

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME PERDELİ SİSTEMLERİN İTME ANALİZİ İÇİN YENİ BİR
SONLU ELEMAN**

DOKTORA TEZİ

Delal DOĞRU ORMANCI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

EYLÜL 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME PERDELİ SİSTEMLERİN İTME ANALİZİ İÇİN YENİ BİR
SONLU ELEMAN**

DOKTORA TEZİ

**Delal DOĞRU ORMANCI
(501062004)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet Işın SAYGUN

EYLÜL 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501062004 numaralı Doktora Öğrencisi Delal DOĞRU ORMANCI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BETONARME PERDELİ SİSTEMLERİN İTME ANALİZİ İÇİN YENİ BİR SONLU ELEMAN” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	Prof. Dr. Ahmet Işın SAYGUN İstanbul Teknik Üniversitesi	
Jüri Üyeleri :	Prof.Dr. Sumru PALA İstanbul Teknik Üniversitesi	
	Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK İstanbul Teknik Üniversitesi	
	Doç. Dr. Canan GİRGİN Yıldız Teknik Üniversitesi	
	Doç. Dr. Murat Serdar KIRÇIL Yıldız Teknik Üniversitesi	

Teslim Tarihi : 15 Haziran 2015
Savunma Tarihi : 18 Eylül 2015

Sevgili eşime ve kızıma,

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği programında, Sayın Prof. Dr. Ahmet Işın SAYGUN danışmanlığında gerçekleştirilen, bu doktora çalışmasında, betonarme perdelerin anizotropik malzeme davranışının esas alındığı bir sonlu eleman geliştirilmiştir. Bu sonlu elemanın kullanıldığı perde-çerçevelerden ve yalnız perdelerden oluşan sistemlere yük artım yöntemiyle itme analizi uygulanarak, göçmeye karşı gelen yatay yük parametresi değeri hesaplanmıştır. Çözümde yük artımının her adımında sonlu elemanın kesitte çekme veya basınç bölgesinde kalmış olmasına göre farklı eleman rijitlik matrisleri kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar farklı bir bilgisayar programı ile elde edilen çözümler ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasının oluşmasına bilgi ve deneyimleri ile katkıda bulunan, zor zamanlarda yol göstericim olan hocam, Sayın Prof. Dr. Ahmet Işın SAYGUN'a sabrı ve özverileri için sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu uzun süreçte motivasyonumu yüksek tutarak bana destek olan sevgili eşime en içten dileklerle teşekkür ederim.

Haziran 2015

Delal Doğru Ormancı
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgi	1
1.2 Konu İle İlgili Çalışmalar.....	2
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	8
2. PERDE ELEMANIN MALZEME ÖZELLİKLERİNİN	
 TANIMLANMASI	11
2.1 Betonun Özellikleri	11
2.2 Donatının Özellikleri.....	13
2.3 Betonarme Perde Özellikleri	14
2.3.1 Kesit zoru ve şekil değiştirme bağıntılarının tanımı	16
3. PERDE SONLU ELEMAN MODELİNİN TANIMI	19
3.1 Perde Elemana Ait Yerdeğiştirme Parametreleri	19
3.2 Yerdeğiştirme Fonksiyonları	23
3.3 Şekildeğiştirme Matrisinin Hesabı	28
3.4 Gerilme Matrisinin Hesabı	32
3.5 Malzeme Rijitlik Matrisinin Hesabı.....	32
3.6 Eleman Rijitlik Matrisinin Hesabı.....	34
3.7 Perde Sonlu Elemanda Uç Yerdeğiştirmelerinin Bulunması	44
3.8 Perde Sonlu Elemanda İç Kuvvetlerin Bulunması	45
4. PERDE ELEMANIN ELASTOPLASTİK DAVRANIŞININ	
 TANIMLANMASI	47
4.1 Basınçtan Çekmeye Geçmesi Durumu	47
4.2 Plastik Davranış Özelliklerinin Tanımlanması	48
4.3 Perde Düğüm Noktalarındaki Gerilmelerin Hesabı	52
4.4 Perde Elemana Uygulanan Yük Artım Yönteminin Prensipleri	53
5. SİSTEMİN OLUŞTURULMASINDA ÇUBUK ELEMANLARLA İLE	
 İLGİLİ BİLGİ	57
5.1 Kiriş Eleman Tanımı	57
5.2 Kolon Eleman Tanımı	59
6. BİLGİSAYAR PROGRAMI.....	63
6.1 Programın Yapısı ve Çalışma Düzeni	63
7. SAYISAL ÖRNEKLER	77
7.1 Düzlem Perde Modelinin + X Yönündeki İtme Analizi	77

7.2 Deneysel Çalışma ile Geliştirilen Bilgisayar Programı Çözümünün Karşılaştırılması	86
7.3 U Perde Modelinin Çözümlemesi	95
7.3.1 U perde modelinin + Y yönündeki itme analizi	96
7.3.2 U perde modelinin - Y yönündeki itme analizi	99
7.4 Bağ Kirişli Perde Modelinin +X Yönündeki İtme analizi.....	102
7.5 Bağ Kirişli Perde Modelinin +Y Yönündeki İtme analizi.....	106
8. SONUÇLAR VE İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR.....	111
KAYNAKLAR.....	115
ÖZGEÇMİŞ	117

SEMBOLLER

N	: birim perde genişliğine gelen basınç gerilmesi
h	: perde cidar kalınlığı
ρ_z	: düşey donatı oranı
ρ_x	: yatay donatı oranı
E_b	: tek eksenli gerilme hali için beton elastisite modülü
E_σ	: tek eksenli gerilme hali için çelik elastisite modülü
ν	: beton poisson oranı
ϵ_z	: boyuna donatı birim şekildeğiştirme
ϵ_b	: beton basınç dayanımına karşı gelen birim kısalma değeri
ϵ_σ	: çeliğin akma birim şekildeğiştirme
$\epsilon_{e\sigma}$	: eşdeğer birim şekildeğiştirme
γ_{xz}	: kayma şekildeğiştirme
ϵ_c	: betonun birim şekildeğiştirme değeri
ϵ_{co}	: beton basınç dayanımına karşı gelen birim şekildeğiştirme
ϵ_{cu}	: betonun ezilme şekildeğiştirme değeri
ϵ_{tu}	: çeliğin akma birim şekildeğiştirme
N_x	: x doğrultusunda birim perde genişliğindeki gerilme değeri
N_z	: z doğrultusunda birim perde genişliğindeki gerilme değeri
T_{xz}	: birim perde genişliğine gelen kayma gerilmesi
M_{xz}	: burulma momenti
M_z	: düzlem dışı eğilme momenti
ϵ_x	: enine doğrultudaki birim şekildeğiştirme değeri
ϵ_{zcek}	: betonun çekme birim şekildeğiştirme değeri
f_c	: betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{ct}	: betonun karakteristik çekme dayanımı
σ_a	: çeliğin akma sınır değeri
ν_i	: düşey yerdeğiştirme serbestliği
β_{xi}	: x eksenli etrafındaki dönme yerdeğiştirme serbestliği
β_{yi}	: y eksenli etrafındaki dönme yerdeğiştirme serbestliği
ϵ_{zi}	: düşey uzama şekildeğiştirme serbestliği
u	: eleman orta noktasının x doğrultusunda yatay yerdeğiştirme serbestliği
w	: eleman orta noktasının y doğrultusunda (perde düzlemine dik) yatay yerdeğiştirme serbestliği
β_z	: eleman orta noktasının sistem global z eksenli etrafındaki dönme yerdeğiştirme serbestliği
$[T_\theta]$	: master noktasının sistem eksen takımındaki yerdeğiştirmelerinden perde özel eksen takımındaki kenar ortalarının yerdeğiştirme bileşenlerine geçiş için kullanılan dönüştürme matrisi
$[T_m]$	: master noktasının sistem eksen takımındaki yerdeğiştirmelerinden perde özel eksen takımındaki kenar ortalarının yerdeğiştirme bileşenlerine geçiş için kullanılan taşıma matrisi
$[TR]$	: global eksen takımından eleman özel eksen takımına geçiş için

	dönüştürme matrisi
x_m, y_m	: master düğüm noktasının sistem eksen takımındaki koordinatları
x_o, y_o	: perde eleman kenar orta noktasının perde özel eksen takımındaki koordinatları
$l_i(x)$	: uçlardaki birim değerlere bağlı olarak lineer polinom
$f_i(x)$	: uçlardaki birim çökmeye karşı gelen kübik polinom
$g_i(x)$	: uçlardaki birim dönmeye karşı gelen kübik polinom
$[d]$	: düğüm noktası uç yerdeğiştirmeleri matrisi
$[U]$	: yerdeğiştirme matrisi
$[A_d]$	: serbestliklerin birim değerinde elemanda yerdeğiştirme bileşenlerinin yayılış fonksiyonları matrisi
$[D]$	: malzeme rijitlik matrisi
$[B]$	: birim yerdeğiştirme durumlarında şekildeğiştirme bileşenlerinin eleman üzerinde yayılışı gösteren matris
$[q]$	: sistem eksen takımındaki düğüm noktası yükleri matrisi
a	: perde elemanın yatay doğrultudaki boyutu
b	: perde elemanın düşey doğrultudaki boyutu
$[K]_{ij}$	: perde elemanın özel eksen takımındaki alt rijitlik matrisi
$[K]_{ij}$	: perde elemanın özel eksen takımındaki alt rijitlik matrisi
$[S]$	: sistem rijitlik matrisi
$[P]$	: ortak sistem eksen takımında düğüm noktası ve master noktasına etkileyen yükleri gösteren kolon matrisi
$[SIGEL]$	: perde sonlu elemanın özel eksen takımındaki gerilme matrisi
$[A]$	: ortak sistem eksen takımında perde elemanın elastik şekildeğiştirme sınırını aşan düğüm noktası plastik şekildeğiştirme parametresi
$[S_{dd}]$	: sistem ortak eksen takımındaki düğüm noktaları yerdeğiştirme bileşenlerinden dolayı, bu yerdeğiştirme bileşenleri doğrultusunda oluşacak uç kuvvetleri matrisi
$[S_{dA}]$	: plastikleşen düğüm noktasındaki ilave plastik düşey yerdeğiştirmelerden dolayı o noktanın üstündeki perde elemanlarının düğüm noktalarında oluşan uç kuvvetlerini matrisi
$[S_{Ad}]$	: düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden dolayı plastikleşen düğüm noktalarında oluşan uç kuvvet matrisi
$[S_{AA}]$	: dış yükler ve düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken, plastikleşen düğüm noktalarında oluşan düşey uç kuvvet matrisi
$[SIGELP]$	: plastikleşen düğüm noktasındaki plastikleşme parametresinin birim değerinden dolayı perde sonlu elemanın düğüm noktalarında oluşan gerilme matrisi
$[ELKA]$	: yük artımı için oluşan ilave kesit zoru matrisi
$[ELKT]$	: toplam kesit zoru matrisi
$NSCEK$	: başlangıçta yük artımı ile çekme oluşacağı başlangıçta tahmin edilen ve sistemde çekme elemanı olarak tanımlanan düğüm noktası numaraları
PAD	: herhangi bir adımda bir nokta veya kesitte akma sınırına ulaşılacak plastikleşmenin başlamasına karşı gelen yük artım oranı
PAZ	: herhangi bir adımda betonarme perde düğüm noktalarının basınç bölgesinden çekme bölgesine geçmesine karşı gelen yük artım oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Donatı çeliklerinin mekanik özellikleri.....	14
Çizelge 3.1a : Dikdörtgen sonlu elemana ait lineer yardımcı fonksiyonlar ve sınır koşulları	25
Çizelge 3.1b : Dikdörtgen sonlu elemana ait kübik yardımcı fonksiyonlar ve sınır koşulları	26
Çizelge 3.2a : $[B]_1$ matrisi	30
Çizelge 3.2b : $[B]_2$ matrisi	30
Çizelge 3.2c : $[B]_3$ matrisi	30
Çizelge 3.2d : $[B]_4$ matrisi	31
Çizelge 3.2e : $[B]_5$ matrisi	31
Çizelge 3.2f : $[B]_6$ matrisi.....	31
Çizelge 3.3a : $[K]_{11}$ eleman rijitlik matrisi	39
Çizelge 3.3b : $[K]_{12}$ eleman rijitlik matrisi.....	40
Çizelge 3.3c : $[K]_{13}$ eleman rijitlik matrisi	40
Çizelge 3.3d : $[K]_{14}$ eleman rijitlik matrisi.....	40
Çizelge 3.3e : $[K]_{15}$ eleman rijitlik matrisi	41
Çizelge 3.3f : $[K]_{16}$ eleman rijitlik matrisi.....	41
Çizelge 4.1 : $[S_{d\Delta}]$ matrisinin elemanları	50
Çizelge 7.1 : Donatı malzeme özellikleri	78
Çizelge 7.2 : Beton malzeme özellikleri.....	78
Çizelge 7.3 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.....	79
Çizelge 7.4 : Geliştirilen program çözümüne ait n_z değerleri.....	80
Çizelge 7.5 : Geliştirilen program çözümüne ait ϵ_z değerleri	81
Çizelge 7.6 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.....	83
Çizelge 7.7 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.....	84
Çizelge 7.8 : Deney numunesine ait donatı özellikleri	86
Çizelge 7.9 : Deney numunesine ait beton özellikleri	87
Çizelge 7.10 : Deney numunesine ait donatı oranları.....	88
Çizelge 7.11 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.....	90
Çizelge 7.12 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.....	93
Çizelge 7.13 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.....	97
Çizelge 7.14 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.....	101
Çizelge 7.15 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.....	103

Çizelge 7.16 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri	108
---	-----

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrisi	3
Şekil 1.2 : Yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrisi	3
Şekil 1.3 : Yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrisi	4
Şekil 1.4 : Kiriş elemanın sonlu elemanlarla idealleştirilmiş modeli	7
Şekil 2.1 : Hognestad beton modeli	12
Şekil 2.2 : Geliştirilmiş Kent ve Park beton modeli	12
Şekil 2.3 : Normal sargı donatılı betonun eğilmesinde $\sigma - \epsilon$ bağıntısı.....	13
Şekil 2.4 : Doğal sertlikte ve soğukta işlem görmüş ħeliklerin gerilme- şekildeğiştirme diyagramları.....	13
Şekil 2.5 : Geliştirilen programda kullanılan gerilme-şekildeğiştirme diyagramı	15
Şekil 3.1 : Perde elemanın eksen takımı.....	20
Şekil 3.2 : Perde elemanın köşe noktalarındaki yerdeğiştirme serbestlikleri	20
Şekil 3.3 : Perde elemanın üşt ve alt kenar orta noktalarındaki yerdeğiştirme serbestlikleri	20
Şekil 3.4 : Perde elemanın plandaki konumu	21
Şekil 3.5 : Master noktasının ve perde elemanın kenar orta noktasının konumu	22
Şekil 3.6 : Master noktasının ve perde elemanın kenar orta noktasının kesit zorları.....	23
Şekil 5.1 : Kiriş uç noktalarındaki yerdeğiştirme serbestlikleri	58
Şekil 5.2 : Kolon uç noktalarındaki yerdeğiştirme serbestlikleri	60
Şekil 6.1 : Ana program akış diyagramı	64
Şekil 6.2 : ELFIN11 alt programı akış diyagramı	66
Şekil 6.3 : PLAS1 alt programı akış diyagramı	70
Şekil 6.4 : PLAS2 alt programı akış diyagramı	73
Şekil 6.5 : SPLAS alt programı akış diyagramı.....	75
Şekil 6.6 : PLAS3 alt programı akış diyagramı	76
Şekil 7.1 : Perde modelinin geometrik özellikleri ve yük bilgisi	77
Şekil 7.2 : 24 elemanlı perde panelinin düğüm noktası numaraları	79
Şekil 7.3 : SAP 2000 bilgisayar programı ve geliştirilen bilgisayar programı çözümü sonucu elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri	82
Şekil 7.4 : 12 elemanlı perde panelinin düğüm noktası numaraları	83
Şekil 7.5 : 20 elemanlı perde panelinin düğüm noktası numaraları	84
Şekil 7.6 : Farklı eleman sayısındaki perde panellerinin çözümü sonucu elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.....	85
Şekil 7.7 : Deney numunesinin donatı yerleşimi ve geometrisi	87
Şekil 7.8 : Perde modeline ait bilgiler	88
Şekil 7.9 : Perde panelinin düğüm noktası numaraları	90
Şekil 7.10 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri	92
Şekil 7.11 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri	92
Şekil 7.12 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri	94
Şekil 7.13 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri	95

Şekil 7.14 : U perdenin plandaki yerleşim, geometrik özellikleri, düğüm noktası numaraları.....	95
Şekil 7.15 : U perdenin üç boyutlu görünümü ve düğüm noktası numaraları	96
Şekil 7.16 : İtme analizi sonucu tarafsız eksenin yeri.....	98
Şekil 7.17 : İtme analizi sonucu plastikleşme meydana gelen düğüm noktaları	98
Şekil 7.18 : Bu çalışmada ve SAP 2000 programında elde edilen yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinin karşılaştırılması	99
Şekil 7.19 : İtme analizi sonucu tarafsız eksenin yeri.....	100
Şekil 7.20 : İtme analizi sonucu plastikleşme meydana gelen düğüm noktaları	100
Şekil 7.21 : Bu çalışmada ve SAP 2000 programında elde edilen yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinin karşılaştırılması	102
Şekil 7.22 : Sistemin plandaki yerleşimi, geometrik özellikleri, düğüm noktası numaraları.....	102
Şekil 7.23 : İtme analizi sonucu tarafsız eksenlerin yerleri	105
Şekil 7.24 : İtme analizi sonucu plastikleşme meydana gelen düğüm noktaları	106
Şekil 7.25 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri	106
Şekil 7.26 : Sistemin plandaki yerleşimi, geometrik özellikleri, düğüm noktası numaraları.....	107
Şekil 7.27 : Bağ kirişli perdenin üç boyutlu görünümü ve düğüm noktası numaraları.....	107
Şekil 7.28 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri	109

BETONARME PERDELİ SİSTEMLERİN İTME ANALİZİ İÇİN YENİ BİR SONLU ELEMAN

ÖZET

Bu tezde, betonarme perdelerin anizotropik malzeme davranışı esas alınarak çözümlendiği bir sonlu eleman geliştirilmiştir. Çözümde sonlu elemanın, kesitte çekme veya basınç bölgesinde kalmış olmasına göre, farklı eleman rijitlik matrisleri kullanılmıştır. Betonarme perde modelinin yatay yükler altında doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir. Bu davranış çubuk sistemlerdeki plastik mafsallara hipotezinin benzeri olarak, düğüm noktaları arasında sonlu elemanın doğrusal elastik davrandığı, plastik şekil değiştirmelerin düşey plastik yerdeğiştirmeler olarak düğüm noktalarında toplandığı kabulü ile tanımlanmıştır. Bu kabule göre betonarme perdede plastikleşme, düşey doğrultudaki birim şekil değiştirmenin, elastik şekil değiştirme sınırına erişmesi ile gerçekleşir. Sonlu elemanın tanımında perdenin sadece kat hizalarında bölünmesinin çözüm için yeterli olduğu yer değiştirme fonksiyonları seçilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar farklı bir bilgisayar programı ile elde edilen çözümler ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Sekiz bölümden oluşan bu çalışmanın, birinci bölümünde; konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar anlatılmış, tez konusunun amacı ve kapsamı kısaca özetlenmiştir.

İkinci bölümde; beton ve donatının malzeme özellikleri tanımlanarak, geliştirilen sonlu eleman için yapılan malzeme ve şekildeğiştirme kabulleri anlatılmıştır. Çekme bölgesinde hesaplarda sadece çeliğin birim şekildeğiştirme değeri dikkate alınırken basınç bölgesinde hem çeliğin hem betonun birim kısalma değerleri gözönünde bulundurularak hesaplanan eşdeğer şekildeğiştirme değerinin elde edilme yöntemi anlatılmıştır. Betonda çatlak oluşmadan önce ve çatlak oluşuktan sonra hesaplarda kullanılacak kesit zoru şekildeğiştirme bağıntılarının tanımı yapılmıştır.

Üçüncü bölümde; geliştirilen sonlu elemanın eksen takımı, düğüm noktası sayısı, her düğüm noktasında kabul edilen yerdeğiştirme serbestlikleri tanımlanmış, 22 adet yerdeğiştirme serbestliğine bağlı olarak seçilen yerdeğiştirme fonksiyonları ve bu fonksiyonların oluşturulmasında kullanılan yardımcı fonksiyonlar verilmiştir. Şekildeğiştirme, gerilme ve malzeme rijitlik matrisleri ile virtüel iş teoreminden yararlanarak hesaplanan eleman rijitlik matrisleri tanımlanmıştır.

Dördüncü bölümde; perde sonlu elemanın elastoplastik davranışı tanımlanmış ve yük artım yönteminin prensipleri açıklanmıştır. Yük artımı ile elemanın köşe noktalarındaki düşey şekildeğiştirme bileşeninin çekme şekildeğiştirme sınırına veya akma şekildeğiştirme sınırına ulaştığı yük parametresi katsayısı hesaplanır ve bu iki değerden küçük olan yük artımında kullanılacak yük parametresi değeri olarak alınır. Perde eleman düğüm noktalarının düşey şekildeğiştirmesinin basınçtan çekmeye geçmesi durumunda sistem rijitlik matrisi yenilenerek çözüm tekrarlanır, düğüm noktasında akma oluşması durumunda ise sistem rijitlik matrisine eklenen bir satır ve bir sütun ile bilinmeyenler bulunur. Plastik mafsallara hipotezinin benzeri olarak geliştirilen teori bu bölümde detaylı olarak açıklanmaktadır.

Beşinci bölümde; perdelerin birbirine bağ kirişlerle bağlı olduğu veya perdelerle birlikte çerçevelerin bulunduğu sistemlerdeki çubuk elemanların uç serbestlik, eleman rijitlik ve gerilme matrislerinin oluşturulması anlatılmakta, bu sistemlerdeki yatay yük parametresi değerinin hesabı kısaca özetlenmektedir.

Altıncı bölümde; geliştirilen bilgisayar programının yapısı ve çalışma düzeni anlatılmış, perde sonlu elemanın elastoplastik hesabının betonarme malzeme davranışı gözönüne alınarak yapılabilmesi için lineer hesap yapan ana programa ilave edilen alt programlar ELFIN11, PLAS1, PLAS2, PLAS3 ve SPLAS olarak özetlenmiştir. ELFIN11'de perde eleman için hem basınç hem çekme elemanı eleman rijitlik matrisleri oluşturularak saklanır. PLAS1'de yük artımı ile elemanın basınçtan çekmeye geçme durumu veya düğüm noktalarında akma oluşma durumu değerlendirilir. 1. durumun gerçekleşmesi halinde sistem rijitlik matrisinin yeniden oluşturulduğu SPLAS'a, 2. durumun gerçekleşmesi halinde akma oluşan noktanın düşey yerdeğiştirmesinin denge denklemlerinin çözümünde dikkate alındığı PLAS2 alt programına dallanma olur. PLAS3 alt programında ise eleman kesit zorları elde edilmektedir.

Yedinci bölümde; geliştirilen bilgisayar programı ile betonarme perdeli sistemlerin yatay yükler altındaki davranışının incelendiği örnekler anlatılmaktadır. Bu örneklerin SAP2000 bilgisayar programı ile çözümlenmesi ve her iki programdan elde edilen yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinin karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Daha önce yatay yükler altındaki davranışın deneysel olarak çalışıldığı perde numuneleri, geliştirilen program ile modellenmiş ve deney sonuçları ile hesap sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Sekizinci bölümde; sonuçlar irdelenmiş, ileriye dönük olarak yapılacak çalışmalar açıklanmıştır.

A NEW FINITE ELEMENT FOR PUSH-OVER ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE SHEAR WALL SYSTEMS

SUMMARY

In this thesis, a finite element which has been analyzed based on anisotropic behavior of reinforced shear walls is developed. Element stiffness matrices were varied based on whether the element is in the tension or the compression zone of the cross-section. Nonlinear behavior of reinforced shear wall model is investigated under horizontal loads. This behavior is defined with a similar approach to plastic hinge assumption in frame structures that the finite element behaves linear elastic between joints and plastic deformations are concentrated on joints as vertical plastic displacements. According to this acceptance, plastic behavior of reinforced shear wall occurs when the vertical strain reaches elastic strain limit. In the definition of finite element, displacement functions are chosen considering that the partition of shear walls just at floor levels, are enough for solution. Results of this study are compared with the solution obtained from a different computer programme and experimental results.

In the first part of this study which is composed from eight parts, earlier studies on subject have been explicated, purpose and extend of thesis subject are briefly summarized.

In the second part; different internal force deformation formulas which are to be used in calculations before and after crack formation are defined. Concrete and rebar are assumed as ideal elastoplastic materials. In shear wall element, it is assumed that concrete and steel works together until crack occurrence at compression and tension zones. It is also accepted that after occurrence of crack, shear wall element moves to the tension zone and accordingly, whilst concrete become no longer active, only rebar proceeds to work. Vertical unit strain value (ϵ_z) which controls the yielding, is calculated differently in tension and compression zones. Whilst, only the strain of steel was taken into consideration in tensioning zone calculations, in compression zone, derivation of equivalent deformation value which has been calculated by considering both unit shortening of steel and concrete is explained. In compression zone, concrete and rebar are concertedly shortens. After reaching maximum unit shortening, concrete will not carry any more load, however, under compression rebar will continue shortening and carrying additional load. In this computer programme, only one unit shortening value is considered. This value is calculated considering maximum unit shortening value of steel is bigger then the one for concrete. In tensioning zone, however, only rebar will work after concrete cracks upon taking a load exceeding tensile strength. In this case, vertical unit strain value (ϵ_z) which controls yielding in tensioning zone is calculated in accordance with maximum unit elongation value of steel. This value will vary with the quality of steel material.

In the third part, coordinate system, joint number and displacement freedoms accepted at every joints of developed finite element are defined and displacement functions which are selected depending on 22 no's of displacement freedoms and

auxiliary functions which are used to generate these displacement functions are given. Shear wall element is defined with six joints. Four of these six joints are corner joints and remaining two are located on middle point of the top and bottom edges of the shear wall element. Number of unknown displacements at joints is four and these displacements are defined as vertical displacement freedom, rotation displacement freedom about x axis, rotation displacement freedom about y axis and vertical strain freedom. Considering freedom at joints as unknown enables frame elements to connect these joints. Number of unknown displacements at middle point of top and bottom edges is three and these are defined as horizontal displacement at x direction, horizontal displacement at y direction and rotation freedom about global z axis. Displacement matrix is a column matrix which has 22 terms. 16 of them are at corner joints and remaining 6 are at master joints. If the shear wall has a θ angle with x axis at x-y horizontal plane, transformation matrix is used to transform the displacement freedom from global coordinate system to local coordinate system. In order to obtain a correct result with finite element method, displacement function which corresponds to unit values of displacement parameters should be selected in accordance with characteristics of finite element. Displacement functions used in this study are formed by multiplying the polynomial which is linear dependent to variable x with the polynomial which is cubic dependent to variable z. Total number of displacement function terms shall be equal to the number of unknown displacements. Stiffness matrices of deformation, stress, material and element stiffness matrix which is calculated by utilising virtual work theorem are defined. Any k_{ij} term of this matrix demonstrates the internal forces which occur in the direction of unit displacement of joint i because of the unit displacement of joint j.

In the fourth part, elastoplastic behaviour of shear wall finite element is defined and principles of load increment method are explained. In every step of the calculation made by load increment method, ez values on joints are being checked and for every joint, load parameter coefficients which are required for the concrete to reach ultimate tensile strain value are defined. Smallest of these parameters gives the first joint which passes from compression to tension and corresponding horizontal load parameter. This horizontal load parameter is named as PAZ. In every load increment step, ez value is checked for all the joints of shear wall elements and load parameter coefficients required for the joints to reach elastic strain limit are calculated. Coefficient which has the smallest value amongst others will give plasticization joint and corresponding horizontal load parameter. This horizontal load parameter is named as PAD. Smaller of the PAD or PAZ shall be considered as load parameter to be used in load increment. When a compression shear wall element transforms in to a tension shear wall element, the system stiffness matrix shall also change. However, system stiffness matrix shall not completely be regenerated. In system stiffness matrix, contribution of element stiffness matrix of compression element shall be removed and contribution of element stiffness matrix of tension element shall be added. By this simplified approach, number and period of analysis are reduced. It is assumed that plasticization occurs on the points where yielding limit strain is exceeded and the elements above these points make different vertical displacements than the ones below. For the solution, system stiffness matrix shall not completely be regenerated, however, for each joint that the yielding limit strain is exceeded (joints that are plasticized) a row and a column shall be added to system stiffness matrix. It is clear that while deformations increase in plasticized points, stresses will remain constant. In order to reach a final solution, results of unit horizontal load parameters

shall be multiplied with horizontal load parameter and superposed with results from solution of vertical loads.

In the fifth part, formation of the joint freedom, element stiffness and stress matrices of frame elements of the systems in which shear walls are connected with transverse beams or frame systems with shear walls are explained and the calculation of the horizontal load parameter in these systems is briefly summarized.

In the part six, structure and operation principles of the developed computer program are explained and subprograms which are added to main program in order to make elastoplastic calculation of shear wall finite element considering material behaviour of reinforced concrete are summarized as ELFIN11, PLAS1, PLAS2, PLAS3 and SPLAS. For shear wall element, element stiffness matrices for both compression and tension elements are generated and saved in ELFIN11. In PLAS, with load increment, elements crossing from compression to tension or yielding formation at joints are evaluated; if the first case is actualised then it will be branching to subprogram SPLAS wherein system stiffness matrix is regenerated, if the second case is actualised then it will be branching to PLAS2 wherein vertical displacement of the yielding point is considered for the solution of equations of equilibrium. In PLAS3 subprogram, element internal forces are obtained.

In part seven, examples wherein behavior of reinforced concrete shear wall systems under horizontal loads are examined with developed computer program, are explained. Analyses of these examples with SAP2000 computer program and comparison of the horizontal load versus top horizontal displacement curve obtained from both programs are introduced. Number of steps to reach failure load, value of the failure load and top displacement which corresponds to this load will increase according to the horizontal and vertical element number that shear wall is divided into. Increase in the number of horizontal joints, enables a more exact determination of the position of neutral axis under major bending moments. To divide shear wall element into more elements will provide obtaining smaller displacements under the same load. Shear wall samples which have been experimentally studied previously are modelled with developed program and similar results are observed. In the light of the foregoing findings, it is acknowledged that applied finite element and calculation method give accurate and reliable results.

In part eight, results are scrutinized and prospective studies are explained. The finite element and calculation method developed in this study, provides much faster analysis with less elements in comparison with other programs which perform pushover analysis. Thus, developed program will be much beneficial to reduce the time spent for structural analysis of high rise buildings.

1. GİRİŞ

1.1 Genel Bilgi

Yapı sistemleri yönetmeliklere de dayanarak dayanıma göre tasarımın esas alındığı doğrusal yöntem ile çözümlenmektedir. Bu yöntemde yapıların doğrusal olmayan davranışı, deprem yüklerinin taşıyıcı sistem davranış katsayısına bölünerek azaltılması ile hesaplara dahil edilir (Celep, 2007). Özellikle deprem isteminin arttığı yüksek katlı binalarda ekonomik olmaktan uzak ve pratikte uygulaması pek mümkün olmayan eleman boyutları ve donatı oranları gerektiren bu durumun önüne geçmek için, son zamanlarda performansa dayalı tasarım yaklaşımları dikkate alınmaya başlanmıştır (Aydinoğlu, 2009). Taşıyıcı sistemde büyük hasarlara neden olan deprem enerjisinin, yapının elastik ötesi davranışı ve sünekliği ile sönmüldüğü kabul edilmektedir (Celep, 2007). Kiriş, kolon, perde elemanların birim şekildeğiştirme istemleri beton ve çeliğin birim şekildeğiştirme istemleri ile karşılaştırılarak kesit hasar düzeyleri belirlenir (DBYBHYA, 2009). Elemanların veya yapının toptan göçmesi elastik ötesi şekildeğiştirmelerin göçme şekildeğiştirme sınır değerlerine ulaşması ile meydana gelir. Yapı sünekliğine ve dayanımına büyük ölçüde etkisi olan perde duvarların doğru şekilde modellenmesi performansa dayalı tasarımda önemli rol oynamaktadır.

Betonarme perdelerin doğrusal olmayan davranışı plastik mafsallı orta dikme çubuk modeli, çok katmanlı kabuk eleman modeli ve sürekli sonlu eleman modeli olmak üzere 3 temel yaklaşım ile modellenir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı perde elemanın çubuk eleman olarak tanımlandığı orta dikme modelidir. Burada perde elemanın doğrusal olmayan davranışı çubuk elemandaki plastik mafsallı özellikleri ile tanımlanır. Perdelerde ve bilhassa birkaç perdenin birleşerek bir çekirdek sistemi oluşturması durumunda, perdenin bir bölgesinin plastikleşmeye başladığı yük eşiği ile perdenin tümüyle taşıma kapasitesini kaybettiği yük eşiği arasında önemli farklılık vardır. Orta dikme modelinde, bu aralıktaki rijitlik değişimi ve bunun yapı sisteminin bütününe etkisi dikkate alınamamaktadır. Çok katmanlı kabuk modelde

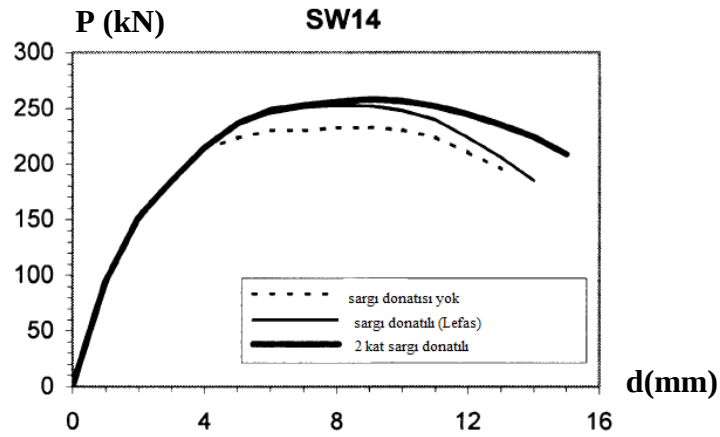
sonlu eleman, kompozit malzeme özelliklerinin dikkate alındığı farklı kalınlıktaki katmanlardan oluşan kabuk elemanlar ile tanımlanır. Betonarme elemanda donatı çeliği ve beton için farklı katmanlar tanımlanır. Sonlu eleman hesaplamalarında bir katman için eksenel şekildeğiştirme ve orta katman eğriligi belirlenir, diğer katmanların eğrilikleri ve şekildeğiştirmeleri düzlem kesit düzlem kalır prensibine göre hesaplanır. Şekildeğiştirmeler ile katmanlara atanan malzeme özellikleri dikkate alınarak gerilme değerleri bulunur (Fahjan ve diğ, 2011). Donatı ideal-elastoplastik model ile beton ise mikrodüzlem modeli ile temsil edilir (Bazant ve diğ, 2000). Üç eksenli gerilme altında lineer olmayan davranışın incelenemediği bu modelde farklı konumlardaki mikro düzlemler arasındaki ilişki, vektör cinsinden oluşturulan gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları ile sağlanır. Bu yöntem ile çözümde bilinmeyen sayısı çok artmakta buna bağlı olarak çözüm süresi uzamaktadır.

1.2 Konu İle İlgili Çalışmalar

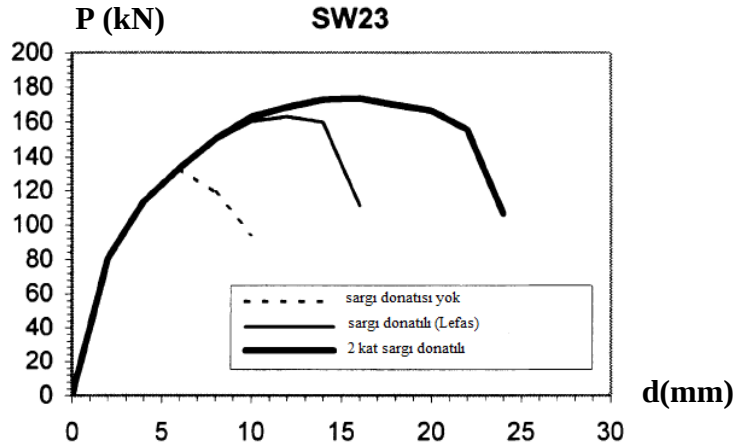
Bu bölümde perde sonlu elemanının yatay yükler altındaki davranışının incelendiği çalışmalar özetlenmiştir.

Kwan ve He (2001), sabit düşey yükler ve artan yatay yükler altında perde sonlu elemanın lineer olmayan davranışının incelendiği bir analitik model geliştirmişlerdir. Yük artımı uygulanarak yatay yük-tepe yer değiştirmesi eğrileri elde edilmiş, her yük artım adımında sekant rijitliği kullanarak direkt (doğrusal) iterasyon yöntemi ile analiz yapılmıştır. Sonlu eleman modelinde betonda çatlak oluşmadan önce ve sonra farklı gerilme şekildeğiştirme bağıntıları kullanılmıştır. Beton çatlak oluşmadan önce izotrop, çatlak oluşuktan sonra ise ortotrop malzeme olarak modellenmiştir. Beton çekme bölgesinde çatlak oluşumu nedeni ile, basınç bölgesinde ise ezilme veya parçalanma nedeni ile dayanımını kaybeder. Deney numuneleri ile bu deney numunelerinin 2 katı sargı donatısına sahip perde elemanların ve hiç sargı donatısı kullanılmamış perde elemanların analiz modelindeki çözümleri karşılaştırılarak başlık bölgelerinde kullanılan enine donatının sargı etkisinin önemi vurgulanmıştır. Çiroz ve etriye kullanılan perdelerde yatay donatı kullanılmayan perdelerle göre süneklik ve dayanımda önemli artışlar gözlenmiştir. Sargı donatısının oranındaki artış ise sünekliği arttırırken dayanımda fazla bir artış sağlamamıştır. Analiz modelinden elde ettikleri sonuçlar ile deney numunelerinden elde ettikleri sonuçları birbiri ile karşılaştırmışlardır. Düşey yük oranı ile yükseklik/genişlik oranının

süneklik artışına etkisinin de araştırıldığı çalışmada düşey yüklerin göreceli olarak daha az olduğu elemanlarda sargı donatısı kullanımının sünekliği önemli ölçüde arttırdığı, dayanıma katkısının ise önemli olmadığı gözlenmiştir. Düşey yüklerin fazla olduğu elemanlarda ise sargı donatısı kullanımı hem sünekliği hem de dayanımı büyük ölçüde arttırmaktadır. Yükseklik/genişlik oranının 1 olduğu ve düşey kuvvetin etkin olmadığı SW14 numunesine ait yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrileri Şekil 1.1’de, yükseklik/genişlik oranının 2 olduğu ve düşey yüklerin fazla olduğu SW23 numunesine ait yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrileri Şekil 1.2’de verilmektedir.



Şekil 1.1 : Yatay yük - tepe yerdeğiştirme eğrisi (Kwan ve He, 2001).

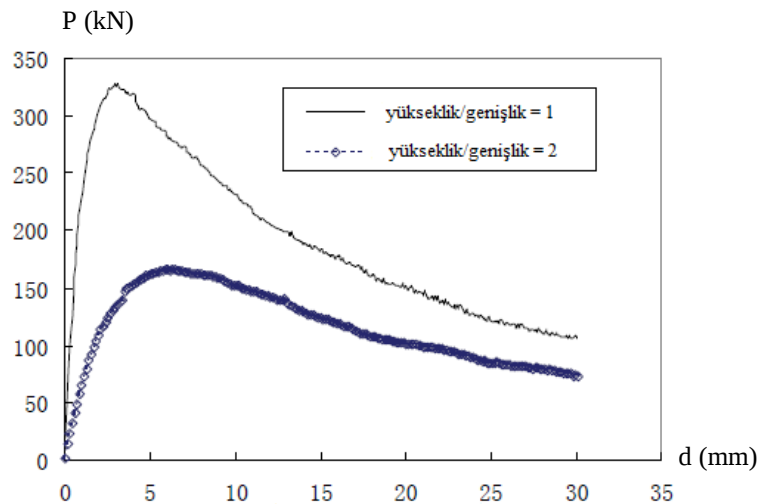


Şekil 1.2 : Yatay yük - tepe yerdeğiştirme eğrisi (Kwan ve He, 2001).

Ayrıca yatay yükler altında, eksenel kuvvet artışının sistemin sünekliğini azalttığı buna karşın dayanımını arttırdığı görülmüştür. Yükseklik/genişlik oranının fazla olduğu perdelerde şekil değiştirmelerin de fazla olmasına bağlı olarak, sargı donatısının süneklik artışına etkisi önem kazanmaktadır.

Xucheng ve Xiaoning (1995), sonlu elemanların artımsal iterasyon yöntemi ile hesabına alternatif olarak, lineer pekleşen malzeme kabulü ve yerdeğiştirme teorisinin esas alındığı bir çözüm geliştirmişlerdir. Bir kiriş elemanı 8 adet sonlu elemana bölünmüş, pekleşen malzeme kabulü ile elasto-plastik davranışı incelenmiştir. Başlangıç şekil değiştirmesi ve başlangıç gerilmesi yöntemleri ile her ardışık yaklaşımda lineer elastik katsayılar matrisinde değişiklik yapılmadan, sadece yük artımı yapılarak denklem sistemi çözülmüştür. Her iterasyon adımı denklemlerin Gauss integrasyon yöntemi ile çözüldüğü artımsal elasto-plastik sonlu eleman analizine göre, bu yöntemde iterasyon sayısı az, işlemler daha basit buna karşın yakınsama hızı fazladır.

Miao ve diğ. (2006), betonarme perde duvarların lineer olmayan davranışını kompozit malzeme prensiplerini dikkate alarak, çok katmanlı kabuk eleman modeli ile düzlem içi-düzlem dışı eğilme çifti ve düzlem içi eğilme-kesme çifti kesit zorları etkisinde incelemiştir. Çalışmada perde yüksekliği/plandaki uzunluk oranının yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrisine etkileri Şekil 1.3’de özetlenmektedir. Yatay yükler altında yükseklik/uzunluk oranının 1 olduğu kısa perdelerin bu oranının 2 olduğu uzun perdeler göre daha fazla taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Maksimum taşıma kapasitesinde kısa perdelerde basınç kolonu oluşmakta ve basınç ezilmesi ile birlikte diyagonal eksenî doğrultusunda yük taşıma kapasitesi hızla azalmaktadır. Bu durum kısa perdelerde gevrek göçme olarak tanımlanan kesme göçmesinin meydana gelmesi ile açıklanır.



Şekil 1.3 : Yatay yük - tepe yerdeğiştirme eğrisi (Miao ve diğ., 2006).

Kubin ve diğ. (2008), betonarme perde elemanını kabuk sonlu eleman ve çubuk eleman olarak ayrı ayrı modelleyerek, perdenin ve perdeye bağlanan kirişlerin düşey ve yatay yükler altındaki kesit tesirlerini incelemişlerdir. Bölüntü boyutları 160x160cm / 80x80cm / 40x40cm / 20x20cm olarak modellenen perde, kabuk eleman varsayımı ile çözülmüştür. Bölüntü boyutu 160x160cm olarak alınan perdenin taban moment değeri, bölüntü boyutunun 20x20cm olduğu perdenin moment değerinden yaklaşık olarak 10 kez daha fazla bulunmuştur. Bu farklılık perdenin üst kotunda perde elemanı boyunca tanımlanan bir kiriş ile önlenmiştir. Kirişin burulma rijitliğinin ve her iki eksen etrafındaki eğilme rijitliklerinin perde ile aynı alındığı çözümde kabuk elemanın bölüntü boyutunun/sayısının perdenin düzlem içi ve düzlem dışı momentini etkilemediği görülmüştür. Bu çözüm ile karşılaştırılmak üzere perde elemanı ortasından geçen düşey bir çubuk eleman olarak modellenmiş ve perde elemanın kesit özelliklerinin aynısı çubuk elemana atanmıştır. Perdeyi temsil eden orta dikmenin düzlem içindeki kirişler ile bağlantısı yatay rijit çubuk elemanlar ile sağlanır.

Khatri ve Anderson (1995), düzlem gerilmeli izoparametrik sonlu eleman kabulü ile çözüm yapan ADINA lineer olmayan sonlu elemanlar beton malzemeli bilgisayar programı ile daha önce deneysel testlerde kullanılan perde modellerini analiz etmişlerdir. Programda beton modeli düzlem gerilme elemanlarından (dikdörtgen levha eleman), donatı modeli ise lineer olmayan kafes elemanlardan yararlanılarak oluşturulur. Donatılar betonu temsil eden 4 noktalı düzlem gerilme elemanlarının ayrıtlarında toplanmış çubuk elemanlar olarak modellenir. Elemanda oluşan çekme kuvvetlerinin donatı tarafından karşılandığı, basınç kuvvetlerinin ise beton tarafından karşılandığı kabul edilir. Modeller monoton artan statik yükler ile yüklenerek, sonlu elemanın bölündüğü parça sayısının, perdede oluşturulan başlık bölgelerinin ve elemanın yükseklik/uzunluk oranının yatay yük-yer değiştirme eğrilerine etkileri araştırılmıştır. Analiz sonucunda yükseklik/uzunluk oranının 2'den büyük olduğu perde elemanlarda eğilme göçmesinin, yükseklik/uzunluk oranının 1'den küçük olduğu perde elemanlarda ise kayma göçmesinin etkili olduğu ve elemanın bölündüğü parça sayısı arttıkça sonuca yakınsaklığın arttığı belirlenmiştir. Başlık bölgesinde yüksek donatı oranı kullanılan perdelerde, henüz başlık bölgelerinin eğilme kapasitelerine ulaşmadan gövdede meydana gelen kesme kuvvetinden dolayı gevrek göçme meydana geldiği görülmüştür. Tersine gövde donatısının başlık

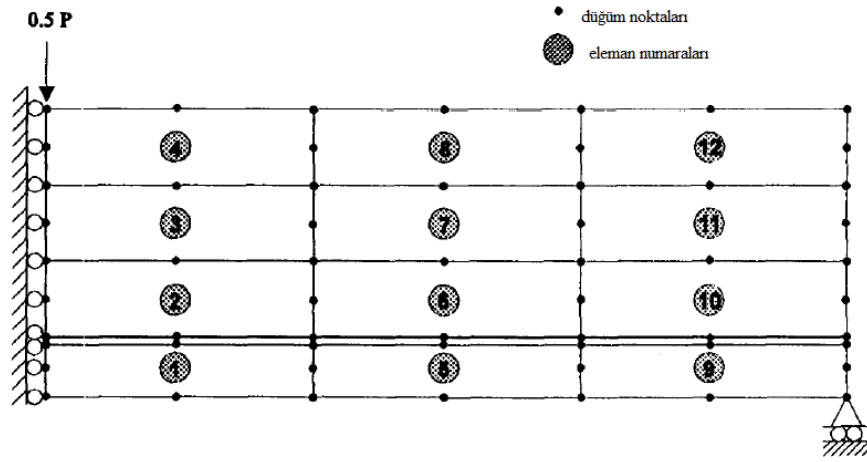
donatısından fazla kullanılması durumunda ise kesme kapasitesi yüksek, eğilme kapasitesi daha düşük olacağından perdede eğilme göçmesi görülür.

Akkaya (2006) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kiriş, yüksek kiriş, perde gibi elemanların monoton artan yükler altında ve düzlem gerilme durumunda doğrusal olmayan davranışı sonlu eleman yöntemi ile incelenmiştir. Beton artımlı iki eksenli ortotrop malzeme modeli ile donatılar ayrık ve yayılı donatı modelleri ile tanımlanır. İki eksenli toplam gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden eşdeğer bir eksenli gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilmiş ve ortotrop artımlı doğrusal elastik gerilme-şekil değiştirme bağıntıları oluşturulmuştur. Toplam gerilmeler ile şekil değiştirmelerin asal doğrultularının çakıştığı kabul edilmiş, yayılı çatlak modeli kullanılarak çekme yumuşaması ve çekme rijitliği ifadeleri de gerilme şekil değiştirme bağıntılarına dâhil edilmiştir. Beton dört noktalı dörtgen, donatı iki noktalı çubuk eleman olarak modellenmiş; her düğüm noktasında iki öteleme serbestlik derecesi alınarak, yerdeğiştirme fonksiyonları da bu kabule göre seçilmiştir. Eleman rijitlik matrisi Gauss sayısal integrasyon yöntemi ile oluşturulmuş ve denge denklemleri Newton Rapson iterasyon ve yük artımı yöntemi ile çözülmüştür. Sayısal çözümlerle elde edilen yük yerdeğiştirme eğrilerinin ve çatlak dağılımlarının deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Kwak ve Kim (2001) tekrarlı yükler altındaki perdelerin lineer olmayan davranışını, geliştirdikleri analitik model ile incelemişlerdir. Donatı lineer elastik ve lineer pekleşen malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Gerilme şekil değiştirme bağıntıları toplam şekil değiştirmelerin asal eksenleri kabul edilen ortotropi eksenleri doğrultusunda oluşturulmuştur. Çatlağın toplam asal şekil değiştirme doğrultusuna dik olduğu kabulü ile dönen çatlak modeli esas alınmıştır. Betonda çatlak oluştuktan sonra, donatıyı saran beton ve donatı arasındaki aderans nedeniyle meydana gelen çekme rijitliği ölçütünün dikkate alındığı ve alınmadığı analitik modellerden elde edilen yatay yük- yerdeğiştirme eğrileri deney numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Çekme rijitliğinin modellenmesi ile maksimum taşınabilecek yük değerinin deney sonuçlarına daha yakın olduğu gözlenmiştir.

Kwak ve Filippou (1997) dönen çatlak modelinin esas alındığı ve çekme rijitliğinin de hesaplara dâhil edildiği sonlu eleman modeli ile kiriş-kiriş, kiriş-kolon birleşim bölgelerini incelemişlerdir. Çalışmada ele alınan bir kiriş örneğinin sonlu eleman modeli Şekil 1.4’de verilmektedir. Beton ve çelik ayrı ayrı malzeme modelleri ile

tanımlanmış, betonarme yani homojen olmayan davranış beton ve çeliğin arasındaki aderans tanımı ile dikkate alınmıştır. Beton iki eksenli gerilme modeli ile çelik lineer elastik pekleşen donatı modeli ile anlatılmıştır. Çatlak dağılımının yükleme geçmişine bağlı olduğu ve çatlak doğrultusunun asal çekme şekil değiştirmeleri doğrultusuna dik olarak değiştiği kabul edilmiştir. Sonlu elemanın yeteri kadar elemana bölündüğü durumda veya donatı oranının yüksek olduğu elemanlarda çekme rijitliği ve aderans sıyrılma ölçütünün modelde ele alınmasının analiz sonuçlarını değiştirmedeği görülmüştür.



Şekil 1.4 : Kiriş elemanın sonlu elemanlarla idealleştirilmiş modeli (Kwak ve Filippou, 1997).

Lefas ve Kotsovos (1990) perde elemanların lineer olmayan davranışını Newton-Raphson metodu ve artık yük kriteri kullanarak artımsal lineer çözüm yöntemi ile incelemiştir; düşey yük, yükseklik/genişlik, düşey-yatay donatı oranlarının, uç bölgesi detaylandırmasının ve beton dayanımının perde davranışına etkilerini irdelemişlerdir. Donatı ve beton arasında tam aderansın kabul edildiği sonlu elemanda, beton 8 noktalı izoparametrik model ile, donatı ise sadece eksenel rijitliğin alındığı 3 noktalı çubuk model ile temsil edilmektedir. Donatıların beton elemanların ayrıtlarında toplandığı varsayılmıştır. Yükseklik/genişlik oranının 2 olduğu perdelerde düşey gövde donatısının % 4'den daha küçük olduğu durumda yatay yükler altında göçme dayanımının mevcut yönetmeliklerde öngörülenden daha büyük olduğu görülmüştür. Perde eğilme kapasitesinin artırılmasında, basınç bölgesindeki beton dayanımının artırılmasının gövde bölgesindeki yatay ve düşey donatı miktarının azaltılmasından daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Lefas ve Kotsovos (1990), deneysel çalışmaları ile yükleme geçmişinin ve onarım metotlarının betonarme perde duvarların dayanım ve deformasyon karakteristiklerine etkilerini incelemişlerdir. Perde duvarlar göçme meydana gelene kadar yüklenmiş ve göçme meydana geldikten sonra yk boşaltılmış, perdede onarım yapıldıktan sonra tekrarlı yüklemeler yapılmıştır. Bu yüklemeler altında dayanım, deformasyon, rijitlik değişimi ile enerji emilimi, şekildeğiştirme miktarı ve çatlak oluşumu incelenmiştir. Onarılan perdelerin yük taşıma kapasitesinin yükleme geçmişine ve beton dayanımına bağlı olmadığı grlmştr. Perdelerin onarılması rijitlik ve snekliklerinde azalmaya neden olmuştur. Onarımda kullanılan epoksinin dayanımı arttırmada önemli bir etkisinin olmadığı fakat kullanım limitleri içinde enerji emilimi ve rijitlik artışında etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Lefas ve diğ (1990) sabit düşey yük ve monoton artan yatay yükler altında 13 adet perde elemanda yaptıkları deneysel çalışmada göçme mekanizması ve dayanım karakteristiklerini incelemişlerdir. Eksenel yük, yükseklik/genişlik oranı, beton dayanımı ve gövde yatay donatı oranının perde elemanın davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Eksenel basınç kuvvetinin yatay yer değiştirmeyi azaltarak, yatay yük taşıma kapasitesini arttırdığı ve bu durumun yükseklik/genişlik oranının fazla olduğu elemanlarda daha belirgin olarak ortaya çıktığı grlmştr. Bilinenin aksine yatay gövde donatısının perde kesme kapasitesi değişiminde önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılmıştır.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Cengiz (2004), homojen, izotrop ve ideal elasto-plastik malzeme kabulü yaparak perdelerin sonlu elemanlarla modellendiği sistemlerin yük artımı yöntemi ile hesabını yapmıştır. ubuk sistemlerdeki plastik mafsallarda hipotezinin benzeri olarak plastik şekildeğiştirmelerin düğüm noktalarında toplandığı ve düğüm noktaları arasında sonlu elemanın lineer davrandığı bir model oluşturulmuş, yük artımı ile akma sınır değerine ulaşan her nokta için sistem rijitlik matrisi yeniden kurulmadan, matrise ilave edilen bir satır ve bir sütün ile çözüm yapılmıştır.

Bu çalışmada betonarme yani homojen olmayan malzeme davranışı esas alınarak zmlenen bir perde sonlu eleman modeli geliştirilerek, sabit düşey ve artan yatay yükler altında itme analizi sonucunda göçme yatay yük parametresi değeri ve bu yük parametresine karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri elde edilecektir. Geliştirilen

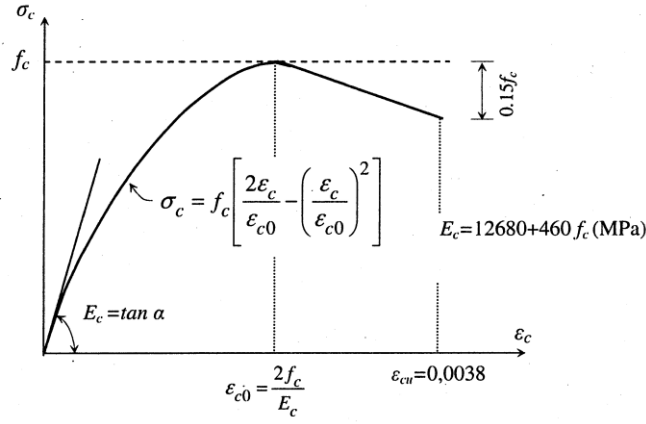
sonlu eleman modelinde Cengiz'in (2004) kullandığı elemanla aynı serbestlik derecesine sahip ve aynı yerdeğiştirme fonksiyonları ile tanımlanan sonlu elemanlar kullanılmakla birlikte, betonarme malzeme davranışı dikkate alınacak ve betonun çatlamış veya çatlamamış olmasına bağlı olarak farklı eleman rijitlik matrisleri tanımlanacaktır. Hem donatı hem beton ideal elasto-plastik malzeme olarak tanımlanır, beton ve çeliğin betonun çekme dayanımı aşılarak betonda çatlak oluşana kadar birlikte çalıştığı, betonda çatlak oluştuktan sonra betonun devre dışı kalarak sadece donatının çalıştığı kabul edilir. Yük artımının her adımında, perdelerin bağlandığı noktalarda düşey şekildeğiştirme bileşenleri bulunarak, bu şekildeğiştirmelerin pozitif veya negatif olması durumuna göre çekme veya basınç elemanı olarak kabul edilecek ve sistem rijitlik matrisinde değişiklik yapılacaktır. Bu değişiklik ilgili eleman için bir önceki adımdaki sistem rijitlik matrisinden basınç elemanı eleman rijitlik matrisinin çıkarılıp, çekme elemanı eleman rijitlik matrisinin eklenmesi ile yapılır. Betonarme eleman olarak tanımlanan perde modelinin yatay yükler altında lineer olmayan analizi yapılarak, elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri deneysel sonuçlar ve diğer bilgisayar programı sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

2. PERDE ELEMANIN MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TANIMLANMASI

2.1 Betonun Özellikleri

Betonarme elemanın davranışında beton davranışının doğru tanımlanması büyük önem taşımaktadır. Beton zamana bağlı davranış gösteren, çekme dayanımının düşük buna karşın basınç dayanımının yüksek olduğu gevrek bir malzemedir. Beton dayanımını ve şekildeğiştirme kapasitesini, yükleme hızı (ani-yavaş yükleme), yükleme tipi (tekrarlı yükleme-boşaltma), numune boyutları da dahil olmak üzere birçok faktör etkilemektedir. Beton basınç dayanımına karşı gelen birim şekildeğiştirme beton dayanımına göre çok az farklılık gösterirken, beton ezilme şekildeğiştirmesi ve buna bağlı olarak süneklik oranı geleneksel betonlarda, yüksek dayanımlı betonlara göre oldukça büyüktür. Beton tek eksenli, iki eksenli ve üç eksenli yükleme altında farklı kırılma çizgileri gösterir. İki eksenli basınç durumunda tek eksenli basınç durumuna göre dayanım %25 civarında artış gösterir. Betonarmede enine sargı donatısı kullanımının oluşturduğu yanal basınç ile hacim büyümesi ve iç çatlakların oluşması engellenir, buna bağlı olarak betonun dayanımı ve sünekliği artar. Betonun sargılı ve sargısız olması durumu farklı gerilme şekildeğiştirme bağıntıları ile anlatılır. Çok eksenli gerilme durumunun modellenmesinin karmaşık olması sebebi ile betonarme elemanların davranışları çeşitli kabullerle basitleştirilebilir (Akkaya, 2006). Eksenel kuvvetin az olduğu durumlarda genellikle perdeler gibi, enine genişleme az olacağından sargı donatısı aktif olarak çalışmaz ve gerilme bir eksenli olarak kabul edilebilir. Sargılı ve sargısız davranışın gözönüne alındığı Hognestad, Geliştirilmiş Kent ve Park, Sheikh ve Üzümeri, Mander, Saatçioğlu-Ravzi başta olmak üzere birçok beton modeli geliştirilmiştir.

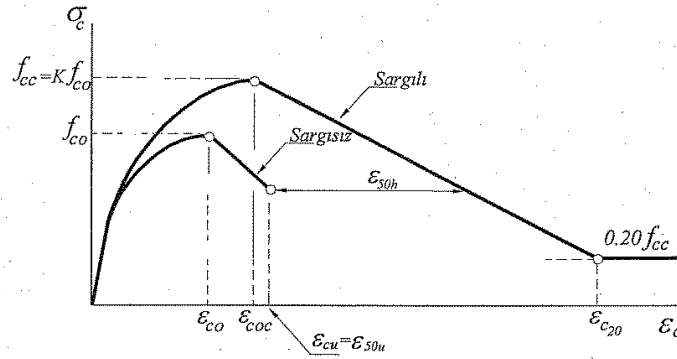
Hognestad'ın sargısız beton için geliştirdiği modele ait gerilme şekildeğiştirme diyagramı Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1 : Hognestad beton modeli (Hognestad, 1951)

Bu modelde gerilme şekildeğiştirme bağıntıları basınç dayanımına kadar 2. derece parabol ile basınç dayanımından sonra ise doğrusal olarak tanımlanır. Beton elastisite modülü $E_c = 12680 + 460 \times f_c$ formülü ile ifade edilmektedir. Betonun ezilme şekildeğiştirme değeri 0.0038 olup, basınç dayanımına karşı gelen birim şekildeğiştirme ise dayanıma bağlı olarak artmaktadır (Doğangün, 2005).

Geliştirilmiş Kent ve Park modeline ait gerilme şekildeğiştirme grafikleri sargılı ve sargısız beton modelleri için Şekil 2.2'de verilmektedir.



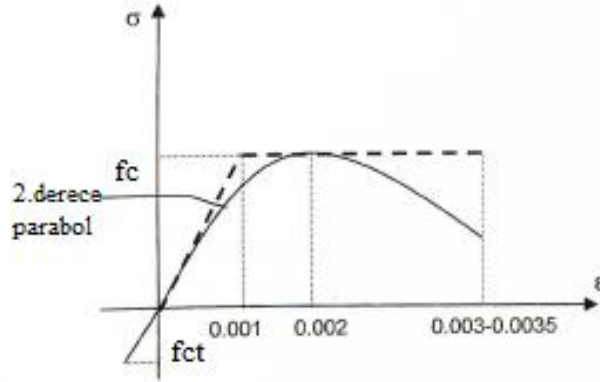
Şekil 2.2 : Geliştirilmiş Kent ve Park beton modeli (Durgun, 2012).

Sargılı beton yanal donatı içinde kalan çekirdek kısım ile sargısız beton ise çekirdek dışında kalan kabuk beton ile anlatılmaktadır. Sargılı betonun basınç dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesi sargısız betona göre daha fazla olup, bu durum gerilme şekildeğiştirme bağıntılarında K katsayısı olarak tanımlanan ve denklem 2.1 ile ifade edilen dayanım artırma faktörü ile dikkate alınmaktadır.

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{ywk}}{f_{co}} \quad (2.1)$$

Burada ρ_s sargı donatısının hacimsel oranını, f_{ywk} sargı donatısının minimum akma dayanımını göstermektedir (Durgun, 2012).

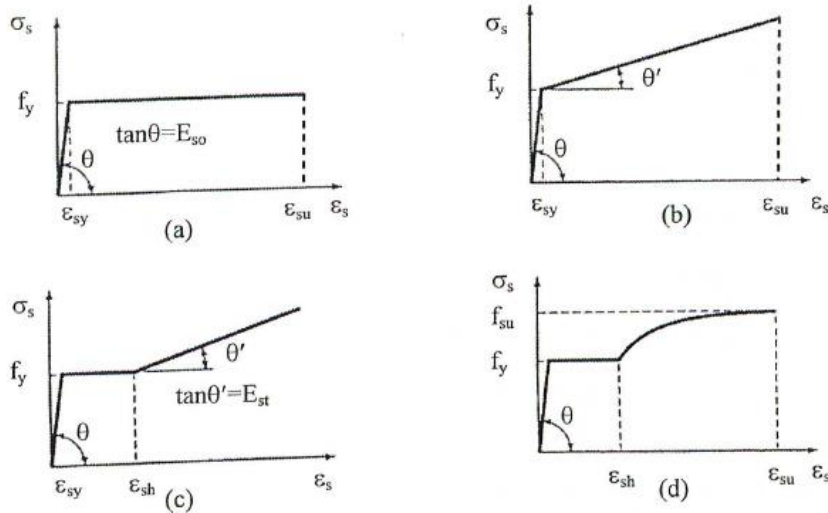
Bu çalışmada, beton için ideal elastoplastik malzeme kabulü yapılmıştır. Bu kabule göre betonda Şekil 2.3'de gösterildiği gibi, 2. derece parabolün başlangıç teğeti ile yatay teğetinin kesim noktasındaki şekil değiştirme değeri 0.001, beton dayanımına karşı gelen birim kısalma değeri olarak tanımlanabilir (Cengiz, 2004)



Şekil 2.3 : Normal sargı donatılı betonun eğilmesinde $\sigma - \epsilon$ bağıntısı (Cengiz, 2004).

2.2 Donatının Özellikleri

Betonarme çeliklerine ait tipik gerilme şekil değiştirme diyagramları Şekil 2.4'de verilmektedir.



Şekil 2.4 : Doğal sertlikte ve soğukta işlem görmüş çeliklerin gerilme şekil değiştirme diyagramları (ASCE, 1982).

Çelik akma dayanımına kadar doğrusal elastik davranır ve gerilme şekil değiştirme grafiğinin eğiminden elastisite modülü çelik kalitesinden bağımsız olarak tüm

Çelikler için aynı kabul edilir. Bu değer TS 500'de 2×10^5 olarak belirlenmiştir. Belirgin bir akma sahanlığı görülmeyen soğukta işlem görmüş çeliklerde 0.002 birim şekildeğiştirmeye karşılık gelen gerilme değeri akma dayanımı olarak tanımlanır. Çeliğin akma dayanımına ulaşması ile birlikte yaklaşık olarak gerilmenin sabit kaldığı buna karşın şekildeğiştirmelerin arttığı akma sahanlığı olarak adlandırılan geniş bir plato oluşur. Akma bölgesinden sonra şekildeğiştirmelerle birlikte gerilmelerin de arttığı, başlangıç eğimine göre oldukça az bir eğimle yükselen pekleşme bölgesi gelir. Bu bölge her elik kalitesi için farklı olan kopma şekildeğiştirme değerine ulaşılması ile birlikte sona erer. Donatı eliğinin kalitesine göre akma dayanımı, akma dayanımı ve kopma dayanımına karşı gelen şekildeğiştirmeler izelge 2.1'de gösterilmektedir.

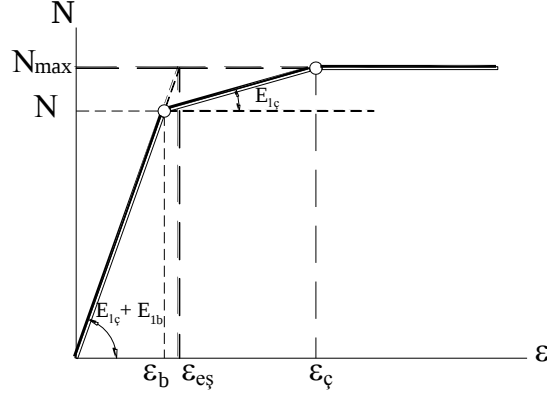
Bu çalışmada, elik için ideal elastoplastik malzeme kabulü yapılmıştır.

Çizelge 2.1 : Donatı eliklerinin mekanik zellikleri (TS500, 2000).

Mekanik zellikler	Donatı ubukları			Hasır Donatı		
	Doğal Sertlikte			Soğukta İşlem Görmüş		
	S220a	S420a	S500a	S420b	S500bs	S500bk
Minimum akma dayanımı (MPa)	220	420	500	420	500	500
Minimum kopma dayanımı (MPa)	340	500	550	550	550	550
Minimum kopma uzaması	0.18	0.12	0.12	0.10	0.08	0.05

2.3 Betonarme Perde zellikleri

Basınç bölgesinde donatı ve beton birlikte hareket ederek kısıalma göstereceklerdir. Beton maksimum birim kısıalma değerine ulaştıktan sonra devre dışı kalarak ilave yk taşımayacak, donatı basınç etkisi ile kısıalmaya ve ilave yük taşımaya devam edecektir. Geliştirilen programda basınç bölgesi için tek bir birim kısıalma değeri dikkate alınmaktadır. Basınç bölgesinde akma oluşmasını kontrol eden düşey birim şekildeğiştirme ϵ_z değeri çeliğin maksimum birim kısıalma değerinin betondan daha büyük olması gözönüne alınarak hesaplanmıştır. ϵ_z değerinin hesaplanma biçimi şekil 2.5 ve denklem 2.2, 2.3, 2.4 ile ifade edilmektedir.



Şekil 2.5 : Geliştirilen programda kullanılan gerilme-şekildeğiştirme diyagramı.

$$E_{1b} = \frac{E_b}{1-\nu^2} \times (1-\rho_z) \times h ; E_{13} = E_3 \times \rho \times h \quad (2.2)$$

$$N = (E_{13} + E_{1b}) \times \varepsilon_z \quad \varepsilon_z < \varepsilon_b \quad (2.3a)$$

$$N = (E_{13} + E_{1b}) \times \varepsilon_b + E_{13} \times (\varepsilon_z - \varepsilon_b) \quad \varepsilon_b < \varepsilon_z < \varepsilon_3 \quad (2.3b)$$

$$N_{\max} = (E_{13} + E_{1b}) \times \varepsilon_b + E_{13} \times (\varepsilon_3 - \varepsilon_b) \quad \varepsilon_z = \varepsilon_3 \quad (2.3c)$$

$$N_{\max} = (E_{13} + E_{1b}) \times \varepsilon_{e\varphi} \quad \varepsilon_b < \varepsilon_{e\varphi} = \varepsilon_z < \varepsilon_3 \quad (2.3d)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{e\varphi} = \frac{N_{\max}}{E_1} \quad (2.4)$$

Burada

h : perde cidar kalınlığı,

ρ_z : düşey donatı yüzdesi,

N : birim perde genişliğine gelen basınç gerilmesi,

E_b : tek eksenli gerilme hali için beton elastisite modülü,

$E_ç$: tek eksenli gerilme hali için çelik elastisite modülü,

ν : beton poisson oranı

ε_b : beton basınç dayanımına karşı gelen birim kısalma değeri,

$\varepsilon_ç$: çeliğin akma birim şekildeğiştirmesi,

ε_z : boyuna donatı birim şekildeğiştirmesi,

$\varepsilon_{eş}$: eşdeğer birim şekildeğiştirme,

olarak tanımlanmaktadır.

Çekme bölgesinde ise betonun çekme dayanımının aşılmasıyla betonun çatlaması ile birlikte sadece donatı çalışacaktır. Bu durumda çekme bölgesinde akma oluşmasını kontrol eden düşey birim şekildeğiştirme ε_z değeri çeliğin maksimum birim uzama değerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu değer çelik malzeme kalitesine göre değişiklik gösterecektir. Çalışmada kesme kuvvetinin ve burulma momentinin malzemenin lineer olmayan davranışına etkisi terk edilmektedir.

2.3.1 Kesit zoru ve şekildeğiştirme bağıntılarının tanımı

Perde elemanda basınç bölgesinde ve çekme bölgesinde betonda çatlak oluşana kadar, beton ve çeliğin birlikte çalıştığı varsayılmıştır. Bu duruma ait gerilme şekil değiştirme bağıntıları aşağıda özetlenmektedir.

Perde sonlu elemanında çatlamamış kesitte oluşacak iç kuvvetler, beton ve çeliğin ortak etkisi göz önüne alınarak,

$$N_z = \frac{E_b h}{1-\nu^2} (1-\rho_z) \varepsilon_z + \frac{E_b h}{1-\nu^2} \nu \varepsilon_x + E_s h \rho_z \varepsilon_z \quad (2.5)$$

$$N_x = \frac{E_b h}{1-\nu^2} (1-\rho_x) \varepsilon_x + \frac{E_b h}{1-\nu^2} \nu \varepsilon_z + E_s h \rho_x \varepsilon_x \quad (2.6)$$

$$T_{xz} = \frac{E_b h}{1-\nu^2} \left(\frac{1-\nu}{2} \right) \gamma_{xz} \quad (2.7)$$

$$M_z = \frac{E_b h^3}{12(1-\nu^2)} \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{A_s}{4} (h-2h')^2 \left(E_s - \frac{E_b}{(1-\nu^2)} \right) \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.8)$$

$$M_{xz} = \frac{E_b h^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{1-\nu}{2} \right) \left(-2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) \quad (2.9)$$

denklemleri ile tanımlanır.

Betonda çatlak oluşuktan sonra, perde sonlu elemanın çekme bölgesine geçtiği buna bağlı olarak betonun devre dışı kalarak, sadece donatı çeliğinin çalıştığı kabulü yapılmıştır. Bu kabule göre kesit zoru şekil değiştirme bağıntıları,

$$N_z = (E_s h \rho_z) \varepsilon_z \quad (2.10)$$

$$N_x = \frac{E_b h}{1-\nu^2} (1-\rho_x) \varepsilon_x + E_s h \rho_x \varepsilon_x \quad (2.11)$$

$$T_{xz} = \frac{E_b h}{1-\nu^2} \left(\frac{1-\nu}{2} \right) \gamma_{xz} \quad (2.12)$$

$$M_z = \frac{A_s}{4} (h-2h')^2 E_s \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.13)$$

$$M_{xz} = 0 \quad (2.14)$$

denklemleri ile tanımlanır.

N_x ve T_{xz} iç kuvvetlerinin hesabında çekme bölgesinde de beton katkısı ihmal edilmemiştir. Burada N_x çatlak doğrultusuna paralel normal kuvveti, T_{xz} ise kesitte oluşan kesme kuvvetini gösterir.

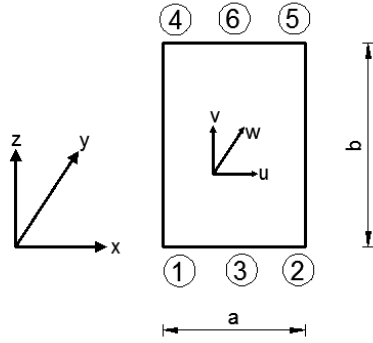
3. PERDE SONLU ELEMAN MODELİNİN TANIMI

Sonlu elemanlara bölünen bir sürekli sistemde elemanların yalnız düğüm noktalarından birbirine bağlı olduğu kabul edilir. Eleman yüzeylerinin yer değiştirmeleri bu düğüm noktalarındaki yerdeğiştirme bileşenleri ve bunların koordinat değişkenlerine göre bazı türevlerinden oluşan uç yerdeğiştirme parametrelerinin birim değerlerine karşı gelen yerdeğiştirme fonksiyonlarının lineer kombinezonu olarak belirlenebilir. Bu şekildeğiştirme durumunun yalnız düğüm noktalarının uç yerdeğiştirme parametreleri doğrultusundaki uç kuvvetlerinden oluştuğu düşünülmektedir. Bu fiktif uç kuvvetleri gerçekte eleman kenar kesitleri boyunca etkiyen yayılı gerilme bileşenlerini ifade etmektedir. Sisteme gelen yüklerin de yalnız düğüm noktalarından etkiyebileceği kabulü sonucunda yayılı dış etkiler düğüm noktalarına etkiyen uç kuvvetlerine dönüştürülür. Uç kuvvetleri ve uç yerdeğiştirmeleri arasındaki matris bağıntıları, birim yerdeğiştirme durumlarını tanımlayan yerdeğiştirme fonksiyonlarından ve sistemin bütünü göz önüne alınıp enerji teoremlerinden yararlanılarak elde edilebilir (Saygun, 1974).

3.1 Perde Elemana Ait Yerdeğiştirme Parametreleri

Bu çalışmada, (Cengiz, 2004)' de geliştirilmiş ve perde - çerçeve taşıyıcı sistemli çok katlı yapıların davranışını iyi temsil ettiği gözlenmiş perde elemanlar kullanılacaktır.

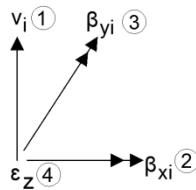
$x - z$ düşey düzlemindeki perde elemanın eleman özel eksen takımı doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Burada a perde elemanın uzunluğunu, b yüksekliğini ifade etmektedir.



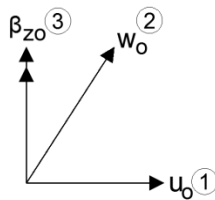
Şekil 3.1 : Perde elemanın eksen takımı.

u ve v perde elemanın düzlemi içindeki yerdeğiştirme bileşenlerini, w ise perde elemanın düzlemine dik yerdeğiştirme bileşenini gösterir. Perde eleman 6 düğüm noktası ile tanımlanmaktadır, bu düğüm noktalarının 4'ü perde elemanın köşe noktalarını, 2'si ise perde elemanın üst ve alt kenar orta noktalarını ifade etmektedir.

Köşe noktalarında bilinmeyen uç yerdeğiştirmeleri sayısı 4 olup; her düğüm noktası için, $[d_1, d_2, d_3, d_4]_i = [v_i, \beta_{xi}, \beta_{yi}, \epsilon_{zi}]$ olarak tanımlanmıştır. Üst ve alt kenar orta noktalarında bilinmeyen uç yerdeğiştirmeleri sayısı 3 olup; $[d_1, d_2, d_3] = [u_o, w_o, \beta_{zo}]$ olarak alınmıştır. Perde elemanın köşe noktalarındaki yerdeğiştirme serbestlikleri Şekil 3.2'de, kenar orta noktalarındaki yerdeğiştirme serbestlikleri Şekil 3.3'de doğrultuları ile birlikte ifade edilmektedir.



Şekil 3.2 : Perde elemanın köşe noktalarındaki yerdeğiştirme serbestlikleri.



Şekil 3.3 : Perde elemanın üst ve alt kenar orta noktalarındaki yerdeğiştirme serbestlikleri.

Burada,

v_i : düşey yerdeğiştirme serbestliğini

β_{xi} : x eksenini etrafındaki dönme yerdeğiştirme serbestliğini

β_{yi} : y eksenini etrafındaki dönme yerdeğiştirme serbestliğini

ε_z : düşey uzama şekildeğiştirme serbestliğini

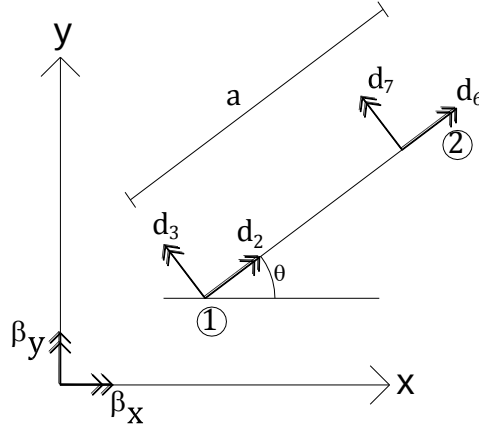
u : eleman orta noktasının x doğrultusunda yatay yerdeğiştirme serbestliğini

w : eleman orta noktasının y doğrultusunda (perde düzlemine dik) yatay yerdeğiştirme serbestliğini

β_z : eleman orta noktasının sistem global z eksenini etrafındaki dönme yerdeğiştirme serbestliğini

temsil etmektedir.

Perdenin (1-2) alt veya (4-5) üst kenarının x-y yatay düzleminde x eksenine göre Şekil 3.4'de gösterildiği gibi θ açısı yapması halinde, global eksen takımındaki v_y , β_x , β_y , ε_z doğrultularındaki yerdeğiştirme serbestliklerinden, eleman özel eksen takımındaki serbestliklere geçiş denklem 3.2'de verilen dönüştürme matrisi ile yapılabilir.



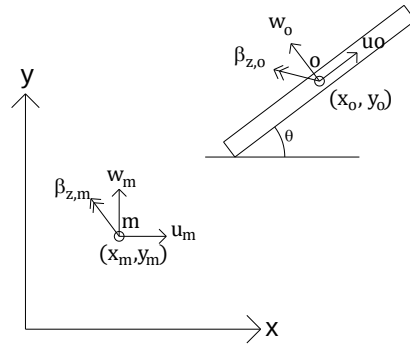
Şekil 3.4 : Perde elemanın plandaki konumu.

$$\cos \theta = \frac{x_2 - x_1}{a} \quad \sin \theta = \frac{y_2 - y_1}{a} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} d_{1(5)} \\ d_{2(6)} \\ d_{3(7)} \\ d_{4(8)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_y \\ \beta_x \\ \beta_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = [T_R] \times \begin{bmatrix} v_y \\ \beta_x \\ \beta_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Tersine eleman özel eksenleri doğrultusunda bulunan serbestliklerin veya bu serbestlikler doğrultusundaki uç kuvvetlerinin, sistem eksen takımındaki bileşenlerine bu dönüştürme matrisinin transpozesi ile geçilebilir.

Çok katlı perdeli yapılarda genelde kat hizalarında x-y düzlemi içinde rijit diyafram kabulünün yapılmasına imkân veren döşemeler bulunması nedeniyle, perde elemanın alt ve üst kenarlarının x-y düzlem içi yerdeğiştirmeleri o katlardaki master düğüm noktalarının yer değiştirme bileşenleri cinsinden ifade edilmelidir. Master noktasının (x_m, y_m) ve perde elemanın (1-2) veya (4-5) kenar ortalarının (x_0, y_0) koordinatları bilinirse Şekil 3.5'de anlatıldığı gibi, sistem eksen takımındaki master noktasının yer değiştirmelerine bağlı olarak, perde özel eksen takımındaki kenar ortalarının yer değiştirme bileşenlerine geçiş $[T_\theta]$ dönüştürme ve $[T_m]$ taşıma matrisleri kullanılarak, 3.3, 3.4 ve 3.5 bağıntıları ile yapılabilir.



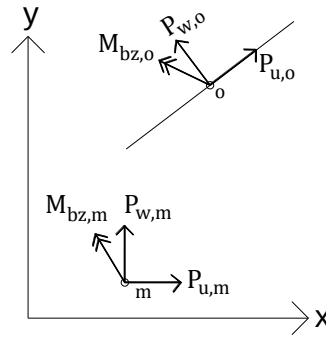
Şekil 3.5 : Master noktasının ve perde elemanın kenar orta noktasının konumu.

$$[T_\theta] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$[T_m] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y_0 - y_m) \\ 0 & 1 & (x_0 - x_m) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ w_0 \\ \beta_{z,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y_0 - y_m) \\ 0 & 1 & (x_0 - x_m) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_m \\ w_m \\ \beta_{z,m} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Tersine bu perde orta noktalarında eleman özel eksen takımında oluşmuş Şekil 3.6' daki kuvvet ve momentlerin kat master noktasındaki $\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum M_z=0$ denge denklemlerine katkısı bu matrislerin transpozesi yardımıyla 3.6 bağıntısı ile hesaplanabilir.



Şekil 3.6 : Master noktasının ve perde elemanın kenar orta noktasının kesit zorları.

$$[T_m]^T \cdot [T_\theta]^T \cdot \begin{bmatrix} P_{u,0} \\ P_{w,0} \\ M_{z,0} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Buna göre eleman uç yerdeğiştirmeleri kolon matrisi köşe noktalarında 4 bilinmeyen, master noktalarında 3 bilinmeyen olmak üzere toplam $4 \times 4 + 2 \times 3 = 22$ terimlidir.

3.2 Yerdeğiştirme Fonksiyonları

Sonlu elemanlar metodunda gerçek sonuçlara ulaşmak için yer değiştirme parametrelerinin birim değerlerine karşı gelen yer değiştirme fonksiyonlarının sonlu eleman özelliklerine uygun olarak seçilmesi gerekmektedir.

Yerdeğiştirme fonksiyonlarının sağlaması gerekli 3 temel koşul aşağıda özetlenmektedir:

1-) Eleman, şekildeğiştirme olmaksızın rijit cisim hareketi yapabilmelidir. Bir başka deyişle rijit cisim hareketi yapan bir elemanda hiçbir kesit zoru ve uç kuvveti oluşmamalıdır.

2-) Elemanın içinde sabit şekildeğiştirme ve sabit iç kuvvet durumları meydana gelebilmelidir.

3-) Ayrıtlar boyunca komşu iki elemanın yerdeğiştirme bileşenleri birbirine eşit olmalıdır. Dönmeleri ifade eden türevlerinin eşit olmasının ise zorunlu olmamakla birlikte yakınsaklık bakımından yararlı olduğu bilinmektedir. Virtüel iş denklem takımının elde edilmesi için, seçilen yerdeğiştirme fonksiyonlarının ayrıtlar boyunca süreklilik şartlarını sağladığı kabulü yapılmıştır (Saygun,1974).

Yerdeğiştirme fonksiyonlarının toplam terim sayısı uç yerdeğiştirmelerinin sayısına eşit olmalıdır.

Geliştirilen sonlu eleman modelinde doğrusal yer değıştirmelerin türevleri olan β_{xi} ve β_{yi} gibi dönme bileşenleri de bilinmeyen olarak alınmıştır. Ayrıtlar boyunca süreklilik koşulunun sağlanması için, bu yerdeğiştirme bileşenlerinin ayrıt boyunca değışimlerinin her iki komşu elemanda da aynı olması gerekmektedir. Bu değışimlerin yalnız ayrıtın iki ucundaki ortak düğüm noktalarının yerdeğiştirme parametreleri cinsinden belirlenmiş olmaları zorunludur.

Bu çalışmada, seçilen yer değıştirme fonksiyonları x değışkenine göre lineer ve z değışkenine göre kübik polinomların çarpımlarından oluşmaktadır. Lagrange fonksiyonları olarak tanımlanan z değışkenine bağlı kübik fonksiyonlar 4 adet olup, $z = \pm b/2$ uçlarında hem yer değıştirmeye hem yer değıştirmenin z 'ye göre birinci türevinin birim değeri almasına karşı gelmektedir. Bu anlamda perde elemanların düğüm noktasındaki dönme serbestliklerinin bilinmeyen seçilmesi ile bu düğüm noktalarına çubuk elemanlar bağlanmasına imkân vermektedir.

Elemanda u , v , w yer değıştirmelerinin (x 'e göre lineer) * (z 'ye göre kübik) değışim şeklinde olduğu kabul edilerek, her biri için 8 olmak üzere toplam 24 parametre belirlenebilir. Ancak kat hizalarında rijit diyafram kabulü gereği perde elemanın üst ve alt kenarlarının boyunun değışmediği, bu hizalarda ($z = \pm b/2$) u 'nun x 'e göre lineer değil sabit olduğu dikkate alınmıştır. Bu durumda u 'nun değışimi 6 parametre ile belirlenerek parametre sayısı 22'ye indirgenmiştir. Bu 22 parametre Bölüm 3.1'de tanımlanan 22 düğüm noktası yerdeğiştirmesinin her biri için tayin edilebilir. Dikdörtgen sonlu elemana ait lineer ve kübik yardımcı fonksiyonlar ve karşı geldikleri sınır koşulları Çizelge 3.1'de belirtmektedir.

Burada,

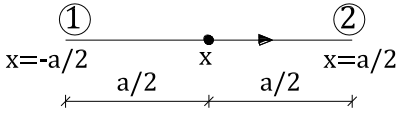
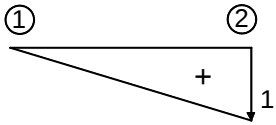
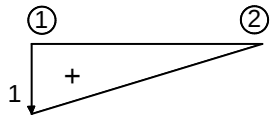
$l(x)$: uçlarındaki birim değerlere bağlı olarak lineer polinomu

$f(z)$: uçlarındaki birim çökmeye karşı gelen kübik polinomu

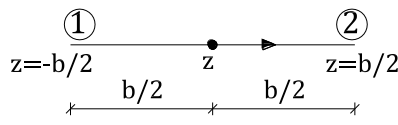
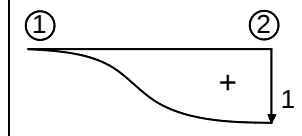
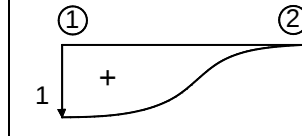
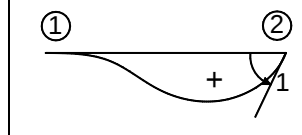
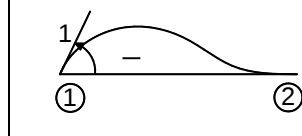
$g(z)$: uçlarındaki birim dönmeye karşı gelen kübik polinomu

ifade etmektedir.

Çizelge 3.1a : Dikdörtgen sonlu elemana ait lineer yardımcı fonksiyonlar ve sınır koşulları.

		
Fonksiyon	Sınır Koşullar	Şekil
$l_1(x) = \frac{1}{2} + \frac{x}{a}$	$x = \frac{a}{2} \rightarrow l_1 = 1$ $x = -\frac{a}{2} \rightarrow l_1 = 0$	
$l_2(x) = \frac{1}{2} - \frac{x}{a}$	$x = \frac{a}{2} \rightarrow l_2 = 0$ $x = -\frac{a}{2} \rightarrow l_2 = 1$	

Çizelge 3.1b : Dikdörtgen sonlu elemana ait kübik yardımcı fonksiyonlar ve sınır koşulları

		
Fonksiyon	Sınır Koşullar	Şekil
$f_1(z) = \frac{1}{2} + \frac{3z}{2b} - \frac{2z^3}{b^3}$	$z = \frac{b}{2} \rightarrow f_1 = 1 ; \frac{\partial f_1}{\partial z} = 0$ $z = -\frac{b}{2} \rightarrow f_1 = 0 ; \frac{\partial f_1}{\partial z} = 0$	
$f_2(z) = \frac{1}{2} - \frac{3z}{2b} + \frac{2z^3}{b^3}$	$z = \frac{b}{2} \rightarrow f_2 = 0 ; \frac{\partial f_2}{\partial z} = 0$ $z = -\frac{b}{2} \rightarrow f_2 = 1 ; \frac{\partial f_2}{\partial z} = 0$	
$g_1(z) = \frac{b}{8} + \frac{z}{4} - \frac{z^2}{2b} - \frac{z^3}{b^2}$	$z = \frac{b}{2} \rightarrow g_1 = 0 ; \frac{\partial g_1}{\partial z} = -1$ $z = -\frac{b}{2} \rightarrow g_1 = 0 ; \frac{\partial g_1}{\partial z} = 0$	
$g_2(z) = -\frac{a}{8} + \frac{z}{4} + \frac{z^2}{2b} - \frac{z^3}{b^2}$	$z = \frac{b}{2} \rightarrow g_2 = 0 ; \frac{\partial g_2}{\partial z} = 0$ $z = -\frac{b}{2} \rightarrow g_2 = 0 ; \frac{\partial g_2}{\partial z} = -1$	

Yapılan kabule göre, yerdeğiştirme matrisinin uç serbestliklerine bağlı olarak ifadesi denklem (3.7) ile verilebilir.

$$[U] = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = [A_d][d] \quad (3.7)$$

Elemanda $[A_d]$ birim uç serbestliklerine karşı gelen yerdeğiştirme fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -l_2(x)g_2(z) & 0 \\ l_2(x)f_2(z) & 0 & 0 & -l_2(x)g_2(z) \\ 0 & l_2(x)g_2(z) & 0 & 0 \end{bmatrix} \times [d]_1 + \dots \quad (3.8)$$

$$\dots + \begin{bmatrix} 0 & 0 & -l_1(x)g_2(z) & 0 \\ l_1(x)f_2(z) & 0 & 0 & -l_1(x)g_2(z) \\ 0 & l_1(x)g_2(z) & 0 & 0 \end{bmatrix} \times [d]_2 + \dots \quad (3.8)$$

$$\dots + \begin{bmatrix} f_2(z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_2(z) & \frac{a}{2}(l_1(x) - l_2(x))f_2(z) \end{bmatrix} \times [d]_3 + \dots \quad (3.8)$$

$$\dots + \begin{bmatrix} 0 & 0 & -l_2(x)g_1(z) & 0 \\ l_2(x)f_1(z) & 0 & 0 & -l_2(x)g_2(z) \\ 0 & l_2(x)g_1(z) & 0 & 0 \end{bmatrix} \times [d]_4 + \dots \quad (3.8)$$

$$\dots + \begin{bmatrix} 0 & 0 & -l_1(x)g_1(z) & 0 \\ l_1(x)f_1(z) & 0 & 0 & -l_1(x)g_1(z) \\ 0 & l_1(x)g_1(z) & 0 & 0 \end{bmatrix} \times [d]_5 + \dots \quad (3.8)$$

$$\dots + \begin{bmatrix} f_1(z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_1(z) & \frac{a}{2}(l_1(x) - l_2(x))f_1(z) \end{bmatrix} \times [d]_6 \quad (3.8)$$

u yerdeğiştirmesi, 4 adet düğüm noktasının $\beta_y = \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_i$ dönmelerine ve 2 adet master noktasının kat hizalarında x doğrultusundaki ötelemelerine bağı olarak, v yer değıştirmesi 4 adet düğüm noktasının v düşey yerdeğıştirmelerine ve $\varepsilon_z = \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_i$ uzama deformasyonlarına bağı olarak, w yerdeğıştirmesi 4 adet düğüm noktasının $\beta_x = \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_i$ dönmelerine, 2 adet master noktasının kat hizalarında y doğrultusundaki ötelemeleri ile β_z dönmelerine bağı olarak bulunur.

u(x), v(z), $\varepsilon(z)$, β_y düzlem içi düğüm noktası serbestlikleri, w(y), β_x , β_z düzlem dışı düğüm noktası serbestlikleridir. [(1,3,4),(5,7,8),(9),(12,14,15),(16,18,19),(20)] perde

düzlemi içindeki yerdeğiştirmeleri tanımlayan düğüm noktası serbestliklerini [(2),(6),(10,11),(13),(17),(21,22)] ise perde düzlemine dik yerdeğiştirmeleri tanımlayan düğüm noktası serbestliklerini ifade etmektedir.

3.3 Şekildeğiştirme Matrisinin Hesabı

[E] şekildeğiştirme matrisi olmak üzere, yerdeğiştirme matrisinin türevinin alınması ile elde edilir. Bu durumda elemanın düzlem içi şekildeğiştirmeleri,

$$\varepsilon_z = \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3.10)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.11)$$

düzlemine dik eğrilikleri;

$$\chi_z = -\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (3.12)$$

$$\chi_{xz} = -2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \quad (3.13)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Şekildeğiştirmeler ve yerdeğiştirmeler arasındaki bağıntı matris formunda

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_x \\ \gamma_{xz} \\ \chi_z \\ \chi_{xz} \end{bmatrix} = [\partial] [U] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial^2}{\partial z^2} \\ 0 & 0 & -2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

olarak ifade edilir.

Şekildeğiştirme matrisinin uç yerdeğiştirmeleri matrisi cinsinden ifadesi aşağıdaki bağıntılar ile özetlenmektedir. Burada $[B]$ matrisi, birim uç yerdeğiştirmelerine karşı gelen yerdeğiştirme fonksiyonlarının $[A_d]$ kısmi türevlerinin alınması ile elde edilir.

Şekildeğiştirme matrisinin uç yerdeğiştirmelerine bağlı olarak ifade edilmesi :

$$[\varepsilon] = [\partial][U] \quad (3.15)$$

$$[U] = [A_d][d] \quad (3.16)$$

$$[\varepsilon] = [\partial][A_d][d] \quad (3.17)$$

$$[B] = [\partial][A_d] \quad (3.18)$$

$$[\varepsilon] = [B][d] \quad (3.19)$$

$[B]$ matrisini, $[B] = [[B]_1 [B]_2 [B]_3 [B]_4 [B]_5 [B]_6]$ şeklinde alt matrislere ayırabiliriz.

Bunlardan her biri şekildeğiştirmelerin değişimini perde köşe noktaları ve master noktaları serbestliklerine bağlı olarak ayrı ayrı göstermektedir.

Bu alt matrislerdeki fonksiyonlarda x, z değişkenlerine sırasıyla 1'den 4'e kadar köşe noktaları koordinatlarını verirse, köşe noktaları deformasyonlarının eleman serbestlikleri cinsinden ifadesi belli olur.

Buna göre $[B]_{ij}$ ($i = 1,2,4,5$) ve ($j = 1,6$) olmak üzere j düğüm noktasının serbestliklerine bağlı olarak i köşe noktasındaki deformasyon bileşenlerinin alacakları değerleri gösterecektir.

$[B]$ matrisinin elemanları Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Çizelge 3.2a : [B]₁ alt matrisi.

d1	d2	d3	d4
$l_2(x) \frac{df_2(z)}{dz}$	0	0	$-l_2(x) \frac{dg_2(z)}{dz}$
0	0	$\left(\frac{1}{a}\right) g_2(z)$	0
$\left(-\frac{1}{a}\right) f_2(z)$	0	$-l_2(x) \frac{dg_2(z)}{dz}$	$\left(-\frac{1}{a}\right) g_2(z)$
0	$-l_2(x) \frac{d^2 g_2(z)}{dz^2}$	0	0
0	$\left(\frac{2}{a}\right) \frac{dg_2(z)}{dz}$	0	0

Çizelge 3.2b : [B]₂ alt matrisi.

d5	d6	d7	d8
$l_1(x) \frac{df_2(z)}{dz}$	0	0	$-l_1(x) \frac{dg_2(z)}{dz}$
0	0	$\left(-\frac{1}{a}\right) g_2(z)$	0
$\left(\frac{1}{a}\right) f_2(z)$	0	$-l_1(x) \frac{dg_2(z)}{dz}$	$\left(-\frac{1}{a}\right) g_2(z)$
0	$-l_1(x) \frac{d^2 g_2(z)}{dz^2}$	0	0
0	$\left(-\frac{2}{a}\right) \frac{dg_2(z)}{dz}$	0	0

Çizelge 3.2c : [B]₃ alt matrisi.

d9	d10	d11
0	0	0
0	0	0
$\frac{df_2(z)}{dz}$	0	0
0	$-\frac{d^2 f_2(z)}{dz^2}$	$-\frac{a}{2}(l_1(x)-l_2(x)) \frac{d^2 f_2(z)}{dz^2}$
0	0	$-2 \frac{df_2(z)}{dz}$

Çizelge 3.2d : [B]₄ alt matrisi.

d12	d13	d14	d15
$l_2(x) \frac{df_1(z)}{dz}$	0	0	$-l_2(x) \frac{dg_1(z)}{dz}$
0	0	$\left(\frac{1}{a}\right) g_1(z)$	0
$\left(-\frac{1}{a}\right) f_1(z)$	0	$-l_2(x) \frac{dg_1(z)}{dz}$	$\left(\frac{1}{a}\right) g_1(z)$
0	$-l_2(x) \frac{d^2 g_1(z)}{dz^2}$	0	0
0	$\left(\frac{2}{a}\right) \frac{dg_1(z)}{dz}$	0	0

Çizelge 3.2e : [B]₅ alt matrisi.

d16	d17	d18	d19
$l_1(x) \frac{df_1(z)}{dz}$	0	0	$-l_1(x) \frac{dg_1(z)}{dz}$
0	0	$\left(-\frac{1}{a}\right) g_1(z)$	0
$\left(\frac{1}{a}\right) f_1(z)$	0	$-l_1(x) \frac{dg_1(z)}{dz}$	$\left(-\frac{1}{a}\right) g_1(z)$
0	$-l_1(x) \frac{d^2 g_1(z)}{dz^2}$	0	0
0	$\left(-\frac{2}{a}\right) \frac{dg_1(z)}{dz}$	0	0

Çizelge 3.2f : [B]₆ alt matrisi.

d20	d21	d22
0	0	0
0	0	0
$\frac{df_1(z)}{dz}$	0	0
0	$-\frac{d^2 f_1(z)}{dz^2}$	$-\frac{a}{2}(l_1(x)-l_2(x)) \frac{d^2 f_1(z)}{dz^2}$
0	0	$-2 \frac{df_1(z)}{dz}$

3.4 Gerilme Matrisinin Hesabı

İç kuvvetler ve şekildeğişirmeler arasındaki bağıntı matris formunda

$$[N] = \begin{bmatrix} N_z \\ N_x \\ T_{xz} \\ M_z \\ M_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & 0 & 0 & 0 \\ E_{21} & E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_x \\ \gamma_{xz} \\ \chi_z \\ \chi_{xz} \end{bmatrix} = [D][\varepsilon] \quad (3.20)$$

olarak ifade edilir. Kat hizalarında döşemelerin düzlemi içinde rijit diyafram etkisine

bağlı olarak $\chi_x = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$ ve M_x yoktur. $\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$ olmak üzere ε_x değeri ise perde

alt ve üst kenarlarında 0 olup, alt ve üst kenarların arasında 0'dan farklıdır.

Hesaplarda sonuca etkisinin fazla olmadığı gözlenmiştir.

Burada [D] lineer elastik malzeme kabulüne göre malzeme rijitlik matrisidir.

İç kuvvetler matrisinin uç yerdeğişirmelerine bağlı olarak ifadesi

$$[N] = [D][\varepsilon] \quad (3.21)$$

$$[\varepsilon] = [B][d] \quad (3.22)$$

$$[N] = [D][B][d] \quad (3.23)$$

matris bağıntıları ile verilebilir.

3.5 Malzeme Rijitlik Matrisinin Hesabı

[D] malzeme rijitlik matrisi $[N] = [D][\varepsilon]$ kesit zoru – şekildeğişirme bağıntıları kullanılarak elde edilir.

$$\begin{bmatrix} n_z \\ n_x \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & 0 \\ E_{21} & E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & E_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_x \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} m_z \\ m_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi_x \\ \chi_{xz} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Çatlamamış kesite ait malzeme rijitlik matrisi terimleri beton ve donatının katkıları dikkate alınarak,

$$E_{12} = E_{21} = \frac{E_b h}{1 - \nu^2} \nu \quad (3.25)$$

$$E_{22} = \frac{E_b h}{1 - \nu^2} \left\{ 1 + \left(\frac{E_3 (1 - \nu^2)}{E_b} - 1 \right) \rho_x \right\} \quad (3.26)$$

$$E_{33} = \frac{E_b h}{1 - \nu^2} \left\{ \frac{1 - \nu}{2} \right\} \quad (3.27)$$

$$D_{11} = \frac{E_b h^3}{12(1 - \nu^2)} \left\{ 1 + 3 \left(\frac{E_3 (1 - \nu^2)}{E_b} - 1 \right) \left(1 - \frac{2h'}{h} \right)^2 \rho_z \right\} \quad (3.28)$$

$$D_{33} = \frac{E_b h^3}{12(1 - \nu^2)} \left\{ \frac{(1 - \nu)}{2} \right\} \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Çatlamış kesite ait malzeme rijitlik matrisi bağıntıları,

$$E_{11} = E_3 h \rho_z \quad (3.30)$$

$$E_{12} = E_{21} = 0 \quad (3.31)$$

$$E_{22} = \frac{E_b h}{1 - \nu^2} \left\{ 1 + \left(\frac{E_3 (1 - \nu^2)}{E_b} - 1 \right) \rho_x \right\} \quad (3.32)$$

$$E_{33} = \frac{E_b h}{1 - \nu^2} \left\{ \frac{1 - \nu}{2} \right\} \quad (3.33)$$

$$D_{11} = \frac{h^3}{4} \left(1 - 2 \frac{h'}{h} \right)^2 E_3 \rho_z \quad (3.34)$$

$$D_{33} = 0 \quad (3.35)$$

şeklinde ifade edilebilir.

3.6 Eleman Rijitlik Matrisinin Hesabı

Eleman rijitlik matrisinin elde edilmesinde virtüel iş teoreminden yararlanılır. Dengede olan bir sistemde geometrik uygunluk şartlarını sağlayan herhangi bir küçük virtüel şekildeğiştirmede yükleme durumundaki dış kuvvetlerin yaptığı iş, iç kuvvetlerin yaptığı şekildeğiştirme işine eşittir. Eleman rijitlik matrisinin satır ve sütun sayısı eleman yerdeğiştirme parametresi sayısına eşit bir kare matristir.

İç kuvvetlerin yaptığı iş:

$$\int_V [\varepsilon]^T [\sigma] dV \quad (3.36)$$

Dış kuvvetlerin yaptığı iş:

$$[d]^T [q] \quad (3.37)$$

$$\int_V [\varepsilon]^T [\sigma] dV = [d]^T [q] \quad (3.38)$$

$$[\varepsilon] = [B][d] \quad (3.39)$$

$$[d]^T \int_V [B]^T [\sigma] dV = [d]^T [q] \quad (3.40)$$

$$[\sigma] = [D][B][d] \quad (3.41)$$

$$[d]^T \int_V [B]^T [D][B][d] dV = [d]^T [q] \quad (3.42)$$

$$\int_V [B]^T [D][B][d] dV = [q] \quad (3.43)$$

[K] eleman rijitlik matrisinin genel ifadesi matris formunda,

$$[K] = \int_V [B]^T [D][B] dV \quad (3.44)$$

'dir.

Bu matrisin herhangi bir k_{ij} terimi j birim düğüm noktası yerdeğiştirmesi nedeniyle, i birim düğüm noktası yerdeğiştirmesi doğrultusunda oluşacak uç kuvvetlerini gösterir. $j = 1$ durumu yükleme, $i = 1$ durumu virtüel şekil değiştirme durumu alınarak, $j = 1$ birim durumuna ait iç kuvvetlerin, i birim durumunda oluşan şekildeğiştirmelerle yaptığı iş şeklinde hesaplanabilir.

Buna göre virtüel iş teoremi gereği eleman rijitlik matrisinin herhangi bir terimi;

$$k_{ij} = \iint \begin{bmatrix} \varepsilon_z & \varepsilon_x & \gamma_{xz} \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} n_z \\ n_x \\ \tau_{xz} \end{bmatrix}_j dA + \iint \begin{bmatrix} \chi_z & \chi_x & \chi_{xz} \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} m_z \\ m_x \\ m_{xz} \end{bmatrix}_j dA \quad (3.45a)$$

$$k_{ij} = \iint \begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_x \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}_i^T [D] \begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_x \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}_j dA + \iint \begin{bmatrix} \chi_z \\ \chi_x \\ \chi_{xz} \end{bmatrix}_i^T [D] \begin{bmatrix} \chi_z \\ \chi_x \\ \chi_{xz} \end{bmatrix}_j dA \quad (3.45b)$$

şeklinde hesaplanır.

Denklem 1.1 ve denklem 1.2'nin açık ifadesi

$$k_{ij} = \iint \left\{ E_{11} \frac{dv_i}{dz} \frac{dv_j}{dz} + E_{22} \frac{du_i}{dx} \frac{du_j}{dx} + E_{21} \frac{du_i}{dx} \frac{dv_j}{dz} + E_{12} \frac{du_j}{dx} \frac{dv_i}{dz} + \dots \right. \quad (3.46)$$

$$\left. \dots + E_{33} \left(\frac{dv_i}{dx} + \frac{du_i}{dz} \right) \left(\frac{dv_j}{dx} + \frac{du_j}{dz} \right) + D_{11} \frac{d^2 w_i}{dz^2} \frac{d^2 w_j}{dz^2} + D_{33} \left(2 \frac{d^2 w_i}{dx dz} \right) \left(2 \frac{d^2 w_j}{dx dz} \right) \right\} dx dz \quad (3.46)$$

olarak tanımlanabilir.

Bu ifadeye göre örneğin k_{11} 'in teriminin elde edilmesi aşağıda özetlenmektedir. $d_1=1$ durumunda,

$$v_1 = l_2(x) f_2(z) \quad u_1 = 0 \quad w_1 = 0 \quad (3.47)$$

$$\frac{du_1}{dx} = 0; \quad \frac{dv_1}{dz} = 0; \quad \frac{dv_1}{dx} \neq 0; \quad \frac{dv_1}{dz} \neq 0 \quad (3.48)$$

$$k_{1,1} = E_{11} \iint \left(\frac{dv_1}{dz} \right) \left(\frac{dv_1}{dz} \right) dx dz + E_{33} \iint \left(\frac{dv_1}{dx} \right) \left(\frac{dv_1}{dx} \right) dx dz \quad (3.49a)$$

$$k_{1,1} = E_{11} \iint \left(l_2(x) \frac{df_2(z)}{dz} \right) \left(l_2(x) \frac{df_2(z)}{dz} \right) dx dz + \dots \quad (3.49b)$$

$$k_{1,1} = \dots + E_{33} \iint \left(\frac{dl_2(x)}{dx} f_2(z) \right) \left(\frac{dl_2(x)}{dx} f_2(z) \right) dx dz \quad (3.49b)$$

$$k_{1,1} = E_{11} \frac{6a}{15b} + E_{33} \frac{13b}{35a} \quad (3.50)$$

Polinom tipinde x ve z'e göre yardımcı fonksiyonların ve türevlerinin çarpımlarının integralleri benzer olarak elde edilmiştir (Saygun, 1974).

$k_{1,5}$ ve benzeri terimler,

$$k_{1,5} = E_{11} \frac{6a}{30b} + E_{33} \left(-\frac{13b}{35a} \right) \quad (3.51)$$

$$k_{1,12} = E_{11} \left(-\frac{6a}{15b} \right) + E_{33} \frac{9b}{70a} \quad (3.52)$$

$$k_{1,16} = E_{11} \left(-\frac{6a}{30b} \right) + E_{33} \left(-\frac{9b}{70a} \right) \quad (3.53)$$

$k_{4,4}$ ve benzeri terimler,

$$k_{4,4} = E_{11} \frac{2ab}{45} + E_{33} \frac{b^3}{105a} \quad (3.54)$$

$$k_{4,8} = E_{11} \frac{2ab}{90} + E_{33} \left(-\frac{b^3}{105a} \right) \quad (3.55)$$

$$k_{4,15} = E_{11} \left(-\frac{ab}{90} \right) + E_{33} \left(-\frac{b^3}{140a} \right) \quad (3.56)$$

$$k_{4,19} = E_{11} \left(-\frac{ab}{180} \right) + E_{33} \frac{b^3}{140a} \quad (3.57)$$

$k_{3,3}$ ve benzeri terimler,

$$k_{3,3} = E_{22} \frac{b^3}{105a} + E_{33} \frac{2ab}{45} \quad (3.58)$$

$$k_{3,7} = E_{22} \left(-\frac{b^3}{105a} \right) + E_{33} \left(-\frac{2ab}{90} \right) \quad (3.59)$$

$$k_{3,14} = E_{22} \left(-\frac{b^3}{140a} \right) + E_{33} \left(-\frac{ab}{90} \right) \quad (3.60)$$

$$k_{3,18} = E_{22} \left(\frac{b^3}{140a} \right) + E_{33} \left(-\frac{ab}{180} \right) \quad (3.61)$$

$k_{1,4}$ ve benzeri terimler,

$$k_{1,4} = k_{4,1} = E_{11} \frac{a}{30} + E_{33} \frac{11b^2}{210a} \quad (3.62)$$

$$k_{1,8} = k_{4,5} = E_{11} \frac{a}{60} + E_{33} \left(-\frac{11b^2}{210a} \right) \quad (3.63)$$

$$k_{1,15} = -k_{4,12} = E_{11} \frac{a}{30} + E_{33} \left(-\frac{13b^2}{420a} \right) \quad (3.64)$$

$$k_{1,19} = -k_{4,16} = E_{11} \frac{a}{60} + E_{33} \frac{13b^2}{420a} \quad (3.65)$$

$$k_{1,3} = k_{3,1} = E_{12} \frac{b}{20} + E_{33} \left(-\frac{b}{20} \right) \quad (3.66)$$

$$k_{1,7} = -k_{3,5} = E_{12} \left(-\frac{b}{20} \right) + E_{33} \left(-\frac{b}{20} \right) \quad (3.67)$$

$$k_{1,14} = k_{3,12} = E_{12} \left(-\frac{b}{20} \right) + E_{33} \frac{b}{20} \quad (3.68)$$

$$k_{1,18} = k_{3,16} = E_{12} \frac{b}{20} + E_{33} \frac{b}{20} \quad (3.69)$$

$k_{3,4}$ ve benzeri terimler,

$$k_{3,4} = k_{4,3} = 0 \quad (3.70)$$

$$k_{3,8} = k_{4,4} = 0 \quad (3.71)$$

$$k_{3,15} = -k_{4,14} = E_{12} \frac{b^2}{120} + E_{33} \left(-\frac{b^2}{120} \right) \quad (3.72)$$

$$k_{3,19} = k_{4,18} = E_{12} \frac{b^2}{120} + E_{33} \frac{b^2}{120} \quad (3.73)$$

$k_{1,9}$ ve benzeri terimler,

$$k_{1,9} = \frac{E_{33}}{2} \quad (3.74)$$

$$k_{1,20} = -\frac{E_{33}}{2} \quad (3.75)$$

$$k_{5,9} = -k_{1,9} \quad k_{5,20} = -k_{1,20} \quad (3.76)$$

$$k_{9,12} = -k_{9,16} = \frac{E_{33}}{2} \quad (3.77)$$

$$k_{12,20} = -k_{16,20} = -k_{9,12} \quad (3.78)$$

$k_{9,9}$ ve benzeri terimler,

$$k_{9,9} = -k_{9,20} = E_{33} \frac{6a}{5b} \quad (3.79)$$

$$k_{3,9} = -k_{3,20} = k_{7,9} = -k_{7,20} = E_{33} \frac{1}{20} \quad (3.80)$$

$k_{4,9}$ ve benzeri terimler,

$$k_{4,9} = -k_{8,9} = -k_{9,15} = k_{9,19} = \frac{E_{33}b}{10} \quad (3.81)$$

$$k_{4,20} = -k_{4,9}; k_{8,20} = -k_{8,9}; k_{15,20} = -k_{9,15}; k_{19,20} = -k_{9,19} \quad (3.82)$$

$k_{2,2}$ ve benzeri terimler,

$$k_{2,2} = D_{11} \frac{4a}{3b} + 4D_{33} \frac{2b}{15a} \quad (3.83)$$

$$k_{2,6} = D_{11} \frac{4a}{6b} + 4D_{33} \left(-\frac{2b}{15a} \right) \quad (3.84)$$

$$k_{2,13} = D_{11} \frac{2a}{3b} + 4D_{33} \left(-\frac{b}{30a} \right) \quad (3.85)$$

$$k_{2,17} = D_{11} \frac{2a}{6b} + 4D_{33} \frac{b}{30a} \quad (3.86)$$

$k_{10,10}$ ve benzeri terimler,

$$k_{10,10} = D_{11} \frac{12a}{b^3} = -k_{10,21} = k_{21,21} \quad (3.87)$$

$k_{10,11}$ ve benzeri terimler,

$$k_{10,11} = k_{10,22} = k_{11,21} = k_{11,22} = 0 \quad (3.88)$$

$k_{2,10}$ ve benzeri terimler,

$$k_{10,2} = D_{11} \left(-\frac{3a}{b^2} \right) = k_{10,6} = -k_{21,2} = -k_{21,6} \quad (3.89)$$

$$k_{10,13} = k_{10,17} = -k_{21,13} = -k_{21,7} \quad (3.90)$$

$k_{2,11}$ ve benzeri terimler,

$$k_{2,11} = D_{11} \frac{a^2}{2b^2} + 2D_{33} \frac{1}{5} \quad (3.91)$$

$$k_{11,6} = -k_{11,2} = k_{22,2} = -k_{22,6} \quad (3.92)$$

$$k_{13,11} = k_{11,2} = -k_{17,11} = -k_{13,22} = k_{17,22} \quad (3.93)$$

Eleman rijitlik matrisinin $[K]_{11}$, $[K]_{12}$, $[K]_{13}$, $[K]_{14}$, $[K]_{15}$, $[K]_{16}$ terimleri Çizelge 3.3’de ifade edilmektedir.

Çizelge 3.3a : $[K]_{11}$ eleman rijitlik matrisi.

$E_{11} \frac{6a}{15b} + E_{33} \frac{13b}{35a}$	0	$E_{12} \frac{b}{20} + E_{33} \left(-\frac{b}{20} \right)$	$E_{11} \frac{a}{30} + E_{33} \frac{11b^2}{210a}$
	$D_{11} \frac{4a}{3b} + 4D_{33} \frac{2b}{15a}$	0	0
		$E_{22} \frac{b^3}{105a} + E_{33} \frac{2ab}{45}$	0
			$E_{11} \frac{2ab}{45} + E_{33} \frac{b^3}{105a}$

Çizelge 3.3b : $[K]_{12}$ eleman rijitlik matrisi.

$E_{11}\frac{6a}{30b} + E_{33}\left(-\frac{13b}{35a}\right)$	0	$E_{12}\left(-\frac{b}{20}\right) + E_{33}\left(-\frac{b}{20}\right)$	$E_{11}\frac{a}{60} + E_{33}\left(-\frac{11b^2}{210a}\right)$
	$D_{11}\frac{4a}{6b} + 4D_{33}\left(-\frac{2b}{15a}\right)$	0	0
		$E_{22}\left(-\frac{b^3}{105a}\right) + E_{33}\left(-\frac{2ab}{90}\right)$	0
			$E_{11}\frac{2ab}{90} + E_{33}\left(-\frac{b^3}{105a}\right)$

Çizelge 3.3c : $[K]_{13}$ eleman rijitlik matrisi.

$\frac{E_{33}}{2}$	0	0
0	$D_{11}\left(-\frac{3a}{b^2}\right)$	$D_{11}\frac{a^2}{2b^2} + 2D_{33}\frac{1}{5}$
$E_{33}\frac{1}{20}$	0	0
$\frac{E_{33}b}{10}$	0	0

Çizelge 3.3d : $[K]_{14}$ eleman rijitlik matrisi.

$E_{11}\left(-\frac{6a}{15b}\right) + E_{33}\frac{9b}{70a}$	0	$E_{12}\left(-\frac{b}{20}\right) + E_{33}\frac{b}{20}$	$E_{11}\frac{a}{30} + E_{33}\left(-\frac{13b^2}{420a}\right)$
	$D_{11}\frac{2a}{3b} + 4D_{33}\left(-\frac{b}{30a}\right)$	0	
		$E_{22}\left(-\frac{b^3}{140a}\right) + E_{33}\left(-\frac{ab}{90}\right)$	
			$E_{11}\left(-\frac{ab}{90}\right) + E_{33}\left(-\frac{b^3}{140a}\right)$

Çizelge 3.3e : [K]₁₅ eleman rijitlik matrisi.

$E_{11}\left(-\frac{6a}{30b}\right) + E_{33}\left(-\frac{9b}{70a}\right)$	0	$E_{12}\frac{b}{20} + E_{33}\frac{b}{20}$	$E_{11}\frac{a}{60} + E_{33}\frac{13b^2}{420a}$
	$D_{11}\frac{2a}{6b} + 4D_{33}\frac{b}{30a}$	0	0
		$E_{22}\left(\frac{b^3}{140a}\right) + E_{33}\left(-\frac{ab}{180}\right)$	$E_{12}\frac{b^2}{120} + E_{33}\frac{b^2}{120}$
			$E_{11}\left(-\frac{ab}{180}\right) + E_{33}\frac{b^3}{140a}$

Çizelge 3.3f : [K]₁₆ eleman rijitlik matrisi.

$-\frac{E_{33}}{2}$	0	0
0	$D_{11}\left(\frac{3a}{b^2}\right)$	$-D_{11}\frac{a^2}{2b^2} - 2D_{33}\frac{1}{5}$
$-E_{33}\frac{1}{20}$	0	0
$-\frac{E_{33}b}{10}$	0	0

[K] eleman rijitlik matrisinin boyutu 22x22'dir ve 36 adet alt matristen oluşmaktadır.

$$[K] = \begin{bmatrix} [K]_{11} & [K]_{12} & [K]_{13} & [K]_{14} & [K]_{15} & [K]_{16} \\ [K]_{21} & [K]_{22} & [K]_{23} & [K]_{24} & [K]_{25} & [K]_{26} \\ [K]_{31} & [K]_{32} & [K]_{33} & [K]_{34} & [K]_{35} & [K]_{36} \\ [K]_{41} & [K]_{42} & [K]_{43} & [K]_{44} & [K]_{45} & [K]_{46} \\ [K]_{51} & [K]_{52} & [K]_{53} & [K]_{54} & [K]_{55} & [K]_{56} \\ [K]_{61} & [K]_{62} & [K]_{63} & [K]_{64} & [K]_{65} & [K]_{66} \end{bmatrix} \quad (3.94)$$

Her bir [K]_{ij} alt matrisi, elemanın j düğüm noktasındaki uç yerdeğiştirmeleri nedeniyle, i düğüm noktasında oluşacak kuvvetler şeklinde tanımlanabilir.

Alt matris boyutları,

$$i: 1,2,4,5 \quad \text{ve} \quad j: 1,2,4,5 \quad [K]_{ij} = 4 \times 4 \quad (3.95a)$$

$$i: 1,2,4,5 \quad \text{ve} \quad j: 3,6 \quad [K]_{ij} = 4 \times 3 \quad (3.95b)$$

$$i: 3,6 \quad \text{ve} \quad j: 1,2,4,5 \quad [K]_{ij} = 3 \times 4 \quad (3.95c)$$

$$i: 3,6 \quad \text{ve} \quad j: 3,6 \quad [K]_{ij} = 3 \times 3 \quad (3.95d)$$

olarak ifade edilebilir.

Eleman rijitlik matrisinin hesabında örneğin, $[K]_{1,i}$ ($i = 1,6$) ve $[K]_{3,j}$ ($j = 3,6$) belirtildikten sonra diğer alt matrisler simetrik (veya antimetrik) uç yerdeğiştirmelerine karşılık simetrik (veya antimetrik) uç kuvvetleri oluşacağı dikkate alınarak aşağıdaki dönüştürme operatörleri ile tayin edilebilir.

Köşe noktalarında,

$$[T_x] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [T_y] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.96)$$

Orta noktalarında,

$$[T_{0_x}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [T_{0_y}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.97)$$

$$[K]_{24} = [T_x] [K]_{15} [T_x] \quad (3.98)$$

$$[K]_{23} = [T_x] [K]_{13} [T_{0_x}] \quad (3.99)$$

$$[K]_{25} = [T_x] [K]_{14} [T_x] \quad (3.100)$$

$$[K]_{46} = [T_y] [K]_{13} [T_{0_y}] \quad (3.101)$$

$$[K]_{45} = [T_y] [K]_{12} [T_y] \quad (3.102)$$

$$[K]_{26} = [T_x][K]_{16}[T_{0x}] \quad (3.103)$$

$$[K]_{22} = [T_x][K]_{11}[T_x] \quad (3.104)$$

$$[K]_{56} = [T_y][K]_{23}[T_{0y}] \quad (3.105)$$

$$[K]_{44} = [T_y][K]_{11}[T_y] \quad (3.106)$$

$$[K]_{55} = [T_x][K]_{44}[T_x] \quad (3.107)$$

x-z düzleminde olduğu varsayılarak elde edilmiş standart perde elemanı rijitlik matrisinden x,y planında herhangi bir açıyla yerleşen perde elemanın rijitlik matrisine dönüştürme matrisleri yardımıyla geçilebilir.

Buna göre global eksen takımındaki dönmelerden eleman köşelerindeki özel eksen takımındaki dönmelere geçiş için tanımlanan dönüştürme matrisi

$$[T_R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.108)$$

şeklinde ifade edilir.

$$[K]_{ijx} = [T_R]^T [K]_{ij} [T_R] \quad (i, j = 1, 2, 4, 5) \quad (3.109)$$

Master düğüm noktalarının sistem ortak eksen takımındaki birim uç yerdeğiştirmelerinden dolayı eleman kenar orta noktalarında oluşan özel eksen doğrultusundaki uç yerdeğiştirmelerine geçiş $[T_\theta]$ dönüştürme ve $[T_m]$ taşıma matrisleri ile sağlanır.

$$[T_\theta][T_m] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & -(y_0 - y_m) \cos \theta + (x_0 - x_m) \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta & (x_0 - x_m) \cos \theta + \sin \theta (y_0 - y_m) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.110)$$

$$[K]_{ijx} = [T_m]^T [T_\theta]^T [K]_{ij} [T_\theta] [T_m] \quad (i, j = 3, 6) \quad (3.111a)$$

$$[K]_{ixjx} = [T_R]^T [K]_{ij} [T_\theta] [T_m] \quad (i=1,2,3,4,5) \quad (j=3,6) \quad (3.111b)$$

$$[K]_{ixjx} = [T_m]^T [T_\theta]^T [K]_{ij} [T_R] \quad (i=3,6) \quad (j=1,2,3,4,5) \quad (3.111c)$$

3.7 Perde Sonlu Elemanda Uç Yerdeğiştirmelerinin Bulunması

Perde sonlu elemanda uç yerdeğiştirmelerin bulunması için master noktaları ve eleman düğüm noktaları moment ve iz düşüm denge denklemi bağıntılarından yararlanılır.

$$[S][d]=[P] \quad (3.112)$$

[S]: sistem rijitlik matrisini,

[P]: ortak sistem eksen takımında düğüm noktası ve master noktası yüklerini,

[d]: düğüm noktası uç yerdeğiştirmeleri matrisini

göstermektedir.

n adet düğüm noktasında 4 adet ve m adet master noktasında 3 adet uç serbestliğı olduğu düşünülürse [S] sistem rijitlik matrisinin boyutu $(4n+3m) \times (4n+3m)$ olur. Bu durumda [P] ve [d] matrisleri $(4n+3m) \times 1$ boyutunda kolon matrislerdir.

[S] matrisi aynı düğüm noktasına birleşen perde elemanların ortak sistem eksen takımındaki ilgili eleman rijitlik matrisi terimlerinin üst üste toplanması ile elde edilir. Denklem 3.112'nin çözümü ile ortak eksen takımındaki uç yerdeğiştirmeleri bulunur.

Özet olarak perde düğüm noktası uç yerdeğiştirmelerinin bulunması için aşağıdaki adımlar izlenir.

1. Eleman rijitlik matrisleri bulunur,
2. Eleman rijitlik matrisleri dönüştürme ve taşıma matrisleri yardımı ile sistem ortak eksen takımına çevrilir,
3. Sistem ortak eksen takımındaki eleman rijitlik matrisleri ile global eksen takımında sistem rijitlik matrisi oluşturulur,
4. Sistem ortak eksen takımındaki uç yerdeğiştirmeleri bulunur.

3.8 Perde Sonlu Elemanda İç Kuvvetlerin Bulunması

Perde sonlu elemanda iç kuvvetler, sistem ortak eksen takımı yerdeğiştirmeleri ile gerilme matrisi çarpılarak bulunur. Sistem ortak eksen takımı yerdeğiştirmelerinden perde sonlu elemanın özel eksen takımı iç kuvvetlerine geçmek için $[T_R]$ dönüştürme matrisinden yararlanılır. Buna göre gerilme matrisi, $[SIGEL] = [D][B][T_R]$ olarak tanımlanmaktadır.

Her düğüm noktası için N_z , T_{xz} , M_z , M_{xz} iç kuvvet değerleri denklem 3.113 ile hesaplanır.

$$[N_i]_{4 \times 1} = [D]_{4 \times 4} [B]_{4 \times 22} [T_R]_{22 \times 22} [d]_{22 \times 1} \quad (3.113)$$

Perde alt ve üst kenarlarının master noktalarına bağlı olması nedeniyle x doğrultusunda birim şekil değiştirme $\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = 0$ değerini alacaktır. Perde köşe noktalarında N_x iç kuvvet değeri ε_x değerinin 0 olması ile sadece $E_{21} \times \varepsilon_z$ ifadesine bağlı olacaktır. Bu ifadenin de N_x iç kuvvetine katkısı çok küçük olduğundan hesaplarda perde düğüm noktalarında $N_x = 0$ kabul edilmiştir. Bu durumda 5×1 boyutundaki iç kuvvet matrisi perde düğüm noktaları için hesapta $[N_i]_{4 \times 1}$ $i=1,2,4,5$ olmak üzere 4×1 boyutunda kabul edilmektedir. Perde düğüm noktalarında $[N_i]_{4 \times 1}$ matrisinin 4×1 boyutunda olması nedeniyle, bu noktalardaki iç kuvvet hesabında $[B]$ matrisi 4×22 boyutunda dikkate alınmıştır.

$[SIGEL]$ matrisi 16×22 boyutundadır ve her düğüm noktası için 4×22 boyutunda alt matrislerden oluşmaktadır.

$$[D]_{4 \times 4} [B]_{4 \times 22} [T_R]_{22 \times 22} = [SG_1]_{4 \times 22} \quad (3.114)$$

$$[SIGEL]_{16 \times 22} = \begin{bmatrix} [SG_1]_{4 \times 22} \\ [SG_2]_{4 \times 22} \\ [SG_4]_{4 \times 22} \\ [SG_5]_{4 \times 22} \end{bmatrix} = \quad (3.115)$$

$$= \begin{bmatrix} [SG_{11}]_{4 \times 4} & [SG_{12}]_{4 \times 4} & [SG_{13}]_{4 \times 3} & [SG_{14}]_{4 \times 4} & [SG_{15}]_{4 \times 4} & [SG_{16}]_{4 \times 3} \\ [SG_{21}]_{4 \times 4} & [SG_{22}]_{4 \times 4} & [SG_{23}]_{4 \times 3} & [SG_{24}]_{4 \times 4} & [SG_{25}]_{4 \times 4} & [SG_{26}]_{4 \times 3} \\ [SG_{41}]_{4 \times 4} & [SG_{42}]_{4 \times 4} & [SG_{43}]_{4 \times 3} & [SG_{44}]_{4 \times 4} & [SG_{45}]_{4 \times 4} & [SG_{46}]_{4 \times 3} \\ [SG_{51}]_{4 \times 4} & [SG_{52}]_{4 \times 4} & [SG_{53}]_{4 \times 3} & [SG_{54}]_{4 \times 4} & [SG_{55}]_{4 \times 4} & [SG_{56}]_{4 \times 3} \end{bmatrix} \quad (3.115)$$

Perde elemanın 1 numaralı düğüm noktasındaki uç yerdeğiştirmelerinin birim değerlerinin bu düğüm noktasında oluşturduğu iç kuvvetler $[SG]_{11}$ matrisi ile tanımlanır.

$$[SG_{11}]_{4 \times 4} = [D]_{4 \times 4} [B]_{4 \times 4} [T_R]_{4 \times 4} \quad (3.116a)$$

$$[SG_{11}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & E_{11} \\ -E_{33}/A & -E_{33} \times \sin \theta & E_{33} \times \cos \theta & 0 \\ 0 & -2 \left(D_{11}/B \right) \times \cos \theta & -2 \left(D_{11}/B \right) \times \sin \theta & 0 \\ 0 & -2 \left(D_{33}/A \right) \times \cos \theta & -2 \left(D_{33}/A \right) \times \sin \theta & 0 \end{bmatrix} \quad (3.116b)$$

Bir düğüm noktasına ait toplam gerilmeler, o düğüm noktasına birleşen perde sonlu elemanların gerilme değerlerinin ortalamaları alınarak hesaplanmaktadır.

4. PERDE ELEMANIN ELASTOPLASTİK DAVRANIŞININ TANIMLANMASI

4.1 Basınçtan Çekmeye Geçmesi Durumu

Perde elemanın davranışı eleman köşe noktalarındaki düşey şekildeğiştirme bileşeni ε_z değerine bakılarak kontrol edilir. Perdelerin bağlandığı noktalarda ε_z bilinmeyen olarak alındığından bu kontrol hem kolay, hem hassas bir şekilde yapılabilir. Çekme kontrolü yapılırken, betonun çekme bölgesindeki f_{ctk} eksenel çekme dayanımına ulaşana kadar çekme alacağı, bu değere karşı gelen ε_z değerine ulaştıktan sonra betonun çatlayıp, çekme kuvvetinin yalnızca düşey donatılarla karşılanacağı kabul edilmiştir.

Perde elemanların tüm düğüm noktaları için ε_z değerine bakılarak çekme kontrolü yapılır. Yük artımıyla yapılan hesabın her adımında çekmeye geçerek, f_{ctk} beton çatlama dayanımının aşıldığı düğüm noktaları belirlenir.

Bu çalışmada, bir elemanın içinde betonun bölgesel olarak çatlamış olduğu kabulü yapılmamış ve elemanın tümüyle ya basınç ya çekme bölgesi elemanı olması durumu esas alınmıştır. Bu durumda çekme şekildeğiştirme sınırına erişen noktalara birleşen bütün perde elemanların tümüyle çekme elemanına dönüşeceği kabulü yapılmıştır.

Perde elemanının basınç elemanından çekme elemanına geçmesi durumunda sistem rijitlik matrisinin değişmesi gerekir. Fakat sistem rijitlik matrisi tamamen yeniden oluşturulmaz. Sistem rijitlik matrisinde, basınç elemanının eleman rijitlik matrisinin katkısı çıkarılıp çekme elemanının eleman rijitlik matrisinin katkısı eklenir. Bu basitleştirilmiş yaklaşım ile işlem hacmi azalır ve çözüm süresi kısalmış olur.

Plastikleşme meydana geldikten sonra basınç elemanından çekme elemanına geçen perdeler için, tanımı daha sonraki bölümlerde açıklanacak olan $[S_{\Delta d}]$, $[S_{d\Delta}]$, $[S_{\Delta\Delta}]$ matrislerinin ilgili terimlerinde de değişiklik yapılacaktır ve takip eden yük artımı için o adıma kadar oluşturulmuş denklem takımının indirgeme işlemi yenilenecektir.

4.2 Plastik Davranış Özelliklerinin Tanımlanması

Oluşturulan sonlu eleman modelinde düğüm noktaları arasında elemanların lineer elastik davrandığı plastik şekil değiştirmelerin düşey plastik yer değiştirmeler olarak düğüm noktalarında toplandığı kabul edilmiştir. Bu kabule göre düğüm noktalarında plastikleşme oluşması durumunda sistem rijitlik matrisi değişmemektedir.

Perde köşe noktalarındaki düşey şekil değiştirme ε_z akma sınırına ulaştıktan sonra bu noktalarda plastikleşmenin meydana geldiği ve bu noktanın üstündeki elemanların bu noktanın altındaki elemanlara göre farklı düşey yerdeğiştirme yaptığı kabul edilmiş, yani gerçekte yayılı olan plastik şekildeğiştirmeler yerine düğüm noktalarında toplanmış plastik yerdeğiştirmeler öngörülmüştür. Plastikleşen noktalarda deformasyonlar artarken gerilmelerin sabit kalacağı açıktır.

Perde elemanların tüm düğüm noktaları için ε_z değerine bakılarak elastik şekildeğiştirme sınırının aşılp aşılmadığı kontrol edilir. Bu kontrol yapılırken her düğüm noktasının ε_z değerine bakılır. Düğüm noktalarının çekme veya basınç bölgesinde olmasına bağlı olarak farklı elastik şekildeğiştirme sınırları tanımlanması söz konusudur. Çekme bölgesindeki düğüm noktaları için çeliğin akma birim şekildeğiştirme sınır değeri elastik şekildeğiştirme sınırını belirlerken, basınç bölgesindeki düğüm noktaları için betonun maksimum birim kısalma değerinin çelik katkısından dolayı arttırılmış değeri elastik şekildeğiştirme sınırını belirler.

Bir düğüm noktasında (çekme veya basınç) elastik şekildeğiştirme sınırına ulaşılmışsa, takip eden yük artımlarında o noktada meydana gelecek akmaya bağlı plastik yerdeğiştirmenin ilave bir bilinmeyen olarak denklem takımına dahil edilmesi gerekir. Plastikleşen düğüm noktaları tespit edildikten sonra akma sınır şekil değiştirmesinin aşıldığı her düğüm noktası için, sistem rijitlik matrisine bir satır ve sütun ilave edilir. İlave edilen satır ve sütunlar denklem 4.1 ve 4.2’de matris formunda yazılmış denklem takımında gösterilmiştir.

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

$$[S_{\Delta d}][d] + [S_{\Delta\Delta}][\Delta] = [0] \quad (4.2)$$

Plastikleşmenin meydana geldiği düğüm noktası sayısı kadar ilave düşey yerdeğiştirme $[\Delta]$ bilinmeyi denklemler takımına eklenir. Burada Δ ilave

bilinmeyenleri plastik yerdeğiştirme nedeniyle bu noktanın üstündeki perde düğüm noktalarının bu noktanın altındaki perde düğüm noktalarına göre rölatif yerdeğiştirmesini göstermektedir.

4.1 bağıntısındaki ilave kolonlar bu rölatif yerdeğiştirme nedeniyle üstteki perdelerin diğer uçlarında oluşan uç kuvvetlerini, 4.2 bağıntısındaki ilave satırlar ise bu rölatif yerdeğiştirmelerle birlikte plastik yerdeğiştirme meydana gelmiş noktada üstteki perdelerin alt ucunda artan yükler için bir düşey uç kuvveti oluşmaması koşulunu ifade eder. Çubuk sistemlerde plastik mafsallarda oluşan kesitte plastik dönmenin ilave bilinmeyen olarak alınmasında uygulanan mantığın benzeri burada uygulanmaktadır. Plastikleşen düğüm noktasındaki ilave plastik düşey yerdeğiştirme ve perde elemanın uç yerdeğiştirmeleri plastikleşen noktalarda iç kuvvet oluşturmazlar. Bu durum denklem 4.2 ile ifade edilmektedir.

İlave edilen satır ve sütunlar indirgenerek, denklem 4.1 ve 4.2 ile sistemin ΔP birim yük artımına göre çözümü yapılır. $[S_{dd}]$ matrisi daha önceden oluşturulup, indirgenmiş olarak saklandığından bu matris üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmaz. Bu çözüm ile plastikleşen sisteme ait birim yatay yük parametresi için ilave düğüm noktası yerdeğiştirme bileşenleri bulunur.

Denklem 4.1 ve 4.2'de ifade edilen $[S_{dd}]$, $[S_{d\Delta}]$, $[S_{\Delta d}]$, $[S_{\Delta\Delta}]$ matrisleri,

$[S_{dd}]$: Hiçbir noktada plastikleşme meydana gelmeden önceki sistem rijitlik matrisidir. Sistem ortak eksen takımındaki düğüm noktaları yerdeğiştirme bileşenlerinden dolayı, bu yerdeğiştirme bileşenleri doğrultusunda oluşacak uç kuvvetlerini gösterir.

$[S_{d\Delta}]$: Plastikleşen düğüm noktasındaki ilave plastik düşey yerdeğiştirmelerden dolayı o noktanın üstündeki perde elemanlarının düğüm noktalarında oluşan uç kuvvetlerini gösterir. Sistem ortak eksen takımında oluşturulmuştur. Betti karşılıklı teoremi uyarınca $[S_{\Delta d}] = [S_{d\Delta}]^T$ dır.

$[S_{\Delta d}]$: Düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden dolayı plastikleşen düğüm noktalarında oluşan düşey uç kuvvetlerini gösterir.

$[S_{\Delta\Delta}]$: Dış yükler ve düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken, plastikleşen düğüm noktasındaki plastikleşme değerinden dolayı tüm plastikleşen düğüm noktalarında oluşan düşey uç kuvvetlerini gösterir. Perde elemanda iki alt düğüm noktasında plastikleşme meydana gelmesi durumunda köşegen üzerindeki

terimler dışındaki terimler sıfırdan farklı olabilir. Bu durumun dışında sadece esas köşegen üzerindeki terimler sıfırdan farklıdır.

olarak tanımlanır.

$[S_{d\Delta}]$ matrisinin oluşturulabilmesi için plastikleşmenin gerçekleştiği düğüm noktalarının elemanın hangi düğüm noktası olduğunun belirlenmesi gerekir. Plastikleşmenin perde elemanın I düğüm noktasında olması durumunda $[K]_{11}$, $[K]_{21}$, $[K]_{31}$, $[K]_{41}$, $[K]_{51}$, $[K]_{61}$ alt matrislerinin, perde eleman özel eksen takımındaki 1 nolu düşey yerdeğiştirme serbestliğinin birim değerinden dolayı oluşan düğüm noktası uç kuvvetlerini veren 1. kolonları alınacaktır. Bu şekilde oluşturulan $[K]_{1\Delta}$, $[K]_{2\Delta}$, $[K]_{4\Delta}$, $[K]_{5\Delta}$ alt matrisleri 4x1 mertebesinde, $[K]_{3\Delta}$ ve $[K]_{6\Delta}$ alt matrisleri 3x1 mertebesinde kolon matrislerdir. Plastikleşmenin perde elemanın J düğüm noktasında olması durumunda ise $[K]_{12}$, $[K]_{22}$, $[K]_{32}$, $[K]_{42}$, $[K]_{52}$, $[K]_{62}$ alt matrislerinin, perde eleman özel eksen takımındaki 1 nolu düşey yerdeğiştirme serbestliğinin birim değerinden dolayı oluşan düğüm noktası iç kuvvetlerini veren 1. kolonları alınacaktır. Buna göre plastikleşmenin perde elemanın I düğüm noktasında ve J düğüm noktasında olması durumlarına ait $[S_{d\Delta}]$ matrisini oluşturan $[K]_{1\Delta}$, $[K]_{2\Delta}$, $[K]_{3\Delta}$, $[K]_{4\Delta}$, $[K]_{5\Delta}$, $[K]_{6\Delta}$ matrisleri Çizelge 4.1'de özetlenmektedir.

Çizelge 4.1 : $[S_{d\Delta}]$ matrisinin elemanları.

Plastikleşmenin i ucunda olması durumunda $[S_{d\Delta}]$	Plastikleşmenin j ucunda olması durumunda $[S_{d\Delta}]$
$[K]_{1\Delta} = \begin{bmatrix} k_{1,1} \\ k_{2,1} \\ k_{3,1} \\ k_{4,1} \end{bmatrix}$	$[K]_{1\Delta} = \begin{bmatrix} k_{1,5} \\ k_{2,5} \\ k_{3,5} \\ k_{4,5} \end{bmatrix}$
$[K]_{2\Delta} = \begin{bmatrix} k_{5,1} \\ k_{6,1} \\ k_{7,1} \\ k_{8,1} \end{bmatrix}$	$[K]_{2\Delta} = \begin{bmatrix} k_{5,5} \\ k_{6,5} \\ k_{7,5} \\ k_{8,5} \end{bmatrix}$

Çizelge 4.1 (devam) : $[S_{d\Delta}]$ matrisinin elemanları.

Plastikleşmenin i ucunda olması durumunda $[S_{d\Delta}]$	Plastikleşmenin j ucunda olması durumunda $[S_{d\Delta}]$
$[K]_{3\Delta} = \begin{bmatrix} k_{9,1} \\ k_{10,1} \\ k_{11,1} \end{bmatrix}$	$[K]_{3\Delta} = \begin{bmatrix} k_{9,5} \\ k_{10,5} \\ k_{11,5} \end{bmatrix}$
$[K]_{4\Delta} = \begin{bmatrix} k_{12,1} \\ k_{13,1} \\ k_{14,1} \\ k_{15,1} \end{bmatrix}$	$[K]_{4\Delta} = \begin{bmatrix} k_{12,5} \\ k_{13,5} \\ k_{14,5} \\ k_{15,5} \end{bmatrix}$
$[K]_{5\Delta} = \begin{bmatrix} k_{16,1} \\ k_{17,1} \\ k_{18,1} \\ k_{19,1} \end{bmatrix}$	$[K]_{5\Delta} = \begin{bmatrix} k_{16,5} \\ k_{17,5} \\ k_{18,5} \\ k_{19,5} \end{bmatrix}$
$[K]_{6\Delta} = \begin{bmatrix} k_{20,1} \\ k_{21,1} \\ k_{22,1} \end{bmatrix}$	$[K]_{6\Delta} = \begin{bmatrix} k_{20,5} \\ k_{21,5} \\ k_{22,5} \end{bmatrix}$

Perdenin alt iki düğüm noktasında da plastikleşme oluşması durumunda $[S_{d\Delta}]$ matrisi,

$$[S_{d\Delta}] = \begin{bmatrix} [K]_{1\Delta}]_1 & [K]_{1\Delta}]_2 \\ [K]_{2\Delta}]_1 & [K]_{2\Delta}]_2 \\ [K]_{3\Delta}]_1 & [K]_{3\Delta}]_2 \\ [K]_{4\Delta}]_1 & [K]_{4\Delta}]_2 \\ [K]_{5\Delta}]_1 & [K]_{5\Delta}]_2 \\ [K]_{6\Delta}]_1 & [K]_{6\Delta}]_2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

şeklinde 22x2 boyutundadır.

$[S_{\Delta\Delta}]$ matrisinin belirlenmesi için plastikleşmenin olduğu noktalar belirlenir. Birinci adımda perde elemanın I düğüm noktasında plastikleşmenin gerçekleşmesi durumunda $[S_{\Delta\Delta}]$ matrisi 1x1 boyutundadır ve değeri $[K]_{11}$ matrisinin ilk terimi olan

k_{11} 'e eşittir. İkinci adımda perde elemanın J düğüm noktasında plastikleşmenin gerçekleşmesi durumunda $[S_{\Delta\Delta}]$ matrisi 2x2 boyutundadır.

1.adımda,

$$[S_{\Delta\Delta}] = [k_{11}] \quad (4.4a)$$

2.adımda,

$$[S_{\Delta\Delta}] = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,5} \\ k_{5,1} & k_{5,5} \end{bmatrix} \quad (4.4b)$$

Perde elemanın alt düğüm noktalarından birinde plastikleşme gerçekleştikten sonra, plastikleşen noktaya komşu perde eleman düğüm noktalarında basınçtan çekmeye geçme durumu görüldüğü takdirde, $[S_{\Delta d}]$, $[S_{d\Delta}]$, $[S_{\Delta\Delta}]$ matrislerinin ilgili terimlerinde değişiklik yapmak gerekir. İlgili perde elemana ait basınç elemanı rijitlik matrisleri, çekme elemanı rijitlik matrisleri ile değiştirilerek $[S_{\Delta d}]$, $[S_{d\Delta}]$, $[S_{\Delta\Delta}]$ matrislerinin çekmeye geçen düğüm noktası ile ilgili terimlerinde değişiklik yapılmış olur. $[S_{\Delta d}]$, $[S_{d\Delta}]$, $[S_{\Delta\Delta}]$ matrisleri indirgeme yapılarak çözüme geçmeden önce, son halleri ile saklanır. Böylece ileriki adımlarda benzer durumun görülmesi halinde matrisler tamamen yeniden oluşturulmayacak, sadece ilgili terimlerde gerekli değişikliklerin yapılması ile çözüme gidilebilecektir.

4.3 Perde Düğüm Noktalarındaki Gerilmelerin Hesabı

Perde elemanın plastikleşen düğüm noktasından dolayı eleman düğüm noktalarında oluşan gerilmeler, eleman gerilme matrisi ve plastikleşen düğüm noktasının plastik düşey yerdeğiştirme değeri kullanılarak bulunur. Burada ifade edilen gerilme matrisi Bölüm 3.9'da anlatılan $[SIGEL]$ matrisidir. $[SIGEL]$ gerilme matrisinin $d_1 = \Delta$ birim yerdeğiştirme durumuna karşı gelen 1. sütunu hesaplarda dikkate alınır. Plastikleşen düğüm noktasının plastikleşme parametresinden dolayı, bu düğüm noktasının ait olduğu elemanın düğüm noktalarında oluşan iç kuvvet değerleri Δ plastikleşme parametresi ile $[SIGELP]$ matrisinin çarpımı ile elde edilir. Bir düğüm noktasında oluşan toplam iç kuvvet değeri,

$$[N] = [SIGEL] \times [d] + [SIGELP] \times [\Delta] \quad (4.5)$$

ifadesi ile elde edilir. Ancak hesaplanan noktada daha önce plastikleşme meydana gelmişse artan yükler altında normal gerilmenin oluşmayacağı göz önüne alınmıştır.

Örneğin perde elemanın I noktasında plastikleşme meydana gelmesi durumunda, [SIGELP] matrisini eleman gerilme matrisinin 1. sütunu, perde elemanın J noktasında plastikleşme meydana gelmesi durumunda, [SIGELP] matrisini eleman gerilme matrisinin 5. sütunu oluşturmaktadır.

Buna göre plastikleşme perde elemanın I düğüm noktasında ise 4.6a matrisi, plastikleşme perde elemanın J düğüm noktasında ise 4.6b matrisi kullanılır.

$$[SIGELP]_{16 \times 1} = \begin{bmatrix} [SG_{11}]_{4 \times 1} \\ [SG_{21}]_{4 \times 1} \\ [SG_{41}]_{4 \times 1} \\ [SG_{51}]_{4 \times 1} \end{bmatrix} \quad (4.6a)$$

$$[SIGELP]_{16 \times 1} = \begin{bmatrix} [SG_{12}]_{4 \times 1} \\ [SG_{22}]_{4 \times 1} \\ [SG_{42}]_{4 \times 1} \\ [SG_{52}]_{4 \times 1} \end{bmatrix} \quad (4.6b)$$

4.4 Perde Elemana Uygulanan Yük Artım Yönteminin Prensipleri

Bu bölümde, oluşturulan perde elemanında göçme güvenliğinin belirlenmesi için, uygulanacak *yük artım yönteminin* prensipleri belirlenmiştir.

Birinci adım olarak, sistemin hem düşey yük grubu, hem yük parametresi birim alınmış yatay yük grubu için ayrı ayrı çözümü yapılır. Yalnız düşey yükler altında hiç bir noktada elastik deformasyon sınır değeri aşılmayacak şekilde kesitlerin seçildiği kabul edilmiştir. Sadece düşey yükler ve birim yatay yük altında, başlangıçta henüz plastikleşme meydana gelmemiş sistemin çözümü için denklem 4.7 kullanılır. Denklem 4.7'nin çözümü ile başlangıçta perde elemanı için bilinmeyen olarak tanımlanan toplam 22 adet uç yerdeğiştirmesi elde edilir. Çözüm sonucu her bir yük grubu için yer değiştirmeler, iç kuvvetler ve perdelerin bağlandığı noktalardaki ϵ_z deformasyonları bulunur.

Her düğüm noktasının betonun çekme şekil değiştirme sınırına $-\epsilon_{zcek}$ 'e erişebilmesi için gerekli yük parametresi katsayısı denklem 4.8 kullanılarak ayrı ayrı belirlenir. Burada SOL(1) düşey yükler altında düğüm noktalarında bulunan birim boy değişimi

değerini, SOL(2) yatay yükler altında düğüm noktalarında bulunan birim boy değişimi değerini ifade etmektedir. Bu katsayılar içinde en küçüğü basınçtan çekmeye geçecek olan ilk düğüm noktasını ve buna karşı gelen yatay yük parametresini verir. Bu yatay yük parametresi *paz* olarak adlandırılır. Çatlama şekil değiştirme sınırını beton kalitesine bağlı olarak betonun birim çekme şekil değiştirme deformasyonu belirlemektedir. İstenirse hesaplarda $f_{ctk}=0$ alınarak betonun çekme almayacağı kabulünün yapılması da mümkündür.

Benzer şekilde yük artımıyla her düğüm noktasının elastik şekil değiştirme sınırına erişebilmesi için gerekli yük parametresi katsayısı denklem 4.8b kullanılarak ayrı ayrı belirlenir. Bu katsayılar içinde en küçüğü ilk plastikleşmenin oluşacağı düğüm noktasını ve buna karşı gelen yatay yük parametresini verir. Bu yatay yük parametresi *pad* olarak adlandırılır.

Paz ve *pad* değerleri birbiri ile kıyaslanır, küçük olan değer yük artımında kullanılacak yük parametresi değerini verir.

İlk adım için *paz* değerinin daha küçük olması durumunda, toplam yükler için çözüm denklem 4.9a'da, *pad* değerinin daha küçük olmasında ise, çözüm denklem 4.9b'de belirtildiği gibi, birim yatay yük parametresi için bulunmuş çözümün yatay yük parametresi değeri ile çarpılıp düşey yüklere ait çözüm ile süperpoze edilmesi ile bulunur.

$$[S_{dd}][d]=[q] \quad (4.7)$$

$$paz = \frac{\varepsilon_{zcek} - SOL(1)}{SOL(2)} \quad (4.8a)$$

$$pad = \frac{\varepsilon_z - SOL(1)}{SOL(2)} \quad (4.8b)$$

$$SOL(1) + SOL(2) \times paz = SOL^2(1) \quad paz < pad \quad (4.9a)$$

$$SOL(1) + SOL(2) \times pad = SOL^2(1) \quad pad < paz \quad (4.9b)$$

Bir sonraki adımda plastikleşmenin gerçekleşeceği veya basınç bölgesinden çekme bölgesine geçecek noktayı bulmak için, yük artım oranının yeniden belirlenmesi gerekir. Bu yatay yük artım oranı, bir önceki adımda süperpozisyon yardımı ile

toplam yükler için bulunan şekil değiştirmeler yani SOL(1), birim yatay yük parametresi için bulunan çözüm yani SOL(2) ve elastik şekil değiştirme sınır değeri dikkate alınarak belirlenir. Her adımda yeni plastikleşen düğüm noktalarına karşı gelen yatay yük parametresi artımı bulunup, toplam yerdeğiştirme ve kesit zorlarına ilaveler yapılır. Adımlar tekrarlanarak yeni plastikleşecek düğüm noktaları, sayısı, yatay yük parametresi artımları belirlenir. Her adımda düğüm noktaları düşey plastik yer değiştirmelerinin sınır değerini aşıp aşmadığı kontrol edilir.

Oluşturulan perde elemanı donatı ve betonun birlikte çalışması halinin dikkate alındığı bir model olduğu için, betonun çatlamış olması veya çatlamamış olması durumlarına göre çözümde farklı eleman rijitlik matrisleri kullanılacaktır.

Herhangi bir adımda çekme ve basınç bölgelerindeki elemanların değişmemesi halinde, yukarıda belirtildiği gibi oluşmuş denklem takımının yeniden indirgenmesine gerek olmayıp, denkleme sadece satır ve sütun ilavesi yapılması yeterli olacaktır. Tarafsız eksenin kaymasına bağlı olarak, basınç bölgesinde olan bazı elemanların çekme bölgesine geçmesi halinde, tüm sistem rijitlik matrisinin yeniden kurularak çözüm yapılması gerekecektir.

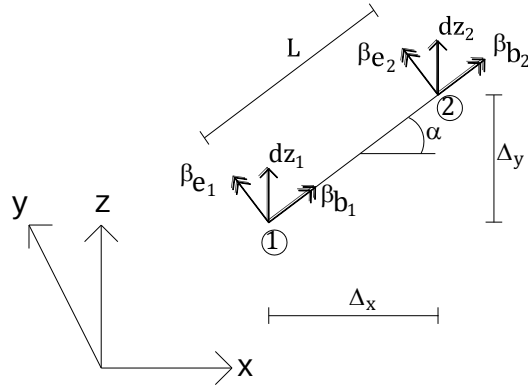
5. SİSTEMİN OLUŞTURULMASINDA ÇUBUK ELEMANLARLA İLGİLİ AÇIKLAMALAR

Bu bölümde perdelerin birbirine bağ kirişlerle bağlı olduğu veya perdelerle birlikte çerçeve sistemlerinin bulunduğu durumlardaki kiriş ve kolon elemanlarının tanımlarına yer verilmektedir. Tez konusuna doğrudan girmediğinden bu tanımlara ait açıklamalar olabildiğince özetlenerek verilecektir. Kolon ve kirişler için eleman rijitlik matrislerinin oluşturulması ayrı bir alt program ile yapılmaktadır. Yük artımının her adımında kirişlerin uçlarındaki eğilme ve burulma momenti değerleri, programa dışarıdan girilen M_{pe} , M_{pb} eğilme ve burulma plastikleşme momenti kapasitesi ile karşılaştırılır ve çubuk elemanların uçlarında plastik mafsallın oluşması için gerekli yük parametresi değeri hesaplanır. Kolonlarda ise alt ve üst kesitlerinde bulunan normal kuvvet ile iki dik doğrultudaki eğilme momentleri bulunup kolon kesitinin tanımlanmış akma yüzeyine ulaşması için gerekli yük parametresi değeri hesaplanır. Çubuklar için hesaplanmış yük parametrelerinden en küçük değeri, perde elemanlar için Bölüm 4.4'te anlatıldığı gibi bulunan yük parametresi değeri ile karşılaştırılır ve küçük olan yük parametresi değerine göre plastikleşmenin perde elemanın veya çubuk elemanın düğüm noktasında meydana geldiğine karar verilir. Çubuk elemanlar için uç serbestlikleri, eleman rijitlik ve gerilme matrisi terimleri aşağıdaki bölümlerde özetlenmektedir.

5.1 Kiriş Eleman Tanımı

Kiriş eleman kat düzlemi içinde rijit öteleme hareketi yapacağı için herhangi bir master noktaya bağlanmasına gerek yoktur.

Her düğüm noktası için tanımlanan 3 adet uç serbestliği yani bir kiriş eleman için tanımlanan 6 adet uç serbestliği Şekil 5.1'de görülmektedir. Her düğüm noktasında T_z , M_{bur} , $M_{eğilme}$ olmak üzere üç kesit zoru hesaplanır. Uç serbestliklerinin ve kesit zorlarının ifade edildiği matrisler sırasıyla denklem 5.1 ve 5.2 ile eleman özel eksen takımındaki rijitlik matrisi denklem 5.3 verilmektedir.



Şekil 5.1 : Kiriş uç noktalarındaki yerdeğiştirme serbestlikleri.

$$\begin{bmatrix} [d]_1 \\ [d]_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dz_1 \\ \beta b_1 \\ \beta e_1 \\ dz_2 \\ \beta b_2 \\ \beta e_2 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\begin{bmatrix} [P]_1 \\ [P]_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{z1} \\ M_{bur1} \\ M_{eğ1} \\ T_{z2} \\ M_{bur2} \\ M_{eğ2} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} [K]_{11} & [K]_{12} \\ [K]_{21} & [K]_{22} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$[K]_{11} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3(1+\beta)} & 0 & -\frac{6EI}{L^2(1+\beta)} \\ 0 & \frac{GI_b}{L} & 0 \\ -\frac{6EI}{L^2(1+\beta)} & 0 & \frac{4EI(1+0.25\beta)}{L(1+\beta)} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$[K]_{12} = [K]_{21} = \begin{bmatrix} -\frac{12EI}{L^3(1+\beta)} & 0 & -\frac{6EI}{L^2(1+\beta)} \\ 0 & -\frac{GI_b}{L} & 0 \\ \frac{6EI}{L^2(1+\beta)} & 0 & \frac{2EI(1-0.5\beta)}{L(1+\beta)} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$[K]_{22} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3(1+\beta)} & 0 & \frac{6EI}{L^2(1+\beta)} \\ 0 & \frac{GI_b}{L} & 0 \\ \frac{6EI}{L^2(1+\beta)} & 0 & \frac{4EI(1+0.25\beta)}{L(1+\beta)} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

şeklindedir.

Burada,

$$\beta = \frac{12EI}{\frac{GF'}{1.2} L^2} = 2.4(1+\nu) \frac{h^2}{L^2} \quad (5.7)$$

olarak ifade edilir.

Kiriş elemanın x-y yatay düzleminde Şekil 5.1'deki gibi θ açısı yapması halinde eleman rijitlik ve yükleme matrislerinin global eksen takımındaki bileşenlerinin bulunması gerekir. Sistem ortak eksen takımındaki uç yerdeğiştirmelerinden çubuk özel eksen takımındaki uç yerdeğiştirmelerine geçmek için

$$[T_R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

dönüştürme matrisi kullanılır.

Bu durumda ortak sistem eksen takımındaki eleman rijitlik matrisi denklem 5.9 ve ortak sistem eksen takımındaki gerilme matrisi denklem 5.10 bağıntıları ile tanımlanır.

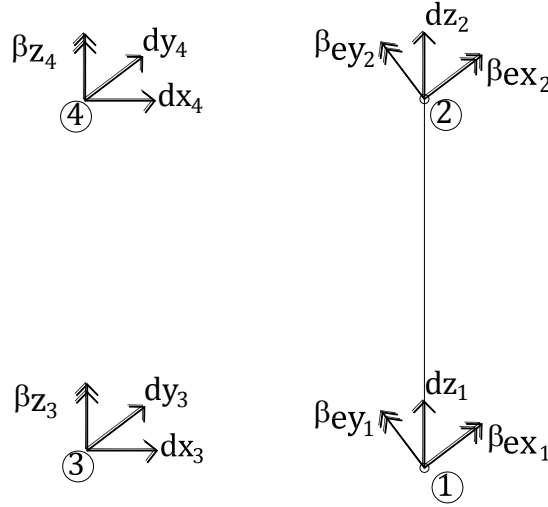
$$[K]_{ixjx} = [T_R]^T [K]_{ij} [T_R] \quad (i, j=1,2) \quad (5.9)$$

$$[SG]_{ixjx} = [SG]_{ij} [T_R] \quad (5.10)$$

5.2 Kolon Eleman Tanımı

Kolon eleman alt ve üst düğüm noktaları ve bu düğüm noktalarının bağlandıkları master noktaları olmak üzere toplam 4 noktayla tanımlanır.

Bir kolon elemanda her düğüm noktası için 3 adet olmak üzere toplamda tanımlanan 12 adet uç serbestliği Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2 : Kolon uç noktalarındaki yerdeğiştirme serbestlikleri.

$$\begin{bmatrix} [d]_1 \\ [d]_2 \\ [d]_3 \\ [d]_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{z1} \\ \beta_{ex1} \\ \beta_{ey1} \\ d_{z2} \\ \beta_{ex2} \\ \beta_{ey2} \\ d_{z3} \\ \beta_{ex3} \\ \beta_{ey3} \\ d_{z4} \\ \beta_{ex4} \\ \beta_{ey4} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Kolon elemanın x-y yatay düzleminde Şekil 5.1’deki gibi θ açısı yapması halinde eleman rijitlik ve yükleme matrislerinin global eksen takımındaki bileşenlerinin bulunması gerekir. Sistem ortak eksen takımındaki uç yerdeğiştirmelerinden çubuk özel eksen takımındaki uç yerdeğiştirmelerine geçmek için

$$[T_R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

dönüştürme matrisi kullanılır.

Bu durumda ortak sistem eksen takımındaki eleman rijitlik matrisi

$$[K]_{ijx} = [T_R]^T [K]_{ij} [T_R] \quad (i, j=1,2) \quad (5.13)$$

olarak ifade edilir.

Master noktasının (x_m, y_m) ve kolon elemanın üst ve alt düğüm noktalarının (x_0, y_0) koordinatları bilirse, sistem eksen takımındaki master noktasının yer değiştirmelerine bağlı olarak, kolon özel eksen takımındaki üst ve alt düğüm noktalarının yer değiştirme bileşenlerine geçiş $[T_\theta]$ dönüştürme ve $[T_m]$ taşıma matrisleri tanımlanarak yapılabilir. Eleman özel eksen takımındaki eleman rijitlik matrisinden sistem ortak eksen takımındaki eleman rijitlik matrisine denklem 5.16'dan yararlanılarak geçilir.

$$[T_\theta] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

$$[T_m] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y_0 - y_m) \\ 0 & 1 & (x_0 - x_m) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

$$[K]_{ijx} = [T_m]^T [T_\theta]^T [K]_{ij} [T_\theta] [T_m] \quad (i, j=3,4) \quad (5.16)$$

Kolon elemanda iç kuvvet matrisi,

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{12} \\ M_{ex1} \\ M_{ey1} \\ M_b \\ M_{ex2} \\ M_{ey2} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

olmak üzere üst ve alt düğüm noktalarındaki eğilme momentleri, sabit burulma momenti ve sabit normal kuvvet değerlerinden oluşur. Ortak sistem eksen takımındaki gerilme matrisi denklem 5.18 ile, gerilme matrisinden yararlanılarak elde edilen iç kuvvet matrisi ise denklem 5.19 ile ifade edilmektedir.

$$[SG]_{ixjx} = [SG]_{ij} [T_R] \quad (i, j=1,2) \quad (5.18a)$$

$$[SG]_{ixjx} = [SG]_{ij} [T_m] [T_\theta] \quad (i, j=3,4) \quad (5.18b)$$

$$[P]_{ij} = [SG]_{ixjx} [d]_{ixjx} \quad (5.19)$$

6. BİLGİSAYAR PROGRAMI

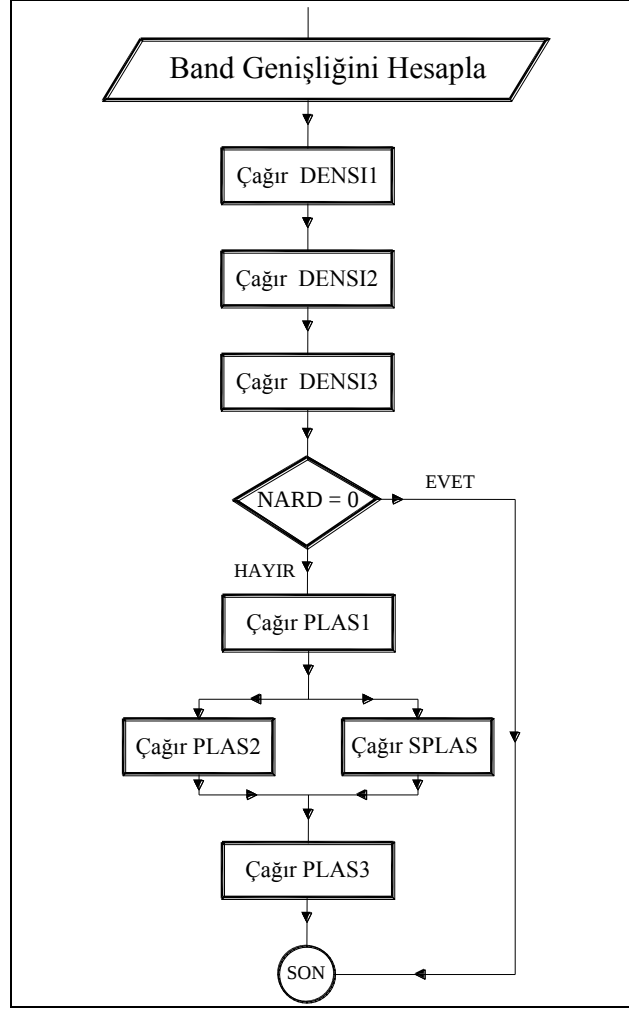
Betonarme perdeleri de içeren çok katlı yapı sistemlerinin artan yatay yükler altında itme analizinin yapılabilmesi için *GENS* isimli bir bilgisayar programının geliştirilmesi yoluna gidilmiştir.

Fortran 77 programlama dilinin kullanıldığı ve değişik sonlu elemanların alt programlarla ana programa monte edilebildiği bu programın ilk versiyonu, Saygun, A. tarafından sonlu elemanlardan oluşan sistemlerin lineer hesabına yönelik olarak hazırlanmıştır. Bu çalışmada önerilen şekliyle itme analizinin gerektirdiği değişiklik, tahkik ve düzenlemeler programa eklenen yeni alt programlarla sağlanmaktadır.

6.1 Programın Yapısı ve Çalışma Düzeni

GENS bilgisayar programının lineer hesaba yönelik bölümü sisteme ait bilgileri okuyan bir ana program, her bir eleman tipi için eleman matrislerini hesaplayan alt programlar ve sistemin bütünü için rijitlik ve yükleme matrisini kuran, sınır şartları ve düğüm noktalarına etkiyen tekil yükleri okuyup denklem takımını çözen ve düğüm noktalarının serbestlik değerlerine bağlı olarak elemanlarda kesit zorlarını hesaplayan ardışık üç alt programdan (*DENSI1*, *DENSI2*, *DENSI3*) oluşmaktadır.

Artımsal itme analizi yapılacaksa öncelikle bir alt programla (*PLAS1*) yük artım değeri ve yük artımı sonucunda sistemde oluşan değişikliğin türü belirlenmektedir. Yük artımı sonucunda betonarme perde içinde tarafsız eksenin yerinin kayması sonucu basınç bölgesindeki bir eleman çekme bölgesine geçiyorsa *SPLAS* alt programına, betonarme perdelerin birinin bir köşesinde düşey deformasyonun çekme veya basınç akma sınırına ulaşması veya kolon ve kiriş uç kesitlerinden birinde plastik mafsall oluşması halinde *PLAS2* alt programına dallanma olmaktadır. Her iki alt programda da sistem rijitlik matrisinde gerekli değişiklikler yapıp denklem sisteminin çözümünden yatay yük parametresi birim değeri için bilinmeyenler hesaplanmaktadır. *PLAS3* alt programında eleman kesit zorları tayin edilmektedir. Öngörülen adım sayısı kadar *PLAS1* ile *PLAS3* arasındaki döngünün



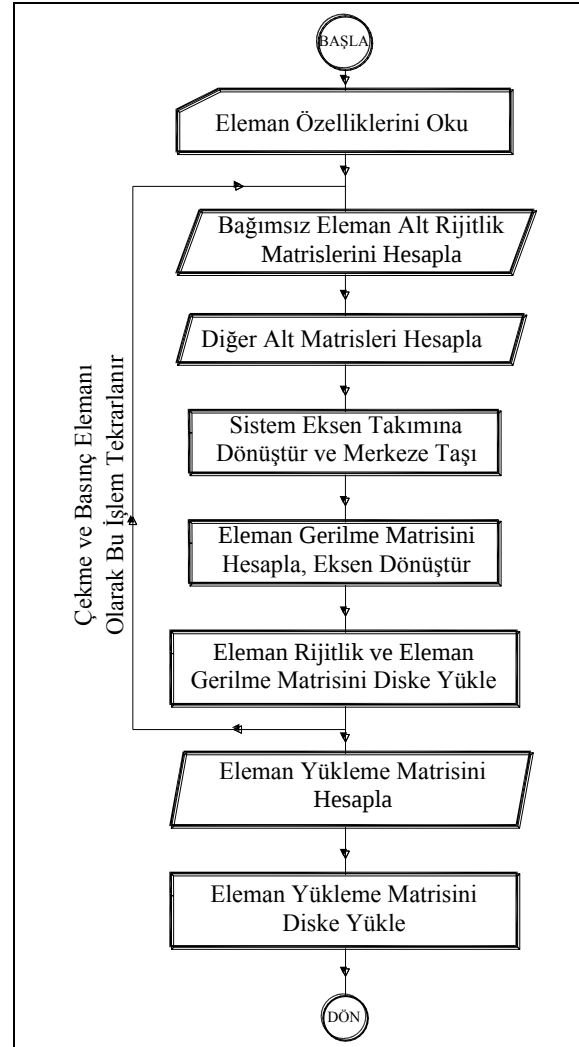
Şekil 6.1 (devam) : Ana program akış diyagramı.

ELFIN11 Alt Programı: Akış diyagramı Şekil 6.2'de verilen bu alt programda 22 serbestlik dereceli betonarme perde elemana ait rijitlik ve diğer ilgili matrisler hesaplanmaktadır. Özellikleri ve planda konumu farklı her eleman için icra edilen bu alt programda eleman boyutlarının yanında planda (x-y düzleminde) perdenin x eksenine ile yaptığı açı, perde alt ve üst kenar ortalarının katlardaki master düğüm noktasına göre koordinatları okunmaktadır.

Başlangıçta, yalnız düşey yükler altında, bütün perde elemanları basınç bölgesinde olup, elemanın rijitlik matrisi terimleri için Bölüm 3.5'de verilen ve betonun katkısının dikkate alındığı formüller geçerlidir. Yatay yüklerin etkimesi ve elemanın çekme bölgesine geçmesi ile Bölüm 3.5'de ifade edilen ve betonun katkısının ihmal edildiği rijitlik matrisi terimlerinin geçerli olması söz konusudur. ELFIN11 alt programında her iki durum için de eleman rijitlik matrisleri ayrı ayrı hesaplanıp diskte saklanmaktadır. Denklem 3.45 ve 3.46 formülleri ile bağımsız alt matrislerin

terimleri bulunup, Bölüm 3.6 da verilen dönüştürme bağıntıları ile diğer alt matrislere geçilerek eleman özel eksenlerinde (planda x-z düzlemi içinde ve master düğüm noktalarının üst ve alt kenarların ortalarında olması kabulü ile) eleman rijitlik matrisi kurulduktan sonra, elemanın plandaki konumuna bağlı olarak Bölüm 3.6'da denklem 3.109 ve 3.110 ifadeleri ile verilen matris çarpımlarıyla eksen dönüştürme ve merkeze taşıma işlemleri yapılarak sistem eksen takımındaki eleman rijitlik matrisleri bulunmaktadır.

Bu alt programda perde elemanın dört köşesindeki kesit zorlarını sistem eksen takımındaki düğüm noktaları serbestliklerine bağlayan eleman gerilme matrisleri de benzer şekilde tanımlanarak, elemanın hem basınç, hem çekme bölgesi içinde olması durumları için ayrı ayrı oluşturularak diske yüklenmektedir.



Şekil 6.2 : ELFIN11 alt programı akış diyagramı.

ELFIN12 Alt Programı: İncelenecek yapı sisteminde betonarme perdelerin yanında çerçevelerin de bulunması halinde kolon veya kiriş çubuk sonlu elemanların rijitlik, yükleme ve gerilme matrislerinin oluşturulması ve diske yüklenmesi ELFIN12 alt programı ile yapılmaktadır. Bu elemanlarla ilgili düzenlemeler doğrudan tez konusuna girmediğinden bu alt programa ait detaylı akış diyagramı verilmesine ve açıklama yapılmasına gerek duyulmamıştır.

DENSI1 Alt Programı: Bu alt programda ELFIN11 alt programında hesaplanmış olan eleman rijitlik ve yükleme matrisi diskten alınarak sisteme ait rijitlik ve yükleme matrisi oluşturulur. Bu alt program standart bir işlem olduğu için akış diyagramı verilmesine gerek görülmemiştir.

DENSI2 Alt Programı: DENSI1'de oluşturulan sistem rijitlik matrisine sınır şartları ve tekil dış yükler ilave edilir.

Artımsal itme analizi yapılırken lineer ilk hesapta, iki yükleme durumu için birlikte hesap yapılmalıdır. Birinci yükleme durumu düşey yükler için çözüm olup, kat hizalarında, perde zati ve döşeme yüklerine statikçe eşdeğer düğüm noktası tekil yükleri perde düğüm noktalarına etkitilir. Basitleştirme bakımından, döşemelerden kirişlere aktarılan yükler de eşdeğer tekil yüklere çevrilmektedir. İkinci yükleme ise yatay yük parametresinin birim değeri için kat master düğüm noktalarına etkitilen yatay yük yayılışına ait çözümdür. Sırayla önce birinci sonra ikinci yükleme için, yüklü düğüm noktası sayısı ve bu sayı kadar düğüm noktası ile yük bileşenlerinin şiddetleri okutulur. Gauss indirgeme yöntemi ile denklem takımının bilinmeyen uç yerdeğiştirmeleri her iki yükleme için hesaplanarak sonuç dosyasına yazdırılır. Bu alt program standart bir işlem olduğu için akış diyagramı verilmesine gerek görülmemiştir.

DENSI3 Alt Programı: Bu alt programda her elemana ait uç yerdeğiştirmeleri bulunmakta, eleman alt programlarında hesaplanmış ve diske yüklenmiş eleman gerilme matrisleri çağrılmakta ve matrislerin çarpımıyla elemanların düğüm noktalarındaki kesit zorları hesaplanmaktadır. Her elemanda kesit zorları ayrı ayrı bastırılabilceği gibi, perde elemanların birleştiği noktalarda o noktalardaki ortalama kesit zorları da hesaplanıp, bastırılmaktadır. Eleman düğüm noktalarında 1.yükleme için bulunan kesit zorları ELKT matrisi, 2. yükleme için bulunan kesit zorları ELKA matrisi olarak itme analizi hesaplarında kullanılmak üzere saklanacaktır. Bu alt

program standart bir işlem olduğu için akış diyagramı verilmesine gerek görülmemiştir.

PLAS1 Alt Programı: Artımsal itme analizi seçeneği uygulanacaksa, ana program akış diyagramı Şekil 6.3'de verilen PLAS1 alt programına geçer. Bu alt programa ilk defa girildiğinde (IARD=0) önce hem perde, hem çubuk elemanlar için sınır değerler okutulmaktadır. Betonarme perdeler için sınır değerler, basınç bölgesindeki betonun akma gerilmesine karşı gelen (ϵ_{zl}) basınç şekil değiştirmesi sınırı, çekme bölgesinde çeliğin akma gerilmesine karşı gelen (ϵ_{zlc}) çekme şekil değiştirmesi sınırı ve betonun çekme dayanım sınırına karşı gelen (ϵ_{zcek}) şekil değiştirme sınırıdır. Bir noktanın basınç bölgesinden çekme bölgesine geçişini belirleyen bu son değer betonun hiç çekme almadığı kabulü halinde sıfır alınır.

Yalnız düşey yükler altında, perdelerin genelde bütün noktalarında düşey şekil değiştirmeler basınç tarafındadır. Yatay yüklere bağlı eğilme momentleri arttıkça ilk hesap adımlarında çok sayıda noktada basınç bölgesinden çekme bölgesine geçiş söz konusu olmaktadır. Uçlarda çekme veya basınç akma sınırlarına ulaşılmadığı, bu hesap adımları atlanmak istenirse, baştan itibaren bu noktaların çekme bölgesinde olduğu ve bu noktalara bileşen perde elemanların, düşey doğrultuda yalnız donatıların etkili olduğu çekme elemanı olarak alınması seçeneği programda öngörülebilmektedir. Bu yola gidilecekse bu tür noktaların sayısı ve sistemdeki düğüm noktası numaraları (NSCEK) başlangıçta ayrıca okutulmaktadır.

Kirişlerde sınır değerler, giriş uçlarında plastik mafsallı oluşturan eğilme ve burulma momenti limit değerlerini, iki eksenli birleşik eğilme etkisindeki kolonlarda sınır değerler ise uç kesitlerindeki akma yüzeyini tanımlamaya yöneliktir.

Herhangi bir adımda bir nokta veya kesitte akma sınırına ulaşılacak plastikleşmenin başlamasına karşı gelen yük artım oranı PAD'ın belirlenmesi:

Betonarme perdelerde, perde elemanların bağlandığı düğüm noktalarında dördüncü serbestlik olan ϵ_z düşey boy değiştirme şekildeğiştirme irdelenerek akma sınırına ulaşılması tahkiki yapılacaktır. Yatay yüklere göre çözümü veren Yükleme II'de bir noktadaki düşey deformasyon pozitif ise bu noktada çekmeye bağlı akmanın söz konusu olacağı anlaşılıp elastik şekil değiştirme sınır değeri olarak çeliğin akma şekil değiştirmesi alınır. Tersine Yükleme II'de o noktadaki düşey deformasyon negatif ise o noktada basınca bağlı elemanın söz konusu olacağı anlaşılacak elastik

şekildeğiştirme sınır değeri olarak betonun idealleştirilmiş basınç şekildeğiştirme sınırı alınacaktır.

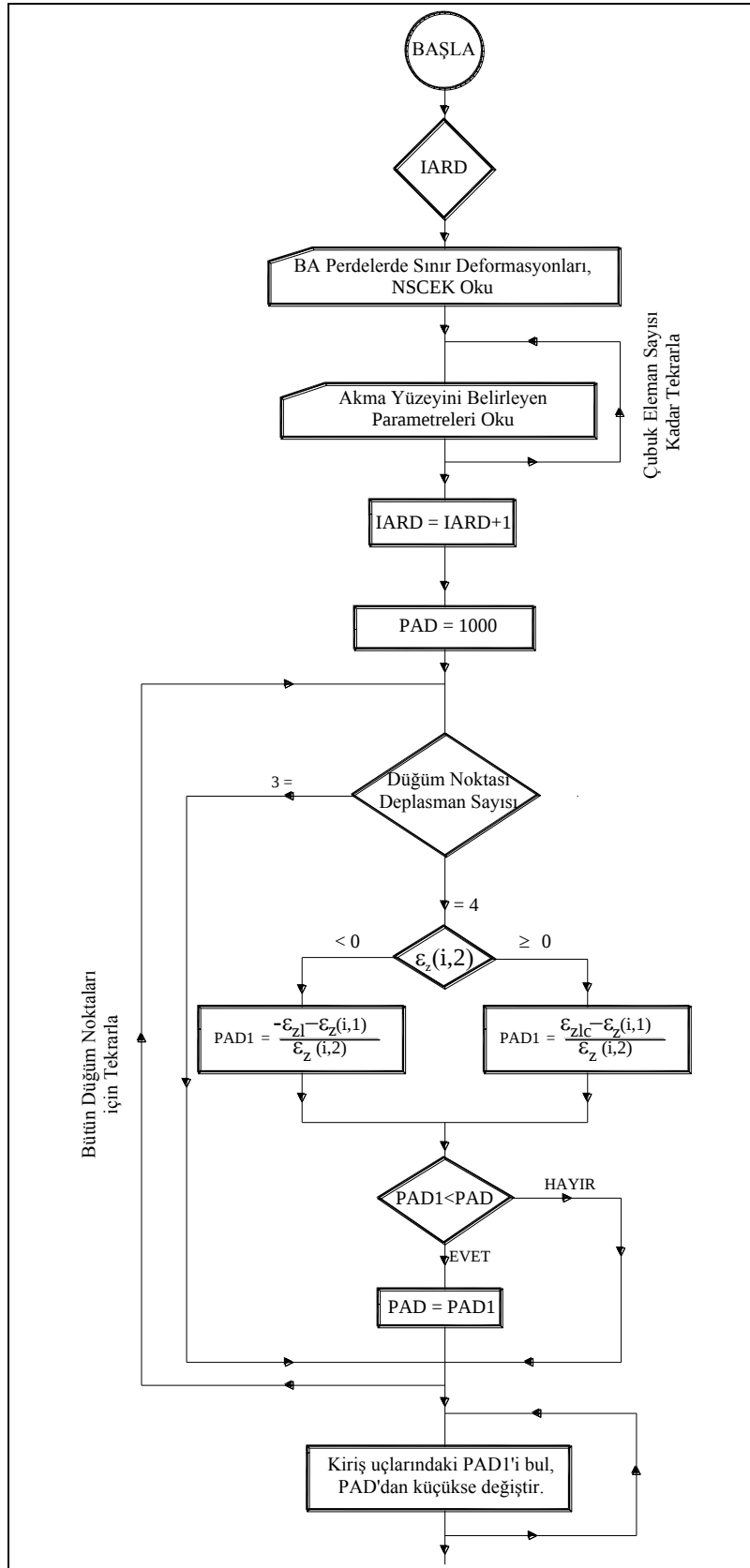
Betonarme perdelerin bağlandığı bütün düğüm noktaları taranıp, bu noktalarda çekme veya basınç akma sınırına erişilmesi için Yükleme I'deki deformasyonlara eklenecek Yükleme II'de yatay yük parametresinin birim değeri için bulunmuş deformasyonların, çarpılması gereken yük parametresi değeri bulunur. Bunların en küçüğü PAD olarak seçilir. Bir başka deyişle her noktada akma şekil değıştırme sınır değerinden Yükleme I'deki düşey deformasyon değeri çıkarılır ve bu değeri Yükleme II'deki düşey deformasyon değerine bölünüp en küçüğü seçilir.

Benzer şekilde bütün çubuk elemanların kiriş uçlarında eğilme veya burulma M_p limit değerine veya kolon uç kesitlerinde akma yüzeyine erişilebilmesi için Yükleme I'deki ELKT kesit zorlarına eklenecek ELKA kesit zorlarının çarpanları bulunur. Bunlardan en küçüğü betonarme perdeler için hesaplanmış PAD değerinden daha küçükse son PAD değeri bu olur.

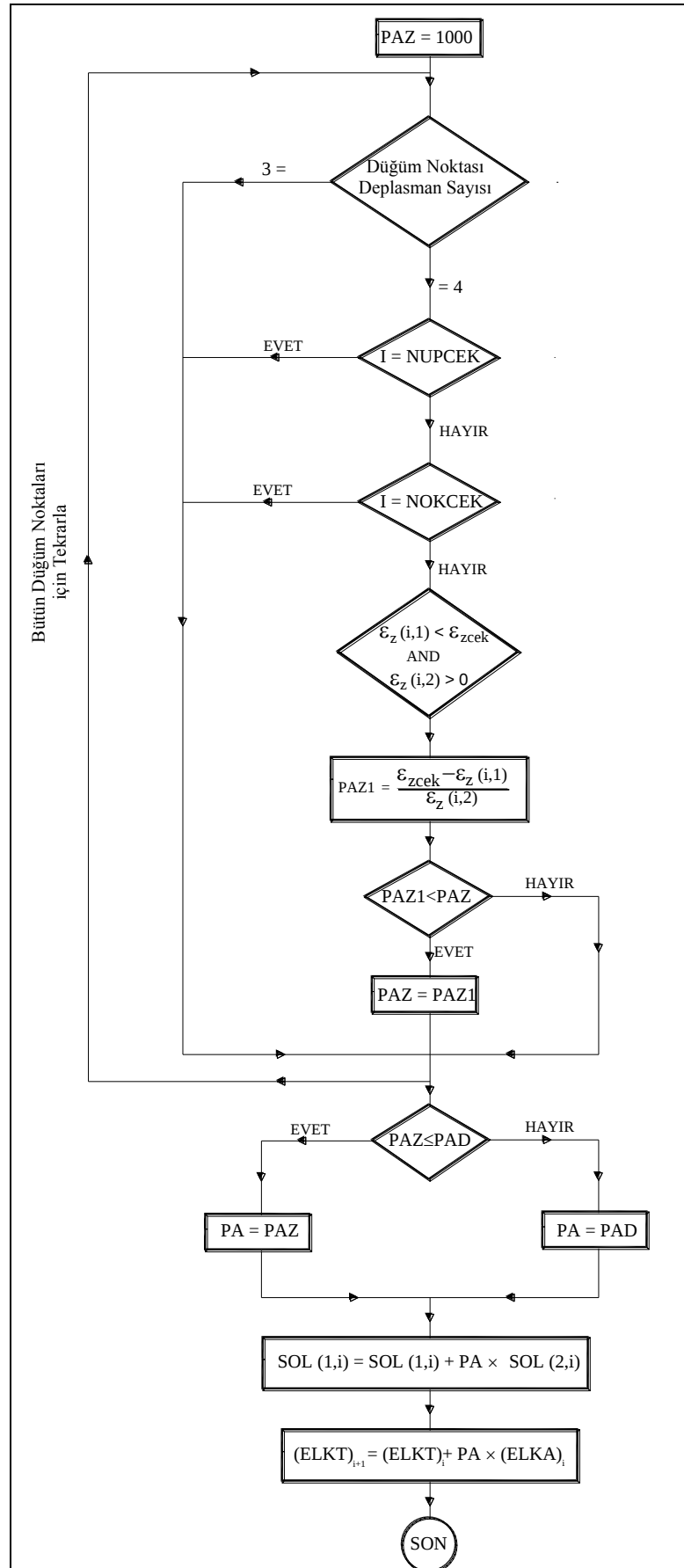
Herhangi bir adımda betonarme perde düğüm noktalarının basınç bölgesinden çekme bölgesine geçmesine karşı gelen yük artım oranı PAZ'ın belirlenmesi :

Betonarme perdelerin tüm düğüm noktaları yeniden taranır. Bu tarama yapılırken baştan itibaren çekme bölgesinde olduğu bilinen veya daha önceki adımlarda çekme bölgesine geçmiş olan noktalar atlanır. ϵ_z düşey boy değıştırme şekildeğiştirmesi Yükleme I'de negatif, Yükleme II'de pozitif olan noktalarda, Yükleme I'deki değeri, beton çekme dayanımı sınır şekildeğiştirmesine (ϵ_{zcek}) ulaştıracak Yükleme II çarpanları bulunur. Bunlardan en küçüğü basınçtan çekme bölgesine geçen ilk düğüm noktasını ve PAZ değerini verir.

Bulunan iki yük parametresi değerinden (PAZ ve PAD) küçük olanı o adıma ait yük parametresi değeridir. PLAS1'de son olarak Yükleme II'deki tüm düğüm noktaları serbestlikleri ve sonlu eleman kesit zorları bu yük parametresi ile çarpılarak Yükleme I'deki karşılıklarına ilave edilir. Buradan da anlaşılacağı gibi Yükleme I, başlangıçta düşey yüklere göre çözümü içerirken, ilerleyen adımlarda yük artımlarına bağlı olarak adım adım düğüm noktası serbestlik değerlerinin ve kesit zorlarının değışimini gösterecektir.



Şekil 6.3 : PLAS1 alt programı akış diyagramı.



Şekil 6.3 (devam) : PLAS1 alt programı akış diyagramı.

PLAS2 Alt Programı: PAD değeri PAZ dan küçük çıkmışsa akış diyagramı Şekil 6.4'de verilen PLAS2 alt programı devreye girer. Betonarme perdelerin düğüm noktalarının birinde ε_z düşey boy değiştirme şekildeğiştirmesinin elastik sınır değerine ulaşmasının veya kiriş/kolon herhangi bir çubuk eleman kesitinde plastik mafsallın oluşmasının PAD nedeni olmasına bağlı olarak, bu programın içinde de bir dallanma gereği ortaya çıkmaktadır.

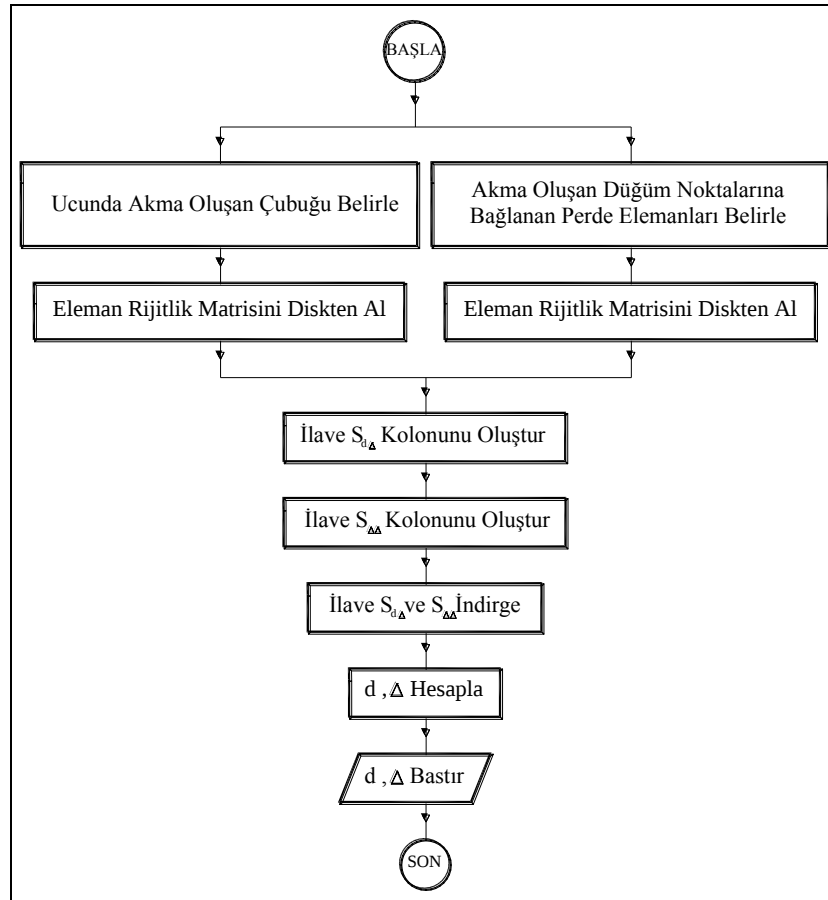
Bir betonarme perde düğüm noktasında ε_z 'in akma sınır değerine ulaşması halinde tezde Bölüm 4.2'den bilindiği gibi düşey boyuna plastik şekildeğiştirmelerin o düğüm noktasında plastik yerdeğiştirme olarak toplandığı kabulü yapılmaktadır. Buna göre takip eden yük artımlarında o noktaya üstten bağlanan perde sonlu elemanların alt düğüm noktası ile alttan bağlanan sonlu elemanların üst düğüm noktası arasında, artan plastik yerdeğiştirme kadar bir ayrılma meydana gelir. Üstten bağlanan elemanların alt düğüm noktasının, alttan bağlanan elemanların üst düğüm noktasına göre ilave rölatif yer değiştirme olarak düşünülmesi gereken bu ayrılma, sistem denklem takımına bir Δ_i ((i), o düğüm noktasının sistemdeki numarası) bilinmeyeninin eklenmesini gerektirir. Bu bilinmeyen nedeniyle denklem takımına eklenecek kolon, sistemin diğer bilinmeyenleri doğrultusundaki denge denklemlerine Δ_i bilinmeyeninin etkisini gösterirken, eklenecek satır, i noktasına üstten bağlanan perde sonlu elemanların birleşmesiyle oluşan yeni düğüm noktasında sistemin diğer serbestlikleri ve Δ_i bilinmeyişi etkisi ile takip eden yük artımlarında bir düşey kuvvet oluşmayacağı şeklindeki denge koşulunu ifade eder. (i) düğüm noktasına üstten bağlanan sonlu elemanların eleman rijitlik matrisleri diskten alınarak ilgili alt noktanın düşey yerdeğiştirmesine karşı gelen matris kolonundan hareket ederek sistem denklem takımına eklenecek ek kolon oluşturulur. Sistem rijitlik matrisinin esas köşegene göre simetrik olma özelliği eklenecek yeni satır ve sütunlar için de geçerlidir.

Bir kiriş kesitinde eğilme veya burulma momentinin M_p moment taşıma kapasitesine ulaşması nedeniyle PAD ortaya çıkmışsa benzer şekilde denklem sistemine bir satır sütun ilavesi gerekecektir. Bu takdirde ilave bilinmeyen plastik mafsallın $\Delta\phi$ dönmesi olacak, ilave kolon bu $\Delta\phi$ dönmenin kiriş uç kuvvetlerinde yaptığı değişikliklerin sistem denge denklemlerine etkilerini gösterecektir. İlave satır takip eden yük artımlarında plastik mafsall oluşan kesitte bir moment değişiminin olmayacağı koşuludur.

Bir kolon üst veya alt kesitinde akma koşuluna gelinmesi nedeninden ötürü PAD meydana gelmişse, aynı şekilde denklem sistemine bir satır ve sütun ilave edilecektir. Bu takdirde ilave bilinmeyen akma yüzeyine diklik koşulundan hareket ederek doğrultusu belirlenen plastik yerdeğiştirmeyi gösterir. İlave kolon bu plastik yerdeğiştirme nedeniyle oluşan kolon uç kuvvetlerinin sistem denge denklemlerine etkilerini gösterecektir. İlave satır ise takip eden yük artımlarında oluşacak kesit zorlarının akma yüzeyi üzerinde kalma koşuludur.

Kiriş/ kolon herhangi bir çubuk elemanın kesitinde plastikleşme olması halinde de ilgili elemanın rijitlik veya gerilme matrisi diskten alınarak denklem takımı ek kolon ve satırları oluşturulur. Sistem rijitlik matrisinin esas köşegene göre simetri özelliği bu halde de geçerlidir.

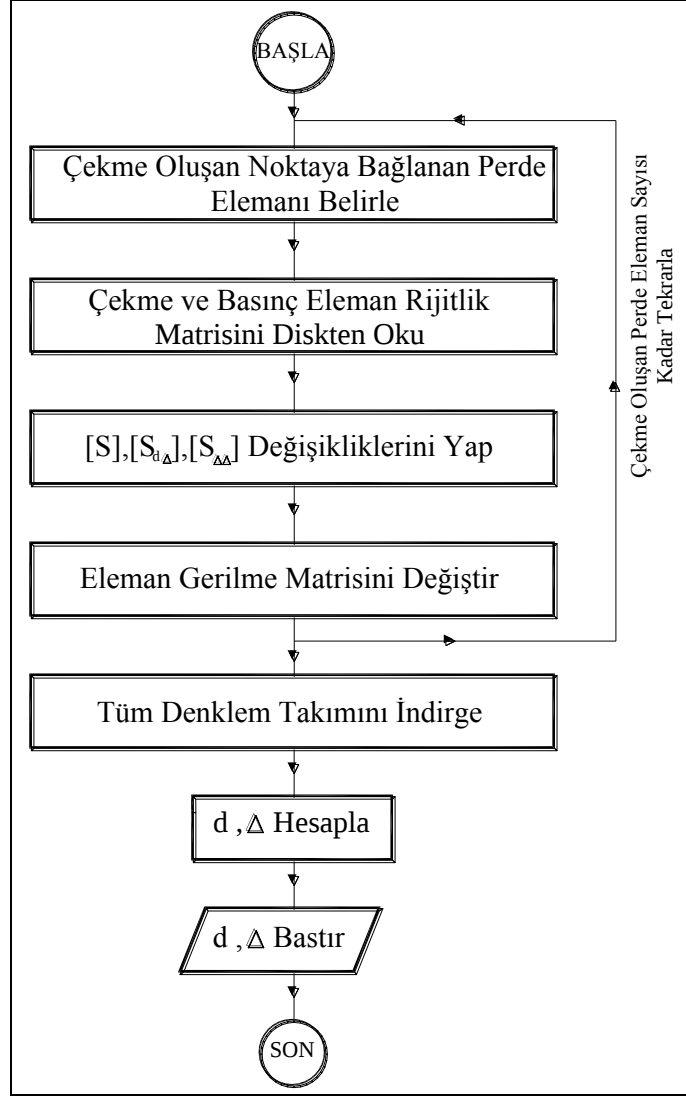
PLAS2'nin devamında indirgeme işlemi yalnız ilave edilen satır ve sütunlara yapılırken yerine koyma işlemi tüm bilinmeyenler için yapılır. Bu indirgeme ve yerine koyma işleminin yalnız yatay yük parametresinin birim değeri, yani Yükleme II için yapılıp, bu yüklemeye karşı gelen çözümün bulunması gerektiği açıktır.



Şekil 6.4 : PLAS2 alt programı akış diyagramı.

SPLAS Alt Programı: PAZ değeri PAD' dan küçük çıkmışsa akış diyagramı Şekil 6.5'de verilen bu alt program devreye girer. Artan yatay yüklerin etkisiyle perde en kesitlerinde oluşan eğilme momentlerinin artması sonucu, tarafsız eksenin yerinin kaymasına bağlı olarak bir düğüm noktası basınç bölgesinden çıkarak çekme bölgesine geçmektedir. Basitleştirme bakımından tezde bir köşe düğüm noktasında bile düşey boy değiştirme şekildeğiştirmesinin beton çekme dayanım sınırına karşı gelen şekildeğiştirmeye eşitlenmesi halinde, elemanın tanımının basınç bölgesi elemanından çekme bölgesi elemanına dönüştüğü kabulü yapılmaktadır.

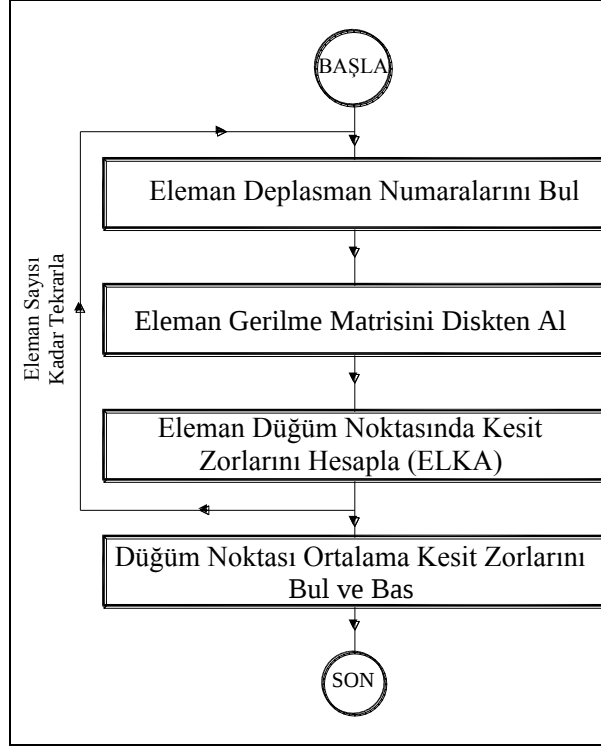
PLAS2'de sistem rijitlik matrisini değiştirmeden akma koşuluna bağlı olarak denkleme yalnız satır sütun ilavesi yeterli olurken, SPLAS'da bir elemanın rijitlik matrisinin değişmesi, takip eden adımlarda sistem rijitlik matrisinde değişiklik yapılmasını gerektirmektedir. Bunu en basit yoldan yapabilmek için, DENSİ2'de indirgenmemiş hali ile muhafaza edilmiş sistem rijitlik matrisi diskten çağrılır. Basınç bölgesinden çekme bölgesine geçen eleman için ELFIN11 icra edilirken elemanın hem basınç, hem çekme elemanı olarak eleman rijitlik matrisleri (asıl ve yedek anlamında) oluşturulduğundan bu iki matris de diskten okunur. Sistem rijitlik matrisinde bu elemandan basınç elemanı olarak gelen katkılar çıkarılıp, çekme elemanı olarak gelen katkılar eklenir. Önceki adımlarda plastikleşmeye bağlı olarak PLAS2'de denklem takımına satır/sütun ilavesi yapılmış ise bunlarda da benzer değişiklikler yapılır. Daha sonraki adımlarda olası yeni değişiklikler için yenilenmiş sistem rijitlik matrisinin indirgenmemiş hali diskte muhafaza edilirken basınç bölgesinden çekme bölgesine geçmiş elemanın rijitlik matrisi yanında kesit zorlarının hesabında kullanılacak gerilme matrisi de asıl/yedek sırası değiştirilerek diske geri yüklenir. Varsa eklenmiş satır ve sütunlar ile birlikte sistem rijitlik matrisinin tümüne indirgeme ve yerine koyma işlemi uygulanarak Yükleme II için denklem takımı çözümü elde edilir.



Şekil 6.5 : SPLAS alt programı akış diyagramı.

PLAS3 Alt Programı: PLAS2 veya SPLAS alt programlarının devamı olan bu alt programda bütün elemanlar için tekrarlanan bir çevrim uygulanmaktadır. Bu çevrimde denklem takımının çözüm dosyasından alınan eleman düğüm noktaları yerdeğiştirmeleri, diskten çağrılan eleman gerilme matrisi ile çarpılarak eleman düğüm noktalarındaki kesit zorları bulunmaktadır. Plastik yerdeğiştirmelerin ortaya çıktığı perde düğüm noktası ve çubuk kesitlerinde bu plastik yerdeğiştirmelerin de eleman kesit zorlarına katkısı dikkate alınmaktadır. İster çekme, ister basınç bölgesinde olsun betonarme perdelerde hem beton hem çelik için ideal elastoplastik $\sigma - \epsilon$ bağıntısı dikkate alındığından, akma gerilmesine ulaşılmış perde elemanın düğüm noktalarında deformasyonlar artsa da akma gerilmesinin sabit kalacağı kontrolü yapılmaktadır.

Bu alt programda da DENSİ3'te olduğu gibi her elemanda kesit zorları ayrı ayrı bastırabileceği gibi, perde elemanların birleştiği noktalarda o noktalardaki ortalama kesit zorları da bastırılmaktadır.



Şekil 6.6 : PLAS3 alt programı akış diyagramı.

Modellenen perde eleman 4m yüksekliğinde 2 kattan oluşmaktadır. Toplam 8m yüksekliğinde, 3m uzunluğunda ve 30cm genişliğindedir. Geliştirilen program ile çözümde perde düşeyde (z doğrultusunda) 4 eleman ve yatayda (x doğrultusunda) 6 eleman olmak üzere toplam 24 elemana bölünmüştür.

Toplam 2800 kN düşey yük 2. kat düğüm noktalarına, toplam 1400 kN düşey yük 1. kat düğüm noktalarına yük alanları ile orantılı olarak dağıtılmıştır, yatay yükler ise 33 ve 17 numaralı kat master noktalarına üst katta 2 birim ve ara katta bir birim olarak etkilmiştir.

Düşey ve yatay donatı oranları ρ_x ve ρ_z 0.005 olarak alınmıştır. Kullanılan donatı ve betonun malzeme özellikleri sırasıyla Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.1 : Donatı malzeme özellikleri.

E_{φ}	210000 MPa
σ_a	420 MPa
ε_{tu}	0.002

Çizelge 7.2 : Beton malzeme özellikleri.

E_b	30000 MPa
f_{ck}	30 MPa
ε_{co}	0.001

Basınç bölgesinde çelik maksimum 0.002 birim kısalma gösterirken, aynı bölgede beton için maksimum birim kısalma 0.001 değerini almaktadır. Basınç bölgesinde çeliğin birim kısalmasının betondan daha fazla olması, programda basınç bölgesi için alınan maksimum basınç kısalması değerinin Bölüm 2.3’de açıklandığı gibi ve denklem 7.5 ile arttırılmasıyla dikkate alınmaktadır.

$$E_{13} = E_s \times h \times \rho_z = 2.1 \times 10^8 \times 0.3 \times 0.005 = 315000 kN / m \quad (7.1)$$

$$E_{1b} = \frac{E_b}{1 - \nu^2} \times (1 - \rho_z) \times h_z \quad (7.2)$$

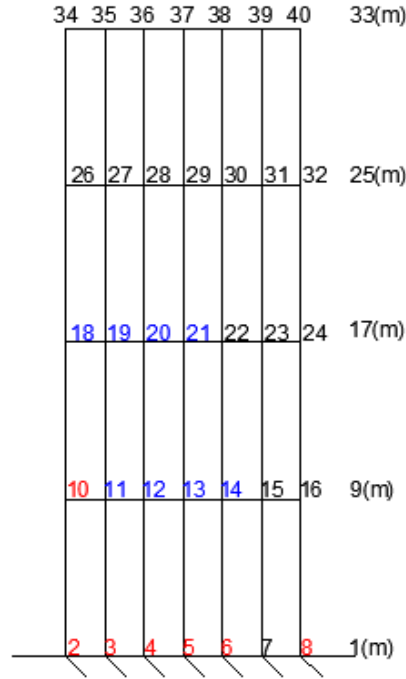
$$E_{1b} = \frac{3 \times 10^7}{(1 - 0.15^2)} \times (1 - 0.005) \times 0.3 = 9161125.3 kN / m \quad (7.2a)$$

$$E = E_{13} + E_{1b} \quad (7.3)$$

$$N = 315000 \times 0.002 + 9161125 \times 0.001 = 9791.12 \text{ kN/m} \quad (7.4)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{e\varphi} = \frac{9791.12}{9476125.3} = 0.00103 \quad (7.5)$$

Perde panelinin düğüm noktası numaraları Şekil 7.2'de, toplam yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi eğrisine ait değerler Çizelge 7.3'de verilmektedir.



Şekil 7.2 : 24 elemanlı perde panelinin düğüm noktası numaraları.

Çizelge 7.3 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

Adım	P(kN)	d(cm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
1	289.8	0.198		2
2	401.2	0.306		3
3	476.5	0.422		4
4	490.0	0.456		10
5	544.8	0.598		11
6	569.8	0.669		5
7	599.4	0.791		12
8	679.2	1.116		13
9	695.8	1.240		18
10	746.2	1.504		6

Çizelge 7.3 (devam) : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

Adım	P(kN)	d(cm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
11	759.6	1.580		19
12	779.7	1.697	2	
13	821.0	1.944	8	
14	842.3	2.090	3	
15	844.5	2.110		20
16	857.2	2.220		14
17	893.1	2.550	4	
18	927.2	3.020	10	
19	938.1	3.170		21
20	938.1	3.170	5	
21	983.3	4.360	6	

İlk plastik yerdeğiştirme 12. adımda 779.7 kN yatay yük ile oluşmaktadır. Bu yatay yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 1.697cm'dir. İlk 11 adımda sistem elemanlarının basınç bölgesinden çekme bölgesine geçmesiyle, tarafsız eksen 7 numaralı düğüm noktasına kaymaktadır. Sonraki adımlarda çekme ve basınç bölgesindeki düğüm noktalarında akma sınırlarına ulaşılıp, son adımda 7 numaralı düğüm noktası etrafında sistemin dönerek mekanizma durumuna geldiği görölmektedir. Sistemin göçme yükü ise 983.3 kN olup, bu yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 4.36 cm'dir. Sap 2000 bilgisayar programı ile elde edilen çözümde ise sistemin göçme yükü 1173.0 kN ve bu yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 3.98 cm'dir. 1., 12., 13. ve 20. adımlarda mesnet düğüm noktalarındaki n_z değerleri Çizelge 7.4'de ve bu noktalara ait ϵ_z değerleri Çizelge 7.5'de verilmektedir.

Çizelge 7.4 : Geliştirilen program çözümüne ait n_z değerleri.

Nokta no	Nz (kN/m)			
	1.adım	12.adım	13.adım	20.adım
2	0.00	630	630	630
3	-571.58	455	613.6	630
4	-995.97	289.6	396.1	630
5	-1386.3	140.7	206.0	630

Çizelge 7.4 (devam) : Geliştirilen program çözümüne ait n_z değerleri.

Nokta no	Nz (kN/m)			
	1.adım	12.adım	13.adım	20.adım
6	-1776.6	12.0	39	202.9
7	-2201.0	-3733.0	-3737.9	-5361.3
8	-2772.6	-8886.0	-9760.4	-9760.4

Çizelge 7.5 : Geliştirilen program çözümüne ait ε_z değerleri.

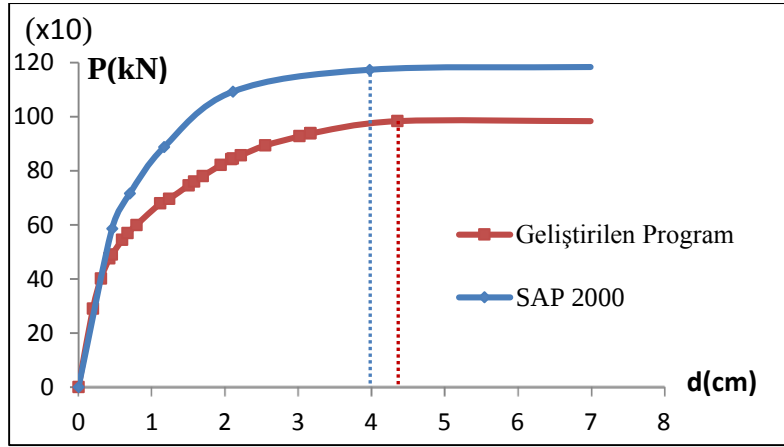
Nokta no	ε_z			
	1.adım	12.adım	13.adım	20.adım
2	0	0.002	0.0022904	0.0020079
3	-0.0000603	0.001444	0.0019481	0.0024006
4	-0.000105	0.000919	0.0012576	0.0025030
5	-0.0001463	0.000446	0.0006538	0.002
6	-0.0001875	0.000382	0.0001238	0.0006440
7	-0.00023223	-0.000395	-0.0003964	-0.000728
8	-0.00029258	-0.000937	-0.00103	-0.0009208

1.adımda, yük artımı ile 2. düğüm noktasında toplam birim düşey şekil değiştirme değeri negatif (basınç) değerden 0 değerine erişmiş, bu durumda düşey gerilme n_z 0 değerini almıştır. Bu adımdan sonra 2. düğüm noktasının bağlı olduğu perde elemanı çekme elemanı olarak çalışır ve bu eleman için betonun katkısı ihmal edilerek ilave yüklerin plastikleşme oluşana kadar donatı tarafından taşındığı kabul edilir. 12. adımda aynı düğüm noktasında toplam birim düşey şekil değiştirme akma sınırı olarak tanımlanan 0.002 değerine erişerek, bu nokta için maksimum taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Bu adımda n_z Denklem 7.6'da belirtildiği gibi 630 kN/m olarak hesaplanmıştır. 13. adımda beton ve çeliğin birlikte çalıştığı basınç bölgesinde kalan 8. düğüm noktasında toplam birim düşey şekil değiştirme akma sınırı olarak tanımlanan 0.00103 değerine ulaşarak, plastikleşme meydana gelmiştir. Bu noktada n_z denklem 7.7'de belirtildiği gibi 9760.4 kN/m değerini almıştır. 20. adımda bu adıma kadar akmanın meydana geldiği 2., 3., 4. ve 8. düğüm noktalarında gerilme değeri artmazken, düşey şekil değiştirmenin akma sınırına ulaşması ile 5. düğüm noktasında da plastikleşmenin oluştuğu görülmektedir.

$$N = E_{13} \times \varepsilon = 315000 \times 0.002 = 630 \text{ kN/m} \quad (7.6)$$

$$N = E \times \varepsilon_{eş} = 9476125.3 \times 0.00103 = 9760 \text{ kN/m} \quad (7.7)$$

SAP 2000 bilgisayar programında da perde eleman aynı geometride, aynı malzeme ve yük bilgisi özellikleri ile tanımlanmıştır. Her iki program ile çözümden elde edilen toplam yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 7.3’de verilmektedir.

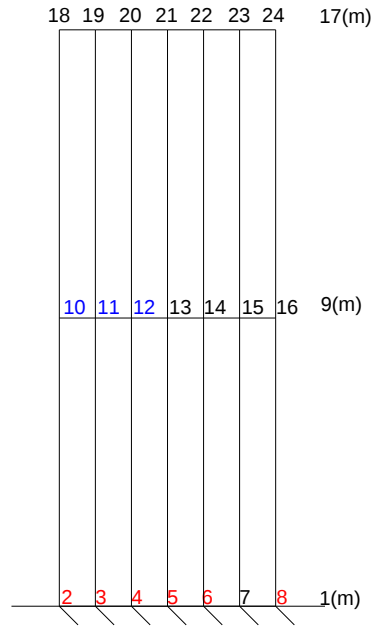


Şekil 7.3 : SAP 2000 bilgisayar programı ve geliştirilen bilgisayar programı çözümü sonucu elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.

Geliştirilen program ile perdenin toplam 24 elemana bölünmesi sonuçların yakınsaması için yeterli olurken, SAP 2000 programında ise yakınsaklığın sağlanması için perdenin düşeyde 8 eleman ve yatayda 6 eleman olmak üzere toplam 48 elemana bölünmesi gerekmektedir.

Aynı perde elemanının kat aralarında bölünmeden, her katta yatayda 6 olmak üzere 2 katta toplam 12 elemana bölündüğü ve her katta yatayda 10 olmak üzere 2 katta toplam 20 elemana bölündüğü çözümleri de yapılmıştır.

12 elemana bölünen perde panelinin düğüm noktası numaraları Şekil 7.4’de, toplam yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrisine ait değerler ise Çizelge 7.6’da verilmektedir.



Şekil 7.4 : 12 elemanlı perde panelinin düğüm noktası numaraları.

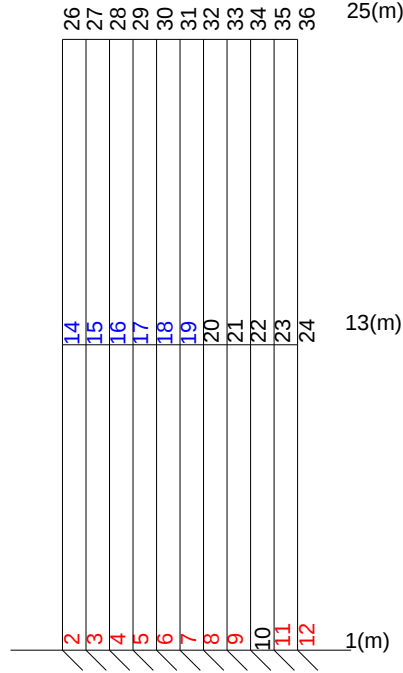
Çizelge 7.6 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

Adım	P(kN)	d(cm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
1	282.5	0.193		2
2	372.6	0.29		3
3	447.8	0.428		4
4	527.2	0.684		5
5	567.3	0.886		10
6	643.3	1.27		11
7	674.2	1.43		6
8	717.7	1.69		12
9	741.2	1.83	2	
10	814.3	2.3	3	
11	819.2	2.33	8	
12	822.2	2.36		13
13	887.5	2.94	4	
14	960.6	3.91	5	
15	1053.7	5.96	6	

Bu modelde ilk plastik yerdeğiştirme 9. adımda 741.2 kN yatay yük ile oluşmaktadır. Bu yatay yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 1.83cm'dir. Sistemin göçme

yükü ise 1053.7 kN olup, bu yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 5.96 cm'dir.

20 elemana bölünen perde panelinin düğüm noktası numaraları Şekil 7.5'de, toplam yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrisine ait değerler ise Çizelge 7.7'de verilmektedir.



Şekil 7.5 : 20 elemanlı perde panelinin düğüm noktası numaraları.

Çizelge 7.7 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

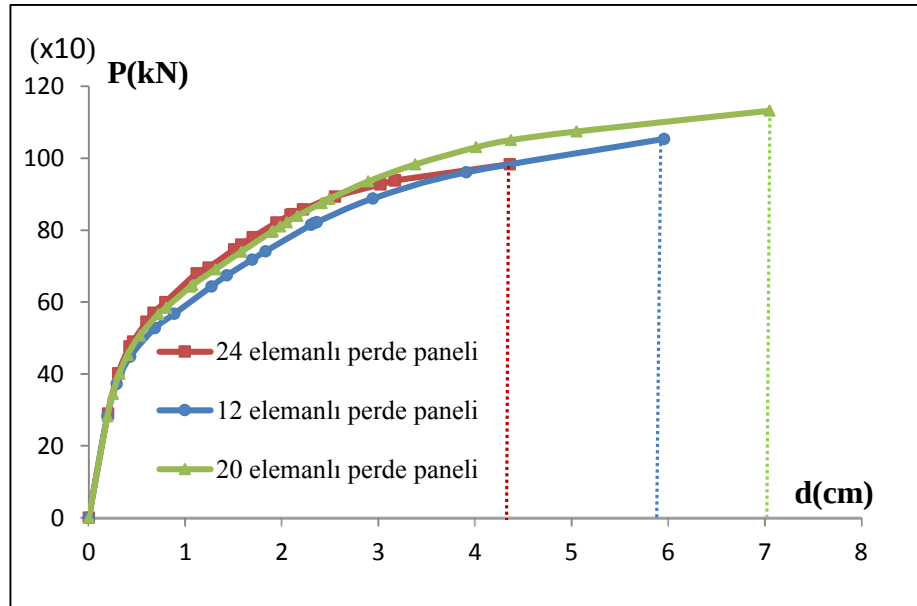
Adım	P(kN)	d(cm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
1	282.0	0.193		2
2	345.0	0.249		3
3	401.1	0.316		4
4	453.6	0.4029		5
5	506.7	0.526		6
6	566.1	0.718		7
7	584.3	0.798		14
8	642.6	1.05		15
9	647.4	1.07		8
10	691.3	1.31		16
11	740.3	1.58		17
12	795.1	1.89	2	

Çizelge 7.7 (devam) : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük – tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

Adım	P(kN)	d(cm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
13	797.1	1.902		18
14	810.5	1.98	12	
15	821.5	2.048		9
16	839.9	2.16	3	
17	875.4	2.41		19
18	887.1	2.49	4	
19	935.4	2.89	5	
20	983.1	3.38	6	
21	1030.7	4.01	7	
22	1050.7	4.37	11	
23	1074.8	5.05	8	
24	1132.5	7.05	9	

Bu modelde ilk plastik mafsall 12. adımda 795.1kN yatay yük ile oluşmaktadır. Bu yatay yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 1.89cm'dir. Sistemin göçme yükü ise 1132.5kN olup, bu yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 7.05cm'dir.

Her üç çözümden elde edilen toplam yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinin karşılaştırılması şekil 7.6'da verilmektedir.



Şekil 7.6 : Farklı eleman sayısındaki perde panellerinin çözümleri sonucu elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.

Genel olarak 3 modelde de yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi grafiklerinin birbirine yakın olduğu görölmüştür. Bu durum perde davranışına uygun şekil fonksiyonlarının seçilerek az sayıda eleman ile de doğru sonucun elde edildiği bir model geliştirildiğini göstermektedir.

Göçme yüküne erişilen adım sayısı, göçme yükünün değerı ve bu yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi perde panelinin düşeyde ve yatayda bölündüğu eleman sayısına bağlı olarak artmaktadır. Göçme yükünün en büyük ve SAP 2000 ile yapılan çözüme en yakın değerı, her katta 10 eleman olmak üzere yatayda en çok elemana bölünen perde modellemesinde görölmüştür. Buradan akma başlangıcı yükü ile göçme yükünün daha hassas bulunabilmesi için yatayda eleman sayısının arttırılmasının önemli olduğu anlaşılmaktadır. Yatayda düğüm noktası sayısının artması, büyük eğilme momentleri altında tarafsız eksenin yerinin daha hassas belirlenebilmesine imkan sağlamaktadır. Düşeyde fazla elemana bölme ise, çekme bölgesine geçen veya akma nedeniyle rijitliği azalan eleman boylarının kısalması nedeniyle, aynı yük değerı için daha küçük yerdeğiştirmelerin bulunmasını sağlamaktadır.

7.2 Deneysel Çalışma ile Geliştirilen Bilgisayar Programı Çözümünün Karşılaştırılması

Lefas ve diğ (1990), sabit düşey yük ve monoton artan yatay yükler altında 13 adet perdede yaptıkları deneysel çalışmada göçme mekanizması ve dayanım karakteristiklerini incelemişlerdir. Tezde, 13 perdeden SW22 numunesi örnek olarak alınmış ve geliştirilen program ile modellenmiştir. Deney numunesine ait donatı ve beton malzeme özellikleri sırasıyla Çizelge 7.8 ve Çizelge 7.9’da verilmektedir.

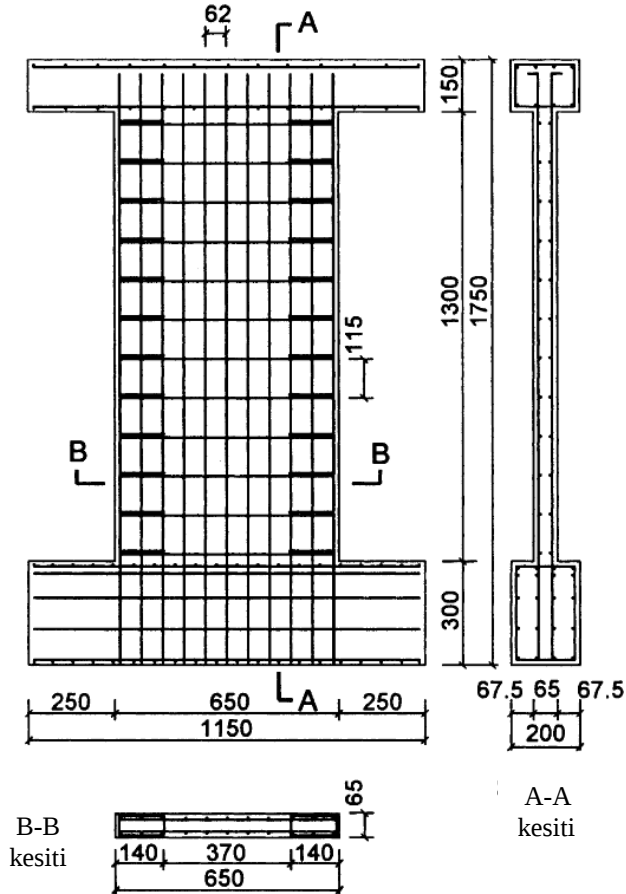
Çizelge 7.8 : Deney numunesine ait donatı özellikleri.

Malzeme Özellikleri	Değer
E_c (MPa)	200000
σ_a (MPa)	470
$\epsilon_{ç}$	0.00235

Çizelge 7.9 : Deney numunesine ait beton özellikleri.

Malzeme Özellikleri	Değer
E_b (MPa)	32800
f_{ck} (MPa)	43
f_{ctk} (MPa)	2.16
ε_b	0.002

Deneysel çalışmada kullanılan perde elemanı Şekil 7.7’de görülmektedir. Deney numunesinin yüksekliği 1300 mm, genişliği 650 mm ve kalınlığı 65 mm’dir Perde alt ve üst kenarlarında kirişle bağlanmıştır. Perde başlık bölgesi uzunluğu 140 mm’dir. Perdenin üst kenarındaki kirişin boyu 1150 mm, yüksekliği 150 mm, genişliği 200 mm boyutlarındadır. Perdenin altındaki kirişin boyu 1150 mm, yüksekliği 300 mm, genişliği 200 mm boyutlarındadır. Hareket etmeyecek şekilde alt kirişin zeminle bağlantısı yapılmıştır.



Şekil 7.7 : Deney numunesinin donatı yerleşimi ve geometrisi.

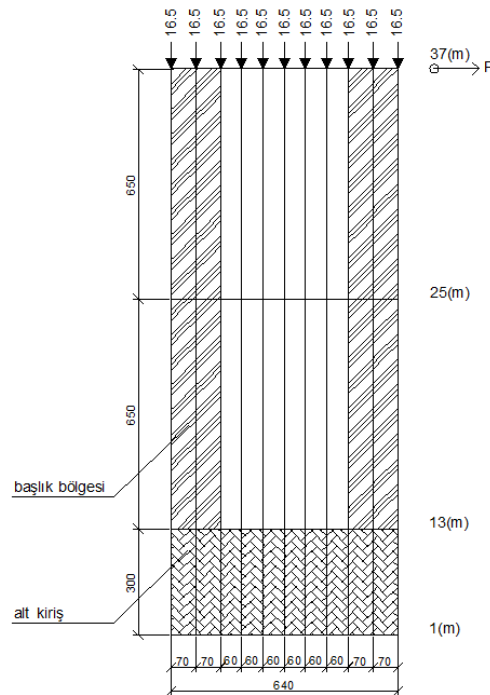
Perdeye düzgün yayılı olarak 492 kN/m toplamda 182 kN düşey eksenel yük ve yatay monoton artan yük uygulanmaktadır.

Perdede düşey donatılar 8 mm, yatay donatılar 6.25 mm çapındadır. Düşey donatıların akma gerilmesi 470 MPa, yatay donatıların akma gerilmesi 520 MPa olarak verilmiştir. Deney numunesine ait donatı oranları Çizelge 7.10’da verilmektedir.

Çizelge 7.10 : Deney numunesine ait donatı oranları.

Perde Bölgesi	Donatı Oranları	
	Yatay (%)	Düşey (%)
Gövde	0.82	2.50
Başlık	1.16	3.30
Alt Kiriş	1.68	1.05
Üst Kiriş	0.82	0.97

Deneyisel çalışmada kullanılan SW22 perde numunesinin, geliştirilen bilgisayar programı ile modellenmesine ait bilgiler Şekil 7.8’de verilmektedir. Perde eleman alt kiriş dışında düşeyde 0.65m’lik 2 parçaya bölünerek, yatayda ise başlık bölgeleri de dikkate alınarak 10 parçaya bölünerek modellenmiştir. Sonuçları değiştirmeyeceği varsayılarak üst kiriş elemanı modelde dikkate alınmamıştır. Düşey yük perde elemanın üst kenarındaki düğüm noktalarına noktasal olarak etkililmiş, yatay yük perde elemanın en üst master noktasına verilmiştir.



Şekil 7.8 : Perde modeline ait bilgiler.

Geliştirilen perde modelinde deney numunesinden farklı olarak betonun malzeme davranışının elastoplastik olduğu varsayılmış, betonun çekme dayanımı 0 kabul edilmiştir. Bu durumda beton dayanımına karşı gelen maksimum kısalma ε_{co} , gerilme şekil değiştirme eğrisinin eğimi olan 0.0013 olarak alınmıştır. Basınç bölgesinde çelik maksimum 0.00235 birim kısalma gösterirken, aynı bölgede beton için maksimum birim kısalma 0.0013 değerini almaktadır. Bu değer hesaplarda denklem 7.12’de ifade edildiği gibi arttırılarak dikkate alınmaktadır. Donatı oranları deney numunesi ile uyumlu olarak başlık bölgesi, orta bölge ve alt kiriş eleman için programda ayrı ayrı tanımlanmıştır.

$$E_{13} = E_s \times h \times \rho_z = 2 \times 10^8 \times 0.065 \times 0.033 = 429000 \text{ kN/m} \quad (7.8)$$

$$E_{1b} = \frac{E_b}{1 - \nu^2} \times (1 - \rho_z) \times h_z = \frac{32.8 \times 10^6}{1 - 0.2^2} \times (1 - 0.033) \times 0.065$$

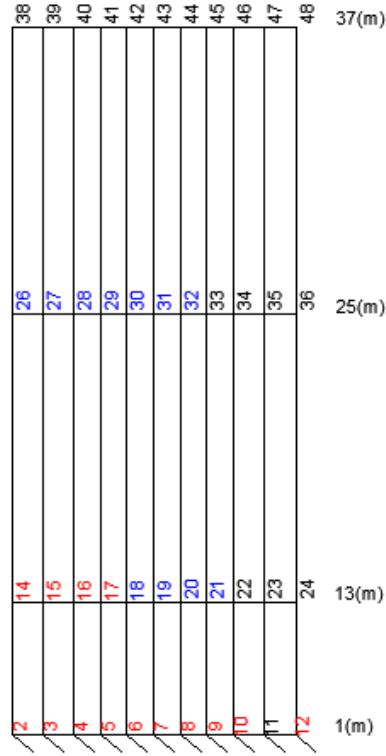
$$= 2147545.83 \text{ kN/m} \quad (7.9)$$

$$E = E_{13} + E_{1b} \quad (7.10)$$

$$N = 429000 \times 0.00235 + 2147545.83 \times 0.0013 = 3800 \text{ kN/m} \quad (7.11)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{eş} = \frac{3800}{2576545.83} = 0.00147 = 1.13 \times 0.0013 \quad (7.12)$$

Perde panelinin düğüm noktası numaraları Şekil 7.9’da, yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrisine ait değerler Çizelge 7.11’de verilmektedir.



Şekil 7.9 : Perde panelinin düğüm noktası numaraları.

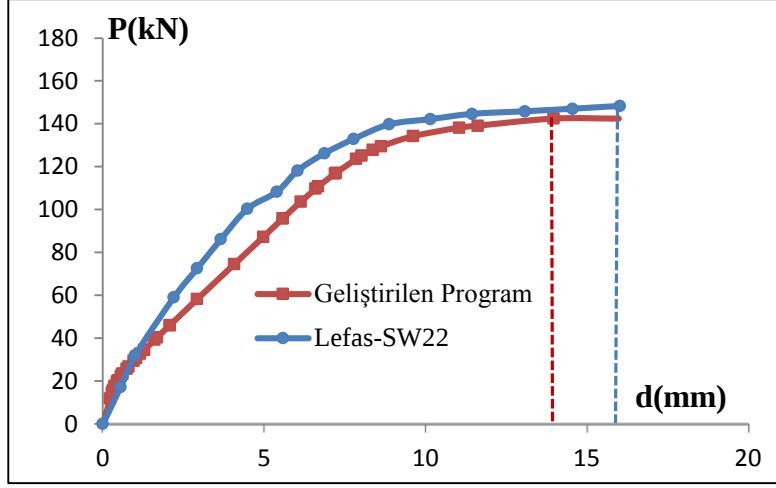
Çizelge 7.11 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

Adım	P(kN)	d(mm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
1	11.78	0.23		2
2	14.6	0.29		14
3	15.6	0.32		3
4	17.1	0.36		15
5	17.8	0.38		4
6	19.7	0.45		16
7	20.4	0.48		5
8	22.3	0.56		17
9	23.2	0.61		6
10	23.5	0.62		26
11	25.7	0.74		18
12	26.8	0.81		7
13	29.4	0.96		27
14	30.7	1.04		19
15	32.7	1.16		8
16	34.6	1.29		28

Çizelge 7.11 (devam) : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

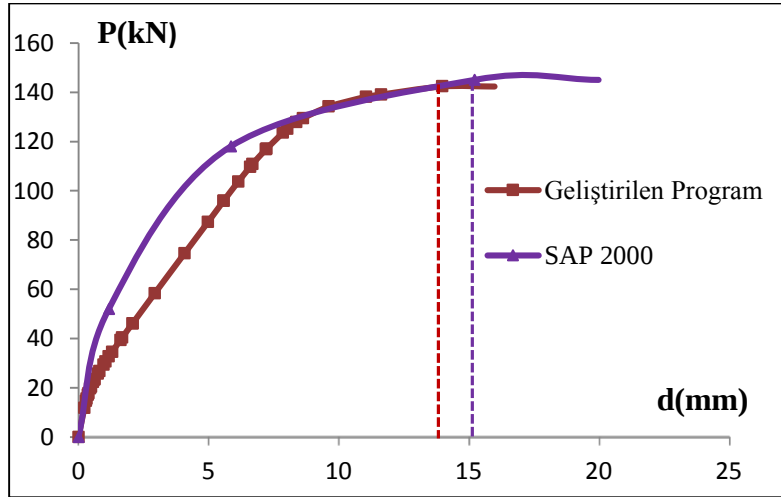
Adım	P(kN)	d(mm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
17	39.3	1.61		29
18	40.4	1.68		20
19	46.1	2.08		9
20	46.1	2.08		30
21	58.3	2.93		31
22	74.6	4.08		21
23	87.3	4.98		32
24	95.9	5.58	2	
25	95.9	5.58	14	
26	103.7	6.14	3	
27	109.7	6.60	15	
28	110.8	6.68	4	
29	116.8	7.20		10
30	117.1	7.23	5	
31	123.6	7.86	6	
32	125.1	8.03	16	
33	127.9	8.37	12	
34	129.5	8.63	7	
35	134.2	9.62	8	
36	138.2	11.05	9	
37	139.1	11.63	17	
38	142.4	13.98	10	

Sistemde ilk plastik düşey yerdeğiştirme 24. adımda oluşmuştur, bu adımdaki yatay yük değeri 95.9 kN ve tepe yerdeğiştirmesi değeri 5.58 mm'dir. Çizelge 7.11'deki son adım sistemin göçme yükünü yani maksimum taşıyabileceği yatay yükü ve bu yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değerini göstermektedir. Sistemin göçme yüküne karşı gelen maksimum yatay kuvvet 142.4 kN ve bu kuvvete karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri yaklaşık olarak 13.9 mm'dir. SW22 numunesine ait deneysel verilere göre maksimum yatay kuvvet 150 kN ve bu kuvvete karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri yaklaşık olarak 15.3 mm'dir. Geliştirilen program ile deneysel verilerden elde edilen toplam yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 7.10'da verilmektedir.



Şekil 7.10 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrileri.

Aynı örnek, geliştirilen programdan farklı olarak Sap 2000 bilgisayar programında her master düğüm noktası arasında da ikiye bölünerek toplam 60 eleman ile modellenmiş ve yatay yük - tepe yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 7.11’de verilmiştir. Sap 2000 bilgisayar programı çözümüne göre göçme yüküne karşı gelen toplam yatay kuvvet 145 kN ve bu kuvvete karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri yaklaşık olarak 15.23 mm’dir.



Şekil 7.11 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.

SW 22 perdesi için beton çekme dayanımının hesaplarda dikkate alındığı bir çözüm yapılmış ve bunun sonuçlara etkisi irdelenmek istenmiştir. Bir önceki örnekten farklı olarak beton çekme dayanımı 2.16 MPa olarak alınmıştır. İtme analizinin her adımında sistem düğüm noktalarında meydana gelen durum (akma veya çekme oluşması) ve bu duruma karşı gelen toplam yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi değerleri Çizelge 7.12’de verilmektedir.

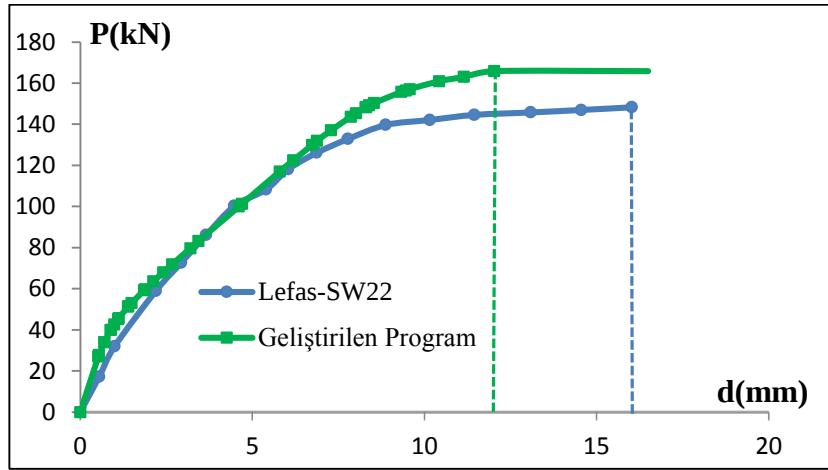
Çizelge 7.12 : Geliştirilen bilgisayar programına ait yatay yük tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

Adım	P(kN)	d(mm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
1	27.0	0.53		2
2	27.8	0.55		14
3	34.0	0.70		15
4	34.1	0.71		3
5	39.9	0.89		4
6	39.9	0.89		16
7	42.6	1.00		26
8	45.2	1.10		5
9	45.7	1.12		17
10	51.3	1.39		6
11	51.5	1.40		27
12	53.0	1.49		18
13	59.2	1.85		7
14	59.8	1.88		28
15	63.6	2.12		19
16	68.0	2.41		29
17	71.9	2.67		8
18	79.7	3.2		30
19	83.3	3.44		20
20	100.0	4.61		31
21	101.3	4.70		9
22	117.1	5.8	14	
23	122.5	6.19	2	
24	130.0	6.74	3	
25	132.0	6.88	15	
26	137.1	7.29	4	
27	143.7	7.86	5	
28	145.4	8.01		32
29	148.3	8.29	16	
30	148.4	8.31	12	
31	149.2	8.39		21
32	150.3	8.53	6	
33	155.8	9.33	7	

Çizelge 7.12 (devam) : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

Adım	P(kN)	d(mm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
34	156.4	9.46	24	10
35	157.1	9.57		
36	161.0	10.43	8	
37	163.1	11.15	17	
38	165.9	12.03	9/11	

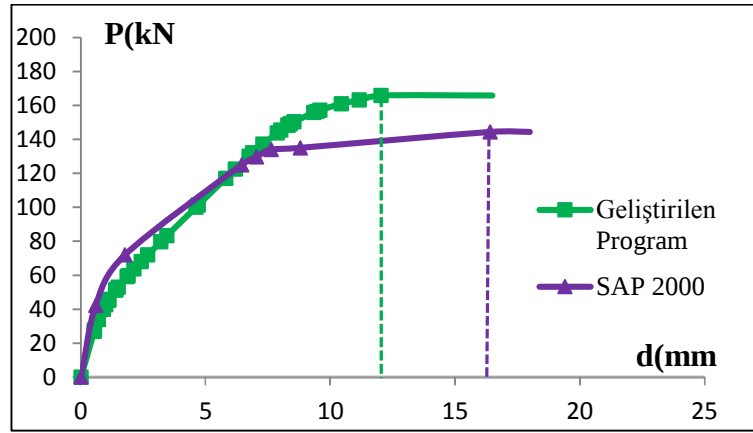
Sistemde ilk plastik yerdeğiştirme 22. adımda oluşmuştur, bu adımdaki yatay yük değeri 117.1 kN ve tepe yerdeğiştirmesi değeri 5.8 mm'dir. Sistemde göçme yüküne karşı gelen maksimum yatay kuvvet 165.9 kN ve bu kuvvete karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri yaklaşık olarak 12.03 mm'dir. Geliştirilen program ile deneysel verilerden elde edilen toplam yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinin karşılaştırılması şekil 7.12'de verilmektedir. Görülebileceği gibi, betonun bir miktar çekme aldığı kabulü, akma sınırına ulaşmadan önceki deney ve hesap eğrilerinin daha yakın olmasını sağlamakta, ancak hesapta göçme yükünün daha büyük bulunmasına neden olmaktadır.



Şekil 7.12 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.

Bu örneğin beton çekme dayanımının dikkate alındığı Sap 2000 bilgisayar programı ile çözümüne ait yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrisinin geliştirilen model ile karşılaştırılması şekil 7.13'te verilmektedir. Sap 2000 bilgisayar programı çözümüne göre göçme yüküne karşı gelen yatay kuvvet 144.37 kN ve bu kuvvete karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri yaklaşık olarak 16.4 mm'dir. Buradan SAP 2000 programında betonun bir miktar çekme aldığı kabul edilse bile, çatlak oluştuktan

sonra betonun hiç çekme almadığı çözüme dönüldüğü anlaşılmaktadır, yani göçme yükü değişmemektedir.

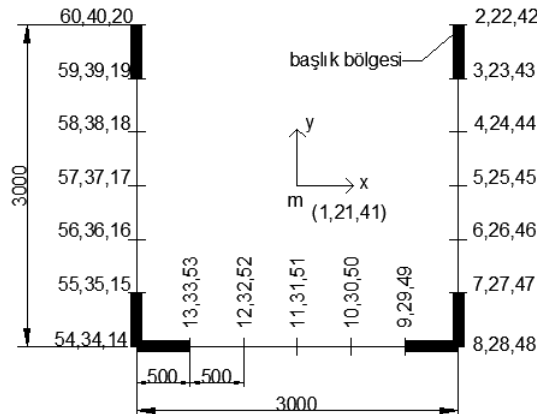


Şekil 7.13 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.

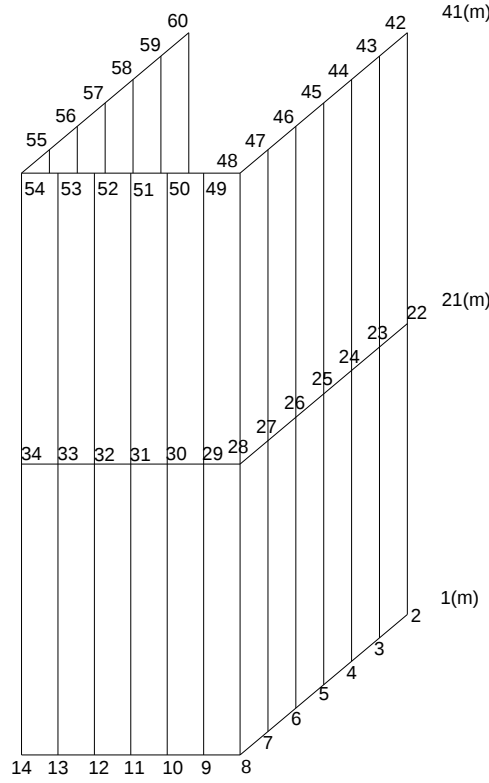
7.3 U Perde Modelinin Çözümlemesi

U - çekirdek perdenin geometrik özellikleri, plandaki yerleşimi ile düğüm noktası numaraları Şekil 7.14'de ve binanın üç boyutlu görünümü Şekil 7.15'de özetlenmektedir.

Kat yüksekliklerinin 4m olduğu sistem 2 katlı olarak düzenlemiştir. Perde kalınlığı 30cm'dir. U perdenin uzunluğu 3m olan her paneli, planda uzunluğu 0.5m olan 6 parçaya bölünmüştür. Perde elemanların düşey boyu kat yüksekliğine eşit ve 4m'dir. Bu durumda sistemde bir katta 18 olmak üzere toplam 36 adet eleman vardır. 60 adet düğüm noktasından 1, 21 ve 41 numaralı düğüm noktaları master düğüm noktalarıdır.



Şekil 7.14 : U perdenin plandaki yerleşim, geometrik özellikleri, düğüm noktası numaraları.



Şekil 7.15 : U perdenin üç boyutlu görünümü ve düğüm noktası numaraları.

Yatay ve düşey donatı oranları Şekil 7.14'de kalın çizilmiş başlık bölgesi elemanlarında 0.01, gövde bölgesinde 0.005 olarak tanımlanmıştır.

Beton ve donatının malzeme özellikleri birinci örnek ile benzer tanımlanmıştır.

Toplam 1800kN düşey yük üst kattaki, toplam 360kN düşey yük ise ara kattaki düğüm noktalarına yük alanları ile uyumlu olacak şekilde noktasal olarak dağıtılmıştır. Yatay yük perdenin en üst master noktasına sırasıyla 2 ve 1 oranlarında etkitilmiştir. Geliştirilen perde modelinin her bir paneli düşeyde 2 eleman ve yatayda 6 eleman olmak üzere toplam 12 elemana bölünmüştür. SAP 2000 programı ile çözümde ise her panel düşeyde 8 eleman ve yatayda 6 eleman olmak üzere toplam 48 elemana bölünmüştür.

7.3.1 U perde modelinin + Y yönündeki itme analizi

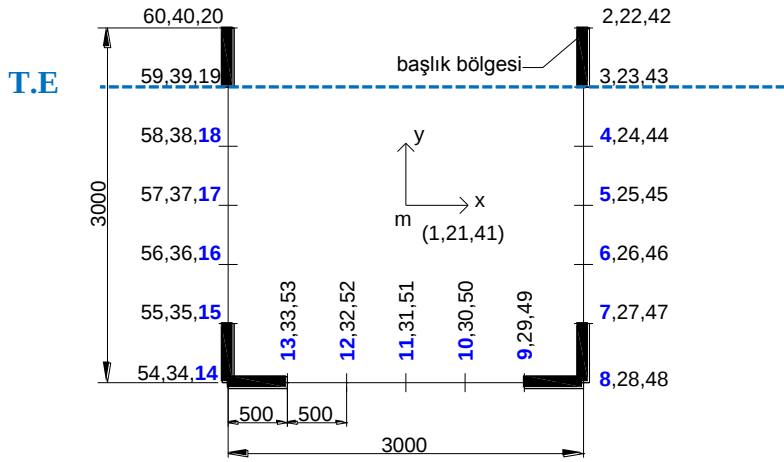
İtme analizinin her adımında sistem düğüm noktalarında meydana gelen durum (akma veya çekme oluşması) ve bu duruma karşı gelen toplam yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi değerleri Çizelge 7.13'de verilmektedir.

Çizelge 7.13 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

Adım	P(kN)	d(cm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
1	279.7	0.0525		8/14
2	315.0	0.0605		9/13
3	325.8	0.0635		10/12
4	327.6	0.0644		11
5	360.5	0.0791		7/15
6	416.3	0.115		6/16
7	510.1	0.193		5/17
8	567.3	0.246		28/34
9	588.1	0.267		29/33
10	604.4	0.282		30/32
11	607.3	0.284		31
12	633.6	0.310		27/35
13	711.3	0.389		26/36
14	867.6	0.552		25/37
15	938.4	0.627		4/18
16	1571.3	1.30		24/38
17	2100.0	1.87	8/14	
18	2121.2	1.89	9/13	
19	2131.7	1.90	10/12	
20	2135.0	1.91	11	
21	2326.0	2.20	7/15	
22	2449.2	2.50	2/20	
23	2492.8	2.63	6/16	
24	2635.0	3.39	5/17	
25	2675.6	3.79		46/56
26	2692.8	3.96		47/55
27	2776.2	4.78		44/58
28	2785.5	4.87		51
29	2815.4	5.17	4/18	

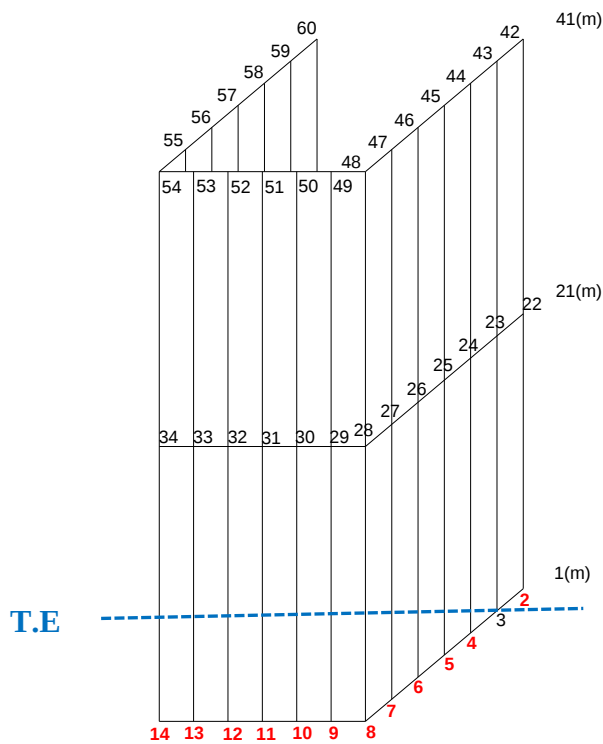
İlk plastik yerdeğiştirme 17. adımda 2100kN yatay yük ile 8. ve 14. düğüm noktalarında aynı anda oluşmaktadır. Bu yatay yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 1.87cm'dir. İlk 15 adımda sistemin alt bölgesindeki elemanların basınç bölgesinden çekme bölgesine geçmesiyle, tarafsız eksen 3-19 numaralı düğüm

noktalarını birleştiren çizgiye kaymaktadır. Basınçtan çekmeye geçen düğüm noktaları ve tarafsız eksenin yeri Şekil 7.16'da mavi ile işaretlenmiştir.



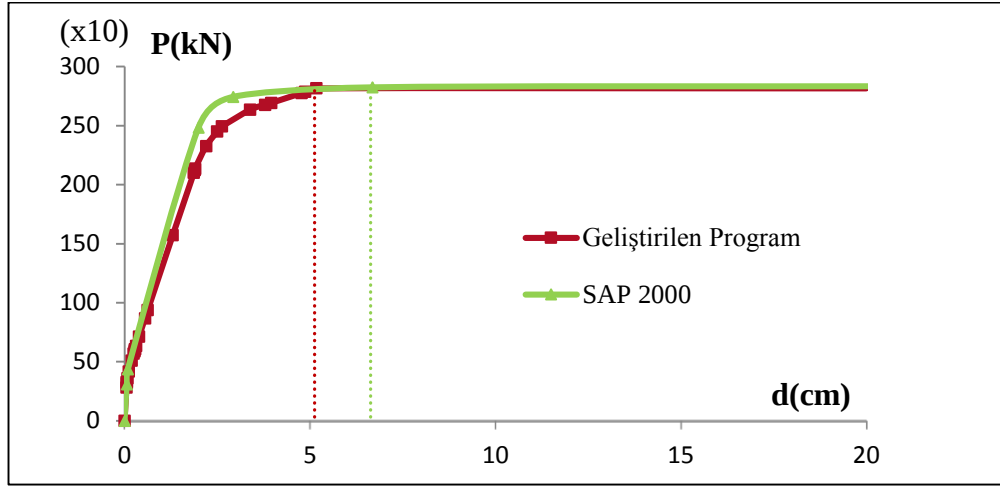
Şekil 7.16 : İtme analizi sonucu tarafsız eksenin yeri.

Sonraki adımlarda çekme ve basınç bölgesindeki düğüm noktalarında akma sınırlarına ulaşıp, son adımda 3-19 düğüm noktalarını birleştiren tarafsız eksen çevresinde, sistemin dönerek mekanizma durumuna geldiği görülmektedir. İtme analizi sonucu plastikleşme meydana gelen düğüm noktaları ise Şekil 7.17’de kırmızı ile işaretlenmiştir.



Şekil 7.17 : İtme analizi sonucu plastikleşme meydana gelen düğüm noktaları.

U perdenin pozitif y yönündeki deprem sonucunda elde edilen yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrisi Şekil 7.18'de verilmektedir. Sistemin göçme yükü ise 2815.4 kN olup, bu yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 5.17cm'dir. SAP 2000 bilgisayar programı ile elde edilen çözümde, sistemin göçme yükü 2824.6 kN ve bu yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 6.68cm'dir. Görüldüğü gibi her iki çözümde de bulunan sonuçlar birbirine çok yakındır.

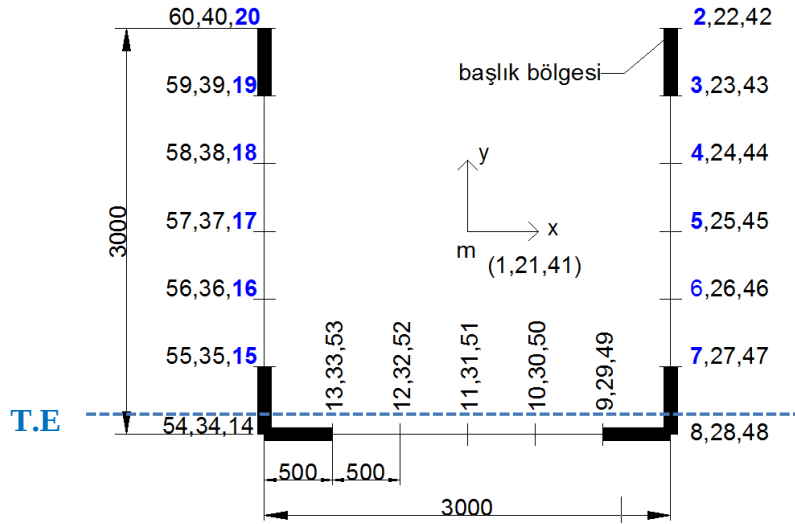


Şekil 7.18 : Bu çalışmada ve SAP 2000 programında elde edilen yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinin karşılaştırılması.

7.3.2 U perde modelinin - Y yönündeki itme analizi

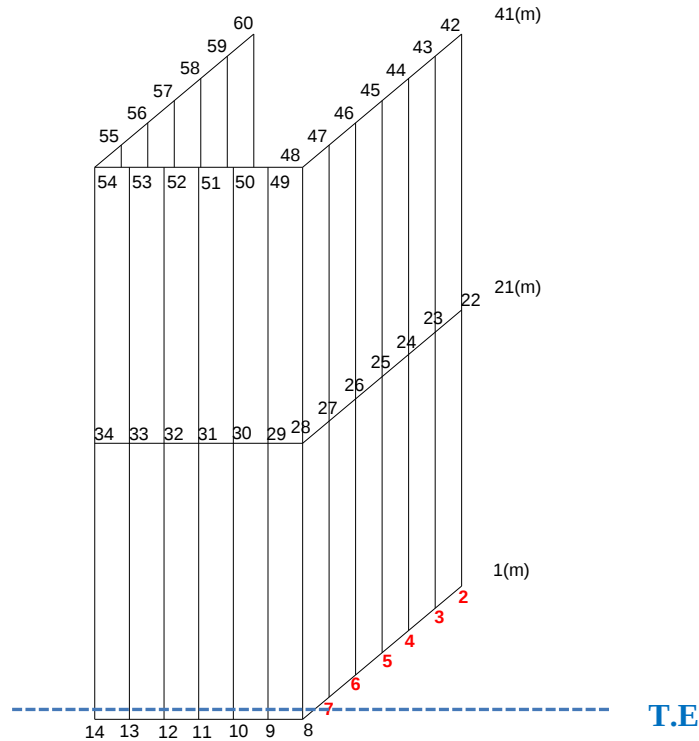
İtme analizinin her adımında sistem düğüm noktalarında meydana gelen durum (akma veya çekme oluşması) ve bu duruma karşı gelen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi değerleri Çizelge 7.14'de verilmektedir.

İlk plastik yerdeğiştirme 13. adımda 1025.1kN yatay yük ile 2. ve 20. düğüm noktalarında aynı anda oluşmaktadır. Bu yatay yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 1.39cm'dir. İlk 9 adımda sistemin üst bölgesindeki elemanların basınç bölgesinden çekme bölgesine geçmesiyle, tarafsız eksen 7-8 / 14-15 numaralı düğüm noktaları arasından geçen çizgiye kaymaktadır. Basınçtan çekmeye geçen düğüm noktaları ve tarafsız eksenin yeri Şekil 7.19'da mavi ile işaretlenmiştir.



Şekil 7.19 : İtme analizi sonucu tarafsız eksenin yeri.

Sonraki adımlarda çekme bölgesindeki düğüm noktalarında akma sınırlarına ulaşıp, son adımda 8-14 numaralı düğüm noktalarını birleştiren çizgi çevresinde sistemin dönerek mekanizma durumuna geldiği görülmektedir. İtme analizi sonucu plastikleşme meydana gelen düğüm noktaları ise Şekil 7.20’de kırmızı ile işaretlenmiştir.

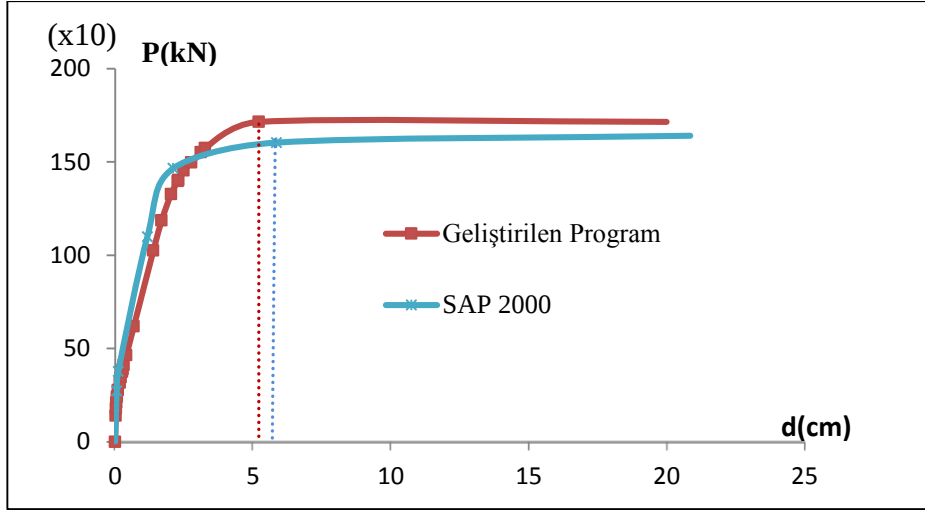


Şekil 7.20 : İtme analizi sonucu plastikleşme meydana gelen düğüm noktaları.

Çizelge 7.14 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

Adım	P(kN)	d(cm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
1	140.1	0.0263		2/20
2	179.7	0.0372		3/19
3	210.7	0.0506		4/18
4	241.0	0.0716		5/17
5	277.0	0.113		6/16
6	316.8	0.173		22/40
7	346.0	0.217		23/39
8	376.0	0.263		24/38
9	389.0	0.284		7/15
10	410.9	0.320		25/37
11	465.1	0.413		26/36
12	618.7	0.682		27/35
13	1025.1	1.39	2/20	
14	1185.7	1.69	3/19	
15	1327.3	2.03	4/18	
16	1397.7	2.28		45/57
17	1402.1	2.30		46/56
18	1453.6	2.49	5/17	
19	1497.3	2.77		44/58
20	1551.9	3.12		47/55
21	1573.9	3.27	6/16	
22	1715.0	5.21	7/15	

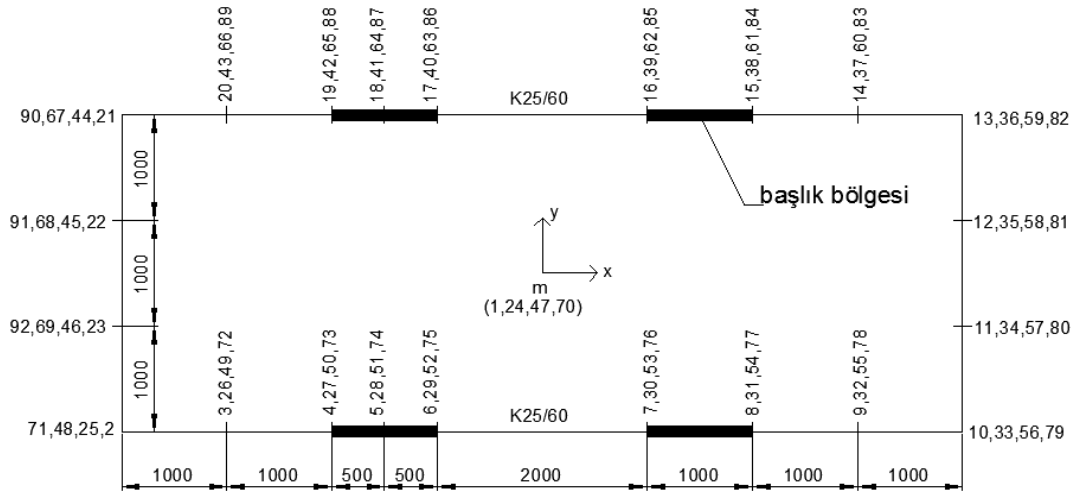
U perdenin negatif y yönündeki deprem sonucunda elde edilen yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrisi Şekil 7.21'de verilmektedir. Sistemin göçme yükü ise 1715.0kN olup, bu yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 5.21cm'dir. SAP 2000 bilgisayar programı ile elde edilen çözümde, sistemin göçme yükü 1603.8kN ve bu yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 5.86cm'dir. Görüldüğü gibi bu yüklemde bulunan göçme yükü değerleri %7 fark etmektedir.



Şekil 7.21 : Bu çalışmada ve SAP 2000 programında elde edilen yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinin karşılaştırılması.

7.4 Bağ Kirişli Perde Modelinin +X Yönündeki İtme Analizi

Bağ kirişleri ile bağlanmış çekirdek perde sisteminin geometrik özellikleri, plandaki yerleşimi ve düğüm noktası numaraları Şekil 7.22'de gösterilmektedir.



Şekil 7.22 : Sistemin plandaki yerleşimi, geometrik özellikleri, düğüm noktası numaraları.

Beton ve donatı malzeme özellikleri örnek 1'deki gibidir.

U perdelerin kirişler ile bağlanması ile oluşturulan sistem 3 katlı olup, kat yükseklikleri 4m, perde kalınlığı 25cm'dir. Her perde paneli Şekil 7.22'de gösterildiği gibi, 1m ve 0.5m'lik parçalara bölünmüştür. Perde elemanların düşey boyu kat yüksekliğine eşit olarak alınmıştır. Bu durumda sistemde bir katta 20 olmak üzere toplam 60 adet perde elemanı vardır. 2m uzunluğundaki kirişler 25cm

genişliğinde ve 60cm yüksekliğindedir. 92 adet düğüm noktasından 1, 24, 47 ve 70 numaralı düğüm noktaları master düğüm noktalarıdır.

Perdelerde yatay ve düşey donatı oranları Şekil 7.18'de kalın çizilmiş başlık bölgesi elemanlarında 0.01, gövde bölgesinde 0.005 olarak tanımlanmıştır. Kirişlerin $\pm$ eğilme moment kapasitesi 240 kNm alınmıştır.

Toplam 5500kN düşey yük üst kattaki, toplam 2200kN düşey yük ise her ara kattaki düğüm noktalarına noktasal olarak dağıtılmıştır. Toplam 7 birimlik yatay yük perdenin en üst master noktasına 5 birim, ara kat master noktalarına birer birim olarak verilmiştir. Geliştirilen programda sistem 60 adet perde ile modellenirken, SAP 2000 programı ile çözümde toplam 240 perde elemanı kullanılmıştır.

İtme analizinin her adımında sistem düğüm noktalarında meydana gelen durum (akma veya çekme oluşması) ve bu duruma karşı gelen toplam yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi değerleri Çizelge 7.15’de verilmektedir.

Çizelge 7.15 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

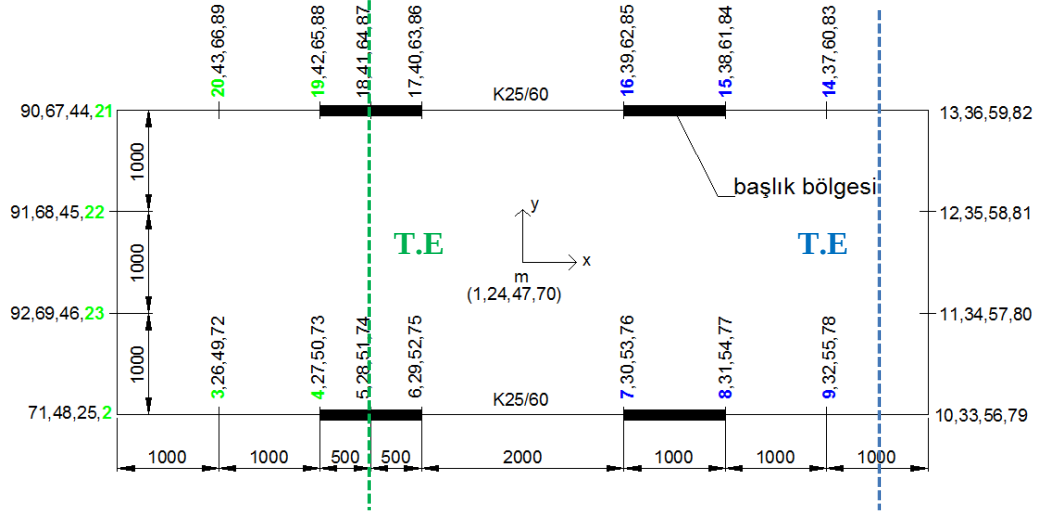
Adım	P(kN)	d(cm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
1	278.0	0.086		7/16
2	353.1	0.105		77/84
3	540.1	0.154		30/39
4	630.0	0.177		75/86
5	741.2	0.207		2/21
6	799.4	0.226		8/15
7	809.6	0.23		22/23
8	1074.7	0.359		3/20
9	1261.8	0.47		9/14
10	1265.9	0.472	53/62	
11	1471.9	0.628	52/63	
12	1482.9	0.638	30/39	
13	1600.0	0.767	29/40	
14	1607.1	0.777	76/85	
15	1618.4	0.797		19/4
16	1623.6	0.807		44/25
17	1632.1	0.822		45/46

Çizelge 7.15 (devam) : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük tepe yerdeğiştirmesi.

Adım	P(kN)	d(cm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
18	1632.3	0.823		31/38
19	1767.2	1.09		26/43
20	1819.8	1.20	75-86	
21	1880.5	1.36		32/37
22	2198.5	2.28	7/16	
23	2215.3	2.33		27/42
24	2319.5	2.65		48/67
25	2354.4	2.76		53/62
26	2384.2	2.85		68/69
27	2519.1	3.27		54/61
28	2582.5	3.47		49/66
29	2618.4	3.58	2/21	
30	2635.0	3.64	22/23	
31	2743.6	4.05	8/15	
32	2822.1	4.44	6/17	
33	2829.6	4.48		55/60
34	2905.1	4.90	3/20	
35	3038.0	6.06	9/14	
36	3082.0	7.00	30/39	
37	3104.0	7.47		50/65
38	3153.6	8.53	4/19	

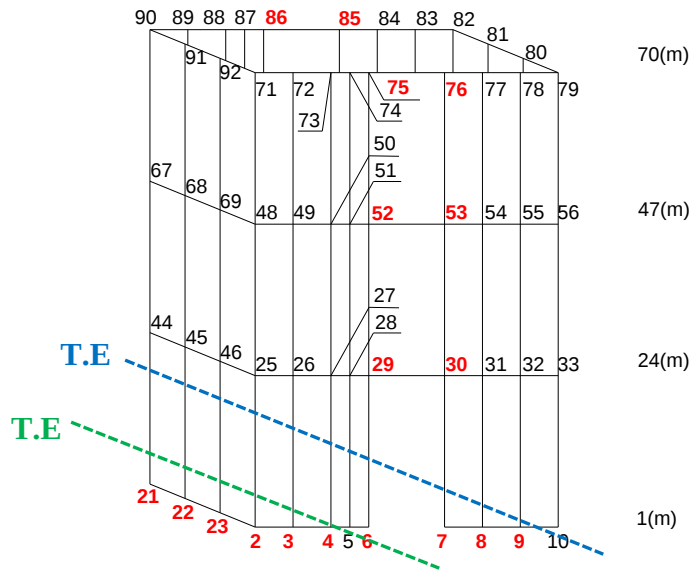
Sistemde ilk plastik yerdeğiştirme 10. adımda 1265.9kN yatay yük ile kiriş elemanına ait 53, 62 numaralı düğüm noktalarında oluşmuştur. 2. Kat kirişlerinin eğılme kapasitelerinin aşılması ile oluşan mafsalları daha sonraki adımlarda 3. Kat ve 1. Kat kirişlerinde meydana gelen eğılme mafsalları takip etmiştir. Perde elemanlarındaki ilk plastik yerdeğiştirmeler kirişlerdeki mafsallaşmalar tamamlandıktan sonra 22. adımda 2198.5kN yatay yük ile 7. ve 16. düğüm noktalarında görölmektedir. Bu düğüm noktaları çekme bölgesinde olup, donatıdaki akma birim şekil değiştirme değerinin elastik şekildeğiştirme sınır değerine ulaşması ile meydana gelmiştir. Basınç bölgesindeki ilk plastik mafsallar 32. adımda 2822.1kN yatay yük ile 6. ve 17. düğüm noktalarında oluşmuştur.

İlk 9 adımda perde elemanların basınç bölgesinden çekme bölgesine geçmesiyle, sağ grup çekirdek perde sisteminin tarafsız eksenini 13-14/9-10 numaralı düğüm noktalarını birleştiren çizgiye kaymaktadır. 15. adımda 4. ve 19. düğüm noktalarının da çekmeden basınca geçmesi ile sol grup çekirdek perde sisteminin tarafsız ekseninin 5-18 numaralı düğüm noktalarını birleştiren çizgiye kaydığı görülmektedir. Basıncıdan çekmeye geçen düğüm noktaları ve tarafsız eksenlerin yeri Şekil 7.23’de sol grup perde için yeşil ile sağ grup perde için mavi ile işaretlenmiştir.



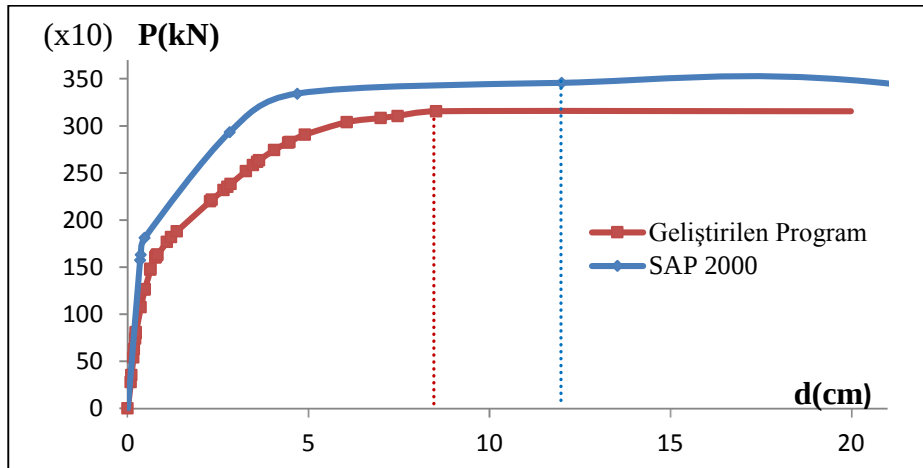
Şekil 7.23 : İtme analizi sonucu tarafsız eksenlerin yerleri.

35. adımda önce sağ çekirdek perde taşıma kapasitesine ulaşmaktadır. Son adımda görülen plastikleşmeler ile sol grup çekirdek sistemi mesnet düğüm noktalarının tamamının düşey birim şekil değiştirmelerinin akma şekil değiştirme sınır değerine ulaştığı, buna bağlı olarak 5-18 numaralı düğüm noktalarını birleştiren çizgi çevresinde bu perdenin de dönerek mekanizma durumuna geldiği görülmektedir. İtme analizi sonucu plastikleşme meydana gelen düğüm noktaları ise Şekil 7.24’de kırmızı ile işaretlenmiştir.



Şekil 7.24 : İtme analizi sonucu plastikleşme meydana gelen düğüm noktaları.

Sistemin pozitif x yönündeki deprem sonucunda elde edilen yatay yük tepe yerdeğiştirmesi eğrisi Şekil 7.25'de verilmektedir. Sistemin göçme yükü 3153.6kN olup, bu yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 8.53cm'dir. SAP 2000 bilgisayar programı ile elde edilen çözümde, sistemin göçme yükü 3456kN ve bu yüke karşı gelen tepe yerdeğiştirmesi değeri 12cm'dir. Göçme yükü farkı % 9 olup, tezde bulunan değerden daha büyüktür.

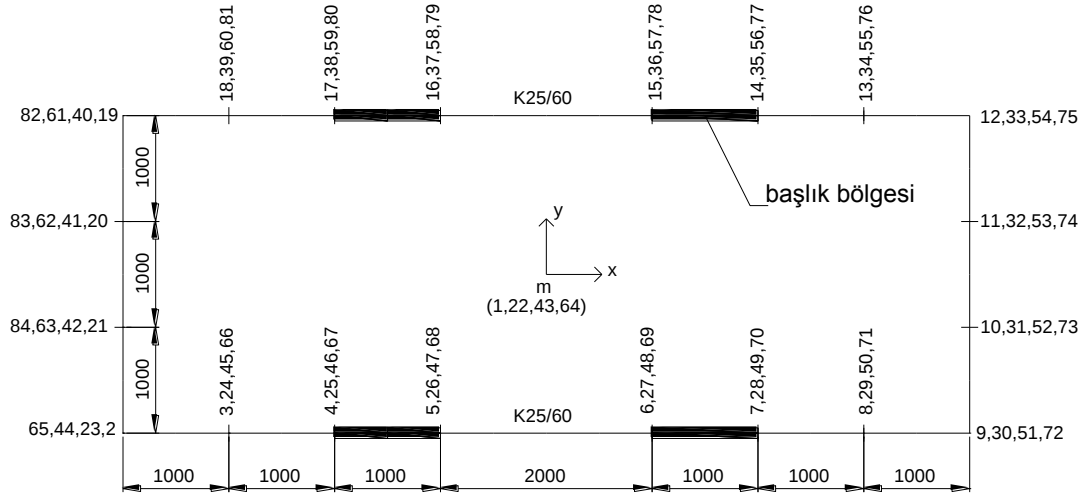


Şekil 7.25 : Yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri.

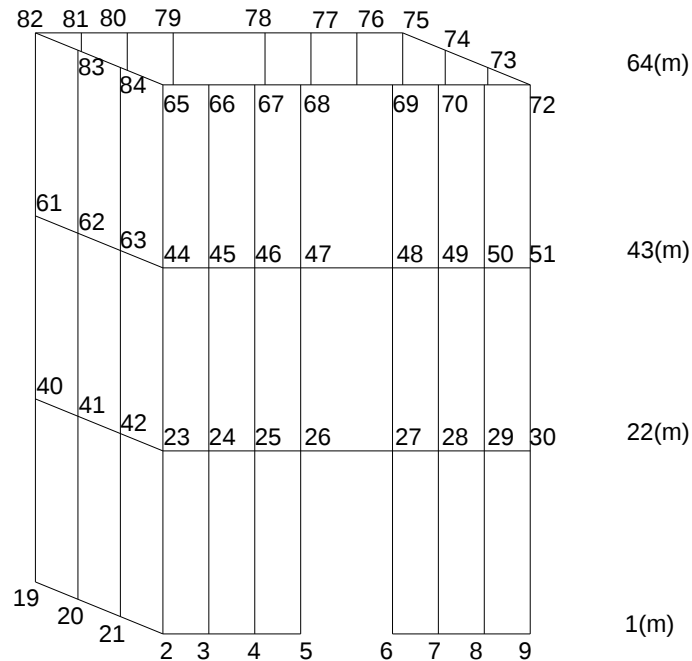
7.5 Bağ Kirişli Çekirdek Perde Modelinin +Y Yönündeki İtme Analizi

Kirişli-perdeli bina modelinin geometrik özellikleri, plandaki yerleşimi ve düğüm noktası numaraları Şekil 7.26'da, üç boyutlu görünümü Şekil 7.27'de gösterilmektedir. Bu örnekte bir öncekinden farklı başık bölgeleri de dahil olmak

üzere tüm perde elemanları 1m uzunluğunda bölünerek toplam eleman sayısında değişiklik yapılmıştır. Bu durumda sistemde bir katta 20 olmak üzere toplam 60 adet perde elemanı vardır. 84 adet düğüm noktasından 1, 22, 43 ve 64 numaralı düğüm noktaları master düğüm noktalarıdır. Bu yükleme için bağ kirişleri çalışmamakta, U şekilli benzer iki perde yatay yükleri karşılamaktadır. Tek perde yerine bu şekilde simetrik iki perde alınması U kesitlerde çarpılma etkisini yok etmektedir.



Şekil 7.26 : Sistemin plandaki yerleşimi, geometrik özellikleri, düğüm noktası numaraları.



Şekil 7.27 : Bağ kirişli perdenin üç boyutlu görünümü ve düğüm noktası numaraları.

İtme analizinin her adımında sistem düğüm noktalarında meydana gelen durum (akma veya çekme oluşması) ve bu duruma karşı gelen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi değerleri Çizelge 7.16’da verilmektedir.

Çizelge 7.16 : Geliştirilen program çözümüne ait yatay yük tepe yerdeğiştirmesi değerleri.

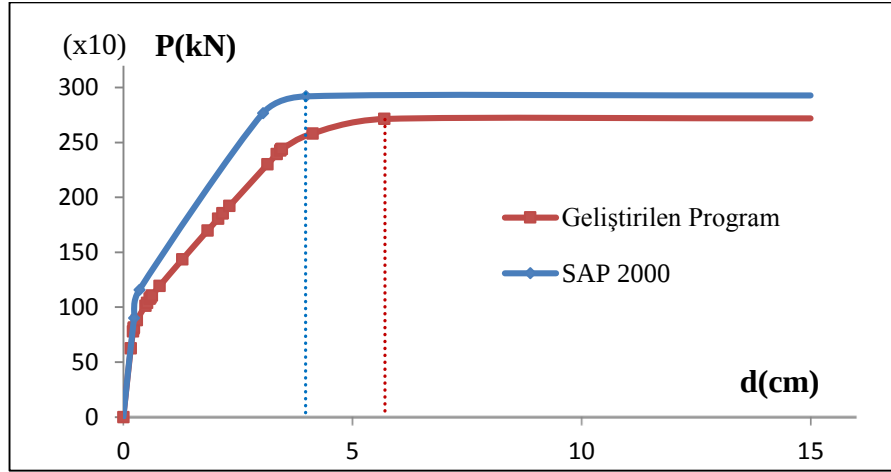
Adım	P(kN)	d(cm)	Nokta No	
			Akma	Çekme
1	625.6	0.163		2/9
2	780.7	0.214		3/8
3	806.2	0.224		5/6
4	814.9	0.232		4/7
5	882.7	0.293		21/10
6	1013.1	0.482		26/27
7	1038.6	0.519		25/28
8	1076.8	0.577		24/29
9	1089.2	0.597		11/20
10	1106.4	0.627		23/30
11	1194.2	0.794		42/31
12	1436.6	1.29		41/32
13	1698.1	1.84		51/44
14	1806.7	2.072		47/48
15	1854.1	2.172		49/46
16	1854.2	2.172		50/45
17	1921.1	2.317		52/63
18	2302.8	3.15		62/53
19	2394.0	3.35	2/9	
20	2427.5	3.42	3/8	
21	2438.7	3.45	5/6	
22	2442.1	3.46	4/7	
23	2582.4	4.13	10/21	
24	2714.6	5.7	11/20	

İlk 9 adımda sistemin alt bölgesindeki elemanların basınç bölgesinden çekme bölgesine geçmesiyle, tarafsız eksen 12-19 numaralı düğüm noktalarını birleştiren çizgiye kaymaktadır.

Sistemde ilk plastik mafsall 19. adımda 2394.0kN yatay yük ile 2 ve 9 numaralı düğüm noktalarında oluşmuştur. Bu düğüm noktaları çekme bölgesinde olup,

donatıdaki akma birim şekil değıştirme değerin elastiğ şekildeğıştirme sınır değeri ne ulaşması ile meydana gelmiştir. Sonraki adımlarda çekme bölgesindeki tüm mesnet düğüm noktalarında akma sınırlarına ulaşılıp, son adımda 12-19 düğüm noktalarını birleştiren tarafsız eksen çevresinde, sistemin dönerek mekanizma durumuna geldiğı görülmektedir.

Sistemin pozitif y yönündeki deprem sonucunda elde edilen yatay yük tepe yerdeğıştirmesi eğrisi Şekil 7.21'de verilmektedir. Sistemin göçme yükü 2714.6kN olup, bu yüke karşı gelen tepe yerdeğıştirmesi değeri 5.7cm'dir. SAP 2000 bilgisayar programı ile elde edilen çözümde, sistemin göçme yükü 2921kN ve bu yüke karşı gelen tepe yerdeğıştirmesi değeri 3.98cm'dir. Göçme yükündeki farklılık tezde daha küçük olmak üzere %7'dir.



Şekil 7.28 : Yatay yük-tepe yerdeğıştirmesi eğrileri.

8. SONUÇLAR VE İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada betonarme malzeme davranışı gösteren sonlu elemanlar tanımlanmış, bu elemanlarla modellenmiş betonarme perdelerin sabit düşey ve artan yatay yükler altında doğrusal olmayan itme analizi hesabı yapılmıştır. Hem donatı hem beton ideal elasto-plastik malzeme olarak tanımlanmış, basınç bölgesindeki çatlamamış beton ile çekme bölgesindeki çatlamış beton için farklı eleman rijitlik matrisi hesaplanmıştır. Beton ve çelik betonda çatlak oluşana kadar birlikte çalıştırılmış, betonda çatlak oluşuktan sonra betonun devre dışı kalarak sadece donatının çalıştığı kabul edilmiştir.

1-) Yük artımının her adımında, perdelerin bağlandığı noktalarda düşey şekildeğiştirme bileşenleri bulunmuş, bu şekildeğiştirmelerin pozitif veya negatif olması durumuna göre eleman, çekme veya basınç elemanı olarak kabul edilerek sistem rijitlik matrisinde değişiklik yapılmıştır. Bu değişiklik ilgili eleman için bir önceki adımdaki sistem rijitlik matrisinden basınç elemanı eleman rijitlik matrisinin çıkarılıp, çekme elemanı eleman rijitlik matrisinin eklenmesi ile kolayca yapılır.

2-) Her yük artımında tarafsız eksenin yeri ve basınçtan çekmeye geçen düğüm noktaları belirlenebilir. Böylece yatay yükler altında perde elemanın içindeki çatlak dağılımı da elde edilir.

3-) Betonarme eleman olarak tanımlanan perde modelinin yatay yükler altında itme analizi yapılmıştır. Doğrusal olmayan davranış çubuk sistemlerdeki plastik mafsal hipotezinin benzeri olarak, düğüm noktaları arasında sonlu elemanın lineer elastik davrandığı, plastik şekil değıştirmelerin düşey plastik yerdeğıştirmeler olarak düğüm noktalarında toplandığı kabulü ile tanımlanmıştır.

4-) Bu kabul ile her yük artımında bütün eleman rijitlik matrislerinin yeniden hesabı ve sistem rijitlik matrisinin yeniden kurulması gibi uzun işlemlere gerek kalmamaktadır. Birim boy değışmesi akma sınır değeriine ulaşan her nokta için sistem rijitlik matrisine bir satır/sütun ilavesi yeterli olmaktadır.

5-) Sonlu elemanların düğüm noktası serbestliklerine karşı gelen şekil fonksiyonlarının perde davranışına uyumlu olarak seçilmiştir. Böylece mevcut diğer programlara göre sistemin nispeten az sayıda elemana bölünmesi yeterli olmaktadır. Örneğin perde katlar arasında bölünmeden, kat yüksekliğince sadece bir eleman alınarak çözüm yapılabilir.

6-) Eleman düğüm noktaları serbestlikleri üç eksen etrafında dönmeleri de içerdiğinden bu noktalarda kirişlerin bağlanması bir sorun yaratmamakta, geliştirilen programla üç boyutlu perde çerçeveli sistemlerin çözümü yapılabilir.

7-) Betonun çekme dayanımının sıfır alınması gerekmemektedir. Çözümlerde belirli bir çekme gerilmesine ulaşıldıktan sonra betonun çatlayacağı ve bu adımdan sonraki adımlarda yalnız donatıların çekme kuvvetlerini karşılayacağı kabulü yapılabilir.

8-) Çözülen örneklerde de görüldüğü gibi hesabın ilk adımlarında, çekme veya basınç akma sınırına ulaşılması değil, tarafsız eksenin artan eğilme momentleri nedeniyle kayması ve bunun sonucu bazı elemanların basınç bölgesinden çekme bölgesine geçişi söz konusudur. Programda bazı elemanların baştan çekme elemanı olarak tanımlanması ve hatta itme analizinde yatay yük parametresinin sıfırdan değil belirli bir değerden başlatılabilmesi mümkündür. Bu şekilde limit yüke ulaşabilmek için gerekli adım sayısı azaltılabilir.

9-) Çözülen örneklerde görüldüğü gibi, tezde geliştirilen sonlu eleman ve hesap yönteminin uygulanması ile elde edilen itme analizi eğrilerinin hem deneysel çalışmalardan, hem benzeri itme analizi yapan programdan elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Buna dayanarak, uygulanan sonlu eleman ve hesap yönteminin doğru ve güvenilir sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.

10-) Yukarıda açıklanan özellikler nedeniyle tezde geliştirilen eleman ve hesap yöntemi, itme analizi yapan diğer programlara göre daha az eleman ağı ile çok daha hızlı itme analizi yapabilmektedir. Bu nedenlerle büyük ve çok katlı sistemlerin itme analizi ciddi zaman tasarrufu sağlayarak yapılabilir.

Çalışmanın ileriye dönük geliştirilmesi kapsamında;

a) Yüksek yapılar hesabı söz konusu olduğunda ikinci mertebe etkilerinin de dikkate alınması gereği ortaya çıkabilecektir.

b) Perde sistemlerinin mekanizma durumuna geldiği limit yüklerin bulunması yanında, plastik mafsallarda mafsallarda dönme kapasitesinin aşılma sınırlamasına benzer olarak, perde düğüm noktalarında eleman boyutlarına bağı olarak çatlak sınırlaması anlamında plastik yerdeğıştirme sınırlamalarının getirilmesi düşünölmektedir. Bunun deneysel çalışmalarla uyumlu tanımlanması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Akkaya, Y.** (2006). *Düzlem gerilme durumunda betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışının sonlu eleman yöntemiyle incelenmesi*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydınoglu M.N.** (2009). Yüksek binaların deprem tasarımında yeni yaklaşımlar. İçinde Z. Celep (Editör), *Betonarme Yapılar Semineri*, (s.54-62). İstanbul : İstanbul Teknik Üniversitesi, 21 Ekim.
- Aydınoglu M. N., Celep Z., Özer E., Sucuoğlu H.** (2009). *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik Açıklamalar ve Örnekler Kitabı*. İstanbul.
- ASCE Committee 447** (1982). *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete*. Newyork : ASCE
- Bazant, Z. P., Caner F.C., Carol I., Adley M.D. ve Akers S.A.** (2000). Microplane model M4 for concrete. I: formulation with work-conjugate deviatoric stress. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(9), 944-953.
- Celep Z.** (2007). *Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme*. İstanbul : Beta Dağıtım.
- Cengiz, E. Y.** (2004). *Yeni bir perde eleman modeli ve çok katlı perde-çerçeve yapı sistemlerinin göçme güvenliğinin belirlenebilmesi için yük artım yöntemi*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Doğangün A.** (2005). *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı*. İstanbul : Birsen Yayınevi.
- Durgun Y.** (2012). *Mevcut betonarme yapıların deprem performanslarının belirlenmesi ve viskoz akışkanlı sönümleyiciler ile güçlendirilmesi için artımsal analize dayalı bir algoritma*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fahjan Y. M., Başak K., Kubin, J. ve Tan M. T.** (2011). Perdeli betonarme yapılar için doğrusal olmayan analiz metotları, 7. *Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, Türkiye : 30 Mayıs - 3 Haziran.
- Hognestad, E.** (1951). A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. *Bulletin Series*, 399(1), 1-128.
- Kent, D. C., ve Park, R.** (1971). Flexural members with confined concrete. *Journal of the Structural Division*, 97, 1967-1990.
- Khatri, D., L. ve Anderson, J. C.** (1995). Analysis of reinforced shear wall components using the adina nonlinear concrete model. *Computer of Structures*, 56(2/3), 485-504.

- Kubin, J., Fahjan Y. M. ve Tan M. T.** (2008). Comparison of practical approaches for modelling shear walls in structural analyses buildings, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China : 12-17 October.
- Kwak, H. G. ve Filippou F.C.** (1997). Nonlinear FE analysis of R/C structures under monotonic loads. *Computer of Structures*, 65(1), 1-16.
- Kwak, H. G. ve Kim D.Y.** (2001). Nonlinear analysis of RC shear walls considering tension-stiffening effect. *Computer of Structures*, 79, 449-517.
- Kwan, A. K. H. ve He X.G.** (2001). Finite element analysis of effect of concrete confinement on behavior of shear walls. *Computer of Structures*, 79, 1799-1810.
- Lefas, I. D., Kotsovos M.D. ve Ambraseys N.N.** (1990). Behavior of concrete structural walls, strength, deformation characteristic and failure mechanism. *ACI Structural Journal*, 87(1), 23-31.
- Lefas, I. D. ve Kotsovos M.D.** (1990). Strength of deformation characteristic of reinforced concrete walls under load reversals. *ACI Structural Journal*, 87(6), 716-726.
- Miao, Z. W., Lu J. J., Jiang J.J. ve Ye L.P.** (2006). Nonlinear FE model for RC shear walls based on multi-layer shell element and microplane constitutive model, *Computational Methods in Engineering and Science Epmesc X*, Sanya, Hainan, China : 21-23 August.
- SAP 2000** (Advanced 14.1.0) [Computer software]. Berkeley, California : Computers and Structures Inc.
- Saygun, A. I.** (1974). *Yüzeysel taşıyıcı sistemlerin hesabı için eğrisel sonlu elemanlar*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Saygun, A. I.** (1979). *Eğri eksenli, kutu kesitli kirişlerin hesabı için bir sonlu elemanlar yöntemi*. (Doçentlik tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TS-500** (2000). *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*. Ankara : Türk Standartları Enstitüsü.
- Xucheng, W. ve Xiaoning W.** (1995). Simplified method for elasto-plastic finite element analysis of hardening materials. *Computer of Structures*, 55(4), 703-708.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Delal DOĞRU ORMANCI
DoğumTarihi ve Yeri : 14.08.1982 / Çorlu
E-posta : delaldogru@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2004, İ.T.Ü, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2006, İ.T.Ü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Doğru Ormanci, D.**, 2015. Betonarme Perdeli Sistemlerin İtme Analizi İçin Özelleşmiş Yeni Bir Sonlu Eleman, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, (Kabul-Yayın aşamasında).

