinin işletme yüküne oranı göçme güvenliğini vermektedir. Böylece yapı sisteminin istenen göçme güvenliğine sahip olup olmadığı kontrol edilebilmektedir.

Göçme güvenliği iki yolla belirlenebilmektedir:

1. Sistem, orantılı olarak artan dış yükler (düşey ve yatay yükler) için hesaplanarak bu yükler için ortak bir göçme güvenliği hesaplanmaktadır.
2. Önce düşey yük grubu, bu yükler için öngörülen bir güvenlik katsayısı ile çarpılarak sisteme etkitilmekte, daha sonra sistem artan yatay yükler için hesaplanarak göçme yükü parametresi belirlenmektedir. Böylece düşey yükler için öngörülen belirli bir güvenlik altında sistemin yatay yük taşıma kapasitesi elde edilmektedir.

Büyük oranda düşey yüklerin daha belirli olduğu, buna karşılık rüzgar ve deprem gibi etkileri karakterize eden yatay yüklerin değişme olasılığının daha fazla olduğu göz önüne alındığında 2 de önerilen hesap şeklinin daha gerçekçi olduğu görülmektedir.

Diğer bir kullanım alanı ise, yapıların göçme yükü esasına göre boyutlandırılmasıdır. Yapıların göçme yükü esasına göre boyutlandırılmalarında uygulanan genel yol bir ardışık yaklaşım yöntemidir. Buna göre, önce sistemin boyutları tahmin edilmekte, göçme yükü hesaplandıktan sonra işletme yükleri ile oranlanarak sistemin göçme güvenliği belirlenmekte ve bu oran öngörülen güvenliğe yeter yaklaşıklığa varana kadar

boyutlar değiştirilerek hesap tekrarlanmaktadır. Ayrıca hesaplar yapılırken işletme yükleri etkisinde sistemde doğrusal - elastik sınırın pek aşılmadığı, büyük şekil değiştirmelerin ve büyük yer değiştirmelerin (betonarme yapılarda zararlı çatlakların) oluşmadığı kontrol edilmelidir [3].

1.6. Konu İle İlgili Çalışmalar

Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan analizinin gerekliliğini benimsemiş bir çok araştırmacı, söz konusu konu üzerinde çalışmış ve yeni yöntemler geliştirmişlerdir. Bunlardan başlıcaları aşağıda sıralanmıştır.

Çakıroğlu, Özden ve Özmen tarafından, II. mertebe teorisine göre analizde normal kuvvetlerin başlangıçta bilinmediği durumlar için ardışık yaklaşım yöntemi ve büyük geometri değişimlerini göz önüne almak için de yük artımı yöntemi verilmiştir. Verilen ardışık yaklaşım yönteminde, önce verilmiş dış etkilere ait normal kuvvetler tahmin edilerek, II. mertebe teorisine göre sistem hesap edilmekte ve normal kuvvetler bulunmaktadır [2,9]. Yine bu yöntemle, bulunan normal kuvvetlerin başlangıçta tahmin edilenlere yakınsaklığı sağlanmaktadır. Yük artımı yöntemiyle de, yüklere küçük artımlar verildiğinden dolayı yer değiştirmelerin küçük olması sağlanarak her artımda hesap doğrusallaştırılabilmekte ve geometri değişimlerinin uygunluk şartları üzerindeki etkisi hesaba katılmış olmaktadır.

İrtem tarafından, malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan uzay çubuk sistemlerin ikinci mertebe elastoplastik hesabı, limit yüklerinin bulunması ve göçme güvenliklerinin tayini için bir yük artımı yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde, yatay yüklere oranla daha az değişim gösteren düşey yüklerin sabit değerleri altında, aralarındaki oran sabit kalacak şekilde artan yatay yükler için hesap yapılmaktadır. Sisteme etkiyen düşey yüklerin belirli değerleri için, daha çok denge denklemlerine bağlı olan normal kuvvetler başlangıçta kolaylıkla tahmin edilebilmekte

ve böylece geometri değişimlerinin denge denklemlerine olan etkisi doğrusallaştırılabilmektedir [10].

Arda ve Uzgider tarafından, çelik taşıyıcı sistemlerin ve kesitlerin plastik taşıma yükü analizi için kullanılabilecek yöntemler sıralanmıştır. Bu analizler sırasında sistemin burkulmayacağı öngörüldüğü için stabilite kontrollerinin de tahkik edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır [9].

Görgün tarafından, uçlarında dönel yaylar bulunan düzlem çerçevelerin statik analizinde doğrusal olmama durumu incelenmiş. Gerçekte düğüm noktaları tam rijit davranmayan sistemlerin düğüm noktalarına dönel yaylar konarak gerçek davranışı için daha doğru bir yaklaşım sağlanmış, sistem rijitlik matrisine ikinci mertebe etkileri de katılarak doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir [11].

Darılmaz ve Kumbasar tarafından, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak düzlemine dik etkiyen yaylı yük etkisindeki betonarme plakların doğrusal olmayan hesabı için bir çözüm yolu önerilmiştir. Betonarme plakların göçme yüklerinin belirlenmesi için doğrusal olmayan davranışı göz önüne alarak önerilen yöntemde, hesaplar ardışık yük artımları için gerçekleştirilmiş ve her yük artımında, bulunan iç kuvvetlere bağlı olarak elemanların rijitlikleri yeniden belirlenmiştir [12].

Aysal tarafından, tek gözlü, kapalı, dikdörtgen bir çelik çerçevenin sabit ve değişken yatay yük etkisi altındaki elastik-plastik davranışı, taşıma gücü yöntemi ile ikinci mertebe etkileri de dikkate alınarak araştırılmış, plastik mafsallık hipotezinden yararlanılarak yük – yer değiştirme bağıntıları elde edilmiştir [13].

Doğaner tarafından, çok katlı çelik yapıların düşey ve yatay yükler altındaki davranışını, malzeme ve geometri değişimlerinin doğrusal olmayan etkilerini göz önüne alarak, inceleyen bir çalışmanın esasları verilmiştir. Söz konusu çalışma "Çok katlı çelik yapıların deprem kuvvetleri altındaki gerçek göçme güvenliklerinin belirlenmesi ve

depreme dayanıklı yapı tasarımı "adlı bir araştırma projesi (İNTAG 505) kapsamı içinde yer almaktadır [14].

Cansunar tarafından, çok katlı düzlem çerçeveler I. mertebe teorisiyle çözümünden elde edilen normal kuvvetlere bağlı olarak II. mertebe teorisiyle çözülerek burkulma yükü hesaplanmıştır [15].

Üçerler tarafından, çelik yapı sistemleri I. ve II. derece deprem bölgeleri için Türk Standartlarına göre boyutlandırılmış ve söz konusu sistemlerin malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan yapı davranışı ve II. mertebe limit yüklerinin hesabı incelenmiştir [16].

Eröz tarafından, düzlemine dik düzlem sistemler, elastoplastik hesap için geliştirilen bir yük artımı yöntemi ile ele alınmış ve böylece yapı sisteminin limit yükünün hesabı, doğrusal denklem takımlarının çözümüyle sağlanmıştır [17].

Hodge tarafından, yapıların plastik analizinin esasları, elastik analizden üstünlükleri ve plastik analiz yöntemleri verilmiştir. Bu yöntemlerde eğilme momenti - eğrilik bağıntısı elastoplastik olarak idealleştirilmiş ve doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin eleman boyunca yayılmayıp belirli kesitlerde toplandığını varsayan plastik mafsallık hipotezi kullanılmıştır [1].

Wood tarafından, düzlem sistemlerde ikinci mertebe limit yükün hesabı için genel bir yük artımı yöntemi verilmiştir. Bu yöntemde yük parametresi sıfırdan itibaren artırılarak, ilk plastik mafsallık oluştuğu kesit belirlenerek, gerçek bir mafsallık konmaktadır. Mafsallık bir duruma gelen sistem, aynı şekilde tekrar çözülmekte, sırasıyla her bir plastik mafsallık oluşan kesite, gerçek bir mafsallık konarak hesap tekrarlanmaktadır. Bu arada sistem mafsallaştıkça rijitliğinin azaldığı gözlenebilmektedir. Sistemin kritik yükü, dış yük parametresinin altına düşünce işleme son verilmekte, son duruma ait yük parametresi, sistemin limit yükünü vermektedir [18].

Özer tarafından, malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan sistemlerin ikinci mertebe hesabı ve göçme yüklerinin bulunması için bir ardışık hesap yöntemi verilmiştir. Verilen yöntemde, lineer olmayan şekil değiştirmelerin sistem üzerinde sürekli olarak yayıldığı göz önünde tutulmuştur. Ayrıca analizde, Matris Kuvvet Yöntemi kullanılmış ve sayısal uygulamalar için de elektronik hesap makinesi programları hazırlanmıştır [19].

Liapunov tarafından, çok katlı rijit çelik çerçevelerin limit yükünün hesabı için, ikinci mertebe elastoplastik hesap yöntemi uygulanmıştır. Çözümde malzeme ideal elastoplastik kabul edilmiş ve plastik mafsallık hipotezi kullanılmıştır. Ayrıca normal kuvvetin eğilme momentine etkisi de göz önünde tutulmuştur [20].

Parikh tarafından, düzlem sistemlerin analizinde, plastik mafsallık hipotezinden yararlanılarak, elastik - plastik analiz incelenmiş ve yük parametresi - şekil değiştirme bağıntısı elde edilmiştir. Ayrıca söz konusu hesaplarla birlikte, çok katlı çelik çerçevelerin boyutlandırılması da irdelenmiştir [21].

Hayalioğlu tarafından, malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan çelik çerçevelerin optimum boyutlandırılması incelenmiştir. Malzeme davranışının doğrusal olmaması, elastoplastik yaklaşımı ile ele alınırken, geometri değişimlerinin doğrusal olmaması ise sistemin büyük yer değiştirme yapması dolayısıyla, her yük artımında denge denklemlerini şekil değiştirmiş sistem üzerinde sağlayan bir yük artımı yaklaşımı kullanılarak ele alınmıştır [22].

Saka tarafından, doğrusal olmayan uzay kafes sistemlerin optimum boyutlandırılması incelenmiştir [23]. Yine Saka ve Ülker tarafından, geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan uzay kafes sistemler için yapısal bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Yöntem, doğrusal olmayan analiz tekniği ile optimumluk kriteri yaklaşımının birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Optimumluk kriteri yönteminin adımları için gereken doğrusal olmayan davranış, ardışık doğrusal analizlerin kullanılması ile elde edilmiştir. Algoritmanın adımları sırasında elastik stabilite tahkik edilmiştir [24].

Ardından, Ülker tarafından, malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan uzay kafes sistemlerin optimum boyutlandırılmasını yapan bir yöntem geliştirilmiştir. Söz konusu yöntemde, sistem elastik rijitlik, sistem geometrik rijitlik ve sistemin malzeme değişiminden meydana gelen rijitlik matrislerinin toplamından sistem rijitlik matrisi elde edilmiştir. Doğrusal olmayan analizin her adımında geometrik rijitlik matrisi, şekil değiştirmiş sistem üzerinde kurulmuştur. Malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan davranışın optimum boyutlandırmada göz önüne alınmasının yapı ağırlığında önemli azalma sağladığı da, bu çalışmada görülmüştür [25].

Noor tarafından, uzay kafes sistemlerin malzeme davranışı, geometri değişimi ve her iki durum için doğrusal olmayan analizi incelenmiş ve malzemenin doğrusal olmayan davranışı, Ramberg - Osgood polinomları yardımıyla hesaplanan değişken elastisite modülleri kullanılarak, ele alınmıştır [26].

Stricklin, Haisler ve Von Riesemann tarafından, yapıların, geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan analizi incelenmiştir. Bu analizde direkt stifnes (matris deplasman) yöntemi kullanılmıştır. Geometri değişimlerinin etkisi ile rijitlik matrisi değişmiş ve analizde şekil değiştirmiş sistem esas alınmıştır [27].

Bu tez çalışmasında ise, malzeme davranışının doğrusal olmaması, ideal elastoplastik davranış yaklaşımı ile ele alınmış, plastikleşen kesitlerin çubuk boyunca yayılmayıp belirli kesitlerde toplandığını varsayan plastik mafsalları teorisi kullanılmıştır. Normal kuvvetlerden oluşan ikinci mertebe etkileri, plastik mafsallar hesaplanırken dikkate alınmıştır. Sistem seçilen bir yük parametresi ile adım adım hesap edilerek her adımda hesap doğrusallaştığından dolayı, doğrusal hesap yöntemlerinden olan Matris Deplasman Yöntemi kullanılabilmektedir.

2. TEORİK ÇALIŞMALAR

2.1. Teorik Çalışmanın Amacı

Çalışmada, yapıların doğrusal olmayan hesabı amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle malzeme davranışının doğrusal olmaması incelenirken, plastik mafsallı varsayımı yapılarak plastikleşen kesitlerin çubuk üzerinde belirli bir noktada toplandığı varsayılmıştır. Yapı sisteminin geometrik bakımdan doğrusal olmama durumu incelenirken de, geometri değişimlerinin denge denklemleri üzerindeki etkileri göz önüne alınmıştır. Bu amaçla kullanılan hesap yöntemleri ve yapılan varsayımlar aşağıda verilmiştir.

Varsayımlar:

1. Yükler ve taşıyıcı sistem aynı düzlem içinde yer alır. Taşıyıcı sistemin her elemanı, bu düzlem içinde yer alan bir simetri eksenine sahiptir.
2. Malzeme sünekler. Yani kopmadan, büyük plastik şekil değiştirmeler yapabilmektedir.
3. Taşıyıcı sistemin elemanlarının birleşimi, M_p plastikleşme momentini aktaracak şekilde bir süreklilik sağlayacaktır.
4. Orantılı yükleme söz konusudur. Yani sisteme etkiyen değişik yükler arasındaki oran yükleme sırasında sabit kalmaktadır.
5. Bernoulli-Navier hipotezi geçerlidir. Buna göre, düzlem kesitler sistem şekil değiştirdikten sonra da düzlem kalırlar.

6. Sistemi oluşturan çubuklar, doğru eksenli, sabit en kesitlidir ve normal kuvvet çubuk boyunca sabittir.
7. Doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin plastikleşen kesit adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bu kesitler dışındaki bölgelerde sistemin lineer-elastik davrandığı kabul edilmiştir (plastik mafsal teorisi).

2.2. Matris Deplasman Yöntemi İle Yapıların Doğrusal Hesabı

Çalışmada kullanılan doğrusal olmayan hesaba yönelik yöntemlerde analiz, adım adım gerçekleştirilmekte ve her adımda doğrusal teori kullanılmaktadır. Bu nedenle aşağıda yapı sistemlerinin Matris Deplasman Yöntemiyle doğrusal hesabı anlatılmıştır.

Doğrusal hesapta, malzemenin gerilme - şekil değiştirme bağıntılarının doğrusal - elastik olduğu, geometri değişimlerinin küçük olmasından dolayı denge denklemlerinin şekil değiştirmemiş cisim üzerinde yazılabileceği varsayılmaktadır.

Bu varsayımlar doğrultusunda, yöntemin amacı, sistemde dış etkilerden meydana gelen eleman uç yer değiştirmelerinin belirlenmesidir. Çünkü bunlardan hareket edilerek bütün elemanların uç kuvvetleri ve dolayısıyla kesit tesirleri bulunup sistemin hesabı tamamlanabilecektir.

Hesabın esası, yapı sistemini meydana getiren elemanların rijitliklerinin, sistem rijitlik matrisi $[S]$ yi elde etmek üzere, uygun şekilde süperpoze edilerek,

$$[L] = [S] \cdot [X] \quad (2.1)$$

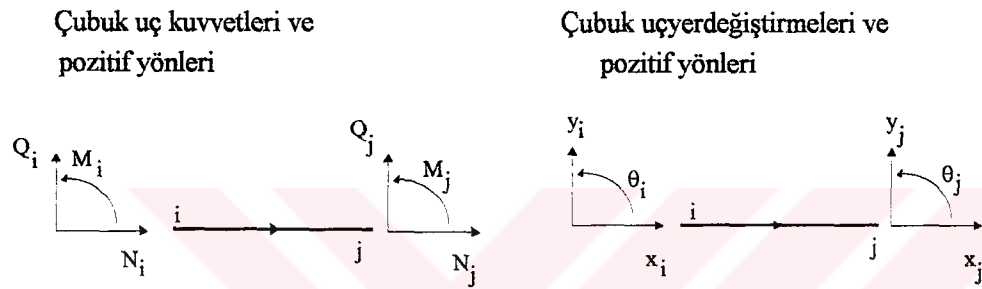
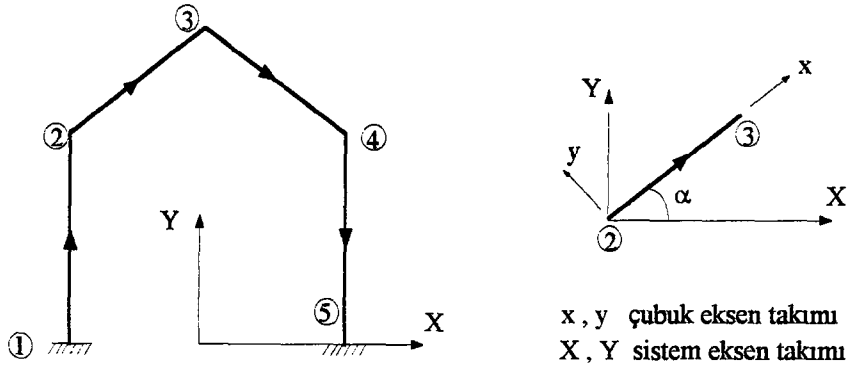
şeklinde yazılan denklem takımının çözülmesidir. Burada $[L]$ düğüm noktası dış yük matrisini, $[X]$ de düğüm noktası yer değiştirmelerinden oluşan bilinmeyenler matrisini göstermektedir.

[S] sistem rijitlik matrisi hesaplanırken, her bir eleman rijitliği kendi eksen takımında elde edilmekte ve daha sonra sistem eksen takımına dönüştürülerek, [S] sistem rijitlik matrisi üzerine süperpoze edilmektedir.

Burada:

- Çubuk eksen takımı, sistemi oluşturan her bir çubuğun, sistemden bağımsız, kendi özel eksen takımındadır.
- Sistem eksen takımı, çubukların kendi eksen takımlarından ayrı olarak tüm sistemi göz önüne alan ortak eksen takımındadır.
- Düğüm noktası yer değiştirmeleri, düzlem çubuk sistemlerde, yatay, düşey ve dönme olmak üzere her bir düğüm noktasında üç adet olan yer değiştirme bileşenleridir. Dolayısıyla herhangi bir düzlemsel sistemde yer değiştirme bileşenleri sayısı, düğüm noktası sayısının üç katı kadardır.
- Çubuk uç kuvvetleri veya Matris Deplasman Yöntemindeki bilinmeyen sayısı, her bir çubuk uçlarındaki düğüm noktalarındaki iç kuvvet bileşenleridir.

Matris Deplasman Yönteminde uç kuvvetler ve uç yer değiştirmeleri için kabul edilen pozitif yönler Şekil 2.1 de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Matris deplasman yönteminde pozitif yönler

Matris Deplasman Yöntemine göre yapılan hesapta aşağıdaki adımlar izlenmektedir [9].

- a. Şekil değiştirme – iç kuvvet bağıntıları (Hooke Kanunu) yazılmakta bunun için her elemanda

$$[P_{ij}] = [k_{ij}][Z_{ij}] \quad (2.2)$$

şeklinde gösterilen Hooke kanunu yazılarak, çubuk eksen takımındaki $[k_{ij}]$ eleman rijitlik matrisi kurulmaktadır.

- b. Geometrik uygunluk şartları yazılarak her bir eleman için

$$[Z_{ij}] = [A_{ij}][X_{ij}] \quad (2.3)$$

bağıntısı kurulmaktadır. $\begin{bmatrix} A_{ij} \end{bmatrix}$ eleman yer değiştirme dönüşüm matrisi sistem eksen takımında hesaplanan çubuk uç yer değiştirmelerini, çubuk rölatif yer değiştirmelerine dönüştüren bir matristir.

- c. Denklem (2.3) de verilen üçlü çarpım yapılarak, çubuk eksen takımında hesaplanan $\begin{bmatrix} k_{ij} \end{bmatrix}$ eleman rijitlik matrisi, sistem eksen takımına dönüştürülmektedir.

$$\begin{bmatrix} S_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ij} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

- d. Bu şekilde elde edilen $\begin{bmatrix} S_{ij} \end{bmatrix}$ matrisleri $[S]$ sistem rijitlik matrisinde ait olduğu yere yerleştirilmektedir. Bu işlem yapı sistemini oluşturan tüm çubuklar için tekrarlanmakta ve $[S]$ sistem rijitlik matrisi kurulmuş olmaktadır.
- e. Denge denklemleri yazılıp $([L]=[S][X])$, bilinmeyenler çözülerek sistem eksen takımına göre düğüm noktaları yer değiştirmeleri bulunmaktadır.
- f. Bulunan $[X]$ yer değiştirmeleri

$$\begin{bmatrix} P_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

bağıntısında yerine konarak eleman uç kuvvetleri bulunmaktadır. Buradan elde edilen uç kuvvetleri sistem eksen takımına göredir. Dolayısıyla bunların çubuk eksen takımına dönüştürülmeleri gerekmektedir.

2.2.1. Eleman Rijitlik Matrisi

Matris Deplasman Yöntemine göre hesapta kullanılan çubuk elemanların çubuk eksen takımındaki eleman rijitlik matrisleri, aşağıda; çubuk uçlarının ankastre veya mafsallı olmaları durumlarına göre elde edilerek verilmiştir.

a. İki ucu ankastre çubuk için,

$$[k_{ij}] = \begin{bmatrix} S & 0 & 0 & -S & 0 & 0 \\ 0 & D & C_i & 0 & -D & C_j \\ 0 & C_i & A_i & 0 & -C_i & B \\ -S & 0 & 0 & S & 0 & 0 \\ 0 & -D & -C_i & 0 & D & -C_j \\ 0 & C_j & B & 0 & -C_j & A_j \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$A_i = a_i \frac{EI}{L}, \quad A_j = a_j \frac{EI}{L}, \quad B = b_{ij} \frac{EI}{L}, \quad (2.7)$$

$$C_i = \frac{A_i + B}{L}, \quad C_j = \frac{A_j + B}{L}, \quad D = \frac{C_i + C_j}{L}, \quad S = \frac{EA}{L}$$

A_i , A_j , B , C_i , C_j , D sayılarına rijitlik sayıları denilmektedir [28]. İki ucu ankastre sabit atalet momentli çubuklarda, $a_i = a_j = 4$, $b_{ij} = 2$ değerini almaktadır.

b. i ucu mafsallı çubuk için,

$$[k_{ij}] = \begin{bmatrix} S & 0 & 0 & -S & 0 & 0 \\ 0 & D & 0 & 0 & -D & C_j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S & 0 & 0 & S & 0 & 0 \\ 0 & -D & 0 & 0 & D & -C_j \\ 0 & C_j & 0 & 0 & -C_j & A_j \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

İki ucu ankastre sabit atalet momentli çubuklarda, $a_i = b_{ij} = 0$ ve dolayısıyla

$A_i = B = C_i = 0$, $a_j = 3$ değerlerini almaktadır.

c. j ucu mafsallı çubuk için,

$$[k_{ij}] = \begin{bmatrix} S & 0 & 0 & -S & 0 & 0 \\ 0 & D & C_i & 0 & -D & 0 \\ 0 & C_i & A_i & 0 & -C_i & 0 \\ -S & 0 & 0 & S & 0 & 0 \\ 0 & -D & -C_i & 0 & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

İki ucu ankastre sabit atalet momentli çubuklarda, $a_j = b_{ij} = 0$ ve dolayısıyla

$A_i = B = C_j = 0$, $a_i = 3$ değerlerini almaktadır.

d. İki ucu mafsallı çubuk için,

İki ucu mafsallı çubukların dönmeye karşı rijitlikleri olmamasına ilaveten eğilme rijitliği de ihmal edilirse, çubuk rijitlik matrisi 2x2 boyutlu bir matrise dönüşmektedir.

$$\begin{bmatrix} k_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S & -S \\ -S & S \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

2.2.2. Yer Değiştirme Dönüşüm Matrisi

Matris deplasman yönteminde her bir çubuğa ait büyüklükler, önce çubuk eksen takımında hesaplanmakta, daha sonra $[L] = [S] \cdot [X]$ denklem takımında kullanılmak üzere, sistem eksen takımına dönüştürülmektedir. Örneğin her bir çubuğa ait çubuk eksen takımında hesaplanan $\begin{bmatrix} k_{ij} \end{bmatrix}$ eleman rijitlik matrisi, $\begin{bmatrix} A_{ij} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{ij} \end{bmatrix}$ çarpımıyla sistem eksen takımına dönüştürülmektedir. Bunun gibi, çubuk üzerinde yük bulunması halinde bu yükler önce çubuk eksen takımında düğüm noktası yüklerine dönüştürülmekte ve daha sonra

$$\begin{bmatrix} L_{ij} \end{bmatrix}_{SET} = \begin{bmatrix} A_{ij} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} L_{ij} \end{bmatrix}_{ÇET} \quad (2.11)$$

dönüşümü yapılarak, sistem eksen takımına dönüştürülmektedir. Denklem takımı çözüldükten sonra kesit tesir diyagramlarını çizmek üzere sistem eksen takımında elde edilen kesit tesirleri

$$\begin{bmatrix} P_{ij} \end{bmatrix}_{ÇET} = \begin{bmatrix} A_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{ij} \end{bmatrix}_{SET} \quad (2.12)$$

dönüşümü ile, çubuk eksenlerine dönüştürülmektedir. Burada yine unutulmaması gereken, bu kesit tesirlerinin işaretlerinin, yapı statikliği işaret kabulüne göre değiştirilmesi gerektiğidir.

İki ucu mafsallı çubuk için,

$$[A_{ij}] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

2.2.3. Yükleme Matrisi

Yükleme matrisi düğüm noktalarına etkiyen yükler ile çubuk üzerine etkiyen yüklerin süperpozisyonu şeklinde oluşturulmaktadır.

Düğüm noktası yükleri sistem eksen takımında verildiğinden dolayı herhangi bir dönüşüm işlemine gerek kalmadan sadece pozitif yönlerine dikkat edilerek yerleştirilmektedir.

Çubuk üzerine etkiyen yükler ise, hem çubuk eksen takımında hem de sistem eksen takımında verilmiş olabilmektedir. Sistem eksen takımında verilmiş ise, ankastrelik etkileri hesaplanarak düğüm noktası yüklerinde olduğu gibi yerleştirilmekte, çubuk yüklerinin çubuk eksen takımında verilmiş olması halinde ise ankastrelik etkileri bulunarak sistem eksen takımına dönüştürülmektedir. Söz konusu yüklerin çubuğa etkiyor olmasından dolayı, düğüm noktalarına etkiyecek şekilde gerekli düzenlemeler yapılmaktadır. Düğüm noktası yüklerinden çubuk üzerine etkiyen yüklerin ankastrelik etkileri çıkarılmakta, böylece kolon matris şeklindeki yükleme matrisi elde edilmektedir.

2.2.4. Denklem Takımının Çözümü

Her bir eleman için yazılan eleman rijitlik matrisi, yer değiştirme numaralarına bağlı olarak sistem rijitlik matrisinde ilgili yerlere yerleştirilerek sistem rijitlik matrisi elde edilmektedir. Tanımlanmış yer değiştirmeler sistem rijitlik matrisinde işaretlenmekte, yükleme matrisi $[L]$ hesaplanmakta, böylece elde edilen $[L] = [S] \cdot [X]$ denklem takımı, sayısal hesaplama yollarından biriyle çözülerek $[X]$ yer değiştirme matrisi bulunmaktadır.

2.2.5. Kesit Tesirlerinin Hesabı

Artık uç kuvvetleri bulunabilmektedir. Eğer sistem rijitlik matrisi doğrudan kurulmuşsa, bu çalışmada uygulandığı gibi, $[P]$ uç kuvvetleri matrisi $[P] = [S] \cdot [X]$ bağıntısıyla elde edilmektedir. $[S]$ sistem rijitlik matrisi daha önce kurulmuş olduğu ve $[X]$ yer değiştirme matrisi de denklem takımının çözümünden bulunduğu için $[S] \cdot [X]$ çarpımından uç kuvvetleri bulunabilmektedir.

Bulunan kesit tesirlerine daha önce hesaplanmış olan ankastrelik etkileri eklenmekte ve çubuk eksen takımına $[P_{xy}]_{\text{ÇET}} = [A] \cdot [P_{XY}]_{\text{SET}}$ çarpımıyla dönüştürülmektedir. Kesit tesirleri Matris Deplasman işaret kuralına göre bulunmuş olduğundan yapı statiği işaret kuralına göre gerekli düzenlemelerin yapılması gerekmektedir.

2.3. Yapıların Doğrusal Olmayan Hesabı

Yapıların doğrusal olmayan hesabına aşağıda, doğrusal olmamaya neden olan iki sebebin ayrı başlıklarla incelenmesi ile değinilmiştir. Bu bağlamda önce malzeme

davranışına göre doğrusal olmayan hesap incelenmiş, daha sonra II. Mertebe teorisini ve büyük yer değiştirme durumunu konu alan, geometri değişimlerine göre doğrusal olmayan hesaba geçilmiştir.

2.3.1. Malzeme Davranışına Göre Doğrusal Olmayan Hesap

Burada, malzeme davranışına göre doğrusal olmayan hesabı esas alan bir yöntem verilmiştir [29]. Bu yöntem, plastik taşıma yükünün hesabı için kullanılan ve bilgisayar programlanmasına uygun bir analiz yöntemidir.

Yapıların bazı durumlarda mekanizma durumuna geçmeden elastik davranış bölgesinde burkulma olayı ile göçtükleri bilinmektedir. Bu nedenle yer değiştirme kontrollerini ve stabilite durumlarını da göz önüne alan bu yöntem, çok serbestlik dereceli karmaşık taşıyıcı sistemlerin plastik taşıma yükü analizi için başka plastik hesap yöntemlerine göre daha elverişlidir.

Bu yöntemin esasını, plastik mafsall oluşumunun sistemin rijitliğine etkisini içeren ardışık elastik analizler oluşturmaktadır. Söz konusu elastik analizler, bilgisayar programlanmasına uygun bir elastik analiz yöntemi olan Matris Deplasman Yöntemi ile yapılmıştır. Yöntemin adımları aşağıda sıralanmıştır.

1. Sisteme etkiyen dış yüklerden dolayı elastik analiz yapılmaktadır. Düğüm noktası yer değiştirmeleri ve çubuk uç kuvvetleri hesaplanmaktadır. Bu ilk analizden elde edilen çubuk uç kuvvetleri P_1 ile gösterilmektedir.
2. Plastik mafsall oluşma olasılığı olan noktalarda, (tekil yüklerin etkidiği noktalarda, düğüm noktalarına birleşen eleman uçlarında, yayılı yük etkisindeki açıklıkların kesme kuvvetinin sıfır olduğu noktalarında), kesitlerin plastik taşıma kapasitelerinin elastik analiz sonuçlarına oranı (λ) hesaplanmaktadır.

Plastik taşıma kapasiteleri göz önüne alınan mukavemet haline göre belirlenmektedir. Çelik elemanlar için, "N + M + Q" bileşik mukavemet hali kullanılarak, dikdörtgen kesit için, her adımdaki plastik taşıma kapasitesi

$$M_{PL} = (1 - (\frac{N}{N_P})^2) * M_P \quad (2.17)$$

bağıntısından hesaplanabilmektedir. Hesaplamalarda 2.3.1.1. de irdelenmiş olan akma şartlarından yararlanılmıştır. Burada,

$$N_P = b' * h * \sigma_A \quad (2.18)$$

$$M_P = \left(\frac{b' h^2}{4} \right) * \sigma_A \quad (2.19)$$

$$b' = b * \sqrt{1 - \left(\frac{Q}{0.58 * A * \sigma_A} \right)^2} \quad (2.20)$$

N_P :Plastik normal kuvvet

M_P :Plastik moment

b, b' :Genişlik ve düzeltilmiş genişlik

olarak verilmiştir.

Betonarme denge altı kirişlerde (çekme kırılması durumunda);

$$M_{PL} = 0.85 * f_{cd} * b * k_1 c * (d - k_1 c / 2) + A_s' * f_{yd} * (d - d') \quad (2.21)$$

$$k_1 c = (A_s - A'_s) / b_w * f_{yd} / (0.85 * f_{cd}) \quad (2.22)$$

Betonarme kolonlarda ise;

$$M_{PL} = N * (h / 2 - k_1 c / 2) * A_{st} / 2 * f_{yd} * d'' \quad (2.23)$$

$$k_1 c = N / (0.85 * f_{cd} * b) \quad (2.24)$$

Burada; f_{cd} betonun hesap basınç dayanımı, f_{yd} çeliğin hesap çekme dayanımı, A_s çekme donatısı alanı, A'_s basınç donatısı alanı, A_{st} toplam boyuna donatı alanı, d faydalı yükseklik, d' paspayı, d'' boyuna donatılar arası uzaklık olarak verilmiştir.

Her çubuk için hesaplanan λ oranlarının en küçüğü bulunmakta, minimum λ nın ait olduğu çubuk ve çubuk üzerindeki yeri, yani ilk plastik mafsallın oluştuğu yeri belirlenmektedir. Bulunan minimum λ , λ_1 yük katsayısı olarak alınmaktadır. Elastik analiz sonucu bulunan yer değiştirmeler ve uç kuvvetleri, λ_1 ile çarpılarak ilk plastik mafsall oluştuğundaki yer değiştirmeler ve uç kuvvetleri bulunmakta, böylece ilk adım tamamlanmış olmaktadır.

3. Minimum λ nın bulunduğu noktaya, plastikleşen kesite, gerçek bir mafsall konarak sistem yeni şekline getirilmiş olmaktadır. Mafsallı yeni sistem, üzerindeki yüklerin etkisi altında ikinci kez yine elastik olarak çözülmekte ve bulunan kesit tesirleri P_2 olarak gösterilmektedir.

4. Plastik mafsall oluşmamış kesitlerde

$$\lambda = \frac{M_{PL} - \lambda_1 P_1}{P_2} \quad (2.25)$$

formülü ile her eleman için λ lar hesaplanmakta, en küçük λ , λ_2 olarak atanmakta, bir önceki adımda bulunan $\lambda_1 P_1$ çarpımı, $\lambda_2 P_2$ ile toplanarak ikinci plastik mafsallı oluştuğundaki çubuk uç kuvvetleri bulunmaktadır.

5. İkinci plastik mafsallı oluşan kesite de bir gerçek mafsallı yerleştirilerek, sistem iki mafsallı yeni şekline büründürülmüş olmaktadır. Yapı göçünceye kadar üçüncü ve dördüncü adımlar tekrarlanmaktadır. Yapının göçtüğüne mekanizma durumu biliniyorsa plastik mafsallı sayısı ile karar verilmektedir.
6. Yapının göçtüğünün belirlendiği aşamaya kadar bulunan λ yük katsayılarının toplamı λ_p plastik taşıma yük katsayısını vermektedir.

İlk analizde sisteme yüklü olan P_0 yükü ile λ_p plastik taşıma yük katsayısının çarpımı, plastik taşıma yükünü vermektedir.

2.3.1.1. Akma Şartları

Düzlemi içindeki kuvvetlerin etkisi altında bulunan düzlem çubuk sistemlerde, ds uzunluğundaki bir çubuk elemanın, ϕ kesitin dönmesi, u ve v kesitin çubuk eksenindeki ve ona dik doğrultudaki yer değiştirmelerini göstermek üzere;

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

$$\text{Birim boy değişmesi} : \frac{du}{ds} \quad (2.26)$$

$$\text{Birim kayma} : \frac{dv}{ds} = \gamma$$

tanımları yapılmaktadır. Düzlem çubuk sistemlerde kesit tesirleri ile şekil değiştirmeler arasındaki bağıntılar da, genel olarak;

$$\frac{d\phi}{ds} = \chi = F_1 (M, N, Q)$$

$$\frac{du}{ds} = F_2 (M, N, Q) \quad (2.27)$$

$$\frac{dv}{ds} = F_3 (M, N, Q)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Burada F_1 , F_2 , F_3 kesit fonksiyonlarını göstermektedir.

Kesit tesirlerinin, artarak belirli bir sınır değere erişmesi halinde, kırılma, akma veya büyük şekil değiştirmeler nedeniyle kesitin taşıma gücü sona ermektedir. Kesitin daha büyük kesit tesirlerini, taşıyamayacağını belirten bu durum, kısaca kırılma olarak tanımlanmaktadır. Kırılmaya karşı gelen kesit tesirlerine de kesitin taşıma gücü adı verilmektedir. Kırılma durumunu kesit tesirlerine veya şekil değiştirmelere bağlı olarak ifade eden

$$K_1 (M, N, Q) = 0 \quad (2.28)$$

veya

$$K_2 \left(\frac{d\phi}{ds}, \frac{du}{ds}, \frac{dv}{ds} \right) = 0 \quad (2.29)$$

bağıntılarına kırılma (akma) şartı denilmektedir.

2.3.2. Geometri Değişimine Göre Doğrusal Olmayan Hesap

Geometri değişimlerine göre doğrusal olmayan hesabın, geometri değişimlerinin denge denklemleri ve geometrik uygunluk bağıntıları üstündeki etkisinin göz önüne alınması şeklinde yapılabileceği, önceki bölümlerde belirtilmişti. Bu doğrultuda, geometri

değişimlerinin sadece denge denklemleri üzerinde etkisini göz önüne alan II. Mertebe teorisi, öncelikle, verilmiş ve sonra da geometrik uygunluk bağıntıları üstündeki etkisi de, ayrıca, ele alınmıştır.

2.3.2.1. II. Mertebe Teorisi

Yapılarda büyük yer değiştirmelerin beklendiği durumlarda, geometri değişimlerinin denge ve geometrik uygunluk bağıntıları üzerindeki etkilerinin hesaba katılması gerekebileceği, ancak büyük yer değiştirmelerin ihmal edilip geometri değişimlerinin sadece denge denklemlerine etkisinin göz önüne alındığı hesap yöntemine II. Mertebe teorisine göre hesap denildiği bilinmektedir.

II. mertebe teorisine göre yapılan hesaplarda normal kuvvetlerin başlangıçta bilinmediği durumlarda, genel olarak bir ardışık yaklaşım hesap yöntemi uygulanmaktadır. Bunun için önce, I. mertebe teorisine göre çözümden elde edilen normal kuvvetler kullanılarak II. mertebe teorisine göre sistem hesap edilmekte ve normal kuvvetler bulunmaktadır. Bulunan normal kuvvetler, bir önceki değerleri ile karşılaştırılarak yeter derecede yakınsaklık sağlanana kadar hesap tekrar edilmektedir.

Genellikle hesabın çok defa tekrar edilmesi gerekmemekte, hatta bir çok halde ilk adımın sonuçlarıyla yetinmek bile mümkün olmaktadır. Çünkü normal kuvvetler daha çok denge şartlarına bağlı kalmaktadır. Bunun için normal kuvvetlerin ilk tahmininde I. mertebe teorisiyle bulunan sonuçlardan yararlanmak mümkün olduğu gibi, bunların denge denklemlerine dayanarak doğrudan tahmin edilmeleri de yeterli olmaktadır.

Sistem hesap edilerek çubukların uç kuvvetleriyle uç yer değiştirmeleri belirlendikten sonra, herhangi bir kesitteki kesit tesirlerini elde etmek için aşağıdaki yol takip edilmektedir.

Her çubuk, doğru eksenli küçük elemanlara ayrılmakta ve iki ucuna basit mesnetler konularak idealleştirilmektedir. Bu sistemde verilmiş yüklerle daha önce belirlenmiş

olan uç kuvvetlerden küçük elemanlarda meydana gelen uç yer değiştirmeleri ve uç kuvvetleri, II. mertebe teorisine dayanan aynı metot ile bulunmaktadır. Bunlar her kesitteki ek yer değiştirmeleri ve kesit tesirlerini vermektedir.

Burada, II. mertebe teorisinin uygulamaları sırasında denge denklemlerinin nasıl değişeceği gösterilmiştir. Bu bağlamda, önce rijitlik matrisinin değişimi daha sonra ankastrelik etkilerin değişimi incelenmiştir. Böylece, normal kuvvetlerin eğilme rijitliklerine etkisi göz önüne alınmış olmaktadır.

Yer değiştirmelerin nispeten büyük olması halinde, denge denklemlerinde kuvvetlerin şekil değiştirmiş sisteme etkidiğinin göz önüne alınması ve böylece normal kuvvetlerden doğan ikinci mertebe etkilerinin hesaba katılması gerekmektedir. Bu durumda da rijitlik matrisi değişeceği için, bu değişimi göstermek üzere doğrusal hesapta kullanılan değerlerle ilişkili olarak belirtilmiştir. Doğrusal hesapta Matris Deplasman Yöntemi kullanıldığından dolayı, burada da aynı yöntem ile değişiklikler gösterilmiştir.

Normal kuvvetleri de göz önüne alan eleman rijitlik matrisinin gösterimi Denklem 2.30 da verilmiştir.

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} S & 0 & 0 & -S & 0 & 0 \\ 0 & D & C_i & 0 & -D & C_j \\ 0 & C_i & A_i & 0 & -C_i & B \\ -S & 0 & 0 & S & 0 & 0 \\ 0 & -D & -C_i & 0 & D & -C_j \\ 0 & C_j & B & 0 & -C_j & A_j \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Rijitlik matrisindeki değişim, stifnes sayılarının değişimi şeklinde olmaktadır. Stifnes sayılarındaki değişimi göstermek için de düzeltme faktörleri denen katsayılardan yararlanılmaktadır.

Basınç durumu için, stifnes sayılarının değişimi ve düzeltme faktörleri aşağıda verilmiştir.

Stifnes sayıları:

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{4EI}{L} \cdot e_i, \quad A_j = \frac{4EI}{L} \cdot e_j, \quad B = \frac{2EI}{L} \cdot e_{ij}, \\ C_i = C_j &= \frac{A_i + B}{L}, \quad D = \frac{C_i + C_j}{L}, \quad S = \frac{EA}{L} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Düzeltilme faktörleri:

$$\begin{aligned} e_i &= \frac{kL \cdot (\sin(kL) - (kL) \cdot \cos(kL))}{4\phi_c}, \quad e_i = e_j, \quad k^2 = \frac{|N|}{EI} \\ e_{ij} &= \frac{kL(kL - \sin(kL))}{2\phi_c}, \quad \phi_c = 2 - 2\cos(kL) - kL \cdot \sin(kL) \end{aligned} \quad (2.32)$$

Çekme durumunda ise düzeltme faktörleri aşağıda verilen şekilde değişecektir.

$$\begin{aligned} e_i' &= \frac{kL \cdot (kL \cdot \cosh(kL) - \sinh(kL))}{4\phi_t}, \\ e_{ij}' &= \frac{kL(\sin(kL) - kL)}{2\phi_t}, \quad e_i' = e_j', \\ \phi_t &= 2 - 2\cosh(kL) + kL \cdot \sinh(kL), \quad k^2 = \frac{|N|}{EI} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Normal kuvvetler göz önüne alındığından dolayı, ankastrelik etkiler de değişikliğe uğrayacaktır. Üniform q yayılı yük için, normal kuvvetin basınç olması durumuna göre, ankastrelik etkilerin değişimi aşağıda verilmiştir.

$$M_i = +\frac{qL^2}{(kL)^2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{kL}{2} - \frac{kL}{2}}{\operatorname{tg} \frac{kL}{2}}, \quad M_j = -\frac{qL^2}{(kL)^2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{kL}{2} - \frac{kL}{2}}{\operatorname{tg} \frac{kL}{2}},$$

$$Q_i = -\frac{qL}{2}, \quad N_i = N_j = 0, \quad Q_j = +\frac{qL}{2} \quad (2.34)$$

Yine üniform q yayılı yük için, ama normal kuvvetin çekme olması durumuna göre, ankastrelik etkilerin değişimi aşağıda verilmiştir.

$$M_i = +\frac{qL^2}{(kL)^2} \cdot \frac{\frac{kL}{2} - \operatorname{tgh} \frac{kL}{2}}{\operatorname{tgh} \frac{kL}{2}}, \quad M_j = -\frac{qL^2}{(kL)^2} \cdot \frac{\frac{kL}{2} - \operatorname{tgh} \frac{kL}{2}}{\operatorname{tgh} \frac{kL}{2}},$$

$$Q_i = -\frac{qL}{2}, \quad N_i = N_j = 0, \quad Q_j = +\frac{qL}{2} \quad (2.35)$$

Sol mesnetten ξL uzaklığındaki bir Q tekil yükü için, normal kuvvetin basınç olması durumuna göre, ankastrelik etkilerin değişimi aşağıda verilmiştir.

$$M_i = \frac{Q}{|N|} \left[A_i \left[\frac{\sin(kL(1-\xi))}{\sin(kL)} + \xi - 1 \right] - B \left[\frac{\sin(kL\xi)}{\sin(kL)} - \xi \right] \right]$$

$$(2.36)$$

$$M_j = \frac{Q}{|N|} \left[B \left[\frac{\sin(kL(1-\xi))}{\sin(kL)} + \xi - 1 \right] - A_j \left[\frac{\sin(kL\xi)}{\sin(kL)} - \xi \right] \right]$$

Yine sol mesnetten ξL uzaklığındaki bir Q tekil yükü için, ama normal kuvvetin çekme olması durumuna göre, ankastrelik etkilerin değişimi aşağıda verilmiştir.

$$M_i = \frac{Q}{|N|} \left[A_i \left[\frac{\sinh(kL(1-\xi))}{\sinh(kL)} + \xi - 1 \right] - B \left[\frac{\sinh(kL\xi)}{\sinh(kL)} - \xi \right] \right]$$

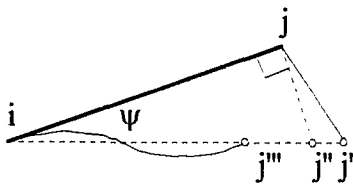
$$(2.37)$$

$$M_j = \frac{Q}{|N|} \left[B \left[\frac{\sinh(kL(1-\xi))}{\sinh(kL)} + \xi - 1 \right] - A_j \left[\frac{\sin(kL\xi)}{\sinh(kL)} - \xi \right] \right]$$

2.3.2.2. Geometri Değişimlerinin Büyük Olması Durumu

Bilindiği gibi, II. mertebe teorisinde geometri değişimlerinin denge denklemlerindeki etkisi dikkate alınarak, geometrik uygunluk şartları üzerindeki etkisi ihmal edilmektedir. Ancak, geometri değişimlerinin ihmal edilemeyecek kadar büyük olması durumunda, geometrik uygunluk şartları üzerindeki etkisinin de hesaba katılması gerekmektedir. Bu durumu esas alan teori, sonlu yer değiştirme teorisi olarak anılmaktadır. Ayrıca, yüklere küçük artımlar verilerek çözüme gidilen yöntemle yük artımı yöntemi denilmektedir. Her adımda sistem ekseni olarak bir önceki adımda bulunan şekil değiştirmiş eksen kullanılarak, geometri değişiminin uygunluk şartları üzerindeki etkisi de hesaba katılmış olmaktadır. Yüklere küçük artımlar verildiğinden, yer değiştirmeler de küçük olacak ve her artımda göz önünde tutulan sistem ekseni için doğrusal geometrik uygunluk şartları kullanılabileceğinden II. mertebe teorisini esas alan yöntemlerden yararlanılabilecektir.

Geometri değişiminin geometrik uygunluk şartları üzerindeki çeşitli etkilerinden, birçok halde en önemli bir tanesi hesaba katılarak, yaklaşık bir sonlu yer değiştirme teorisi geliştirilebilmekte ve buna düzeltilmiş II. mertebe teorisi denilebilmektedir. Şekil 2.2 de görüldüğü üzere ψ sapma açısı yapan bir ij çubuğunun j ucunun j' ye geldiği kabul edilen doğrusal teoride, çubuk boy değişmesi terkedilmiş olmaktadır. Gerçekte ψ dönme açısından dolayı çubuğun j ucu j' ye değil, bir daire yayı üzerinde hareket ederek j'' ye gelmektedir. Çubuğun bu j'' kısılmasını hesaba katmak, j'' kısılmasını meydana getiren fiktif t üniform sıcaklık azalmasını hesaba katmak ile mümkün olabilmektedir.



Şekil 2.2 Çubukta boy değişimi

$$j' j'' = \left[(L\psi)^2 + L^2 \right]^{1/2} - L \cong \frac{1}{2} \psi^2 L \quad (2.38)$$

Başlangıçta ψ^2 ler bilinmediğinden normal kuvvetlerle birlikte ψ ler üzerinde de iterasyon yapılması gerekmektedir.

Hesapta izlenen yol, aşağıda sıralanmıştır.

- a. Sistem, verilmiş bir yük için $\psi = 0$ kabul edilerek, yani ikinci mertebe teorisine göre hesaplanmaktadır.

Bulunan uç yer değiştirmelerinden

$$\psi = \frac{Q_i + Q_j}{L} \quad (2.39)$$

$$t = -\frac{1}{2} \frac{\psi^2}{\varepsilon} \quad (2.40)$$

bağıntıları ile, sırasıyla her çubuğun sapma açısı ve fiktif üniform sıcaklık azalmaları bulunmaktadır.

- b. Verilmiş yükler ve fiktif t sıcaklık azalmalarının ortak etkisi altında sistem yeniden II. mertebe teorisine göre hesaplanmaktadır.
- c. Başlangıçta alınan N ve ψ değerlerine yeter derecede yakın değerler bulununcaya kadar, hesap tekrar edilerek aranan sonuçlar elde edilmektedir.

Çubuğun eğilmesinden dolayı meydana gelen $j'' j'''$ boy kısalması çok defa terk edilebilecek kadar küçük değerler almaktadır. Böyle olmayan hallerde, çubuklar

daha küçük elemanlara bölünüp idealleştirilerek bu etkiler terk dileyebilecek hale getirilebilmektedir.

Geometri değişimlerinin büyük olması durumu bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

2.4. Bilgisayar Programı

Teorik çalışmalar bölümünde esasları verilen yöntemler için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu bölümde söz konusu programla ilgili bir takım bilgiler ve akış diyagramı verilmiştir.

2.4.1. Programın Amacı ve Uygulama Alanı

İkinci mertebe etkilerini ve plastik mafsalları hipotezini göz önüne alarak düzlem çerçevelerin analizini yapan bir bilgisayar programı hazırlanıp Quick Basic dilinde kodlanmıştır.

Hazırlanan program ile düzlem çerçevelerin hem elastik hem de ikinci mertebe elastik-plastik analizi yapılabilmektedir. Elastik analizde Matris Deplasman Yöntemi, Rijitlik Matrisleri Yöntemi de denilmektedir, kullanılmıştır. Bu yöntemde sistem rijitlik matrisi doğrudan elde edilmiştir. Teorik çalışmalar bölümünde belirtildiği gibi, plastik mafsalları oluşma olasılığı olan kritik kesitler sırasıyla belirlenmekte, ilk plastik mafsalları oluştuğu kesite gerçek bir mafsalları konarak Matris Deplasman Yöntemi ile yeni şekline bürünen sistemin yani mafsallaşmış sistemin, elastik analizi yapılmaktadır. Yük parametreleri ve plastik mafsallar bu şekilde bulunurken, ikinci mertebe etkileri de sistem rijitlik ve yükleme matrisine normal kuvvetin etkileri yansıtılarak ikinci mertebe elastik - plastik analizin adım adım gerçekleşmesi sağlanmaktadır.

Bu program her ne kadar düzlem sistemler için hazırlanmış olsa da, uzay sistemlere de uygulanacak şekilde geliştirilmesi bu çalışmanın sınırları dışındaki amaçlar içinde yer almaktadır.

2.4.2. Verilerin Girilmesi

Veriler, DATA satırlarında verilmiş, ancak istenirse INPUT komutuyla klavyeden de girilecek şekilde düzenlenebilmektedir. Verilerin tümü matris boyutunda dinamik olarak tanımlanmış, böylece program akışında gereken yerlerde yeni boyutlar atanabilmiş ve kolayca verilere erişim sağlanmıştır.

2.4.2.1. Ekran Formatı

Programın çalışması sırasında ekranın görünümü iki kısma bölünmüş; üst kısım, özellikleri verilen sistemin çizdirilmesine, alt kısım ise ekrana yazdırılması istenen bilgilerin görünümüne ayrılmıştır.

2.4.2.2. Sistem Ve Çubuk Özellikleri

Sistemdeki toplam düğüm noktası sayısı, çubuk sayısı, düğüm noktalarına ve çubuklara etkiyen yüklerin sayısı, toplam yer değiştirmelerin sayısı sistem özellikleri olarak girilmektedir. Her bir çubuk için de, sistemde seçilmiş olan bir koordinat eksenlerine göre, çubukların her iki düğüm noktası koordinatları, çubuk numaraları, i ve j ucunu belirlemek için düğüm noktası numaraları girilmektedir. Çubukların enkesit alanları, atalet momentleri, boyları gibi bilgiler program içinde hesaplanacağından dolayı başlangıçta girilmelerine gerek yoktur. Yukarıdaki veriler çubukları tanımlamaya

yetmektedir. Bu özellikler, programın akış süreci içinde tekrar tekrar gerekeceğinden, dosyalara aktararak program daha kullanışlı hale getirilebilmiştir.

2.4.2.3. Diğer Girdiler

Çizdirilmek istenen diyagramın (M, Q veya N) ve ölçeğinin belirtilmesi, programın çalışması esnasında ekrana yazdırılacak olan bilgilerin akış durumunun belirtilmesi gibi sistem özellikleri ile doğrudan ilgili olmayıp çıktıları denetleyen bilgilerdir.

2.4.3. Çıktıların Alınması

2.4.3.1. Yer Değiştirmeler Ve İç Kuvvetler

Programdan edinilen ve ister ekrana isterse yazıcıya alınması istenen sonuçlar, öncelikle iç kuvvetler ve yer değiştirmelerdir. Bunlar her adım sonunda alınabilmekte olup asıl istenen analiz sonundaki sonuçlar ise program sonunda verilmektedir. Her bir adımdaki kesit tesirleri bir sonraki adımda kullanılacağından dolayı adım numaralarına göre dosyalara kaydedilmektedir.

2.4.3.2. Yük Parametreleri Ve Plastik Mafsal Yerleri

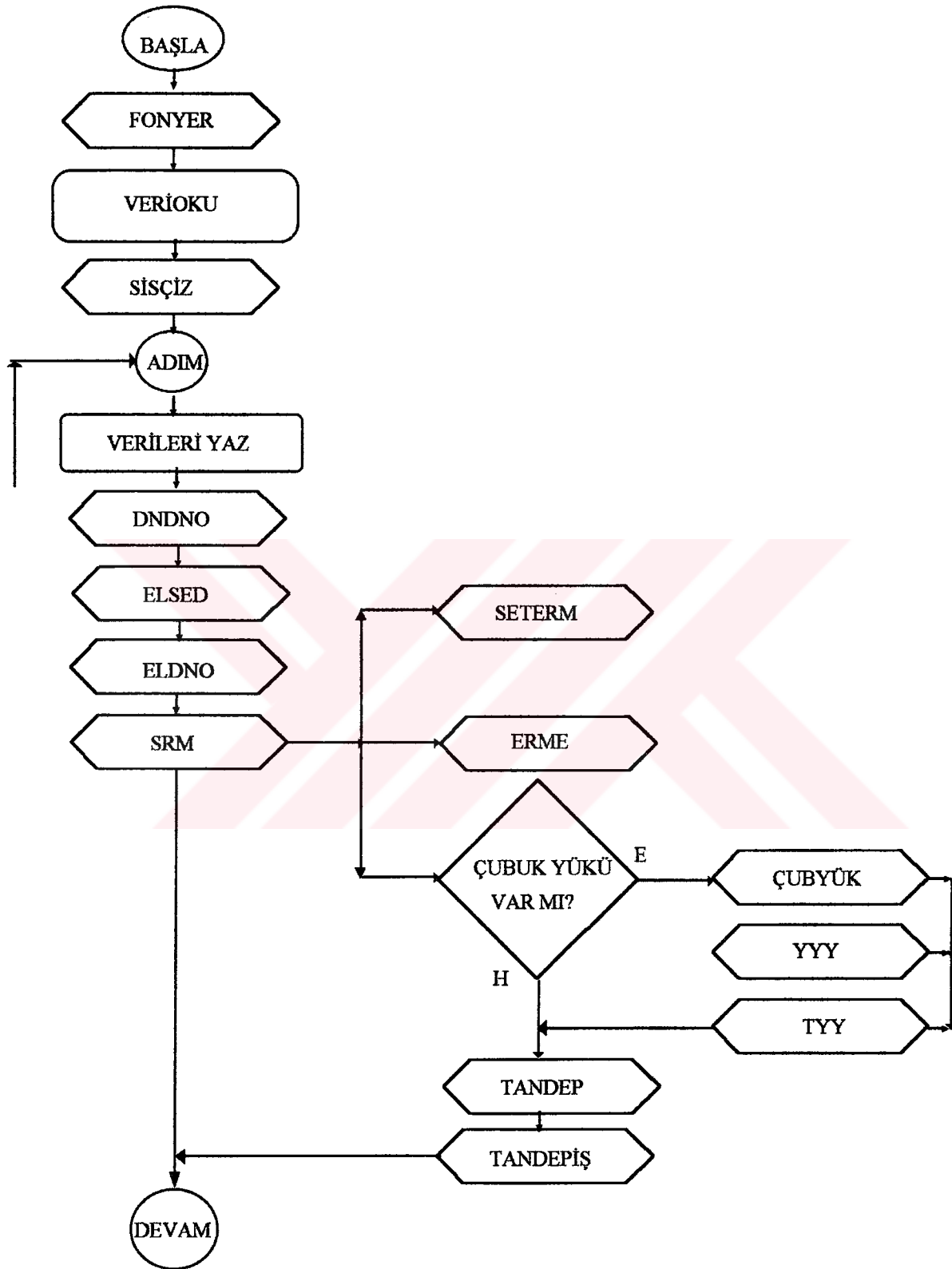
Her bir adım sonunda, o adıma ait yük parametresi ve söz konusu adıma kadar bulunan yük parametrelerinin toplamı elde edilip bir dosyaya kaydedilebilmektedir. Yük parametrelerinin en son toplamı limit yük parametresi ve bunun başlangıçtaki yüklerle çarpımı da limit yükü vermektedir. Ayrıca plastik mafsal yerlerinin ekran görünümü ve yazıcı çıktısı alınabilmektedir. Ekran görünümünde plastik mafsallar oluştuğu yerleri işaretlenip, plastik mafsalların oluşma sırası görsel olarak kolaylıkla izlenebilmektedir.

2.4.4. Kesit Tesiri Diyagramları

Yöntemin esası adım adım analize dayandığı için, yine her bir adım sonunda bulunan kesit tesirleri üst üste çizdirilerek, adım adım değişim izlenebilmektedir. Giriş bilgisi olarak, istenen kesit tesiri diyagramı belirtilerek, çizimin türü (M, Q veya N) elde edilmektedir. Giriş bilgisinde istek değiştirilerek her üç kesit tesiri diyagramı ayrı ayrı çizdirilebilmektedir.

2.4.5. Akış Diyagramı

Hazırlanan programın akış diyagramı Şekil 2.3 de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Akış diyagramı



Şekil 2.4 Akış diyagramı (devam)

2.4.6. Akış Diyagramının Açıklanması

VERİOKU: Sistem ve eleman özellikleri, düğüm noktalarına ve elemanlara etkiyen yükler gibi önceki bölümde değinilen verileri, matris formda okumakta ve program akışı içinde ulaşımını kolaylaştırmak için bir dosyaya kaydetmektedir.

SİSÇİZ: Program çalışırken verilen sistemi ve adım adım sistemdeki değişiklikleri gözlemek için, değişen sistemlerin şeklini çizmektedir.

DNDNO : Düğüm noktası yer değiştirme numaralarını bulmaktadır.

ELSED: Elemanların serbestlik derecelerini bulmaktadır. Her adımda sistem özelliklerinin değişimine bağlı olarak ilgili elemanların serbestlik dereceleri de değişecektir.

ELDNO: Elemanların yer değiştirme numaralarını bulmaktadır. Bu değişim de serbestlik derecesine bağlı olduğundan dolayı adım adım değişecektir.

SRM: SETERM, ERME, ÇUBYÜK, YYY, TYY, TANDEP ve TANDEPİŞ alt programlarını kullanarak sistem rijitlik matrisini oluşturmakta ve denklem takımında kullanılmak üzere son şeklini vermektedir.

SETERM: Sistem eksen takımında eleman rijitlik matrisini oluşturmaktadır.

ERME: Kurulan eleman rijitlik matrisini, yer değiştirme numaralarına bağlı olarak, sistem rijitlik matrisine eklemektedir.

ÇUBYÜK: Düğüm noktaları dışında çubuk üzerine etkiyen yükler varsa bu yükleri düğüm noktalarına etkiyecek şekilde dönüştürmektedir.

YYY: Yayılı yükleri, denklem takımının Gauss Eliminasyon yöntemi ile çözümünde kullanılmak üzere, sistem rijitlik matrisine bir kolon eklenerek oluşturulan yerlere, yine yer değiştirme numaralarına bağlı olarak yerleştirir.

TTY: YYY 'de olduğu gibi tekil yükleri yerleştirir.

TANDEP: Sistem özellikleri içinde verilmiş değerleri belli olan yer değiştirmeleri belirten, tanımlanmış yer değiştirme numaralarını, kayıtlı oldukları ilgili dosyadan bulmaktadır.

TANDEPİŞ: Bulunan tanımlanmış yer değiştirme numaralarını sistem rijitlik matrisinde işaretlemektedir. (Söz konusu sistem rijitlik matrisinden, denklem takımında kullanılacak şekle getirilmiş olan rijitlik matrisi anlaşılmalıdır).

DENKTAK: Belirlenen sistem rijitlik matrisini ve kayıtlı olduğu dosyadan yer değiştirme numaralarını alarak denklem takımını çözmektedir. Böylece yer değiştirmeler bulunmuş olmaktadır.

EKESTES: Bulunan yer değiştirmeler yardımıyla eleman kesit tesirlerini hesaplamaktadır.

DEPDÖN: Yer değiştirme dönüşüm matrisini, elemanın mesnet şekline göre şart deyimiyle alt programlara göndererek hesaplamaktadır.

İDÖN: Matris deplasman yönteminin işaret kabulüne göre bulunmuş olan kesit tesirlerini, yapı statığı işaret kabulüne göre dönüşümü yapmaktadır.

AÇMOM: Açıklık momentlerini hesaplamaktadır.

MPL: Elemanların plastik taşıma gücünü hesaplamaktadır.

YÜKKAT: Adım adım analiz yönteminde açıklanan şekilde, yük katsayılarını hesaplamaktadır.

MİNYÜK: Her bir eleman için ayrı ayrı bulunan yük katsayılarının içinden en küçüğünü seçmektedir.

DİYÇİZ: Her bir adım için ayrı olarak kesit tesiri diyagramlarını çizmektedir.



3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Düzlem çerçevelerin doğrusal olmayan hesabı

Çalışmada, düzlem çerçevelerin doğrusal olmayan analizi hedeflenmiş, malzemenin doğrusal olmayan davranışı ile ikinci mertebe etkilerini dikkate alan bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Malzemenin doğrusal olmayan davranışı incelenirken elastoplastik kabul edilen malzeme davranışı göz önüne alınmış, bu amaçla kullanılan ve ayrıntıları Bölüm 2.3.1. de verilen yöntem ile ikinci mertebe etkilerini dikkate almaya yönelik Bölüm 2.3.2. de verilen yöntem birleştirilmiştir.

Çalışmada, yapıların doğrusal olmayan hesabının gerekliliği belirtilmiş ve doğrusal hesaba olan üstünlükleri irdelenmiştir. Doğrusal olmayan analizde, malzeme davranışının doğrusal olmaması ile geometri değişimlerinin doğrusal olmaması birlikte ele alınmıştır. Malzeme davranışını doğrusallıktan uzaklaştıran etkenler ortaya konarak, bu tür doğrusal olmayan analiz daha belirgin bir duruma getirilmiştir. Malzeme davranışının doğrusal olmayan analizinde, plastik hesap açıklanmış ve bu hesabın beton, çelik ve betonarme gibi yapı malzemelerinde uygulanabilirliği incelenmiştir.

Doğrusal olmayan hesabın diğer bir türü olan geometri değişimlerinin doğrusal olmaması incelenirken de, geometri değişimlerinin sadece denge denklemlerine olan etkisini göz önüne alan II. mertebe teorisi açıklanmış, bu değişimlerin uygunluk bağıntılarına etkilerini de göz önüne alan sonlu yer değiştirme teorisi, çalışmada kullanılmayıp sadece esaslarının verilmesi ile yetinilmiştir.

Malzeme davranışının ve geometri değişimlerinin doğrusal olmaması ayrı ayrı irdelendikten sonra, bu iki doğrusal olmama durumunun birlikte düşünülmesi, değişik şartlara göre birinin tercih edilip diğerinin ihmal edilebilmesi gibi durumlar incelenmiştir.

Doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin kullanım alanlarının belirlenmesi de ayrı bir önem taşımaktadır. Bu yüzden çalışmada özet olarak ele alınmıştır. Yapıların göçme yükü esasına göre boyutlandırılmaları veya boyutlandırılmış yapıların göçme güvenliklerinin belirlenmesi, doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin kullanım alanları arasında sıralanmıştır.

Çalışmanın konusu ile ilgili önceki çalışmalar araştırılmış, bu çalışmalarda doğrusal olmayan hesap ele alınırken kullanılan varsayımlar ve yöntemler incelenmiş ve kısa bir özeti sunulmuştur. Bu arada bu tez çalışmasının da kapsamı belirtilmiştir.

Teorik çalışmalar bölümünde çalışmanın varsayımları, kullanılan yöntemler ve esasları verilerek incelenmiştir. Doğrusal olmayan hesabın ilk adımında doğrusal hesap yöntemi kullanıldığından dolayı, öncelikle doğrusal bir hesap yöntemi olan Matris Deplasman yöntemi verilmiştir. Bu yöntemin seçiminde bilgisayar programlanmasına uygunluğu etkili olmuştur.

Çalışmada, plastikleşmenin eleman boyunca yayılmayıp belirli kesitlerde toplandığını varsayan plastik mafsalsal teorisi açıklanarak, bir adım adım analiz yöntemi verilmiştir. Bu arada akma şartları da tanımlanmıştır. Böylelikle malzeme davranışının doğrusal olmaması durumu belirtilen yaklaşıklıkla ele alınmıştır.

Geometri değişimlerinin doğrusal olmaması irdelenirken, II. mertebe ve sonlu yer değiştirme teorileri açıklanmıştır. Çalışmada II. mertebe etkileri göz önüne alınarak, büyük yer değiştirme durumu ihmal edilmiştir.

II. mertebe etkilerini katarak, düzlem çerçevelerin elastik – plastik analizini yapan bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Bu program yardımıyla bazı sayısal örnekler çözülmüştür. Aşağıda bu sayısal uygulamalar ve sonuçları verilmektedir.

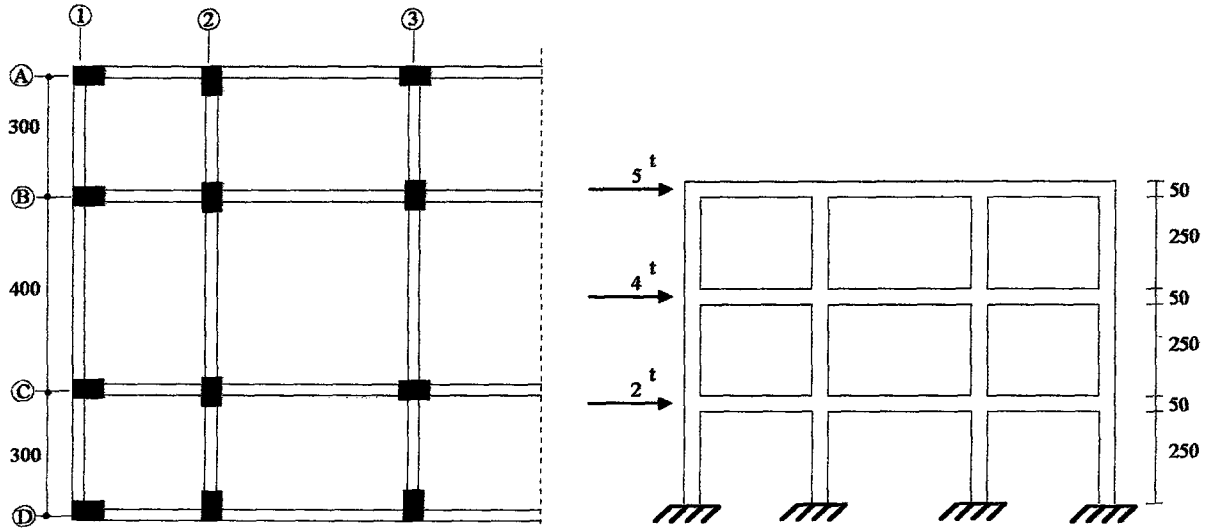
Yukarıda sözü edilen yöntemin karşılaştırmalı bir uygulaması olması bakımından, donatıları belirlenmiş betonarme düzlem bir çerçeve söz konusu yöntem ile çözülerek, elastik sonuçları veren ilk adımdaki kesit tesirleri esas alınarak taşıma gücü esaslarına göre donatılmıştır [30]. Bulunan bu donatı oranları söz konusu plastik yöntemle göre hazırlanmış olan bilgisayar programında veri olarak girilmiş ve elastik – plastik çözümü yapılmıştır. Böylece sistemin davranışı belirginleşebilmiş ve plastik mafsalların kolonlarda oluşmaması için gerektiğinde gerekli düzenlemeler bir çok defa denenerek en uygun sonuç bulunabilmektedir.

3.2. Betonarme Çerçevelerin Elastik ve Plastik Çözümlerinin İncelenmesi

Şekil 3.1 de kalıp planı verilen yapıdaki 2 aksı çerçevesinin betonarme olarak boyutlandırılması elastik ve plastik hesap yöntemlerine göre yapılarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

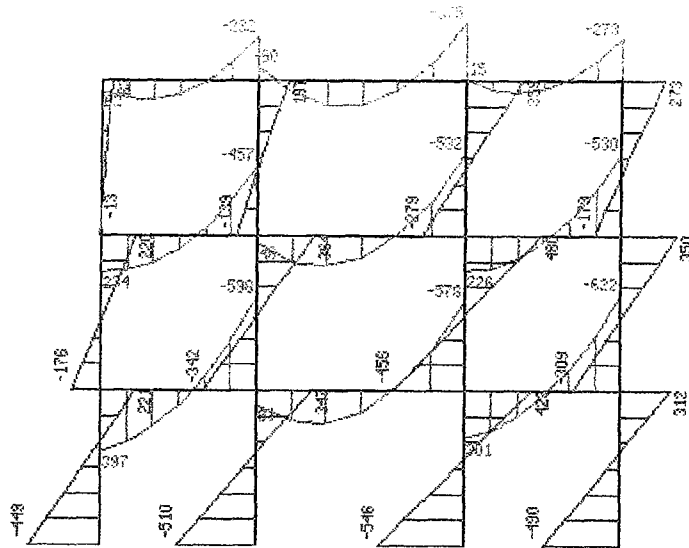
İncelenen çerçevede tüm kiriş ve kolonların boyutları 25/50 cm olarak seçilmiştir. Çerçeve yükleri, döşeme yükleri 0.4 t/m^2 olduğuna göre ve dolgu duvar ile eleman ağırlıkları göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Kiriş düşey yükleri sabit (G) ve hareketli (Q) yüklerin toplamı olmak üzere 1.776 t/m dir. Yatay deprem yükleri (E) dinamik analiz yapılarak ve süneklik katsayısı 5 alınarak hesaplanmıştır. Göz önüne alınan deprem yükleri Şekil 3.1 de gösterilmiştir.

Çerçevelerin çözümlenmesinde yük kombinezonu olarak $G+Q+E$ kombinezonu temel alınmıştır. Analiz yapılırken deprem yüklerinin yön değiştireceği de dikkate alınmıştır. Malzeme olarak; C16 ve S220 kullanılmıştır.

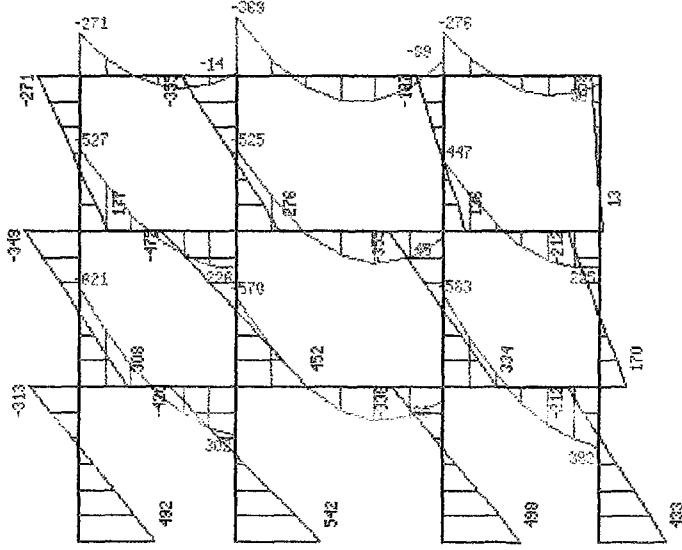


Şekil 3.1 Kalıp planı, betonarme çerçeve ve yatay deprem yükleri

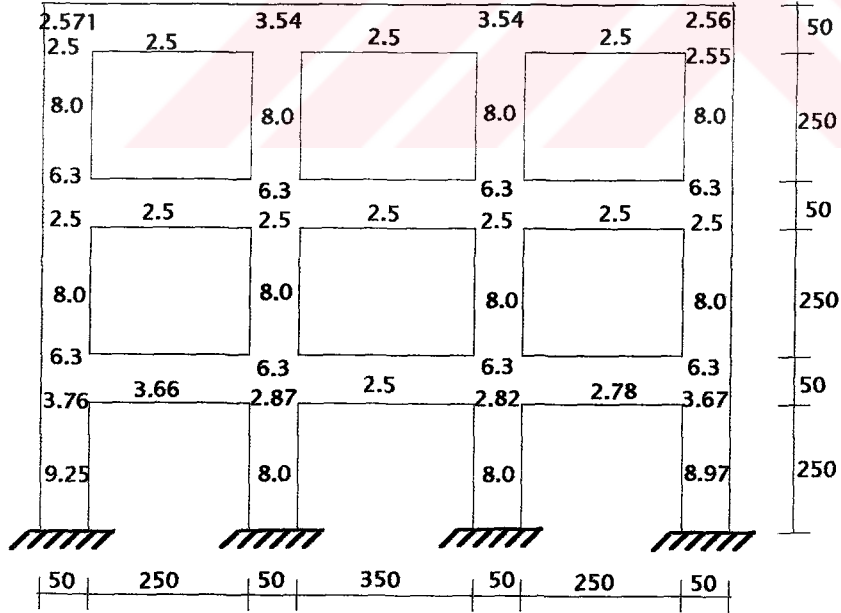
İlk olarak söz konusu çerçeve verilen yükler altında deprem yüklerinin sağdan ve soldan etkimesi halinde doğrusal hesaba göre çözülerek kesit tesirleri bulunmuştur (Şekil 3.2, Şekil 3.3). Daha sonra bu kesit tesirlerinin elverişsiz olanları seçilerek donatı hesabı Taşıma Gücü yöntemine göre minimum donatı şartı da göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Hesaplanan donatı oranları Şekil 3.4 de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Düşey yükler ve sağa doğru etkiyen yatay yükler için doğrusal hesaptan bulunan eğilme momenti diyagramı (tcm).

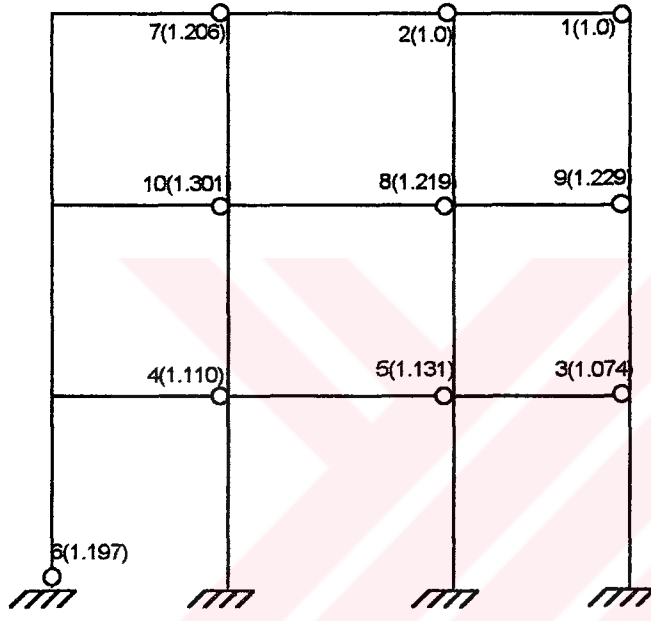


Şekil 3.3 Düşey yükler ve sola doğru etkiyen yatay yükler için doğrusal hesaptan bulunan eğilme momenti diyagramı (tcm).



Şekil 3.4 Doğrusal hesap sonucu elde edilen donatı oranları

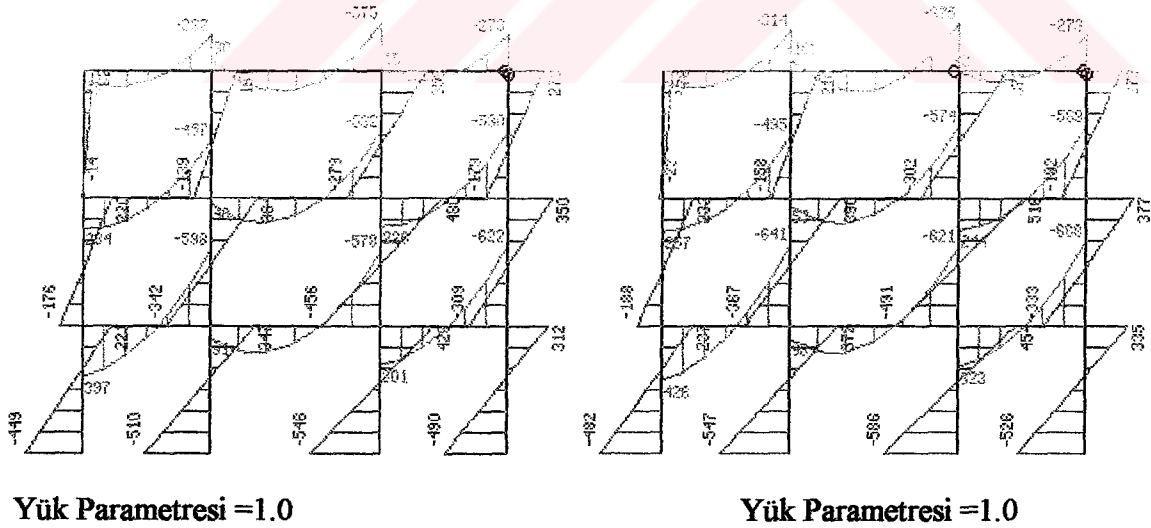
Elastik hesap sonucu elde edilen bu donatı oranları, çalışmada düzlem çerçevelerin plastik hesabı için hazırlanan bilgisayar programında kullanılarak plastik mafsalların gelişimi ve yük parametresinin değişimi gözlenmiştir. Mafsalların gelişimi ve yük parametrelerinin değişimi Şekil 3.5 ve 3.6 da, her bir yük parametresine karşılık gelen yük düzeylerindeki eğilme momentleri de Şekil 3.7, 3.8 ve 3.9 da verilmiştir.



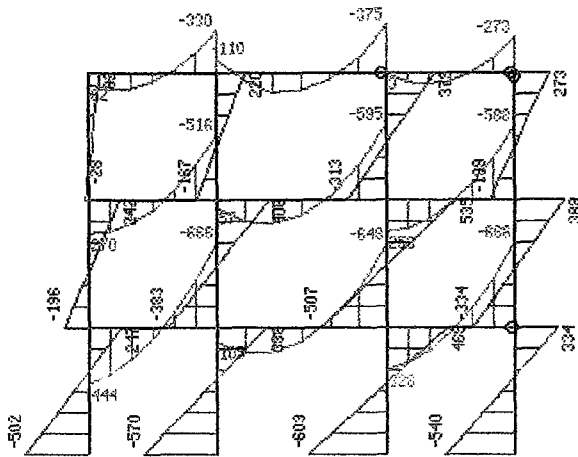
Şekil 3.5 Düşey ve sağa doğru etkiyen yatay yükler için doğrusal hesaptan bulunan donatı oranları ile hesaplanan çerçevede plastik mafsalların gelişim sırası ve yük parametreleri



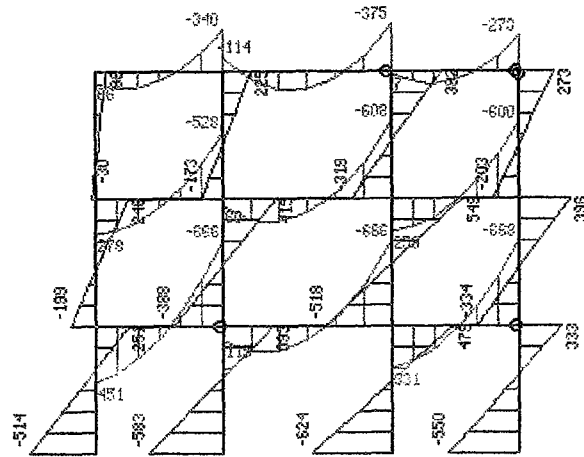
Şekil 3.6 Düşey ve sola doğru etkiyen yatay yükler için doğrusal hesaptan bulunan donatı oranları ile hesaplanan çerçevede plastik mafsalların gelişim sırası ve yük parametreleri



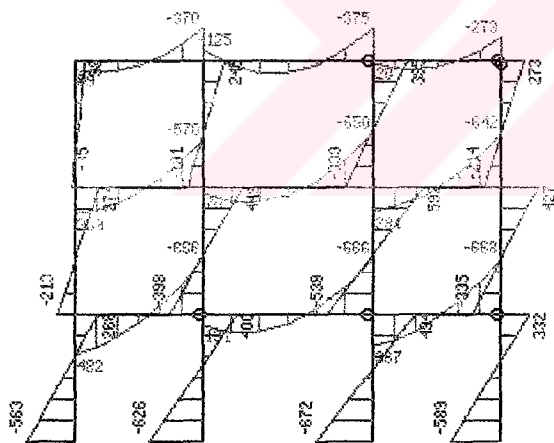
Şekil 3.7 Elastik teori ile hesaplanan donatı oranlarına ait moment diyagramları.



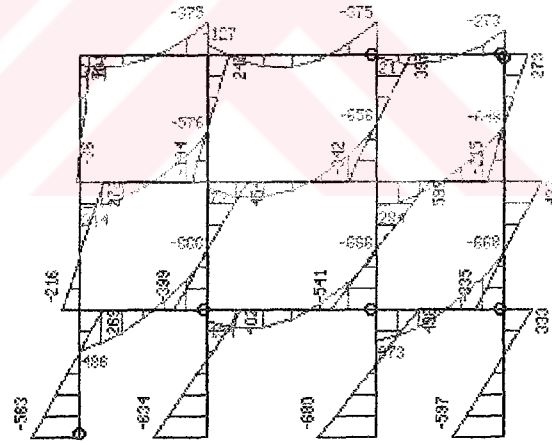
Yük Parametresi = 1.074



Yük Parametresi = 1.110

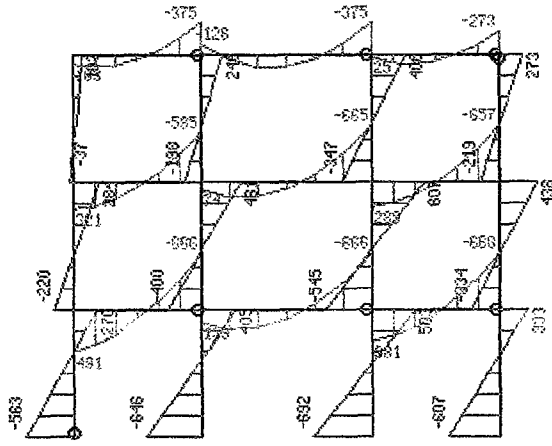


Yük Parametresi = 1.131

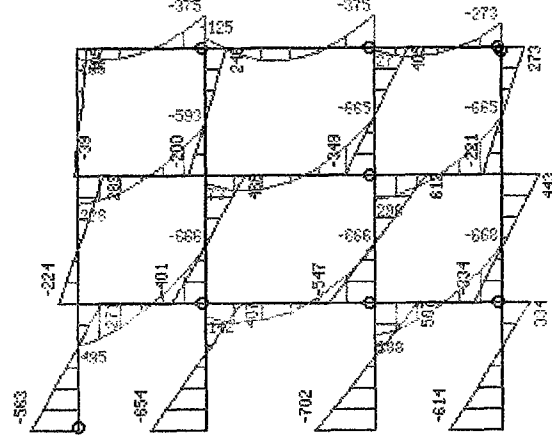


Yük Parametresi = 1.197

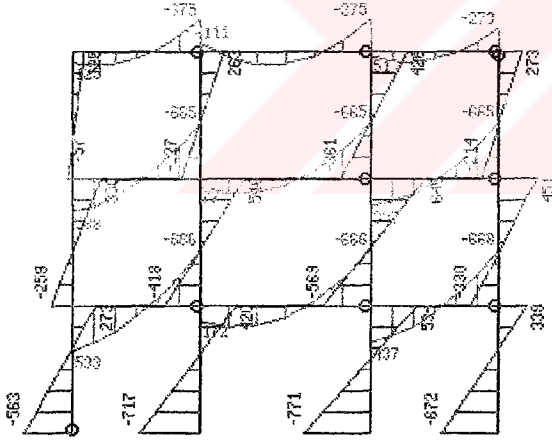
Şekil 3.8 Elastik teori ile hesaplanan donatı oranlarına ait moment diyagramları (devam).



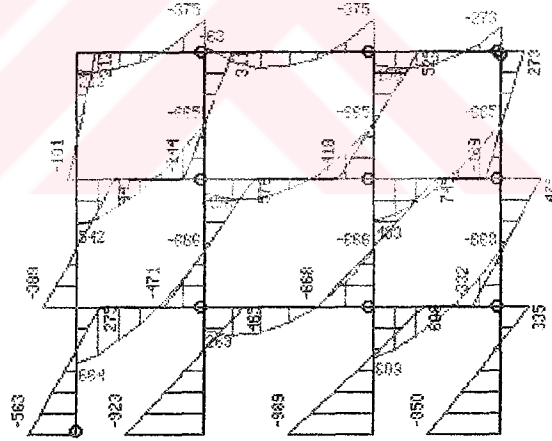
Yük Parametresi = 1.206



Yük Parametresi = 1.219



Yük Parametresi = 1.229

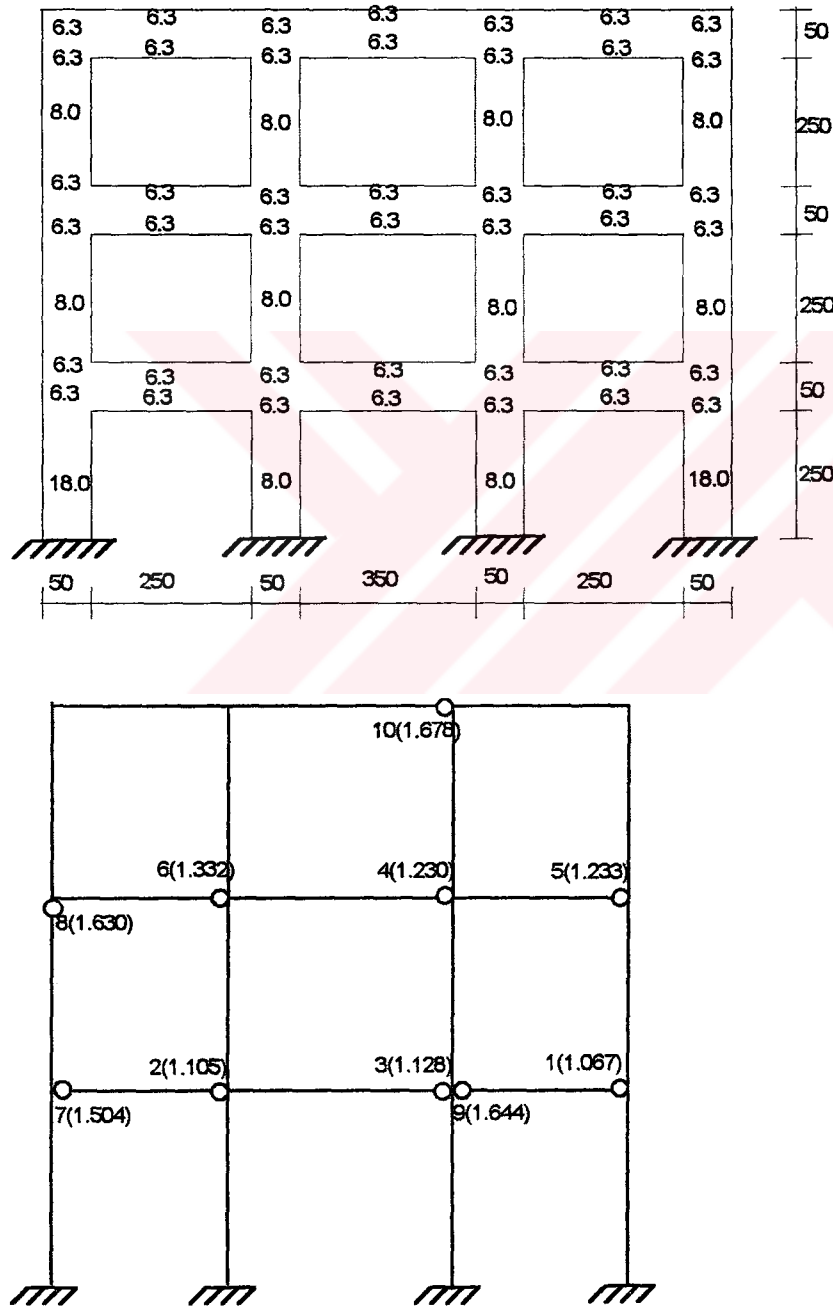


Yük Parametresi = 1.301

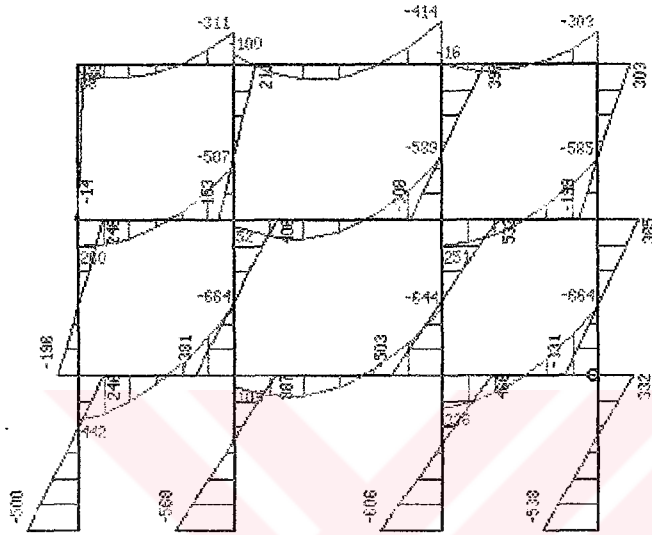
Şekil 3.9 Elastik teori ile hesaplanan donatı oranlarına ait moment diyagramları (devam)

Doğrusal hesap sonuçları bu şekilde bulunduktan sonra, aynı boyut ve yükleme durumu için çerçeve, bu defa kiriş ve kolonlara minimum donatı konularak ($\rho_{kiriş}=0.0063$,

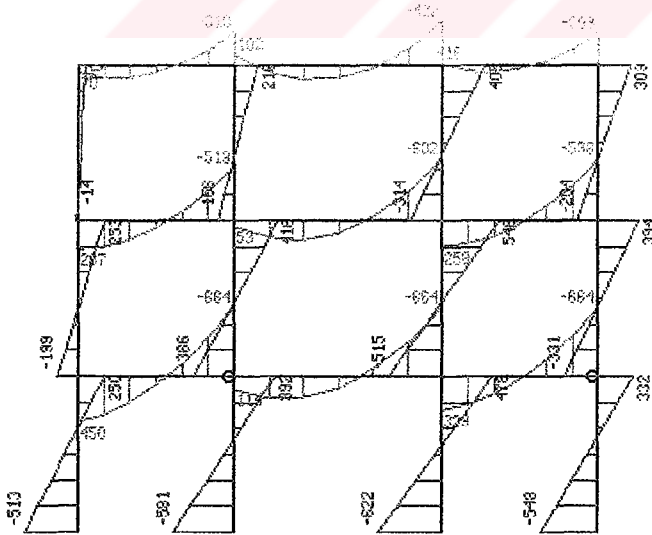
$\rho_{\text{colon}} = 0.0080$) plastik hesap ile çözümlenmiş, plastik mafsall gelişimi ile yük parametreleri ve kesit tesirleri elde edilmiştir. Mafsalların gelişimi ve yük parametrelerinin değişimi Şekil 3.10 da, her bir yük parametresine karşılık gelen yük düzeylerindeki eğilme momentleri de Şekil 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 ve 3.15 de verilmiştir. Donatı oranları şekilde 10^3 ile çarpılarak verilmiştir.



Şekil 3.10 Plastik hesap için seçilen donatı oranları ve plastik mafsall gelişimi

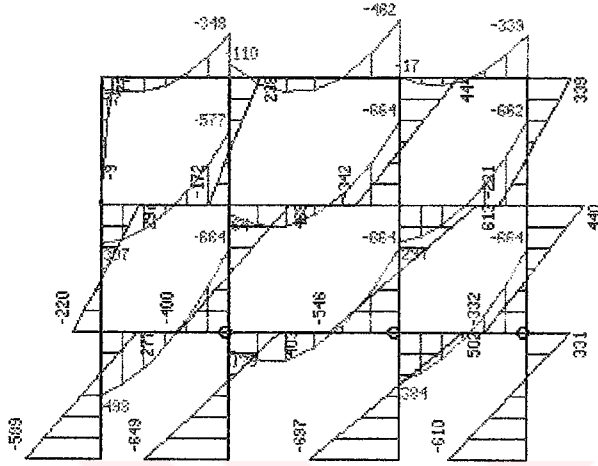


Yük Parametresi = 1.067

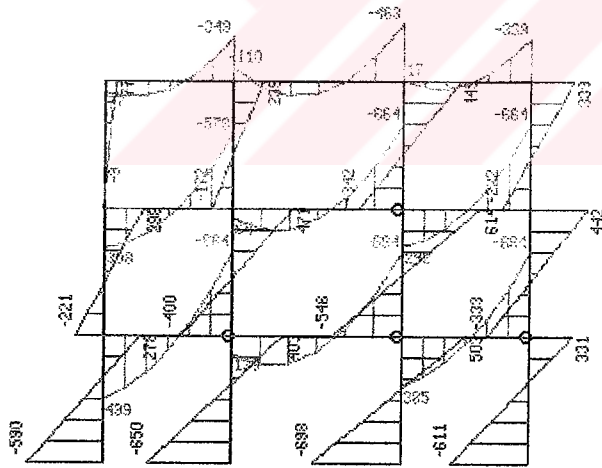


Yük Parametresi = 1.105

Şekil 3.11 Plastik hesapta yük parametrelerine bağlı olarak eğilme momenti diyagramlarının değişimi

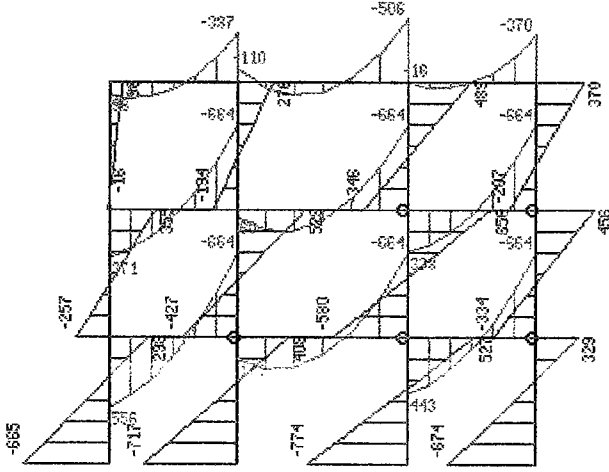


Yük Parametresi = 1.128

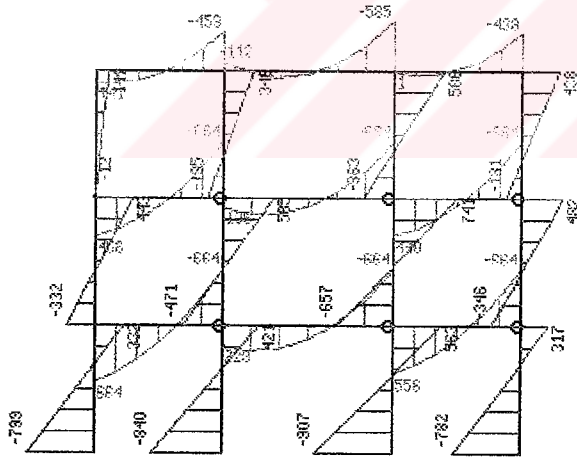


Yük Parametresi = 1.230

Şekil 3.12 Plastik hesapta yük parametrelerine bağlı olarak eğilme momenti diyagramlarının değişimi (devam)

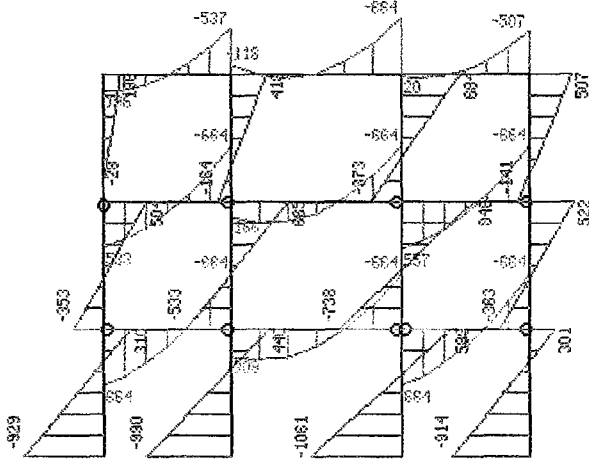


Yük Parametresi = 1.233



Yük Parametresi = 1.332

Şekil 3.13 Plastik hesapta yük parametrelerine bağlı olarak eğilme momenti diyagramlarının değişimi (devam)



Yük Parametresi = 1.644

Şekil 3.15 Plastik hesapta yük parametrelerine bağlı olarak eğilme momenti diyagramlarının değişimi (devam)

3.2.1. Elastik ve Plastik Hesap Sonucu Bulunan Donatı Oranlarının Karşılaştırılması

İncelenen örnekte elastik ve plastik hesapta bulunan donatı oranları karşılaştırıldığında plastik hesapta daha büyük donatı oranlarının kullanıldığı görülmektedir. Plastik hesaplama amaçlanan plastik mafsalların kolonlarda oluşmasını önlemektir. Bu amacı sağlayan daha küçük donatı oranlarını bulmak mümkündür. Bunun için taşıyıcı elemanlara konulan donatı oranlarını değiştirerek bir deneme yanılma yolu ile bu oranları bulmak mümkün ise de bu hesabın birçok kez yinelenmesi demektir. Bunun yerine yapı sistemini elastik hesap kullanarak boyutlandırmak ve elde edilen donatılarla yapıdaki mafsal gelişimini kontrol etmek daha kullanışlı olacaktır. Bu hesap sırasında kolonlarda mafsal oluşması halinde ilgili kolon boyutunu veya donatısını artırmak amaç için yeterli olacaktır.

Plastik hesap ile yapılmak istenen donatı oranlarının küçük bulunması değil, plastik hesapta, plastik mafsallarda gelişimi izlenebildiğinden dolayı sünekliği artırıcı yönde gerekli düzenlemeler yapabilmektir. Betonarme sistemlerin plastik hesabının mümkün olması için betonarme elemanların birtakım özelliklere sahip olması gerektiğinden daha önce bahsedilmişti. Bu nedenle betonarme yapıların plastik hesaplarda boyutlandırılmasında, ilk mafsallarda oluşması için gereken yük parametresinin bir veya daha büyük olacak şekilde sistemin boyutlandırılması bu sakıncayı ortadan kaldıracaktır.

3.2.2. Elastik ve Plastik Hesap Sonucu Bulunan Mafsallarda Gelişiminin Karşılaştırılması

Elastik hesap yöntemlerinde, yüklerin işletme yüklerini aşması halinde, plastik mafsalların hangi kesitlerde meydana geleceğini gözlemek mümkün değildir. Kesitlere konulan donatı oranları hesaplarda bulunan donatılarla aynı ise teorik olarak bütün kesitler aynı anda taşıma güçlerini kaybedeceklerdir. Ancak çoğu zaman kesitlere konulan donatılar hesaplarda bulunan değerlerden bir miktar fazla olmaktadır. Bu durumda ise kesitlerin taşıma güçlerini kaybetmeleri veya plastikleşmeleri ilgili şekilden görüleceği üzere (Şekil 3.4.) rastgele olmakta ve yük parametresinin değeri ise yaklaşık 1 civarında olmaktadır. Yine taşıma gücünü ilk kaybeden kesitler kolon elemanlarda olabilmektedir. Bu durum yapının deprem yükleri altındaki davranışı açısından istenmeyen bir davranış olarak karşımıza çıkmaktadır.

Örnek çerçevenin plastik hesaplarda boyutlandırılmasında önce boyutlara ve donatı oranlarına karar verilmiş daha sonra plastik hesap yapılarak mafsalların gelişimi gözlenmiştir. Bu sırada herhangi bir kolonda plastik mafsallarda oluşmuşsa o kolonun donatısı artırılarak bu durum önlenmeye çalışılmıştır.

Çerçevelerin daha büyük boyutlara ulaştığı, yüklerin daha da büyüdüğü değişik sistemlerde, söz konusu belirsizlikler belirginleşmektedir. Elastik hesapta emniyetli tarafta kalacak şekilde boyut ve donatı hesabıyla, bu belirsizliklerin giderilmesi mümkün olmamaktadır. Çünkü, plastik mafsall gelişimi bilinmeden yapılacak düzenlemeler yine belirsiz olmakta, hatta istenmeyen yeni durumların ortaya çıkması mümkün olabilmektedir. Örneğin, kirişlerde kesitin emniyetli tarafta kalacak şekilde donatılandırılması halinde sünekliğin azalması durumu gözden kaçabilmektedir.

3.2.3. Elastik ve Plastik Hesap Sonucu Bulunan Yük Parametrelerinin Karşılaştırılması

Elastik hesapta, yapının göçme konumuna gelmesi için yüklerin işletme yüklerine eşit olmasının yeterli olacağı kabul edilmektedir. Dolayısıyla aynı sayıda plastik mafsall oluşması için elastik hesapta boyutlandırılan çerçevede, plastik hesapta boyutlandırılan çerçeveye göre daha az yükün yeterli olduğu gözlenmiştir. Elastik hesapta projelendirilen yapılarda gerçek emniyet katsayısının değeri hesaplanamamaktadır.

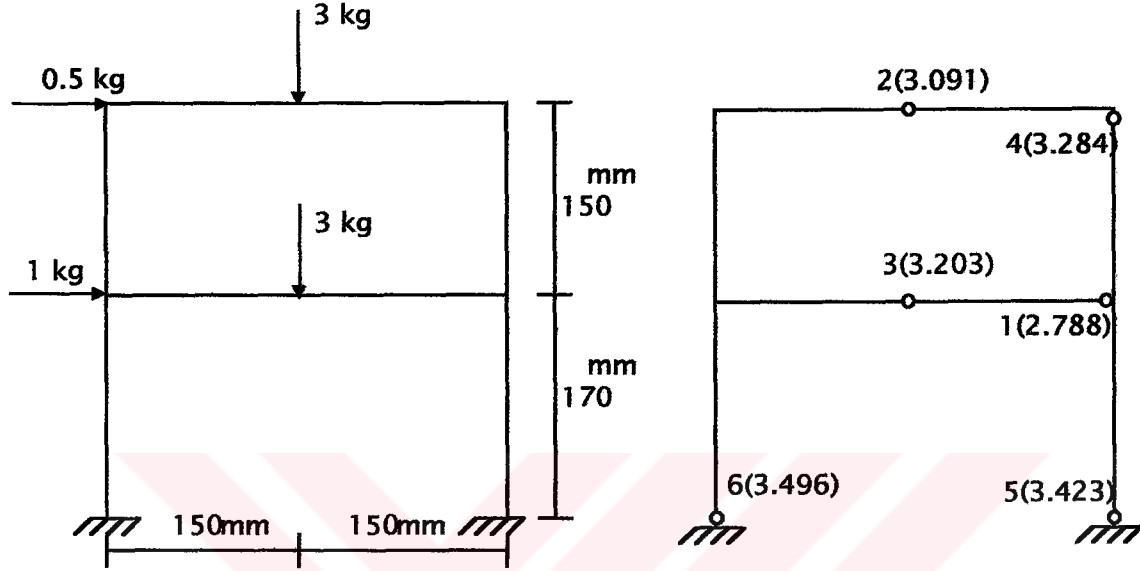
3.3. Elastoplastik Hesabın Çelik Çerçevede Uygulaması

Hazırlanan bilgisayar programının ve çalışmanın bir uygulaması olması bakımından, özellikleri Şekil 3.16 da verilen çelik çerçeve ele alınmış ve söz konusu program ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar [29] ile aynı olup, plastik mafsall gelişimi ve yük parametreleri değişimi Şekil 3.16 da verilmiştir.

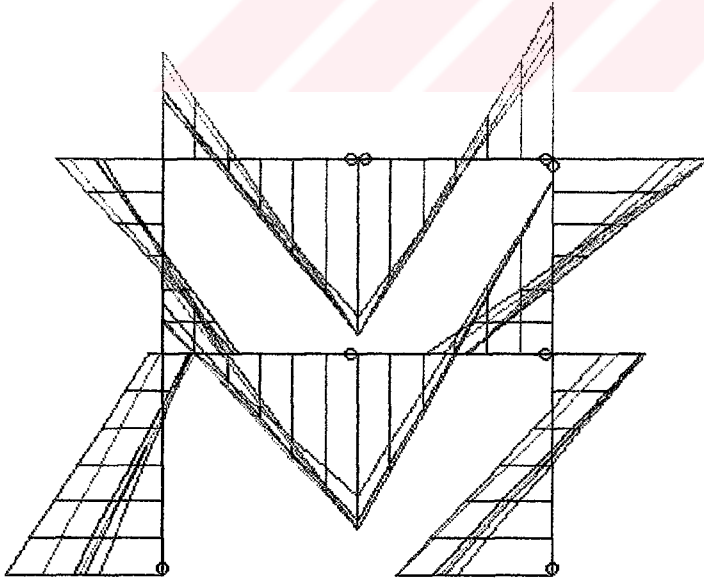
Kirişlerde : $I = 1000 \text{ mm}^4$, $A = 20 \text{ mm}^2$, $M_p = 450 \text{ kgmm}$

Kolonlarda : $I = 500 \text{ mm}^4$, $A = 25 \text{ mm}^2$, $M_p = 400 \text{ kgmm}$

Ayrıca, her bir adım için hesaplanmış olan kesit tesirleri, aynı diyagram üzerinde büyük ölçekli olarak gösterilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.16 Çelik çerçevenin yükleme durumu ve plastik mafsall gelişimi



Şekil 3.17 Yük parametresine bağlı olarak eğilme momenti diyagramlarının değişimi

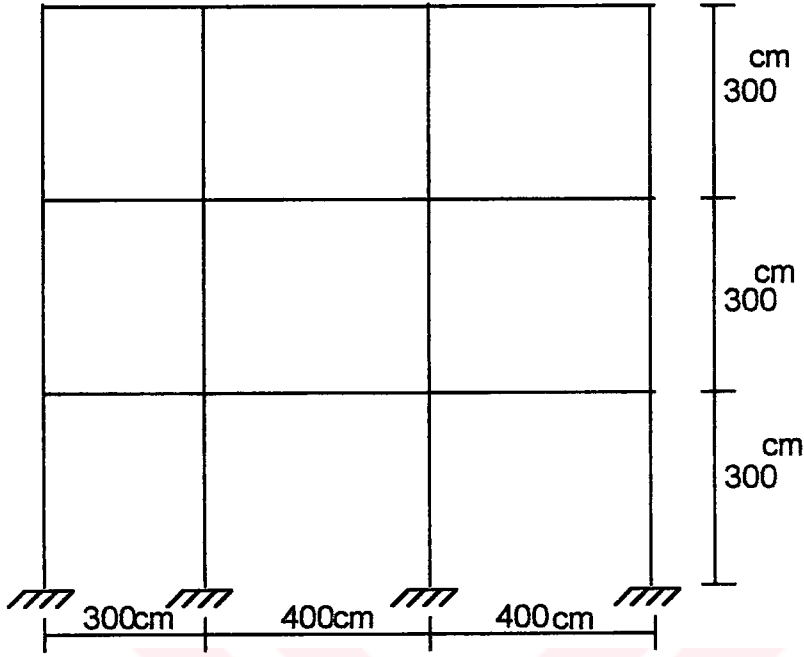
3.4. İkinci Mertebe Etkileri İçin Bir Uygulama

Bu amaçla, Şekil 3.18 de açıklıkları ve kat yüksekliği verilen çelik çerçevenin I. mertebe elastoplastik ve II. mertebe elastoplastik hesabı yapılmıştır. Çelik çerçevenin kiriş ve kolon boyutları 10x15 cm ve dikdörtgen kesitlidir. Yükleme durumu ise Bölüm 3.2. de incelenen çerçeve ile aynıdır. Söz konusu çerçevede, akma dayanımı 2.4 t/cm^2 ve elastisite modülü 2000 t/cm^2 olan St37 çeliğinin kullanıldığı varsayılmıştır.

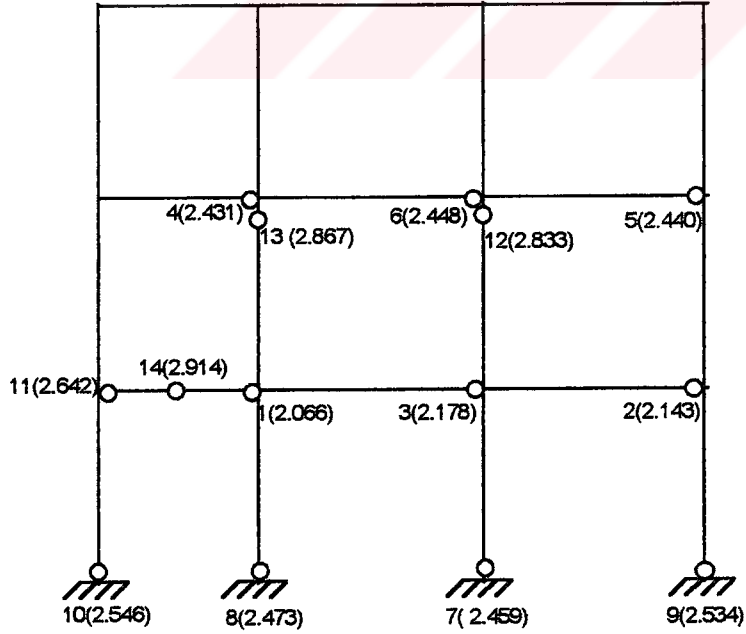
Çerçevenin I mertebe elastoplastik hesabında akma şartı olarak basit eğilme kullanılmış, II.mertebe elastoplastik hesabında ise akma şartı olarak basit eğilme (M) ve bileşik mukavemet hali ($N + M + Q$) kullanılarak, toplam üç farklı hesap yapılmıştır.

Şekil 3.19 da I mertebe elastoplastik ve akma şartının basit eğilme olması, Şekil 3.20 de II mertebe elastoplastik akma şartının basit eğilme olması, Şekil 3.21 de ise II mertebe elastoplastik akma şartının bileşik mukavemet hali olması durumu için elde edilen plastik mafsall gelişimi ve yük parametreleri verilmiştir.

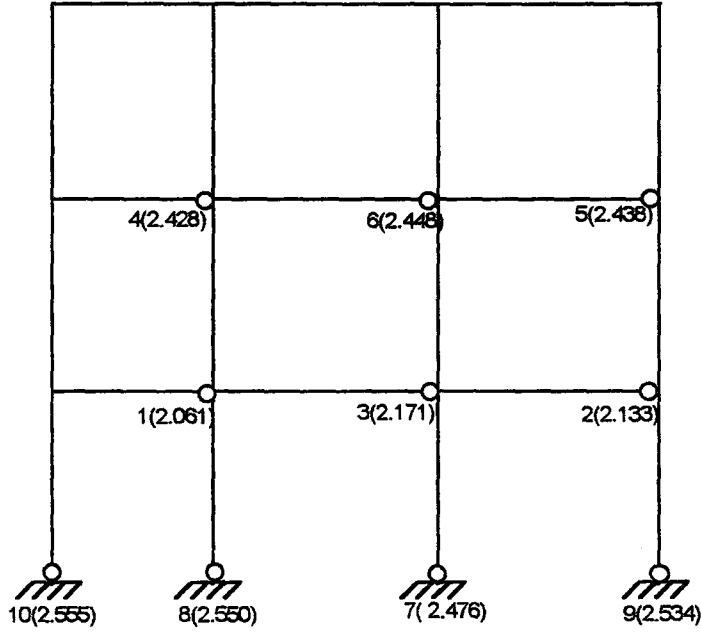
Şekil 3.19 ve Şekil 3.20 nin incelenmesinden II mertebe etkisinin küçük olduğu gözlenmiştir. Sistem küçük boyutlu olduğundan II. mertebe etkilerinin, yük parametrelerine ve plastik mafsall gelişimine katkısı belirgin bir şekilde gözlenememiştir. Ancak $N + M + Q$ bileşik mukavemet durumuna ait II. mertebe elastoplastik hesapta, plastik mafsall gelişiminin değiştiği gözlenmiştir.



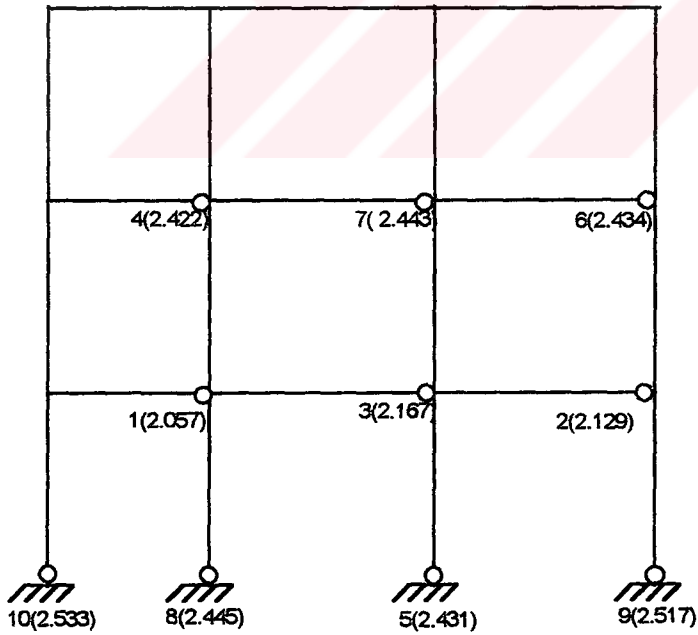
Şekil 3.18 Çelik çerçeve ve boyutları



Şekil 3.19 I.mertebe elastoplastik ve akma şartının basit eğilme durumu olması halinde elde edilen plastik mafsall gelişimi ve yük parametreleri



Şekil 3.20 II. mertebe elastoplastik ve akma şartının basit eğilme durumu olması halinde elde edilen plastik mafsall gelişimi ve yük parametreleri



Şekil 3.21 II.mertebe elastoplastik ve akma şartının bileşik mukavemet hali olması durumunda elde edilen plastik mafsall gelişimi ve yük parametreleri

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada, düzlem çerçevelerin I. mertebe ve II. mertebe elastoplastik hesabı teorik olarak incelenmiş, bir bilgisayar programı hazırlanarak, söz konusu hesaba yönelik bazı uygulamalar yapılmıştır.

İlk uygulamada, göz önüne alınan betonarme çerçevenin elastik ve plastik yaklaşımla boyutlandırılması yapılmış, elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından donatı oranları arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Burada elastik hesap deyimi ile, kesit tesirlerinin doğrusal – elastik yöntemlerle bulunması ancak kesitlerin Taşıma Gücü yöntemine göre boyutlandırılıp donatılması kast edilmektedir. Plastik hesap yöntemleri ile donatı hesabından da, hem kesit tesirlerinin hem de kesitin boyut ve donatı hesabının plastik hesap yöntemleri ile yapılmış olması kast edilmektedir.

Yukarıda sözü edilen durumdan dolayı, elastik hesap yöntemlerine göre donatı hesabının yeterli olduğu, ancak bu hesap yöntemlerinde plastik mafsall gelişiminin ve yapının göçme durumunun bilinmemesinden dolayı sakıncası olduğu söylenebilir. Bu durumun netleşmesi için yine plastik hesap yöntemlerine gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle, elastik hesap yöntemlerine göre donatı hesabı yapılarak, plastik hesap yöntemleri ile de, elde edilen bu donatı oranlarının nasıl bir mafsall gelişimi meydana getireceğinin izlenmesi önerilmektedir. Yapılan bu kontrolde, kolonlarda mafsall oluşması gözlenmişse, ilgili kolonun taşıma gücünü arttırıcı yönde önlemler alınması önerilmektedir.

İncelenen ilk çelik çerçeve örneği, I. mertebe elastoplastik hesap yönteminin bir uygulaması olarak ele alınmıştır. I. mertebe elastoplastik hesap yöntemine göre yapılan hesaptan elde edilen sonuçlar, [29] da verilen sonuçlar ile aynıdır.

Çelik çerçeve için çözülen diğer bir örnekte, elastoplastik hesabın irdelenmesi ile birlikte, normal kuvvetlerin oluşturduğu II. mertebe etkilerinin de gözlenmesi

istenmiştir. Bu nedenle, söz konusu çerçeve, önce I. mertebe elastoplastik hesap yöntemine göre hazırlanmış olan bilgisayar programı ile çözülerek plastik mafsall gelişimi ve yük parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra, söz konusu programa normal kuvvetlerin etkisi yansıtılarak II. mertebe elastoplastik hesap yöntemine çözülmüş ve aynı çerçevenin son olarak, akma şartının $N + M + Q$ bileşik mukavemet durumu olmasına göre II. mertebe elastoplastik hesabı yapılmış ve plastik mafsall gelişimi ve yük parametreleri elde edilmiştir. Böylece aynı çerçeve için üç farklı hesaba göre sonuçlar elde edilmiştir. Sistemin ve yükleme durumunun özelliklerine bağlı olarak, akma şartının $N + M + Q$ bileşik mukavemet durumu olmasına göre II. mertebe elastoplastik hesap sonuçları dışında, belirgin bir fark gözlenememiştir. Daha büyük boyutlu ve yükleri daha büyük sistemlerde II. mertebe etkilerinin açık bir farkı gözlenebilmektedir. Bu nedenle, sistem ve yükleme durumuna bağlı olarak II. mertebe etkilerinin, yapılacak hesaplarda, göz önüne alınması önerilmektedir.

Plastik hesabın da içinde yer aldığı doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin, doğrusal hesap yöntemlerine göre zorluğu, bilgisayar programları ile aşılabildiğinden dolayı, sistemin ve malzemenin gerçek davranışını esas alan söz konusu yöntemlerin, lisansüstü araştırma konusu olmasının yanı sıra, lisans eğitimi sırasında da verilmesi gerektiği yolundaki düşünceleri destekleyici sonuçlar elde edildiğinden aynı düşünce paylaşılmış ve önerilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Hodge, P.G., 1959, Plastic Analysis of Structures. Mc Graw Hill Book Company, NewYork, p 1-8.
- [2] Çakıroğlu, A., Özden, E. ve Özmen, G., 1970, Yapı Sistemlerinin Hesabı İçin Matris Metotları Ve Elektronik Hesap Makinesi Programları. Dizerkonca Matbaası, İstanbul, Cilt I, s 3, 200.
- [3] Özer, E., Doğaner, S., Orakdöğen, E. ve Girgin, K., 1993, Çok katlı yapı sistemlerinin lineer olmayan davranışının incelenmesi. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler I. Teknik Kongresi, Gazi Magosa, 54-63.
- [4] Ersoy, U., 1978, Beton Ve Betonarmenin Doğrusal Elastik Olmayan Davranışı. İMO yayını, Ankara, s 1-25.
- [5] Arda, T.S. ve Uzgider, E., 1986, Çelik Yapılarda Taşıma Gücü. Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul, s 4-17.
- [6] Arda, T.S and Aşkar, G., 1986, Plastic Design of Steel Structures. Boğaziçi University Press, İstanbul, p 1-4.
- [7] Çakıroğlu, A. ve Özer, E., 1980, Malzeme Ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, Cilt I, s 4-68.

- [8] Aksoğan, O., 1986, Nonlinear yapı analizi. Yapı mekaniğinde son gelişmeler sempozyumu, Trabzon, 227-233.
- [9] Çakıroğlu, A., Özden, E. ve Özmen, G., 1974, Yapı Sistemlerinin Hesabı İçin Matris Metotları Ve Elektronik Hesap Makinesi Programları. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, Cilt II, s 15-99.
- [10] İrtem, E., 1991, Uzay çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yükün hesabı için bir yük artımı yöntemi. Doktora tezi, İ.T.Ü., İstanbul. (yayınlanmamış)
- [11] Görgün, H., 1992, Düğüm noktalarına dönel yaylarla bağlı çubuklardan oluşan düzlemsel çerçevelerin nonlinear analizi. Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana. (yayınlanmamış)
- [12] Darılmaz, K. ve Kumbasar, N., 1998, Düzgün yayılı yük etkisindeki betonarme plakların sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan hesabı. İMO Teknik Dergi, 9, (3), 1697-1714.
- [13] Aysal, S.E., 1992, Kapalı dikdörtgen çelik çerçevelerin elastik – plastik analizi. Doktora tezi, Y.T.Ü., İstanbul. (yayınlanmamış)
- [14] Doğaner, S., 1993, Çok katlı düzlem ve çelik çerçevelerin gerçek göçme güvenlikleri ve yapı sistemlerinin hesap yöntemlerinin karşılaştırılması. Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü., İstanbul. (yayınlanmamış)
- [15] Cansunar, S., 1993, Çok katlı düzlem çerçevelerin yaklaşık ikinci mertebe hesabı. Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü., İstanbul. (yayınlanmamış)

- [16] Üçerler, C., 1995, Çok katlı çelik çerçevelerin II. mertebe limit yüklerinin hesabı. Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir. (yayınlanmamış)
- [17] Eröz, A., 1995, Düzlemine dik yükler etkisindeki düzlem sistemlerin elastoplastik hesabı için bir yük artımı yöntemi ve betonarme döşemelerin göçme yüklerinin belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü., İstanbul. (yayınlanmamış)
- [18] Wood, R.H., 1958, The stability of tall buildings, Proc. Inst. of Civil Engrs, 11, 69.
- [19] Özer, E., 1969, Lineer olmayan sistemlerin hesabı için bir metot. Doktora tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [20] Liapunov, S., 1974, Ultimate strength of multistory steel rigid frames. J. Struct. Div., 100, (8), 1643.
- [21] Parikh, B.P., 1966, Elastic – plastic analysis and design of unbraced multistory frames, Ph. D. Dissertation, Lehigh University. (yayınlanmamış)
- [22] Hayalioğlu, M.S., 1989, Büyük deplasman yapan elastik – plastik çerçevelerin optimum boyutlandırılması. Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ. (yayınlanmamış)
- [23] Saka, M.P., 1988, Optimum design of non-linear space trusses. Comp. Struct., 30, (3), 545-551.
- [24] Saka, M.P. and Ulker, M., 1991, Optimum design of geometrically non-linear space trusses. Comp. Struct., 41, (6), 1387-1396.

- [25] Ülker, M., 1995, Malzeme ve geometri bakımından lineer olmayan uzay kafes sistemlerin optimum boyutlandırılması. İMO Teknik Dergi, 6, (2), 971-985.
- [26] Noor, A.K., 1974, Non-linear analysis of space trusses. J. Struct. Div., 3, 533-546.
- [27] Stricklin, J.A., Haisler, W.E. and Von Riesaman, W.A., 1971, Geometrically non-linear structural analysis by direct stiffness method. J. Struct. Div., 9, 2299-2314.
- [28] Tezcan, S., 1970, Çubuk Sistemlerin Elektronik Hesap Makineleri İle Çözümü. Arı Kitabevi Matbaası, İstanbul, s 154-161.
- [29] Bektaş, S. ve Sungur, İ., 1985, Uzay çerçevelerin elastik – plastik analizi. Türkiye inşaat mühendisliği 8. teknik kongresi, Ankara, 35-47.
- [30] Ersoy, U., 1985, Betonarme. Bizim Büro Basımevi, Ankara, Cilt I, s 90-114.