

**MERKEZİ VE DIŞMERKEZ ÇAPRAZLI ÇELİK YAPI SİSTEMLERİNDE
LİNEER OLMAYAN DAVRANIŞIN İNCELENMESİ
VE SÜNEKLİK DÜZEYİNİN BELİRLENMESİ**

**Y. A. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
HİZMETLERİ MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Bahadır ÖZCİHAN
(501981006)**

104012

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Haziran 2001**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erkan ÖZER

Erkan Özer

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Tuncer ÇELİK (İ.Ü.)

Tuncer Çelik

Yrd. Doç. Dr. Konuralp GİRGİN

Konuralp GİRGİN

HAZİRAN 2001

ÖNSÖZ

Bu çalışmada merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinin lineer olmayan davranışları, göçme güvenlikleri ve süneklilik düzeyleri incelenmiştir.

Yüksek lisans tezi süresince, engin bilgi ve deneyimlerinden yararlanma fırsatını bulduğum danışman hocam Prof. Dr. Erkan ÖZER başta olmak üzere, ilgi ve yardımları ile bana destek olan Yrd. Doç. Dr. Konuralp GİRGIN'e ve tüm Yapı Statiği Çalışma Grubu öğretim üyelerine en içten teşekkürlerimi sunarım .

Üzerimde büyük emekleri olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca bana her türlü kolaylığı sağlayan SEYAŞ yöneticileri ve teknik elemanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran, 2001

İstanbul

Bahadır ÖZCİHAN

İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	xi
SUMMARY	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Sınır Durumlar	1
1.2 Depreme Dayanıklı Yapılarda Aranılan Özellikler	3
1.3 Yapı Sistemlerinin Süneklik Düzeyine Göre Sınıflandırılması	4
1.4 Yapı Sistemlerinin Dış Yükler Altındaki Lineer Olmayan Davranışları	5
1.5 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	7
2 YAPI SİSTEMLERİNİN LİNEER OLMAYAN TEORİYE GÖRE HESABI VE İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKÜN BULUNMASI İÇİN BİR YÜK ARTIMI YÖNTEMİ	9
2.1 Varsayımlar	9
2.2 Yöntemin Esasları	10
2.3 Akma Koşulları	13
2.4 Yöntemin Matematik Formülasyonu	18
2.4.1 Denge Denklemleri	18
2.4.2 Plastik Kesitlerdeki Akma Koşulları	21
2.4.3 Genişletilmiş Denklem Takımının Oluşturulması, Çözümü ve Bilinmeyenlerin Elde Edilmesi	22
2.4.4 Uç Kuvvetlerinin ve İç Kuvvetlerin Hesabı	23
2.4.5 Plastik Kesitin ve Yük Parametresinin Belirlenmesi	24
2.5 Hesapta İzlenen Yol	24
2.6 Bilgisayar Programları	27

3	YAPI SİSTEMLERİNDE LİNEER OLMAYAN DAVRANIŞIN İNCELENMESİ	29
3.1	Göçme Güvenliğinin Belirlenmesi	29
3.1.1	İkinci Mertebe Limit Yükün Hesabı	30
3.1.2	Göçme Yükünün Hesabı	31
3.2	Yatay Yük Parametresi – Yerdeğiştirme Bağıntıları	31
3.3	Plastik Kesitlerin Oluşumu	33
3.4	Yapı Sistemlerinde Süneklik Düzeyinin Belirlenmesi	33
4	MERKEZİ VE DIŞMERKEZ ÇAPRAZLI SİSTEMLER ÜZERİNDE SAYISAL İNCELEMELER	36
4.1	Taşıyıcı Sistem Modellerinin Seçimi ve Ortak Özellikleri	36
4.2	Taşıyıcı Sistem Modellerinin Boyutlandırılması	39
4.2.1	Varsayımlar	39
4.2.2	Boyutlandırmada Esas Alınan Yönetmelikler	40
4.2.3	Analiz ve Boyutlandırma	43
4.3	Taşıyıcı Sistem Modellerinde Lineer Olmayan Davranışın İncelenmesi	47
4.4	Süneklik Düzeyinin Belirlenmesi	49
4.5	Sayısal Sonuçların Değerlendirilmesi	50
5	SONUÇLAR	53
	KAYNAKLAR	57
	EKLER	59
EK A	Taşıyıcı Sistem Modellerinin Geometrik Özellikleri ve Enkesit Profilleri	60
EK B	Taşıyıcı Sistem Modellerinde Yatay Yük Parametresi – Bağlı Yerdeğiştirme Diyagramları	66
EK C	Taşıyıcı Sistem Modellerinde Plastik Kesitlerin Oluşumu	73
	ÖZGEÇMİŞ	80

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1 : Taşıyıcı Sistem Modellerinde Kullanılan Enkesit Profilleri	44
Tablo 4.2 : Taşıyıcı Sistem Modellerinde Yapı Ağırlıkları	45
Tablo 4.3 : Taşıyıcı Sistem Modellerinde Deprem Katsayılarının Belirlenmesi	45
Tablo 4.4 : Deprem Yüklerinin Katlara Göre Dağılımı	46
Tablo 4.5 : Deprem Yükleri Altındaki Göreli Kat Ötelemeleri	46
Tablo 4.6 : Sayısal Sonuçların Özeti	48
Tablo 4.7 : Sistem Süneklik Oranları	49

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Yapılarda Dayanım - Süneklik İlişkisi	4
Şekil 1.2 : Yük Parametresi - Yerdeğiştirme (P-δ) Bağlılıları	6
Şekil 2.1 : İdeal Elastoplastik Malzemede Gerilme-Şekildeğiştirme (σ-ε) Bağlılısı	9
Şekil 2.2 : Akma Yüzeyi ve Akma Vektörü	14
Şekil 2.3 : İdealleştirilmiş Akma Yüzeyi	17
Şekil 2.4 : $[S_{d\phi}]$ Matrisinin Elemanları	20
Şekil 3.1 : Süneklik Oranının Belirlenmesi	34
Şekil 4.1 : Taşıyıcı Sistem Modelleri ve Geometrik Özellikleri	38
Şekil A.1 : TSM 1 Geometrik Özellikleri ve Enkesit Profilleri	60
Şekil A.2 : TSM 2 Geometrik Özellikleri ve Enkesit Profilleri	61
Şekil A.3 : TSM 3 Geometrik Özellikleri ve Enkesit Profilleri	62
Şekil A.4 : TSM 4 Geometrik Özellikleri ve Enkesit Profilleri	63
Şekil A.5 : TSM 5 Geometrik Özellikleri ve Enkesit Profilleri	64
Şekil B.1 : TSM 1 için Yatay Yük Parametresi – Bağlı Yerdeğiştirme Diyagramı	66
Şekil B.2 : TSM 2 için Yatay Yük Parametresi – Bağlı Yerdeğiştirme Diyagramı	67
Şekil B.3 : TSM 3 için Yatay Yük Parametresi – Bağlı Yerdeğiştirme Diyagramı	68
Şekil B.4 : TSM 3a için Yatay Yük Parametresi – Bağlı Yerdeğiştirme Diyagramı	69
Şekil B.5 : TSM 4 için Yatay Yük Parametresi – Bağlı Yerdeğiştirme Diyagramı	70

Şekil B.6	: TSM 5 için Yatay Yük Parametresi – Bağıl Yerdeğiştirme Diyagramı	71
Şekil C.1	: TSM 1 için Plastik Kesitlerin Oluşumu	73
Şekil C.2	: TSM 2 için Plastik Kesitlerin Oluşumu	74
Şekil C.3	: TSM 3 için Plastik Kesitlerin Oluşumu	75
Şekil C.4	: TSM 3a için Plastik Kesitlerin Oluşumu	76
Şekil C.5	: TSM 4 için Plastik Kesitlerin Oluşumu	77
Şekil C.6	: TSM 5 için Plastik Kesitlerin Oluşumu	78



SEMBOL LİSTESİ

A_0	: Etkin yer ivmesi katsayısı
A_1, A_2, A_3, B	: Lineerleştirilmiş akma koşulu katsayıları
C_m	: Yanal desteklemeyi ve gereğinde uç momentlerini gözönüne alan bir katsayı
$[d]$	: Düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri matrisi
$\vec{d}(\phi_y, \phi_z, \Delta)$	: Bileşik eğik eğilme durumuna ait plastik şekildeğiştirme vektörü
E	: Elastisite modülü
EI_y, EI_z	: Çubuğun y ve z asal eksenlerindeki eğilme rijitliği
I	: Yapı önem katsayısı
$[k]_{ii}, [k]_{ij}, \dots$	: Çubuk eksenlerindeki eleman rijitlik matrisleri
$[k]_{ixix}, [k]_{ixjx}, \dots$	: Sistem eksenlerindeki eleman rijitlik matrisleri
$K (M_x, M_y, M_z, N, T_y, T_z)$	: Genelleştirilmiş akma koşulu fonksiyonu
$K (M_y, M_z, N)$	: Bileşik eğik eğilme durumuna ait akma koşulu
m	: Plastik kesitlerin sayısı
M_p	: Kesitin eğilme momenti taşıma gücü
M_y, M_z	: Çubuğun y ve z asal eksenlerindeki eğilme momentleri
n	: Düğüm noktası sayısı
n	: Hareketli yük katılım katsayısı
N	: Normal (eksenel) kuvvet
N_p	: Kesitin normal kuvvet taşıma gücü
$[P_0]$	: Çubuk yüklerinden oluşan uç kuvvetleri kolon matrisi

P_{G1}	: Birinci mertebe göçme yükü parametresi
P_{G2}	: İkinci mertebe göçme yükü parametresi
P_i	: İşletme yükü parametresi
P_{L1}	: Birinci mertebe limit yük parametresi
P_{L2}	: İkinci mertebe limit yük parametresi
$[P_{\phi 0}]$	: Çubuk yüklerinden dolayı plastik kesitlerdeki iç kuvvet değişimlerinden oluşan bir kolon matris
$[p_{\phi k}]_{ix}, [p_{\phi k}]_{jx}$	: k sayılı plastik şekildeğiştirme parametresinin birim değerinden oluşan, sistem eksen takımındaki çubuk uç kuvvetleri matrisleri
$[q]$	: Düğüm noktaları yükleri matrisi
R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
$R_d(T)$	: Deprem yükü azaltma katsayısı
$S(T)$	: Spektrum katsayısı
$[S_{dd}]$	: Üzerinde plastik kesitler bulunmayan sisteme ait sistem rijitlik matrisi
$(S_{dd})_{\alpha\beta}$	: Sistem rijitlik matrisinin bir elemanı
$[S_{d\phi}]$	: Plastik şekildeğiştirme parametrelerinin birim değerlerinden meydana gelen uç kuvvetlerinin denge denklemlerine katkısını ifade eden matris
$[S_{\phi\phi}]$	: Birim plastik şekildeğiştirmelerden oluşan iç kuvvet değişim matrisi
T	: Bina doğal titreşim periyodu
T_A, T_B	: Spektrum karakteristik periyotları
T_y, T_z	: Kesme kuvvetleri
V_t	: Deprem etkileri ile oluşan taban kesme kuvveti
W	: Etkin yapı ağırlığı
α_y, α_z	: Stabilite katsayıları
δ	: Yerdeğiştirme

ε	: Şekildeğiştirme
ε_a	: Akma sınırına karşı gelen şekildeğiştirme
$[\phi]$	: Plastik şekildeğiştirme parametrelerinden oluşan kolon matris
ϕ_y, ϕ_z, Δ	: Plastik şekildeğiştirme bileşenleri
λ_b	: Eğilme düzlemindeki narinlik (çubuk burkulma boyunun atalet yarıçapına oranı)
μ	: Sistem süneklik oranı
σ	: Gerilme
σ_a	: Akma gerilmesi
σ_b	: Yalnız eğilme momenti etkisi altında hesaplanan gerilme
σ_B	: Yalnız eğilme momenti etkisi altında izin verilen gerilme (eğilme güvenlik gerilmesi)
σ_{bem}	: Yalnız basınç kuvveti etkisi altında izin verilen gerilme (basınç güvenlik gerilmesi)
σ'_e	: Euler kritik gerilmesinin n güvenlik katsayısına bölünmesi ile elde edilen sınır gerilme
σ_{eb}	: Yalnız eksenel kuvvet etkisi altında hesaplanan gerilme

MERKEZİ VE DIŞMERKEZ ÇAPRAZLI ÇELİK YAPI SİSTEMLERİNDE LİNEER OLMAYAN DAVRANIŞIN İNCELENMESİ VE SÜNEKLİK DÜZEYİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Deprem bölgelerindeki yapıların yeterli bir güvenlik altında ve ekonomik olarak tasarımı, yapı taşıyıcı sistemlerinin deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışları ve süneklik düzeyleri ile yakından ilgilidir. Bu durum, betonarme yapıların yanında, özellikle son yıllarda yoğun bir şekilde gündeme gelen çelik yapılar için de geçerlidir.

Yapı malzemelerinin orantı sınırından sonraki lineer olmayan davranışını ve geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisini (ikinci mertebe etkisi) gözönüne alan ileri hesap yöntemlerinde meydana gelen gelişmeler, betonarme ve çelik yapı sistemlerinin dış yükler altındaki gerçek davranışlarının daha yakından izlenebilmesine ve göçme güvenliklerinin daha gerçekçi bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamıştır.

Bu hususlar gözönünde tutularak, merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinin deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışlarının incelenmesini, göçme güvenliklerinin ve süneklik düzeylerinin belirlenmesini amaçlayan bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması sözkonusu araştırmanın esaslarını, ayrıntılarını ve sonuçlarını kapsamaktadır.

Tez beş bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölüm konunun tanıtılmasına, konu ile ilgili çalışmaların gözden geçirilmesine, çalışmanın amacının ve kapsamının açıklanmasına ayrılmıştır.

Bu bölümde, depreme dayanıklı yapı tasarımında esas alınan kullanılabilirlik, kontrollü hasar ve göçme sınır durumları üzerinde durulmuş, bu sınır durumlara karşı yeterli bir güvenlik sağlanabilmesi için yapıların sahip olması gereken rijitlik, dayanım ve süneklik özellikleri açıklanmıştır. Ayrıca, tez çalışmasının konusunu oluşturan süneklik kavramı ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Çalışmanın amacı, merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinin lineer olmayan davranışlarının incelenmesi, göçme güvenliklerinin ve süneklik düzeylerinin belirlenmesidir.

İkinci bölümde, yapı sistemlerinin lineer olmayan teoriye göre hesabı ile limit ve göçme yüklerinin bulunması amacıyla geliştirilen ve bu çalışmada esas alınan bir yük

artımı yöntemi ve bu yöntemin pratik uygulamaları amacıyla hazırlanan bilgisayar programı açıklanmıştır.

Yük artımı yönteminin dayandığı varsayımlar, yöntemin esasları ve matematik formülasyonu ile yöntemin uygulanmasında izlenen yol bu bölümde yer almaktadır.

Üçüncü bölüm yapı sistemlerinin lineer olmayan davranışlarının incelenmesine ayrılmıştır. Bu bölümde, çalışmanın konusunu oluşturan merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik taşıyıcı sistemlerin lineer olmayan teoriye göre hesabı ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesine yönelik bilgiler verilmiş, sistem süneklik oranının tanımına ait kriterler tartışılmıştır.

Sistemlerin elastoplastik davranışları göçme güvenliği, ikinci mertebe limit yük, göçme yükü, yatay yük parametresi – yerdeğiştirme bağıntıları ve plastik kesitlerin oluşumu başlıkları altında incelenmiştir.

Dördüncü bölümde merkezi ve dışmerkez çaprazlı çok katlı çelik yapıların pratikteki olası uygulamalarını içerecek şekilde seçilen ve düzlem çerçeve sistemlerden oluşan taşıyıcı sistem modelleri belirlenmiş, bu sistemler ülkemizde yürürlükte olan yönetmeliklere göre boyutlandırılmış, boyutlandırılan sistemlerin elastoplastik davranışları incelenerek göçme güvenlikleri ve süneklik oranları hesaplanmıştır. Bu bölümde ayrıca elde edilen sayısal sonuçlar değerlendirilmiştir.

Beşinci bölüm bu çalışmada varılan sonuçların açıklanmasına ayrılmıştır. Çalışmanın başlıca özellikleri, sayısal sonuçların değerlendirilmesi ve konunun olası genişleme alanları bu bölümde sunulmuştur.

Çalışmanın sayısal incelemelerinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

a- Ülkemizde yürürlükte olan yönetmeliklere göre boyutlandırılan merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemleri, TS4561 yönetmeliği ve diğer ülkelerde yürürlükte olan plastik hesap yönetmeliklerinde öngörülen güvenliğe sahiptir.

b- Merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemleri için, ilk plastik kesitler yatay işletme yükünden sonra oluşmaktadır. Bu sonuç, işletme yükleri altında sistemlerin lineer-elastik davrandığını göstermektedir.

c- İlk plastik kesitler, boyutlandırılan sistemlerin özelliklerine göre, kiriş veya kolonlarda meydana gelmektedir. Buna karşılık, çapraz sistemi büyük ölçüde eğilmeye çalışan elemanlar içeren dışmerkez çaprazlı sistemde (TSM 4) ilk plastik kesitler çapraz sistemini oluşturan elemanlarda meydana gelmiştir.

d- Plastik kesitlerin yapı elemanları üzerindeki dağılımı incelendiğinde, gerek merkezi gerekse dışmerkez çaprazlı sistemlerde, genellikle kirişlerde kolonlara oranla daha fazla plastik kesit olduğu gözlenmektedir. Çapraz sistemi eğilme elemanları içeren TSM 4 te ise, beklenildiği gibi, plastik kesitlerin önemli bir bölümü çapraz sisteminde meydana gelmektedir.

e- Düşey işletme yükleri altında, bağıl yerdeğiştirmenin $\delta/H = 0,005 - 0,010$ değerleri arasında ikinci mertebe limit yüke (P_{L2}) ulaşılmaktadır. Bu değerler, çelik çaprazlı sistemlerde göçme durumuna karşı gelen $\delta/H = 0,02$ sınır yerdeğiştirmesinin altında kalmaktadır.

f- Boyutlandırılan yapı sistemlerinin bağıl ağırlıkları merkezi çapraz sisteminde (*TSM 1*) 1,00 iken *TSM 4* te 0,91 değerini almakta, diğer dışmerkez çaprazlı sistemlerde ise 0,81 – 0,84 arasında değişmektedir. Yapı sistemlerinin ağırlıkları arasındaki temel fark, yapı davranış katsayısının merkezi ve dışmerkez çaprazlı sistemlerde sırasıyla $R = 4$ ve $R = 8$ değerlerini almasından, diğer bir deyişle, sistemlerin süneklik düzeyleri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır.

g- Süneklik oranı, göçmeye neden olan yerdeğiştirmenin lineer sınıra karşı gelen yerdeğiştirmeye oranı olarak tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada, lineer sınıra karşı gelen yerdeğiştirmenin, ikinci mertebe limit yüke ulaşıncaya kadar oluşan plastik kesitlerin yaklaşık %10 unun oluştuğu andaki yerdeğiştirme olduğu varsayılmıştır. Bu yerdeğiştirmenin ise, yaklaşık olarak ikinci mertebe limit yükün %70 ine ulaşıldığı andaki yerdeğiştirme olduğu sayısal incelemelerden görülmektedir. Buna göre, süneklik oranı için

$$\mu = \frac{0,02}{(\delta / H)_{0,7P_{L2}}}$$

bağıntısının kullanılması uygun olmaktadır. Bu bağıntı ile elde edilen sistem süneklik oranları

Merkezi çapraz sistemlerde

TSM 1 için $\mu = 5$

Dışmerkez çapraz sistemlerde

TSM 2, 3, 3a, 5 için $\mu = 6,5 - 8$

TSM 4 için $\mu = 10$

değerlerini almaktadır.

Elde edilen sistem süneklik oranlarının, genel olarak 1998 deprem yönetmeliğinde bu tür yapı sistemleri için öngörülen $R = 4$ ve $R = 8$ deprem yükü azaltma katsayıları ile belirli bir yaklaşıklıkla uyumlu olduğu, çapraz sistemi büyük ölçüde eğilmeye çalışan elemanlar içeren *TSM 4* için ise daha yüksek bir deprem yükü azaltma katsayısının kullanılabileceği görülmektedir.

h- Yük parametresi – yerdeğiştirme bağıntıları incelendiğinde, dışmerkez çaprazlı sistemlerde göçmeden önce meydana gelen plastik şekildeğiştirmelerin merkezi çaprazlı sisteme göre daha büyük değerler aldığı ve göçmenin sünek olduğu görülmektedir. Bu sonuç, dışmerkez çaprazlı sistemlerin merkezi çaprazlı sistemlere göre daha fazla deprem enerjisi tüketebildiğini göstermektedir.

NON-LINEAR BEHAVIOR AND DUCTILITY OF CONCENTRICALLY AND ECCENTRICALLY BRACED STEEL FRAME STRUCTURES

SUMMARY

The safe and economical design of structures in earthquake regions is closely related to the non-linear behavior and ductility of structural systems. Along with the reinforced concrete structures, this is also true for steel constructions which gradually become more popular.

The developments in advanced analysis and design methods, which consider the non-linear behavior of construction materials as well as the effect of geometrical changes on equilibrium equations ($P-\Delta$ effects), enable scientists and engineers to predict the real behavior of reinforced concrete and steel structures under external loads and to determine their collapse safety, more realistically.

Based on these ideas, a research is conducted to study the non-linear behavior of concentrically and eccentrically braced steel frame structures and determine their collapse safety and ductility under earthquake loads. This thesis comprises the basis, details and the results of this research.

The thesis consists of five chapters.

In the first chapter, after introducing the scope and the related works, the objectives and the content of study are explained.

In this chapter, immediate occupancy, damage control and collapse prevention limit states, which are essential for earthquake-resistant design, are studied. The features which structures must have to provide sufficient safety against these limit states, such as rigidity, strength and ductility, are explained in this chapter. The ductility concept is also studied in detail.

The objective of the research is to study the non-linear behavior of concentrically and eccentrically braced steel frame structures and to determine their collapse safety and ductility level.

In the second chapter, a load increments method which is developed to analyze the structural systems according to non-linear theory and to determine their limit and collapse loads is introduced. Also the computer software, used for the practical applications of this method are explained.

This chapter also contains the assumptions of the load increments method as well as the fundamentals, mathematical formulation and the application procedure.

Third chapter is devoted to the study non-linear behavior of structural systems. In this chapter, the results obtained by analyzing the concentrically and eccentrically braced steel frames according to the non-linear theory are evaluated and the criteria related to the system ductility ratio are discussed.

The elastic-plastic behavior of structural systems are studied in terms of the collapse safety, second-order limit load, collapse load, load–deflection diagrams and the plastic section patterns.

In the fourth chapter, sample structural systems, which consist of planar frame systems and represent the possible practical applications of concentrically and eccentrically braced multi-story steel structures, are defined. These sample systems are designed in accordance with the existing code regulations. Collapse safety and ductility ratios are then calculated by studying the elastic-plastic behavior of the structural systems. In this section, the numerical results obtained from these calculations are also evaluated.

The fifth chapter covers the conclusions of the study. The basic features of the study, evaluation of the numerical results and possible extensions of the subject are presented in this chapter.

The results obtained from the numerical analysis of the study are summarized below.

- a- The concentrically and eccentrically braced steel structural systems, which are designed according to the existing code regulations of Turkey, complies with the safety criteria indicated in TS4561 plastic design code and similar codes which are effective in other countries.
- b- For concentrically and eccentrically braced steel structures, the first plastic sections are formed after working loads. This implies that the investigated systems display linear-elastic behavior below working loads.
- c- The first plastic section is formed in either beams or columns, depending on the characteristics of the structural system. On the other hand, in the eccentrically braced system (TSM 4), which has a bracing system containing flexural elements, the first plastic section is formed in the elements of the bracing system.
- d- When the plastic section patterns are studied, it is observed that, more plastic sections are formed in beams than in columns in both concentrically and eccentrically braced systems. In TSM4, which has a bracing system containing flexural elements, most of the plastic sections are formed in the bracing system, as expected.
- e- Under working gravity loads, second-order limit load (P_{L2}) is reached between drift ratios of $\delta/H = 0,005 - 0,010$. These values are below the limiting drift ratio of $\delta/H = 0,02$, which corresponds to the collapse limit state of braced frames.
- f- The relative weight of the structural system is 1,00 in concentrically braced frame (TSM 1), while it is 0,91 in TSM 4. The relative weight changes between 0,81 and 0,84 in other eccentrically braced frame systems. The difference between the weights of the structural systems is due to the fact that structure behavior coefficient

has values of $R=4$ and $R=8$ in concentrically and eccentrically braced frame systems, respectively. In other words, the difference in weight of structures is caused by the difference between their ductility levels.

g- The ductility ratio can be defined as the ratio of deflection that causes the structure to collapse to the deflection that corresponds to the linear-elastic limit. In this study, the deflection which corresponds to the linear-elastic limit is assumed to be the deflection that occurs when 10% of the plastic sections are formed. The results of the numerical analyses indicate that this deflection generally occurs at the 70% of the second-order limit load. Therefore, the following equation can be used for determining the ductility ratio

$$\mu = \frac{0,02}{(\delta / H)_{0,7P_{L2}}}$$

Using this equation, the following values of ductility ratios are obtained for frames under investigation.

In concentrically braced frame system

$$\mu = 5 \quad \text{for} \quad TSM 1$$

In eccentrically braced frame systems

$$\mu = 6,5 - 8 \quad \text{for} \quad TSM 2, 3, 3a \text{ and } 5$$

$$\mu = 10 \quad \text{for} \quad TSM 4$$

It can be seen that, while the calculated system ductility ratios generally conform with the structural behavior factors of $R = 4$ and $R = 8$ which are indicated in 1998 Turkish Seismic Code regulations for these type of structural systems, a higher structural behavior factor can be used for TSM 4, which has a bracing system that contains flexure elements.

h- When load parameter – deflection diagrams are studied, it is observed that plastic deformations that occur before collapse load have greater values for eccentrically braced frame systems than for concentrically braced frame system and therefore the collapse is ductile. This result indicates that eccentrically braced systems consume more seismic energy than concentrically braced systems.

1 GİRİŞ

Deprem bölgelerindeki yapıların yeterli bir güvenlik altında ve ekonomik olarak tasarımı, yapı taşıyıcı sistemlerinin deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışları ve süneklik düzeyleri ile yakından ilgilidir, [1,2]. Bu durum, betonarme yapıların yanında, özellikle son yıllarda yoğun bir şekilde gündeme gelen çelik yapılar için de geçerlidir.

Yapı malzemelerinin orantı sınırından sonraki lineer olmayan davranışını ve geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisini (ikinci mertebe etkisi) gözönüne alan ileri hesap yöntemlerinde meydana gelen gelişmeler, betonarme ve çelik yapı sistemlerinin dış yükler altındaki gerçek davranışlarının daha yakından izlenebilmesine ve göçme güvenliklerinin daha gerçekçi bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamışlardır, [3-5].

Bu hususlar gözönünde tutularak, merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinin deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışlarının incelenmesini, göçme güvenliklerinin ve süneklik düzeylerinin belirlenmesini amaçlayan bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması sözkonusu araştırmanın esaslarını, ayrıntılarını ve sonuçlarını kapsamaktadır.

1.1 Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Sınır Durumlar

Depreme dayanıklı yapı tasarımında, depremden hemen sonra yapının işlevine devam edebilmesi, meydana gelen deprem hasarının sınırlı ve onarılabilir olması, yapı içindekilerin can güvenliğinin sağlanması ve göçmenin önlenmesi şeklinde olmak üzere, değişik sınır durumlara karşı belirli düzeylerde güvenlik sağlanması amaçlanmaktadır, [6,7]. Öngörülen güvenlik düzeyi, yapının önemine, kullanım amacına ve yapıdan beklenen performansa bağlı olarak değişmektedir.

Ülkemizde yürürlükte olan 1998 Deprem Yönetmeliğine [8] ve diğer başlıca deprem yönetmeliklerine [9,10] göre, önem katsayısı $I = 1,00$ olan yapılarda aşağıda açıklanan üç sınır durumun herbirine karşı belirli düzeylerde güvenlik sağlanması öngörülmektedir, [11,12].

a- Kullanılabilirlik sınır durumu

Yapının ömrü boyunca çok sayıda tekrarlanan hafif şiddetteki depremler altında yapı taşıyıcı sisteminde ve yapısal olmayan elemanlarda hasar meydana gelmemeli, böylece yapının işlevini aksatmadan sürdürmesi sağlanmalıdır. Bu koşul, deprem etkileri altında elastik sınırın pek aşılması ve yerdeğiştirmelerin öngörülen sınır değerlerden daha küçük olması ile sağlanabilmektedir.

b- Kontrollü hasar sınır durumu

Tekrarlanma olasılığı daha düşük olan orta şiddetteki depremler altında, yapı taşıyıcı sisteminde ve/veya yapısal olmayan elemanlarda onarılması gereken hasarın meydana gelmesine izin verilebilir. Ancak bu hasarın ekonomik olarak onarılabilir düzeyde kalması gerekmektedir.

c- Göçme kontrolü sınır durumu

Yapının ömrü boyunca ancak bir kere meydana gelebilen çok şiddetli depremler altında ise, yapı taşıyıcı sisteminde ve yapısal olmayan elemanlarda büyük hasar oluşabilir. Bazı hallerde bu büyük hasarın onarılması da ekonomik bakımdan mümkün olmayabilir. Bununla beraber, depreme dayanıklı olarak boyutlandırılan ve inşa edilen bir yapı sisteminin çok şiddetli depremler altında dahi göçmemesi ve can kaybının olmaması gerekmektedir. Bu koşulun sağlanabilmesi için yapı sisteminin yeterli bir dayanıma sahip olması ve göçme yükünden önce yeterli düzeyde elastik olmayan şekil değiştirme yapabilmesi istenir. Böylece, deprem enerjisinin bir bölümünün elastik olmayan şekil değiştirmeler yoluyla tüketilmesi amaçlanmaktadır.

1.2 Depreme Dayanıklı Yapılarda Aranılan Özellikler

Önceki bölümde açıklanan üç sınır duruma karşı öngörülen güvenliğin sağlanabilmesi, yapının yeterli düzeyde rijitlik, dayanım ve süneklik özelliklerine sahip olması ile mümkün olmaktadır. Bu özellikler aşağıda açıklanmıştır.

a- Rijitlik

Düşey ve yatay işletme yükleri altında, yapının yerdeğiştirmeleri lineer-elastik bölgede kalmalı ve sınırlı olmalıdır. Böylece, kullanılabilirlik sınır durumuna karşı belirli bir güvenlik sağlanabilmektedir.

b- Dayanım

Yapının göçme yükü yeterince büyük olmalı, tasarıma esas olan düşey ve yatay hesap yükleri altında bölgesel ve ani göçmeler meydana gelmemeli, ayrıca sistem burkulmamalıdır. Özellikle çok katlı yapılarda, ikinci mertebe etkilerinin yol açtığı stabilite yetersizliği nedeniyle göçme yükü önemli oranda azalabilmektedir. Tasarım sırasında bu etkilerin de hesaba katılması gerekmektedir.

c- Süneklik

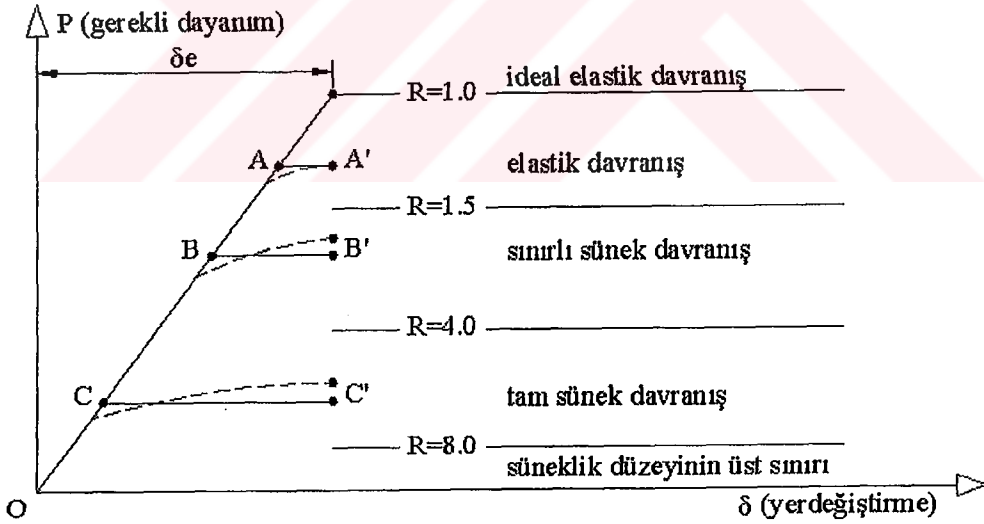
Göçme sırasındaki toplam şekildeğiştirmelerin lineer şekildeğiştirmelere oranı *sistem süneklik oranı* olarak tanımlanmaktadır. Göçmeden önce yapı yeterli düzeyde lineer olmayan şekildeğiştirme yapabilmeli, yani sistem süneklik oranı büyük değerler almalıdır.

Sistem süneklik oranının büyük olması, yüksek şiddetteki depremlerde meydana gelen elastoplastik davranış sırasında yapının tükettiği deprem enerjisinin artmasını, deprem hasarlarının ve ani göçme riskinin azalmasını sağlamaktadır. Görüldüğü üzere, sistem süneklik oranı deprem etkileri altında yapının davranışını belirleyen önemli bir özelliktir. Bu nedenle, modern deprem yönetmeliklerinde sistem süneklik oranına (μ) bağılı olarak bir yapı davranış katsayısı (R) tanımlanmakta ve yapı sisteminin lineer-elastik teoriye göre hesabı ile elde edilen deprem iç kuvvetleri bu davranış katsayısına bölünerek azaltılmaktadır. Bu şekilde, sistemin lineer-elastik sınır ötesindeki davranışı hesaba katılmaya çalışılmaktadır.

Çok katlı çelik yapıların yatay rüzgar ve deprem etkilerine göre tasarımında, çok kere düşey çapraz sistemlerden yararlanılmaktadır. Bu çapraz sistemler, oluşturulan konstrüksiyonun geometrisine göre *merkezi çapraz sistemler* ve *dışmerkez çapraz sistemler* olarak isimlendirilirler. Çelik çerçeveler içine yerleştirilen merkezi çapraz sistemlerde, yatay yükler elemanlardaki eksenel kuvvetler ile karşılanmaktadır. Buna karşılık, çapraz elemanların kiriş ve/veya kolonların orta bölgelerine bağlandığı dışmerkez çapraz sistemlerde ise eğilme etkileri oluşmaktadır. Bu özellik, dışmerkez çapraz sistemlerin daha sünek bir davranış sergilemesine ve oluşan eğilme şekildeğiştirmeleri ile deprem enerjisinin bir bölümünün tüketilmesine neden olmaktadır, [13].

1.3 Yapı Sistemlerinin Süneklik Düzeyine Göre Sınıflandırılması

Tasarımda öngörülen ve elastoplastik hesap sonucunda elde edilen sistem süneklik oranı ve buna bağlı olarak belirlenen yapı davranış katsayısı açısından, yapı sistemleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilirler (Şekil 1.1), [11].



Şekil 1.1 Yapılarda Dayanım - Süneklik İlişkisi

a- Elastik davranan yapılar

Önemleri nedeniyle, bazı yapılar deprem etkileri altında lineer-elastik davranacak şekilde boyutlandırılırlar. Bu tür yapıların yük parametresi – yerdeğiştirme ($P-\delta$) bağıntıları OAA' gibidir ve süneklik düzeyleri çok düşüktür.

b- Sünek davranan yapılar

Elastik davranan yapıların dışında kalan diğer yapılarda lineer-elastik sınırın ötesindeki şekildeğiştirme ve yerdeğiştirmelere izin verilebilir. Lineer olmayan şekildeğiştirmelerin sağladığı süneklik nedeniyle, sözkonusu yapılar lineer-elastik davranışa karşı gelen deprem kuvvetlerinden daha küçük deprem kuvvetlerine karşı koyacak şekilde boyutlandırılırlar.

Deprem etkileri altında sünek davranış sergileyen bir yapı sisteminin süneklik düzeyi, genel olarak malzeme karakteristiklerine, enkesit geometrisine, sistem özelliklerine, hiperstatiklik derecesine ve süneklik düzeyini arttıracak konstrüktif önlemlere bağlı olarak değişmektedir. Bu bakımdan sünek yapılar ikiye ayrılabilir.

b1- Sınırlı sünek yapılar

Bu tür yapıların yük parametresi-yerdeğiştirme bağıntısı OBB' şeklindedir ve 1998 Deprem Yönetmeliğinde [8] öngörülen yapı davranış katsayısı $R = 1,5 - 4$ arasında değişmektedir.

b2 – Tam sünek yapılar

Bu gruba giren yapı sistemleri yüksek bir süneklik düzeyine sahip olacak şekilde boyutlandırılırlar. Artan deprem etkileri altındaki $P-\delta$ bağıntısı şematik olarak OCC' şeklinde olan bu yapılar için, $R = 4 - 8$ arasında değişen bir davranış katsayısı uygulanmaktadır.

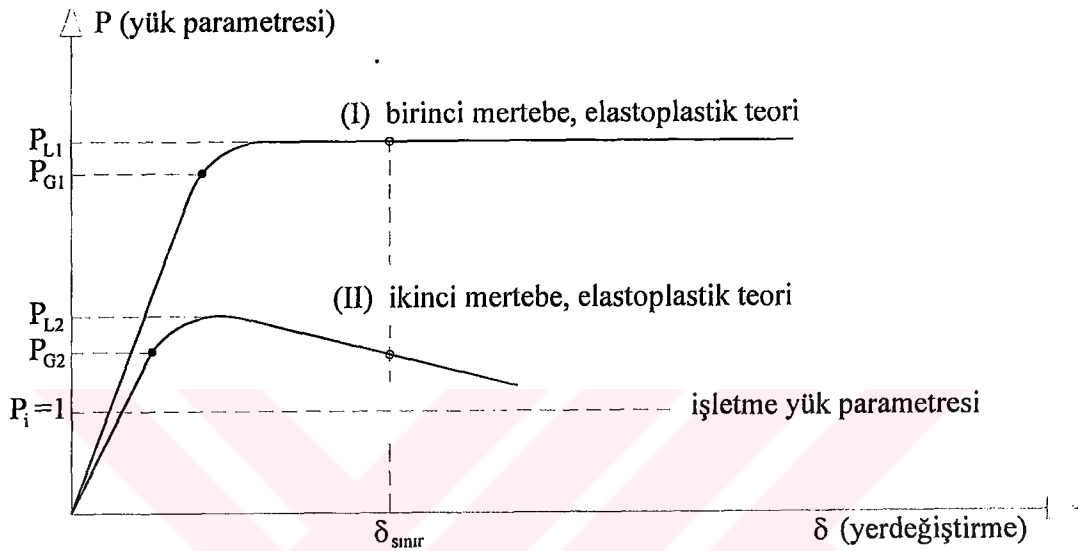
Bir yapı sisteminin gerçek göçme güvenliğinin ve süneklik düzeyinin belirlenebilmesi için uygulanan en gerçekçi yöntemlerden biri, artan dış etkiler altındaki lineer olmayan davranışının incelenmesidir.

1.4 Yapı Sistemlerinin Dış Yükler Altındaki Lineer Olmayan Davranışları

Düşey ve yatay yükler etkisindeki bir yapı sisteminin lineer olmayan teorilere göre hesabı ile elde edilen yük parametresi-yerdeğiştirme ($P-\delta$) bağıntıları Şekil 1.2 de şematik olarak gösterilmişlerdir, [1].

Bir yapı sisteminin dış yükler altındaki davranışının lineer olmaması genel olarak iki nedenden kaynaklanmaktadır.

- a- malzemenin lineer-elastik olmaması nedeniyle iç kuvvet-şekildeğiştirme bağıntılarının (bünye denklemlerinin) lineer olmaması,
- b- geometri değişimlerinin etkisi nedeniyle denge denklemlerinin lineer olmaması.



Şekil 1.2 Yük Parametresi - Yerdeğiştirme (P-δ) Bağıntıları

Malzemenin lineer olmayan davranışının gözönüne alındığı teoriye *elastoplastik teori*, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin gözönüne alındığı teoriye *ikinci mertebe teorisi*, lineerliği bozan her iki etkinin birlikte gözönüne alındığı teoriye ise *ikinci mertebe elastoplastik teori* denilmektedir.

Lineer olmayan malzemeden yapılmış sistemlerde, artan dış yükler altında iç kuvvetler de artarak bazı kesitlerde lineer-elastik sınırı aşmakta ve bu kesitler dolaylarında plastik şekildeğiştirmeler meydana gelmektedir. Yeterli düzeyde süneklik özelliği gösteren yapılarda plastik şekildeğiştirmelerin *plastik kesit* adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde sistemin lineer-elastik davrandığı varsayılabilir. Bu varsayıma dayanan plastik kesit kavramı ile, tek eksenli basit eğilmenin etkin olduğu düzlem sistemlere uygulanabilen *plastik mafsal hipotezi* bileşik iç kuvvet durumunu da içerecek şekilde genişletilmiş olmaktadır.

Plastik kesit kavramının geçerli olduğu varsayılan bir yapı sisteminin birinci merteye teorisine göre elastoplastik hesabı ile elde edilen yük parametresi-yerdeğıştirme ($P-\delta$) bağıntısı Şekil 1.2 de (I) eğrisi ile gösterilmiştir. Bu teoride, oluşan plastik kesitler nedeniyle sistemin bir bölümü veya tümü mekanizma durumuna gelerek taşıma gücü sona ermektedir. Bu duruma karşı gelen yük parametresi *birinci merteye limit yük* (P_{L1}) olarak tanımlanır.

Lineerliğı bozan her iki etkinin birlikte gözönüne alınması halinde, yani yapı sisteminin ikinci merteye elastoplastik teoriye göre hesabı ile elde edilen $P-\delta$ diyagramı Şekil 1.2 de (II) eğrisi ile gösterilmiştir. Görüldüğü gibi bu eğri başlangıçta (I) eğrisine teğet olmakta, daha sonra ikinci merteye etkileri ve bunlara bağılı olarak artan plastik şekildeğıştirmeler nedeniyle yerdeğıştirmeler hızla artmaktadır. Yükler artarak bir P_{L2} sınır değerine eşit olunca, meydana gelen plastik kesitler nedeniyle rijitliğı azalan sistemin burkulma yükü dış yük parametresinin altına düşer, diğeri bir deyişle, $P-\delta$ diyagramında artan yerdeğıştirmelere azalan yük parametreleri karşı gelir. Yapının burkulma nedeniyle taşıma gücünü yitirmesine sebep olan bu yük parametresine *ikinci merteye limit yük* denilmektedir.

Bazı hallerde, dış yükler limit yüke erişmeden önce, meydana gelen büyük yerdeğıştirmeler ve plastik şekildeğıştirmeler yapının göçmesine neden olabilmektedir. Büyük yerdeğıştirme ve şekildeğıştirmelere izin verilen hallerde ise, göçme çok kere limit yükten sonra meydana gelir.

Şekil 1.2 den görüldüğü gibi, ikinci merteye etkilerinin önem kazandığı yapı sistemlerinde bu etkiler nedeniyle limit yük ve sistemin göçme yükü azalmakta ve ikinci merteye teorisine göre hesap yapılması gerekmektedir.

1.5 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, yapı sistemlerinin lineer olmayan teoriye göre hesabı için geliştirilen ileri hesap yöntemlerinin sağladığı olanaklardan yararlanarak, merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinin deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışlarını incelenmesi, göçme güvenliklerinin ve süneklik düzeylerinin belirlenmesidir.

Bu amaca yönelik olarak, merkezi veya dışmerkez çaprazlar içeren çok katlı çelik yapı sistemlerini temsil etmek üzere seçilen taşıyıcı sistem modelleri, ülkemizde yürürlükte olan yönetmeliklere göre boyutlandırılmışlardır. Daha sonra, boyutlandırılan yapı sistemleri düşey işletme yükleri altında, eşdeğer statik kuvvetler ile temsil edilen ve monoton artan yatay deprem etkileri için, malzeme ve geometri değişimleri bakımından lineer olmayan teoriye göre hesaplanarak elastoplastik davranışları ayrıntılı olarak incelenmiş, göçme yükleri ve süneklik oranları belirlenmiştir.

Tezin sunuluşunda izlenen yol şu aşamalardan oluşmaktadır :

- a- yapı sistemlerinin lineer olmayan teoriye göre hesabı ve göçme yüklerinin bulunması amacıyla geliştirilen ve bu çalışmada esas alınan bir yük artımı yönteminin ve bu yöntemin pratik uygulamaları amacıyla hazırlanan bilgisayar programının açıklanması,
- b- yük artımı yönteminin uygulanması ile elde edilen sonuçlara dayanarak, yapı sistemlerinin lineer olmayan davranışlarının çeşitli yönleri ile incelenmesi,
- c- merkezi ve dışmerkez çaprazlı çok katlı çelik yapıların pratikteki olası uygulamalarını içerecek şekilde seçilen ve düzlem sistemlerden oluşan taşıyıcı sistem modellerinin (*TSM*) belirlenmesi, bu sistemlerin ülkemizde geçerli olan yönetmeliklere göre boyutlandırılması, boyutlandırılan sistemlerin elastoplastik davranışlarını inceleyerek göçme güvenliklerinin ve süneklik oranlarının belirlenmesi,
- d- sayısal sonuçların değerlendirilmesi ve önerilerin oluşturulması.

Aşağıdaki bölümlerde bu aşamalar ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

2 YAPI SİSTEMLERİNİN LİNEER OLMAYAN TEORİYE GÖRE HESABI VE İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKÜN BULUNMASI İÇİN BİR YÜK ARTIMI YÖNTEMİ

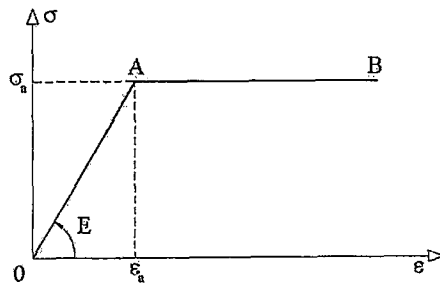
Bu bölümde, düzlem ve uzay çubuk sistemlerin lineer olmayan teoriye göre hesabı ve ikinci mertebe limit yüklerinin bulunması amacıyla geliştirilen bir yük artımı yönteminin dayandığı varsayımlar, yöntemin esasları, akma koşulları, yöntemin matematik formülasyonu ve uygulanmasında izlenen yol açıklanacaktır, [3,4]. Ayrıca geliştirilen yöntemin pratik uygulamaları için hazırlanan ve bu çalışma kapsamında kullanılan bir bilgisayar programı hakkında bilgi verilecektir, [14].

2.1 Varsayımlar

- a- Bernoulli-Navier hipotezi geçerlidir. Bu hipoteze göre, düzlem kesitler şekildeğiştirdikten sonra da düzlem kalırlar.
- b- Malzeme ideal elastoplastiktir. Bu tür malzemede gerilme-şekildeğiştirme (σ - ϵ) diyagramı, σ_a akma gerilmesini, ϵ_a ise ona karşı gelen birim boydeğişmesini göstermek üzere

$$\begin{aligned} 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_a & \quad \text{için} \quad \sigma = E \epsilon \\ \epsilon > \epsilon_a & \quad \text{için} \quad \sigma = \sigma_a \end{aligned}$$

şeklinde iki doğru parçasından oluşmaktadır, Şekil 2.1.



Şekil 2.1 İdeal Elastoplastik Malzemede Gerilme-Şekildeğiştirme (σ - ϵ) Bağıntısı

c- Lineer olmayan eğilme ve uzama şekildeğiştirmelerinin *plastik kesit* adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışında kalan b6lgelerde ise sistemin lineer-elastik davrandığı varsayılmaktadır. B6ylece, tek eksenli basit eğilmenin etkin olduğu sistemlere uygulanabilen *plastik mafsal hipotezi*, iki eksenli eğilme momentleri ve eksenel kuvvetten oluşan bileşik iç kuvvet durumunu da kapsayacak şekilde genişletilmiş olmaktadır.

d- Akma koşulları eğilme momentlerine ve normal kuvvete bağlıdır. Kesme kuvvetlerinin ve burulma momentinin akma koşuluna etkisi terkedilmektedir. Ayrıca akma koşullarının, akma y6zeyinin d6zlem parçalarından oluşacak şekilde idealleştirilmesi ile elde edilebileceği varsayılmıştır.

e- İkinci mertebe teorisi uygulanmaktadır. Bu teoriye g6re, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi hesaba katılmakta, geometrik uygunluk koşullarına etkisi terkedilmektedir.

f- Sistemin şekildeğiştirmesi sırasında dış y6klerin doğrultuları değişmemektedir.

g- Sistemi oluşturan çubuklar doğru eksenli, sabit enkesitlidir ve normal kuvvet çubuk boyunca sabittir. Bu koşulların sağlanmadığı çubuklar doğru eksenli, sabit enkesitli olan ve normal kuvveti sabit varsayılabilen yeter derecede k66k parçalara ayrılarak idealleştirilebilir. B6ylece, gerçek sistemin 6zelliklerini yaklaşık olarak sağlayan bir sistem 6zerinde hesap yapılabilir.

2.2 Y6ntemin Esasları

Tek eksenli basit eğilme etkisindeki sistemlere uygulanabilen klasik plastik mafsal hipotezine dayanan elastoplastik hesap y6ntemlerinde ikinci mertebe etkilerinin ve bileşik iç kuvvet durumunun g6z6n6ne alınması istendiğinde, problemin lineer olmamasından kaynaklanan şu durumlarla karşılaşılmaktadır.

a- Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi nedeniyle s6perpozisyon prensibi geçerli olmadığından, birbirini izleyen iki plastik kesitin oluşumu arasında sistemin davranışı lineer değildir. Bu nedenle, her plastik kesitin meydana geldiği yatay y6k parametresi ancak ardışık yaklaşım ile hesaplanabilmekte veya y6klere çok k66k artımlar verilerek hesap yapılması gerekmektedir.

b- Her plastik kesitin oluşumundan sonra, bu kesitin sonlu plastik şekildeğiştirme yapabilme özelliği nedeniyle, sistemin rijitliği ve dolayısıyla dış yükler altındaki davranışı değişmektedir. Bu durumda, sisteme ait denklem takımının her adımında yeniden kurulması ve çözümü gerekmektedir. Bu ise, ikinci mertebe limit yükten önce meydana gelen plastik kesitlerin sayısına bağlı olarak, hesapların uzamasına neden olmaktadır.

c- Bileşik iç kuvvet durumu gözönüne alındığında, artan yüklerle birlikte plastik kesitlerdeki iç kuvvetler de sürekli olarak değişmektedir. Dolayısıyla bu kesitlerdeki iç kuvvetlerin, her yük artımı için, ardışık yaklaşımla yeniden hesaplanması gerekmektedir.

Bu çalışmada, uzay çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yüke ait yatay yük parametresinin ve yapıların göçme güvenliklerinin belirlenebilmesi amacıyla geliştirilen bir yük artımı yönteminden yararlanılmıştır. Bu yöntemde, düşey yükler kendileri için öngörülen bir güvenlik katsayısı ile çarpılarak sisteme etkilildikten sonra, aralarındaki oran sabit kalacak şekilde artan yatay yükler için hesap yapılarak ikinci mertebe limit yüke ait yatay yük parametresi ve göçme güvenlik katsayısı belirlenmektedir.

Sisteme etkileyen düşey yüklerin bilinmesi halinde, çubuklardaki normal kuvvetler başlangıçta kolaylıkla tahmin edilebilmekte ve bu normal kuvvetler için hesaplanan ikinci mertebe rijitlik ve yükleme matrislerinden yararlanarak ikinci mertebe etkileri lineerleştirilebilmektedir. Böylece her plastik kesitin meydana geldiği yatay yük parametresinin hesabı için ardışık yaklaşım yapılmasına gerek kalmamaktadır.

Hesap sonucunda bulunan normal kuvvetlerin başlangıçta tahmin edilen değerlerden çok farklı olduğu ve bu farkın sonuçları önemli oranda etkilemesinin beklendiği durumlarda, son adımdaki normal kuvvetler esas alınarak hesap tekrarlanabilir. Ancak normal kuvvetler büyük ölçüde denge denklemlerine bağlı olduklarından, düşey yüklerin toplamı sabit kaldığı sürece, özellikle çok katlı düzlem ve uzay çerçeve sistemlerde genellikle hesabın tekrarlanmasına gerek kalmamaktadır.

Yöntemin uygulanmasında, yapı sistemi ardışık yük artımları için hesaplanmaktadır. Her yük artımı, herhangi bir kesitteki iç kuvvet durumunun akma koşulunun

belirlediği sınır duruma erişmesi halinde, diğer bir deyişle, bir plastik kesitin oluşumu ile sona erer.

Sisteme etkiyen dış yükler arttıkça, plastik kesitlerdeki iç kuvvetler akma koşullarını sağlayacak şekilde değişebilmekte, buna karşılık iç kuvvetler doğrultularında sonlu plastik şekildeğiştirmeler meydana gelmektedir. Bir plastik kesitteki sonlu plastik şekildeğiştirme bileşenleri, akma vektörünün akma yüzeyine dik olması özelliği nedeniyle, tek bir plastik şekildeğiştirme bileşenine bağlı olarak ifade edilebilmektedir.

Geliştirilen yük artımı yönteminde, her plastik kesitin oluşumundan sonra o kesitteki bağımsız plastik şekildeğiştirme bileşeninin ilave bilinmeyen olarak alınması ve iç kuvvet durumunun akma yüzeyi üzerinde kaldığını ifade eden yeni bir denklemin denklem takımına eklenmesi öngörülmektedir. Ayrıca, akma yüzeyinin düzlemlerden oluşacak şekilde idealleştirilmesi suretiyle, ilave edilen denklemin lineer olması sağlanabilmektedir.

Bir önceki adıma ait denklem takımı indirgenmiş olduğundan, sözkonusu yük artımına ait çözüm sadece yeni bilinmeyene ait denklemin indirgenmesi ile elde edilebilmektedir.

Görüldüğü gibi, esasları yukarıda açıklanan yük artımı yöntemi ile, malzeme ve geometri değişimi bakımından lineer olmayan düzlem ve uzay çubuk sistemlerin yatay yük parametresi-yerdeğiştirme bağıntılarının tayini ve ikinci mertebe limit yüklerinin hesabı, plastik kesitlerdeki bağımsız plastik şekildeğiştirme bileşenlerini de içeren bir genişletilmiş denklem sisteminin kurulmasına ve bu denklem sistemi ile alt sistemlerinin çözümüne indirgenmiş olmaktadır.

Artan yükler altındaki sistemlerde genellikle pek karşılaşılacakla birlikte, bir plastik kesitteki iç kuvvet durumunun yön değiştirerek akma yüzeyinin iç bölgesine yönelmesi söz konusu olabilir. Bu durumda, söz konusu kesitte yeni bir plastik şekildeğiştirme bilinmeyeninin tanımlanması ve bunun önceki plastik şekildeğiştirme bilinmeyenine eksi işaretle eşit olduğunu ifade eden yeni bir denklemin denklem takımına eklenmesi yeterli olmaktadır.

Bu çalışmanın sayısal incelemelerinde karşılaşıldığı gibi, sistemde yalnız eksenel kuvvet etkisinde olan çubukların (örneğin iki ucu mafsallı çubuklar) bulunması halinde iki farklı durum söz konusu olmaktadır.

a- Eksenel kuvvetin çekme olması veya basınç kuvveti altındaki elemanların bölgesel burkulmalarının söz konusu olmaması halinde, özel bir işleme gerek kalmaksızın hesap yapılabilir. Çünkü bu tür çubuklarda yalnız eksenel doğrultuda plastik şekil değiştirmeler meydana gelmekte ve bunların bilinmeyen olarak alınması yeterli olmaktadır.

b- Buna karşılık eksenel basınç etkisindeki çubukların burkulmasının mümkün olduğu durumlarda, dış yük parametresinin artan değerleri için, burkulan çubuğun sistem rijitlik matrisine etkisinin ortadan kaldırılmasını sağlayan özel bir işlemin uygulanması gerekir.

2.3 Akma Koşulları

İdeal elastoplastik malzemeden yapılmış çubuklardan oluşan sistemlerde, bir kesitteki iç kuvvetler artarak akma koşulunun belirlediği sınır duruma erişince kesitin taşıma kapasitesi sona erer ve iç kuvvetler doğrultularında sonlu plastik şekil değiştirmeler meydana gelir.

Uzay çubuk sistemlerde akma koşulu, genel olarak altı adet iç kuvvet bileşeni cinsinden

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

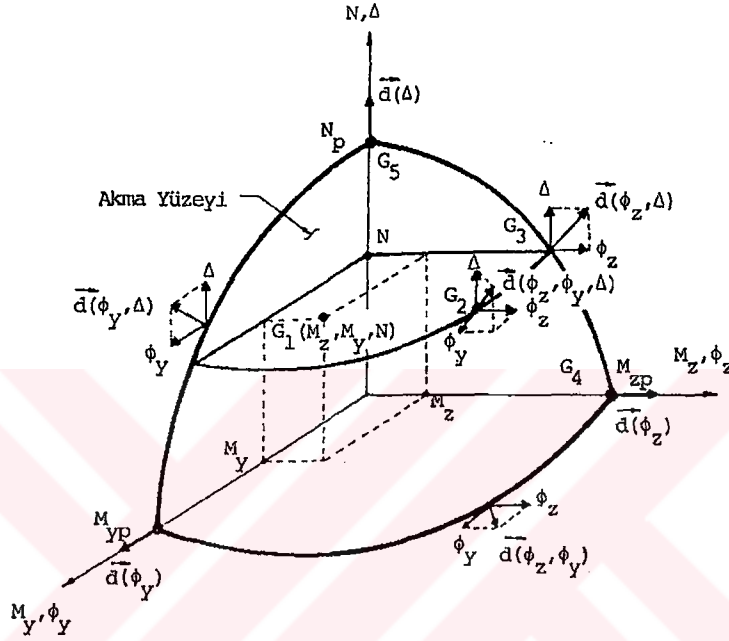
şeklinde ifade edilebilir.

Bu akma koşulundaki iç kuvvetlerden bazıları, modellenen sistemin özelliklerine ve sisteme etkiyen dış yüklerin şekline bağlı olarak, terkedilebilir mertebede olabilir. Örneğin, uygulamada çok karşılaşıldığı gibi, M_x burulma momentinin ve T_y, T_z kesme kuvvetlerinin akma koşuluna etkileri terkedilirse, (2.1) denklemi

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

şeklini alır. Burada M_y ve M_z sırasıyla y ve z eksenleri etrafındaki eğilme momentlerini, N normal kuvveti ve $K (M_y, M_z, N)$ ise kesitin şekline ve malzeme karakteristiklerine bağlı olarak belirlenen lineer olmayan bir fonksiyonu göstermektedir.

(2.2) akma koşulunun belirlediği üç boyutlu akma yüzeyinin, her üç iç kuvvetin de pozitif olduğu bölgeye ait bölümü Şekil 2.2 de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Akma Yüzeyi ve Akma Vektörü

Şekildeki dik koordinat sisteminde, bir iç kuvvet durumu $G (M_y, M_z, N)$ noktası ile temsil edilmektedir. Lineer olmayan şekildeğişirmelerin plastik kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde sistemin lineer-elastik davrandığı kabul edildiğinden, akma yüzeyi içindeki bir iç kuvvet durumu için (G_1 noktası) şekildeğişirmeler lineer-elastiktir. İç kuvvet durumu akma yüzeyi üzerine gelince (G_2 noktası) kesit plastikleşir ve iç kuvvet doğrultularında sonlu plastik şekildeğişirmeler meydana gelebilir.

İç kuvvet durumu akma yüzeyi üzerindeki bir G_2 noktasına geldikten sonra, değişen dış etkiler altında bu nokta akma yüzeyi üzerinde hareket edebilir veya yüzeyin içine doğru yönelebilir; fakat akma yüzeyinin dışına çıkamaz.

Bir plastik kesitteki iç kuvvet durumunun akma yüzeyi üzerinde kalma özelliği

$$dK = \frac{\partial K}{\partial M_y} dM_y + \frac{\partial K}{\partial M_z} dM_z + \frac{\partial K}{\partial N} dN = 0 \quad (2.3)$$

bağıntısı ile ifade edilir.

Verilen bir iç kuvvet durumu için, plastik kesitte toplandığı varsayılan plastik şekildeğiştirmeler $\vec{d}(\phi_y, \phi_z, \Delta)$ akma vektörü ile tanımlanırlar. Akma vektörüne ait ϕ_y , ϕ_z , Δ bileşenleri sırasıyla M_y , M_z eğilme momentleri ve N normal kuvveti doğrultularındaki sonlu plastik şekildeğiştirmeleri göstermektedirler.

İdeal elastoplastik malzemeden yapılmış sistemlerde, $\vec{d}$ akma vektörünün akma yüzeyine dik olduğu bilinmektedir, [15] [16]. Diklik özelliği nedeniyle akma vektörünün bileşenleri

$$\phi_y = \mu \frac{\partial K}{\partial M_y}, \quad \phi_z = \mu \frac{\partial K}{\partial M_z}, \quad \Delta = \mu \frac{\partial K}{\partial N} \quad (2.4)$$

şeklinde, tek bir parametreye bağlı olarak ifade edilebilirler. Buradaki μ parametresi akma vektörünün şiddetini belirlemektedir.

İdeal elastoplastik malzemeden yapılmış kesitlerde akma yüzeyinin düzlem parçalarından oluşacak şekilde idealleştirilmesi halinde, (2.2) akma koşulu için yaklaşık olarak

$$K(M_y, M_z, N) = A_1 M_y + A_2 M_z + A_3 N + B = 0 \quad (2.5)$$

lineer bağıntısı yazılabilir. Bu bağıntıdaki A_1 , A_2 , A_3 ve B katsayıları malzeme ve enkesit karakteristiklerine göre bağlı olarak belirlenirler.

Akma koşulunun (2.5) lineer bağıntısı ile idealleştirilmesi halinde, iç kuvvet durumunun akma yüzeyi üzerinde kalma özelliği

$$\Delta K = A_1 \Delta M_y + A_2 \Delta M_z + A_3 \Delta N = 0 \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir.

Ayrıca, ϕ_y, ϕ_z, Δ plastik şekildeğiştirme bileşenleri için

$$\begin{aligned}\phi_y &= \mu A_1 \\ \phi_z &= \mu A_2 = \frac{A_2}{A_1} \phi_y \\ \Delta &= \mu A_3 = \frac{A_3}{A_1} \phi_y\end{aligned}\tag{2.7}$$

yazılabilir. Böylece akma vektörünün bileşenleri tek bir ϕ_y bağımsız plastik şekildeğiştirme bileşenine bağlı olarak ifade edilebilmektedir.

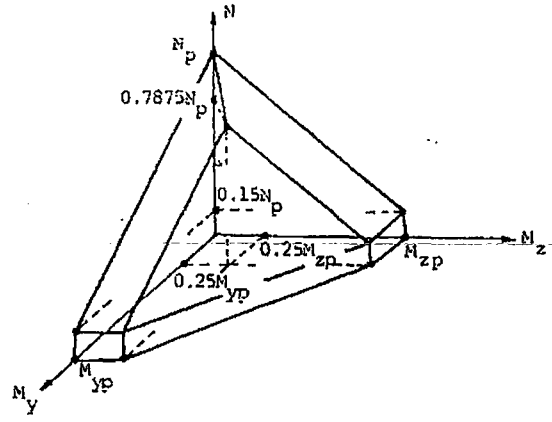
ϕ_y bağımsız plastik şekildeğiştirme bileşeninin birim değeri için, yani $\mu A_1 = 1$ iken

$$\phi_y = 1 \quad , \quad \phi_z = \frac{A_2}{A_1} \quad , \quad \Delta = \frac{A_3}{A_1}\tag{2.8}$$

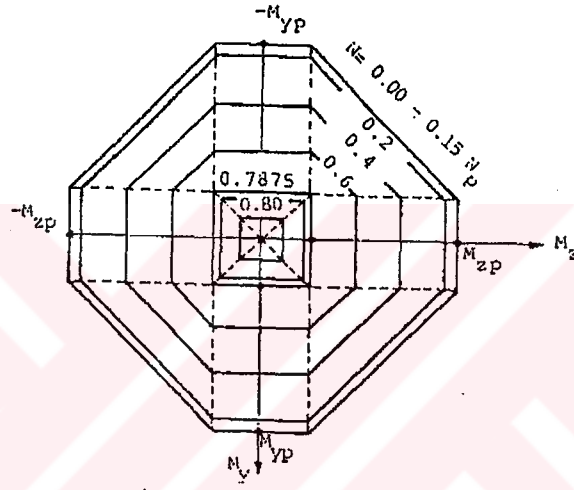
olmaktadır.

Bilindiği gibi, akma koşulları malzeme özelliklerine ve kesit şekline bağlı olarak elde edilmektedirler. Bu çalışmada I ve benzeri kesitli çubuklarda $K(M_y, M_z, N) = 0$ akma koşulu ile elde edilen akma yüzeyinin (2.5) bağıntısına göre lineerleştirilmesi esasına dayanan idealleştirilmiş bir akma yüzeyinden yararlanılmaktadır. Kullanılan akma yüzeyi, bu yüzeyin $N - M_y, N - M_z$ düzlemleri ile ara kesitleri ve $M_y - M_z$ düzlemi üzerindeki izdüşümü Şekil 2.3 te gösterilmişlerdir.

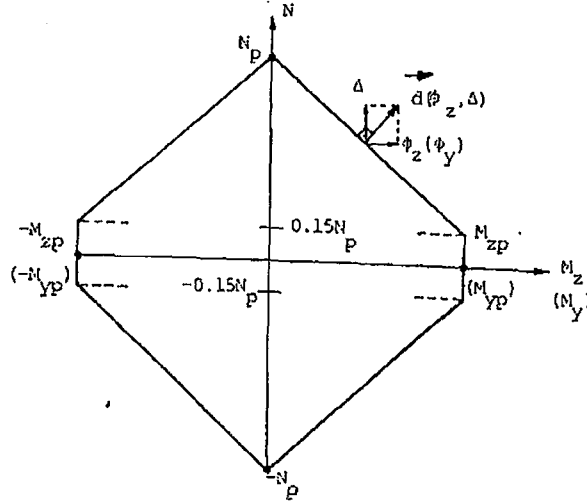
Düzlem çubuk sistemlerde aynı tür kesitler için kullanılmakta olan lineerleştirilmiş akma koşulu diyagramına benzer olarak, bu çalışmada esas alınan akma yüzeyinde de $|N| \leq 0,15 \times N_p$ bölgesinde normal kuvvetin akma koşuluna etkisi terkedilmektedir. Diğer taraftan Şekil 2.3 ten görüldüğü gibi, $|N| \leq 0,7875 \times N_p$ olduğu durumlarda ise, $|M_y / M_{yp}| \leq 0,25$ için M_y nin, $|M_z / M_{zp}| \leq 0,25$ için M_z nin akma koşuluna etkileri terkedilebilmektedir.



İdealleştirilmiş Akma Yüzeyi



Akma Yüzeyinin (M_y - M_z) Düzlemi Üzerindeki İzdüşümü



Akma Yüzeyinin (N - M_z), (N - M_y) Düzlemleri İle Kesiti

Şekil 2.3 İdealleştirilmiş Akma Yüzeyi

2.4 Yöntemin Matematik Formülasyonu

Yukarıdaki bölümlerde açıklandığı gibi, uygulanan yük artımı yönteminin her adımında, plastik kesitler içeren sistemin bir yük artımı için hesabı gerekmektedir.

Sistemin hesabı için Matris Yerdeğiştirme Yönteminden yararlanılmıştır, [17]. Bu yöntemde, plastik kesitleri gözönüne alacak şekilde gerekli düzenlemeler yapıldığında, bilinmeyenler iki gruptan oluşurlar.

- a- Düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri.
- b- Oluşan plastik kesitlerdeki lineer olmayan şekildeğiştirmeleri ifade eden bağımsız şekildeğiştirme bileşenleri.

Bu bilinmeyenleri hesaplamak amacıyla yazılan denklemler de iki grupta toplanabilirler.

- a- Düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri doğrultularındaki moment ve izdüşüm denge denklemleri.
- b- Plastik kesitlerdeki iç kuvvet durumlarının akma koşullarını sağladığını ifade eden akma koşulu denklemleri.

Görüldüğü gibi, bilinmeyenlerin ve denklemlerin sayıları birbirine eşittir.

2.4.1 Denge Denklemleri

Düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri doğrultularında yazılan moment ve izdüşüm denge denklemlerinin matris gösterimi

$$[S_{dd}][d] + [S_{d\phi}][\phi] + [p_0] = [q] \quad (2.9)$$

şeklindedir. Bu denklemlerdeki matrisler aşağıda tanımlanmışlardır.

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

$[P_0]$: düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken, çubuklara etkiyen dış yüklerden oluşan uç kuvvetleri kolon matrisi,

$[q]$: düğüm noktalarına etkiyen dış yüklere ait kolon matristir.

Sistemdeki düğüm noktalarının sayısı n ile gösterildiğinde, $[d]$, $[P_0]$ ve $[q]$ kolon matrisleri uzay sistemlerde $6n$, düzlem sistemlerde ise $3n$ boyutundadırlar.

$[S_{dd}]$: üzerinde plastik kesitler bulunmayan sisteme ait rijitlik matrisidir.

$[S_{dd}]$ matrisi uzay sistemlerde $6n \times 6n$, düzlem sistemlerde $3n \times 3n$ boyutundadır ve *Betti karşılıklı teoremi* uyarınca esas köşegenine göre simetriktir. Bu matrisin $(S_{dd})_{\alpha\beta}$ elemanı, dış yükler sıfır iken, $d_\beta = 1$ birim yerdeğiştirme bileşeninden oluşan p_α uç kuvvetini göstermektedir.

İkinci mertebe teorisine göre hesapta $[S]_{dd}$ ve $[P_0]$ matrislerinin elemanları, çubukların

$$\alpha_y = l \sqrt{\frac{|N|}{EI_y}}, \quad \alpha_z = l \sqrt{\frac{|N|}{EI_z}} \quad (2.10)$$

büyükliklerine bağlı olarak hesaplanırlar, [18]. Burada N aksenal basınç kuvvetini, l çubuk boyunu, EI_y ve EI_z çubuk eğilme rijitliklerini göstermektedir.

$[\phi]$: plastik kesitlerdeki bilinmeyen plastik şekildeğiştirme bileşenlerinden oluşan bir kolon matristir.

Sistemdeki plastik kesitlerin sayısı m ile gösterilirse, bu matris

$$[\phi] = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ . \\ . \\ \phi_m \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

şeklindedir.

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

$[S_{d\phi}] =$

1	2	.	k	.	.	m	
			0				1
			0				2
			0				.
			$[p_{\phi k}]_{ix}$				i
			0				.
			0				.
			$[p_{\phi k}]_{jx}$				j
			0				.
			0				.
			0				n

Şekil 2.4 $[S_{d\phi}]$ Matrisinin Elemanları

Düzlem sistemlerde $3n \times m$, uzay sistemlerde $6n \times m$ boyutunda olan bu matrisin k sayılı kolonu, dış yüksüz sistemde düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken, ij çubuğu üzerindeki k sayılı plastik kesitte

$$\phi_{yk} = 1 \quad , \quad \phi_{zk} = \frac{A_2}{A_1} \quad , \quad \Delta = \frac{A_3}{A_1}$$

diğeri tüm plastik kesitlerde

$$\phi_y = \phi_z = \Delta = 0$$

olması durumunda, sistem eksen takımındaki $[p_{\phi k}]_{ix}, [p_{\phi k}]_{jx}$ çubuk uç kuvvetleri matrislerinden oluşmaktadır, Şekil 2.4.

$[p_{\phi k}]_{ix}, [p_{\phi k}]_{jx}$ uç kuvvetleri matrislerinin birim plastik şekildeğiştirmelere bağılı olarak elde edilişı [3-5] te verilmiştir.

2.4.2 Plastik Kesitlerdeki Akma Koşulları

Plastik kesitlerdeki akma koşulları, bir yük artımı sırasında plastik kesitlerdeki iç kuvvet durumlarının akma yüzeyi üzerinde kaldığını ifade eden bağıntılardır.

Yukarıda (2.6) denklemi ile verilen bu özellik tüm sistem için matris formunda yazılırsa

$$[S_{\phi d}] [d] + [S_{\phi \phi}] [\phi] + [p_{\phi 0}] = [0] \quad (2.12)$$

şeklini alır. Burada

$[S_{\phi d}]$: dış yüksüz sistemde plastik şekildeğiştirmeler sıfır iken, yalnız düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden dolayı plastik kesitlerde oluşan iç kuvvetlerin akma koşuluna etkisini içeren bir matristir.

Bu matris düzlem sistemlerde $m \times 3n$, uzay sistemlerde $m \times 6n$ boyutundadır. Betti karşılık teoremi uyarınca, $[S_{\phi d}]$ ve $[S_{d\phi}]$ matrisleri arasında

$$[S_{\phi d}] = [S_{d\phi}]^T \quad (2.13)$$

bağıntısı bulunmaktadır.

$[S_{\phi \phi}]$: $m \times m$ boyutunda bir matristir.

Bu matrisin k sayılı kolonu, dış yüksüz sistemde düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri sıfır iken, k sayılı plastik kesitteki birim plastik şekildeğiştirmelerden dolayı tüm plastik kesitlerdeki

$$\Delta M_y + \frac{A_2}{A_1} \Delta M_z + \frac{A_3}{A_1} \Delta N$$

iç kuvvet değişimlerini göstermektedir.

Betti karşılıklı teoremine göre $[S_{\phi\phi}]$ matrisi de esas köşegenine göre simetriktir. Ayrıca, sistemi oluşturan çubukların herbirinde birden fazla plastik kesit bulunmadığı sürece, $[S_{\phi\phi}]$ matrisinin sadece esas köşegeni üzerindeki terimleri sıfırdan farklıdır.

$[P_{\phi 0}]$: m elemanlı bir kolon matristir.

Bu matrisin $(p_{\phi 0})_k$ sayılı elemanı, düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri ve plastik şekildeğiştirme bileşenleri sıfır iken, k sayılı plastik kesitin bulunduğu çubuk üzerindeki dış yüklerden dolayı bu kesitteki

$$(p_{\phi 0})_k = \left(\Delta M_y + \frac{A_2}{A_1} \Delta M_z + \frac{A_3}{A_1} \Delta N \right)_k \quad (2.14)$$

iç kuvvet değişimlerinden oluşur.

Yukarıda açıklanan denge denklemleri ve akma koşulları birarada yazıldığında, sisteme ait genişletilmiş denklem takımı

$$\begin{bmatrix} [S_{dd}] & [S_{d\phi}] \\ [S_{\phi d}] & [S_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [d] \\ [\phi] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [p_0] \\ [p_{\phi 0}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [q] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

şeklinde elde edilir.

Bu denklemin katsayılar matrisi, m sayıda plastik kesit içeren düzlem çubuk sistemlerde $3n + m$, uzay çubuk sistemlerde ise $6n + m$ mertebesinde.

2.4.3 Genişletilmiş Denklem Takımının Oluşturulması, Çözümü ve Bilinmeyenlerin Elde Edilmesi

Uygulanan yük artımı yönteminin herhangi bir adımı sonunda, sistemde k sayılı plastik kesitin oluşumundan sonra, $\Delta P_{k+1} = 1$ yük artımı için yeni sisteme ait denklem takımının yeniden kurulup çözülmesine gerek yoktur. Bunun yerine, son plastik kesitin oluşumundan sonra, o kesitteki plastik şekildeğiştirmeleri ifade eden

bir ϕ_k bilinmeyi tanımlanır ve bu bilinmeye ait yeni kolon ve satır bir önceki adıma ait denklem takımına eklenerek genişletilmiş denklem takımı elde edilir.

Bir önceki yük artımına ait çözüm elde edilirken denklem takımının katsayılar ve sabitler matrisleri indirgenmiş olduğundan, genişletilmiş denklem takımının çözümü için sadece ilave kolon ve satırın indirgenmesi yeterli olmaktadır.

2.4.4 Uç Kuvvetlerinin ve İç Kuvvetlerin Hesabı

Herhangibir yük artımında (2.15) denklem takımı çözülerek $[d]$ ve $[\phi]$ bilinmeyen matrisleri hesaplandıktan sonra, bu bilinmeyenlere bağlı olarak sistem eksen takımındaki çubuk uç kuvvetleri matrisleri

$$[p]_{ix} = [k]_{ixix} [d]_{ix} + [k]_{ixjx} [d]_{jx} + [p_0]_{ix} + [p_\phi]_{ix} [\phi]_{ij} \quad (2.16)$$

$$[p]_{jx} = [k]_{jxix} [d]_{ix} + [k]_{jxjx} [d]_{jx} + [p_0]_{jx} + [p_\phi]_{jx} [\phi]_{ij}$$

bağıntıları ile tayin edilirler. Burada,

$[p_\phi]_{ix}$: ij çubuğunda oluşan plastik kesitlere ait $[p_{\phi k}]_{ix}$ kolon matrislerinin yanyana yazılması ile elde edilen dikdörtgen matrisi,

$[p_\phi]_{jx}$: ij çubuğunda oluşan plastik kesitlere ait $[p_{\phi k}]_{jx}$ kolon matrislerinin yanyana yazılması ile elde edilen dikdörtgen matrisi,

$[\phi]_{ij}$: ij çubuğu üzerindeki plastik kesitlere ait ϕ_k bilinmeyenlerinin değerlerinin alt alta yazılması ile elde edilen bir kolon matrisi göstermektedir.

ij çubuğunda tek bir plastik kesitin oluşması halinde $[p_\phi]_{ix}$ ve $[p_\phi]_{jx}$ matrisleri kolon matrise dönüşmekte ve $[\phi]_{ij}$ matrisi tek bir ϕ_k elemanından meydana gelmektedir. Üzerinde plastik kesit bulunmayan çubuklarda $[p_\phi]_{ix}, [p_\phi]_{jx}, [\phi]_{ij}$ matrisleri sıfır olduğundan, bu çubukların sistem eksen takımındaki uç kuvvetleri matrisleri

$$\begin{aligned}
[p]_{ix} &= [k]_{ixix} [d]_{ix} + [k]_{ixjx} [d]_{jx} + [p_0]_{ix} \\
[p]_{jx} &= [k]_{jxix} [d]_{ix} + [k]_{jxjx} [d]_{jx} + [p_0]_{jx}
\end{aligned}
\tag{2.16a}$$

bağıntıları ile tayin edilirler.

Çubuk eksen takımındaki uç kuvvetleri matrisleri ise, $[T]$ dönüştürme matrisini göstermek üzere,

$$\begin{aligned}
[p]_i &= [T]^T [p]_{ix} \\
[p]_j &= [T]^T [p]_{jx}
\end{aligned}
\tag{2.17}$$

ifadeleri ile elde edilirler.

ij çubuğunun herhangi bir kesitindeki kesit zorları uç kuvvetlerine ve çubuk üzerindeki dış yüklere bağlı olarak denge denklemleri ile belirlenirler.

2.4.5 Plastik Kesitin ve Yük Parametresinin Belirlenmesi

Sistemdeki bütün çubukların uç kuvvetleri ve kesit zorları hesaplandıktan sonra, bir sonraki adıma ait $(k+1)$ sayılı plastik kesitin yeri ve bunu meydana getiren yük parametresi belirlenir. Bunun için sistemde plastik kesit oluşabilecek bütün kritik kesitlerde akma koşulları yazılarak bu kesitlerin plastikleşmesi için gerekli olan ΔP_{k+1} yük artımları hesaplanır. Elde edilen değerlerden en küçüğü $(k+1)$ sayılı plastik kesitin oluşmasını sağlayan ΔP_{k+1} yük artımını, bu yük artımının elde edildiği nokta ise plastik kesitin yerini verir.

2.5 Hesapta İzlenen Yol

Önceki bölümlerde açıklanan yük artımı yöntemi ile, sabit düşey yükler ve artan yatay yükler etkisindeki merkezi veya dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinin limit yükleri ile göçme yüklerinin hesabında ve süneklik düzeylerinin belirlenmesinde izlenen yol şu adımlardan oluşmaktadır.

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

2. Düşey hesap yükleri altında sistem lineer teoriye göre çözülerek çubuk normal kuvvetleri hesaplanır veya büyük ölçüde denge denklemlerine bağlı olan normal kuvvetler doğrudan doğruya denge denklemleri ile tahmin edilir.

Tahmin edilen normal kuvvetlere bağlı olarak, ikinci mertebe teorisine ait çubuk rijitlik ve yükleme matrisleri hesaplanır.

3. Sistem düşey yük parametresinin birim değeri için ikinci mertebe teorisine göre hesaplanarak çubuk uç kuvvetleri ve kritik kesitlerdeki iç kuvvetler bulunur. Kritik kesitlerdeki iç kuvvet durumları akma koşulunun belirlediği sınır durumlarla karşılaştırılarak ilk plastik kesitin oluşacağı düşey yük parametresi tayin edilir. Bu değer düşey işletme yüklerinden daha büyük ise, sistemde düşey yüklerden dolayı plastik kesit meydana gelmediği anlaşılır ve yatay yükler için hesaba geçilir. Aksi halde, düşey yük parametresi düşey işletme yüklerine eşit oluncaya kadar, düşey yüklerden meydana gelen her plastik kesit için 5-9 sayılı adımlarda verilen işlemler tekrarlanarak uygulanır. Sistemin düşey yükler altında hesabı tamamlandıktan sonra yatay yükler için hesaba geçilir.

4. Sistem yatay yük parametresinin birim değeri için hesaplanır. Bunun için, yatay yüklerden oluşan $[p_0]$ ve $[q]$ matrisleri ile, varsa plastik kesitlere ait $[p_{\phi_0}]$ matrisleri hesaplanarak denklem takımındaki yerlerine yazılır. Bir önceki adımda indirgenmiş olan katsayılar matrisinden yararlanarak sadece bu matrisler indirgenir. Denklem takımı çözülerek bilinmeyenler tayin edildikten sonra, Bölüm 2.4.4 te açıklandığı gibi, çubuk uç kuvvetleri ve iç kuvvetler hesaplanır. Tüm kritik kesitlerdeki iç kuvvet durumları akma koşullarının belirlediği sınır durumlarla karşılaştırılarak bir sonraki adıma ait plastik kesitin yeri ve buna karşı gelen yatay yük parametresi bulunur.

5. Yeni oluşan k sayılı plastik kesitteki ϕ_k plastik şekildeğiştirme parametresi ek bilinmeyen olarak alınır ve bu bilinmeyene bağlı olarak oluşturulan bir kolon ile plastik kesitteki iç kuvvet durumunun akma koşulunu sağladığını ifade eden bir satır önceki adıma ait indirgenmiş denklem takımına ilave edilir. Sadece yeni eklenen satır ve kolon indirgenir.

6. Denklem takımına ait katsayılar matrisinin determinant değeri hesaplanır. Bu değer sıfır veya negatif ise, yani

$$\det[S] \leq 0$$

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

7. Denklem takımı çözülerek birim yük artımından oluşan $[d]$ ve $[\phi]$ bilinmeyenleri ile çubuk uç kuvvetleri ve iç kuvvetler bulunur.

8. Dördüncü adımda açıklanan işlemler benzer şekilde uygulanarak, $k+1$ sayılı plastik kesitin oluştuğu toplam yük parametresi hesaplanır. Bu yüklerden meydana gelen toplam yerdeğiştirmeler, plastik şekildeğiştirmeler, çubuk uç kuvvetleri ve iç kuvvetler elde edilir.

9. Sistemin başlıca yerdeğiştirmeleri, rölatif yerdeğiştirmeler, plastik kesitlerdeki şekildeğiştirmeler kendilerine ait sınır değerlerle karşılaştırılır. Bu büyüklüklerden herhangi birinin kendisine ait sınır değere eşit olması halinde göçme yüküne (P_G) ulaşıldığı anlaşılır ve hesaba son verilir.

10. Limit yük veya göçme yükü elde edilinceye kadar, 5-9 sayılı adımlarda açıklanan işlemler tekrarlanır.

Hesap sonunda elde edilen normal kuvvetlere bağlı olarak belirlenen ikinci mertebe çubuk rijitlik ve yükleme matrislerinin başlangıçta esas alınan değerlerinden farklı olması ve bu farkın sonucu etkileyecek mertebede olması halinde, bu büyüklükler esas alınarak hesap tekrarlanabilir.

11. İncelenen yapı sisteminde, her plastik kesitin oluşumuna karşı gelen yatay yük parametreleri (P) ve rölatif yerdeğiştirmeler (δ/H) esas alınarak, artan yatay yükler altındaki $P - \delta/H$ diyagramı elde edilir. Bu diyagram yardımı ile ve Bölüm 3 te açıklanan kriterler çerçevesinden sistemin süneklik düzeyi belirlenir.

2.6 Bilgisayar Programları

Önceki bölümlerde esasları ve ayrıntıları açıklanan yük artımı yönteminin sayısal uygulamaları için hazırlanan EPASS programı ile, sabit düşey yükler ve artan yatay yükler etkisindeki çelik yapı sistemlerinin ikinci mertebe elastoplastik hesabı yapılmakta ve lineer olmayan davranışları incelenerek göçme güvenlikleri belirlenmektedir, [14].

Programda plastik kesitlerin oluşumunu izleyen bir yük artımı yöntemi uygulandığından, giriş bilgileri içinde verilen bir anahtar değişken yardımı ile, hesabın ara adımlarına ait sonuçlar elde edilebilmekte ve böylece yapının artan yükler altındaki davranışı ayrıntılı olarak incelenebilmektedir.

Programın giriş bilgileri arasında

- a- programın çalışma düzenini ve çıkış bilgilerinin kapsamını belirleyen kontrol değişkenleri
- b- yapının geometrik özellikleri ve mesnetlenme koşulları
- c- düşey hesap yükleri ile yatay işletme yükleri
- d- çubukların enkesit bilgileri
- e- malzeme karakteristikleri

bulunmaktadır.

Çıkış bilgileri ise şu şekilde düzenlenmiştir.

- a- göçme yükü parametresi
- b- göçme yüküne karşı gelen iç kuvvetler, yerdeğiştirmeler, plastik kesitler ve bu kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme bileşenleri
- c- her plastik kesitin oluşumuna karşı gelen iç kuvvetler, yerdeğiştirmeler ve plastik şekildeğiştirmeler.

Bu çalışmada, lineer olmayan teoriye göre hesap yapan **EPASS** bilgisayar programı, merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik düzlem çerçevelerin elastoplastik davranışlarının belirlenmesi için kullanılmıştır. Modelleme esnasında karşılaşılan bazı özel durumlar ve alınan önlemler şunlardır.

a- İki ucu mafsallı olan çubuklar modellenirken, çubukların enkesit bilgilerinde eğilme rijitlikleri sıfır olarak tanıtılmıştır. Böylece çubukların iki ucu mafsallı olarak davranması sağlanmaktadır.

b- Basınç etkisi altındaki çubuklarda, çubuğun bölgesel burkulması daha kritik olabileceğinden, böyle bir durumla karşılaşılması halinde, çubuğun sistem rijitlik matrisine katkısı ortadan kaldırılarak hesaba devam edilebilmektedir.



3 YAPI SİSTEMLERİNDE LİNEER OLMAYAN DAVRANIŞIN İNCELENMESİ

Bu bölümde, yapı sistemlerinin düşey yükler ve deprem etkileri altında elastoplastik analizi ile elde edilen sonuçların yorumlanması üzerinde durulacaktır. Analiz sonuçları özel olarak bu çalışmanın kapsamındaki *merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik taşıyıcı sistemler* için değerlendirilecek, ayrıca yapı sistemlerinde süneklik oranının tanımı tartışılacak ve bir öneri geliştirilecektir.

Yapı sistemlerinin elastoplastik davranışlarını temsil eden başlıca özellikler göçme güvenliği, yük parametresi – yerdeğiştirme diyagramları ve plastik kesitlerin oluşumudur.

3.1 Göçme Güvenliğinin Belirlenmesi

Bir yapı sisteminin dış yükler altındaki lineer olmayan davranışının en belirgin göstergesi bu yüklere karşı sağlanan göçme güvenliğidir. Göçme güvenliği, yapı sisteminin göçmesine neden olan dış yüklerin kendilerine ait nominal değerlere (işletme yükleri) oranı ile elde edilir.

Göçme, taşıyıcı sistemin ve dış yüklerin özelliklerine bağlı olarak aşağıdaki nedenlerden biri ile meydana gelebilir. Bunlar

- a- sistemin tümünün veya bir bölümünün mekanizma durumuna gelmesi,
- b- sistemin tümünün burkulması veya bölgesel burkulma oluşması,
- c- plastik kesitlerde oluşan sonlu plastik şekildeğiştirmelerin kendilerine ait sınır değerleri (dönme kapasitesi vb.) aşması,
- d- sistemde büyük yerdeğiştirmelerin meydana gelmesidir.

Aşağıdaki bölümlerde önce sistemin burkularak göçmesine neden olan ikinci mertebe limit yükün, daha sonra da göçme yükünün nasıl hesaplanacağı açıklanacaktır.

3.1.1 İkinci Mertebe Limit Yükün Hesabı

İkinci mertebe etkilerinin gözönüne alındığı bir yapı sisteminde, dış yükler artarak ikinci mertebe limit yüke (P_{L2}) erişince sistem burkularak göçer.

Burkulma, plastik kesitlerin sayısının artması ile rijitliği giderek azalan sistemin kritik yükünün dış yük parametresinin altına düşmesi ile meydana gelir. Bu durumda sistemin katsayılar matrisinin determinant değeri sıfır veya sıfırdan küçük olmakta ve $P - \delta$ diyagramında artan yerdeğiştirmelere azalan yük parametreleri karşı gelmektedir.

Bu tanım gözönünde tutularak ikinci mertebe limit yük iki şekilde belirlenebilir.

a- Yük artımı yönteminin her adımında sistemin katsayılar matrisinin determinant değeri hesaplanır. İndirgenmiş katsayılar matrisinin esas köşegeni üzerindeki elemanların dışındaki tüm elemanlar sıfır olacağı için, bu matrisin esas köşegeni üzerindeki sayıların çarpımı determinant değerini vermektedir. Bu değer

$$\det[S] \leq 0$$

ise sistemin burkulduğu anlaşılır ve bu yük artımından önceki toplam yük parametresi P_{L2} olarak anılır.

b- Her yük artımında hesaplanan yerdeğiştirme bileşenleri önceki adımdaki toplam değerleri ile karşılaştırılır. Artan yüklere karşılık, yerdeğiştirme büyüklüklerinin bir önceki adımdaki değerlerle ters işaretli olması, artan yerdeğiştirmelere azalan yatay yük parametresinin karşı geldiğini, yani sistemin burkulduğunu ifade eder. Bu durumdan önceki yük artımına ait toplam yük parametresi P_{L2} değerini verir.

İkinci mertebe etkilerinin gözönüne alınmadığı taşıyıcı sistemlerde, sistem burkulmadan önce mekanizma durumuna gelerek göçebilir. Bu duruma karşı gelen yüke (P_{LI}) birinci mertebe limit yük denilmektedir.

Sistemin bir bölümünün veya tamamının mekanizma durumuna gelmesi halinde de

$$\det[S] \leq 0$$

olacağından, birinci mertebe limit yük benzer şekilde hesaplanabilir.

3.1.2 Göçme Yükünün Hesabı

Bazı hallerde sistem burkulmadan önce işletme dışı kalarak göçebilir. Buna plastik kesitlerdeki büyük plastik şekildeğiştirmeler ve sistemin büyük yerdeğiştirmeleri neden olabilir. Böyle durumlarda, ikinci mertebe limit yükten daha küçük olan göçme yükünün hesabı gerekmektedir.

Göçme yükünün tayini için, her yük artımı sonunda hesaplanan yerdeğiştirmelerin ve plastik şekildeğiştirmelerin kendilerine ait sınır değerleri aşıp aşmadıkları kontrol edilir. Uygulanan yük artımı yönteminde, düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinin yanında plastik kesitlerdeki sonlu plastik şekildeğiştirmeler de bilinmeyen olarak alınıp denklem takımının çözümünden elde edildiklerinden, bunların ayrıca hesaplanmalarına gerek kalmamaktadır.

Taşıyıcı sistemin burkulmasından veya mekanizma durumuna gelmesinden önce yukarıdaki sınır durumlardan birinin meydana gelmesi halinde, o duruma ait toplam yük parametresi göçme yükü (P_G) olarak alınır.

3.2 Yatay Yük Parametresi – Yerdeğiştirme Bağlıları

Dış yükler ile bu yüklerden oluşan yerdeğiştirmeler arasındaki bağıntılar, yapı sistemlerinin artan yükler altındaki davranışını ifade ederler. Bu çalışmada

Düşey yük parametresi (DYP) : düşey yüklerin bu yüklere ait işletme yükü değerine oranı

Yatay yük parametresi (YYP) : yatay yüklerin bu yüklere ait işletme yükü değerine oranı

Bağıl yerdeğiştirme (δ / H) : toplam yatay yerdeğiştirmenin yapı yükseklğine oranı

şeklinde tanımlanmaktadır.

Sabit düşey yükler ve monoton olarak artan yatay yükler etkisindeki yapı sistemlerinde, ikinci mertebe elastoplastik teoriye ait yatay yük parametresi – bağıl yatay yerdeğiştirme ($YYP - \delta / H$) diyagramları genel olarak üç farklı bölgeden oluşmaktadır.

a- Birinci bölge, taşıyıcı sistemin sabit düşey yükler ve artan yatay yükler altında lineer-elastik davrandığı bölgedir. İkinci mertebe etkilerinin lineerleştirilmesi halinde, bu bölgede YYP ve δ / H arasındaki bağıntı doğrusaldır.

b- İkinci bölge, taşıyıcı sistemde lineer olmayan şekildeğiştirmelerin toplandığı varsayılan plastik kesitlerin oluşmaya başladığı bölgedir. Bu bölgede, plastik kesitlerin oluşumu ile birlikte sistemin rijitliği azalmaya başlar. İkinci bölge yük parametresinin ikinci mertebe limit yüke eşit olması ile sona erer.

c- Üçüncü bölge sistemin burkulma sonrası davranışını ifade etmektedir. İkinci mertebe limit yükten sonra sistemin katsayılar matrisinin değeri negatif olduğundan, bu bölgede artan yerdeğiştirmelere azalan yük parametreleri karşı gelir, [19]. Göçmenin burkulmadan önce oluşmadığı durumlarda, bu bölge göçme yüküne ve ona karşı gelen yerdeğiştirmeye kadar devam eder.

Bu çalışmada, yatay yük parametresi – bağıl yerdeğiştirme ($YYP - \delta / H$) diyagramları düşey yük parametresinin $DYP = 1,000$ ve $DYP = 1,500$ değerleri için ayrı ayrı elde edilerek Ek B de toplu olarak verilmiştir. Böylece, merkezi ve dışmerkez çaprazlı sistemlerde farklı düşey yük seviyelerindeki lineer olmayan davranışların incelenmesi ve göçme güvenliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

3.3 Plastik Kesitlerin Oluşumu

Yapı çeliği gibi sünek malzemeden yapılan sistemlerde plastik şekildeğiştirmelerin plastik kesit adı verilen belirli noktalarda toplandığı, bunların dışında kalan bölgelerde ise sistemin lineer elastik davrandığı kabul edilmektedir. Bu hipotezin geçerli olduğu bir yapı sistemi, artan dış yükler altında oluşan plastik kesitlerden dolayı mekanizma durumuna gelir veya stabilite yetersizliği nedeniyle burkularak göçer.

Çok katlı çelik bir yapı sisteminin elastoplastik özelliklerinin ve sünekliğinin, deprem ve rüzgar gibi dinamik dış etkiler altındaki davranışının değerlendirilmesinde plastik kesitlerin oluşumuna ait bazı bilgiler önem kazanmaktadır. Bunların başlıcaları

- a- göçmeden önce meydana gelen plastik kesitlerin toplam sayısı,
- b- plastik kesitlerin kolonlara, kirişlere ve çapraz sistemine dağılımı,
- c- plastik kesitlerin yapı yüksekliği boyunca dağılımı,
- d- kirişler, kolonlar ve çapraz sistemlerindeki ilk plastik kesitlerin oluştukları yük parametreleri,
- e- göçmeden önce oluşan son plastik kesitin yeridir.

Bu değerlendirmenin yapılmasına olanak sağlamak amacıyla hazırlanan tablolar Bölüm 4 te, plastik kesitlerin sistem üzerindeki dağılımını gösteren şemalar ise Ek 3 te toplu olarak verilmişlerdir.

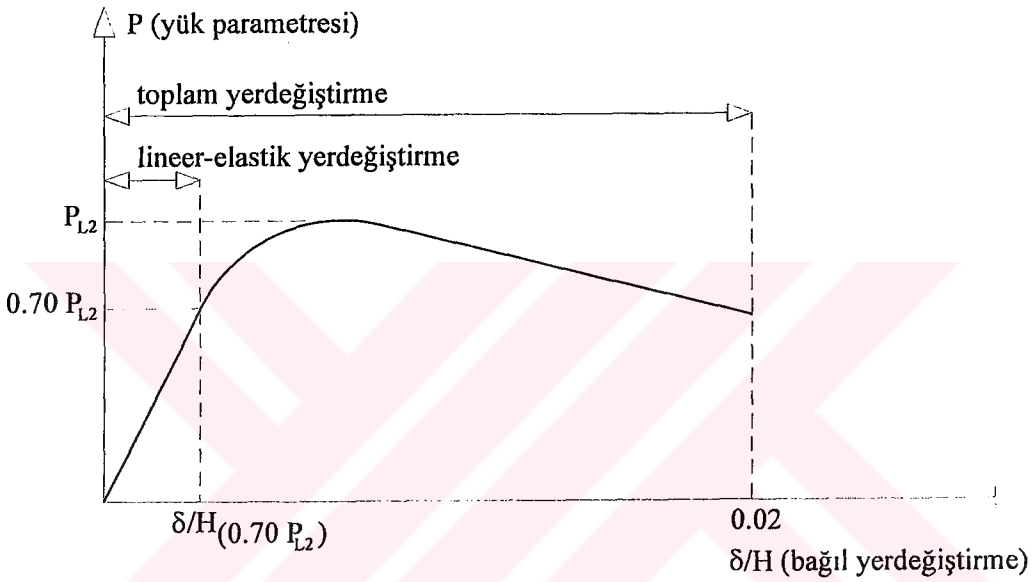
3.4 Yapı Sistemlerinde Süneklik Düzeyinin Belirlenmesi

Yapı sistemlerinin süneklik düzeyini belirleyen başlıca parametre süneklik oranıdır. Süneklik oranı genel olarak, göçmeye neden olan yerdeğiştirmenin lineer sınıra karşı gelen yerdeğiştirmeye oranı olarak tanımlanmaktadır. Çaprazlı yapı sistemlerinde göçmeye ait bağıl yerdeğiştirme için $\delta/H = 0,02$ sınır değeri esas alınmaktadır, [6]. Diğer taraftan bu çalışmada, lineer sınıra karşı gelen yerdeğiştirmenin, ikinci mertebe limit yüke ulaşıncaya kadar meydana gelen plastik kesitlerin yaklaşık %10 unun

oluştugu andaki yerdeğiştirme olduğu varsayılmıştır. Bu yerdeğiştirmenin ise, yaklaşık olarak ikinci mertebe limit yükün %70 ine ulaşıldığı andaki yerdeğiştirme olduğu sayısal incelemelerden görölmektedir. Bu hususlar gözönünde tutularak, merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinde süneklik oranı için

$$\mu = \frac{0,02}{(\delta / H)_{0,7 P_{L2}}} \quad (3.1)$$

bağıntısının kullanılması önerilmektedir, Şekil 3.1.



Şekil 3.1 Süneklik Oranının Belirlenmesi

Bu çalışmada ayrıca, incelenen taşıyıcı sistem modellerinin süneklik düzeylerinin farklı kriterlere göre değerlendirilmesini sağlamak amacıyla beş ayrı süneklik oranı tanımını daha yapılmıştır. Bunlar

- i- ikinci mertebe limit yüke karşı gelen toplam yerdeğiştirmenin, ilk plastik kesitin oluştuğu durumdaki yerdeğiştirmeye oranı
- ii- göçmeyi belirleyen $\delta / H = 0,02$ yerdeğiştirmenin, ilk plastik kesitin oluştuğu durumdaki yerdeğiştirmeye oranı
- iii- ikinci mertebe limit yüke karşı gelen toplam yerdeğiştirmenin, bu yükün %70 değerinde meydana gelen yerdeğiştirmeye oranı

iv- $\delta / H = 0,02$ yerdeşiştirmenin, ikinci mertebe limit yk düzeyindeki lineer yerdeşiştirmeye oranı

v- ikinci mertebe limit yüke karşı gelen toplam yerdeşiştirmenin, bu yükten oluşan lineer yerdeşiştirmeye oranı.

Tüm taşıyıcı sistem modelleri için bu kriterlere göre belirlenen sistem süneklik oranları Bölüm 4 te verilerek karşılaştırılmıştır.



4 MERKEZİ VE DIŞMERKEZ ÇAPRAZLI SİSTEMLER ÜZERİNDE SAYISAL İNCELEMELER

Bu bölümde, çerçeveler ile merkezi veya dışmerkez çaprazlardan oluşan çok katlı, uzay çelik yapı sistemleri içinde yeralan, merkezi veya dışmerkez çaprazlı düzlem çerçevelerinin deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışları ve süneklik düzeyleri sayısal olarak incelenecektir.

Bu amaçla, merkezi ve dışmerkez çaprazlı çok katlı çelik yapı sistemlerini temsil etmek üzere, biri merkezi çaprazlı, dördü dışmerkez çaprazlı olan düzlemsel çelik taşıyıcı sistemler seçilmiştir. Araştırmanın sayısal uygulamalarına esas olan bu örnek yapı sistemlerine taşıyıcı sistem modelleri (*TSM*) adı verilecektir.

İncelenen taşıyıcı sistem modellerinin lineer olmayan davranışlarının ve süneklik düzeylerinin karşılaştırılmasında daha sağlıklı bir sonuca varmak amacıyla, çaprazlarının yerleşimi dışında kalan tüm sistem özellikleri aynı seçilmiştir.

4.1 Taşıyıcı Sistem Modellerinin Seçimi ve Ortak Özellikleri

Taşıyıcı sistem modellerine ilişkin ortak özellikler aşağıda sıralanmıştır.

- a- Altı katlı olan düzlem çerçevelerin kat yüksekliği 3,50 m, toplam yüksekliği 21,00 m dir.
- b- Sistemler üç açıklıklı ve toplam $3 \times 5,00 = 15,00$ m genişliktedir.
- c- Her iki doğrultudaki düzlem çerçevelerden oluşan sistemde çerçeve aralığı 5,00 m dir. Ancak, döşeme yüklerinin her iki doğrultudaki çerçevelere dağıtılması nedeniyle, çerçevelerin düşey yük alanı 2,50 m genişliktedir.
- d- Üç açıklıktan sadece orta açıklıkta çapraz sistemi bulunmaktadır.

e- Kenar akslardaki kolonlar, iki ucu mafsallı çubuk olarak alınmışlardır. Böylece, yatay yüklerin tamamının çaprazlı olan orta açıklık tarafından karşılanması sağlanmıştır.

f- Yapı yükleri ve ilave yükler

yapı yükleri, çatıda	: 0,400 t/m ²
normal katlarda	: 0,350 t/m ²
ilave yükler, çatıda	: 0,200 t/m ²
normal katlarda	: 0,350 t/m ² (bölme duvar yükleri dahil)
çatıda parapet yükleri	: 0,200 t/m
normal katlarda dış duvar yükleri	: 0,400 t/m

g- Bölgenin ve yapının depremselliğine ilişkin özellikler

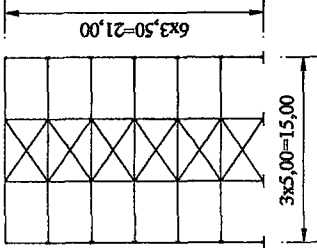
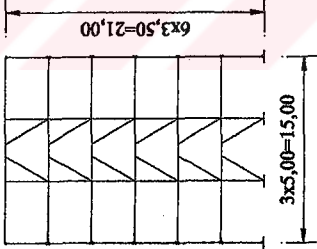
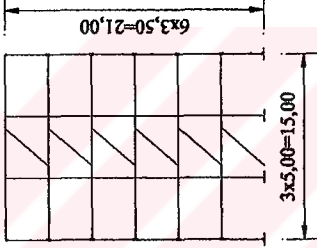
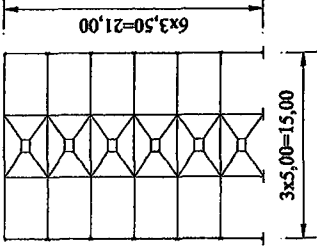
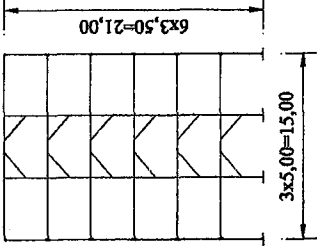
etkin yer ivmesi katsayısı	: $A_0 = 0,40$
yerel zemin sınıfı	: Z2 ($T_A = 0,15$ sn, $T_B = 0,40$ sn)
yapı önem katsayısı	: $I = 1,00$
hareketli yük katılım katsayıları, çatıda	: $n = 0,30$
normal katlarda	: $n = 0,60$

h- Kullanılan yapı çeliğinin sınıfı ve akma dayanımı

$$\text{Fe37 yapı çeliği, } \sigma_a = 2400 \text{ kg/cm}^2$$

Yukarıda belirtilen esaslara göre seçilen taşıyıcı sistem modelleri ve geometrik boyutları Şekil 4.1 de gösterilmiştir.

Taşıyıcı sistem modelleri, bir tanesi merkezi çaprazlı (TSM 1), dört tanesi dışmerkez çaprazlı (TSM 2, 3, 4, 5) olmak üzere toplam beş adet çelik çerçeve sistemden oluşmaktadır.

MERKEZİ ÇAPRAZLI	 TSM 1
DIŞMERKEZ ÇAPRAZLI	 TSM 2  TSM 3  TSM 4  TSM 5

Şekil 4. 1 Taşıyıcı Sistem Modelleri ve Geometrik Özellikleri

4.2 Taşıyıcı Sistem Modellerinin Boyutlandırılması

Bu çalışmada, merkezi ve dışmerkez çaprazlı çok katlı çelik yapıların pratikteki olası uygulamalarını temsil etmek üzere, Bölüm 4.1 de açıklandığı şekilde seçilen taşıyıcı sistem modelleri ülkemizde yürürlükte olan yönetmeliklere göre boyutlandırılmakta ve boyutlandırılan sistemlerin kiriş, kolon enkesitleri ile diğer özellikleri elde edilmektedir.

Aşağıda, taşıyıcı sistem modellerinin boyutlandırılmasında gözönünde tutulan varsayımlar ve boyutlandırmaya esas alınan yönetmelikler kısaca açıklanacaktır.

4.2.1 Varsayımlar

- a- Boyutlandırmaya esas olan sistem hesaplarında malzemenin lineer-elastik olduğu gözönünde tutulmakta, ikinci mertebe etkileri ise ilgili yönetmeliğin öngördüğü şekilde burkulma ve moment büyütme katsayıları ile hesaba katılmaktadır.
- b- Tüm kirişler ve düğüm noktalarına rijit olarak bağlanan kolonlar, enkesitlerinin gövde levhası düzlemi çerçeve düzlemi içinde bulunacak şekilde düzenlenmişlerdir. Kirişlerin ve kolonların I kesitli, çapraz sistemi çubuklarının ise U profillerden oluşan kutu kesitli elemanlar olduğu gözönünde tutulmuştur.
- c- Dış akstaki kolonlar ve merkezi çapraz sistemindeki çaprazlar hariç olmak üzere, çerçevelerin düğüm noktalarının rijit, mesnetlerinin temele ankastre oldukları varsayılmaktadır.
- d- Düzlem çerçeve olarak modellenen sistemlerin çerçeve düzlemi dışındaki yanal yerdeğiştirmelerinin önlenmesi varsayılmakta ve çerçeve düzlemi dışındaki kolon burkulma boyları kolon boyuna eşit olarak alınmaktadır.
- e- Kirişlerin yanal burkulması döşeme sistemi tarafından önlenmektedir.
- f- Kiriş-döşeme sisteminin kompozit davranışı hesaba katılmamıştır.

g- Döşeme yüklerinin, çerçeve düzlemine dik doğrultudaki ikincil kirişler aracılığı ile çerçeve kirişlerine aktarıldığı gözönünde tutulmaktadır. Dış duvar ve çatı parapeti yükleri ise, düzlem çerçevelerde dış düğüm noktasına etkiyen tekil kuvvetlerle temsil edilmişlerdir.

h- Deprem kuvvetleri, kat düzlemlerine etkiyen tekil yatay kuvvetler şeklinde idealleştirilmektedir.

4.2.2 Boyutlandırmada Esas Alınan Yönetmelikler

Seçilen taşıyıcı sistem modellerinin deprem hesapları 1998 deprem yönetmeliği [8] esaslarına uygun olarak yapılmış, çelik elemanların boyutlandırılmasında ise ülkemizde yürürlükte olan TS 648 çelik yapılar yönetmeliğine [20] uyulmuştur.

Bu yönetmeliklerin esasları aşağıda özetlenmiştir.

a- 1998 Deprem Yönetmeliği

Eşdeğer deprem yükü yönteminin uygulandığı bir yapı sistemine etkiyen taban kesme kuvveti (toplam eşdeğer deprem yükü)

$$V_t = \frac{A_0 \times I \times S(T)}{R_a(T)} W \quad (4.1)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda kullanılan simgeler aşağıda açıklanmıştır.

A_0 : etkin yer ivmesi katsayısı

I : yapı önem katsayısı

$S(T)$: spektrum katsayısı

$$S(T) = 1 + 1,5 T/T_A \quad (0 \leq T \leq T_A)$$

$$S(T) = 2,5 \quad (T_A < T \leq T_B)$$

$$S(T) = 2,5 (T_B/T)^{0,8} \quad (T > T_B)$$

T : bina doğal titreşim periyodu (sn)

T_A, T_B : spektrum karakteristik periyotları (sn)

$R_a(T)$: deprem yükü azaltma katsayısı

$$R_a(T) = 1,5 + (R-1,5) T/T_A \quad (0 \leq T \leq T_A)$$

$$R_a(T) = R \quad (T > T_A)$$

R : taşıyıcı sistem davranış katsayısı

$$R = 4 \quad (\text{merkezi çaprazlı çelik çerçeveler})$$

$$R = 8 \quad (\text{dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler})$$

W : etkin yapı ağırlığı ($W = G + nQ$)

n : hareketli yük katılım katsayısı

b- TS 648 Çelik Yapılar Yönetmeliği

TS 648 Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları standardına [20] göre, eğilme momenti ve eksenel kuvvet etkisinde bulunan bir kirişte gerilme kontrolü

$$\frac{\sigma_{eb}}{0,60 \times \sigma_a} + \frac{\sigma_b}{\sigma_B} \leq 1,00 \quad (4.2)$$

formülü ile yapılır. Bu formülde

σ_{eb} : yalnız eksenel kuvvet etkisi altında hesaplanan gerilmeyi,

σ_b : yalnız eğilme momenti etkisi altında hesaplanan gerilmeyi,

σ_a : yapı çeliğinin akma gerilmesini,

σ_B : yalnız eğilme momenti etkisi altında izin verilen gerilmeyi
(eğilme güvenlik gerilmesi)

göstermektedir.

Kirişin yanal burkulmasının döşeme sistemi veya stabilite bağlantıları yardımı ile önleildiği hallerde, eğilme güvenlik gerilmesi

$$\sigma_B = 0,60 \times \sigma_a$$

değerini almaktadır.

Dışmerkez basınç kuvveti veya eksenel basınç kuvveti ile beraber M_x ve/veya M_y eğilme momentleri etkisindeki bir kolonda, burkulmalı ve burkulmasız gerilme kontrolleri

$$\frac{\sigma_{eb}}{\sigma_{bem}} + \frac{C_{mx} \times \sigma_{bx}}{\left(1 - \frac{\sigma_{eb}}{\sigma'_{ex}}\right) \times \sigma_{Bx}} + \frac{C_{my} \times \sigma_{by}}{\left(1 - \frac{\sigma_{eb}}{\sigma'_{ey}}\right) \times \sigma_{By}} \leq 1,00 \quad (4.3)$$

$$\frac{\sigma_{eb}}{0,60 \times \sigma_a} + \frac{\sigma_{bx}}{\sigma_{Bx}} + \frac{\sigma_{by}}{\sigma_{By}} \leq 1,00 \quad (4.4)$$

formülleri ile yapılır.

$\sigma_{eb} / \sigma_{bem} \leq 0,15$ için bu formüller yerine

$$\frac{\sigma_{eb}}{\sigma_{bem}} + \frac{\sigma_{bx}}{\sigma_{Bx}} + \frac{\sigma_{by}}{\sigma_{By}} \leq 1,00 \quad (4.5)$$

formülü de kullanılabilir.

Bu bağıntılarda x ve y , gerilmelerin ve ilgili katsayıların ait olduğu eksenleri göstermektedir. Ayrıca,

σ_{bem} : yalnız basınç kuvveti etkisi altında izin verilen gerilme
(basınç güvenlik gerilmesi)

σ'_e : Euler kritik gerilmesinin n güvenlik katsayısına bölünmesi ile elde edilen sınır gerilme,

$$\sigma'_e = \frac{\pi^2 \times E}{n \times \lambda_b^2} \quad (n = 2,50) \quad (4.6)$$

E : yapı çeliğinin elastisite modülü,

λ_b : eğilme düzlemindeki narinlik
(çubuk burkulma boyunun atalet yarıçapına oranı)

C_m : yanal desteklemeyi ve gereğinde uç momentlerini gözönüne alan bir katsayıdır.

Yanal yerdeğiştirmesi önlenmemiş çerçevelerde C_m katsayısı

$$C_m = 0,85$$

değeri almaktadır.

σ_{bem} basınç güvenlik gerilmesi, incelenen kolonun x ve y doğrultularındaki λ_x ve λ_y narinliklerinden büyük olanına bağı olarak, TS 648 – Madde 3.2.2 de açıklandığı şekilde hesaplanır. Benzer şekilde, σ_b eğilme güvenlik gerilmesinin kolonun yanal burkulma güvenliğine bağı olarak hesabı standardın 3.3.4.2 maddesinde açıklanmıştır.

4.2.3 Analiz ve Boyutlandırma

Merkezi ve dışmerkez çaprazlı çok katlı çelik yapıların pratikteki uygulamalarını temsil etmek üzere seçilen düzlem taşıyıcı sistem modelleri ülkemizde yürürlükte olan ve esasları önceki bölümde açıklanan yönetmeliklere göre boyutlandırılmışlardır.

Boyutlandırmanın sistem analizi aşamasında SAP2000 . paket programından yararlanılmıştır, [21].

Boyutlandırılan sistemlerin geometrik özelliklerini ve enkesit profillerini gösteren sistem şemaları Ek A de verilmiştir. Bunlardan Şekil A.1 merkezi çaprazlı çelik yapı sistemini, Şekil A.2 - A.5 ise dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerini göstermektedir.

Boyutlandırmada eleman enkesitleri belirlenirken şu hususlar gözönünde tutulmuştur.

a- Deprem yüklerinin her iki yönde de etkiyebileceği gözönüne alınarak sistemler simetrik olarak boyutlandırılmıştır.

b- Kolon enkesitleri olarak geniş başlıklı **HE-A** Avrupa norm profilleri kullanılmıştır. Konstrüktif amaçla, en küçük kolon enkesiti olarak **HE-200-A** kullanılmıştır.

c- Kiriş enkesitleri olarak **IPE** Avrupa norm profilleri kullanılmıştır.

d- Çapraz sistemleri için, 2 adet **NPU** profilinden kapalı kutu kesit oluşturmak sureti ile elde edilen kesitler kullanılmıştır. Böylece, düzlem içi ve düzlem dışı burkulmaya karşı yaklaşık olarak eşit bir rijitlik sağlanması amaçlanmıştır.

Bu enkesit profillerinin taşıyıcı sistem modelleri üzerindeki dağılımı Tablo 4.1 de özetlenmiştir.

Tablo 4.1 Taşıyıcı Sistem Modellerinde Kullanılan Enkesit Profilleri

Sistem	Kolonlar	Kirişler	Çapraz Sistemleri
TSM 1	HE360-A, HE320-A, HE280-A, HE240-A, HE200-A	IPE 330, IPE300, IPE270, IPE240	2U120, 2U100
TSM 2	HE280-A, HE260-A, HE240-A, HE220-A, HE200-A	IPE270, IPE240	2U100
TSM 3	HE320-A, HE280-A, HE240-A, HE220-A, HE200-A	IPE300, IPE270, IPE240	2U100
TSM 4	HE280-A, HE240-A, HE220-A, HE200-A	IPE300, IPE270, IPE240	2U120, 2U100
TSM 5	HE300-A, HE280-A, HE240-A, HE220-A, HE200-A	IPE270, IPE240	2U100

Tablo 4.1 de özetlenen enkesit profilleri kullanarak boyutlandırılan taşıyıcı sistem modellerinin eleman bazındaki ve toplam yapı ağırlıkları ile bu ağırlıkların oranları Tablo 4.2 de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Taşıyıcı Sistem Modellerinde Yapı Ağırlıkları

	Dış Kolon	İç Kolon	Kiriş	Çapraz	Toplam	ORAN
	(t)	(t)	(t)	(t)	(t)	
TSM 1	1,777	3,016	3,378	1,758	9,929	1,00
TSM 2	1,777	2,380	3,168	1,025	8,350	0,84
TSM 3	1,777	2,586	3,229	0,586	8,178	0,82
TSM 4	1,777	2,199	3,348	1,732	9,056	0,91
TSM 5	1,777	2,521	3,033	0,676	8,007	0,81

Taşıyıcı sistem modellerinin deprem analizinde kullanılan katsayı ve parametreler ile bunlara bağlı olarak hesaplanan deprem katsayıları (taban kesme kuvvetinin etkin yapı ağırlığına oranı) Tablo 4.3 de verilmiştir.

Tablo 4.3 Taşıyıcı Sistem Modellerinde Deprem Katsayılarının Belirlenmesi

	SİSTEMLER	Etkin yer ivmesi katsayısı	Yapı önem katsayısı	Yapı 1. doğal periyodu	Spektrum katsayısı	Yapı davranış katsayısı	Deprem Katsayısı
		A_0	I	T_1	$S(T)$	R	V_i/W
Merkezi çaprazlı sistem	TSM 1	0,40	1,00	0,72	1,57	4	0,157
Dışmerkez çaprazlı sistemler	TSM 2	0,40	1,00	1,12	1,10	8	0,055
	TSM 3	0,40	1,00	1,21	1,03	8	0,052
	TSM 4	0,40	1,00	1,22	1,03	8	0,051
	TSM 5	0,40	1,00	1,57	0,84	8	0,042

Tablo 4.3 de verilen deprem katsayıları ile hesaplanan eşdeğer deprem yüklerinin katlara göre dağılımı Tablo 4.4 de görülmektedir.

Tablo 4.4 Deprem Yüklerinin Katlara Göre Dağılımı

Sistem	TSM 1	TSM 2	TSM 3	TSM 4	TSM 5
Kat	(t)	(t)	(t)	(t)	(t)
6	10,660	3,740	3,504	3,488	2,844
5	11,536	4,044	3,792	3,776	3,080
4	9,228	3,236	3,032	3,020	2,464
3	6,920	2,428	2,276	2,264	1,848
2	4,616	1,620	1,516	1,512	1,232
1	2,308	0,808	0,760	0,756	0,616

Bu deprem yükleri altında hesaplanan göreceli kat ötelemeleri ve bu ötelemelerin sınır değerleri Tablo 4.5 te verilmiştir.

Tablo 4.5 Deprem Yükleri Altındaki Göreceli Kat Ötelemeleri

Kat / Sistem	TSM 1	TSM 2	TSM 3	TSM 3a	TSM 4	TSM 5
6	0,0020	0,0009	0,0014	0,0012	0,0012	0,0013
5	0,0022	0,0012	0,0020	0,0015	0,0017	0,0022
4	0,0022	0,0015	0,0022	0,0016	0,0020	0,0026
3	0,0018	0,0016	0,0023	0,0015	0,0016	0,0026
2	0,0015	0,0016	0,0020	0,0012	0,0016	0,0024
1	0,0011	0,0013	0,0015	0,0006	0,0013	0,0015
Sınır değeri	0,0035	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025

4.3 Taşıyıcı Sistem Modellerinde Lineer Olmayan Davranışın İncelenmesi

Bu çalışmada, merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik düzlem çerçevelerden oluşan ve Bölüm 4.2 de açıklandığı şekilde boyutlandırılan taşıyıcı sistem modelleri, malzeme ve geometri değişimleri bakımından lineer olmayan teoriye göre hesaplanarak deprem yükleri altındaki lineer olmayan davranışları, göçme güvenlikleri ve süneklik düzeyleri belirlenmektedir.

Taşıyıcı sistem modellerinin lineer olmayan teoriye göre analizi için esasları Bölüm 2 de açıklanan yük artımı yönteminden ve bu yöntemin pratik uygulamaları için hazırlanan EPASS bilgisayar programından yararlanılmıştır.

Bu analiz sonucunda tüm taşıyıcı sistem modelleri için elde edilen yatay yük parametresi – bağıl yerdeğiştirme ($YYP - \delta/H$) diyagramları Ek B deki şekillerde topluca verilmiştir. Bu şekillerden Şekil B.1 de merkezi çaprazlı sistemin (*TSM1*), Şekil B.2 – B.6 da ise dışmerkez çaprazlı sistemlerin (*TSM 2-5*) diyagramları görülmektedir. Diyagramlarda belirtildiği gibi, *TSM 3a* taşıyıcı sistem modeli *TSM 3* ün aynı olmakla beraber aksi yönde deprem yükleri etkisindedir.

Yatay yük parametresi – bağıl yerdeğiştirme diyagramları düşey yük parametresinin $DYP = 1,000$ ve $DYP = 1,500$ değerleri için ayrı ayrı elde edilmiştir. Diyagramlar göçme yüküne karşı gelen $\delta/H = 0,02$ bağıl yerdeğiştirmesine kadar devam ettirilmiştir. Diyagramlardan görüldüğü gibi, $YYP - \delta/H$ eğrileri ikinci mertebe limit yükte (P_{L2}) maksimumdan geçmekte ve δ/H bağıl yerdeğiştirmesinin daha büyük değerlerine azalan yük parametresi karşı gelmektedir.

Taşıyıcı sistem modellerinin, düşey yük parametresinin $DYP = 1,000$ değeri için ikinci mertebe limit yüke kadar lineer olmayan analizi ile elde edilen plastik kesitlerin sistem üzerindeki dağılımları ve oluşum sıraları Ek C te, Şekil C.1 – C.6 da verilmiştir. Şekiller üzerinde kirişlerde, kolonlarda ve çapraz sisteminde oluşan ilk plastik kesitler ile ikinci mertebe limit yüke karşı gelen son plastik kesitin oluşum sıraları belirtilmiştir.

Taşıyıcı sistem modellerinin $DYP = 1,000$ ve $DYP = 1,500$ için elastoplastik analizi ile elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 4.6 üzerinde topluca verilmiştir.

Tablo 4.6 Sayısal Sonuçların Özeti

Düşey yük parametresi $DYP = 1,000$

Sistem	Plastik kesitlerin sayısı				İlk plastik kesitin oluştuğu YYP			P _{L2}	δ _{L2} / H
	Toplam	Kolon	Kiriş	Çapraz	Kolon	Kiriş	Çapraz		
TSM 1	20	9	6	5	1.577	3.105	2.712	3.141	0.0096
TSM 2	25	2	18	5	2.458	2.075	2.479	2.814	0.0123
TSM 3	23	9	12	2	2.338	1.446	2.622	2.769	0.0099
TSM 3a	28	5	14	9	2.976	1.895	2.012	3.083	0.0090
TSM 4	31	4	-	27	1.823	-	1.511	2.029	0.0054
TSM 5	12	7	5	-	1.870	2.158	-	2.262	0.0060

Düşey yük parametresi $DYP = 1,500$

Sistem	Plastik kesitlerin sayısı				İlk plastik kesitin oluştuğu YYP			P _{L2}	δ _{L2} / H
	Toplam	Kolon	Kiriş	Çapraz	Kolon	Kiriş	Çapraz		
TSM 1	26	10	13	3	1.230	2.042	2.514	2.864	0.0178
TSM 2	19	4	11	4	1.702	1.969	2.249	2.509	0.0058
TSM 3	19	10	9	-	1.615	1.088	-	2.288	0.0060
TSM 3a	28	8	12	8	2.356	1.663	1.972	2.781	0.0096
TSM 4	31	8	1	22	1.111	1.753	1.497	1.756	0.0041
TSM 5	11	9	2	-	1.227	1.528	-	1.530	0.0046

Bu tablolarda, sırasıyla

- a- plastik kesitlerin toplam sayısı ve yapı elemanları üzerindeki dağılımı,
- b- kolon, kiriş ve çapraz sisteminde ilk plastik kesitlerin oluştuğu yatay yük parametreleri,
- c- ikinci mertebe limit yük parametresi,
- d- ikinci mertebe limit yüke karşı gelen bağıl yerdeğiştirme değeri

yeralmaktadır.

4.4 Süneklik Düzeyinin Belirlenmesi

Merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemleri için Bölüm 3.4 te yapılan tanımlara uygun olarak, taşıyıcı sistem modelleri için belirlenen sistem süneklik oranları Tablo 4.7 de topluca verilmiştir.

Tablo 4.7 Sistem Süneklik Oranları

TSM 1	TSM 2	TSM 3	TSM 3a	TSM 4	TSM 5	KRİTER
3,4	4,8	4,9	3,5	2,6	1,8	İkinci mertebe limit yükteki yerd.
						ilk plastik kesite karşı gelen yerd.
7,1	7,8	10,0	7,6	9,5	6,0	%2 yerdeğiştirme
						ilk plastik kesite karşı gelen yerd.
4,9	8,1	7,0	6,5	10,0	7,0	%2 yerdeğiştirme
						Göçme yükünün %70'indeki yerd.
2,4	5,0	3,5	2,9	2,7	2,1	İkinci mertebe limit yükteki yerd.
						Göçme yükünün %70'indeki yerd.
3,5	5,7	4,9	4,5	7,0	4,9	%2 yerdeğiştirme
						İkinci mert. limit yükteki lin. yerd.
1,7	3,5	2,4	2,0	1,9	1,5	İkinci mertebe limit yükteki yerd.
						İkinci mert. limit yükteki lin. yerd.

Bölüm 3.4 te (3.1) bağıntısı ile önerilen sistem süneklik oranları tabloda koyu karakterlerle gösterilmiştir.

4.5 Sayısal Sonuçların Değerlendirilmesi

Taşıyıcı sistem modellerinin lineer olmayan davranışlarına ilişkin olarak gerçekleştirilen sayısal incelemeler değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmaktadır.

a- Merkezi çaprazlı çelik yapı sistemlerinin göçme yükü parametreleri

$$DYP = 1,000 \text{ için } P_G = P_{L2} = 3,141$$

$$DYP = 1,500 \text{ için } P_G = P_{L2} = 2,864$$

değerlerini almaktadır. Dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinin göçme yükü parametreleri ise

$$DYP = 1,000 \text{ için } P_G = P_{L2} = 2,029 - 3,083$$

$$DYP = 1,500 \text{ için } P_G = P_{L2} = 1,530 - 2,781$$

arasında değişmektedir. Görüldüğü gibi, incelenen taşıyıcı sistem modellerinin tümü plastik hesap yönetmelikleri tarafından öngörülen göçme güvenliğini sağlamaktadırlar.

b- Merkezi çaprazlı çelik yapı sistemlerinin ikinci mertebe limit yüke ait bağlı yerdeğiştirmeleri

$$DYP = 1,000 \text{ için } \delta/H = 0,0096$$

$$DYP = 1,500 \text{ için } \delta/H = 0,0178$$

değerlerini almaktadır. Dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinde bu bağlı yerdeğiştirmeler

$$DYP = 1,000 \text{ için } \delta/H = 0,0054 - 0,0123$$

$$DYP = 1,500 \text{ için } \delta/H = 0,0041 - 0,0096$$

arasındadır. Bu değerler, çelik çaprazlı sistemlerde göçme durumuna karşı gelen $\delta/H = 0,02$ sınır yerdeğiştirmesinin altında kalmaktadır.

c- Merkezi çaprazlı çelik yapı sistemleri için ilk plastik kesitin oluştuğu yatay yük parametresi

$$DYP = 1,000 \text{ durumunda } P = 1,577$$

$$DYP = 1,500 \text{ durumunda } P = 1,230$$

olmaktadır. Dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemleri için ilk plastik kesitin oluştuğu yatay yük parametresi

$$DYP = 1,000 \text{ durumunda } P = 1,446$$

$$DYP = 1,500 \text{ durumunda } P = 1,088$$

dir. Bu durum, düşey ve yatay işletme yükleri altında sistemde plastik kesit oluşmadığını göstermektedir.

d- *TSM 1* olarak tanımlanan merkezi çapraz sisteminde ilk plastik kesit kolonda, dışmerkez çapraz sistemlerinden *TSM 2* ve *TSM 3* te kirişlerde, *TSM 5* te ise kolonda meydana gelmektedir. Buna karşılık, *TSM 4* te ilk plastik kesit çapraz sistemini oluşturan elemanlarda meydana gelmektedir.

e- Plastik kesitlerin yapı elemanları üzerindeki dağılımı incelendiğinde, en çok plastik kesit *TSM 1* ve *TSM 5* te kolonlarda, *TSM 2* ve *TSM 3* te kirişlerde, *TSM 4* te ise çapraz sistemini oluşturan elemanlarda oluşmaktadır.

f- Boyutlandırılan yapı sistemlerinin ağırlıkları *TSM 1* de 1,00 iken, *TSM 4* te 0,91 değerini almakta, *TSM 2*, *TSM 3* ve *TSM 4* te ise 0,81 – 0,84 arasında değişmektedir.

g- İncelenen yapı sistemlerinin ağırlıkları arasındaki fark daha çok kolon ve çapraz sistemi ağırlıklarının farkından oluşmaktadır. *TSM 4* ün diğer dışmerkez çaprazlı yapı sistemlerinden daha ağır olması, çapraz sisteminde kullanılan ek elemanların ağırlığından kaynaklanmaktadır.

h- Göçmeye karşı gelen yerdeğiştirmenin, lineer sınıra karşı gelen yerdeğiştirmeye oranı olarak tanımlanan süneklik oranları

Merkezi çapraz sistemlerde

TSM 1 için $\mu = 5$

Dışmerkez çapraz sistemlerde

TSM 2, 3, 3a, 5 için $\mu = 6,5 - 8$

TSM 4 için $\mu = 10$

değerlerini almaktadır.



5 SONUÇLAR

Merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinde lineer olmayan davranışın incelenmesi ve süneklik düzeyinin belirlenmesi konulu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

1- Çalışmada, malzeme ve geometri değişimleri bakımından lineer olmayan sistemlerin hesabı için geliştirilen bir yük artımı yönteminin ve bu yöntemin pratik uygulamaları amacıyla hazırlanan bilgisayar programlarının sağladığı olanaklardan yararlanmak suretiyle, merkezi veya dışmerkez çaprazlar içeren çelik yapı sistemlerinin düşey yükler ve deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışları, göçme güvenlikleri ve süneklik düzeyleri ayrıntılı ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2- İnceleme, orta yükseklikteki çelik yapı sistemlerini temsil etmek üzere seçilen altı katlı, merkezi ve dışmerkez çaprazlı düzlem çerçeve sistemler üzerinde gerçekleştirilmiştir. *Taşıyıcı sistem modelleri* olarak isimlendirilen bu sistemlerden biri merkezi çaprazlı diğer dördü ise değişik düzendeki dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerdir. Böylece, merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve sistemlerde lineer olmayan davranışın ve süneklik düzeyinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada ayrıca, değişik dışmerkez çapraz düzenlerinin sistem davranışına ve süneklik düzeyine katkıları araştırılmıştır.

3- Merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik sistemlerin süneklik oranlarının belirlenmesinde çeşitli kriterler kullanılmıştır. Sistem süneklik oranları hem klasik süneklik tanımına göre, hem de burkulma sonrası davranışı da gözönüne alan farklı kriterlere göre belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

4- Uygulamada genellikle kullanılmakta olan dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin yanında, çapraz düzeni içinde eğilme elemanları içeren farklı bir dışmerkez çaprazlı çerçeve sistemin (*TSM 4*) davranışı da bu çalışma kapsamı içinde ayrıca incelenmiştir.

5- Çalışmanın sayısal incelemelerine dayanarak elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

a- Ülkemizde yürürlükte olan 1998 deprem yönetmeliği [8] ve TS648 çelik hesap yönetmeliğine [20] uygun olarak boyutlandırılan merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinin göçme yükü parametreleri,

$$DYP = 1,000 \text{ için } P_G = P_{L2} = 2,029 - 3,141$$

$$DYP = 1,500 \text{ için } P_G = P_{L2} = 1,530 - 2,864$$

arasında değişmektedir. Bu sonuç, incelenen merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinin TS4561 plastik hesap yönetmeliği [22] ve diğer ülkelerde yürürlükte olan plastik hesap yönetmeliklerinde öngörülen güvenliğe sahip olduğunu göstermektedir.

b- Merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapı sistemlerinde düşey yük parametresinin gerek $DYP = 1,000$ gerekse $DYP = 1,500$ değerleri için, ilk plastik kesitler yatay işletme yükünden sonra oluşmaktadır. Bu sonuç, incelenen sistemlerin işletme yükleri altında lineer-elastik davrandığını göstermektedir.

c- İlk plastik kesitler, boyutlandırılan sistemlerin özelliklerine göre, kirişlerde veya kolonlarda meydana gelebilmektedir. Buna karşılık, çapraz sistemi büyük ölçüde eğilmeye çalışan elemanlar içeren TSM 4 te ilk plastik kesit çapraz sistemini oluşturan elemanlarda meydana gelmiştir.

d- Plastik kesitlerin yapı elemanları üzerindeki dağılımı incelendiğinde, gerek merkezi gerekse dışmerkez çaprazlı sistemlerde genellikle kirişlerde kolonlara oranla daha fazla plastik kesit olduğu gözlenmektedir. Çapraz sistemi eğilme elemanları içeren TSM 4 te ise, beklenildiği gibi, plastik kesitlerin önemli bir bölümü çapraz sisteminde meydana gelmektedir.

e- Düşey işletme yükleri altında, bağıl yerdeğiştirmenin $\delta/H = 0,005 - 0,010$ değerleri arasında ikinci mertebe limit yüke (P_{L2}) ulaşılmaktadır. Bu değerler, çelik çaprazlı sistemlerde göçme durumuna karşı gelen $\delta/H = 0,02$ sınır yerdeğiştirmesinin [6] altında kalmaktadır.

f- Boyutlandırılan yapı sistemlerinin bağıl ağırlıkları merkezi çapraz sisteminde (TSM 1) 1,00 iken, TSM 4 te 0,91 değerini almakta, diğer dışmerkez çaprazlı sistemlerde ise 0,81 – 0,84 arasında değişmektedir. Yapı sistemlerinin ağırlıkları arasındaki temel fark, yapı davranış katsayısının merkezi ve dışmerkez çaprazlı sistemlerde sırasıyla $R = 4$ ve $R = 8$ değerlerini almasından, diğer bir deyişle, sistemlerin süneklik düzeyleri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır.

İncelenen yapı sistemlerinin ağırlıkları arasındaki fark daha çok kolon ve çapraz sistemi ağırlıklarının farkından oluşmaktadır. TSM 4 ün diğer dışmerkez çaprazlı yapı sistemlerinden daha ağır olması, çapraz sisteminde kullanılan ek elemanlardan kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, bu sistem için süneklik oranı daha yüksek değerler almaktadır.

g- Süneklik oranı, göçmeye neden olan yerdeğiştirmenin lineer sınıra karşı gelen yerdeğiştirmeye oranı olarak tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada, lineer sınıra karşı gelen yerdeğiştirmenin, ikinci mertebe limit yüke ulaşıncaya kadar meydana gelen plastik kesitlerin yaklaşık %10 unun olduğu andaki yerdeğiştirme olduğu varsayılmıştır. Bu yerdeğiştirmenin ise, yaklaşık olarak ikinci mertebe limit yükün %70 ine ulaşıldığı andaki yerdeğiştirme olduğu sayısal incelemelerden görülmektedir. Buna göre, süneklik oranı için

$$\mu = \frac{0,02}{(\delta / H)_{0,7P_{L2}}}$$

bağıntısının kullanılması uygun olmaktadır. Bu bağıntı ile elde edilen sistem süneklik oranları

Merkezi çapraz sistemlerde

TSM 1 için $\mu = 5$

Dışmerkez çapraz sistemlerde

TSM 2, 3, 3a, 5 için $\mu = 6,5 - 8$

TSM 4 için $\mu = 10$

değerlerini almaktadır.

Elde edilen sistem süneklik oranlarının genel olarak 1998 deprem yönetmeliğinde [8] bu tür yapı sistemleri için ngrlen $R = 4$ ve $R = 8$ deprem yükü azaltma katsayıları ile belirli bir yaklaşıklıkla uyumlu olduğu, çapraz sistemi büyük lde eğilmeye çalışan elemanlar içeren *TSM 4* için ise daha yüksek bir deprem yükü azaltma katsayısının kullanılabileceği grlmektedir.

h- Yük parametresi – yerdeğiştirme bağıntıları incelendiğinde, dışmerkez aprazlı sistemlerde göçmeden önce meydana gelen plastik şekildeğiştirmelerin merkezi aprazlı sisteme göre daha büyük değerler aldığı ve göçmenin sünek olduğu grlmektedir. Bu sonuç, dışmerkez aprazlı sistemlerin merkezi aprazlı sistemlere göre daha fazla deprem enerjisi tketebildiğini göstermektedir.

5. Bu çalışmada esas alınan inceleme yöntemi benzer şekilde uygulanmak suretiyle, diğer yapı sistemlerinin süneklik düzeylerinin belirlenmesi ve yönetmeliklerde ngrlen R yapı davranış katsayısının irdelenmesi mümkün olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Özer, E., İrtem, E., Orakdöğen, E., Girgin, K., Doğaner, S. ve Kurtuldu, S.,** 1994. Çok katlı çelik yapıların deprem kuvvetleri altında gerçek göçme güvenliklerinin belirlenmesi ve depreme dayanıklı yapı tasarımı, Teknik Rapor, İNTAG 505, TÜBİTAK, Ankara.
- [2] **Karacan, M. A.,** 1999. Boşluklu perdeler içeren çok katlı betonarme yapı sistemlerinin lineer olmayan davranışlarının incelenmesi ve süneklik düzeylerinin belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Özer, E.,** 1987. Determination of second-order limit load by a method of load increments, *Bulletin of the Technical University of Istanbul*, **40, 4**, 815-836.
- [4] **İrtem, E.,** 1991. Uzay çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yükün hesabı için bir yük artımı yöntemi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] **Girgin, K.,** 1996. Betonarme yapı sistemlerinde ikinci mertebe limit yükün ve göçme güvenliğinin belirlenmesi için bir yük artımı yöntemi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **FEMA 273,** 1997. Nhep Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *Applied Technology Council*, Washington.
- [7] **ATC 40,** 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, *Applied Technology Council*, California.
- [8] **Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik,** 1998. İmar ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü Başkanlığı, Ankara.
- [9] **UBC97,** Uniform Building Code Volume 2, 1997. International Conference of Building Officials, California.
- [10] **Eurocode 8,** Earthquake Resistant Design of Structures, 1993. European Committee For Standardization, Brussels.
- [11] **Paulay, T. and Priestley, N.,** 1992. *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [12] **Celep, Z. ve Kumbasar, N.,** 2000. *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*, İstanbul.

- [13] **Popov, E. P.**, 1980. *Eccentric Seismic Bracing of Steel Frames*. Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, İstanbul, Turkey, September 8-13 1980, Vol 7, 127-132.
- [14] **Girgin, K.**, 1993. Çelik Yapıların Elastoplastik Analizi için Bir Bilgisayar Programı, *Yayınlanmamış Bir Çalışma*.
- [15] **Hodge, P. G.**, 1959. *Plastic Analysis Of Structures*, Mc. Graw Hill., New York.
- [16] **Çakıroğlu, A., Özer, E.**, 1980. *Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler*, Cilt I, İ.T.Ü. Kütüphanesi, İstanbul.
- [17] **Çakıroğlu, A., Özden, E., Özmen, G.**, 1992. *Yapı Sistemlerinin Hesabı için Matris Metodları ve Elektronik Hesap Makinesi Programları*, Cilt II, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [18] **Çakıroğlu, A., Özden, E., Özmen, G.**, 1992. *Yapı Sistemlerinin Hesabı için Matris Metodları ve Elektronik Hesap Makinesi Programları*, Cilt I, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [19] **Kütük, C.**, 1998. Elastoplastik şekil değiştiren sistemlerin burkulma sonrası davranışlarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] **TS 648**, 1980. Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [21] **SAP 2000p V.7.40**, 2001. Three Dimensional Static and Dynamic Finite Element Analysis and Design of Structures, *Structural and Engineering Software*, Computers and Structures Inc., California.
- [22] **TS 4561**, 1985. Çelik Yapıların Plastik Teoriye Göre Hesap Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

EKLER

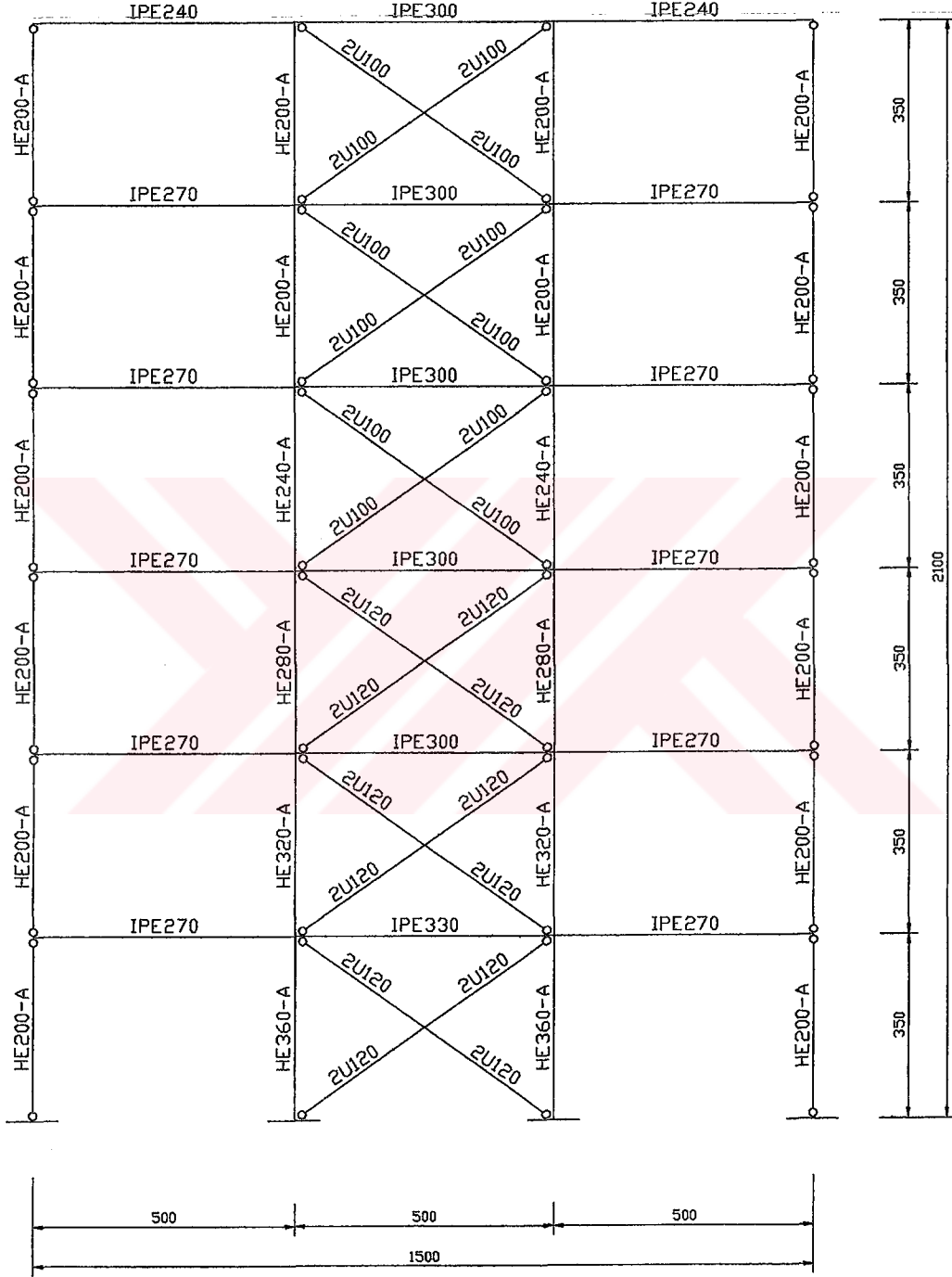


EK A

**TAŞIYICI SİSTEM MODELLERİNİN
GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ
VE ENKESİT PROFİLLERİ**

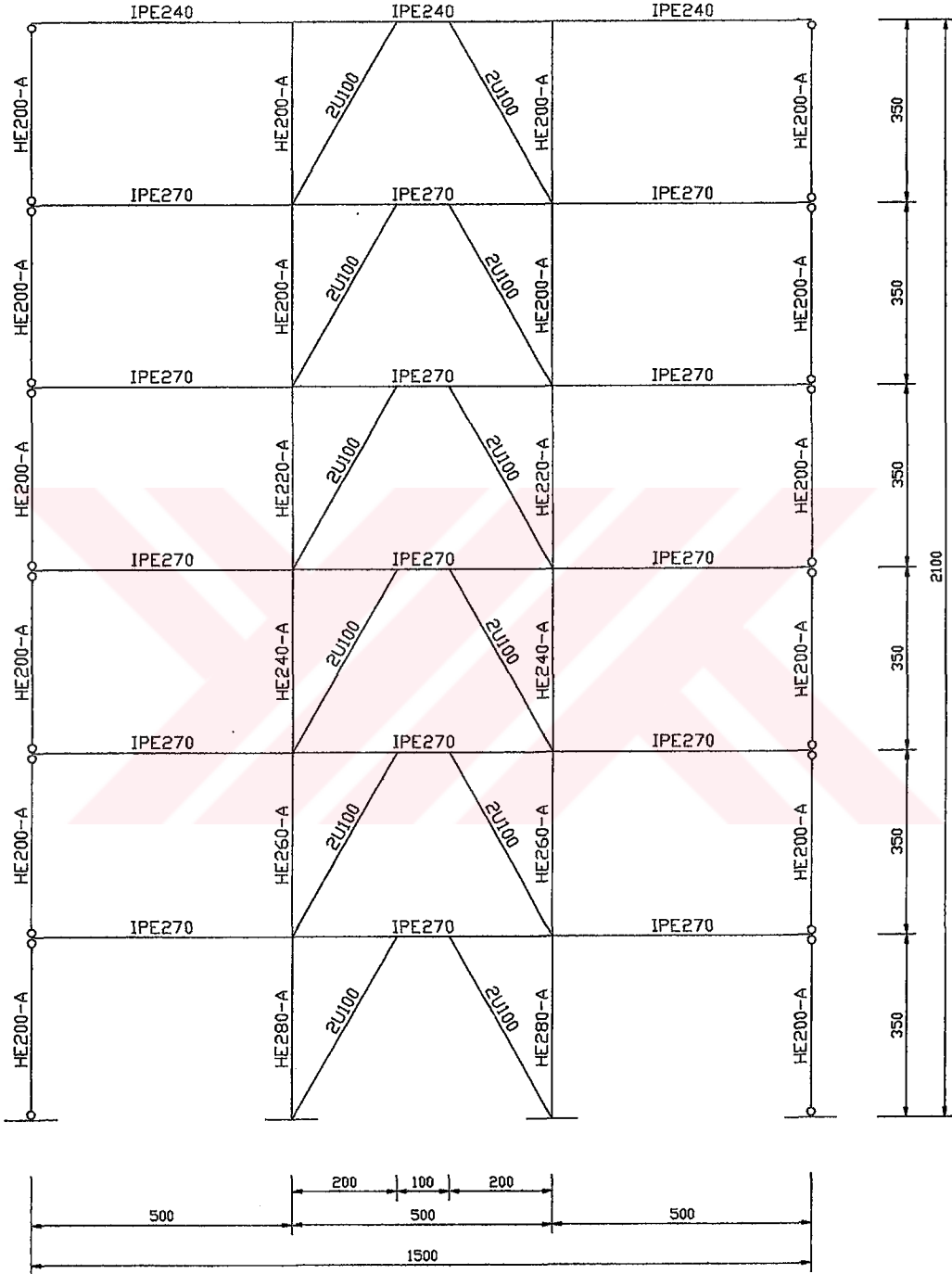


TSM 1 – (merkezi çaprazlı sistem)



Şekil A.1 TSM 1 Geometrik Özellikleri ve Enkesit Profilleri

TSM 2 – (dışmerkez çaprazlı sistem)



Şekil A.2 TSM 2 Geometrik Özellikleri ve Enkesit Profilleri

Technical drawing of a steel truss structure, showing a plan view and a side elevation.

Plan View Dimensions:

- Overall width: 1500
- Overall depth: 2100
- Vertical member spacing: 350 (5 segments)
- Horizontal member spacing: 500 (3 segments)

Members and Labels:

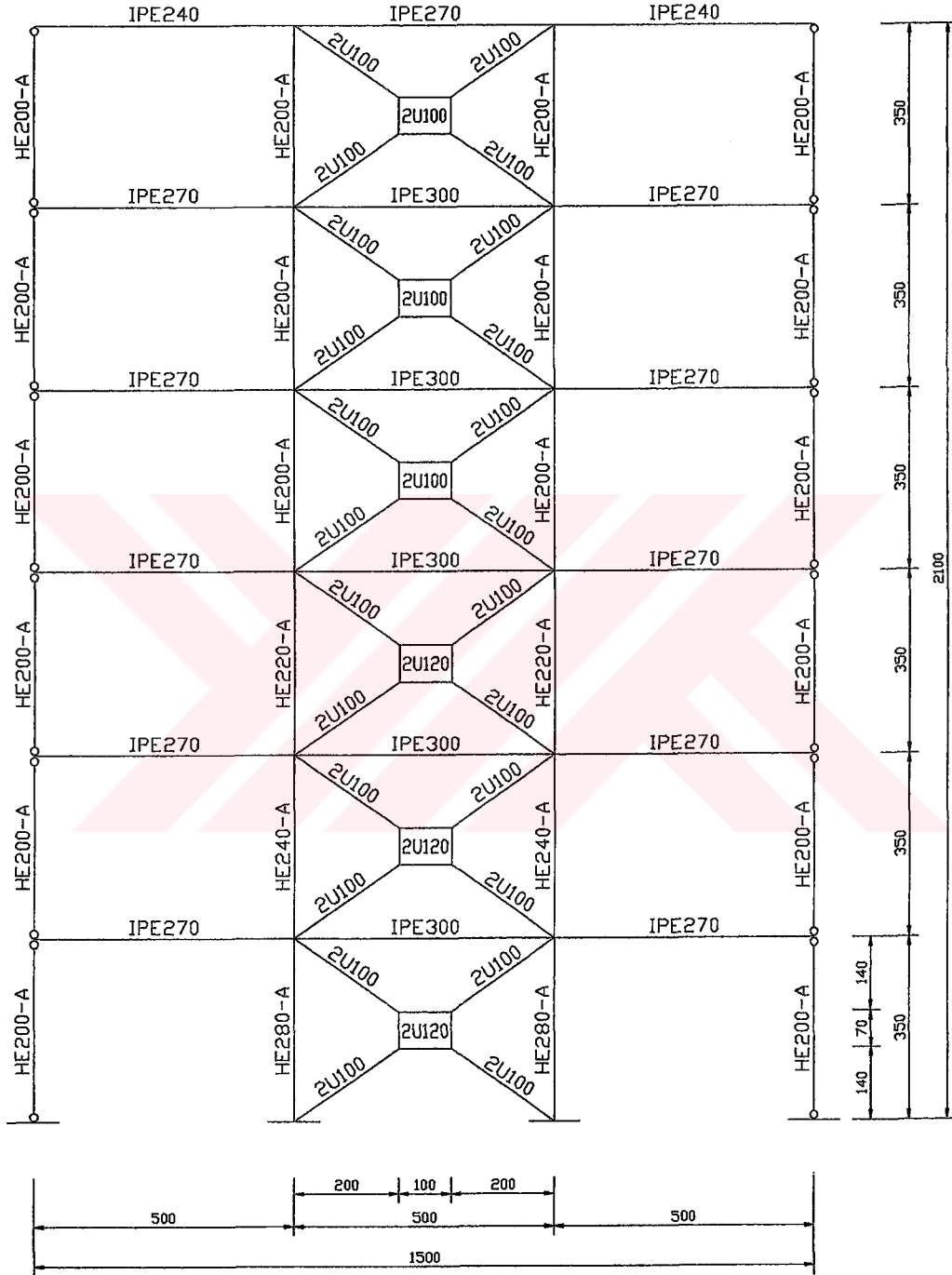
- Vertical Members:** HE200-A, HE220-A, HE240-A, HE280-A, HE320-A
- Horizontal Members:** IPE240, IPE270, IPE300
- Diagonal Members:** 2U100

Side Elevation Dimensions:

- Overall height: 2100
- Segment heights: 350 (5 segments)

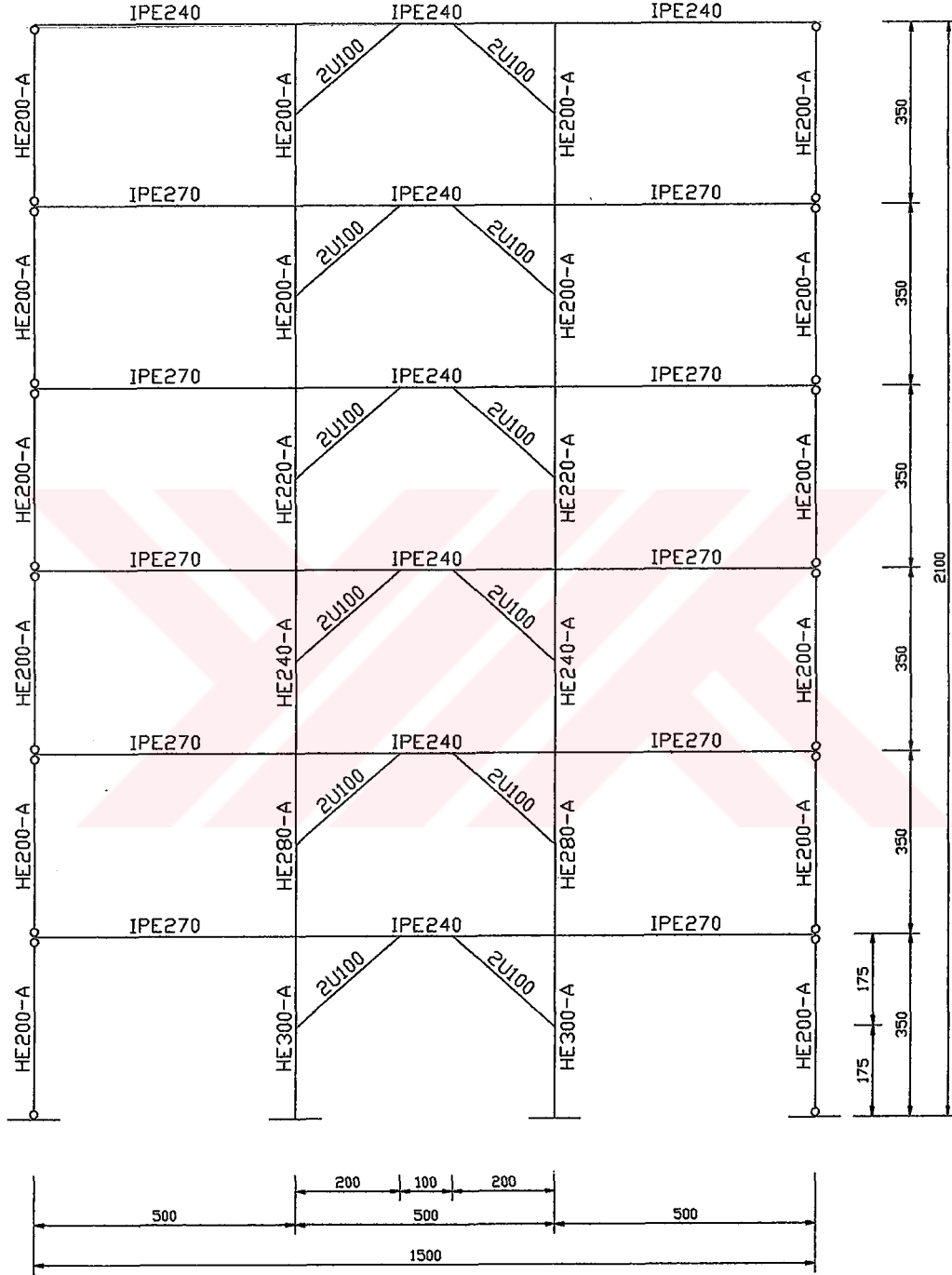
63

TSM 4 – (dışmerkez çaprazlı sistem)



Şekil A.4 TSM 4 Geometrik Özellikleri ve Enkesit Profilleri

TSM 5 – (dışmerkez çaprazlı sistem)

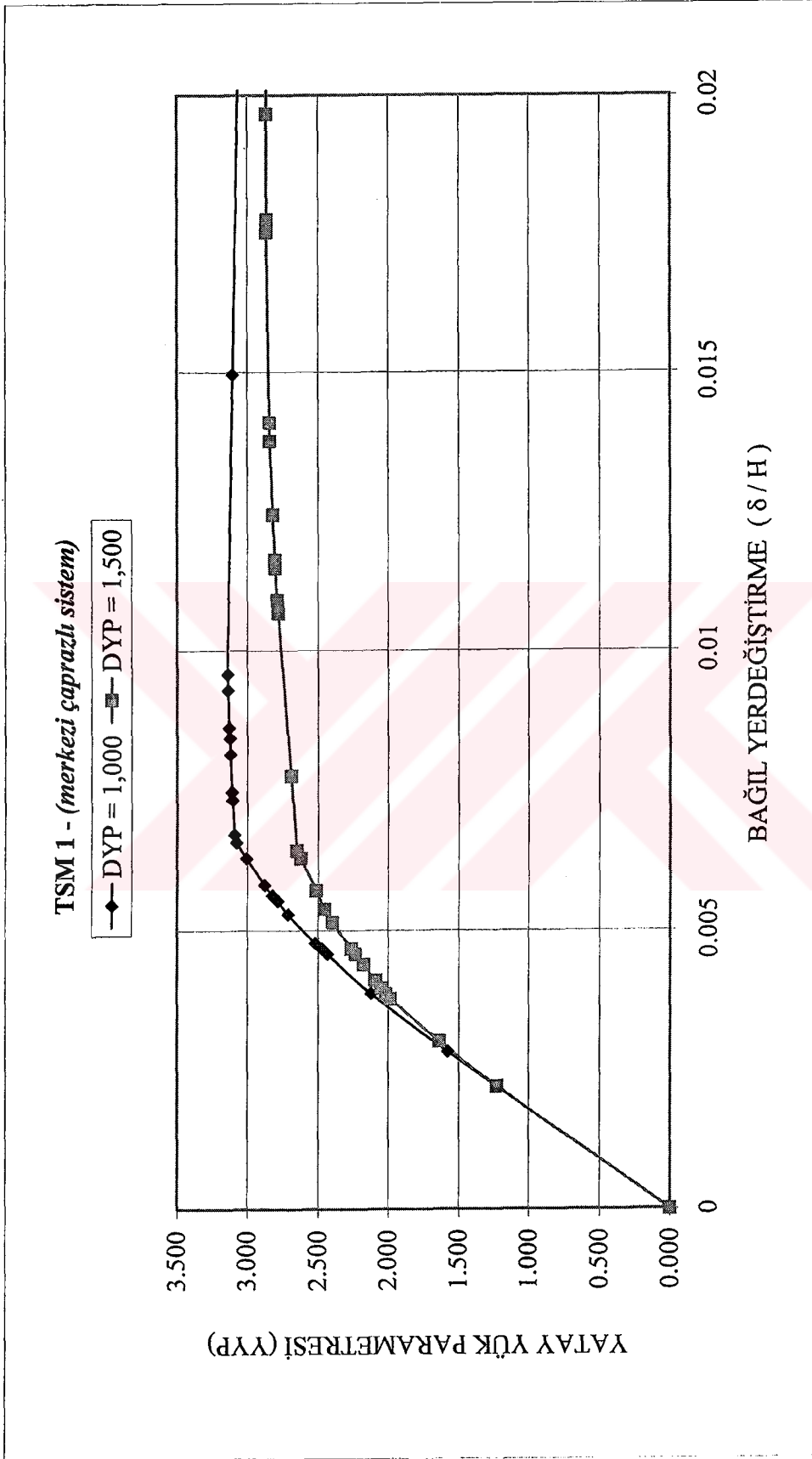


Şekil A.5 TSM 5 Geometrik Özellikleri ve Enkesit Profilleri

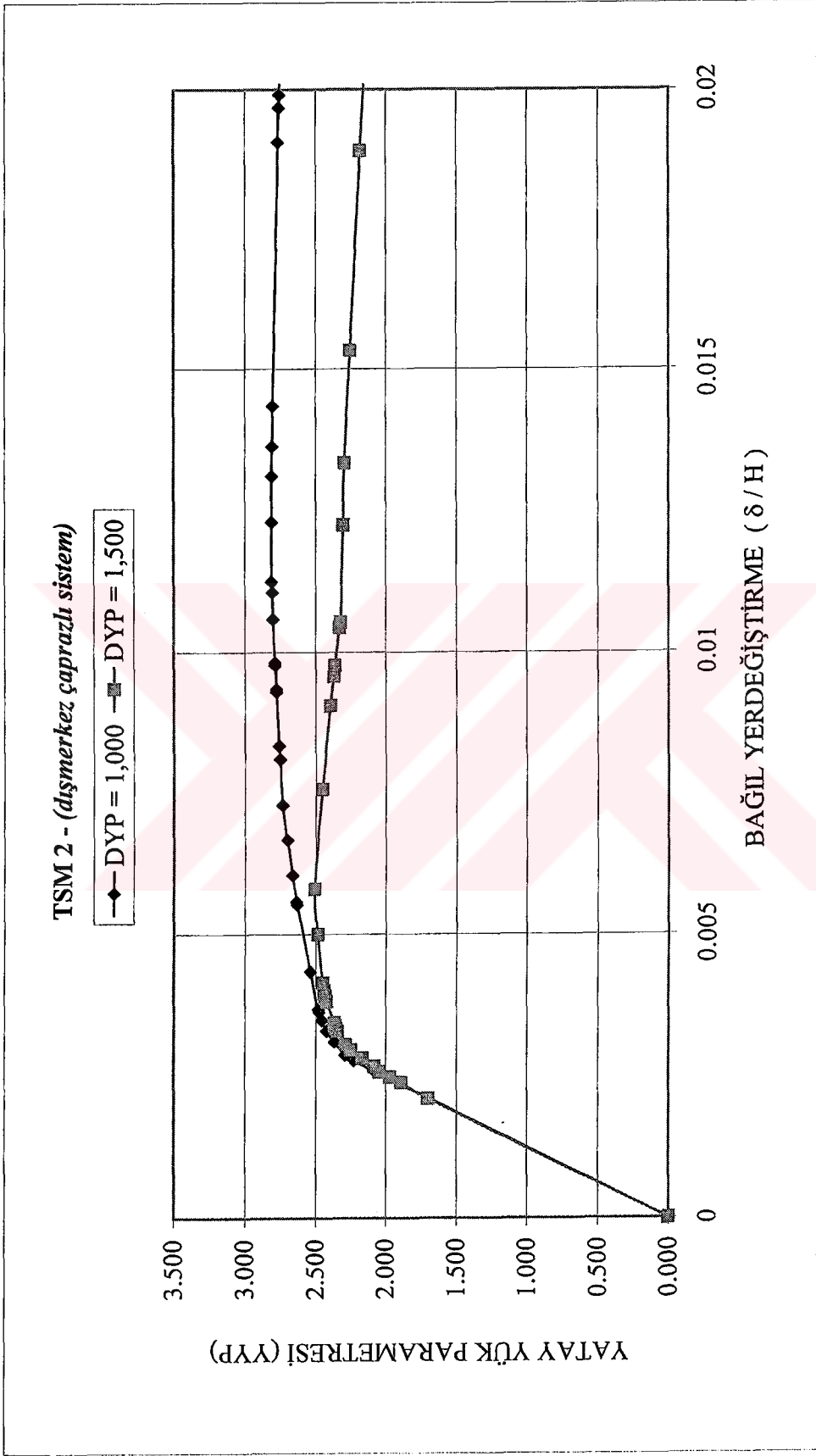
EK B

TAŞIYICI SİSTEM MODELLERİNDE YATAY YÜK PARAMETRESİ – BAĞIL YERDEĞİŞTİRME DİYAGRAMLARI

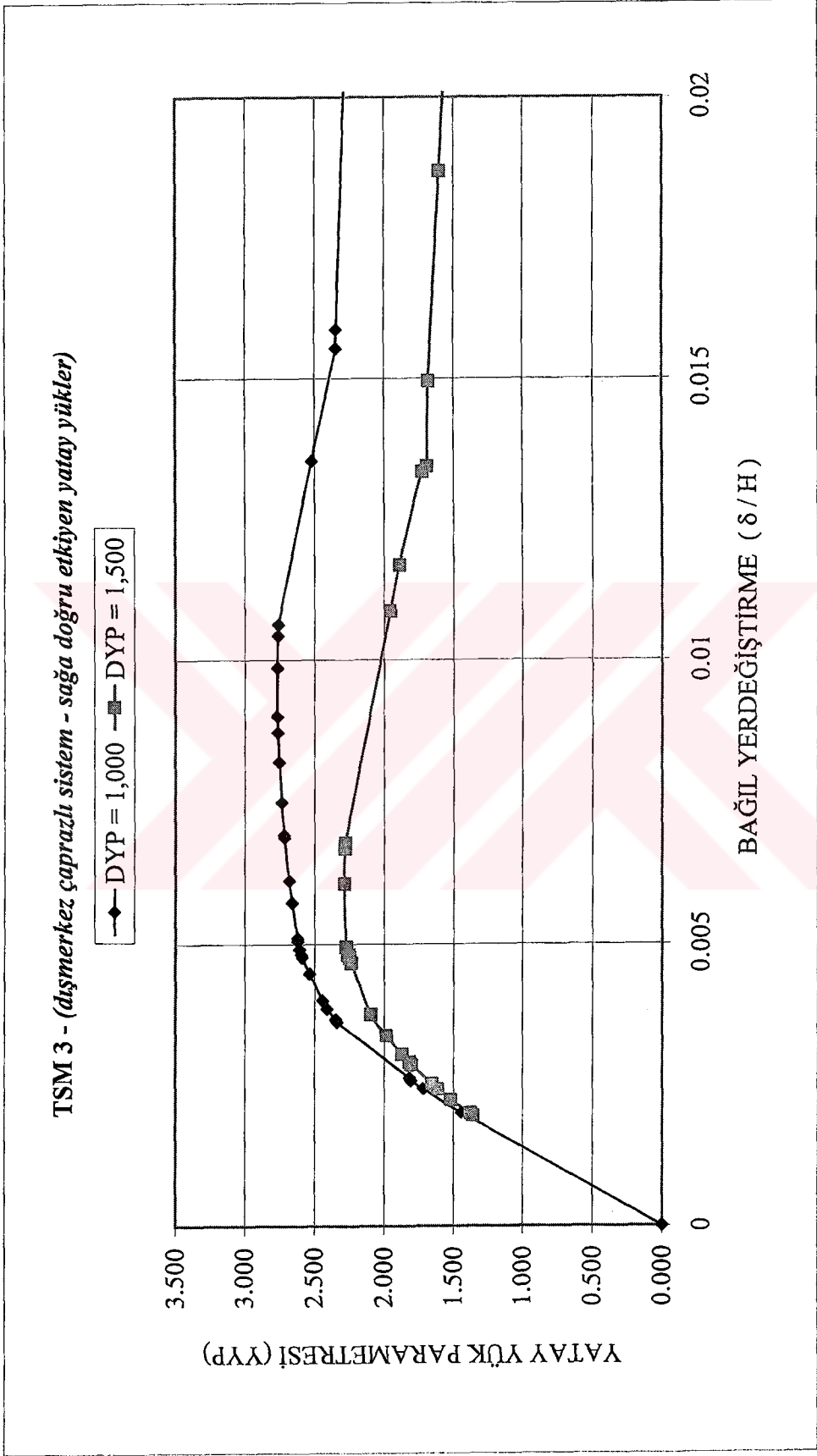




Şekil B.1 TSM 1 için Yatay Yük Parametresi - Bağıl Yerdeğiştirme Diyagramı

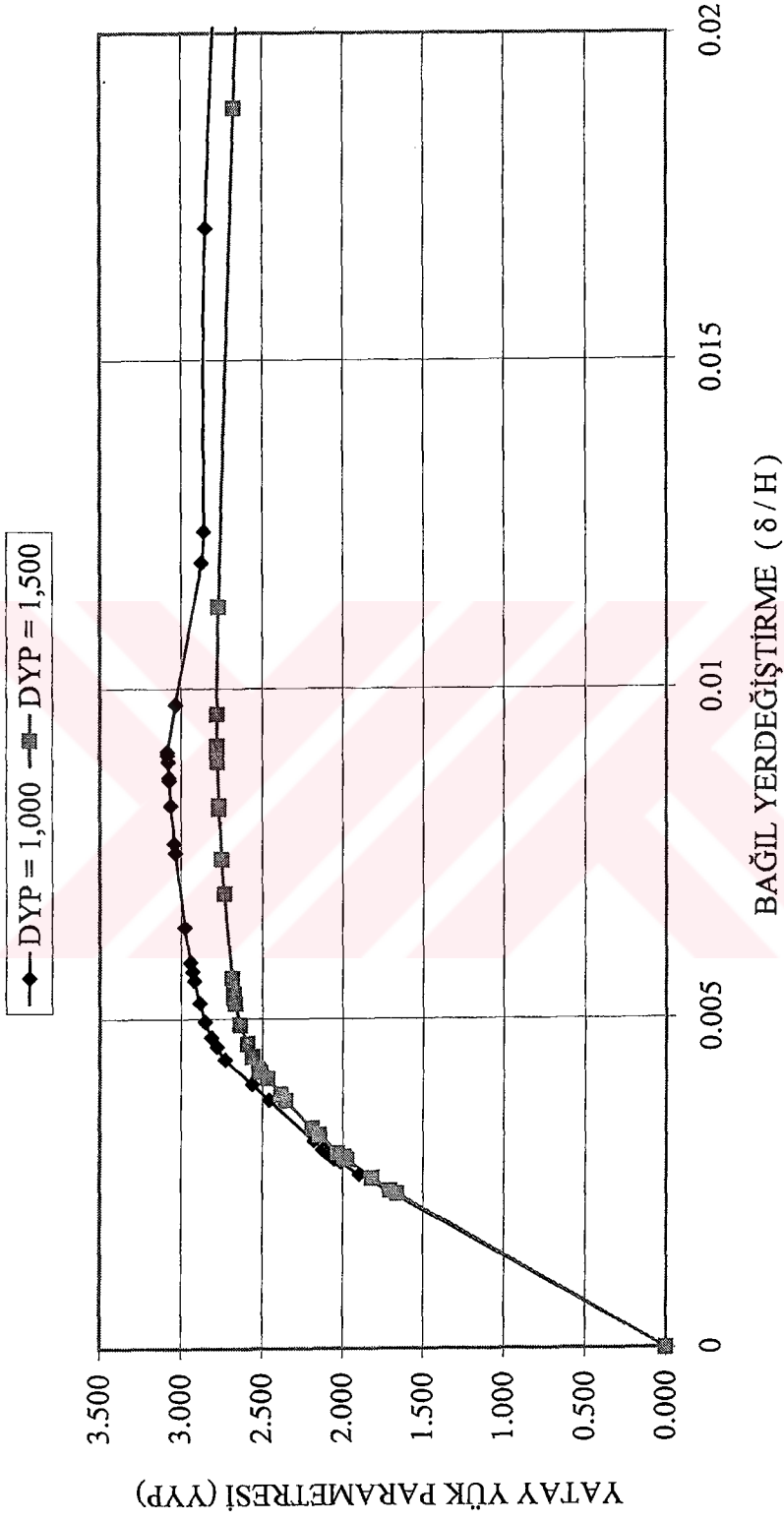


Şekil B.2 TSM 2 için Yatay Yük Parametresi - Bağıl Yerdeğiştirme Diyagramı

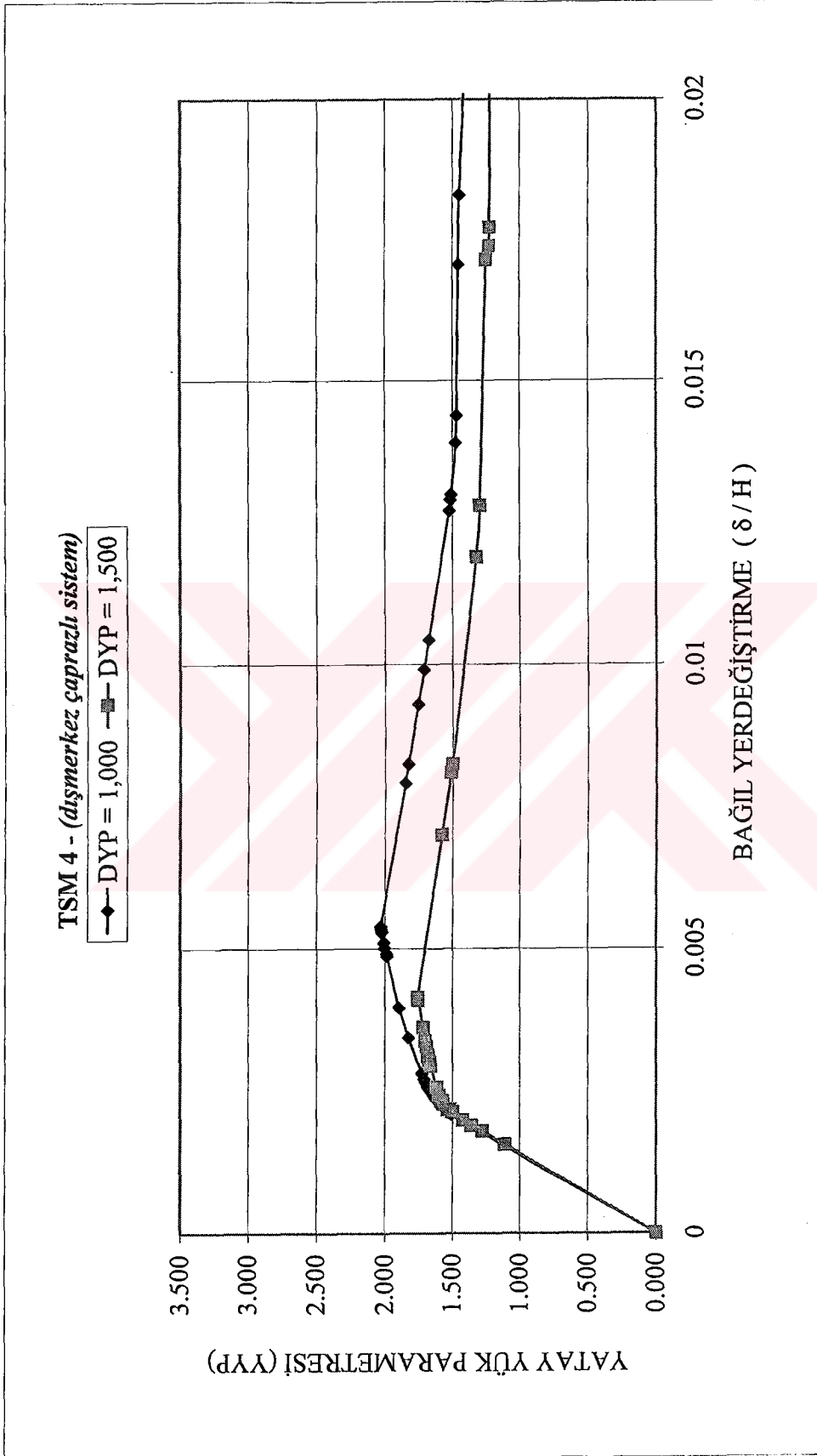


Şekil B.3 TSM 3 için Yatay Yük Parametresi - Bağıl Yerdeğiştirme Diyagramı

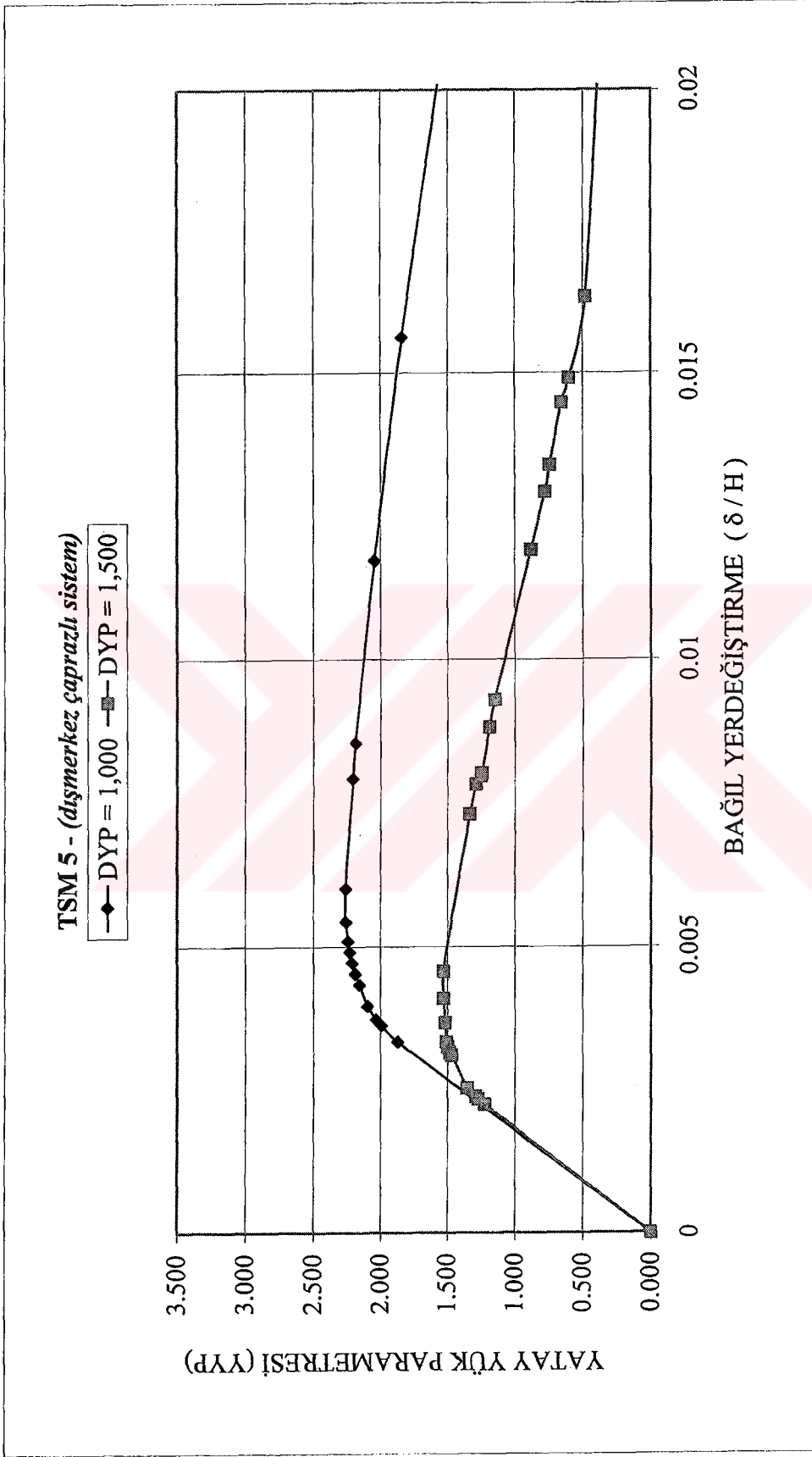
TSM 3a - (dışmerkez çaprazlı sistem - sola doğru etkiyen yatay yükler)



Şekil B.4 TSM 3a için Yatay Yük Parametresi - Bağıl Yerdeğiştirme Diyagramı



Şekil B.5 TSM 4 için Yatay Yük Parametresi - Bağıl Yerdeğiştirme Diyagramı



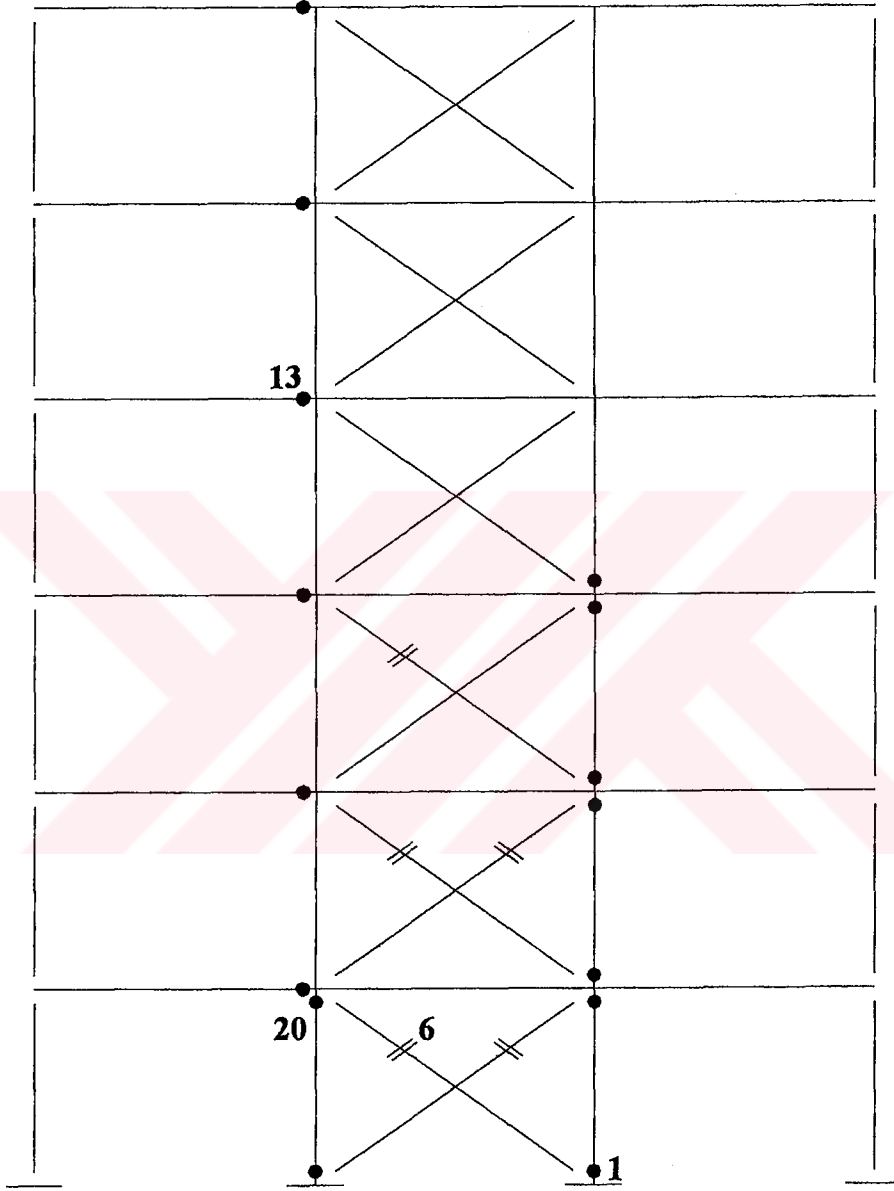
Şekil B.6 TSM 5 için Yatay Yük Parametresi - Bağıl Yerdeğiştirme Diyagramı

EK C

TAŞIYICI SİSTEM MODELLERİNDE PLASTİK KESİTLERİN OLUŞUMU

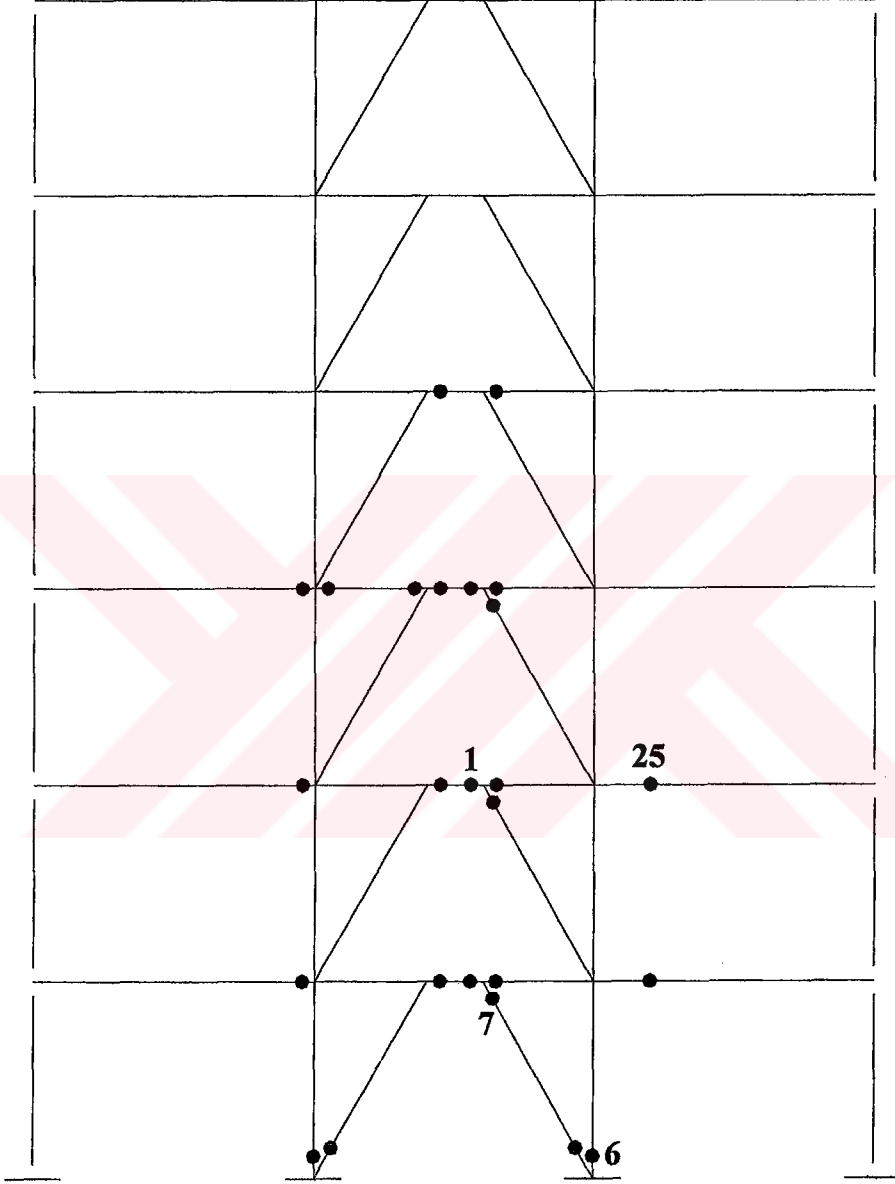


TSM 1 – (merkezi çaprazlı sistem)



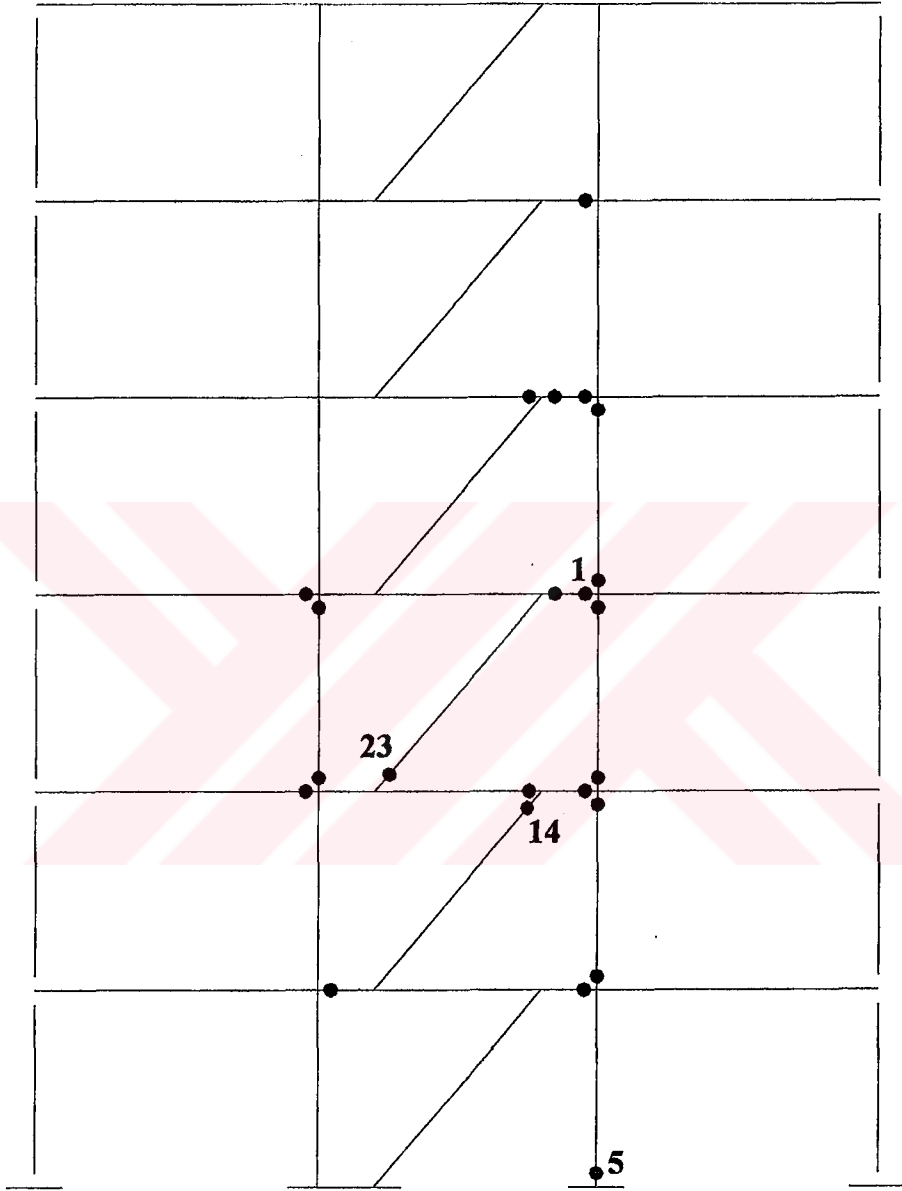
Şekil C.1 TSM 1 için Plastik Kesitlerin Oluşumu

TSM 2 – (dışmerkez çaprazlı sistem)



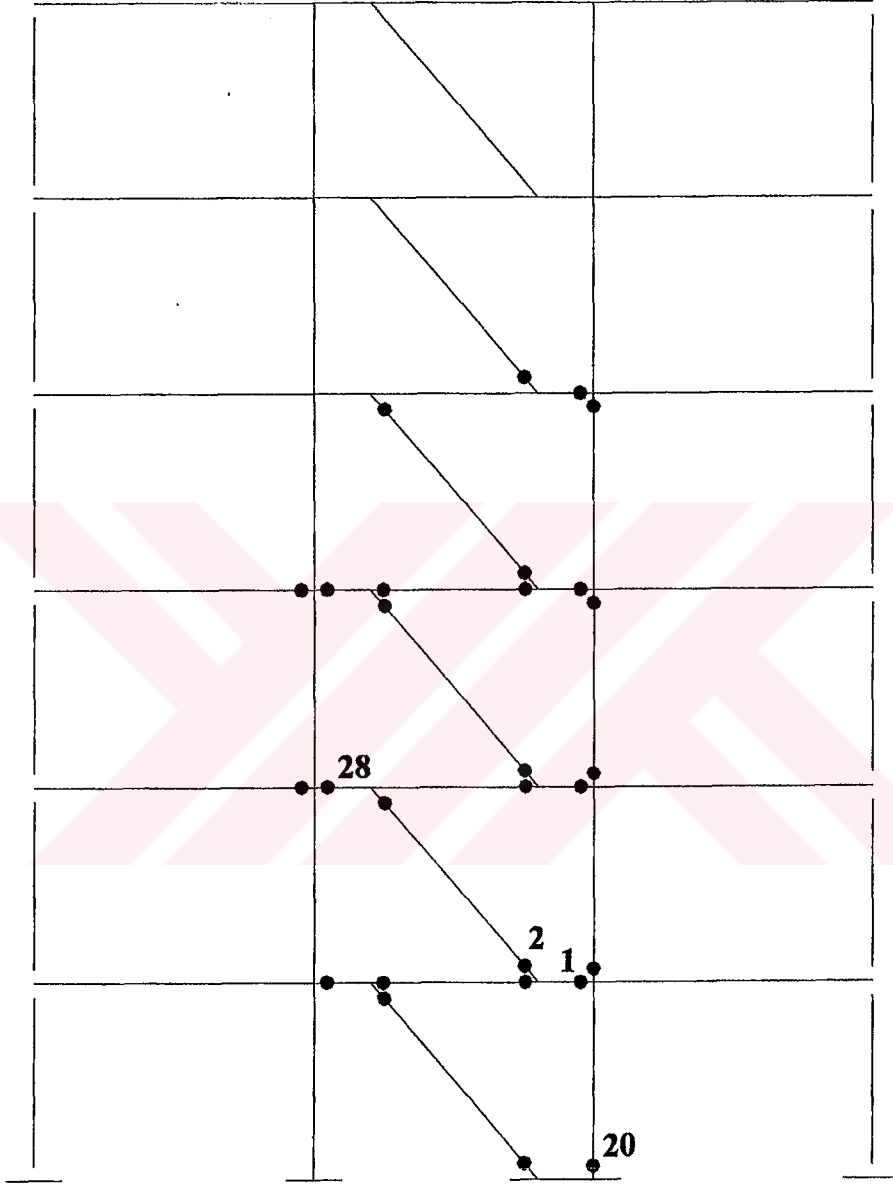
Şekil C.2 TSM 2 için Plastik Kesitlerin Oluşumu

TSM 3 – (dışmerkez çaprazlı sistem – sağa doğru etkiyen yatay yükler)



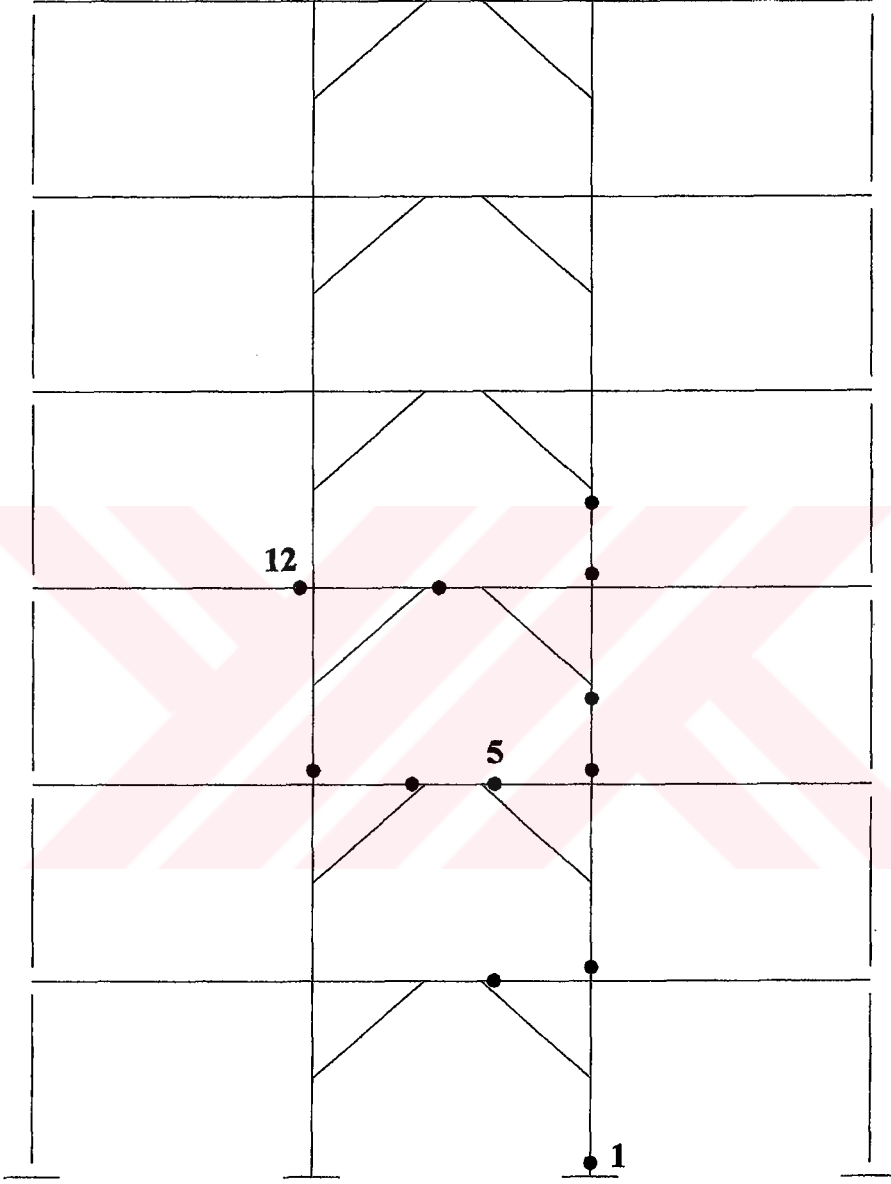
Şekil C.3 TSM 3 için Plastik Kesitlerin Oluşumu

TSM 3a – (dışmerkez çaprazlı sistem – sola doğru etkiyen yatay yükler)



Şekil C.4 TSM 3a için Plastik Kesitlerin Oluşumu

TSM 5 – (dışmerkez çaprazlı sistem)



Şekil C.6 TSM 5 için Plastik Kesitlerin Oluşumu

ÖZGEÇMİŞ

Bahadır ÖZCİHAN, 1976 yılında İzmir’de doğmuştur. İlkokulu Melih Özakat İlköğretim okulu, ortaokulu İzmir Bornova Anadolu Lisesinde tamamladıktan sonra, İzmir Fen Lisesini bitirmiştir. 1994 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümüne girmeye hak kazanmıştır. 1998 yılında İ.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümünü bitirdikten sonra, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsüne bağlı Yapı Anabilim Dalı, Yapı Analizi ve Boyutlandırma Programına girmeye hak kazanarak yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Halen özel bir kuruluştaki Proje Mühendisi olarak çalışmaktadır.

