İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATLI PERDELİ SİSTEMLERİN YATAY YÜKLERE GÖRE SONLU ELEMANLARLA ÇÖZÜMÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Ayşegül KANLI

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATLI PERDELİ SİSTEMLERİN YATAY YÜKLERE GÖRE SONLU ELEMANLARLA ÇÖZÜMÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Ayşegül KANLI
(501021021)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Aralık 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Ocak 2006

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ahmet Işın SAYGUN
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Sumru PALA
Doç.Dr. Necdet TORUNBALCI

OCAK 2006

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği programında, Prof. Dr. Sayın Ahmet Işın SAYGUN danışmanlığında gerçekleştirilen, bu yüksek lisans tez çalışmasında, önceden oluşturulmuş olan perde sonlu eleman modeli geliştirilerek, yalnız perdelerden ve perde- çerçevelerden oluşan çok katlı, üç boyutlu, kat hizasında rijit hareket yapan yapı sistemlerinin elastik hesabı ve göçmeye karşı gelen yatay yük parametresini bulmak için modeller geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında bilgi, birikim ve deneyimleri ile bana yol gösteren, özveride bulunarak desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Sayın Ahmet Işın SAYGUN' a en içten dileklerimle teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Aynı şekilde bana her konuda yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Sayın Mecit ÇELİK' e teşekkür ederim.

Çalışmalarımda bana destek olan babama, anneme, kardeşime, arkadaşlarıma ve özellikle her türlü yardımları için Sayın Sinem ÖZYILMAZ ve Sayın Serkan Tarık ÖZTUNA'ya sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ocak 2006 Ayşegül KANLI

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ ix
SEMBOL LİSTESİ xi
ÖZET xiv
SUMMARY xvi

1. GİRİŞ 1

1.1. Konu 1

1.2. Konu ile ilgili çalışmalar 1

1.3. Çalışmanın amacı ve kapsamı 7

2. PERDE SONLU ELEMAN MODELİ 9

2.1. Kabuller 9

2.2. Perde sonlu elemana ait eksen takımı, uç kuvvetleri, yerdeğiştirme parametreleri 9

2.3. Perde elemana ait rijitlik ve gerilme matrislerinin hesabı 11

2.3.1. Yerdeğiştirme bileşenlerinin yayılış fonksiyonları 11
2.3.2. Şekildeğiştirme matrisinin hesabı 14
2.3.3. Düğüm noktalarına ait iç kuvvetler (gerilme) matrisinin tanımı 16
2.3.4. [D] Elastisite matrisinin belirlenmesi 16
2.3.5. Eleman bağımsız alt rijitlik matrislerinin hesabı 17
2.3.5.1. Geliştirilen sonlu elemana ait rijitlik matrisinin bulunması 19
2.3.5.2. Geliştirilen sonlu elemana ait rijitlik matrislerinin hesabında kullanılan dönüştürme matrisleri 22
2.3.5.3. Perde sonlu elemana ait diğer alt matrislerin hesabı 23
2.3.6. Perde elemanın düğüm noktalarına ait iç kuvvetler (gerilme) matrisinin hesabı 25

2.4. Özel Durum 28

3. ÇUBUK SONLU ELEMAN 29

3.1. Kabuller 29

3.2. Çubuk eksen takımı, uç kuvvetleri,yerdeğiştirmeleri ve dönüştürme matrislerinin incelenmesi 30

3.2.1. Çubuk eleman sistem eksen takımı 30
3.2.2. Uzay çubukta çubuk özel eksen takımı,uç kuvvetleri ve yerdeğiştirmeleri 31
3.2.3. Çubuk sistem eksen takımına dönüştürme matrisi 32

3.3. Çubuk elemana ait rijitlik matrisi 32

4. ÇUBUK VE PERDE SONLU ELEMANLARDAN OLUŞAN SİTEMİN ELASTİK HESABI 35

4.1. Ortak sistem eksen takımı, düğüm noktası kuvvetleri, düğüm noktası yerdeğiştirme parametreleri ve düğüm noktası yükleri 35

4.2. Sistem eksen takımına dönüştürme matrisleri 35

4.2.1. Perde sonlu elemana ait rijitlik matrisinin perde eksen takımından çubuk sonlu elemanların da dahil edildiği eksen takımına dönüştürülmesi 35
4.2.2. Perde sonlu elemanın planda farklı açısal konumuna bağlı olarak ortak sistem eksen takımına dönüştürme matrisi 36
4.2.3. Çubuk elemana ait rijitlik matrisinin perde sonlu elemanların da dahil edildiği eksen takımına dönüştürülmesi 38
4.2.4. Çubuk elemanın farklı açısal konumuna bağlı olarak ortak sistem eksen takımına dönüştürme matrisi 38

4.3. Yapı sistemlerinin kat seviyesinde rijit hareket yapması durumunun incelenmesi 41

4.4. Sisteme ait yükleme ve rijitlik matrisinin oluşturulması ve oluşturulan denklem takımının çözümü 44

4.5. Uç kuvvetlerinin bulunması 49

4.5.1. Perde sonlu elemanda iç kuvvetlerin bulunması 49
4.5.2. Çubuk elemanda uç kuvvetlerinin bulunması 50

5. PERDELERİN ELASTO-PLASTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ 51

5.1. Homojen, izotrop, ideal elasto-plastik malzeme 51

5.2. Betonarme perdeler 53

5.2.1. Donatı çeliğinin özellikleri 53
5.2.2. Betonun özellikleri 54
5.2.3. Betonarme perde eleman için malzeme bakımından yapılan kabuller 55

6. PERDELERDEN OLUŞAN SİSTEMLERİN GÖÇME YÜK PARAMETRESİNİN BELİRLENMESİNDE İZLENEN YÖNTEM 57

6.1. Denklem takımının oluşturulması 58

6.1.1. Özel durumların incelenmesi 63

6.2. Denklem takımının çözümü ve bilinmeyenlerin bulunması 64

6.3. Düğüm noktasındaki gerilmelerin hesabı 65

6.3.1. Plastikleşen düğüm noktalarındaki plastikleşme parametrelerinden sonlu eleman düğüm noktalarında oluşan gerilmelerin hesabı 65
6.3.2. Her adıma ait düğüm noktası toplam gerilmelerin hesabı 66
6.3.3. Plastikleşen düğüm noktalarında toplam s_z şekildeğiştirmesinin bulunması 67

6.4. Perdelerden oluşan sistemin göçme güvenliğinin belirlenmesinde yük artımı yöntemi 69

7. ÇUBUK ELEMANLARIN PLASTİKLEŞMESİNDE İZLENEN YÖNTEM 72

7.1. Kirişlerde iç kuvvet şekildeğiştirme bağıntısı 72

7.2. Kolon elemanlarda eğilme plastikleşmesi durumu 74

7.3. Çubuk elemanlarda burulma plastikleşmesi durumu 76

7.4. Çubuk elemanlarda plastikleşme oluşması durumunda sistem rijitlik matrisine ilave edilmesi gereken terimler 77

7.4.1. Plastikleşmenin M_x eğilme momentinden dolayı oluşması durumu 79
7.4.2. Plastikleşmenin M_z eğilme momentinden dolayı oluşması durumu 80
7.4.3. Plastikleşmenin M_y burulma momentinden dolayı oluşması durumu 80

7.5. Sistem rijitlik matrisine ilave edilecek terimlerin dönüştürülmesi 81

7.6. [SΦΦ] matrisinin elemanları 82

7.7. Plastikleşen sisteme ait denklem takımının çözümü ve bilinmeyenlerin bulunması 83

7.8. Düğüm noktası uç kuvvetlerinin hesabı 83

8. PERDE VE ÇUBUK ELEMANLARDAN OLUŞAN YAPI SİSTEMLERİNDE GÖÇME YÜK PARAMETRESİNİN HESABI İÇİN YÜK ARTIMI YÖNTEMİ 85

9. BİLGİSAYAR PROGRAMI 88

9.1. Programın amacı 88

9.2. Gens.for bilgisayar programı 88

9.2.1. Program giriş bilgileri 88
9.2.2. Program çıkış bilgileri 89

9.3. Alt programlar 90

9.3.1. Subroutine ELRIJ 90
9.3.2. Subroutine TRANSP 90
9.3.3. Subroutine TRANSIIP 91
9.3.4. Subroutine MATCAPP 91
9.3.5. Subroutine MATCPP 91

9.3.6. Subroutine PMAT 91
9.3.7. Subroutine PMATC 91
9.3.8. Subroutine MATCAPC 92
9.3.9. Subroutine TRANS 92
9.3.10. Subroutine TRNF 92
9.3.11. Subroutine ÇUBUK 92
9.3.12. Subroutine TRÇUBUK 92
9.3.13. Subroutine TRANSII 92
9.3.14. Subroutine MATCAP 92

10. SAYISAL ÖRNEKLER 93

10.1. 6 katlı düzlem perde-kiriş sistemin farklı çözümler ile elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması 93

10.2. 13 katlı düzlem perde-kiriş sistemin farklı çözümler ile elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması 104

10.3. 6 katlı düzlem perde-kiriş sisteminin yük artımı yöntemi ile hesabında elde edilen sonuçlar 121

10.4. 13 katlı düzlem perde-kiriş sisteminin yük artımı yöntemi ile hesabında elde edilen sonuçlar 122

11. SONUÇLAR 123

KAYNAKLAR 127

EKLER 130

ÖZGEÇMİŞ 145

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1.	Yardımcı fonksiyonlar.....	13
Tablo 2.2.	Serbestliklerin birim değerinde elemanda yerdeğiştirme bileşenlerinin yayılış fonksiyonları.....	14
Tablo 2.3.a.	$[B]_1$ ve $[B]_2$ alt matrisleri.....	20
Tablo 2.3.b.	$[B]_3$ ve $[B]_4$ alt matrisleri.....	21
Tablo 2.4.a.	$[K]_{11}$ eleman alt rijitlik matrisleri.....	23
Tablo 2.4.b.	$[K]_{12}$ eleman alt rijitlik matrisleri.....	24
Tablo 2.4.c.	$[K]_{21}$ eleman alt rijitlik matrisleri.....	24
Tablo 2.4.d.	$[K]_{22}$ eleman alt rijitlik matrisleri.....	24
Tablo 2.5.a.	Eleman gerilme alt matrisleri.....	26
Tablo 2.5.b.	Eleman gerilme alt matrisleri.....	27
Tablo 10.1.	Çözüm 1'den elde edilen sonuçlar.....	95
Tablo 10.2.	EK 2'den elde edilen sonuçlar (x doğrultusu).....	96
Tablo 10.3.	Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)...	96
Tablo 10.4.	Orta çekirdekteki çubuk elemanın sistemden çıkarılmasıyla elde edilen sonuçlar (x doğrultusu).....	97
Tablo 10.5.	Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)...	97
Tablo 10.6.	EK 3'den elde edilen sonuçlar (x doğrultusu-döşemeli).....	98
Tablo 10.7.	Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmler)....	98
Tablo 10.8.	Orta çekirdekteki çubuk elemanın sistemden çıkarılmasıyla elde edilen sonuçlar (x doğrultusu-döşemeli).....	99
Tablo 10.9.	Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)...	99
Tablo 10.10.	6 katlı perdeli sistemde x doğrultusundaki bütün sonuçların karşılaştırılması.....	100
Tablo 10.11.	EK 4'den elde edilen sonuçlar (y doğrultusu).....	101
Tablo 10.12.	Çözümlerin karşılaştırılması (y doğrultusunda yerdeğiştirmeler)...	101
Tablo 10.13.	EK 5'den elde edilen sonuçlar (y doğrultusu-döşemeli).....	102
Tablo 10.14.	Çözümlerin karşılaştırılması (y doğrultusunda yerdeğiştirmeler)...	102
Tablo 10.15.	6 katlı perdeli sistemde y doğrultusundaki bütün sonuçların karşılaştırılması.....	103
Tablo 10.16.	Çözüm 1'den elde edilen sonuçlar.....	106
Tablo 10.17.	EK 6'den elde edilen sonuçlar (x doğrultusu).....	107
Tablo 10.18.	Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)...	108
Tablo 10.19.	Orta çekirdekteki çubuk elemanın sistemden çıkarılmasıyla elde edilen sonuçlar (x doğrultusu).....	109
Tablo 10.20.	Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)...	110
Tablo 10.21.	EK 7'den elde edilen sonuçlar (x doğrultusu-döşemeli).....	111
Tablo 10.22.	Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmler)....	112
Tablo 10.23.	Orta çekirdekteki çubuk elemanın sistemden çıkarılmasıyla elde edilen sonuçlar (x doğrultusu-döşemeli).....	113

Sayfa No

Tablo 10.24. Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)... 114
Tablo 10.25. 13 katlı perdeli sistemde x doğrultusundaki bütün sonuçların karşılaştırılması..... 115
Tablo 10.26. EK 8'den elde edilen sonuçlar (y doğrultusu)..... 116
Tablo 10.27. Çözümlerin karşılaştırılması (y doğrultusunda yerdeğiştirmeler)... 117
Tablo 10.28. EK 9'dan elde edilen sonuçlar (y doğrultusu-döşemeli)..... 118
Tablo 10.29. Çözümlerin karşılaştırılması (y doğrultusunda yerdeğiştirmeler)... 119
Tablo 10.30. 13 katlı perdeli sistemde y doğrultusundaki bütün sonuçların karşılaştırılması..... 120

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.a. Sonlu eleman, boyutları, eksen takımı, yerdeğiştirme parametreleri..... 10
Şekil 2.1.b. Sonlu eleman düğüm noktası iç kuvvetleri..... 10
Şekil 2.2.a. Düğüm noktası yerdeğiştirme parametrelerinin pozitif yönleri..... 11
Şekil 2.2.b. Eleman düğüm nktalarının numaralanışı ve koordinatları..... 11
Şekil 3.1. İdeal elasto-plastik malzemede yükleme ve boşaltma eğrileri..... 29
Şekil 3.2. Çubuk sistem eksen takımı, düğüm noktası uç kuvvetleri, yükleri ve yerdeğiştirmelerin pozitif yönleri..... 30
Şekil 3.3. Uzay çubukta çubuk özel eksen takımı, uç kuvvetleri ve yerdeğiştirmeleri..... 31
Şekil 4.1.a. Perde özel eksen takımında yerdeğiştirme parametrelerinin numaralanışı..... 35
Şekil 4.1.b. Ortak sistem özel eksen takımında yerdeğiştirme parametrelerinin numaralanışı..... 35
Şekil 4.2. Perde sonlu elemanın planda y ekseni ile yaptığı açı..... 37
Şekil 4.3.a. Çubuk özel eksen takımında yerdeğiştirme bileşenlerinin numaralanışı..... 38
Şekil 4.3.b. Ortak sistem eksen takımında yerdeğiştirme bileşenlerinin numaralanışı..... 38
Şekil 4.4. Rijit düzlem içindeki bir i düğüm noktasının referans noktasına bağlılığı..... 42
Şekil 4.5. Referans noktalarına bağlı perde çubuk sistemin şematik gösterimi..... 45
Şekil 5.1. Perde elemanlarda gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı..... 52
Şekil 5.2. İdeal elasto-plastik malzeme olarak donatı çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı..... 54
Şekil 5.3. Normal sargı donatılı betonun eğilmesinde dış liflerdeki σ-ε bağıntısı..... 54
Şekil 6.1. Plastikleşen düğüm noktalarında toplam şekildeğişitirme..... 67
Şekil 7.1. Kirişlerde iç kuvvet (M) şekildeğişitirme (χ) bağıntısı..... 72
Şekil 7.2. Çubuk elemanlarda iç kuvvet şekildeğiştirme bağıntısı..... 74
Şekil 7.3. Eğik eğilme ve normal kuvvet etkisi altında tarafsız eksenin konumu..... 75
Şekil 10.1. 6 katlı sistemin Çözüm 1'e göre STA4CAD'de modellenmesi (Plan)..... 94
Şekil 10.2. 6 katlı sistemin Çözüm 1'e göre STA4CAD'de modellenmesi (3 boyutlu)..... 94
Şekil 10.3. STA4CAD'de 9x aksı üzerindek elemanların moment diyagramları..... 95

Sayfa No

Şekil 10.4. 13 katlı sistemin Çözüm 1'e göre STA4CAD'de modellenmesi (Plan)..... 104
Şekil 10.5. 13 katlı sistemin Çözüm 1'e göre STA4CAD'de modellenmesi (3 boyutlu)..... 105
Şekil 10.6. 13 katlı sistemde 9x aksındaki elemanların moment diyagramları..... 105
Şekil 10.7. 6 katlı sistemin x doğrultusunda yük artımı yöntemiyle hesap sonuçları..... 121
Şekil 10.8. 6 katlı sistemin y doğrultusunda yük artımı yöntemiyle hesap sonuçları..... 121
Şekil 10.9. 13 katlı sistemin x doğrultusunda yük artımı yöntemiyle hesap sonuçları..... 122
Şekil 10.10. 13 katlı sistemin y doğrultusunda yük artımı yöntemiyle hesap sonuçları..... 122

SEMBOL LİSTESİ

$[d]_i$	:i düğüm noktası yerdeğiştirme parametreleri kolon matrisi.
u,v,w	:Yerdeğişitirme bileşenleri.
li,fi,gi	:Yardımcı fonksiyonlar.
β_n, β_z	:n ve s ekseni etrafında dönme yerdeğiştirmesi.
ε_z	:z ekseni boyunca şekildeğiştirme.
[Ad]	:Serbestliklerin birim değerinde elemanda yer değiştirme bileşenlerinin yayılış fonksiyonları matrisi.
[D]	:Elastisite matrisi.
$E_ç$	:Beton çeliği elastisite modülü.
E_b	:Beton elastisite modülü.
h	:Perde eleman kalınlığı.
a,b	:Eleman yatay ve düşey boyutları.
υ	:Poisson oranı.
[ε]	:Şekildeğiştirme matrisi.
[B]	:Birim yerdeğiştirme durumlarında şekildeğiştirme bileşenlerinin eleman üzerinde yayılışını gösteren matris.
[N]	:Kesit tesirleri matrisi.
[P]	:Ortak sistem eksen takımında iki ucu ankastre çubukta dış yüklerden meydana gelen çubuk uç kuvvetleri matrisi.
[Ts],[Tz]	:Simetriden dolayı dönüşüm matrisi.
[TD]	:Perde özel eksen takımındaki6 adet düğüm noktası serbestliğinden, ortak eksen takımındaki 7 adet düğüm noktası serbestliğine geçişi sağlayan dönüşüm matrisi.
$[P]_i$, **[P]**	:Çubuk özel eksen takımında çubuk elemanın i ve j düğüm noktalarına ait uç kuvvetleri matrisi.
[C]	:Çubuk eleman rijitlik matrisi.
L	:Çubuk boyu.
F	:Çubuk enkesiti.
G	:Kayma modülü.
EI_y, EI_z	:YZ ve XY düzlemlerindeki eğilme rijitlikleri.
α	:Perde elemanın planda yatayla yaptığı açı.
[TR], [TTR]	:Ortak sistem eksen takımına dönüştürme matrisleri.
[SS]	:Sistem eksen takımında sistem rijitlik matrisi.
β	:Çubuk Z ekseninin sistem Z ekseni ile yaptığı açı.
ΔX, ΔY	:Rijit düzlemdeki i düğüm noktası ile referans noktası arasındaki dik mesafeler.
X_m, Y_m	:Referans noktasının koordinatları.
X_i, Y_i, X_j, Y_j	:i ve j düğüm noktaların koordinatları..
[tt]	:Referans noktasına bağlılığı sağlayan dönüştürme matrisi.
[q]	:Sistem eksen takımında etkiyen düğüm noktası yüklerine ait matris.
$[K]^*_{ixjx}$	:Perde sonlu elemanın ortak sistem eksen takımındaki alt rijitlik matrisi.
$[C]^*_{ixjx}$	:Çubuk sonlu elemanın ortak sistem eksen takımındaki alt rijitlik matrisi.
$[d]^*$	:Ortak sistem eksen takımında bağımsız yer değiştirme bieşenleri.

[d] **:**Ortak sistem eksen takımında bağımlı ve bağımsız yer değiştirme bileşenleri.

[$S_{\Delta d}$] **:**Ortak sistem eksen takımında perde sonlu elemanlarda, dış yüksüz sistemde, plastik şekildeğiştirmeler sıfır iken yalnız düğüm noktalarının yer değiştirme bileşenlerinden dolayı plastikleşen düğüm noktalarında oluşan uç kuvvetleri matrisi.

[$S_{\Delta\Delta}$] **:**Ortak sistem eksen takımında perde sonlu elemanlarda, dış yüksüz sistemde, plastik şekildeğiştirmeler sıfır iken k sayılı plastikleşen düğüm noktasındaki plastik şekildeğiştirme parametresinin birim değeri için tüm plastik kesitlerde oluşan uç kuvvet matrisi.

[SGP] **:**Plastikleşmeden dolayı perde sonlu elemanlarda oluşan gerilme alt matrisi.

[$SGPP]_{kk}$ **:**k. plastikleşen düğüm noktasındaki plastikleşme parametresinin birim değerinden dolayı sonlu perde elemanın düğüm noktalarında oluşan gerilme matrisi.

[$dp]'_{24x1}$ **:**Perde sonlu eleman özel eksen takımındaki ilave yer değiştirme parametreleri.

[SIGEL]* **:**Plastikleşme nedeni ile perde sonlu elemana ait gerilme matrisi.

PPD **:**Plastikleşme parametresi.

NDC **:**Ortak sistem eksen takımında d_7 şekildeğiştirme bileşeninin işareti.

[$P]_m$ **:**m nolu perde sonlu elemana ait perde özel eksen takımındaki tolam uç kuvvetleri.

[dp] **:**Perde özel eksen takımında 6 bilinmeyenli yer değiştirme bileşenleri.

[SIGEL] **:**20x24 boyutunda perde sonlu elemana ait gerilme matrisi. (perde özel eksen takımında)

[$P]_{20x1}$ **:**Perde sonlu eleman uç kuvvetleri. (perde özel eleman takımında)

[$P]_{ix}$, [$P]_{jx}$ **:**Ortak sistem eksen takımında çubuk eleman uç kuvvetleri matrisi.

[S_{dd}] **:**Ortak sistem eksen takımındaki, üzerinde plastik kesit bulunmayan perdelerden oluşan sistemin rijitlik matrisi.

[Δ] **:**Ortak sistem eksen takımında perde elemanın elastik şekildeğiştirme sınırını aşan düğüm noktası plastik şekildeğiştirme parametresi.

[$S_{d\Delta}$] **:**Ortak sistem eksen takımında perdelerde plastik şekildeğiştirmenin oluştuğu düğüm noktasında düşey doğrultudaki ve düğüm noktası yerdeğiştirme parametresi ile ters işaretli plastik yer değiştirmenin birim değerinden dolayı perde elemanın düğüm noktalarında oluşan ilave uç kuvvetleri matrisi.

[$K_{d\Delta}$] **:**Perde özel eksen takımında plastikleşme ile ilgili ilave kolon matris.

[TN] **:**Dönüşüm matrisi.

[$EK_{d\Delta}$], [$EK_{d\phi}$] **:**Ortak sistem eksen takımında plastikleşme ile ilgili ilave kolon matris.

[$EK_{n\Delta}$]*, [$EK_{n\phi}$]*:Ortak sistem eksen takımında referans noktası ile bağlılığı kapsayan plastikleşme ile ilgili ilave kolon alt matris.

ε_e **:**Elastik şekildeğiştirme sınır değeri.

ε_g **:**Maksimum şekildeğiştirme sınır değeri.

N_{ze} **:**Elastik şekildeğiştirme sınırındaki perde sonlu elemanın plastikleşen düğüm noktasındaki düşey doğrultudaki uç kuvvet.

s,z,n **:**Perde sonlu eleman özel eksen takımı.

[Ui] **:**Dış yükler altında sistemdeki yük doğrultusundaki yer değiştirme bileşenleri.

[$P]_t$ **:**Sıcaklık değişimine karşı gelen sabitler matrisi.

[K]ii_{6x6} **:**Perde özel eksen takımındaki alt rijitlik matrisleri.

[C]ii_{6x6} **:**Çubuk özel eksen takımındaki alt rijitlik matrisleri.

Gc **:**Kayma modülü.

GJ **:**Çubuk burulma rijitliği.

[$C]_{ixjx}$ **:**Çubuk sistem eksen takımındaki alt rijitlik matrisleri.

X,Y,Z (1,2,3) **:**Ortak sistem eksen takımı.

l_y, m_y, n_y :X,Y,Z eksenlerinin Y çubuk eksenine göre doğrultu cosinüsleri.

Tr :Kesitin burulma taşıma gücü.

A_{ot} :Burulma için kesitteki etriye kesit alanı.

A_e :Köşe çubuk merkezlerini birleştiren sınır içinde kalan alan.

f_{ywd} :Hesapta kullanılacak etriye akma dayanımı.

$[\phi]$:Ortak sistem eksen takımında, moment taşıma gücünü aşan düğüm noktalarındaki plastik şekildeğiştirme parametresi.

$[S_{d\phi}]$:Ortak sistem eksen takımında plastikleşmenin oluştuğu düğüm noktasında plastikleşmeye neden olan momente paralel dönme yerdeğiştirme parametresinin birim değerinden dolayı çubuk elemanın düğüm noktalarında oluşan ilave uç kuvvetleri matrisidir.

$[S_{\phi d}]$:Ortak sistem eksen takımında dış yüksüz sistemde plastik şekildeğiştirmeler sıfır iken yalnız düğüm noktalarının yer değiştirme bileşenlerinden dolayı plastikleşen düğüm noktalarında oluşan uç kuvvetleri matrisi.

$[S_{\phi\phi}]$:m adet plastikleşen düğüm noktası için mxn boyutunda kare matris. Bu matrisin k sayılı kolonu dış yüksüz sistemde düğüm noktalarının yer değiştirme bileşenleri sıfır iken k sayılı plastikleşen düğüm noktasındaki plastik şekildeğiştirme parametresinin birim değeri için tüm plastik kesitlerdeki iç kuvvet değişimini göstermektedir.

$[\phi]_{ij}$:IJ çubuğu üzerindeki plastik kesitlere ait bilinmeyen ilave ϕ_k plastik şekildeğişitrme parametreleri.

$[EK_{1\phi}]$:Ortak sistem eksen takımında IJ çubuğunda oluşan plastik kesitlerden dolayı elemanın I düğüm noktasında oluşan ilave uç kuvvetleri matrisi.

$[EK_{2\phi}]$:Ortak sistem eksen takımında IJ çubuğunda oluşan plastik kesitlerden dolayı elemanın J düğüm noktasında oluşan ilave uç kuvvetleri matrisi.

$E_{eş}$:Eşdeğer elastisite modülü.

t :Perde kalınlığı.

ρ :Donatı oranı.

$\max \phi$:Çubuklarda eğilmeden dolayı plastik kesit dönme kapasitesi.

L_p :Plastik bölge uzunluğu.

M_x, M_z :Çubuk eksen takımında x ve z eksenleri etrafında eğilme momentleri.

M_{xp}, M_{zp} :Çubuk eksen takımında x ve z eksenleri etrafında basit eğilme halinde moment taşıma gücü.

N_p :Çubuk eksen takımında y ekseni boyunca basit çekme – basınç normal kuvvet taşıma gücü..

N :Çubuk eksen takımında y ekseni boyunca çekme – basınç normal kuvveti.

τ :Kayma gerilmesi.

T :Burulma momenti.

T_{cr} :Burulma momenti etkisi altında eğik çatlama dayanımı.

F_{ctk} :Beton çekme dayanımı.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Konu

Literatürde, çok katlı yapıların malzeme bakımından lineer olmayan davranışının dikkate alındığı çalışmaların genellikle çubuk elemanlar üzerine yapıldığı, perde elemanların da çubuk elemanlara dönüştürülerek idealleştirildiği görülmüştür.

Çubuk elemanlarda, lineer olmayan şekildeğiştirmelerin yayılı olmadığı, plastik mafsal denilen belirli kesitlerde toplandığını kabul eden plastik mafsal hipotezine göre çözüm üretilmektedir. Büyük perdelerin veya U, L, V , T şeklindeki perdelerin tek bir çubuk eleman olarak alınması uygun olmayıp, perdelerin bölge bölge akma sınırına eriştiğinin kabulü uygun olacaktır.

Malzemenin doğrusal olmayan davranışının göz önüne alındığı elasto plastik teoriye göre yapılan çözümlerde, malzemenin lineer elastik sınırdan sonraki taşıma kapasitesinden yararlanılmaktadır.

Çok katlı yapılarda döşemelerin kendi düzlemleri içinde rijit kabul edilmesi, bilinmeyen sayısını azalttığından hesabı kolaylaştırmaktadır.

1.2. Konu İle İlgili Çalışmalar

Yapılan incelemeler sonucunda, sonlu elemanlar üzerine çok sayıda çalışma yapılmış olduğu, plastikleşme ile ilgili çalışmaların genellikle çubuk elemanlar için yapıldığı, perde elemanlar için ise genellikle deneysel çalışmalar yapıldığı, perdelerin çubuk elemanlardan oluşacak şekilde idealleştirildiği görülmüştür. Plastikleşme ve sonlu elemanlar ile ilgili olarak yakın zamanda yapılan çalışmaların bazıları burada sunulmuştur.

Kaynak [1] de, kutu kesitli doğru ve eğri eksenli kirişlerin dış yükler, düzgün ve farklı sıcaklık değişmeleri, ilk germe etkileri altında, statik ve dinamik hesabına uygulanmak üzere yeni bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Doğru eksenli sistemlere uygulanacak dikdörtgen plak eleman üzerinde, elemanın serbestlik dereceleri ve bunların birim değerinde yerdeğiştirme bileşenlerinin yayılış

fonksiyonları teorik hesaplarda yapılan basit kabuller ile belirlenmiş, sabit kalınlıklı elemanda rijitlik matrisi integre edilip tablolar halinde verilmiştir. Dairesel eksenli eğrisel elemanlar için benzer işlemler yapılmış kalınlığın en kesit doğrultusunda değişken olabileceği göz önüne alınmıştır. Çeşitli dış yük yayılışları, düzgün ve farklı sıcaklık değişimleri ve ilk germe kuvvetlerini belirleyen yükleme matrisleri ile dinamik hesap için gerekli kütle matrisleri belirlenmiştir. Konu ile ilgili bilgisayar programı geliştirilerek örnek uygulamalar yapılmıştır.

Kaynak [2] de, betonarme uzay çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yükün hesabı ve göçme güvenliğinin belirlenebilmesi için geliştirilen bir yük artımı yöntemi kullanılmıştır. Düşey yükler belli olduğundan büyük ölçüde denge denklemlerine bağlı olan normal kuvvetler başlangıçta tahmin edilmekte, böylece geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi lineerleştirilmektedir. Akma koşulları lineerleştirildiğinden, iç kuvvet durumunun akma yüzeyi üzerinde kaldığını ifade eden akma koşulu denklemleri de lineer denklemlere dönüştürülmüştür. Böylece her plastik kesitin meydana geldiği yük parametresi ardışık yaklaşıma gerek kalmadan doğrudan hesaplanabilmiştir. ϕ plastikleşme parametresinin unsurları olarak, ϕ 'nin belirli katsayıları olan ϕ_x, ϕ_z ve Δ tanımlanmıştır. Plastikleşmeden dolayı [SS] sistem rijitlik matrisine ilave edilmesi gereken ilave Uç kuvvetleri ϕ cinsinden ifade edilmektedir. Konu ile ilgili bilgisayar programı geliştirilerek örnek uygulamalar yapılmıştır.

Kaynak [3] de, çelik düzlem çerçevelerde ikinci mertebe limit yükün hesabı için genel bir yük artımı yöntemi geliştirilmiştir. Malzemenin elasto-plastik davranışının ve geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin göz önüne alındığı bu çalışmada plastik kesit kavramı önerilmekte, böylece basit eğilme etkisindeki elemanlar için uygulanabilen plastik mafsal hipotezi bileşik iç kuvvet durumunu da kapsayacak şekilde genişletilmektedir. Yöntemde sabit düşey yükler ve artan yatay yükler altında hesap yapılması öngörüldüğünden, düşey yüklere bağlı olarak hesaplanan normal kuvvetler için ikinci mertebe etkileri lineerleştirilmektedir. Ayrıca her plastik kesitin oluşumundan sonra o kesitteki plastik dönme yeni bir bilinmeyen olarak alınmakta ve plastik kesitteki akma koşulunu ifade eden yeni bir denklem, denklem takımına ilave edilmektedir. Böylece, her yük artımında denklem takımının yeniden kurulup çözülmesine gerek kalmadan, yeni bilinmeyene ait satır ve kolonun indirgenmesi suretiyle çözüme ulaşılmıştır.

Kaynak [4] de, malzeme ve geometri değişimi bakımından lineer olmayan uzay çubuk sistemlerin ikinci mertebe elasto-plastik hesabı, limit yüklerin bulunması ve göçme güvenliğinin tayini için bir yük artımı yöntemi geliştirilmiştir. Normal kuvvetler başlangıçta tahmin edilerek geometri değişimlerinin denge denklemlerine olan etkisi lineerleştirilmiş, dikdörtgen kutu kesitler ve benzeri kesitler için düzlemlerden oluşacak şekilde idealleştirilmiş üç boyutlu bir akma şartı önerilmiş, plastikleşen kesitlerdeki iç kuvvet durumunun akma yüzeyi üzerinde kaldığı ifade edilmiştir. Akma yüzeyinin düzlemlerden oluşacak şekilde idealleştirilmesi suretiyle akma şartı olarak tanımlanan denklemler lineerleştirilmiş ve böylece her plastik kesitin meydana geldiği yük parametresi ardışık yaklaşıma gerek kalmadan hesaplanmıştır. Konu ile ilgili bilgisayar programı yazılarak örnek uygulamalar yapılmıştır.

Kaynak [5] de, sismik titreşimlere maruz üç boyutlu betonarme perde çerçeve sistemlerin plastik şekildeğiştirmelerine dayalı rijitlik ve mukavemet azalmasını dikkate alan doğrusal olmayan stokastik çözümleri irdelemiş ve farklı karakteristiklere sahip depremler altında sayısal örnekler çözülmüştür. Taşıyıcı sistemi oluşturan betonarme perdelere Takayanagi 'nin deneysel sonuçlarından elde edilen model kullanılmıştır. Çubuk elemanlarda sabit elastisite modülü kabulü yapılmasına rağmen düşeyde gerilmelerin artmasıyla elastisite modülünün değişimini göz önüne alabilmek için, düşeyde perde kendi içinde elastisite modülü sabit belirli sayıda elemanlara bölünmüştür. Normal katlarda bölünen parça sayısı n=4 olarak alınmış, en alt katta hızlı iç kuvvet değişimi nedeni ile n=10 değerine kadar arttırılmıştır. Her perde parçasının rijitlik matrisi, eğilme ve kayma şekildeğiştirmelerinin etkileri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Tek tek rijitlik matrisleri üretildikten sonra kat için tüm serbestlik derecelerini barındıran eleman rijitlik matrisi oluşturulmuştur. Daha sonra kat perdesinin alt ve üst düğüm noktalarındaki altışar adet yerdeğiştirmeye denk düşecek şekilde yoğunlaştırılmış rijitlik matrisi elde edilmiştir. Perde elemanlarının yıkıcı deprem etkileri altında doğrusal olmayan davranışı iki modelle ele alınmıştır. Bunlardan birisi başlangıca yönelik histerik model ve diğeri perde parçalarının eğilme rijitliklerinin zaman adımında değişen değerleri Roufaiel- Meyer tarafından oluşturulmuş moment eğrilik ifadesinden elde edilmek sureti ile rijitlik matrisindeki yerine konulmuştur.

Kaynak [6] da, betonarme perdelerin sonlu elemanlar yöntemiyle lineer olmayan hesabı yapılırken betonun lineer olmayan davranışı yapılmış bir deneysel çalışmadaki bulgulara göre dikkate alınmakta, çeliğin gerilme şekildeğiştirme bağıntısı ise üç doğru ile idealleştirilmektedir. Beton 8 düğüm noktalı dikdörtgen levha elemanlarla, donatı bu elemanların düşey ve yatay arıtlarında toplanıp 3 noktalı çubuk elemanlarla idealize edilmektedir. Lineer olmayan hesap düzeninin ayrıntıları için birinci yazarın doktora tezi referans verilirken, elde edilen sayısal sonuçların deney sonuçları ile büyük ölçüde uyuştuğu belirtilmektedir. Makalede sabit düşey ve artan yatay yükler altında, perdenin yatay yük taşıma kapasitesinin değişiminde perde yüksekliğinin genişliğine oranı, düşey gerilme şiddetinin etkisi, başlık ve gövde bölgelerindeki boyuna ve enine donatının farklı pursantajlarının etkisi irdelenmektedir.

Kaynak [7] de, Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley 'de deneysel test için yüklenen iki perde örneği düzlem gerilmeli izoparametrik sonlu elemanlardan oluşan ADINA lineer olmayan sonlu eleman beton malzemeli model kullanılarak modellendirilmiştir. Kuvvet yerdeğiştirme sonuçlarının deneysel data ile iyi korrelasyon gösterdiği, modellerin monoton olarak artan statik yüklerle yüklendiği, hesaplarda perdelerde mevcut yerdeğiştirme sünekliğinin dikkate alındığı, belirtilmiştir. Burada beton 8 noktalı izoparametrik dikdörtgen levha elemanlar, donatılar ayrıtlarda toplanmış çubuk elemanlarla idealize edilmiştir. Başlık bölgelerindeki elemanlarla sargılı beton için yüksek düktiliteye sahip, gövde bölgesindeki sargısız beton için çok düşük düktiliteye sahip farklı gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları tanımlanmış, çelik için iki eğimli pekleşen elasto-plastik bağıntı kabul edilmiştir. Yatay yükle yüklü alttan konsol perde modeli üzerinde deneysel ve sayısal çözümler karşılaştırılmıştır.

Kaynak [8] de, önce elasto- plastik malzeme kabulü altında gerilme ve şekildeğiştirmelerdeki artımları birbirine bağlayan elasto-plastik matris, öngörülen akma koşuluna bağlı olarak ifade edilmektedir. Yüke küçük artımlar verilerek sonuca gidilen yöntemde, her yük artımında başlangıç gerilmesi adi verilen hesap yöntemi uygulanarak, akma yüzeyine ulaşılma koşulu tahkik edilip, gerilmeler akma yüzeyi üzerinde kalırken şekildeğiştirmelerin akma yüzeyine dikliği koşulu ardışık yaklaşımla sağlanmaktadır.

Ardışık yaklaşımlarda başlangıç elastik sistem rijitlik matrisi değişmediğinden ek yükler için çözüm söz konusudur. Çok sayıda örnek üzerinde yöntemin geçerliliği ve yakınsaklığı irdelenmiştir.

Kaynak [9] da, sonlu eleman yerdeğiştirme metodu kullanılarak ince ve kalın anizotropik plak ve kabukların elasto plastik analizi yapılmıştır. Kesme şekildeğiştirmesini göz önüne alan kalın bir kabuk formülasyonu düşünülmüştür. İzoparametrik elemanların ince kabuk ve plaklarda uygun sonuç vermesi için kalınlık boyunca azaltılmış integral sayısı ve bir kesme kuvveti düzeltme katsayısı kullanılmıştır. Elasto plastik hesap yapılırken Huber-Misses' in izotrop malzeme için verilmiş akma hipotezinin ortotrop malzemeler için genelleştirilmiş hali akma fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Yük artımları için adım adım hesap yapılırken, her adımda lineer-olmayan denklem sisteminin çözümünde Newton- Raphson benzeri bir ardışık yaklaşım yöntemi uygulanmıştır.

Kaynak [10] da, sonlu eleman yönteminin betonarmede uygulanması konu edilmiştir. Betonarme plakların doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir. Plağı düzlem gerilme durumundaki levhaların üst üste birleştirilmesi olarak kabul eden çözüm yöntemi kullanılarak donatının sonlu eleman üzerinde yayılı olduğu ve donatı ile beton arasındaki aderansın tam olduğu kabul edilmiştir. Oluşan çatlak şekilleri her tabaka ve Gauss noktası dikkate alınarak verilmiştir.

Kaynak [11] de, W. Xucheng ve W. Xiaoning tarafından malzemelerin elastoplastik davranışını dikkate alırken çift eğimli pekleşen ideal elasto- plastik malzeme kabulünden hareket edilirse sonlu elemanlarla elasto- plastik hesabını önemli ölçüde basitleştirilebileceği gösterilmektedir. Yüklere küçük artımlar verip ve her yük seviyesi için eleman rijitlik matrisini yeniden kurmadan, başlangıç şekildeğiştirme veya başlangıç gerilmesi yöntemlerinden birini uygulayıp lineer elastik katsayılar matrisini değiştirmeden ardışık yaklaşımlarla sonuca gidilmektedir.

Kaynak [12] de, çelik elemanların kesitlerinde, özellikle plastik mafsal hipotezi uygulanırken zayıf eksen etrafmda eğilme momenti ile normal kuvvetin karşıhkh etkileşiminde, akma koşulunda değişiklik önerilmektedir.

Kaynak [13] de, deprem gibi ekstrem yüklerin neden olduğu büyük elastik olmayan şekildeğiştirmeler için plastik mafsal davranışının gerçeğe yakın değerlendirilmesinin, betonarme çerçeveli yapıların en büyük kalıcı şekildeğiştirme

kapasitesinin belirlenmesinde önemli rol oynadığı belirtilmiştir. Deneysel çalışmalarda betonarme kesitlerin basınç bölgelerinde çoğunlukla boyuna donatı burkulmasının ortaya çıkmasına karşın, bu hususun genel olarak plastik mafsal oluşan kesitlerde taşıma kapasitesi tayin edilirken dikkate alınmadığı belirtilmektedir. Basınç donatısındaki ikinci mertebe etkiler nedeniyle boyuna donatıların basınç kuvveti taşıma kapasitelerindeki azalmayı öngören bir hesap yöntemi bu çalışmada önerilmektedir.

Kaynak [14] de, betonarme çubuk sistemlerde çubuk rijitlik matrisleri malzemenin elasto-plastik davranışını dikkate alarak, akma yüzeyinin tanım fonksiyonlarından hareketle hesaplanmaktadır.

Kaynak [15] de, perde düzlemine dik bağ kirişlerinin perdelere saplandığı noktalarda, bu kirişlerin vereceği perde zayıf ekseni etrafındaki momentlerin bütün perde genişliğince sabit kabul edilemeyeceği, kirisin saplandığı nokta civarında yığılan uzaklaştıkça sönen eğilme momentleri ortaya çıkacağından hareketle, bu tür birleşimlerin olduğu noktalarda perdenin zayıf ekseni etrafında dönme redörleri bulunurken çalışan efektif bir perde genişliği tanımlanmaktadır. Bağ kirişi genişliğinin perde genişliğine oranı ile perde genişliğinin ardışık iki bağ kirişi arası mesafeye yani kat yüksekliğine oranına bağlı olarak bu efektif genişlik formüle edilmektedir. Efektif genişliğin toplam perde genişliğine oranı kadar olan perdenin zayıf ekseni etrafındaki dönme redörü azalmasının sistem rijitlik matrisindeki etkisi, bu çalışmada perde düzlemine dik bağlanan bağ kirişlerinin uçlarına dönmeye karşı elastik birleşimler konularak dikkate alınmıştır. Dönmeye karşı elastik birleşimlerin yay katsayıları yani dönme redörleri çalışan efektif perde genişliğinden hareket ederek formüle edilmiştir. Seçilmiş örneğin sayısal çözümleri yapılarak bu dönmeye karşı elastik birleşimlerin alınıp, alınmamasının özellikle perde taban momentlerinde önemli farklılıklar yarattığı gösterilmiştir.

1.3. Çalışmanın Amacı Ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, perdelerden, perde-çerçevelerden oluşan, malzeme bakımından lineer olmayan yapı sistemlerinin çözümü için ve kat seviyelerinde tek eleman olarak bölmeden veya bölerek kullanılabilecek böylece de bilinmeyen sayısını azaltacak nitelikte yeni bir perde sonlu eleman modeli geliştirmek, geliştirilen sonlu perde elemanın rijitlik matrisi yardımı ile plastikleşmeye ait ilave terimleri bulmak, plastikleşen sistemin çözümünü yeni bir yük artımı yöntemi ile yapmaktır.

Ayrıca, özel durumlarda anlatıldığı gibi, simetri veya antimetriden dolayı aynı yük parametresinde birden fazla plastikleşme oluşabileceği göz önüne alınarak, simetrik plastikleşme durumunda, her bir plastikleşen düğüm noktası için ayrı ayrı satır ve sütun ekleyerek bilinmeyen sayısını arttırmak yerine, mutlak değerce birbirine eşit plastikleşme parametreleri için sadece bir kolon ve sütun eklenerek bilinmeyen sayısı azaltılabilmektedir.

Düşey yükler için yük katsayısı [16] da yatay yük etkisi altındaki yük katsayıları göz önüne alınarak 1.0 alınmış, yatay yüklerin ise orantılı olarak arttığı kabul edilmiştir.

Perde elemanlarda plastikleşmenin düşey doğrultudaki şekildeğiştirme bileşeninin ε_e elastik şekildeğiştirme sınırına erişmesinden , çubuk elemanlarda ise eğilme veya burulma momentinin kesitin taşıma gücüne erişmesinden dolayı oluştuğu kabul edilmiştir.

Perdelerden oluşan, plastikleşen sistemin hesabında izlenen yol, plastikleşmenin oluştuğu, diğer bir deyişle ε_e elastik şekildeğiştirme sınırına ulaşan perde düğüm noktalarının birim düşey yerdeğiştirmesi nedeni ile ait olduğu sonlu elemanın düğüm noktalarında ve plastikleşen düğüm noktalarında düşey yerdeğiştirme doğrultusunda oluşan uç kuvvetleri, plastikleşme parametresi olarak isimlendirilen Δ düşey yerdeğiştirme değerini bulmak üzere sistem rijitlik matrisine ilave satır ve sütun olarak eklenir. Çözümü yapılan sistem lineer bir sistemdir.

Çubuk elemanlarda plastikleşme için, yine plastikleşme parametresi olarak isimlendirilen dönme yerdeğiştirme parametresinin birim değeri için ait olduğu çubuk elemanın düğüm noktalarında ve plastikleşen düğüm noktalarında oluşan uç

kuvvetleri, plastikleşme parametresini bulmak üzere sistem rijitlik matrisine ilave satır ve sütun olarak eklenir. Çözümü yapılan sistem lineer bir sistemdir.

Plastikleşmenin sadece mesnetlerde oluşabileceği sistemlerde bu yöntem yerine, sistem rijitlik matrisi her seferinde yeniden kurulup, plastikleşen mesnet düğüm noktalarında düşey yerdeğiştirme serbest bırakılarak, diğer bir deyişle ona ait satır ve sütun silinmeyerek lineer çözüm tekrarlanır. Perde elemanlarda plastikleşen mesnetlerde hesap sonucu çıkan ilave düşey yerdeğiştirme değeri, plastikleşme parametresi olacaktır. Ancak bu çözüm plastikleşmenin mesnet düğüm noktaları dışında başka düğüm noktalarında oluşabileceği sistemler için, denklem takımında birbirinin aynı olan satır ve sütunlar nedeni ile çözüm vermeyeceğinden, bu çalışmada yukarıda açıklanan yöntemin kullanılması gerekmektedir.

Geliştirilen sonlu perde eleman ve doğru eksenli prizmatik çubuklardan oluşan perde- çerçeveli sistemlerin lineer hesabı ve perdenin elasto plastik davranışı ile göçme yük parametresinin hesabı için Fortran programlama dilinde, bilgisayar programı yazılmıştır. Bu program yardımı ile örnek çözümler yapılmıştır. Hesap adımlarında, sistem rijitlik matrisi, sadece ilk adımda indirgenmekte, diğer adımlarda ilave edilen terimlerin indirgeme işlemi yapılarak yeni plastikleşen sistem çözülmektedir.

Geliştirilen perde sonlu elemanın planda yatayla farklı açılar yapabileceği göz önüne alınmıştır. Geliştirilen perde sonlu eleman kullanılarak, uzayda, çok katlı, kat seviyesinde rijit hareket yaptığı kabul edilen perdeli, perde-çerçeveli yapı sistemlerinin çözümü yapılarak, göçmeye karşı güvenlikleri yük artımı yöntemi ile belirlenmektedir.

BÖLÜM 2. PERDE SONLU ELEMAN MODELİ

Bu bölümde, çok katlı bir yapının taşıyıcı sisteminde yer alan perdelerin, kat aralarında düşey doğrultuda çok sayıda elemana bölünmeye gerek bırakmadan uygun sonuç verebilecek şekilde modellenmesine yönelik, düzlemi içinde ve düzlemine dik kuvvetler etkisi altındaki, düşey dikdörtgen bir sonlu eleman geliştirilecektir.

2.1. Kabuller

Geliştirilecek olan sonlu elemana ait kabulleri şu şekilde sıralayabiliriz:

a) Her düğüm noktasında 6 yerdeğiştirme parametresi olmak üzere toplam 24 serbestlik derecesi bulunur.

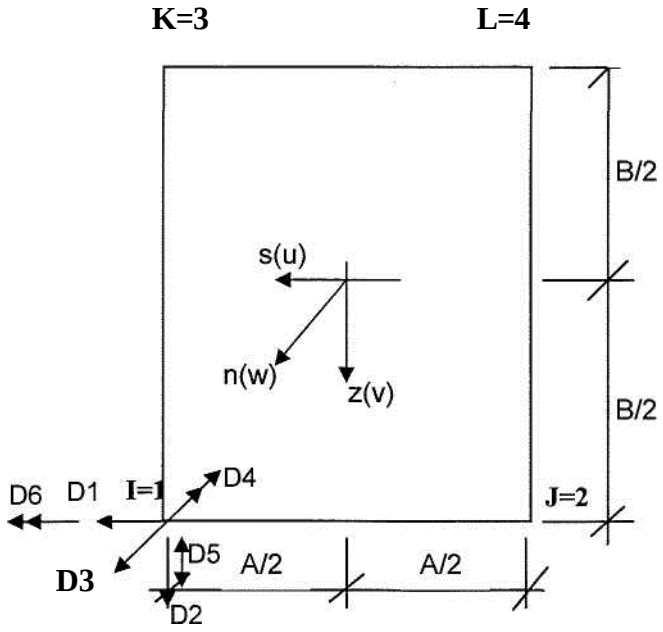
b) Yerdeğiştirme fonksiyonlarının seçiminde, kat döşemelerinin düzlemleri içinde rijit harekete neden olduğu göz önüne alınıp yatayda (s doğrultusunda) lineer, kat yüksekliği boyunca (z doğrultusunda) kübik değişim, kabulü yapılmıştır.

2.2. Perde Elemana Ait Eksen Takımı, Uç Kuvvetler, Yerdeğiştirme Parametreleri

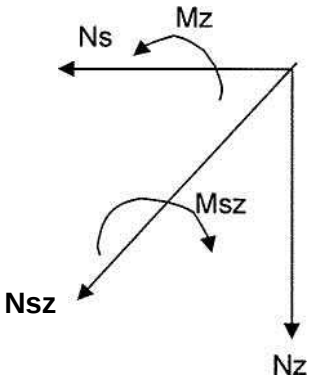
Şekil 2.1.a'da eleman, boyutları, eksen takımı, düğüm noktası yerdeğiştirme parametreleri gösterilmiştir. Düğüm noktası uç kuvvetleri de düğüm noktası yerdeğiştirme parametreleri gibi aynı doğrultu ve yönde seçilmiş olup, Şekil 2.1.b'de gösterilmiştir.

Burada s ve z eleman düzlemi içindeki eksenler olup bu doğrultulardaki yerdeğiştirme bileşenleri u ve v dir. n ise eleman düzlemine dik eksen olup bu doğrultudaki yerdeğiştirme bileşeni w dir.

Düğüm noktaları yerdeğiştirme parametrelerinin alt alta yazılması ile oluşan kolon matris $[d]_i$ ve eleman tüm serbestliklerinin matris formunda ifadesi [d] ; (i=l,…4)



Şekil 2.1.a. Sonlu eleman, boyutları, eksen takımı, yerdeğiştirme parametreleri.

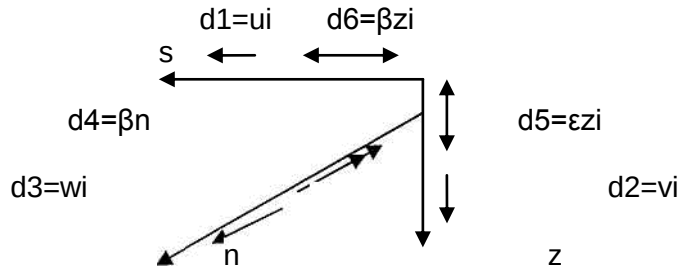


Şekil 2.1.b. Sonlu eleman düğüm noktası iç kuvvetleri.

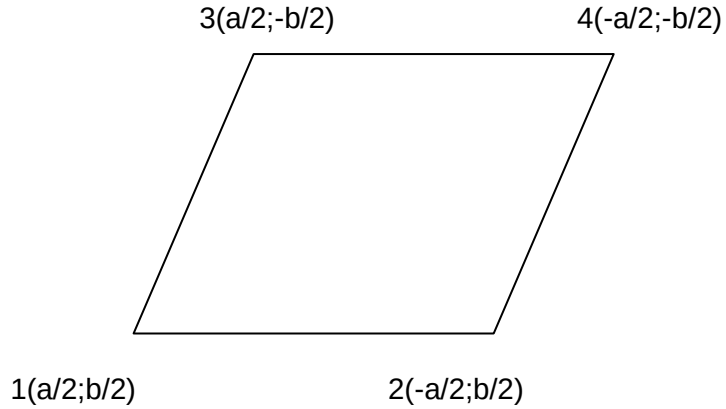
$$[d]_i = \begin{bmatrix} U_i \\ V_i \\ W_i \\ \beta n_i = \partial u/\partial z \\ \varepsilon z_i = \partial v/\partial z \\ \beta z_i = \partial w/\partial z \end{bmatrix} \qquad [d] = \begin{bmatrix} [d]_1 \\ [d]_2 \\ [d]_3 \\ [d]_4 \end{bmatrix} \qquad (2.1.)$$

(2.1.)'deki gibi yazılabilir.

Düğüm noktası yerdeğiştirme parametrelerinin pozitif yönleri aşağıda Şekil 2.2.a.'da, numaralanış. sırası ile koordinatları da Şekil 2.2.b.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2.a. Düğüm noktası yerdeğiştirme parametrelerinin pozitif yönleri.



Şekil 2.2.b. Eleman düğüm noktalarının numaralanışı ve koordinatları.

2.3. Perde Elemana Ait Rijitlik ve Gerilme Matrislerinin Hesabı

2.3.1. Yerdeğiştirme bileşenlerinin yayılış fonksiyonları

Yerdeğiştirme fonksiyonlarının seçiminde yapılan kabule göre, kat hizasında (s doğrultusunda) rijit hareket nedeni ile doğrusal değişim, kat yüksekliği boyunca (z doğrultusunda) kübik değişim göz önüne alınarak, yerdeğiştirme fonksiyonları (2.2.) deki şekilde belirlenmiştir.

$$U(s,z)^{=}(a_1'+a_2'.s).(a_1+a_2.z+a_3.z^2+a_4.z^3)$$

$$V(s,z)=(b_1'+b_2'.s).(b_1+b_2.z+b_3.z^2+b_4.z^3) \qquad (2.2)$$

$$W(s,z)= (c_1'+c_2'.s).(c_1+c_2.z+c_3.z^2+c_4.z^3)$$

Serbestlik derecelerinin ayrı ayrı birim değerleri için yerdeğiştirme bileşenlerinin eleman yüzeyinde yayılışını belirleyen şekil fonksiyonları (birim durum fonksiyonları) (2.2.) genel formüllerinde olduğu gibi her iki s ve z değişkenine göre lineer veya kübik fonksiyonların çarpımı şeklindedir. Li(x) lineer değişimi, fi(x) ve gi(x) kübik değişimleri göstermek üzere karşılaşılabilecek bu yardımcı fonksiyonların açık ifadeleri ve sınır şartları Tablo (2.1.) de gösterilmiştir.[1] Elemanda yerdeğiştirme bileşenlerinin (u, v, w) yayılışı eleman serbestliklerine bağlı olarak;

$$[U] = [A_d].[d] \tag{2.3}$$

bağıntısı ile verilebilir. Burada [Ad] matrisinin her kolonu karşı geldiği serbestliğin birim değerinde elemanda yerdeğiştirme bileşenlerinin yayılış fonksiyonlarını göstermektedir.

Li(s) lineer değişimi, fi(z) ve gi(z) sırasıyla uçlardaki birim çökme ve birim dönmelere karşı gelen kübik değişimleri göstermek üzere, [Ad] matrisi bu yardımcı fonksiyonlar ile belirlenir.

Yerdeğiştirme yayılışları için yukarıda açıklanan kabullere göre, s ve z değişkenleri cinsinden yazılmış (Tablo 2.1.) deki yardımcı fonksiyonlar (li, fi, gi) ile belirlenen [Ad] matrisinin transpozesi (Tablo 2.2.) de verilmiştir.

Tablo 2.2. Serbestliklerin birim değerinde elemanda yerdeğiştirme bileşenlerinin yayılış fonksiyonları

$[A_d]^T =$

u	**v**	**w**
$l_1(s).f_1(z)$	0	0
0	$l_1(s).f_1(z)$	0
0	0	$l_1(s).f_1(z)$
$l_1(s).g_1(z)$	0	0
0	$l_1(s).g_1(z)$	0
0	0	$l_1(s).g_1(z)$
$l_2(s).f_1(z)$	0	0
0	$l_2(s).f_1(z)$	0
0	0	$l_2(s).f_1(z)$
$l_2(s).g_1(z)$	0	0
0	$l_2(s).g_1(z)$	0
0	0	$l_2(s).g_1(z)$
$l_1(s).f_2(z)$	0	0
0	$l_1(s).f_2(z)$	0
0	0	$l_1(s).f_2(z)$
$l_1(s).g_2(z)$	0	0
0	$l_1(s).g_2(z)$	0
0	0	$l_1(s).g_2(z)$
$l_2(s).f_2(z)$	0	0
0	$l_2(s).f_2(z)$	0
0	0	$l_2(s).f_2(z)$
$l_2(s).g_2(z)$	0	0
0	$l_2(s).g_2(z)$	0
0	0	$l_2(s).g_2(z)$

2.3.2. Şekildeğiştirme matrisinin hesabı

Düzlemsel elemanlarda, deformasyon ve eğriliklerin yerdeğiştirme bileşenleri cinsinden, kartezyen koordinatlardaki ifadeleri klasik elastisite teorisinden şu şekilde yazılmaktadır:

$$\varepsilon s = \partial u / \partial s \qquad \chi s = -\partial^2 w / \partial s^2$$

$$\varepsilon z = \partial v / \partial z \qquad \chi z = -\partial^2 w / \partial z^2 \qquad (2.4.)$$

$$\gamma sz = \partial v / \partial s + \partial u / \partial z \qquad \tau = -\partial^2 w / \partial s \partial z$$

Yerdeğiştirme parametrelerinin s doğrultusunda değişimi lineer olduğundan ikinci türev sıfırdır. Dolayısı ile $\chi s=0$. çıkar. Elemanın herhangi bir noktasındaki şekildeğiştirmeler ve yerdeğiştirmeler arasındaki bağıntı matris formunda:

$$\left[\varepsilon\right]=\begin{bmatrix}\varepsilon s\\ \varepsilon z\\ \gamma sz\\ \chi z\\ 2\tau\end{bmatrix}=\left[\partial\right]\cdot\left[U\right]=\begin{bmatrix}\partial/\partial s & 0 & 0\\ 0 & \partial/\partial z & 0\\ \partial/\partial z & \partial/\partial s & 0\\ 0 & 0 & -\partial^2/\partial z^2\\ 0 & 0 & -2\partial^2/\partial s\partial z\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}u\\ v\\ w\end{bmatrix} \tag{2.5.}$$

şeklinde yazılabilir. Yerdeğiştirme bileşenlerinin yerine (2.3.) formülündeki ifadeler yazılırsa,

$$\left[\varepsilon\right]=\left[\partial\right]\cdot\left[U\right] \tag{2.6.a.}$$

$$\left[\varepsilon\right]=\left[\partial\right]\cdot\left[Ad\right]\cdot\left[d\right]=\left[B\right]\cdot\left[d\right] \tag{2.6.b}$$

elde edilir. Burada [B] matrisinin her bir kolonu birim yerdeğiştirme durumlarında göz önüne alınan şekildeğiştirme bileşenlerinin eleman üzerinde yayılışını göstermektedir. 5 satır ve 24 sütunlu [B] matrisinin 5x6 boyutundaki alt matrisleri (2.7.) de gösterilmiştir.

$$\left[B\right]=\left[\left[B\right]_1\left[B\right]_2\left[B\right]_3\left[B\right]_4\right]^T \tag{2.7.}$$

Özel olarak [B] matrisinde s ve z değişkenlerine düğüm noktalarının koordinatları yazılırsa, düğüm noktalarında birim durumlara karşı gelen şekildeğiştirme bileşenleri bulunabilir. $[\varepsilon_d]$ kolon matrisinin sırasıyla düğüm noktaları şekildeğiştirme matrislerinin alt alta yazılmasından oluştuğu tanımlanırsa,

$$\left[\varepsilon_d\right]=\left[B_d\right]\cdot\left[d\right] \tag{2.8.a.}$$

$$\left[B_d\right]=\left[\left[B_d\right]_1\left[B_d\right]_2\left[B_d\right]_3\left[B_d\right]_4\right]^T \tag{2.8.b.}$$

yazılabilir. Burada $[B_d]$ 20 satır ve 24 kolonlu bir matris olacaktır. Tablo 2.2. de verilen yerdeğiştirme fonksiyonlarından hareket ederek, $[B_d]$ matrisi hesaplanır.

2.3.3. Düğüm noktalarına ait iç kuvvetler (gerilme) matrisinin tanımı

Sonlu elemanın herhangi bir noktasındaki iç kuvvetler matris formunda (2.9.) şeklinde yazılabilir.

$$[N] = \begin{bmatrix} Ns \\ Nz \\ Nsz \\ Mz \\ Msz \end{bmatrix} \tag{2.9.}$$

Lineer elastik malzeme kabulü ile bu iç kuvvetler o noktadaki şekildeğiştirme bileşenlerine bağlı olarak:

$$[N] = [D] \cdot [[\varepsilon] - [\varepsilon_t]] \tag{2.10.}$$

şeklinde yazılabilir. Burada [et] eğer varsa, sistemdeki düzgün veya farklı sıcaklık değişiminden kaynaklanan şekildeğiştirmeleri göstermektedir.

Elastisite matrisinin düğüm noktalarında bulunan şekildeğiştirmeler ile yapılarak, bu noktalardaki iç kuvvetler yerdeğiştirme parametrelerine bağlı olarak bulunur.

2.3.4. [D] Elastisite matrisinin belirlenmesi

[D] elastisite matrisi izotrop malzeme kabulüne göre tanımlanacaktır. [17]

$$[D] = \begin{bmatrix} C \cdot \begin{bmatrix} 1 & \upsilon & 0 \\ \upsilon & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\upsilon)/2 \end{bmatrix} & [0] \\ [0] & D \cdot \begin{bmatrix} 1 & \upsilon & 0 \\ \upsilon & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\upsilon)/2 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \tag{2.11.}$$

$\chi s=0$ olduğundan 4. satır ve sütun silinerek 5x5 boyutunda elastisite matrisi elde edilir. Burada belirtilen C ve D katsayıları:

$$C = E \cdot h/(1-\upsilon^2) \qquad D = E \cdot h^3/12 \cdot (1-\upsilon^2) \tag{2.12.}$$

şeklinde olup, [D] elastisite matrisi izotrop malzeme için,

$$[D] = E \cdot h/(1-\upsilon^2) \cdot \begin{bmatrix} 1 & \upsilon & 0 & 0 & 0 \\ \upsilon & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\upsilon)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h^2/12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h^2(1-\upsilon)/24 \end{bmatrix} \quad (2.13.)$$

şeklini alır.

2.3.5. Eleman bağımsız alt rijitlik matrislerinin hesabı

Dengede olan bir cismin, herhangi bir yer ve şekildeğiştirmesinde iç kuvvetlerin işi dış kuvvetlerin işine eşittir. Virtüel iş teoremine göre, sisteme etkiyen dış etkileri ve bunların sonucu oluşan iç kuvvetleri yükleme durumu, her serbestliğin birim değeri için sistemin şekildeğiştirmesini virtüel deplasman durumu olarak alıp, iç kuvvetlerin işini dış kuvvetlerin işine eşitlersek, i nci serbestlik için,

$$\iint [\varepsilon]_i^T \cdot [D] \cdot [[\varepsilon] - [\varepsilon_t]] \cdot dA = \iint [U]_i^T \cdot [q] \cdot dA \quad (2.14.)$$

elde edilir. Bu formülde:

[q] :Sisteme etkiyen dış yükleri,

[ε] :Dış etkiler altında sistemin bir noktasında oluşacak şekildeğiştirme bileşenlerini,

[ε_t] :Eğer varsa, sistemdeki sıcaklık değişiminden kaynaklanan şekildeğiştirme bileşenlerini ve

[Ui] :i. serbestlik derecesinin birim değerinde sistemde oluşacak yerdeğiştirme bileşenlerinin yayılışını göstermektedir.

Sistemin dış etkiler altındaki denge durumunun toplam N adet serbestlik derecesine karşı gelen birim durumların lineer kombinezonu olduğu kabulü ile, yukarıdaki (2.14.) denklemi aşağıdaki şekle dönüşür:

$$[\varepsilon] = \sum_{j=1}^{N} [\partial] \cdot [U]_j \cdot d_j = \sum_{j=1}^{N} [\varepsilon]_j \cdot d_j \quad (2.15.)$$

$$\sum_{j=1}^{N} d_j \cdot \iint [\varepsilon]_i^T \cdot [D] \cdot [\varepsilon]_j \, dA = \iint [U]_i^T \cdot [q] \cdot dA + \iint [\varepsilon]_l^T \cdot [D] \cdot dA \qquad (2.16.a.)$$

Bu formülde aşağıdaki kısaltmaları yaparak,

$$kij = \iint [\varepsilon]_i^T \cdot [D] \cdot [\varepsilon]_j \cdot dA = \iint [\varepsilon]_i^T \cdot [N]_j \cdot dA \qquad (2.16.b.)$$

$$pi, o = \iint [U]_i^T \cdot [q] \cdot dA$$

$$pi, t = \iint [\varepsilon]_l^T \cdot [D] \cdot [\varepsilon_t] \cdot dA$$

$$\sum_{j=1}^{N} kij \cdot d_j = pi, o + pi, t \qquad (2.17.)$$

bulunur. Sistemin her serbestlik değerinin birim durumuna karşı gelen eşitlikler matris formunda yazılırsa,

$$[K] \cdot [d] = [P]o + [P]t \qquad (2.18.)$$

denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımında, [K] sistem rijitlik matrisini, [d] serbestlik değerlerinin alt alta yazılması ile oluşan bilinmeyenler kolon matrisini, [P]o dış yüklere ait kolon yükleme matrisini, [P]t sıcaklık değişimine karşı gelen sabitler matrisini göstermektedir. [17, 18, 19]

Yukarıda açıklanan virtüel iş teoremine dayanarak elde edilen iş ifadeleri (eleman rijitlik, yükleme ve sıcaklık değişimi matrisleri), sistemi oluşturan bütün sonlu elemanlar için ayrı ayrı hesaplanacak, sisteme ait olan rijitlik, yükleme ve sıcaklık değişimi matrisleri, matris yerdeğiştirme yöntemi ile toplanıp yukarıda ifade edilen (2.18.) denklem takımı elde edilecektir.

Eleman rijitlik matrisinin satır ve sütun sayısı eleman yerdeğiştirme parametresi sayısına eşit bir kare matris olacaktır. Bu matrisin herhangi bir kij terimi, j birim durumuna ait iç kuvvetlerin i birim durumundaki şekildeğiştirmelerde yaptığı iş olarak tanımlanabilir. Buna göre eleman rijitlik matrisi matris formunda, birim yerdeğiştirme parametrelerine karşılık gelen şekildeğiştirmeler,

$$[\varepsilon] = [B] \qquad (2.19.)$$

olmak üzere,

$[K] = \iint [\varepsilon]^T \cdot [D] \cdot [\varepsilon] \cdot dA$ ifadesinde yerine konulursa,

$$[K] = \iint [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot dA = \iint [[\partial] \cdot [Ad]]^T [D] \cdot [[\partial] \cdot [Ad]] \cdot dA \quad (2.20.a.)$$

$$[K] = \iint [Ad]^T \cdot [\partial]^T \cdot [D] \cdot [\partial] \cdot [Ad] \cdot dA \quad (2.20.b.)$$

yazılabilir.

2.3.5.1. Geliştirilen sonlu elemana ait rijitlik matrisinin bulunması

Tablo 2.2. de yer alan, [Ad] matrisinin ifadeleri s ve z değişkenleri cinsinden li, fi, gi yardımcı fonksiyonlarının çarpımı yardımı ile bulunur. Örneğin, [Ad] matrisinin (1,1) elemanı

$l_1(s)=1/2+s/a$

$f_1(z)=l/2+3z/2b-2z^3/b^3$

$l_1(s).f_1(z)=l/4+3z/4b-z^3/b^3+s/2a+3sz/2ab-2sz^3/ab^3$

olarak elde edilir. Buradan $[B]_1$ matrisinin (1,1) terimi,

$[B] = [\partial] \cdot [Ad]$

$\partial / \partial s \cdot (l_1(s) \cdot f_1(z)) = 1/2a + 3z/2ab - 2z^3/ab^3$ bulunur.

$[B]_1$, $[B]_2$, $[B]_3$, $[B]_4$ alt matrislerinin terimleri Tablo 2.3.a. ve 2.3.b.'de verilmiştir. [K] eleman rijitlik matrisi de (2.20.b.) formülü ile her iki doğrultuda ayrı ayrı

Tablo 2.3.a. $[B]_1$ ve $[B]_2$ alt matrisleri

$[B]_1=$

$1/2a+3z/2ab-2z^3/ab^3$	0	0	$-b/8a-z/4a+z^2/2ab+z^3/ab^2$	0	0
0	$3/4b-3z^2/b^3+3s/2ab-6sz^2/ab^3$	0	0	$-1/8+z/2b+3z^2/2b^2-s/4a+sz/ab+3sz^2/ab^2$	0
$3/4b-3z^2/b^3+3s/2ab-6sz7ab^3$	$1/2a+3z/2ab-2z^3/ab^3$	0	$-1/8+z/2b+3z^2/2b^2-s/4a+sz/ab+3sz^2/ab^2$	$-b/8a-z/4a+z^2/2ab+z^3/ab^2$	0
0	0	$6z/b^3+12sz/ab^3$	0	0	$1/2b+3z/b^2+s/ab+6sz/ab^2$
0	0	$-3/2ab+6z^2/ab^3$	0	0	$-1/4a+z/ab+3z^2/ab^2$

$[B]_2=$

$-1/2a-3z/2ab+2z^3/ab^3$	0	0	$b/8a+z/4a-z^A2/2ab-z^3/ab^2$	0	0
0	$3/4b-3z^2/b^3-3s/2ab+6sz^2/ab^3$	0	0	$-1/8+z/2b+3z^2/2b^2+s/4a-sz/ab-3sz^2/ab^2$	0
$3/4b-3z^2/b^3-3s/2ab+6sz^2/ab^3$	$-1/2a-3z/2ab+2z^3/ab^3$	0	$-1/8+z/2b+3z^2/2b^2+s/4a-sz/ab-3sz^2/ab^2$	$b/8a+z/4a-z^2/2ab-z^3/ab^2$	0
0	0	$6z/b^3-12sz/ab^3$	0	0	$1/2b+3z/b^2-s/ab-6sz/ab^2$
0	0	$3/2ab-6z^2/ab^3$	0	0	$1/4a-z/ab-3z^2/ab^2$

Tablo 2.3.b. $[B]_3$ ve $[B]_4$ alt matrisleri

$[B]_3=$

1/2a-3z/2ab+ +2z^3/ab^3	0	0	b/8a-z/4a- ...-z^2/2ab+z^3/ab^2	0	0
0	-3/4b+3z7b^3- ..-3s/2ab+6sz^2/ab^3	0	0	-1/8-z/2b+3z72b^2- ..-s/4a-sz/ab+3sz7ab^2	0
-3/4b+3z7b^3- ..-3s/2ab+6sz^2/ab^3	1/2a-3z/2ab+ +2z^3/ab^3	0	-1/8-z/2b+3z72b^2- ..-s/4a-sz/ab+3sz^2/ab^2	b/8a-z/4a- ...-z^2/2ab+z^3/ab^2	0
0	0	-6z/b^3-12sz/ab^3	0	0	-1/2b+3z/b^2- ...-s/ab+6sz/ab^2
0	0	3/2ab-6z^2/ab^3	0	0	-1/4a-z/ab+ ...+3z7ab^2

$[B]_4=$

-1/2a+3z/2ab- -2z^3/ab^3	0	0	-b/8a+z/4a+ ...+z^2/2ab-z^3/ab^2	0	0
0	-3/4b+3z^{A}2/b^3+ ..+3s/2ab-6sz^2/ab^3	0	0	-1/8-z/2b+3z^2/2b^2+ ..+s/4a+sz/ab-3sz7ab^2	0
-3/4b+3z^2/b^3+ ..+3s/2ab-6sz^2/ab^3	-1/2a+3z/2ab- -2z^3/ab^3	0	-1/8-z/2b+3z^2/2b^2+ ..+s/4a+sz/ab-3sz7ab^2	-b/8a+z/4a+ ...+z^2/2ab-z^3/ab^2	0
0	0	-6z/b^3+12sz/ab^3	0	0	-1/2b+3z/b^2+ ...+s/ab-6sz/ab^2
0	0	-3/2ab+6z^2/ab^3	0	0	1/4a+z/ab- ...-3z7ab^2

integrallerin hesaplanması ile tablolaştırılabilir. Ayrıca eleman rijitlik matrisinin hesabını da simetri özeliklerinden yararlanarak yalnız bazı terimlerin bulunması ve diğerlerinin de dönüştürme formülleri ile bulunması mümkündür. Eleman rijitlik matrisi,

$$[K] = \begin{bmatrix} [K]_{11} & [K]_{12} & [K]_{13} & [K]_{14} \\ [K]_{21} & [K]_{22} & [K]_{23} & [K]_{24} \\ [K]_{31} & [K]_{32} & [K]_{33} & [K]_{34} \\ [K]_{41} & [K]_{42} & [K]_{43} & [K]_{44} \end{bmatrix} \qquad (2.20.c.)$$

şeklinde (6x6) kare alt matrislere ayrılabilir. Buradaki [K]ij alt matrisleri, j düğüm noktası serbestliklerinin birim değerlerinde i düğüm noktasında oluşacak iç kuvvetleri vermektedir.

2.3.5.2. Geliştirilen sonlu elemana ait alt rijitlik matrislerinin hesabında kullanılan dönüştürme matrisleri

Betti karşıtlık teoremi uyarınca rijitlik matrisinin simetri şartından,

$$[K]ij = [K]ji \qquad (2.21.)$$

eşitliği vardır. Bu nedenle matrisin yalnız esas köşegeni üzerindeki alt matrislerin verilmesi yeterlidir.

Ayrıca sonlu elemanın s ve z eksenlerine göre simetrik olmasından dolayı alt matrisler arasında ilave bağıntılar verilebilir. Bu elemanda 1 ve 3 düğüm noktaları ile 2 ve 4 düğüm noktaları z=0 eksenine göre; 1 ve2 düğüm noktaları ile 3 ve 4 düğüm noktaları s=0 eksenine göre simetriktir (şekil 2.3.).

1 ve 3 düğüm noktalarındaki serbestlikler arasında simetrik yerdeğiştirme halinde,

$$[d]_3 = [Ts] \cdot [d]_1 \qquad (2.22.)$$

şeklinde tanımlanabilen ilave bağıntı mevcut olup, buradaki [Ts] matrisi köşegen bir matristir. Köşegen üzerindeki terimlerin işaretleri 1 ve 3 düğüm noktalarındaki yerdeğiştirme parametrelerinin pozitif yönlerinin z=0 eksenine göre simetrik olup olmadığına göre belirlenmiştir. Simetrik iki yerdeğiştirme durumuna karşı gelen uç kuvvetlerinin de simetrik olması şartından, örneğin;

$$[K]_{33} = [Ts] \cdot [K]_{11} \cdot [Ts] \qquad (2.23.)$$

eşitliği vardır. [1]

$$[Ts] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \qquad (2.24.)$$

Benzer şekilde s=0 eksenine göre simetri için de [Tz] köşegen matrisi tanımlanır.

$$[Tz] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (2.25.)$$

2.3.5.3. Perde sonlu elemana ait diğer alt matrislerin hesabı

Yukarıda açıklanan karşıtlık teoremi ve eleman simetrisi nedeni ile eleman rijitlik matrisinin terimlerinin bulunabilmesi için sadece $[K]_{11}$, $[K]_{12}$, $[K]_{13}$ $[K]_{14}$ alt matrislerinin integral yoluyla bulunması yeterli olup, eleman rijitlik matrisinin esas köşegeni ve üzerindeki diğer alt matrisler, bu bağımsız alt matrislerden ve dönüştürme matrislerinden yararlanılarak, (2.26.) daki şekilde yazılabilir. Bu dört adet alt matris Tablo 2.4.a, 2.4.b, 2.4.c, 2.4.d'de verilmiştir.

Tablo 2.4.a. $[K]_{11}$ Eleman Alt Rijitlik Matrisi x $(E.h/(1-\upsilon^2)$

$13b35a+k_1/5$	$k_3/4$	0	$-11b^2/210a-k_6/60.b$	$b.ks/20$	0
	$2a/5b+13k_2/70$	0	$-b.\ ks/20$	$-a/30-11k_2.b/420$	0
		$h^2a/3b^3+6k_7/5ab$	0	0	$h^2a/6b^2+k_7/10a$
			$b^3/105a+ke/45$	0	0
	Simetrik			$2ba/45+k_2.b^2/210$	0
					$h^2a/çb+2k_7.b/15a$

Tablo 2.4.b. $[K]_{12}$ Eleman Alt Rijitlik Matrisi x $(E.h/(1-\upsilon^2)$

$-13b/35a+k_1/10$	$k_5/4$	0	$11b^2/210a-k_6/120.b$	$b.k_3/20$	0
$-k_5/4$	$a/5b-13k_2/70$	0	$b.\ k_3/20$	$-a/60+11\ k_2.b/420$	0
0	0	$h^2a/6b^3-6k_7/5ab$	0	0	$h^2a/12b^2-k_7/10a$
$11b^2/210a-k_6/120.b$	$-\ b.\ k_3/20$	0	$-b^3/105a+k_6/90$	0	0
$-\ b.ka/20$	$-a/60+11k_2.b/420$	0	0	$ba/45-k_2.b^2/210$	0
0	0	$h^2a/12b^2-k_7/10a$	0	0	$h^2a/18b-2k_7.b/15a$

Tablo 2.4.c. $[K]_{13}$ Eleman Alt Rijitlik Matrisi x $(E.h/(1-\upsilon^2)$

$9b/70a-k_1/5$	$-k_5/4$	0	$13b^2/420a-k_6/60.b$	$-b.k_5/20$	0
$k_5/4$	$-2a/5b9k_2/140$	0	$b.\ k_5/20$	$-a/30+13k_2.b/840$	0
0	0	$-h^2a/3b^3-6k_7/5ab$	0	0	$h^2a/6b^2+k_7/10a$
$-13b^2/420a+k_6/60.b$	$b.\ k_5/20$	0	$-b^3/140a-k_6/180$	$b^2.k_6/120$	0
$-b.k_5/20$	$a/30-13k_2.b/840$	0	$-b^2.k_5/120$	$-ba/90-k_2.b^2/280$	0
0	0	$-h^2a/6b^2-k_7/10a$	0	0	$h^2a/18b-k_7.ba/30$

Tablo 2.4.d. $[K]_{14}$ Eleman Alt Rijitlik Matrisi x $(E.h/(1-\upsilon^2)$

$-9b/70a-k_1/10$	$-k_1/4$	0	$-13b^2/420a-k_6/120b$	$-b.k_3/20$	0
$-k_5/4$	$-a/5b-9k_2/140$	0	$-b.\ k_3/20$	$-a/60-13k_2.b/840$	0
0	0	$-h^2a/6b^3+6k_7/5ab$	0	0	$h^2a/12b^2-k_7/10a$
$13b^2/420a+k_6/120b$	$b.\ k_3/20$	0	$b^3/140a-k_6/360$	$b^2.k_3/120$	0
$b.k_3/20$	$a/60+13k_2.b/840$	0	$b^2.k_3/120$	$-ba/180+k_2.b^2/280$	0
0	0	$-h^2a/12b^3+k_7/10a$	0	0	$h^2a/36b+k_7.ba/30$

Tablo 2.4.a, 2.4.b, 2.4.c, 2.4.d de yapılan kısaltmalar:

$k_1=(1-\upsilon).a/b$ $k_2=(1-\upsilon).b/a$ $k_3=(\upsilon+(1-\upsilon)/2)$

$k_4=h^2.\ (1-\upsilon)/a.b$ $k_5=(\upsilon-(1-\upsilon)/2)$ $k_6=(1-\upsilon).a.b$ (2.27.)

$k_7=h^2.\ (1-\upsilon)/24$

şeklindedir. Matrislerin $E.h/(1-\upsilon^2)$ ile çarpılması gerekmektedir.

$$
\begin{aligned}
[K]_{33} &= [Ts]\cdot[K]_{11}\cdot[Ts] \\
[K]_{34} &= [Ts]\cdot[K]_{12}\cdot[Ts] \\
[K]_{22} &= [Tz]\cdot[K]_{11}\cdot[Tz] \\
[K]_{24} &= [Tz]\cdot[K]_{13}\cdot[Tz] \\
[K]_{44} &= [Tz]\cdot[K]_{33}\cdot[Tz] \\
[K]_{23} &= [Tz]\cdot[K]_{14}\cdot[Tz]
\end{aligned}
\qquad (2.26.)
$$

2.3.6 Perde elemanın düğüm noktalarına ait iç kuvvetler (gerilme) matrisinin hesabı

Yukarıdaki bölümlerde çıkarılan,

$$[\varepsilon] = [B] \cdot [d] \qquad (2.28.a.)$$

$$[B] = [[B]_1 [B]_2 [B]_3 [B]_4]^T \qquad (2.28.b.)$$

(2.28.) ifadeleri, aşağıdaki (2.29.a.) denkleminde, sıcaklık değişmelerinden dolayı şekildeğiştirmeler ihmal edilerek yerine konulursa,

$$[N] = [D] \cdot [[\varepsilon] - [\varepsilon_t]] \qquad (2.29.a.)$$

$$[N] = [D] \cdot [B] \cdot [d] \qquad (2.29.b.)$$

elde edilir. Bu denklemde,

$$[B_T] = [D] \cdot [B] \qquad (2.30.)$$

kısaltması yapılarak,

$$[N] = [B_T \cdot [d]] \qquad (2.31.)$$

elde edilir. $[B_T]$ matrisinde sonlu elemanın dört düğüm noktasının koordinatları yazılarak, $[B_T]_d$ matrisi elde edilir. $[B_T]_d$ matrisinin alt matrislerini gösteren transpozesi,

$$[B_T]_d = [[B_T]_{d,1} [B_T]_{d,2} [B_T]_{d,3} [B_T]_{d,4}]^T \qquad (2.32.)$$

şeklindedir. Bu alt matrisler açılarak,

$$\begin{aligned}
[B_T]_1 &= [[B_T]_{1,1} [B_T]_{1,2} [B_T]_{1,3} [B_T]_{1,4}]^T \\
[B_T]_2 &= [[B_T]_{2,1} [B_T]_{2,2} [B_T]_{2,3} [B_T]_{2,4}]^T \\
[B_T]_3 &= [[B_T]_{3,1} [B_T]_{3,2} [B_T]_{3,3} [B_T]_{3,4}]^T \\
[B_T]_4 &= [[B_T]_{4,1} [B_T]_{4,2} [B_T]_{4,3} [B_T]_{4,4}]^T
\end{aligned} \qquad .. \qquad (2.33.)$$

şeklinde yazılabilir. (2.33.) formülündeki alt matrisler Tablo 2.5.a. ve 2.5.b. de gösterilmiştir. Bu tablodaki değerlerin $E*h/(1-\upsilon^2)$ ile çarpılması gerekmektedir.

Tablo 2.5.a. Eleman gerilme alt matrisleri x $(E.h/(1-\upsilon^2)$

$[B_T]_{1,1}=$

d1	d2	d3	d4	d5	d6
1/a	0	0	0	υ	0
υ/a	0	0	0	1	0
0	(1-υ)/2a	0	(1-υ)/2	0	0
0	0	$6h^2/12b^2$	0	0	$4h^2/12b$
0	0	0	0	0	$h^2(1-\upsilon)/24a$

$[B_T]_{1,2}=$

d7	d8	d9	d10	d11	d12
-1/a	0	0	0	0	0
-υ/a	0	0	0	0	0
0	-(1-υ)/2a	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	$-h^2(1-\upsilon)/24a$

$[B_T]_{1,3}=$

d13	d14	d15	d16	d17	d18
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	$-6h^2/12b^2$	0	0	$2h^2/12b$
0	0	0	0	0	0

$[B_T]_{1,4}=$

d19	d20	d21	d22	d23	d24
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

$[B_T]_{2,1}=$

d1	d2	d3	d4	d5	d6
1/a	0	0	0	0	0
υ/a	0	0	0	0	0
0	(1-υ)/2a	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	$h^2(1-\upsilon)/24a$

$[B_T]_{2,2}=$

d7	d8	d9	d10	d11	d12
-1/a	0	0	0	υ	0
-υ/a	0	0	0	0	0
0	-(1-υ)/2a	0	(1-υ)/2	0	0
0	0	$6h^2/12b^2$	0	0	$4h^2/12b$
0	0	0	0	0	$-h^2(1-\upsilon)/24a$

$[B_T]_{2,3}=$

d13	d14	d15	d16	d17	d18
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

$[B_T]_{2,4}=$

d19	d20	d21	d22	d23	d24
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	$-6h^2/12b^2$	0	0	$2h^2/12b$
0	0	0	0	0	0

Tablo 2.5.b. Eleman gerilme alt matrisleri x $(E.h/(1-\upsilon^2)$

$[B_T]_{3,1}=$

d1	d2	d3	d4	d5	d6
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	$-6h^2/12b^2$	0	0	$2h^2/12b$
0	0	0	0	0	0

$[B_T]_{3,2}=$

d7	d8	d9	d10	d11	d12
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

$[B_T]_{3,3}=$

d13	d14	d15	d16	d17	d18
1/a	0	0	0	υ	0
υ/a	0	0	0	1	0
0	$(1-\upsilon)/2a$	0	$(1-\upsilon)/2$	0	0
0	0	$6h^2/12b^2$	0	0	$-4h^2/12b$
0	0	0	0	0	$h^2(1-\upsilon)/24a$

$[B_T]_{3,4}=$

d19	d20	d21	d22	d23	d24
-1/a	0	0	0	0	0
$-\upsilon$/a	0	0	0	0	0
0	$-(1-\upsilon)/2a$	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	$-h^2(1-\upsilon)/24a$

$[B_T]_{4,1}=$

d1	d2	d3	d4	d5	d6
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

$[B_T]_{4,2}=$

d7	d8	d9	d10	d11	d12
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	$-6h^2/12b^2$	0	0	$-2h^2/12b$
0	0	0	0	0	0

$[B_T]_{4,3}=$

d13	d14	d15	d16	d17	d18
1/a	0	0	0	0	0
υ/a	0	0	0	0	0
0	$(1-\upsilon)/2a$	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	$h^2(1-\upsilon)/24a$

$[B_T]_{4,4}=$

d19	d20	d21	d22	d23	d24
-1/a	0	0	0	υ	0
$-\upsilon$/a	0	0	0	0	0
0	$-(1-\upsilon)/2a$	0	$(1-\upsilon)/2$	0	0
0	0	$6h^2/12b^2$	0	0	$-4h^2/12b$
0	0	0	0	0	$-h^2(1-\upsilon)/24a$

2.4. Özel Durum

Perde sonlu elemanın her düğüm noktasında ε şekildeğiştirme değeri bilinmeyen olarak seçilmiştir. Aynı katta farklı kalınlıklı perde elemanların birleşmesi sonucu ortak kenar üzerindeki eleman düğüm noktalarında farklı normal kuvvetlerin oluşması sorun yaratmaz. Ancak düşeyde, diğer bir deyişle katlardaki perde kalınlıklarının farklı olması durumunda, aynı düğüm noktasında yerdeğiştirme parametreleri değişmemekle birlikte iç kuvvetlerin hesabı sonucu farklı normal kuvvetler oluşacaktır. Bu durumu gidermek için, farklı kalınlıklı elemanların birleştiği düğüm noktalarının olduğu yerde değişken kalınlıklı ara bir perde eleman tanımlanması gerekmektedir. Bu ara eleman için düğüm noktasının bilinmeyenleri, yerdeğiştirme parametrelerinin birim durumlarına karşı gelen şekil fonksiyonlarının eleman üzerindeki yayılışları yine aynı şekilde seçilecektir. Sadece değişken kalınlık nedeni ile eleman rijitlik matrisi değişecektir. Kalınlığın fonksiyonel ifadesinin de integral içine alınarak rijitlik matrislerinin sayısal integrasyon ile hesaplanması gerekmektedir. Örneğin, Gauss integral noktaları yöntemi ile rijitlik matrisinin terimleri hesaplanabilir. Bu çalışmada eleman kalınlığının değişmediği kabul edilmiştir.

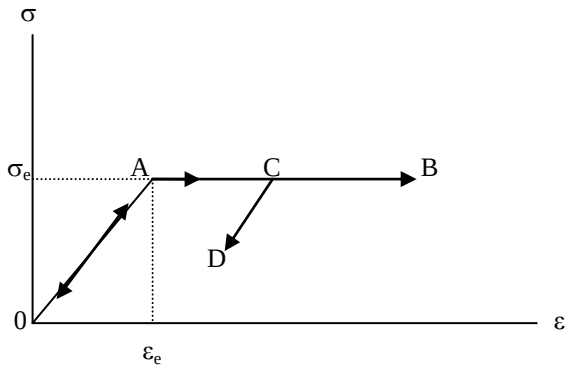
BÖLÜM 3. ÇUBUK SONLU ELEMAN

Geliştirilen perde sonlu elemanın kullanıldığı yapı sistemlerinde, çubuk sonlu elemanda kullanılarak, perde-çerçeveli sistemlerin çözümünün yapılması amaçlandığından, bu bölümde doğru eksenli, prizmatik uzay çubuk sonlu elemanlardan söz edilecektir.

3.1. Kabuller

a-) Bernoulli- Navier hipotezi geçerlidir. Buna göre düzlem kesitler, sistem şekil değiştirdikten sonra da düzlem kalırlar.

b-) Malzeme ideal-elastoplastiktir. Bu tür malzemelerde yükleme ve boşaltma eğrisi şekil 3.1. deki gibidir.



Şekil 3.1. İdeal elasto-plastik malzemede yükleme ve boşaltma eğrileri.

Buna göre, yükleme eğrisi OA ve AB parçalarından oluşmaktadır.

OA Bölgesinde: $0<\varepsilon<\varepsilon_e$, $\sigma = E.\ \varepsilon$

AB Bölgesinde: $\varepsilon>\varepsilon_e$, $\sigma = \sigma_e$ 'dir.

Boşaltma eğrisi: AO ve CD parçalarından oluşmaktadır.

AO Bölgesinde: $\varepsilon<\varepsilon_e$, OA ile çakışmaktadır.

CD Bölgesinde: $\varepsilon>\varepsilon_e$, OA doğrusuna paraleldir.

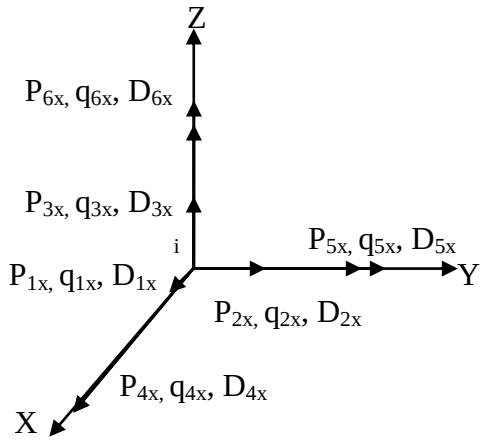
c-) Birinci mertebe teorisine göre hesap yapılacaktır. Dış etkiler altında sistemin geometrisindeki değişimlerin denge denklemleri ve geometrik uygunluk koşullarına etkisi terk edilmektedir. Ayrıca, sistemin şekildeğiştirmesi sırasında dış yüklerin doğrultuları değişmemektedir.

d-) Sistemdeki çubuklar doğru eksenli, sabit enkesitlidir. Sistemde eğri eksenli, değişken enkesitli çubukların bulunması durumunda, bu özelikteki çubuklar, yukarıdaki şartları sağlayacak şekilde küçük parçalara ayrılarak idealleştirilebilirler.

3.2. Çubuk Eksen Takımı, Uç Kuvvetleri, Yerdeğiştirmeleri Ve Dönüştürme Matrislerinin İncelenmesi

3.2.1. Çubuk eleman sistem eksen takımı

Sadece çubuklardan oluşan sistemin geometrisini ve düğüm noktalarının yerdeğiştirmelerini ortak bir eksen takımına göre tanımlayabilmek ve sistem denklem takımını oluşturabilmek için ortak bir koordinat takımına gerek vardır. Bu amaçla XYZ kartezyen koordinat takımına çubuk sistem eksen takımı denir.



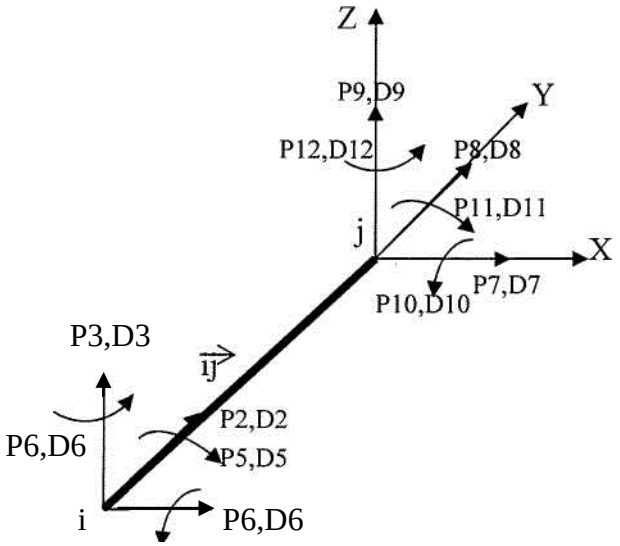
Şekil 3.2. Çubuk sistem eksen takımı, düğüm noktası uç kuvvetleri, yükleri ve yerdeğiştirmelerinin pozitif yönleri.

Her düğüm noktasında XYZ sistem eksen takımında üçü açısal ve üçü doğrusal olmak üzere 6 tane yerdeğiştirme parametresi bulunmaktadır. Bunların pozitif yönleri Şekil 3.2 de gösterilmiştir. i düğüm noktasındaki yerdeğiştirmeler ve uç kuvvetler matris formunda aşağıda gösterilmiştir.

$$[d_{ix}] = \begin{bmatrix} D_{1x} \\ D_{2x} \\ D_{3x} \\ D_{4x} \\ D_{5x} \\ D_{6x} \end{bmatrix} \qquad [P_{ix}] = \begin{bmatrix} P_{1x} \\ P_{2x} \\ P_{3x} \\ P_{4x} \\ P_{5x} \\ P_{6x} \end{bmatrix} \tag{3.1.}$$

3.2.2. Uzay çubukta çubuk özel eksen takımı, uç kuvvetleri ve yerdeğiştirmeleri

Uzay çubuk sistemde çubuk eksen takımı ve pozitif yönleri şekil. 3.3. de gösterilmiştir. i ve j çubuğun başlangıç ve son düğüm noktalarını, ij ise çubuğun pozitif yönünü göstermektedir. Görüldüğü gibi çubuk özel eksen takımında, çubuk ekseni sistem Y ekseni ile aynı doğrultuda, çubuk kesitinin asal eksenleri sistem X ve Z eksenleri ile çakışık olarak seçilmiştir.



Şekil 3.3. Uzay çubukta çubuk özel eksen takımı, uç kuvvetleri ve yerdeğiştirmeleri.

Çubuğun i ve j düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmelerinin matris formundaki gösterimi:

$$[d]_i = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \\ D_6 \end{bmatrix} \qquad [d]_j = \begin{bmatrix} D_7 \\ D_8 \\ D_9 \\ D_{10} \\ D_{11} \\ D_{12} \end{bmatrix} \tag{3.2.}$$

şeklindedir. Çubuğun i ve j düğüm noktalarındaki uç kuvvetleri, aynı numaralı yerdeğiştirmelerine karşı gelecek şekilde aşağıda verilmiştir.

$$[P]_i = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} \qquad [P]_j = \begin{bmatrix} P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \end{bmatrix} \tag{3.3.}$$

3.2.3. Çubuk sistem eksen takımına dönüştürme matrisi

Çubuk rijitlik matrisleri, uç kuvvetleri ve yerdeğiştirmeleri ortak bir eksen takımına dönüştürüldükten sonra, sisteme ait denklem takımının kurulması gerekmektedir. [17, 18, 19]. Dönüştürme matrisleri 4. Bölümde açıklanmıştır.

3.3. Çubuk Elemana Ait Rijitlik Matrisi

Çubuk eksen takımındaki [C] çubuk rijitlik matrisi i ve j uçlarına ait *6x6* boyutundaki $[C]_{ii}$, $[C]_{jj}$, $[C]_{ij}$ ve $[C]_{ji}$ alt matrislerinin (3.4.) deki gibi bir araya gelmesinden oluşur. [18]

$$[C] = \begin{bmatrix} [C]_{ii} & [C]_{ij} \\ [C]_{ji} & [C]_{jj} \end{bmatrix}_{12\times12} \tag{3.4.}$$

[C] matrisinin $k_{m,n}$ elemanı, Dn=l yerdeğiştirmesinden dolayı P_m uç kuvvetinin değerini vermektedir. Betti karşıtlık teoremi uyarınca [C] matrisinin elemanları arasında:

$$[C]ii = [C]ii^T$$

$$[C]jj = [C]jj^T \tag{3.5.}$$

$$[C]ij = [C]ji^T$$

özellikleri bulunmaktadır.

Doğru eksenli, prizmatik uzay çubuklarda birinci mertebe teorisine ait çubuk rijitlik alt matrisleri (3.5.) de verilmiştir. [2, 18]

Burada:

E : Elastisite modülünü

υ : Poisson oranı

G : E/2 * (1 +υ) kayma modülünü

GJ : Çubuk burulma rijitliğini

L : Çubuk boyunu

F : Çubuk enkesitini

EI_X, EI_Z: sırası ile YZ ve XY düzlemlerindeki eğilme rijitliklerini göstermek üzere,

$$[C]_{ii} = \begin{bmatrix} 12EI_z/L^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6EI_z/L^2 \\ 0 & EF/L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12EI_x/L^3 & 6EI_x/L^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6EI_x/L^2 & 4EI_x/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & GJ/L & 0 \\ -6EI_z/L^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4EI_z/L \end{bmatrix}_{6\times6}$$

$$[C]_{ij} = \begin{bmatrix} -12EI_z/L^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6EI_z/L^2 \\ 0 & -EF/L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -12EI_x/L^3 & 6EI_x/L^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6EI_x/L^2 & 2EI_x/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -GJ/L & 0 \\ 6EI_z/L^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2EI_z/L \end{bmatrix}_{6\times6} \qquad (3.6.)$$

$$[C]_{jj} = \begin{bmatrix} 12EI_z/L^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6EI_z/L^2 \\ 0 & EF/L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12EI_x/L^3 & -6EI_x/L^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6EI_x/L^2 & 4EI_x/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & GJ/L & 0 \\ 6EI_z/L^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4EI_z/L \end{bmatrix}_{6\times6}$$

şeklindedir. Çubuk sistem eksen takımındaki çubuk rijitlik matrisleri:

$$[C]_{xx} = \begin{bmatrix} [C]_{ixix} & [C]_{ixjx} \\ [C]_{jxix} & [C]_{jxjx} \end{bmatrix} \qquad (3.7.)$$

şeklinde gösterilebilir. Çubuk sistem eksen takımındaki çubuk rijitlik alt matrisleri, [T] dönüştürme matrisi, çubuk eksenlerindeki büyüklüklerin sistem eksenlerine dönüştürülmesi amacıyla tanımlanarak, (3.8.) deki dönüştürme ifadeleri ile elde edilirler.

$$[C]_{ixix} = [T].[C]_{ii}.[T]^T$$

$$[C]_{jxix} = [T].[C]_{ji}.[T]^T \qquad (3.8.)$$

$$[C]_{ixjx} = [T].[C]_{ij}.[T]^T$$

$$[C]_{jxjx} = [T].[C]_{jj}.[T]^T$$

Çubuk eksen takımındaki alt rijitlik matrisleri arasında Betti karşıtlık teoremi uyarınca bulunan özelikler çubuk sistem eksen takımındaki alt matrisler için de aynen geçerlidir.

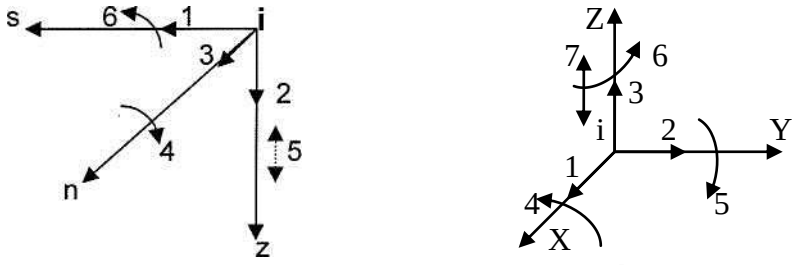
BÖLÜM 4. ÇUBUK VE PERDE SONLU ELEMANLARDAN OLUŞAN SİSTEMİN ELASTİK HESABI

4.1. Ortak Sistem Eksen Takımı, Düğüm Noktası Kuvvetleri, Düğüm Noktası Yerdeğiştirme Parametreleri ve Düğüm Noktası Yükleri

Ortak sistem eksen takımı kartezyen koordinat takımı olarak alınacak olup, çubuk ve perdelerden oluşan sistemde her düğüm noktasında üçü doğrusal, üçü açısal ve düşey doğrultuda şekildeğiştirme olmak üzere toplam yedi adet yerdeğiştirme parametresi bulunmaktadır. Açısal yerdeğiştirme bileşenlerinin yönleri sağ el kuralına göre belirlenmiştir.

4.2. Sistem Eksen Takımına Dönüştürme Matrisleri

4.2.1. Perde sonlu elemana ait rijitlik matrisinin perde eksen takımından çubuk sonlu elemanların da dahil edildiği eksen takımına dönüştürülmesi



a b

Şekil 4.1a. Perde özel eksen takımında yerdeğiştirme parametrelerinin numaralanışı.

Şekil 4.1.b. Ortak sistem eksen takımında yerdeğiştirme parametrelerinin numaralanışı.

Perde sonlu elemana ait her bir rijitlik alt matrisi, perde ve ortak eksen takımındaki eksenlerin birbirlerine göre ters veya aynı yönlü olmaları ve yerdeğiştirme bileşenlerinin sıralanış numaraları göz önüne alınarak, 7x7 boyutlu, her bir düğüm noktasında yedi yerdeğiştirme parametresi bulunan perde elemana ait alt rijitlik matrislerine dönüştürülür. Öncelikle, Y-Z düzlemi içinde bulunan bir perde sonlu elemanın sistem eksen takımında Şekil 4.1.b. deki sıralama ile gösterilen düğüm noktası yerdeğiştirmelerinden, eleman özel eksen takımında Şekil 4.1 .a. daki

sıralamaya geçişi için, [TD] dönüştürme matrisi (4.1.) deki gibi tanımlanır.

$$[TD] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6\times 7} \qquad (4.1.)$$

Perde sonlu elemanın özel eksen takımında elde edilen, rijitlik alt matrislerinin, ortak sistem eksen takımındaki değerlerini elde etmek için, bütün alt matrislerin (4.2.) formülünden görüldüğü gibi, sağdan [TD], soldan $[TD]^T$ matrisleri ile çarpılması gerekmektedir.

n=l,4; m=l,4 olmak üzere,

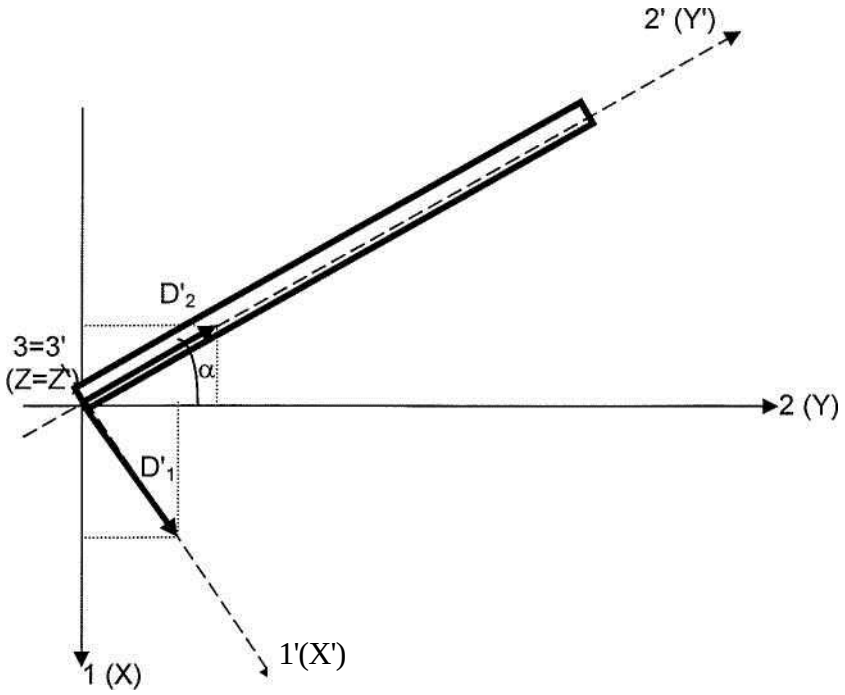
$$[K]^*_{mn}=[TD]^T.[K]_{mn}.[TD] \qquad (4.2.)$$

şeklinde her düğüm noktasında 7 serbestlik bulunan perde sonlu eleman rijitlik alt matrislerine geçilir.

4.2.2. Perde sonlu elemanın planda farklı açısal konumuna bağlı olarak ortak sistem eksen takımına dönüştürme matrisi

Perde elemanın planda farklı açısal konumda bulunması, diğer bir deyişle Y-Z düzlemi içinde olmaması halinde (Şekil 4.2) ilave dönüştürme matrisleri kullanılarak ortak sistem eksen takımına dönüştürülmüş eleman alt rijitlik matrisleri bulunur. Elemanın planda Y ekseni ile yaptığı açı α olmak üzere bu ilave [TTR] dönüştürme matrisi aşağıda gösterilmiştir.

$$[TTR]_{7\times 7} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4.3.)$$



Şekil 4.2. Perde sonlu elemanın planda Y ekseni ile yaptığı açı.

α açısının sinüs ve kosinüs değerleri perde elemanın düğüm noktalarının koordinatlarından yararlanılarak bulunmaktadır. Burada [TTR] dönüştürme matrisi, sistem eksenlerindeki büyüklüklerin perde eksenlerine dönüştürülmesi amacıyla tanımlanmıştır.

$$[TR] = [TTR]^T \tag{4.4.}$$

ve m=i, j, k, l olmak üzere,

$$[SS]_{mxix}=[TR].[K]^*_{mi}.[TTR]$$

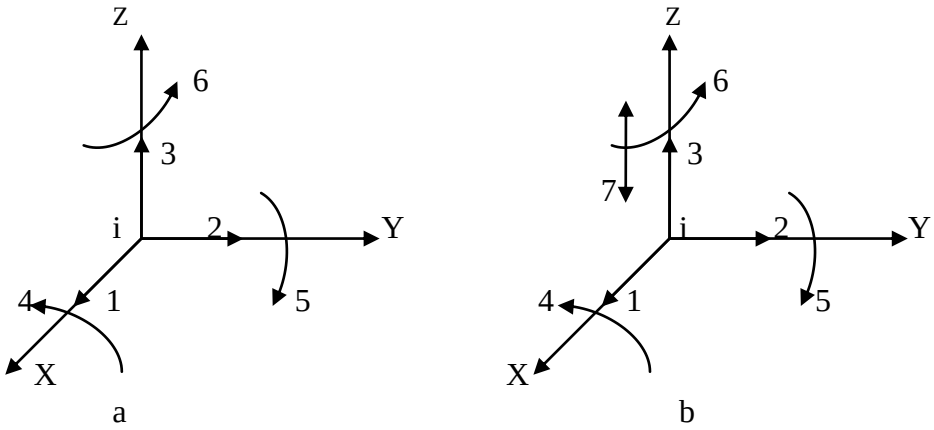
$$[SS]_{mxjx}=[TR].[K]^*_{mj}.[TTR] \tag{4.5.}$$

$$[SS]_{mxkx}=[TR] .[K]^*_{mk}.[TTR]$$

$$[SS]_{mxlx} = [TR] . [K]^*_{ml}.[TTR]$$

toplam 16 adet alt matris çarpılarak ortak eksen takımına ait değerler elde edilir.

4.2.3. Çubuk elemana ait rijitlik matrisinin perde sonlu elemanların da dahil edildiği eksen takımına dönüştürülmesi



Şekil 4.3.a. Çubuk özel eksen takımında yerdeğiştirme parametrelerinin numaralanışı.

Şekil 4.3.b. Ortak sistem eksen takımında yerdeğiştirme parametrelerinin numaralanışı.

Çubuk eksen takımında altı adet yerdeğiştirme parametresi bulunmakta olup, perde elemanların da dahil edildiği sistem eksen takımındaki yerdeğiştirme bileşenlerinden farkı çubukta perde de olduğu gibi 7. yerdeğiştirme parametresi olan düşey eksen doğrultusundaki şekildeğiştirmenin olmamasıdır. Bu nedenle çubuk için elde edilen 6x6 boyutundaki rijitlik alt matrislerinin 7. satır ve sütunu sıfır elemanlardan oluşan genişletilmiş hale getirilmesi gerekmektedir. Ancak, yalnız çubukların birleştiği bir düğüm noktasında d_7 şekildeğiştirme bileşeni olmayacağından denklem takımının çözümünden önce o noktanın 7. serbestliğini sıfırlamak, diğer bir deyişle esas köşegene 1 koymak gerekmektedir. Sistemin hesabını da perde ve çubukların birleştiği düğüm noktasında şekildeğiştirme değeri çıkacak olup bunlar perde eleman için anlam ifade edecektir.

4.2.4. Çubuk elemanın farklı açısal konumuna bağlı olarak ortak sistem eksen takımına dönüştürme matrisi

Sistem eksenlerindeki büyüklüklerin, çubuk eksenlerine ait büyüklüklere dönüştürülmesi amacıyla tanımlanan [TR] dönüştürme matrisi:

$$[TR] = \begin{bmatrix} [t] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [t] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [t] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [t] \end{bmatrix}_{12\times12} \tag{4.6.}$$

şeklinde [t] alt matrislerinden oluşmaktadır. [t] alt matrisinin elemanları [2] de aşağıda belirtildiği şekilde tanımlanmıştır.

$$[t] = \begin{bmatrix} \dfrac{m_y \cos\beta + l_y n_y \sin\beta}{\sqrt{(1-n_{y^2})}} & \dfrac{-(l_y \cos\beta - m_y n_y \sin\beta i}{\sqrt{(1-n_{y^2})}} & \sqrt{(1-n_{y^2})\cdot \sin\beta} \\ l_y & m_y & n_y \\ \dfrac{-(l_y n_y \cos\beta - m_y \sin\beta i}{\sqrt{(1-n_{y^2})}} & \dfrac{-m_y n_y \cos\beta - l_y \sin\beta}{\sqrt{(1-n_{y^2})}} & \sqrt{(1-n_{y^2})\cdot \cos\beta} \end{bmatrix} \tag{4.7.}$$

Burada

X_i, X_j, Y_i, Y_j, Z_i, Z_j : i ve j uçlarının sistem eksenlerindeki koordinatları olmak üzere,

$$l_y=(X_j-X_i)/L$$

$$m_y=(Y_j-Y_i)/L \tag{4.8.}$$

$$n_y = (Z_j - Z_i)/L$$

sırasıyla X, Y ve Z sistem eksenlerinin y çubuk eksenine göre doğrultu cosinüslerini, β ise çubuk z ekseninin sistem Z ekseni ile yaptığı açıyı göstermektedir.

Çubuk ekseninin Z eksenine paralel olması halinde, [t] matrisi:

$$[t] = \begin{bmatrix} n_y \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ 0 & 0 & n_y \\ n_y \sin\beta & -\cos\beta & 0 \end{bmatrix} \tag{4.9.}$$

şeklini alır. [2].

Bu çalışmada yatay düzlem içinde bulunan kirişler için, elemanın y ekseni ile sistem Y ekseni arasındaki açı olan α ya göre, [TR] dönüştürme matrisi olarak, perde elemanlar için (4.3.) de verilen dönüştürme matrisi kullanılacak olup, çubuk elemanın şekildeğiştirme bileşeni bilinmeyen olarak seçilmediğinden bu matrisin

(7,7) elemanı sıfır alınacaktır. Kolon elemanların kesit asal eksenlerinin sistem X-Z eksenleri ile çakışmaması durumunda da, kolon asal eksenleri ile sistem eksenleri arasındaki açı β olmak üzere, sistem doğrultularına geçiş için tanımlanan [TRFF] dönüştürme matrisi (4.6.) daki gibi, (4.10.a.) da verilen $[t_1]$ alt matrislerinden oluşur.

$$[t_1] = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \qquad (4.10.a.)$$

Kolon elemanların düşey ile sıfır derece açı (γ=0) yapacak şekilde bulunduğu kabul edilerek, eleman eksen takımından sistem eksen takımına geçiş için tanımlanan [TTR] dönüştürme matrisi, (4.6.) daki gibi, (4.10.b.) de verilen $[t_2]$ alt matrislerinden oluşur.

$$[t_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \\ 0 & -\cos\gamma & -\sin\gamma \end{bmatrix} \qquad (4.10.b.)$$

Ters bir dönüşüm içinde,

$$[TTR] = [TR]^T \qquad (4.11.a.)$$

$$[TRF] = [TRFF]^T \qquad (4.11.b.)$$

olmak üzere dönüştürme matrisleri tanımlanabilir. Ancak perde elemanlarında dahil edildiği ortak sistem eksen takımına geçilirken [TR] ve [TRF] matrislerinin 14x14 boyutunda olması gerekmektedir. Düşey şekildeğiştirme bileşeni bilinmeyen olarak çubuk elemanlarda seçilmediğinden (4.6.) matrisinin 6. ve 12. Satır ve sütunundan sonra terimleri sıfır olan birer adet ilave satır ve sütun eklenerek düzenlenmesi gerekmektedir.

$$[SS]_{ixix} = [TRFF].[C]_{ii}.[TRF]$$

$$[SS]_{jxix} = [TRFF].[C]_{ji}.[TRF]$$

$$[SS]_{ixjx} = [TRFF].[C]_{ij}.[TRF]$$

$$[SS]_{jxjx} = [TRFF].[CJ]_{jj}.[TRF] \qquad (4.12.a.)$$

$[SS]_{ixix}$-[TTR].$[C]_{ii}$[TR]

$[SS]_{jxix}$ = [TTR].$[C]_{ji}$.[TR]

$[SS]_{ixjx}$ = [TTR].$[C]_{ij}$.[TR]

$[SS]_{jxjx}$ = [TTR].$[C]_{jj}$.[TR] (4.12.b.)

şeklinde çubuğa ait alt matrisler ortak sistem eksen takımına ait olan değerlere dönüştürülmüş. olur. [18]

4.3. Yapı Sistemlerinin Kat Seviyesinde Rijit Hareket Yapması Durumunun İncelenmesi

Kat döşemelerinin düzlemleri içinde sonsuz rijit varsayılması çok katlı yapı sistemlerinde, bilinmeyen sayısını azaltarak hesabını daha hızlı yapılmasını sağlamaktadır. Bu kabul yapıldığında, rijit düzlem içindeki bütün düğüm noktalarının düzlem içi yerdeğiştirmelerinin belirli bir referans noktasının üç adet,

dml=dmx, dm2=dmy, dm3=dm6 (4.13.)

yerdeğiştirme bileşenlerine bağlanması gereği ortaya çıkmaktadır.

Lim (tan(D_6)) = D_6 (4.14.)

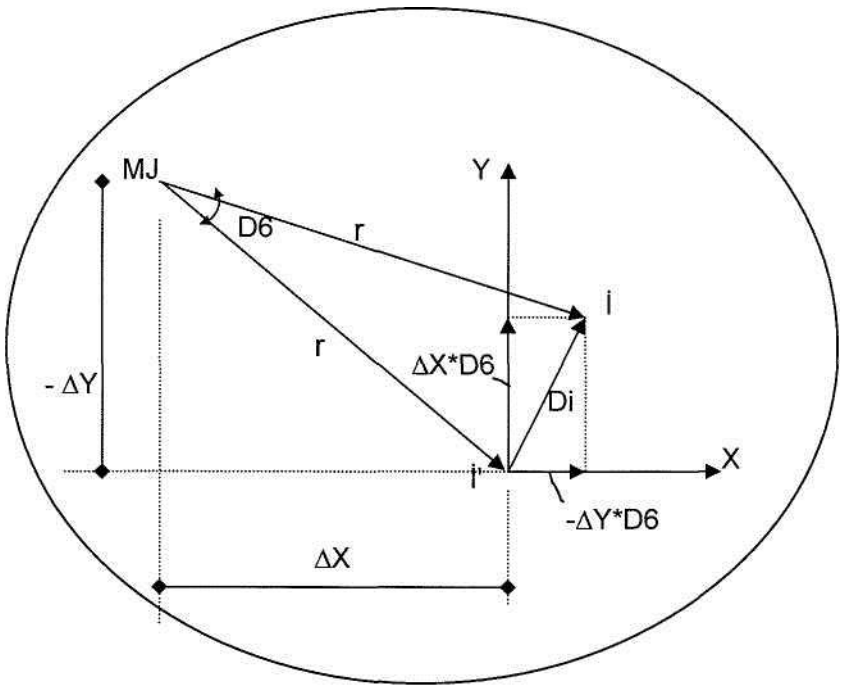
$D_6 \rightarrow 0$

D_6 yerdeğiştirmesi çok küçük bir dönme olduğundan yukarıdaki ifade geçerlidir. D_6 çok küçük olduğundan, Şekil 4.4. de görüldüğü gibi,

$\left| M_{J,i} \right| = \left| M_{J,i'} \right| = r$ (4.15.a.)

tan (D_6) = D_i / r (4.15.b.)

D_i = tan (D_6)*r = D_6*r (4.15.c.)



Şekil.4.4. Rijit düzlem içindeki bir i düğüm noktasının referans noktasına bağlılığı

olmak üzere benzer şekilde bileşen yerdeğiştirmeler için de,

$$\begin{bmatrix} D_{ix} \\ D_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta Y \\ \Delta X \end{bmatrix} \cdot D_6 = \begin{bmatrix} -(Y_i - Y_{mj}) \\ (X_i - X_{mj}) \end{bmatrix} \cdot D_6 \qquad (4.16.)$$

yazılabilir.

Aynı kat döşemesi üzerinde bulunan düğüm noktalarının düzlem içi yerdeğiştirme bileşenleri (d_1, d_2, d_6) seçilen bir referans noktasının yerdeğiştirme bileşenleri cinsinden ifade edilir. Bunun için:

1- Rijit döşeme düzlemleri içinde bulunan çubukların bu düzlemler içindeki eğilme ve uzama rijitlikleri istenirse sıfır alınabilir, sıfır alınmazsa bile hesaba girmeyeceklerdir.

2- Rijit döşeme düzlemleri dışında kalan çubukların (kolonların) sistem eksenlerindeki çubuk rijitlik matrisleri ve rijit döşeme düzlemleri içinde düğüm noktası bulunan perde elemanların rijitlik matrisleri $[tt]_m$ dönüştürme matrisleri yardımı ile,

m=i, j, k, 1 perde elemanın düğüm noktaları olmak üzere:

$$[K]^*_{mxix} = [tt]^T_m \,.\, [K]_{mxix}.\, [tt]_i$$

$$[K]^*_{mxjx} = [tt]^T_m.\, [K]_{mxjx}.[tt]_j$$

$$[K]^*_{mxkx} = [tt]^T_m.[K]_{mxkx}.[tt]_k \qquad (4.17.)$$

$$[K]^*_{mxlx}=[tt]^T_m.[K]_{mxlx}.[tt]_1$$

m=i, j çubuk sonlu elemanın düğüm noktaları olmak üzere:

$$[C]^*_{mxix} = [tt]^T_m \,.\, [C]_{mxix}.\, [tt]_i$$

$$[C]^*_{mxjx} = [tt]^T_m.\, [C]_{mxjx}.[tt]_j \qquad (4.18.)$$

şeklinde, seçilen bir referans noktasının yerdeğiştirme bileşenleri cinsinden ifade edilir. Burada [TT] dönüştürme matrisi:

$$[TT] = \begin{bmatrix} [tt]_i & 0 \\ 0 & [tt]_j \end{bmatrix} \qquad (4.19.)$$

Perde sonlu elemanlar için,

$$[TT] = \begin{bmatrix} [tt]_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [tt]_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [tt]_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [tt]_l \end{bmatrix} \qquad (4.20.)$$

şeklindedir. Burada:

X_m, Y_m :Seçilen referans noktasının koordinatları,

$X_{i,j,k,l}$, $Y_{i,j,k,l}$:i, j, k ve l düğüm noktalarının koordinatları,

n :Çubuk elemanlar için i, j ve perde sonlu elemanlar için i, j, k, 1 olmak üzere,

$$\Delta X_n = X_n - X_m \qquad \Delta Y_n = Y_n - Y_m \qquad (4.21.)$$

$$[tt]_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\Delta Y_n & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \Delta X_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & tpc \end{bmatrix} \quad (4.22.)$$

şeklinde olup, bu matrislerde yer alan tpc değeri ortak sistem eksen takımında çubuklar için sıfır, perdeler için bir değerini almaktadır.

3- Sistem eksenindeki $[Po]_{ix}$ ve $[Po]_{jx}$ çubuk yükleme matrisleri,

$$[Po]^*_{ix}=[tt]^T_i.[P_O]_{ix}$$

$$[Po]^*_{jx}=[tt]^T_j.[Po]_{jx} \quad (4.23.)$$

bağıntıları ile, seçilen bir referans noktasının koordinatlarına göre bulunur ve bağımsız yerdeğiştirme bileşenlerine kaşı gelecek şekilde sistem yükleme matrisinde ilgili yerlere yazılır.

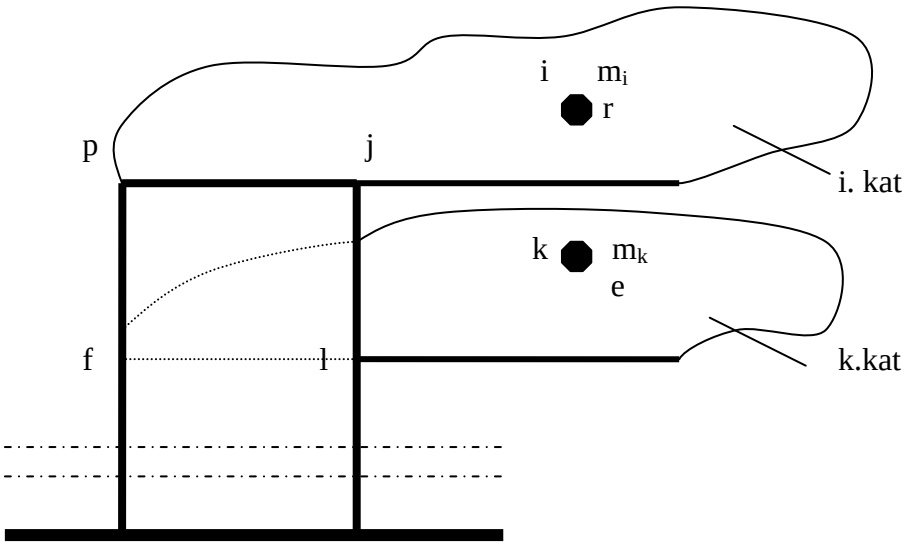
4- Sistem eksen takımında etkiyen dış yüklere ait [q] matrisi

$$[q]^*=[tt]^T_j.[q] \quad (4.24.)$$

bağıntısı ile dönüştürülerek dış yükler matrisindeki ilgili yerlere yazılır.

4.4. Sisteme Ait Yükleme Ve Rijitlik Matrisinin Oluşturulması Ve Oluşturulan Denklem Takımının Çözümü

Sistemin hesabı için matris yerdeğiştirme yönteminden yararlanılmıştır. Rijit düzlem içinde düğüm noktaları bulunan çubuk ve perde sonlu elemanlara ait alt rijitlik matrisleri ve yükleme matrisleri yukarıda açıklandığı şekilde dönüştürülerek, sisteme ait rijitlik ve yükleme matrisleri, bu alt matrislerin ilgili yerlere yazılması ve üst üste gelen terimlerin toplanması ile elde edilir.



Şekil 4.5. Referans noktalarına bağlı perde- çubuk sistemin şematik gösterimi.

Şekil 4.5. de şematik olarak gösterilen perde - çubuk sistemde, i. kattaki referans noktası i, k. kattaki referans noktası k olmak üzere p, j ve r düğüm noktaları i. referans noktasına, f, 1 ve e düğüm noktaları k. referans noktasına bağlı çubuk ve perde eleman düğüm noktalarıdır. Her düğüm noktasında ve referans noktasında yedi adet serbestlik vardır. p, j ve r düğüm noktalarının 1., 2. ve 6. serbestlikleri i nolu referans noktasına , f, l ve e düğüm noktalarının 1., 2. ve 6. serbestlikleri k nolu referans noktasına bağlıdır. Düğüm noktalarının diğer serbestlikleri katlardaki referans noktalarından bağımsızdır.

Her düğüm noktasında 7 adet serbestlik olduğundan herhangi bir n nolu düğüm noktasının serbestliklerinin sistemdeki numaralanışı, t_p=l, 7 olmak üzere,

$$t=(n-l)*7+t_p \qquad (4.25.)$$

şeklinde gösterilerek t. serbestlik ifade edilebilir. Referans noktasına bağlı olan herhangi bir düğüm noktasının 1., 2. ve 6. serbestlikleri s_m nolu referans noktasının 1., 2. ve 6. serbestliklerine bağlı olarak, t_m=l, 2, 6 olmak üzere,

$$s=(s_m-l)*7+t_m \qquad (4.26.)$$

şeklinde ifade edilebilen sistemin s. serbestliği haline gelir. Referans noktasına bağlı düğüm noktalarının diğer serbestlikleri ile referans noktasına bağlı olmayan düğüm noktalarının tüm serbestliklerinin sistemdeki t serbestlik numaraları değişmeyecektir. Bir düğüm noktasının herhangi bir serbestliğinin birim değerinden dolayı ait olduğu elemanın serbestlikleri doğrultusunda oluşan iç kuvvetlerini

veren, ortak sistem eksen takımındaki eleman alt rijitlik matrislerinin terimleri, sistem rijitlik matrisinde serbestlik numaralarına göre karşı geldikleri (satır, kolon)'a yazılır. Betti karşıtlık teoremi geçerlidir. (4.27.) ve (4.28.) de görülen, [M]* matrisleri, referans noktalarının serbestliklerinin birim değerinden dolayı referans ve düğüm noktası serbestlikleri doğrultu ve yönünde oluşan iç kuvvetleri ve Betti karşıtlık teoremi gereği tersini ifade eden alt rijitlik matrislerini, [Mpo]* matrisleri, referans noktalarına ait alt yükleme matrislerini göstermektedir.

$$[SS]^* = \begin{bmatrix} [M]^*_{ixix} & [M]^*_{ixkx} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [M]^*_{kxix} & [M]^*_{kxkx} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [M]^*_{pxix} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & [PP]^*_{ixix} \end{bmatrix}_{7(n+r)\times 7(n+r)} \qquad (4.27.)$$

$$[Po]^*_j = \begin{bmatrix} [M_{po}]^*_{ix} \\ [M_{po}]^*_{kx} \\ [Po]^*_{px} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ [Po]^*_{lx} \end{bmatrix}_{(7n+r)\times 1} \qquad (4.28.)$$

Örneğin; i nolu referans noktasına bağlı olan j nolu düğüm noktasının, referans noktası serbestliklerine bağlı olan 1 nolu yerdeğiştirme parametresine s_{j1} dersek, s_{j1}'in birim değerinden dolayı ortak sistem eksen takımında kendi doğrultu ve yönünde oluşan iç kuvvet eleman rijitlik alt matrisleri kullanılarak [SS] matrisinin $[M]^*_{ixix}(s_{j1}, s_{j1})$ terimi, aynı referans noktasına bağlı p düğüm noktasının 2. yerdeğiştirme parametresi doğrultu ve yönünde oluşan iç kuvvet $[M]^*_{ixix}(s_{p2}, s_{j1})$ terimi, k nolu referans noktasına bağlı l düğüm noktasının 1. serbestliği doğrultu ve yönünde oluşan iç kuvvet $[M]^*_{kxix}(s_{l1}, s_{j1})$ terimi, i referans noktasına bağlı p düğüm noktasının referans noktasının serbestliklerinden bağımsız olan 4. serbestliği doğrultu ve yönünde oluşan iç kuvvet $[M]^*_{pxjx}(t_{p4}\ s_{j1})$ terimi olacaktır. Benzer şekilde, k nolu referans noktasına bağlı olan 1 düğüm noktasının referans noktası serbestliklerinden bağımsız olan 3. serbestliğinin birim değerinden dolayı,

referans noktası serbestliklerinden bağımsız olan 7 . serbestliği doğrultu ve yönünde oluşan iç kuvvet $[PP]^{*}_{lxlx}(t_{l7}, t_{l3})$ terimi olup, 1 düğüm noktasının referans noktasına bağlılığından dolayı herhangi bir değişime gerek olmadan sistem rijitlik matrisinde yerine yazılacaktır. Perde ve çubukların birleştiği düğüm noktasına ait satır ve sütunlara hem perdeden hem de çubuktan terimler gelecek olup, üst üste gelen terimler toplanacaktır. Toplama yöntemi ile oluşturulan sistem rijitlik matrisi, n adet düğüm noktalı, r adet referans noktalı sistem için 7(n+r)x7(n+r) şeklinde kurulur. Ancak referans noktalarına bağlı düğüm noktalarının 1., 2. ve 6. serbestliklerine ait terimler, ilgili referans noktasına ait satır ve sütuna taşındığından bu satır ve sütunlar sıfır olacaktır. Ayrıca referans noktalarına ait 3., 4., 5. ve 7. satır ve sütunlar kat döşemelerinin rijit hareketini temsil etmediğinden sıfırdır. Dolayısı ile sistemin bilinmeyenleri, kat hizasındaki döşemelerin rijit hareketini ifade eden referans noktalarının iki öteleme, bir dönme yerdeğiştirme parametresi olmak üzere 3r ve referans noktalarından bağımsız 4n adet düğüm noktası serbestlikleri olmak üzere toplam (4n+3r) adet olacaktır. Böylece sistem rijitlik matrisinin boyutları (4n+3r)x(4n+3r) olarak küçülerek elde edilecektir.

Sadece perdelerin birleştiği düğüm noktalarında 6. yerdeğiştirme parametresi olan düşey eksen etrafında dönme yerdeğiştirmesi perde sonlu elemanın düğüm noktalarında serbestlik olarak seçilmediğinden, sistem rijitlik matrisinde bu yerdeğiştirme parametresine karşı gelen satır ve sütun sıfır olacaktır. Ancak, rijit düzlem içindeki düğüm noktalarının 6. dönme yerdeğiştirme parametresi, rijit düzlemin dönmesi olarak referans noktasına bağlandığından bu husus bir sorun yaratmamaktadır.

Hazırlanan bilgisayar programında sistem rijitlik matrisi, yukarıda anlatıldığı şekilde her düğüm noktasında ve referans noktasında yedi adet bilinmeyen için bulunmakta ve simetri nedeni ile köşegen üstü terimler o satırın ilk terimi olacak şekilde yerleştirilmektedir. Mesnetlenme koşulu nedeni ile sıfır olan yerdeğiştirme bileşenlerine ait satır ve sütunlar, referans noktalarına bağlı düğüm noktalarının 1., 2. ve 6. yerdeğiştirme bileşenlerine ait satır ve sütunlar, referans noktalarına ait 3., 4., 5. ve 7. satır ve sütunlar sıfır olduğundan, bu yerdeğiştirme bileşenlerini tutulu hale getirmek, diğer bir deyişle sıfırlamak için köşegen üzerine bir yazılmakta, denklem takımı küçültülmeden işlem yapılmaktadır.

Referans noktalı sisteme ait denklem takımı, yüklerden ve [d] değerlerinden meydana gelen tesirlerin $[q]^*$ düğüm ve referans noktası yüklerine eşitliği şeklinde, düğüm ve referans noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri doğrultularında yazılan moment ve izdüşüm denge denklemlerinin toplu halde yazılması ile elde edilir:

$$[SS]'.[d]+[P_0]^*=[q]^* \qquad (4.29.)$$

Burada:

[SS] :Sistem rijitlik matrisini,

[Po] :İki ucu ankastre çubukta, ortak sistem eksen takımındaki dış yüklerden meydana gelen çubuk uç kuvvetlerini,

$[q]^*$:Ortak sistem eksen takımında düğüm ve referans noktası yüklerini göstermektedir. [17, 18]

Bu çalışmada perde düğüm noktalarına tekil yüklerin etki ettiği, çubuklar üzerindeki yayılı yüklerin statikçe eşdeğer tekil yüklere dönüştürülebileceği düşünülerek yalnızca tekil yüklerin bulunduğu ve tekil yüklerin etkime noktasının düğüm noktası olduğu kabul edilerek, $[Po]^*$ kullanılmamıştır.

Perde elemanların mesnetlenen düğüm noktalarında sıfırdan farklı bırakılması gereken yerdeğiştirme parametreleri, ortak sistem eksen takımının X eksenine paralel elemanlarda Y ekseni etrafındaki dönme yerdeğiştirme parametresi ile düşey doğrultudaki şekildeğiştirme bileşenidir. Benzer şekilde Y eksenine paralel perde elemanlarda X ekseni etrafındaki dönme yerdeğiştirme parametresi ile düşey doğrultudaki şekildeğiştirme bileşenidir. U, L, T, I şeklindeki perdelerin iki veya daha fazla elemanın farklı açılarla birleştiği köşe noktalarında X ve Y eksenleri etrafındaki dönme yerdeğiştirme bileşenlerinin her ikisinin ve düşey doğrultudaki şekildeğiştirme bileşeninin serbest bırakılması gerekmektedir.

Mesnetlenme koşulu nedeniyle sıfır olan yerdeğiştirme parametrelerine ait olan satır ve sütunlar silinerek, sistem rijitlik matrisi köşegeni üzerine bir yazıldıktan sonra, Gauss eliminasyon yöntemi ile denklem takımı indirgenir ve düğüm noktalarının bağımsız yerdeğiştirme bileşenlerinden oluşan [d]* bulunur. Referans noktasına bağlı düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerine geçiş için, çubuklar için n= i, j, perde sonlu elemanlar için n= i, j, k, 1 olmak üzere,

$$[d]_{nx}=[tt]_n.[d]^*_{nx} \qquad (4.30.)$$

dönüşümü yapılır. Böylece her düğüm noktasında bağımlı ve bağımsız yerdeğiştirme bileşenlerinden oluşan toplam yedi adet yerdeğiştirme parametresi elde edilir.

4.5. Uç Kuvvetlerinin Bulunması

4.5.1. Perde sonlu elemanda iç kuvvetlerin bulunması

Bir perde sonlu elemanın planda farklı açısal konumda bulunabileceği ve bir düğüm noktasının farklı açı ile birleşen birden fazla perde elemana ait olabileceği göz önüne alınmıştır.

Öncelikle, ortak sistem eksen takımında (7 li) bulunan yerdeğiştirme bileşenleri Bölüm 4.1. de anlatıldığı gibi elemanın plandaki açısına bağlı olarak [TTR] dönüştürme matrisi ile çarpılır ve elemana ait (7 li) yerdeğiştirme bileşenleri bulunur. n=i, j, k, 1 olmak üzere,

$$[d]_n'' = [TTR] \cdot [d]_n^* \qquad (4.31.)$$

bulunan bu serbestlikler, perde özel eksen takımı ile ortak sistem eksen takımı arasındaki yönler ve numaralandırma göz önüne alınarak,

$$[d]_n^{**} = [TD] \cdot [d]_n'' \qquad (4.32.)$$

perde özel eksen takımına ait yerdeğiştirme bileşenlerine dönüştürülür. Örneğin; sistem eksen takımındaki 7 no.lu yerdeğiştirme parametresi perde özel eksen takımındaki (6 1ı) 5 nolu yerdeğiştirme parametresine eşittir. Ortak sistem eksen takımındaki düşey eksen etrafındaki 6 no.lu dönme yerdeğiştirme parametresi perde sonlu elemanda bilinmeyen yerdeğiştirme parametresi olarak alınmadığından, sıfırdır, bu nedenle de dönüşüm sonucunda 7. satır sıfır olacağından, perde özel eksen takımında her düğüm noktasında 6 bilinmeyenli yerdeğiştirme bileşenleri [dp] elde edilmiş olur.

Her bir perde elemana ait iç kuvvetler , Bölüm 2. de bulunan 20x24 boyutundaki gerilme matrisi ile eleman düğüm noktalarına ait yerdeğiştirme parametreleri çarpılarak bulunur.

$$[SIGEL]_{20x24} = [B_T]_d \qquad (4.33.)$$

$$[P]_{20xi} = [SIGEL]_{2OX24} \bullet [dp]_{24x1} \qquad (4.34.)$$

Bir düğüm noktası aynı açı ile birleşen birden fazla sonlu elemanın düğüm noktası olabileceğinden, düğüm noktasının ortalama gerilme değerleri, o düğüm noktasında aynı açı ile birleşen sonlu elemanlara ait gerilme değerlerinin ortalaması alınarak bulunur. [17,[20]

4.5.2. Çubuk elemanda uç kuvvetlerinin bulunması

Ortak sistem eksen takımına göre bulunan alt rijitlik matrisleri ile çubuk düğüm noktalarına ait yerdeğiştirme bileşenleri çarpılmak ve sistem eksenlerindeki ankastrelik uç kuvvetleri matrisleri ile toplanmak suretiyle, ortak sistem eksen takımına ait uç kuvvetleri bulunur.

$$[P]_{ix} = [C]_{ixix} \bullet [d]_{ix} + [C]_{ixjx} . [d]_{jx} + [P_0]_{ix} \qquad (4.35.)$$

$$[P]_{jx} = [C]_{jxix} \bullet [d]_{ix} + [C]_{jxjx} \bullet [d]_{jx} + [Pol_{jx}$$

Ortak sistem eksen takımında bulunan, çubuk düğüm noktalarına ait 7. yerdeğiştirme parametresi olan şekildeğiştirme, çubuk özel eksen takımında yerdeğiştirme parametresi olarak seçilmediğinden sıfırdır. Ortak sistem eksen takımında bulunan çubuk uç kuvvetlerinden çubuk sonlu elemana ait özel eksen takımındaki uç kuvvetlerine geçiş için, Bölüm 4.2. de anlatılan [TR] dönüşüm matrisi ile ortak sistem eksen takımında bulunan uç kuvvetleri çarpılır. [18]

$$[P]_i=[TR].[P]_{ix} \qquad (4.36.)$$

$$[P]_j=[TR].[P]_{jx}$$

BÖLÜM 5. PERDELERİN ELASTO-PLASTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

5.1. Homojen, İzotrop, İdeal Elasto-Plastik Malzeme

Çok katlı yapı perdelerinin düzlemi içindeki gerilme durumu, levhalarda düzlemsel gerilme durumunun özel bir halidir. Döşemelerin kat hizalarında rijit diyafram etkisi yapması sonucu perdelerde yatay boy değiştirme şekildeğiştirmesi kat hizalarında sıfır, arada terk edilebilecek mertebede küçük olacaktır. İdeal elasto - plastik malzeme için von Mises hipotezi esas alınarak, akma koşulu bu durumda,

$$\sigma_z^2+3\tau^2 \leq \sigma_e^2 \qquad (5.1.)$$

şeklindedir. Burada σ_z düşey normal gerilmeyi, τ kayma gerilmesini, σ_e tek eksenli akma limitini göstermektedir. Eğilme momenti ve kesme kuvveti etkisindeki dikdörtgen kesitlerde akma koşulunun,

$$M/M_p+0,75.(T/T_p)^2 = 1 \qquad (T \leq T_P/1,5) \qquad (5.2.)$$

olarak elde edilebileceği gösterilmiştir [21]. Ancak bunun bir alt sınır olduğu gerçekte kesitin daha büyük iç kuvvetleri de taşıyabileceği belirtilerek,

$$M/M_p+(T/T_p)^4 = 1 \qquad (T \leq T_P) \qquad (5.2.)$$

bağıntısının kullanılabileceğine dair referans verilmiştir. Burada, F ve W kesitin alanı ve mukavemet momentlerini göstermek üzere,

$$\tau e = \sigma_e/\sqrt{3} \qquad (5.4.)$$

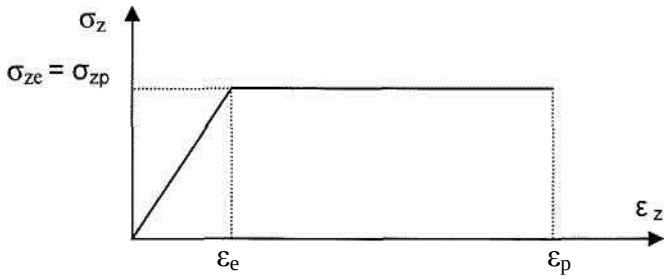
$$T_p = \tau_e.F \qquad (5.5.)$$

$$M_p = 1,5.\ W_e.\sigma_e \qquad (5.6.)$$

şeklindedir.

Bu bağıntılardan tarafsız eksen civarında maksimum değerler alıp uçlarda sıfırlanan kayma gerilmelerinin perdelerde moment taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilemediği, özellikle çok basık olmayan yüksek yapı perdelerinde kayma

etkisi terk edilerek akma koşulları için tek eksenli gerilme haline ait Şekil 5.1. basitleştirici kabulün yapılabileceği sonucu çıkarılabilir.



Şekil 5.1. Perde elemanlarda gerilme - şekildeğiştirme bağıntısı.

Buna göre, ε_e elastik şekildeğiştirme sınırına kadar sistemin her noktasının lineer elastik davrandığı, bu sınırdan sonra artan yükler altında plastikleşen noktalarda σ_z düşey gerilmesinin sabit kaldığı, ε_z şekildeğiştirmesinin ε_P plastik şekildeğiştirme sınırına kadar arttığı kabul edilmektedir.

Elemanlarda yayılı plastik şekildeğiştirmelerin dikkate alınması durumunda, her yük adımında plastik şekildeğiştirme bölgelerinin belirlenmesi ve eleman rijitlik matrisinin buna uygun olarak yeniden hesaplanıp sistem rijitlik matrisinin kurulması gerekecektir. Küçük olmayan yük artımları için bu bölgenin değişimini de dikkate alarak ardışık yaklaşım yapılması zorunludur:. Bu anlamda veya buna eşdeğer ardışık yaklaşım teknikleri ile hesabın yapılışı [25] de açıklanmış ve çeşitli çalışmalar referans verilmiştir. Bu çalışmada, plastik şekildeğiştirmelerin düğüm noktalarında düşey plastik yerdeğiştirmeler olarak toplandığı, düğüm noktaları arasında elemanların lineer elastik kaldığı kabul edilecektir. Çubuklardaki plastik mafsal hipotezinin benzeri olan ve hesabı önemli ölçüde kısaltan bu kabul sonucu eleman ve sistem rijitlik matrisleri değişmemekte, perde düğüm noktalarında düşey şekildeğiştirme ε_e akma sınırına ulaştıktan sonraki yük artımlarında bu düğüm noktalarında rölatif plastik düşey yerdeğiştirmeler ortaya çıkmaktadır.

Örneğin, ε_e akma sınırının aşıldığı düğüm noktası bir mesnet düğüm noktası ise artan yükler için hesapta bu noktadaki düşey mesnet bağı kaldırılıp, bulunacak yerdeğiştirme bu noktanın plastik yerdeğiştirmesi olarak kabul edilecektir.

Genelde tabanından mesnetli konsol gibi çalışan çok katlı yapı perdelerinde göçme iki şekilde oluşmaktadır:

a- Biri hariç bütün mesnet noktalarında plastikleşmenin (düşeyde ayrılma) oluşması (bir nokta etrafında elemanın dönmesi gibi), diğer bir deyişle mesnet düğüm noktalarının ε_e elastik şekildeğiştirme sınırına gelmiş olmaları,

b- Mesnetteki bütün noktalarda, ε_e elastik şekildeğiştirme değerine ulaşılmamış olsa bile, herhangi bir düğüm noktasında ε_P plastik şekildeğiştirme sınırına ulaşılmış olmasıdır.

Bu çalışmada, yük artımı yöntemi yukarıda belirtilen kabullere göre geliştirilmiştir.

5.2. Betonarme Perdeler

Homojen, izotrop malzeme öngörülerek oluşturulan perde sonlu elemanların betonarme malzeme özelliklerini de dikkate alarak kullanımı mümkündür.

5.2.1. Donatı çeliğinin özellikleri

Betonun çekme dayanımı çok düşük olduğundan çekme bölgesindeki gerilmelerin tümüyle çelik donatılarla karşılandığı kabul edilecektir. Çelik çekme ve basınç altında benzer özellikler gösteren bir malzemedir. Pekleşme terk edilerek ideal elasto - plastik malzeme kabulü yapılırsa, çelik için Şekil 5.2. de verilen gerilme şekildeğiştirme diyagramı çizilebilir.

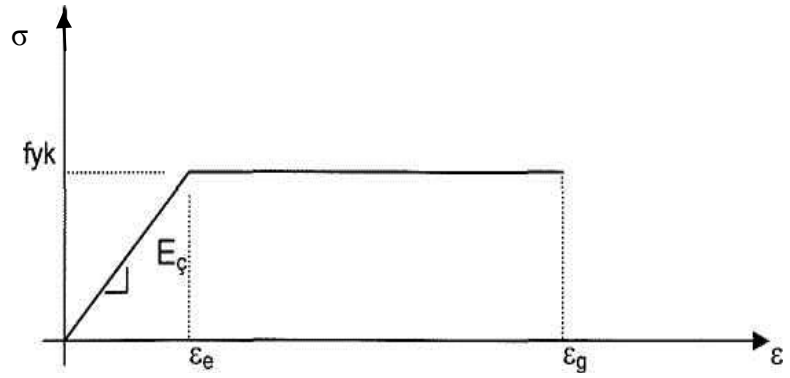
Şekil 5.2. de görüldüğü gibi $\sigma - \varepsilon$ eğrisinin doğrusal elastik olan bölümünün eğimi çeliğin elastisite modülüdür. [16] da beton çeliğinin elastisite modülünün $2.10^6 kgf/cm^2$ ($2.10^5 N/mm^2$) olarak alınması gerektiği belirtilmiştir.

Donatı çeliğinin sınıflarına göre akma sınırına ve kopmaya karşı gelen şekildeğiştirme değerleri değişmektedir. Göçme güvenliğinin belirlenmesinde, gerilme değerleri için malzeme güvenlik katsayıları kullanılmadan malzemenin gerçek davranışına karşı gelen değerlerin kullanılması uygun olacaktır. Örneğin:

BÇI için $f_{yk}=2200\ kgf/cm^2$, $\varepsilon_e = f_{yk}/E_c = 2200/\ 2.10^6 = 0.0011$ $\varepsilon_g = 0.18$

BÇIII için $f_{yk}=4200\ kgf/cm^2$, $\varepsilon_e = f_{yk}/E_c = 4200/\ 2.10^6 = 0.0021$ $\varepsilon_g = 0.12$

şeklinde verilebilir. [21, 22]



Şekil 5.2. İdeal elasto - plastik malzeme olarak donatı çeliğinin gerilme şekildeğiştirme bağıntısı.

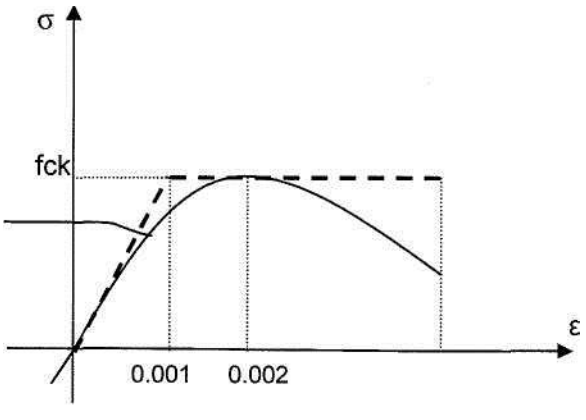
5.2.2. Betonun özellikleri

Normal sargılı betonun davranışını gösteren Şekil 5.3. de görüldüğü gibi eğrinin başlangıç eğimi betonun elastisite modülünü vermektedir. [16] da değişik beton sınıflarına göre elastisite modülü verilmiştir. Düşük dayanımlı betonlar, yüksek dayanımlı betonlara oranla daha fazla sünekliğe sahiptirler. Maksimum gerilmeye karşılık olan birim kısalma beton dayanımından bağımsız olarak 0.002 mertebesindedir. Sargı donatısının artması sünekliği arttırmaktadır. Avrupa beton komitesine göre (CEB), normal sargılı betonda Şekil 5.3. de ikinci derece parabol olarak gösterilen kısım ile birleşen yatay teğet kısım idealleştirilmiş ve ezilmeye karşı gelen boy değişimi 0.003-0.0035 ile sınırlandırılmıştır.

Betonun kayma modülü, elastisite modülünün bir fonksiyonu olup, [16] da Gc yaklaşık olarak,

$$Gc = 0{,}40.Ec \qquad (5.7.)$$

verilmiştir.



Şekil 5.3. Normal sargı donatılı betonun eğilmesinde dış liflerdeki σ-ε bağıntısı.

İdeal elasto plastik malzeme kabulünde Şekil 5.3. de gösterilen başlangıç teğetinin yatay teğeti kestiği noktadaki şekildeğiştirme değeri 0.001 olarak alınarak, her cins beton için elastisite modülü, $E_b = 1000*f_{ck}$ şeklinde hesaplanabilir. Gerilme değerlerinin, malzemenin gerçek davranışını göz önüne almak üzere malzeme katsayılarına bölünmeden alınması uygun olacaktır.

5.2.3. Betonarme perde eleman için malzeme bakımından yapılan kabuller

Homojen kesit kabulü ile rijitlik matrisleri hesaplanmış sonlu elemanların betonarme perdelere uygulanabilmesi için belli bir donatı oranına sahip betonarme kesite karşı gelen eşdeğer bir elastisite modülü tanımlanabilir. Sonlu elemanlar yöntemi ile perde eleman ağı oluşturulurken, kat hizalarındaki perde elemanlar donatı dağılımına göre istenilen sayıya bölünerek uygun çözüm elde edilebilir. Ancak sonlu elemanın çekme veya basınç bölgesinde olması halinde bu eşdeğer elastisite modülleri farklı değerler alacaktır. Homojen kesitin eşdeğer elastisite modülü $E_{eş}$, donatı oranı ρ, perde eleman kalınlığı h olmak üzere, birim perde uzunluğuna gelen normal kuvvet n,

$$n=E_b.h.(l- \rho).\varepsilon+E_ç. h. \rho.\varepsilon = E_{eş}. h.\varepsilon \quad (5.8.)$$

şeklinde yazılabilir. Basınç bölgesinde,

$$E_{eş} =E_b.(l- \rho)+E_ç. P \quad (5.9.)$$

çekme bölgesinde ise çatlamamış kesitte betonun aldığı çekme ihmal edilirse,

$$E_{eş} =E_ç.\rho \quad (5.10.)$$

şeklinde elde edilecektir.

İdeal elasto plastik malzeme ve beton ile çelik arasındaki aderansın tam olduğu kabulüne göre, elastik şekildeğiştirme sınırına karşı gelen ε değerleri, elemanın basınç gerilmesinin etkisi altında bulunması durumunda beton ve çelik aynı kısalmayı yapacak ve betona ait $\varepsilon_e = 0.001$ değerine, çekme gerilmesinin etkisi altında olması durumunda ise beton katkısı olmayacak ve çelik sınıfına bağlı ε_g değerine eşit olacaktır. Göçmeye karşı gelen ε_g değerleri de benzer şekilde belirlenecektir.

Buna göre, eleman rijitlik matrisi hesabında elastisite modülünü, elemanın basınç veya çekme bölgesinde olmasına göre (5.9.) veya (5.10.) formüllerinden alıp, düğüm noktalarında akma sınır boydeğişmeleri için çekme veya basınç

gerilmelerinde farklı değerler vermek koşulu ile bu çalışmada önerilen yöntem betonarme perdelere de uygulanabilir. Ancak, elemanların çekme veya basınç bölgesinde olması başlangıçta bilinmediğinden bir ardışık yaklaşım gerekecektir.

Bu çalışmanın devamında, betonarme malzeme özelliklerinin dikkate alındığı bu anlamda örneklerin çözümüne gidilecektir.

BÖLÜM 6. PERDELERDEN OLUŞAN SİSTEMLERİN GÖÇME YÜK PARAMETRESİNİN BELİRLENMESİNDE İZLENEN YÖNTEM

Sadece mesnet düğüm noktalarında plastikleşmenin oluşabileceği sistemlerde, sistem rijitlik matrisinde plastikleşmenin oluştuğu düğüm noktasında plastikleşme parametresi olarak isimlendirilen o noktadaki düşey yerdeğiştirmenin serbest bırakılması, diğer bir deyişle ona ait satır ve sütunun silinmemesi ile sistem rijitlik matrisi her seferinde yeniden kurularak çözüm elde edilebilir. Ancak plastikleşmenin mesnet düğüm noktaları dışında herhangi bir uç düğüm noktasında oluşması halinde, bu noktaya bağlanmış ve bu noktanın üstündeki elemanların bu noktanın altında kalmış elemanlara göre söz konusu noktada farklı düşey yerdeğiştirme yapabilecek şekilde bir düzenleme gerekecektir. Bu durum matris yerdeğiştirme yönteminin standart sistem rijitlik matrisi oluşturma tekniğine uymamaktadır.

Bu bölümde, perde elemanlardan oluşan yapı sistemlerinin göçme yük parametresinin belirlenmesi için farklı bir yöntem sunulacaktır. Akma sınır şekildeğiştirmesinin aşılarak plastikleşmenin başladığı düğüm noktalarının her biri için elastik hesap sırasında matris yerdeğiştirme yöntemine göre kurulmuş sistem rijitlik matrisine bir satır ve sütun ilave edilerek oluşturulan denklem sistemiyle ΔP yük artımına göre hesap yapılacaktır.

Üzerinde plastikleşen düğüm noktaları bulunan sistemin bilinmeyenleri:

a- Düğüm noktalarının bağlandıkları referans düğüm noktasının yerdeğiştirmelerinden bağımsız olan biri doğrusal (u_z), iki açısal (β_x, β_y) yerdeğiştirmesi ve $d_7=e_z$ boy değişimi olmak üzere toplam dört adet serbestliği ve referans noktalarının rijit düzlem hareketini belirleyen iki doğrusal, bir açısal yerdeğiştirmesi,

b- Perde elemanın elastik şekildeğiştirme sınırını aşan düğüm noktalarının Δ_k plastik şekildeğiştirme parametresi,

olmak üzere iki grupta toplanabilirler.

Bu bilinmeyenleri tayin etmek için:

a- Düğüm noktalarının ve referans noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri doğrultularında yazılan moment ve izdüşüm denge denklemlerinden,

b- Plastik şekildeğiştirmenin oluştuğu düğüm noktasında, o noktanın üstünde kalan ve o noktada birleşen perde sonlu elemanların o noktadaki düşey izdüşüm denge denkleminden yararlanılır.

6.1. Denklem Takımının Oluşturulması

Bölüm 4. de anlatılan denge denklemlerine, plastik şekildeğiştirmenin oluştuğu düğüm noktasının birim düşey yerdeğiştirme değerinden dolayı eleman düğüm noktalarına gelen iç kuvvetleri ilave edilerek denklem takımının bir bölümü (6.1.) elde edilir.

$$[S_{dd}][d] + [S_{d\Delta}][\Delta] = [q] \qquad (6.1)$$

Bu denklemde:

$[S_{dd}]$: Sistem ortak eksen takımında, üzerinde plastik düğüm noktası bulunmayan sistemin referans noktasına bağlanarak küçültülen rijitlik matrisidir. n düğüm noktalı ve r adet referans noktalı (master joint) sistem için (4n+3r) x (4n+3r) boyutundadır. Esas köşegene göre simetriktir. Dış yükler sıfır iken birim yerdeğiştirme bileşenlerinden dolayı, yerdeğiştirme bileşenleri doğrultusunda oluşan iç kuvvetlerini göstermektedir. $[S_{dd}]$ matrisinin toplama yöntemi ile oluşumu Bölüm 4. de anlatılmıştır.

$[q]$: Dış yük matrisi, düğüm noktalarına etkiyen dış yüklerin ortak sistem eksen takımındaki bileşenlerinden meydana gelen (4n+3r) elemanlı bir kolon matristir.

$[\Delta]$: Ortak sistem eksen takımında, elastik şekildeğiştirme sınırını aşan düğüm noktalarındaki plastik şekildeğiştirme parametreleri olup, m adet plastikleşen düğüm noktası için m adetli kolon matristir.

$[S_{d\Delta}]$: Sistem ortak eksen takımında, plastik şekildeğiştirmenin oluştuğu düğüm noktasında düşey doğrultudaki plastik yerdeğiştirmenin birim değerinden dolayı o noktanın üstündeki perde elemanların düğüm noktalarında oluşan ilave iç kuvvetleri matrisidir. Üzerinde m sayılı plastikleşen düğüm noktası, r adet referans noktası ve n adet düğüm noktası bulunan uzay sistemde, pek çok terimi sıfır

olmakla birlikte bu matrisin boyutu (4n+3r) x m dir. $[S_{d\Delta}]$ matrisinin k sayılı kolonu, k sayılı plastikleşen düğüm noktasının plastik yerdeğiştirmesinin $\Delta k = 1$ değeri için, (diğer plastikleşen düğüm noktalarındaki plastik yerdeğiştirmeler ve düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken) k noktasına üstten bağlanan perde elemanların düğüm noktalarına etkiyen iç kuvvetlerinden oluşmaktadır.

$[S_{d\Delta}]$ matrisinin k sayılı kolonunun elde edilmesi için, plastikleşmenin başladığı düğüm noktasının, elemanın hangi düğüm noktası olduğunun belirlenerek, Bölüm 2. de anlatılan perde eleman alt rijitlik matrislerinden yararlanılacaktır. Örneğin plastikleşmenin perde elemanın I düğüm noktasında olması durumunda $[K]_{11}$, $[K]_{21}$, $[K]_{31}$ ve $[K]_{41}$ alt matrislerinin, perde eleman özel eksen takımındaki 2 nolu düşey yerdeğiştirme parametresinin birim değerinden dolayı oluşan düğüm noktası iç kuvvetlerini veren 2. kolonları alınacaktır. Buna göre $D=E.h/(1-\upsilon^2)$ olmak üzere, plastikleşme perde elemanın I düğüm noktasında ise,

$$[K_{1\Delta}] = \begin{bmatrix} (\upsilon + (1-\upsilon)/2)/4 \\ 2a/5b + 13b(1-\upsilon)/70a \\ 0 \\ -b\cdot(\upsilon - (1-\upsilon)/2)/20 \\ -a/30 - 11\cdot(1-\upsilon)\cdot b^2/420a \\ 0 \end{bmatrix} \cdot D$$

$$[K_{2\Delta}] = \begin{bmatrix} (\upsilon - (1-\upsilon)/2)/4 \\ a/5b - 13b(1-\upsilon)/70a \\ 0 \\ b\cdot(\upsilon + (1-\upsilon)/2)/20 \\ -a/60 - 11\cdot(1-\upsilon)\cdot b^2/420a \\ 0 \end{bmatrix} \cdot D \qquad (6.2.a.)$$

$$[K_{3\Delta}] = \begin{bmatrix} (\upsilon - (1-\upsilon)/2)/4 \\ -2a/5b + 9b(1-\upsilon)/140a \\ 0 \\ b\cdot(\upsilon - (1-\upsilon)/2)/20 \\ -a/30 - 13\cdot(1-\upsilon)\cdot b^2/840a \\ 0 \end{bmatrix} \cdot D$$

$$[K_{4\Delta}] = \begin{bmatrix} -(\upsilon + (1-\upsilon)/2/4 \\ -a/5b - 9b(1-\upsilon)/140a \\ 0 \\ -b\cdot(\upsilon + (1-\upsilon)/2)/20 \\ -a/60 - 13\cdot(1-\upsilon)\cdot b^2/840a \\ 0 \end{bmatrix} \cdot D$$

plastikleşme perde elemanın J düğüm noktasında ise,

$$[K_{1\Delta}] = \begin{bmatrix} (\upsilon -(1-\upsilon)/2)/4 \\ a/5b - 13b(1-\upsilon)/70a \\ 0 \\ -b\cdot(\upsilon + (1-\upsilon)/2)/20 \\ -a/60 - 11\cdot(1-\upsilon)\cdot b^2/420a \\ 0 \end{bmatrix} \cdot D$$

$$[K_{2\Delta}] = \begin{bmatrix} -(\upsilon + (1-\upsilon)/2)/4 \\ 2a/5b + 13b(1-\upsilon)/70a \\ 0 \\ b\cdot(\upsilon - (1-\upsilon)/2)/20 \\ -a/30 - 11\cdot(1-\upsilon)\cdot b^2/420a \\ 0 \end{bmatrix} \cdot D \qquad (6.2.b.)$$

$$[K_{3\Delta}] = \begin{bmatrix} (\upsilon + (1-\upsilon)/2)/4 \\ -a/5b - 9b(1-\upsilon)/140a \\ 0 \\ b\cdot(\upsilon - (1-\upsilon)/2)/20 \\ -a/60 - 13\cdot(1-\upsilon)\cdot b^2/840a \\ 0 \end{bmatrix} \cdot D$$

$$[K_{4\Delta}] = \begin{bmatrix} -(\upsilon - (1-\upsilon)/2)/4 \\ -2a/5b + 9b(1-\upsilon)/140a \\ 0 \\ -b\cdot(\upsilon - (1-\upsilon)/2)/20 \\ -a/30 - 13\cdot(1-\upsilon)\cdot b^2/840a \\ 0 \end{bmatrix} \cdot D$$

plastikleşme perde elemanın K ve L düğüm noktasında ise herhangi bir işlem yapılmayacaktır. 6.2.a. ve 6.2.b. formüllerinden ve plastikleşen düğüm noktasını ifade eden n=I, J olmak üzere, $[K_{d\Delta}]_n$ matrisi,

$$[K_{d\Delta}]_{n24\times1} = \begin{bmatrix} [K_{1\Delta}] \\ [K_{2\Delta}] \\ [K_{3\Delta}] \\ [K_{4\Delta}] \end{bmatrix}_n \tag{6.3.}$$

şeklinde perde özel eksen takımındaki değerleri ile elde edilir. Ortak sistem eksen takımına dönüştürülmesi Bölüm 4. de anlatıldığı şekilde yerdeğiştirme bileşenlerinin yönleri ve numaralanış sırası göz önüne alınarak,

$$[TDD]_{28\times24} = \begin{bmatrix} [TD]^T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [TD]^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [TD]^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [TD]^T \end{bmatrix} \tag{6.4.a.}$$

matrisi kullanılarak,

$$[K_{d\Delta}]_{n^*\,28x1} = (-1) \bullet [TDD]_{\,28x24} \,.\, [K_{d\Delta}]_{n24x1} \tag{6.4.b.}$$

$[K_{d\Delta}]_n$ matrisi $[K_{d\Delta}]_n^*$ matrisi haline dönüşecektir. Terimlerin (-1) ile çarpılmasının nedeni perde özel eksen takımındaki düşey yerdeğiştirme parametresi yönünün, ortak sistem eksen takımındaki ile ters olmasındandır. $[K_{d\Delta}]_n^*$ matrisinin her bir alt matrisi 7 elemanlı kolon matris olup, aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$[K_{d\Delta}]_n^* = \begin{bmatrix} [K_{1\Delta}]^* \\ [K_{2\Delta}]^* \\ [K_{3\Delta}]^* \\ [K_{4\Delta}]^* \end{bmatrix}_n \tag{6.5.}$$

Perde elemanın yatayla farklı açılar yapabileceği göz önüne alınarak, $[K_{d\Delta}]_n^*$ matrisinin, Bölüm 4.2.2. de açıklandığı şekilde, [TR] dönüştürme matrisinden oluşan [TN] matrisi ile çarpılması gerekmektedir. Buna göre,

$$[TN] = \begin{bmatrix} [TR] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [TR] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [TR] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [TR] \end{bmatrix} \tag{6.6.a.}$$

$$\left[EK_{d\Delta}\right]_n = \begin{bmatrix} \left[EK_{1\Delta}\right] \\ \left[EK_{2\Delta}\right] \\ \left[EK_{3\Delta}\right] \\ \left[EK_{4\Delta}\right] \end{bmatrix}_n \qquad (6.6.b.)$$

olmak üzere,

$$[EK_{d\Delta}]_{n28xl} = [TN]_{28x28} \bullet [K_{d\Delta}]_{n^* 28x1} \qquad (6.7.)$$

şeklini alacaktır. Daha sonra bu alt matrisler düğüm noktalarının referans noktasına bağlılığı da göz önüne alınarak , rijit düzlem içinde düğüm noktası bulunan perde sonlu elemanların $[EK_{1\Delta}]$, $[EK_{2\Delta}]$, $[EK_{3\Delta}]$ ve $[EK_{4\Delta}]$ iç kuvvetleri matrisleri $[tt]^T$ matrisleri ile çarpılarak, m= 1,2,3,4 olmak üzere,

$$[EK_{m\Delta}]^*_{7x1} = [tt]^T_{7x7} . [EK_{m\Delta}]_{7x1} \qquad (6.8.)$$

şeklinde, seçilen referans noktasına bağlılığı ifade eden $[EK_{m\Delta}]^*$ matrislerine dönüştürülür. Bu alt matrisler, $[S_{d\Delta}]$ matrislerinde ilgili yerlere yazılır.

Yukarıda sözü edilen, (6.1.) denklemlerine ilave olarak, plastikleşen düğüm noktalarındaki plastik yerdeğiştirme parametresini bulabilmek amacı ile, plastikleşme parametresi doğrultusunda (düşey doğrultuda) (6.9.) denge denklemi ilave edilir.

$$[S_{\Delta d}][d] + [S_{\Delta\Delta}][\Delta] = [0] \qquad (6.9)$$

Böylece denklem takımı kurulmuş olur. Burada:

$[S_{\Delta d}]$: Sistem ortak eksen takımında, dış yüksüz sistemde plastik şekildeğiştirmeler sıfır iken, yalnız düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden dolayı plastikleşen düğüm noktalarında oluşan iç kuvvetleri gösteren bir matristir. m adet plastikleşen düğüm noktası, n adet düğüm noktası ve r adet referans noktası bulunan sistem için m x (4n+3r) boyutundadır. Betti karşıtlık teoremi uyarınca,

$$[S_{\Delta d}] = [S_{d\Delta}]^T \qquad (6.10.)$$

olduğundan ayrıca hesaplanmasına gerek yoktur.

$[S_{\Delta\Delta}]$: m adet plastikleşen düğüm noktası için m x m boyutunda kare matristir. Bu matrisin k sayılı kolonu dış yüksüz sistemde düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken k sayılı plastikleşen düğüm noktasındaki plastikleşme

parametresinin birim değeri için tüm plastikleşen düğüm noktalarındaki iç kuvvet değişimini göstermektedir. Betti karşıtlık teoremi uyarınca esas köşegene göre simetriktir. Esas köşegen üzerindeki terimler dışındaki terimler genelde sıfırdır. Eğer bir perde sonlu elemanda iki alt düğüm noktasında da plastikleşme oluşuyorsa, köşegen üzerindeki terimler dışındaki terimlerden ilgili olanları sıfırdan farklı olacaktır. şöyle ki, yeni plastikleşen düğüm noktası sonlu elemanın I düğüm noktası ve daha önce J düğüm noktasında m. plastikleşme var ise, k. plastik yerdeğiştirme parametresi için,

eski plastikleşen düğüm noktası, J düğüm noktası ise $[S_{\Delta\Delta}]\ (m,k) = [K_{2\Delta}](2,1)$

köşegen üzerindeki terim $[S_{\Delta\Delta}]\ (k,k) = [K_{1\Delta}](2,1)$ (6.11.a.)

yeni plastikleşen düğüm noktası sonlu elemanın J düğüm noktası ve daha önce I düğüm noktasında m. plastikleşme var ise, k. plastik yerdeğiştirme parametresi için,

eski plastikleşen düğüm noktası, I düğüm noktası ise $[S_{\Delta\Delta}]\ (m,k) = [K_{1\Delta}]\ (2,l)$

köşegen üzerindeki terim $[S_{\Delta\Delta}]\ (k,k) = [K_{2\Delta}]\ (2,1)$ (6.11.b.)

elde edilir. Plastikleşme parametrelerinin düşey yerdeğiştirme bileşenleri olması nedeniyle, $[S_{\Delta\Delta}]$ matrisinin elde edilmesinde herhangi bir dönüştürme işlemi yapılmasına gerek yoktur.

Yukarıda açıklanan denge denklemleri ve akma koşulları bir arada yazıldığında, sisteme ait genişletilmiş denklem takımı elde edilir.

$$\begin{bmatrix} [S_{dd}] & [S_{d\Delta}] \\ [S_{\Delta d}] & [S_{\Delta\Delta}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [d] \\ [\Delta] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [q] \\ [0] \end{bmatrix} \qquad (6.12.)$$

Buradaki katsayılar matrisi (4n+3r+m) x (4n+3r+m) boyutunda ve esas köşegene göre simetriktir.

6.1.1. Özel durumların incelenmesi

Perde sonlu elemanlardan oluşan sistemde, sistemin geometrik bakımından simetrik ve yükleme bakımından antimetrik olması gibi durumlarda, herhangi bir yük parametresinde aynı anda birden fazla düğüm noktasında simetrik plastikleşme oluşabilir. Bu durumda da elastik hesaba ait denklem takımına bir tek plastikleşme parametresi için bir satır ve sütun ilave edilecek olup, plastikleşen düğüm

noktalarında antimetriden dolayı, plastikleşme parametreleri birbirine mutlak değerce eşit olacaktır. Plastikleşen düğüm noktasının düşey doğrultudaki birim yerdeğiştirme durumundan düğüm noktalarında ve plastikleşen düğüm noktalarında meydana gelen iç kuvvetler, plastikleşen düğüm noktalarındaki d_7 şekildeğiştirme yerdeğiştirme parametresinin işareti ile çarpılmalı, simetrinin bozulmaması için düğüm noktalarında oluşan iç kuvvetler ters işaretli olarak sisteme ilave edilmelidir. Bunun matematiksel anlamı ise, bir denklem takımının herhangi bir satır veya sütunu, herhangi bir sayı ile çarpılıp, herhangi bir satır veya sütun ile toplanabilir, şeklinde açıklanabilir.

6.2. Denklem Takımının Çözümü Ve Bilinmeyenlerin Bulunması

Üzerinde plastikleşen düğüm noktaları bulunan sisteme ait genişletilmiş denklem takımı Bölüm 6.1. de belirlenmiştir. Bu denklem takımının çözümünde elastik hesap için ve daha önceki plastikleşen düğüm noktaları için indirgenmiş olan satır ve sütunlar tekrar Gauss eliminasyon yöntemi ile indirgenmeyecek olup, sadece yeni oluşan k sayılı plastikleşen düğüm noktasına ait $[S_{\Delta d}]$, $[S_{d\Delta}]$ ve $[S_{\Delta\Delta}]$ matrislerinin satır ve sütunları hesaplanarak denklem takımına ilave edilir. Başlangıçta sıfır olan serbestliklere ait olan satır ve sütunların ek kolon ve satıra karşı gelen terimleri sıfırlanır. İlave edilen satır ve sütun Gauss eliminasyon yöntemi ile indirgenecektir.

Ayrıca her artım yük parametresinde sabitler kolonunun yeni satırı indirgenecektir. Denklem takımının çözümü sonucu artım yük parametresi için, ilave bağımsız serbestlikler ve plastikleşen düğüm noktalarına ait ilave plastikleşme parametreleri elde edilecektir. Bölüm 4. de anlatıldığı gibi dönüştürme matrisleri ile ilave bağımsız serbestliklerden, ilave bağımlı ve bağımsız serbestlikler hesaplanacaktır. Plastikleşme parametresi olan düşey doğrultudaki ilave yerdeğiştirmeden dolayı plastikleşen düğüm noktalarındaki ilave şekildeğiştirmeler eleman rijitlik matrisinin ilgili terimleri kullanılarak bulunur ve hesap sonucu plastikleşen düğüm noktalarına ait d_7 şekildeğiştirme bileşenleri ile toplanarak, plastikleşen düğüm noktalarındaki d_7 şekildeğiştirmeleri o adım için bulunur.

Toplam yük parametresine ait düğüm noktaları serbestlikleri ve plastikleşen düğüm noktalarına ait plastikleşme parametreleri, o adıma kadar elde edilen değerlerin toplamı ile elde edilecektir. n adım için k. plastikleşen düğüm noktasına ait toplam

plastikleşme parametresi Δ_k ve i düğüm noktasındaki n. adım için toplam serbestlik değerleri $[D_i]_n$ olmak üzere,

$$\Delta_{k,n} = \sum_{t=k+1}^{n} \Delta_{k,t} \qquad (6.13.a.)$$

$$[D_i]_n = \sum_{m=1}^{n} [D_i]_m \qquad (6.13.b.)$$

şeklinde ifade edilir.

6.3. Düğüm Noktasındaki Gerilmelerin Hesabı

İlave yük parametresi için ortak sistem eksen takımında bulunan ilave yerdeğiştirme bileşenleri Bölüm 4. de anlatıldığı gibi, dönüştürme matrisleri ile elemanın planda farklı açı ile bulunabileceği düşünülerek eleman (7 li) eksen takımına, daha sonra perde sonlu eleman özel eksen takımına (6 lı) dönüştürülür.

6.3.1. Plastikleşen düğüm noktalarındaki plastikleşme parametrelerinden sonlu eleman düğüm noktalarında oluşan gerilmelerin hesabı

Perde sonlu elemanın plastikleşen düğüm noktasının plastikleşme parametresinden dolayı eleman düğüm noktalarında oluşan gerilmeleri, Bölüm 2. de anlatılan $[B_T]$ alt matrislerinin d_2=l birim yerdeğiştirme durumuna karşı gelen 2. kolon elemanlarının ters işaretlisi vermektedir. Ters işaretli seçilmesinin nedeni ortak sistem eksen takımına göre hesaplanan plastikleşmeye ait düşey yerdeğiştirmenin perdeye ait özel eksen takımının pozitif yönüyle ters işaretli olmasıdır. Buna göre, plastikleşen düğüm noktası elemanın n=I düğüm noktası ise,

I ve J düğüm noktasında, $[SGP](3,1) = -D^*(l-\upsilon)/2a$ (6.14.a.)

Plastikleşen düğüm noktası elemanın n=J düğüm noktası ise,

I ve J düğüm noktasında, $[SGP](3,1) = D^*(l-\upsilon)/2a$ (6.14.b.)

ilave gerilme değerleri elde edilecektir. $[SGP]_n$ alt matrisi 5 elemanlı kolon matris olup, bunun dışındaki diğer elemanlar sıfırdır. K. plastikleşen düğüm noktasındaki plastikleşme parametresinin birim değerinden dolayı sonlu elemanın düğüm noktalarında oluşan gerilme matrisi,

$$[SGPP]_k = \begin{bmatrix} [SGP]_i \\ [SGP]_j \\ [SGP]_k \\ [SGP]_l \end{bmatrix}_{20\times 1} \tag{6.15.}$$

şeklinde ifade edilir.

6.3.2. Her adıma ait düğüm noktası toplam gerilmelerinin hesabı

Her perde sonlu eleman için, ilave düğüm noktası yerdeğiştirme parametreleri [dp'] ile Bölüm 2. de anlatılan eleman gerilme matrisi [SIGEL] çarpılır, bir düğüm noktasında birden fazla sonlu elemanın birleşmesi halinde elemanlardan gelen değerlerin ortalaması alınır ve ilave gerilme değerleri elde edilir. Aynı adımda plastikleşen düğüm noktalarının ilave plastikleşme parametrelerinden dolayı, ait olduğu elemanın düğüm noktalarında oluşan ilave gerilme değerleri, [SGPP] gerilme matrisi ile plastikleşme parametresi çarpılarak bulunur, düğüm noktası ilave yerdeğiştirme parametrelerinden oluşan değerler ile toplanır. K. plastikleşen düğüm noktasına ait gerilme matrisi [SGPP] ve plastikleşme parametresi PPD olmak üzere ilave gerilme değerleri $[P']_{20x1}$:

$$[P']_{20\times 1} = [SIGEL]^*_{20\times 24} \cdot [dp']_{24\times 1} + \sum_{n=1}^{K} [SGPP]_{20\times 1} \cdot PPD \tag{6.16.a.}$$

şeklinde elde edilir.

Özel durum olarak Bölüm 6.1.1. de anlatılan simetrik sistemler de olduğu gibi aynı anda birden fazla simetrik plastikleşen düğüm noktası olması durumunda, sistem rijitlik matrisine mutlak değerce birbirine eşit tek plastikleşme parametresine ait bir satır ve bir sütun eklenmesi çözümü için, [SGPP] gerilme matrisinin, ilave plastikleşme parametresi ve plastikleşen düğüm noktasının ortak sistem eksen takımındaki dy şekildeğiştirme bileşeninin işareti ile çarpılarak, düğüm noktası $[dp']_{24x1}$ ilave yerdeğiştirme parametrelerinden oluşan değerlerle toplanması gerekmektedir. d_7 şekildeğiştirme bileşeninin işareti NDC olmak üzerek. plastikleşen düğüm noktasının bulunduğu sonlu elemandaki ilave gerilme değerleri,

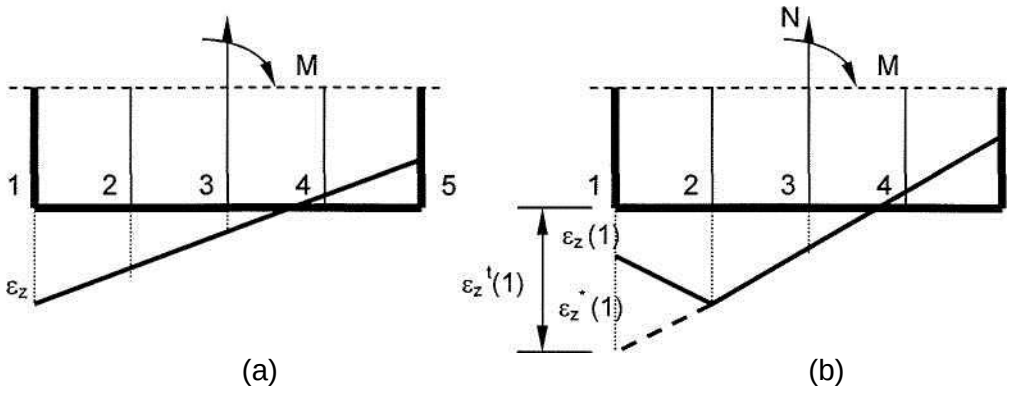
$$[P']_{20\times 1} = [SIGEL]^*_{20\times 24} \cdot [dp']_{24\times 1} + \sum_{n=1}^{K} [SGPP]_{20\times 1} \cdot PPD \cdot NDC \tag{6.16.b.}$$

şeklinde elde edilir. İdeal elasto plastik malzemenin elastik sınırdan sonraki davranışı gereği, yatay doğrunun eğimi olan EF boy değişimi rijitliği sıfır olacağından $[SIGEL]^*$ matrisinde, plastikleşen düğüm noktasında düşey doğrultuda gerilme yaratan terimin sıfır alınması gerekmektedir. Her ilave yük parametresi sonucu oluşan gerilmeler daha önceki adımlara ait ilave yük parametreleri için bulunan değerler ile toplanarak toplam gerilme değerleri elde edilir. Perde özel eksen takımında, m nolu eleman ve n adet adım için aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$[P]_{m,n} = \sum_{t=1}^{n} [P']_m^k \qquad (6.17.)$$

6.3.3. Plastikleşen düğüm noktalarında toplam ε_z şekildeğiştirmesinin bulunması

Şekil 5.1. deki ε_e elastik şekil değiştirme sınırının aşılarak, plastik yerdeğiştirmelerin oluştuğu bir perde düğüm noktasında üst elemanlar ile alt elemanların birleştiği noktalar arasında bir düşey düğüm noktası kuvveti kalmadığından bu noktada normal gerilme ve ε_z şekildeğiştirmesinde artan yükler için hesapta bir azalma görülür.



Şekil 6.1. Plastikleşen düğüm noktalarında toplam şekildeğiştirme.

Örneğin yanyana gelmiş dört elemanla idealleştirilmiş bir perdede önce 1 noktasında ε_e akma sınır değerine ulaşıldığı varsayılırsa, akma sınırına ulaşılıncaya kadar yatay perde kesitindeki ε_z değerleri Şekil 6. 1.a. daki gibi yaklaşık lineer değişirken, akma sınırının üstündeki artan yükler için 1 noktasının düşey yerdeğiştirmesinin serbest hale gelmesi nedeniyle ε_z (1) de küçülme ve perde yatay kesiti boyunca lineer değişimin bozulması durumu ortaya çıkar. Bu husus akma sınır değeri aşıldıktan sonra plastik şekildeğiştirmelerin 1 noktasında plastik bir düşey yerdeğiştirme olarak toplanması kabulünden ileri gelmektedir. Gerçekte ise, bu anlamda bir yerdeğiştirme olmayıp, ε_z (1)> ε_e için artan yükler altında Şekil 5.1.

deki gibi ε_z (1) artarken elastisite modülü E=0. olması nedeniyle düşey gerilmenin oluşmaması söz konusudur. ε_z (1)' in hesapla bulunan değerinden, Şekil 6.1.b. deki nokta nokta gösterilmiş gerçek değerine yaklaşık olarak geçebilmek için eleman rijitlik matrisinin ε_z (1)' e ait satırında gerçekte olmayan ama hesapla bulunan ($d_{2,p}$) plastik yerdeğiştirmesinin (-) eksi işaretlisinin etkisini alıp, bunun vereceği ilave ε_z^*(l)' in bulunması gerekir. Şekil 2.1.a. da gösterilmiş eleman özel eksen takımındaki işaret kuralı ve serbestliklerin numaralandırılması sırasına uygun olarak,

$$k_{52}.(-d_{2,p}) + k_{55}.\varepsilon_z^*(l) = 0. \qquad (6.18.)$$

bağıntısından,

$$\varepsilon_z^*(l) = (k_{52} / k_{55}).d_2,p \qquad (6.19.)$$

bulunur. Tablo 4.2.a. da verilen rijitlik matrisi terimlerinin açık ifadesinden,

$$\varepsilon_z^*(1) = \frac{-[a/30 + 11(1-\upsilon)b^2/420a]}{[2ab/45 + (1-\upsilon)b^3/210a]} d_{2,p} \qquad (6.20.)$$

bulunur, kısaltma yapılarak düzenlenirse,

$$\varepsilon_z^*(1) = -0.,75b \frac{[1 + 11(1-\upsilon)b^2/14a^2]}{[1 + 1,5(1-\upsilon)b^2/14a^2]} d_{2,p} \qquad (6.21.)$$

çıkar. Burada b, a perde elemanın yüksekliği ve genişliği, υ poisson oranıdır. Ortak sistem eksen takımındaki (Şekil 4.1.b.) yerdeğiştirme parametresi numara sırası ve pozitif yön kabulü uygulanırsa formül işareti değişerek,

$$d_7^* = \varepsilon_z^*(1) = (0.,75b) \frac{[1 + 11(1-\upsilon)b^2/14a^2]}{[1 + 1,5(1-\upsilon)b^2/14a^2]} d_{3,p} \qquad (6.22.)$$

olur. Toplam şekildeğiştirme,

$$d_7^t = \varepsilon_Z^t(1) = \varepsilon_z(l) + \varepsilon_z^*(l) = d_7 + d_7^* \qquad (6.23.)$$

olup, bu noktada maksimum plastik şekildeğiştirme limitine (ε_p) ulaşma kontrolü bu toplam $d_7^t = \varepsilon_z^t$(l) şekildeğiştirmesi ile yapılmalıdır.

6.4. Perdelerden Oluşan Sistemin Göçme Güvenliğinin Belirlenmesinde Yük Artımı Yöntemi

1. Sisteme etki eden düşey yükler yeter sayıda statikçe eşdeğer tekil kuvvetlere dönüştürülür. Yatay yükler kat seviyelerindeki referans noktasına etki ettirilir.Referans noktasına bağlı olmayan düğüm noktalarındaki yükler aynen alınır.

2. Düşey yükler ve düşey yüklerden oluşan momentler, yatay yükler ve yatay yüklerden oluşan momentler olmak üzere yükler iki gruba ayrılır.

3. Birinci adımda, düşey yükler 1.0 düşey yük katsayısı ile çarpılarak sisteme etki ettirilir ve sisteme ait rijitlik ve yükleme matrisi, referans noktasına bağlılık göz önüne alınarak oluşturulur. Düşey yük grubu için sistem çözülerek, düğüm noktalarına ait sistem ortak eksen takımındaki yerdeğiştirme bileşenleri bulunur. Eleman özel eksen takımındaki değerlere dönüştürülerek düğüm noktaları ortalama kuvvet bileşenleri hesaplanır.

4. Düşey yükler altında düğüm noktalarının d_7 şekildeğiştirme bileşeninin elastik sınırı aşmaması tercih edilir.

5. İkinci adımda, yatay yük grubu başlangıç yatay yük parametresi 1 alınarak sistem çözülür. Düğüm noktalarına ait ilave yerdeğiştirme bileşenleri ve iç kuvvetler bulunur. İkinci adıma ait çözüm birinci adımdaki değerlere ikinci adımda bulunan çözümün bir yük parametresi ile çarpılarak toplanmasıyla elde edilecektir. Bu yük parametresi hiçbir düğüm noktasında toplam d_7 şekildeğiştirme bileşeninin ε_e akma sınır şekildeğiştirmesini aşmamasını ve en azından bir noktada (aynı yük parametresi değeri için birkaç noktada bu sınır değere ulaşılması mümkündür) bu değere ulaşılmasını sağlayacak şekilde seçilmelidir. Bunun için, her düğüm noktasının elastik şekildeğiştirme sınırına erişebilmesi için gerekli yük parametresi katsayısı ayrı ayrı belirlenir. Bulunan katsayılar içinde en küçüğü plastikleşmenin oluşacağı düğüm noktasını veya noktalarını ve ilave yatay yük parametresini verir.

6. İkinci adıma ait çözüm bu yük parametresi ile çarpılıp birinci adıma ait çözüme ilave edilerek ilk plastikleşmenin oluştuğu yatay yük parametresine ait düğüm noktası serbestlikleri ve kuvvetleri bulunur.

7. Adım bir arttırılır. Plastikleşen düğüm noktalarından dolayı elastik sisteme ait [SS] rijitlik matrisine ilave edilmesi gereken satır ve sütunlar belirlenir. [SS] indirgenmiş olduğundan sadece yeni ilave edilen kolon ve satırlar indirgenir. Birim yatay yük parametresi için sabitler kolonunda ilave edilmiş satır veya satırlar için indirgeme devam ettirilir. Determinant kontrolü yapılarak sistemin yükleri taşıyıp taşıyamadığı kontrol edilir. Yerine koyma işlemi yapılarak, plastikleşen sisteme ait birim yatay yük parametresi için ilave düğüm noktası yerdeğiştirme bileşenleri ve plastikleşen düğüm noktasına ait plastikleşme parametresi bulunur. Plastikleşme parametresi olan düşey doğrultudaki ilave yerdeğiştirmeden dolayı plastikleşen düğüm noktalarındaki ilave şekildeğiştirmeler perde eleman rijitlik matrisinin ilgili terimleri kullanılarak, formül 6.22. ve 6.23. ile, o adım için bulunur.

8. Bir düğüm noktasında plastikleşme oluşmuş elemanda uç kuvvetleri bulunurken, düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden oluşan gerilmeler ile plastikleşme parametrelerinden oluşan gerilmeler toplanır. Özel durum olarak, aynı anda birden fazla plastikleşen düğüm noktası için tek plastikleşme parametresi kullanılması halinde, bulunan tek plastikleşme parametresi plastikleşen düğüm noktalarının d_7 şekildeğiştirme bileşeninin işareti ile çarpılarak göz önüne alınır.

9. Yeni plastikleşecek düğüm noktaları, sayısı, ilave yatay yük parametresi belirlenir. İşlemler 5 nci maddeden itibaren yinelenir.

10. Her adım sonunda bulunan düğüm noktalarına ait d_7 şekildeğiştirme bileşeninin, ε_p göçme şekildeğiştirme sınır değerini aşıp aşmadığı kontrol edilir.

11. Sistemin kısmi veya tamamen mekanizma durumuna gelip gelmediğinin kontrolü için, sistem matrisinde determinant değerinin çok küçülmesi veya işaret değiştirmesine bakılabilir. Ayrıca, artan yatay yük parametresi altında çözümü yapılan plastikleşen sistemde en büyük yatay yerdeğiştirmeninin oluşabileceği referans noktasının herhangi bir adımdaki ilave yatay yerdeğiştirme parametresinin işaret değiştirip değiştirmediğine bakılarak sistemin mekanizma durumuna gelip gelmediği kontrol edilebilir. Yapı

sistemlerinde göçme nedenlerinden birisi de, belirli bir sınır değer verilmesi durumunda, en büyük yatay yerdeğiştirmeyi yapacak olan tepe noktasının, bu değere erişmiş olmasıdır.

12. Perdelerden oluşan sistemlerde göçme, her perdede mesnet düğüm noktalarının biri hariç hepsinde elastik şekildeğiştirme sınırına erişilmesi veya aşılması ile ya da elastik şekildeğiştirme sınırına erişmemiş düğüm noktaları olsa bile plastikleşen düğüm noktasının birinde göçme şekildeğiştirme sınırına ulaşılması durumunda oluşur.

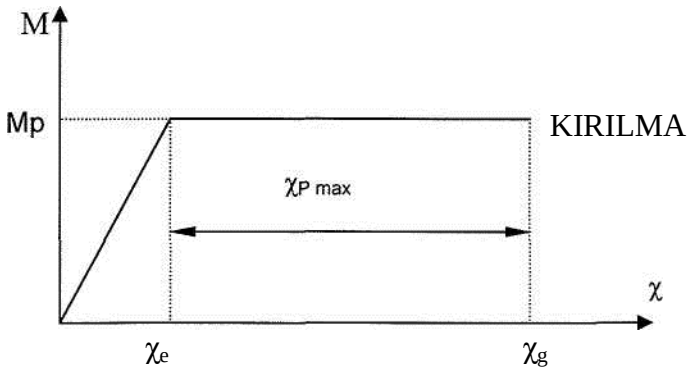
BÖLÜM 7. ÇUBUK ELEMANLARIN PLASTİKLEŞMESİNDE İZLENEN YÖNTEM

Çubuk elemanlardan oluşan yapı sistemlerinin göçme güvenliğinin belirlenmesi için Bölüm 6. da izlenen yöntemin benzeri uygulanacak olup, bu bölümde, çubukta plastikleşme oluşması durumunda sistem rijitlik matrisine ilave edilmesi gereken terimler açıklanacaktır.

Çubuk sonlu elemanlarda plastikleşmenin, eğik eğilme ve normal kuvvet etkisi altında eğilme dönmesinden ve/veya burulma momenti etkisi altında burulma dönmesinden dolayı oluştuğu kabul edilmiştir. Söz konusu iki durum, bu bölümde ayrı ayrı açıklanacaktır.

7.1. Kirişlerde İç Kuvvet Şekildeğiştirme Bağıntısı

Kat döşemelerinin rijit diyafram etkisi yaptığı dikkate alınırsa, döşeme düzlemi içindeki kirişlerde yalnızca tek eksenli eğilme ve burulma momentinin oluşacağı görülebilir. Her iki tesirin karşılıklı etkisi terk edilirse, ideal elasto - plastik M - χ bağıntısı Şekil 7.1. deki gibidir.



Şekil. 7.1. Kirişlerde iç kuvvet (M) şekildeğiştirme (χ) bağıntısı.

Yeter derecede süneklik özelliği gösteren ve plastik bölge uzunluğu L_p nin çok büyük olmadığı yapı sistemlerinde, lineer olmayan şekildeğiştirmelerin plastik mafsal adı verilen belirli kesitlerde toplandığı bunun dışındaki bölgelerde ise sistemin lineer elastik davrandığı varsayılabilir. Plastik mafsal hipotezi adı verilen bu varsayıma göre çubuğun bir uç kesitinde eğilme momenti M bir M_p sınır

değerine ulaşıncaya kadar düğüm noktasına rijit bağlı olarak o düğüm dönmesine eşit döner. M, M_p değerine ulaştıktan sonra artan yükler altında o kesitte moment sabit kalarak düğüm noktası dönmesini çubuk uç kesiti dönmesinden farklılaştıran plastik mafsal rölatif dönmesi oluşur. Plastik mafsalın dönme kapasitesi belirli bir sınır değere erişince kesit kırılır ve sistem göçer. Dönme kapasitesi,

$$\max \phi = L_p \cdot \chi_{max} \qquad (7.1.)$$

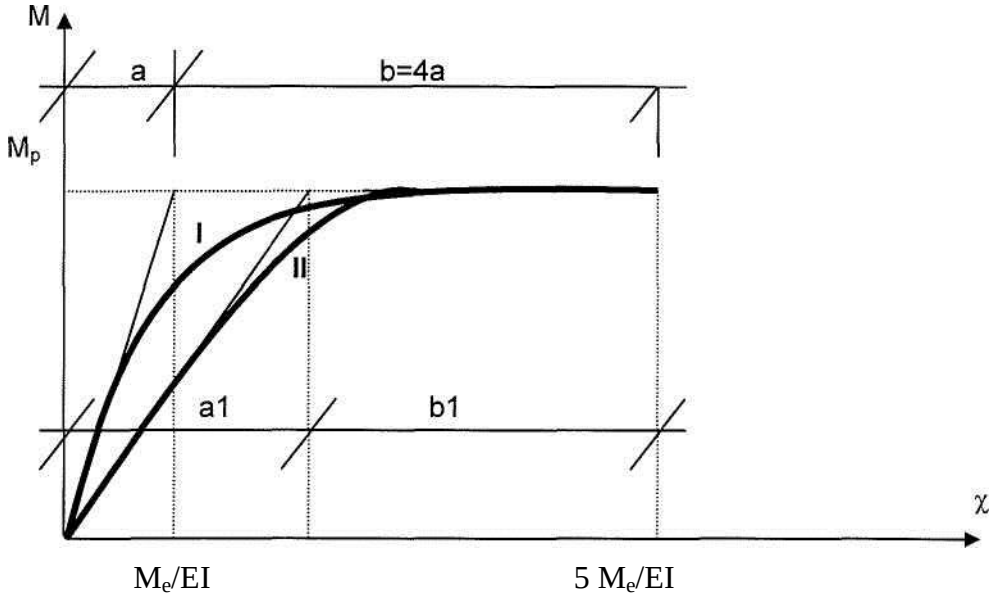
şeklinde yaklaşık olarak belirlenebilir. Burada L_p plastik bölge uzunluğu olup, dikdörtgen kesitlerde sürekli eleman durumunda momente paralel kesit boyu kadar, sürekli olmayan eleman ucunda momente paralel kenar boyunun yarısı kadar alınabilir. Plastik mafsallar arasında sistem lineer elastik davranır. [22]

Kirişlerde M eğilme momentinin M_p momentine ulaşması yalnız uç kesitlerde değil, düşey yüklerin tekil yükler halinde toplandığı tekil yük altındaki kesitlerde de söz konusudur. Bu çalışmanın öncelikli inceleme konusu artan yatay yükler altında perdelerin davranışını dikkate almak olduğundan [2, 4] de detaylı olarak açıklanan şekilde kiriş açıklık kesitlerinde düşey tekil yükler altında plastik momente ulaşılması hali irdelenmemiş, örneklerde görülebileceği gibi düşey yükler kiriş ortasında toplanıp bu noktalar düğüm noktası kabul edilmiştir.

Betonarme kirişlerde hem M_p kesit akma eğilme momenti değerinin hem Şekil 7.1. deki M - χ bağıntısındaki lineer değişim bölgesindeki oranın kesit boyutları yanında donatı miktarı ve yerleşimine bağlı olarak belirlenebileceği açıktır.

Çubuk elemanların sünek davranış gösterdiği kabulü ile, b/a > bl/al olduğundan I eğrisi II eğrisinden daha sünektir. Örneklerde Şekil 7.2. de görüldüğü üzere, çubuk elemanlarda plastik kesit dönme kapasitesi, b=4a olarak alınmıştır. L_p plastik bölge uzunluğu olmak üzere, plastik kesit dönme kapasitesi,

$$FI=L_p*4*M_e/EI \qquad (7.2.)$$



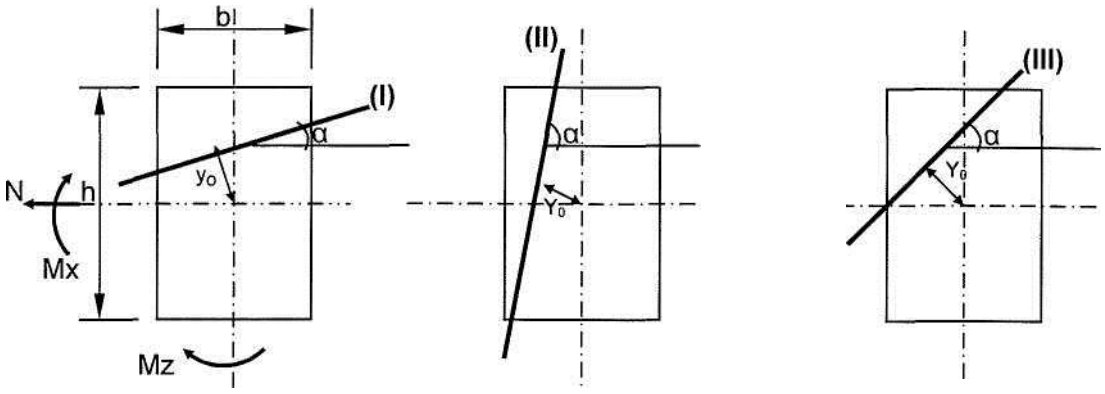
Şekil 7.2. Çubuk elemanlarda iç kuvvet şekildeğiştirme bağıntısı.

olarak kabul edilmiştir. Çubuk elemanlarda göçme nedenlerinden birisi, plastik kesitlerde dönme kapasitesinin aşılmasıdır.

Kiriş elemanlarda plastikleşmenin eğilme momentinden ve/veya burulma momenti etkisi altında burulma plastikleşmesinden oluşacağı kabul edilmiştir. Basitlik ve emniyet açısından burulma ve eğilme etkileşimi ihmal edilmiştir. Çubuk kesitlerinde hem burulma hem de eğilme (X veya Z eksenlerinin birinin etrafında) plastikleşmesinin olabileceği kabul edilmiştir. Betonarme hesaplarda da bu şekilde hesap yapıldığında eğilme için boyuna donatının ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir.

7.2. Kolon Elemanlarda Eğilme Plastikleşmesi Durumu

M_x, M_z ve N kesit zorları etkisi altındaki bir dikdörtgen kesitte tarafsız eksenin üç durumu Şekil 7.2. de gösterilmiştir. Deprem yönünün iki doğrultudan birinde etki ettiği düşünülerek bu çalışmada tarafsız eksenin iki durumu göz önüne alınmış, (III) durumu göz önüne alınmamıştır. Diğer bir deyişle, M_x ve M_z eğilme momentlerinden birinin ötekine nazaran daha etkin olduğu düşünülmüştür. Kesme kuvvetinin etkisi ihmal edilmiştir. Tarafsız eksenin herhangi bir durumu için izdüşüm ve moment denge denklemleri yazılarak kesitin akmasına sebep olan kesit tesirleri elde edilir.[21]



(a) (b) (c)

Şekil 7.3. Eğik eğilme ve normal kuvvet etkisi altında tarafsız eksenin konumu.

Tarafsız eksenin (I) durumunda olması halinde akma şartı,

$$M_x/M_{xp}+(3/4)*(M_z/M_{zp})^2+(N/N_p)^2-1=0 \qquad (7.3.a.)$$

şeklinde olup, tarafsız eksenin (II) durumunda olması halinde x ve z indislerinin yerleri değiştirilerek akma şartı,

$$M_z/M_{zp}+(3/4)*(M_x/M_{xp})^2+(N/N_p)^2-l=0 \qquad (7.3.b.)$$

yazılır. Burada:

M_x, M_z, N :Kesit tesirleri

M_{xp}, M_{zp} :Tek eksenli basit eğilme durumuna ait plastik momentleri (taşıma gücünü)

N_p :Yalnız normal kuvvet altındaki kesitin taşıma kapasitesini

göstermektedir.

Kolon elemanlarda plastikleşmenin çubuk kesitlerindeki baskın eğilme momenti yönündeki eğilme dönmesinden oluşacağı kabul edilmiş, normal kuvvetin ve diğer doğrultudaki eğilme momentinin etkisi 7.3.a ve 7.3.b formüllerinde kullanılarak göz önüne alınmıştır. Örneğin x ekseni etrafındaki momentin etkin olması durumunda, 7.3.a. formülünden kesitin M_z ve N etkisi altında taşıyabileceği en büyük M_x eğilme momenti (taşıma gücü) bulunacaktır. Aynı işlem z doğrultusu içinde yapılacaktır. [21]

7.3. Çubuk Elemanlarda Burulma Plastikleşmesi Durumu

Burulma plastikleşmesi için, kesme kuvvetinin etkisi ihmal edilmiştir. İdeal elasto plastik malzemeden yapılmış bir çubuk elemana etkiyen burulma momenti artarak plastik burulma momenti adı verilen, kesitin en fazla taşıyabileceği burulma momenti M_{bp} ye erişmesi durumunda, plastik mafsal hipotezi gereği kesitte burulma momenti artmayacak, kesit burularak serbestçe dönecektir.

Burulma momenti etkisi altındaki herhangi bir kesitin taşıyabileceği burulma momenti kum tümseği anolijisinden bulunabilir. Yatay vaziyette tutulan kesit üzerine dökülen kohezyonsuz kumun aldığı biçim ile kum tümseğinin eğimi kayma gerilmesine eşit kabul edilir. Tümseğin hacmi kesitin taşıyabileceği burulma momentinin yarısına eşit olur. Buna göre dikdörtgen kesitler için, x kayma gerilmesi, b kesitin kısa kenarı kesitin uzun kenarı olmak üzere,

$$T= b^2.(h-b/3)/2.\tau \qquad (7.4.)$$

şeklinde verilebilir. Çatlamaya karşı olan burulma momenti T_{cr}, τ yerine betonun çekme dayanımı f_{ctk} konularak hesaplanabilir. Tablalı kesitler için kesit dikdörtgenlere bölünüp toplam alınarak hesap yapılabilir. [23]

$$T_{cr}= 1,35 \; . \; F_{ctd} \; . \; S \qquad (7.5.)$$

şeklinde verilmiş olup burada, S burulma dayanımı momentidir. Kesit tiplerine göre değerleri [16] da verilmiştir. Gövdede oluşan asal basınç gerilmeleri beton ezilme dayanımını aşmamalıdır. Dengeli kırılma etriyenin akması ile gövdedeki ezilmenin aynı anda olduğu durum olup, gevrek kırılma için bu üst sınır,

$$\max T= b^2.(h-b/3)/0,25.f_{ck} \qquad (7.6.)$$

şeklinde ifade edilebilir. Ancak hesaplarda kullanılırken f_{ck} yerine f_{cd} alınmalıdır.

Çatlamaya kadar betonarme kesitlerin burulma rijitliği, elastisite teorisine göre,

$$GJ= Gc. \sum b^3.h/3 \qquad (7.7.)$$

formülü ile hesaplanabilir.

Donatısı belirli betonarme bir kesitte burulma momenti için taşıma gücü,

$$Tr = 2.A_{ot}/s.A_e.f_{ywd} \qquad (7.8.)$$

formülü ile [16] da verildiği şekilde bulunabilir. Ancak göçme güvenliğinin belirlenmesinde malzemenin gerçek davranışını göz önüne alarak, hesap dayanımı yerine karakteristik değerin kullanılması uygun olacaktır. Betonarme hesap yapılırken burulmanın olduğu durumlarda, burulma için gerekli etriyeye eşit hacimde boyuna donatı bulundurulması zorunludur. Eğilme için ayrıca boyuna donatı hesabı yapılması gerekmektedir. (7.8.) formülünde:

Tr : Kesitin burulma taşıma gücü

A_{ot} : Burulma için kesitteki etriye kesit alanı

A_e : Köşe çubuk merkezlerini birleştiren sınır içinde kalan alan

f_{ywd} : Hesapta kullanılacak etriye akma dayanımını ifade etmektedir.

7.4. Çubuk Elemanlarda Plastikleşme Oluşması Durumunda Sistem Rijitlik Matrisine İlave Edilmesi Gereken Terimler

Plastikleşen sisteme ait denklem takımı Bölüm 5 de anlatıldığı gibi çubuklar için yeniden düzenlenirse, ϕ plastikleşme parametresi olarak isimlendirilen x, y veya z ekseni etrafında dönme olmak üzere, (6.12.) denklemi,

$$\begin{bmatrix} [S_{dd}] & [S_{d\Phi}] \\ [S_{\Phi d}] & [S_{\Phi\Phi}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [d] \\ [\Phi] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [q] \\ [0] \end{bmatrix} \qquad (7.9.)$$

şeklinde düzenlenebilir. Burada:

$[S_{dd}]$:Sistem ortak eksen takımında, üzerinde plastik kesit bulunmayan sistemin rijitlik matrisidir. n düğüm noktalı, r referans noktalı sistem için Bölüm 6.1. de açıklandığı şekilde (4n+3r) x (4n+3r) boyutundadır. Esas köşegene göre simetriktir. Dış yükler sıfır iken birim yerdeğiştirme bileşenlerinden dolayı, yerdeğiştirme bileşenleri doğrultusunda oluşan uç kuvvetlerini göstermektedir. $[S_{dd}]$ matrisinin toplama yöntemi ile oluşumu Bölüm 4. de anlatılmıştır. çubuk düğüm noktalarında gerçekte referans noktalarına bağımlı olmayan bir doğrusal, iki açısal olmak üzere yalnız üç serbestlik vardır. Bir düğüm noktasında hem çubuk hem perde sonlu elemanlar bağlanıyorsa herhangi bir sorun çıkmaz, sistem rijitlik matrisinde noktanın dördüncü serbestliğine ait satır sütun perde elemanlardan gelen terimlerle doldurulur. Buna karşılık bir noktada yalnız çubuklar birleşiyor ise bu noktanın dördüncü serbestliğine ait satır, sütun tümüyle boş kalacaktır. Singülariteyi

önlemek için sistem rijitlik matrisinde o satır sütunun esas köşegenine birim değer atayarak bu serbestliğin tutulmasını sağlamak gerekir.

[d] :Sistem ortak eksen takımında, düğüm noktası yerdeğiştirme bileşenleri.

[q] :Dış yük matrisi, düğüm noktalarına etkiyen dış yüklerin ortak sistem eksen takımındaki bileşenlerinden meydana gelen 4n+3r terimli bir kolon matristir.

[ϕ] :Ortak sistem eksen takımında, moment taşıma gücünü aşan uç kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametresi olup, m adet plastikleşen kesit için m adetli kolon matristir.

[$S_{d\phi}$] :Sistem ortak eksen takımında, plastikleşmenin oluştuğu kesitte, plastikleşmeye neden olan momente paralel dönme yerdeğiştirme parametresinin birim değerinden dolayı, çubuk elemanın uç kesitlerinde oluşan ilave uç kuvvetleri matrisidir. Üzerinde m sayılı plastikleşen kesit, n adet düğüm noktası ve r adet referans noktası bulunan uzay sistemde, bu matrisin boyutu (4n+3r) x m dir. [$S_{d\phi}$] matrisinin k sayılı kolonu, k sayılı plastikleşen kesitin plastik dönme yerdeğiştirmesinin ϕ_k =1 değeri için, diğer plastikleşen kesitlerdeki plastik dönme yerdeğiştirmeleri ve düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken uç kesitlere etkiyen uç kuvvetlerinden oluşmaktadır.

[$S_{\phi d}$] : Sistem ortak eksen takımında, dış yüksüz sistemde plastik şekildeğiştirmeler sıfır iken, yalnız düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden dolayı plastikleşen kesitlerde oluşan uç kuvvetleri gösteren bir matristir. m adet plastikleşen kesit, n adet düğüm noktası ve r adet referans noktası bulunan sistem için m x (4n+3r) boyutundadır. Betti karşıtlık teoremi uyarınca,

$$[S_{\phi d}] = [S_{d\phi}]^T \qquad (7.10.)$$

olduğundan ayrıca hesaplanmasına gerek yoktur.

[$S_{\phi\phi}$] : m adet plastikleşen kesit için m x m boyutunda kare matristir. Bu matrisin k sayılı kolonu dış yüksüz sistemde düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken k sayılı plastikleşen kesitteki plastik şekildeğiştirme parametresinin birim değeri için tüm plastik kesitlerdeki iç kuvvet değişimini göstermektedir. Betti karşıtlık teoremi uyarınca esas köşegene göre simetriktir. Esas köşegen üzerindeki terimler dışındaki terimler genelde sıfırdır. Eğer çubuk elemanda birden fazla

plastik kesit oluşursa, köşegen üzerindeki terimler dışındaki terimlerden ilgili olanları sıfırdan farklı olacaktır.

Doğru eksenli prizmatik çubuklar için rijitlik matrisi Bölüm 3 de anlatılmıştır. $[S_{\phi d}]$ matrisinin terimleri aşağıdaki alt başlıklarda verilmiştir.

7.4.1. Plastikleşmenin M_x eğilme momentinden dolayı oluşması durumu

Çubuğun herhangi bir kesitinde hesap sonucu bulunan M_x momentinin, (7.3.a.) da verilen akma koşulundan bulunacak olan M_x momenti değerini aşması halinde, o kesitte plastikleşmenin oluştuğu kabul edilecektir. Bu durumda Bölüm 3 de verilen çubuk rijitlik matrisinden yararlanılarak, plastikleşme nedeni ile sistem rijitlik matrisine ilave edilmesi gereken satır ve sütunlar belirlenecektir.

Plastikleşmenin IJ çubuğunun I ucunda olması durumunda çubuk özel eksen takımındaki [CII] ve [CJI] rijitlik alt matrislerinin, x ekseni etrafında dönme yerdeğiştirme parametresinin birim değerinden dolayı oluşan düğüm noktası uç kuvvetlerini veren, dördüncü kolonları alınacaktır. Bu terimler (7.11.a.) ile verilmiştir.

$$[C_{1\Phi}]_x = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 6EI_x/L^2 \\ 4EI_x/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad [C_{2\Phi}]_x = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -6EI_x/L^2 \\ 4EI_x/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (7.11.a.)$$

Plastikleşmenin IJ çubuğunun J ucunda olması durumunda çubuk özel eksen takımındaki [CIJ] ve [CJJ] rijitlik alt matrislerinin, x ekseni etrafında dönme yerdeğiştirme parametresinin birim değerinden dolayı oluşan düğüm noktası uç kuvvetlerini veren, dördüncü kolonları alınacaktır. Bu terimler (7.1 l.b.) ile verilmiştir.

$$[C_{1\Phi}]_x = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 6EI_x/L^2 \\ 2EI_x/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad [C_{2\Phi}]_x = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -6EI_x/L^2 \\ 4EI_x/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (7.11.b.)$$

7.4.2. Plastikleşmenin M_z eğilme momentinden dolayı oluşması durumu

Çubuğun herhangi bir kesitinde hesap sonucu bulunan M_z eğilme momentinin, (7.3.b.) de verilen akma koşulundan bulunacak olan M_z momenti değerini aşması halinde, o kesitte plastikleşmenin oluştuğu kabul edilecektir.

Plastikleşmenin IJ çubuğunun I ucunda olması durumunda çubuk özel eksen takımındaki [CII] ve [CJI] rijitlik alt matrislerinin, J ucunda olması durumunda çubuk özel eksen takımındaki [CIJ] ve [CJJ] rijitlik alt matrislerinin, z ekseni etrafında dönme yerdeğiştirme parametresinin birim değerinden dolayı oluşan düğüm noktası uç kuvvetlerini veren, altıncı kolonları alınacaktır. Bu terimler (7.12.a.) ve (7.12.b.) ile verilmiştir.

$$[C_{1\Phi}]_z = \begin{bmatrix} -6EI_z/L^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 4EI_z/L \end{bmatrix} \qquad [C_{2\Phi}]_z = \begin{bmatrix} 6EI_z/L^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2EI_z/L \end{bmatrix} \qquad (7.12.a.)$$

$$[C_{1\Phi}]_z = \begin{bmatrix} -6EI_z/L^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2EI_z/L \end{bmatrix} \qquad [C_{2\Phi}]_z = \begin{bmatrix} 6EI_z/L^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2EI_z/L \end{bmatrix} \qquad (7.12.b.)$$

7.4.3. Plastikleşmenin M_y burulma momentinden dolayı oluşması durumu

Dış yüklerin yalnızca düğüm noktalarından etkimesi halinde, çubuklarda sabit burulma momenti oluşacağı dikkate alınırsa, bir çubukta hesap sonucu bulunan M_y burulma momentinin, Tr burulma momenti taşıma gücü değerini aşması halinde, o çubukta plastikleşmenin oluştuğu kabul edilecektir. Plastik mafsalın çubuğun iki ucundan herhangi birine konacağı kabul edilebilir.

Plastikleşmenin IJ çubuğunun I ucunda olduğu kabul edilirse, çubuk özel eksen takımındaki [CII] ve [CJI] rijitlik alt matrislerinin, y ekseni etrafında dönme yerdeğiştirme parametresinin birim değerinden dolayı oluşan düğüm noktası uç kuvvetlerini veren, beşinci kolonları alınacaktır. Bu terimler (7.13.) ile verilmiştir.

$$[C_{1\Phi}]_y = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ GJ/L \\ 0 \end{bmatrix} \qquad [C_{2\Phi}]_y = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -GJ/L \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7.13.}$$

7.5. Sistem Rijitlik Matrisine İlave Edilecek Terimlerin Dönüştürülmesi

(7.11.a-b), (7.12.a-b) ve (7.13.) ile verilen $[C_{d\phi}]$ matrisi, plastikleşen kesit ucunu gösteren n=I, J olmak üzere,

$$[C_{d\Phi}]_n = \begin{bmatrix} [C_{1\Phi}] \\ [C_{2\Phi}] \end{bmatrix}_{12\times 1} \tag{7.14.a.}$$

şeklinde çubuk özel eksen takımındaki değerleri ile elde edilir. Bölüm 4 de anlatıldığı gibi ortak sistem eksen takımına dönüştürülerek her biri yedi elemanlı alt matrisler haline getirilir.

$$[C_{d\Phi}]_n^* = \begin{bmatrix} [C_{1\Phi}]^* \\ [C_{2\Phi}]^* \end{bmatrix}_{14\times 1} \tag{7.14.b.}$$

Çubuk elemanın sistemde farklı açılar ile yer alabileceği göz önüne alınarak $[C_{d\phi}]_n^*$ matrisinin, Bölüm 4.2.4. de açıklandığı şekilde [TTR] alt matrislerinden oluşan [TN] dönüştürme matrisi ile çarpılması gerekmektedir.

$$[TN] = \begin{bmatrix} [TTR] & 0 \\ 0 & [TTR] \end{bmatrix}_{14\times 14} \tag{7.15.}$$

$$[EK_{d\Phi}]_n = \begin{bmatrix} [EK_{1\Phi}] \\ [EK_{2\Phi}] \end{bmatrix} \tag{7.16.}$$

olmak üzere,

$$[EK_{d\phi}]_{n\ 14x1} = [TN]_{14x14} \,.\, [C_{d\phi})]_{n\ 14x1} \tag{7.17.}$$

şeklini alacaktır. Daha sonra bu alt matrisler düğüm noktalarının referans noktasına bağlılığı da göz önüne alınarak, rijit düzlem içinde düğüm noktası bulunan kolon elemanların $[EK_{1\phi}]$ ve $[EK_{2\phi}]$ uç kuvvetleri matrisleri $[tt]^T$ matrisleri ile çarpılarak, m=l, 2 olmak üzere,

$$[EK_{m\phi}]^*_{7x1} = [tt]^T_{7x7} \,.\, [EK_{m\phi})]_{7x1} \qquad (7.18.)$$

şeklinde seçilen referans noktasına bağlılığı ifade eden $[EK_{m\phi,}]^*$ matrislerine dönüştürülür. Bu alt matrisler $[S_{d\phi,}]$ matrisinde ilgili yerlere yazılırlar.

7.6. $[S_{\phi\phi}]$ Matrisinin Elemanları

Çubuk elemanlarda yalnız bir adet plastik mafsal oluşması durumunda $[S_{\phi\phi}]$ matrisinin esas köşegen üzerindeki terimi hariç diğer terimleri sıfırdır. çubuk sonlu elemanda birden fazla plastik mafsal oluşması durumunda köşegen dışı terimler sıfırdan farklı olacaktır.

Yeni plastikleşen düğüm noktası çubuk elemanın I düğüm noktası ve daha önce J düğüm noktasında m. plastikleşme oluşmuş ise, k. plastik yerdeğiştirme parametresi için,

M_x eğilme momentinden dolayı plastikleşme var ise,

Köşegen dışı terim, $[S_{\phi\phi}](m,k) = [C_{2\phi}]_x(4,l)$ (7.19.a.)

Köşegen üzerindeki terim, $[S_{\phi\phi}](k,k) = [C_{1\phi}]_x(4,l)$

M_z eğilme momentinden dolayı plastikleşme var ise,

Köşegen dışı terim, $[S_{\phi\phi}](m,k) = [C_{2\phi}]_z(6,l)$ (7.19.b.)

Köşegen üzerindeki terim, $[S_{\phi\phi}](k,k) = [C_{1\phi}]_z(6,l)$

M_y burulma momentinden dolayı plastikleşme var ise,

Köşegen dışı terim, $[S_{\phi\phi}](m,k) = [C_{2\phi}]_y(5,l)$ (7.19.c.)

Köşegen üzerindeki terim, $[S_{\phi\phi}](k,k) = [C_{1\phi}]_y(5,l)$

Yeni plastikleşen düğüm noktası çubuk elemanın J düğüm noktası ve daha önce I düğüm noktasında m. plastikleşme oluşmuş ise, k. plastik yerdeğiştirme parametresi için,

M_x eğilme momentinden dolayı plastikleşme var ise,

Köşegen dışı terim, $[S_{\phi\phi}](m,k) = [C_{1\phi}]_x(4,l)$ (7.20.a.)

Köşegen üzerindeki terim, $[S_{\phi\phi}](k,k) = [C_{2\phi}]_x(4,l)$

M_z eğilme momentinden dolayı plastikleşme var ise,

Köşegen dışı terim, $[S_{\phi\phi}](m,k) = [C_{1\phi}]_z(6,l)$ (7.20.b.)

Köşegen üzerindeki terim, $[S_{\phi\phi}](k,k) = [C_{2\phi}]_z(6,l)$

şeklinde elde edilir. Plastikleşen düğüm noktasının rijit düzleme bağlı olmasından dolayı $[S_{\phi\phi}]$ matrisinin terimlerinin elde edilmesinde herhangi bir değişiklik olmayacaktır.

7.7. Plastikleşen Sisteme Ait Denklem Takımının Çözümü Ve Bilinmeyenlerin Bulunması

Bölüm 6.2. de anlatıldığı gibi, plastikleşen kesitleri bulunan sisteme ait genişletilmiş denklem takımının çözümü için, elastik hesap için ve daha önce oluşmuş plastik kesitlere ait satırlar indirgenmiş olduğundan tekrar indirgenmez, sadece yeni plastikleşen kesite ait olan satır ve sütunun elemanları olan $[S_{\phi\phi}]$, $[S_{d\phi}]$ ve $[S_{\phi d}]$ matrisleri hesaplanarak denklem takımına ilave edilir, başlangıçta sıfır olan yerdeğiştirmelere ait olan satır ve sütunların ek kolon ve satıra karşı gelen terimleri sıfırlanır, ilave edilen terimler Gauss eliminasyon yöntemi ile indirgenir.

Birim yatay yük parametresi için indirgenmiş olan sabitler kolonunda sadece ilave edilmiş satır veya satırlar için indirgeme devam ettirilir. Denklem takımının çözümü sonucu artım yük parametresi için ilave bağımsız yerdeğiştirme ve plastikleşme parametreleri elde edilir. Bölüm 4 de anlatıldığı gibi dönüştürme matrisleri ile ilave bağımsız yerdeğiştirmelerden ilave bağımlı ve bağımsız yerdeğiştirmeler hesaplanır.

7.8. Düğüm Noktası Uç Kuvvetlerinin Hesabı

Herhangi bir adımdaki yük artımı için bilinmeyen ilave [d] ve [ϕ] değerleri bulunduktan sonra üzerinde plastik kesitler bulunan bir IJ çubuğunun ortak sistem eksen takımındaki ilave uç kuvvetleri matrisleri,

$$[P]_{ix} = [C]_{ixix}.\,[d]_{ix} + [C]_{ixjx}.\,[d]_{jx} + [EK_{1\phi}]\,.\,[\phi]_{ij} \quad (7.21.a.)$$

$$[P]_{jx} = [C]_{jxix}.\,[d]_{ix} + [C]_{jxjx}.\,[d]_{jx} + [EK_{2\phi}]\,.\,[\phi]_{ij} \quad (7.21.b.)$$

bağıntıları yardımı ile bulunur. Bu bağıntılarda,

$[\phi]_{ij}$:IJ çubuğu üzerindeki plastik kesitlere ait bilinmeyen ilave ϕ_k plastik şekildeğiştirme parametrelerini,

$[EK_{1\phi}]$:Ortak sistem eksen takımında IJ çubuğunda oluşan plastik kesitlerden dolayı elemanın I düğüm noktasında oluşan ilave uç kuvvetleri matrisini,

$[EK_{2\phi}]$:Ortak sistem eksen takımında IJ çubuğunda oluşan plastik kesitlerden dolayı elemanın J düğüm noktasında oluşan ilave uç kuvvetleri matrisini göstermektedir.

Üzerinde plastik kesitler bulunmayan çubuklarda,

$$[P]_{ix} = [C]_{ixix}.\ [d]_{ix} + [C]_{ixjx}.\ [d]_{jx} \qquad (7.22.a.)$$

$$[P]_{jx} = [C]_{jxix}.\ [d]_{ix} + [C]_{jxjx}.\ [d]_{jx} \qquad (7.22.b.)$$

şeklinde ilave uç kuvvetleri hesaplanacaktır. Her adıma ait ortak sistem eksen takımındaki ilave uç kuvvetleri bulunduktan sonra, çubuk özel eksen takımındaki uç kuvvetleri matrisleri dönüştürme yapılarak,

$$[P]_i = [TR].\ [P]_{ix} \qquad (7.23.a.)$$

$$[P]_j = [TR].\ [P]_{jx}. \qquad (7.23.b.)$$

elde edilir. [2, 17, 18]

BÖLÜM 8. PERDE VE ÇUBUK ELEMANLARDAN OLUŞAN YAPI SİSTEMLERİNDE GÖÇME YÜK PARAMETRESİNİN HESABI İÇİN YÜK ARTIMI YÖNTEMİ

Bu bölümde, sadece perdelerden oluşan sistemler için 6. Bölümde verilen yöntem kullanılarak, çubuk ve perde elemanların bulunduğu yapı sistemlerinde göçme yük parametresinin hesabı için yük artımı yönteminde yapılması gerekenler maddeler halinde verilecektir. Yük artımı yönteminin adımlarını şöyle sıralayabiliriz:

1. Sisteme etki eden düşey yükler yeter sayıda statikçe eşdeğer tekil kuvvetlere dönüştürülür. Yatay yükler kat seviyelerindeki referans noktasına etki ettirilir. Referans noktasına bağlı olmayan düğüm noktalarındaki yükler aynen alınır.

2. Düşey yükler ve düşey yüklerden oluşan momentler, yatay yükler ve yatay yüklerden oluşan momentler olmak üzere yükler iki gruba ayrılır.

3. Birinci adımda, düşey yükler 1.0 düşey yük katsayısı ile çarpılarak sisteme etki ettirilir ve sisteme ait rijitlik ve yükleme matrisi, referans noktasına bağlılık göz önüne alınarak oluşturulur. Düşey yük grubu için sistem çözülerek, düğüm noktalarına ait sistem ortak eksen takımındaki bağımsız serbestlikler bulunur. Referans noktasına bağlılığa göre bulunan bağımsız serbestliklerden bağımlı ve bağımsız serbestliklere geçilir.

4. Perde ve çubuk elemanların düğüm noktalarına ve uç kesitlerine ait kuvvetler önceki bölümlerde anlatıldığı gibi hesaplanır.

5. Düşey yük grubu altında plastikleşmenin oluşmaması öngörülmektedir.

6. İkinci adımda, yatay yük grubu başlangıç yatay yük parametresi 1.0 alınarak sistem çözülür. Düğüm noktalarına ait ilave serbestlikler ve kuvvetler bulunur. İkinci adıma ait çözüm birinci adımdaki değerlere ikinci adımda bulunan çözümün bir yük parametresi ile çarpılarak toplanmasıyla elde edilecektir. Bu yük parametresinin belirlenebilmesi için örneğin önce perdeler ele alınarak perdeler için hiçbir düğüm noktasında toplam d_7 şekildeğiştirme bileşeninin ε_e akma sınır şekildeğiştirmesini aşmamasını ve

en azından bir noktada (aynı yük parametresi değeri için birkaç noktada bu sınır değere ulaşılması mümkündür) bu değere ulaşılmasını sağlayacak şekilde seçilmelidir. Daha sonra çubuklar ele alınarak, her çubuk elemanın her düğüm noktasının eğik eğilme ve normal kuvvet etkisi altında, x ekseni ve z ekseni etrafında eğilme dönmesinden ve ayrıca y ekseni etrafında burulma dönmesinden dolayı plastikleşebilmeleri için perdedekine benzer şekilde yük parametresi (aynı yük parametresi değeri birkaç nokta için elde edilebilir) belirlenir. Perde ve çubuklar için belirlenen yük parametreleri içinde en küçüğü plastikleşmeye neden olacak yük parametresini verecektir.

7. İkinci adıma ait çözüm bu yük parametresi ile çarpılıp birinci adıma ait çözüme ilave edilerek ilk plastikleşmenin oluştuğu yatay yük parametresine ait düğüm noktası serbestlikleri ve kuvvetleri bulunur.

8. Her çubuk elemanın her düğüm noktası için etkisi altında bulunduğu normal kuvvet, eğik eğilme momentleri göz önüne alınarak çubuk özel eksen takımında eğilme momenti taşıma gücü değerleri belirlenir.

9. Adım bir arttırılır. Plastikleşen düğüm noktalarından dolayı elastik sisteme ait [SS] rijitlik matrisine ilave edilmesi gereken satır ve sütunlar belirlenir. [SS] indirgenmiş olduğundan sadece yeni ilave edilen kolon ve satırlar indirgenir. Birim yatay yük parametresi için sabitler kolonunda ilave edilmiş satır veya satırlar için indirgeme devam ettirilir. Determinant kontrolü yapılarak sistemin yükleri taşıyıp taşıyamadığı kontrol edilir. Yerine koyma işlemi yapılarak, plastikleşen sisteme ait birim yatay yük parametresi için ilave düğüm noktası serbestlikleri ve plastikleşen düğüm noktasına ait plastikleşme parametresi bulunur. Perdeler için plastikleşme parametresi olan düşey doğrultudaki ilave yerdeğiştirmeden dolayı perdelere ait plastikleşen düğüm noktalarındaki ilave şekildeğiştirmeler perde eleman rijitlik matrisinin ilgili terimleri kullanılarak, formül 6.22. ve 6.23. ile, o adım için bulunur.

10. Bir düğüm noktasında plastikleşme oluşmuş elemanda uç kuvvetleri bulunurken, düğüm noktalarının serbestliklerinden oluşan değerler ile plastikleşme parametrelerinden oluşan değerler toplanır.

11. Yeni plastikleşecek düğüm noktaları, sayısı, ilave yatay yük parametresi belirlenir. işlemler 6 nci maddeden itibaren yinelenir.

12. Perde sonlu elemanların düğüm noktalarında, d_7 şekildeğiştirme bileşeninin ε_p göçme şekildeğiştirme sınır değerini aşıp aşmadığı, çubuk elemanların plastikleşen kesitlerinin plastik dönme kapasitelerini aşıp aşmadığı kontrol edilir. Bunlardan birinin veya bir kaçının sınır değerleri aşması durumunda, bu sınır değerlere erişmeyi sağlayacak yük parametrelerinden en küçüğü belirlenerek, öncelikle hangi düğüm noktasında, hangi yatay yük parametresi altında ve hangi nedenden dolayı bu sınır değere erişildiği belirlenir.

13. Sistemin kısmi veya tamamen mekanizma durumuna gelip gelmediğinin kontrolü için, sistem matrisinde determinant değerinin çok küçülmesi veya işaret değiştirmesine bakılabilir. Ayrıca, artan yatay yük parametresi altında çözümü yapılan plastikleşen sistemde en büyük yatay yerdeğiştirmenin oluşabileceği referans noktasının herhangi bir adımdaki ilave yatay yerdeğiştirme parametresinin işaret değiştirip değiştirmediğine bakılarak sistemin mekanizma durumuna gelip gelmediği kontrol edilebilir.

14. Hesap sistem mekanizma durumuna gelene kadar devam eder. Perde ve çubuklardan oluşan yapı sistemlerinde göçme sistemin mekanizma durumuna gelmesi, çubuklardaki plastik kesitlerin FI dönme kapasitelerini aşması yada perde elemanların düğüm noktalarında d_7 şekildeğiştirme bileşeninin ε_{max} sınır değerine erişmesi durumunda oluşur. Ayrıca, göçme nedenlerinden birisi de, belirli bir sınır değer verilmesi durumunda, en büyük yatay yerdeğiştirmeyi yapacak olan tepe noktasının, bu değere erişmiş olmasıdır.

BÖLÜM 9. BİLGİSAYAR PROGRAMI

9.1. Programın Amacı

Bu tez çalışmasının amacı ve kapsamına uygun olarak, perde ve çerçevelerden oluşan yapı sistemlerinin elastik hesabı ve göçme güvenliğinin belirlenebilmesi için, Fortran programlama dilinde, Microsoft Developer Studio da derlenen Gens.for isimli bir bilgisayar programı kullanılmıştır.

9.2. Gens.for Bilgisayar Programı

9.2.1. Program giriş bilgileri

Perde ve çerçevelerden oluşan yapı sistemlerinin elastik hesabı ve göçme güvenliğinin belirlenebilmesi amacı ile kullanılan programda, giriş bilgisi olan düğüm noktalarının elastik ve maksimum şekildeğiştirme değerleri homojen malzeme kabulüne göre girilmektedir. Giriş bilgileri:

Yapı sistemine ait bilgiler:

1. Mesnet düğüm noktaları ve referans noktaları dahil düğüm noktası sayısı,
2. Mesnet düğüm noktaları hariç, referans noktaları dahil düğüm noktası sayısı,
3. Düşey ve yatay yüklü düğüm sayısı,
4. Sıfır olan düğüm noktası serbestlikleri sayısı,
5. Perde sonlu eleman ve çubuk eleman sayısı,
6. Düğüm noktası koordinatları,
7. Referans noktalarına bağlı düğüm noktaları,
8. Perde sonlu elemanların düğüm noktaları, eleman boyutları,
9. Perde sonlu elemanların bağlı oldukları rijit düzlem,
10. Çubuk elemanların düğüm noktaları, açısal konumları (asal eksenler ile yapılan açı), rijit düzlem içinde olup olmadıkları,
11. Çubuk kesitlerinin iki doğrultu için plastik bölge uzunlukları,

12. Çubuk elemanların eylemsizlik momentleri, kesit alanları, burulma rijitliği,
13. Çubuk eleman kesitlerinin normal kuvvet, basit eğilme ve basit burulma momenti taşıma gücü,
14. Yatay ve düşey yüklü düğüm noktaları,
15. Başlangıçta sıfır olan düğüm noktası serbestlikleri.

Yapı malzemesine ait bilgiler:

1. Poisson oranı,
2. Perde sonlu elemanın basınç veya çekme elemanı olarak çalışması durumuna göre girilebilen elastik ve maksimum şekil değiştirme sınır değerleri (örneklerde homojen malzeme kabul edilerek girilmiştir),
3. Perde ve çubuk elemanların elastisite modülleri (10^6 ile bölünmüş olarak),
4. Çubuk elemanlar için kayma modülü.

Program içinde yer alan sabit değerler:

1. Düşey yük parametresi,
2. Başlangıç yatay yük artım parametresi.

9.2.2. Program çıkış bilgileri

Program çıkış bilgileri:

1. Program giriş bilgileri ve perde sonlu elemanların plandaki konumuna göre açısal değerleri, düşey yükleme sonucu perde özel eksen takımında perde düğüm noktalarında elde edilen iç kuvvetler ve serbestlikler Gens.SON isimli çıkış dosyasına yazdırılmaktadır.
2. Hesap sonucu bulunan perde ve çubuk elemanlara ait rijitlik matrisleri Gens.SON isimli çıkış dosyasına yazdırılmaktadır.
3. Her adımda hesap sonucu bulunan düğüm noktalarına ait ilave serbestlik değerleri,
4. Her adımda sonunda toplam yatay yüklerden dolayı düğüm noktalarında oluşan toplam serbestlik değerleri,
5. Her adımda hesap sonucu bulunan ilave ve toplam plastikleşme parametreleri,

6. Her adım sonunda bulunan perde özel eksen takımında (6 1ı) perde eleman düğüm noktasında toplam ortalama kuvvetler,

7. Her adım sonunda bulunan, çubuk özel eksen takımındaki ilave uç kuvvetleri ile yatay ve düşey yüklemelerden bulunan toplam uç kuvvetleri,

8. Her adım sonunda bulunan, perde sonlu eleman düğüm noktalarındaki toplam d_7 şekildeğiştirme bileşeni, çubuk elemanların uç kesitlerinde çubuk özel eksen takımında elde edilen toplam M_x, M_z eğilme momentleri ile M_y burulma momentleri ve taşıma güçleri,

9. Her adım sonunda plastikleşecek düğümlerin hangi elemana ait olduğu, nosu,plastikleşme nedenleri, kaç adet olduğu,

10. Her adımda, maksimum şekildeğiştirme sınırını ve dönme kapasitesini aşan düğüm noktaları,

11. Program sonunda sonuç bilgileri olarak, plastikleşen düğüm noktaları, plastikleşme nedeni, yeri, eleman nosu, düğüm nosu, elemanın kaçıncı düğüm noktası olduğu, kaçıncı plastikleşen nokta olduğu,

12. Program akışı sırasında dönme kapasitesinin, maksimum şekildeğiştirme sınırının aşılması, mekanizma durumuna gelmesi, düşey yükler altında plastikleşme oluşması diğer bir deyişle perde plastik şekildeğiştirme sınırının veya çubuklarda kesit taşıma gücünün aşılması, durumlarına ait uyarı mesajları Gens.SON isimli çıkış dosyasında yer almaktadır.

9.3. Alt Programlar

9.3.1. Subroutine ELRIJ

Bu alt programda, perde sonlu elemanlar için perde eleman özel eksen takımında eleman alt rijitlik matrisleri hesaplanmakta, ortak sistem eksen takımına dönüşüm yapılmakta, perde eleman özel eksen takımında eleman gerilme matrisi hesaplanmaktadır.

9.3.2. Subroutine TRANSP

Perde sonlu elemanlar için elde edilen alt rijitlik matrislerinin elemanın planda yatayla farklı açılar yapması durumuna göre, ortak sistem eksen takımına dönüşümünü sağlayan, dönüştürme matrisini veren alt programdır.

9.3.3. Subroutine TRANSIIP

Perde sonlu elemanın rijit düzlem içinde düğüm noktası olması durumunda, sistem rijitlik matrisinde perde elemana ait alt rijitlik matrislerinin ilgili yere yazılmasından önce dönüşümü sağlayan, dönüştürme matrisini veren alt programdır.

9.3.4. Subroutine MATCAPP

Perde sonlu elemanın rijit düzlem içinde düğüm noktası olması durumunda, sistem rijitlik matrisinde perde elemana ait alt rijitlik matrislerinin ilgili yere yazılmasından önce, eleman alt rijitlik matrisleri ile dönüştürme matrislerinin çarpımını yaparak, dönüşüm işlemini yapan alt programdır.

9.3.5. Subroutine MATCPP

Perde sonlu elemanın rijit düzlem içinde düğüm noktası olması ve plastikleşmenin perde elemanın düğüm noktalarından birinde oluşması durumunda, plastikleşmeden dolayı sistem rijitlik matrisine ilave edilecek terimlerin ilgili yere yazılmasından önce, ilave kolon matrisler ile dönüştürme matrisinin çarpımını yaparak, dönüşüm işlemini yapan alt programdır.

9.3.6. Subroutine PMAT

Plastikleşmenin perde elemanın düğüm noktalarından birinde oluşması durumunda sistem rijitlik matrisine ilave edilmesi gereken kolon alt matrislerini, önce perde özel eksen takımında oluşturan sonra elemanın plandaki açısal konumunu göz önüne alarak ortak sistem eksem takımına dönüştüren, plastikleşme nedeni ile perde özel eksen takımında oluşan ilave iç kuvvetlerin hesabında kullanılacak olan gerilme matrisini veren alt programdır.

9.3.7. Subroutine PMATC

Plastikleşmenin çubuk elemanın kesitlerinden birinde oluşması durumunda sistem rijitlik matrisine ilave edilmesi gereken kolon alt matrislerini, önce çubuk özel eksen takımında oluşturan, elemanın açısal konumunu göz önüne alarak ortak sistem eksem takımına dönüştürerek veren alt programdır. Plastikleşmeden dolayı plastikleşen elemanların düğüm noktalarında oluşan ilave uç kuvvetlerini veren kolon matrisler ana program içinde verilmiştir.

9.3.8. Subroutine MATCAPC

Plastikleşmenin çubuk elemanın kesitlerinden birinde oluşması durumunda sistem rijitlik matrisine ilave edilmesi gereken kolon alt matrislerini, elemanın rijit düzlem içinde düğüm noktası olması (kolon) durumuna göre dönüştüren alt programdır.

9.3.9. Subroutine TRANS

Çubuk elemanın farklı açısal konumlarına göre, çubuk alt rijitlik matrislerinin sistem eksen takımına dönüşümünü sağlayan, dönüştürme matrislerini veren alt programdır.

9.3.10. Subroutine TRNF

Kolon asal eksenlerinin sistem eksenleri ile çakışmaması durumunda dönüşümü sağlamak için dönüştürme matrisini veren alt programdır.

9.3.11. Subroutine CUBUK [2]

Çubuk özel eksen takımında çubuk elemanlara ait alt rijitlik matrislerini veren alt programdır.

9.3.12. Subroutine TRCUBUK [2]

Çubuk elemanın farklı açısal konumlarına göre, çubuk alt rijitlik matrislerinin dönüştürme matrisleri ile çarpımını sağlayarak sistem eksen takımına dönüşümü sağlayan alt programdır.

9.3.13. Subroutine TRANSII [2]

Çubuk elemanın rijit düzlem içinde düğüm noktasının bulunması (kolon) durumunda, çubuk alt rijitlik matrislerinin dönüşümünü sağlayan dönüştürme matrislerini veren alt programdır.

9.3.14. Subroutine MATCAP [2]

Çubuk elemanın rijit düzlem içinde düğüm noktasının bulunması (kolon) durumunda, çubuk elemana ait alt rijitlik matrislerinin sistem rijitlik matrisinde ilgili yere yazılmasından önce, eleman alt rijitlik matrisleri ile dönüştürme matrislerinin çarpımını yaparak, dönüşüm işlemini gerçekleştiren alt programdır.

BÖLÜM 10. SAYISAL ÖRNEKLER

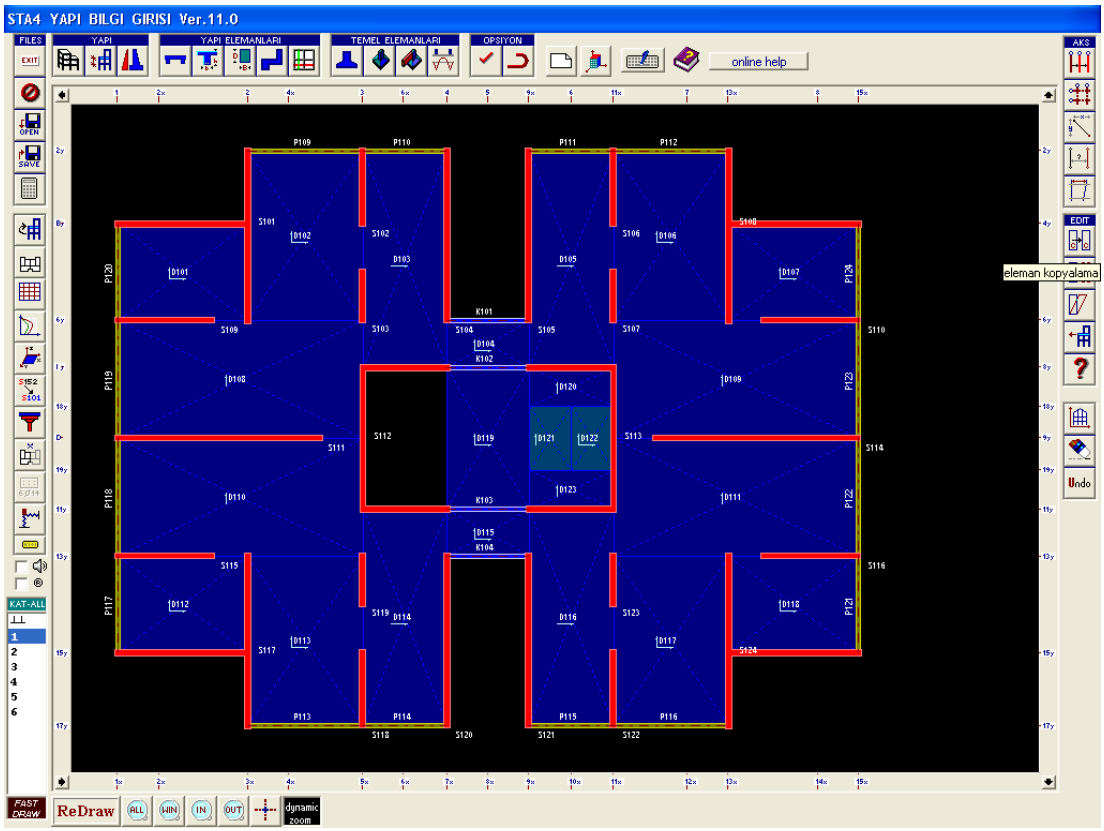
Bu bölümde, geliştirilen perde sonlu eleman ve yük artımı yöntemi kullanılarak, Bölüm 9.da içeriği anlatılmış olan bilgisayar programı yardımı ile yapılan uygulamalardan ve benzer bilgisayar programından (STA4CAD) elde edilen sonuçların karşılaştırılması ile ilgili çalışmalar yer almaktadır.

Örneklerde, geliştirilen perde sonlu elemanların STA4CAD adlı bilgisayar programı kullanılarak modellenmesiyle, x ve y doğrultularında ayrı ayrı, aynı yatay ve düşey yükler altında yaptıkları yerdeğiştirmeler karşılaştırılarak sonuçlar tablo şeklinde özetlenmiştir.

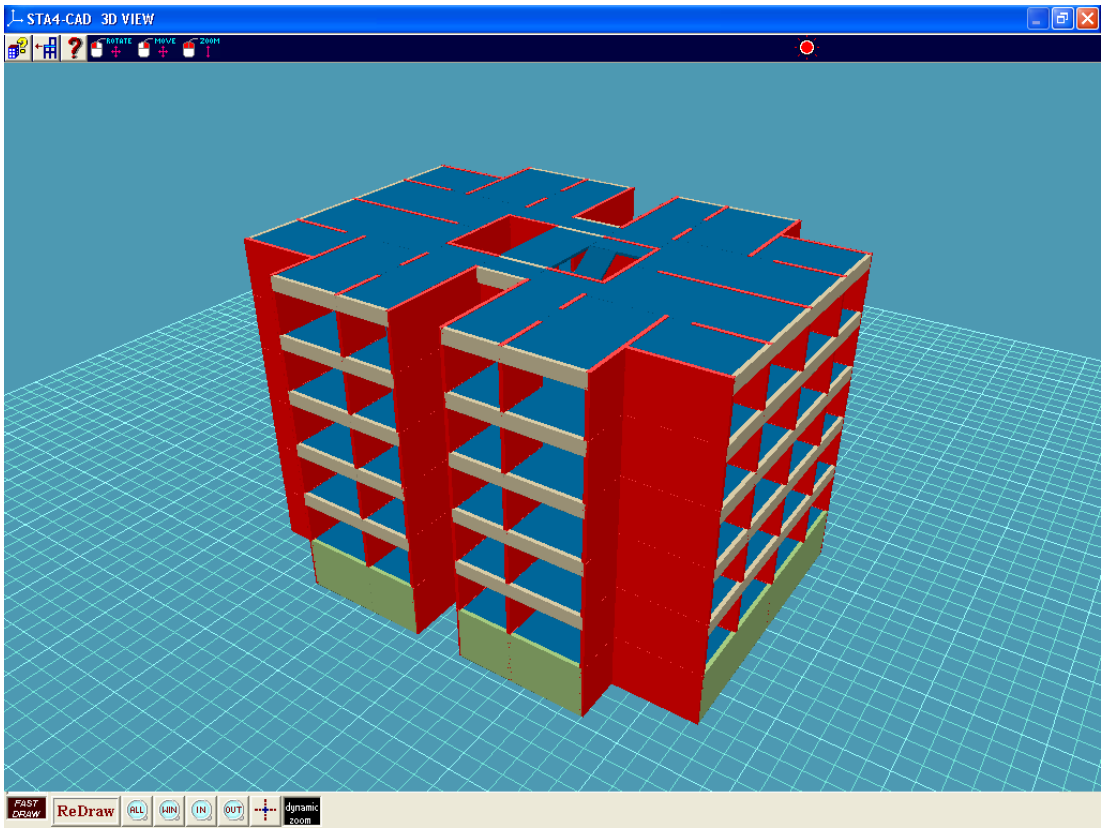
10.1. 6 Katlı Düzlem Perde-Kiriş Sistemin Farklı Çözümler İle Elde Edilen Hesap Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çözüm 1 : STA4CAD kullanılarak bodrum katta 16 adet dış perde ve normal katlarda 5 adet benzer olmak üzere 6 katta toplam 160 adet perde eleman ve her katta bodrum perdelerinin hizasında 16 adet, çekirdekte ise 4 adet çubuk eleman modellenerek bulunmuştur. (Şekil.10.3), (Şekil.10.4)

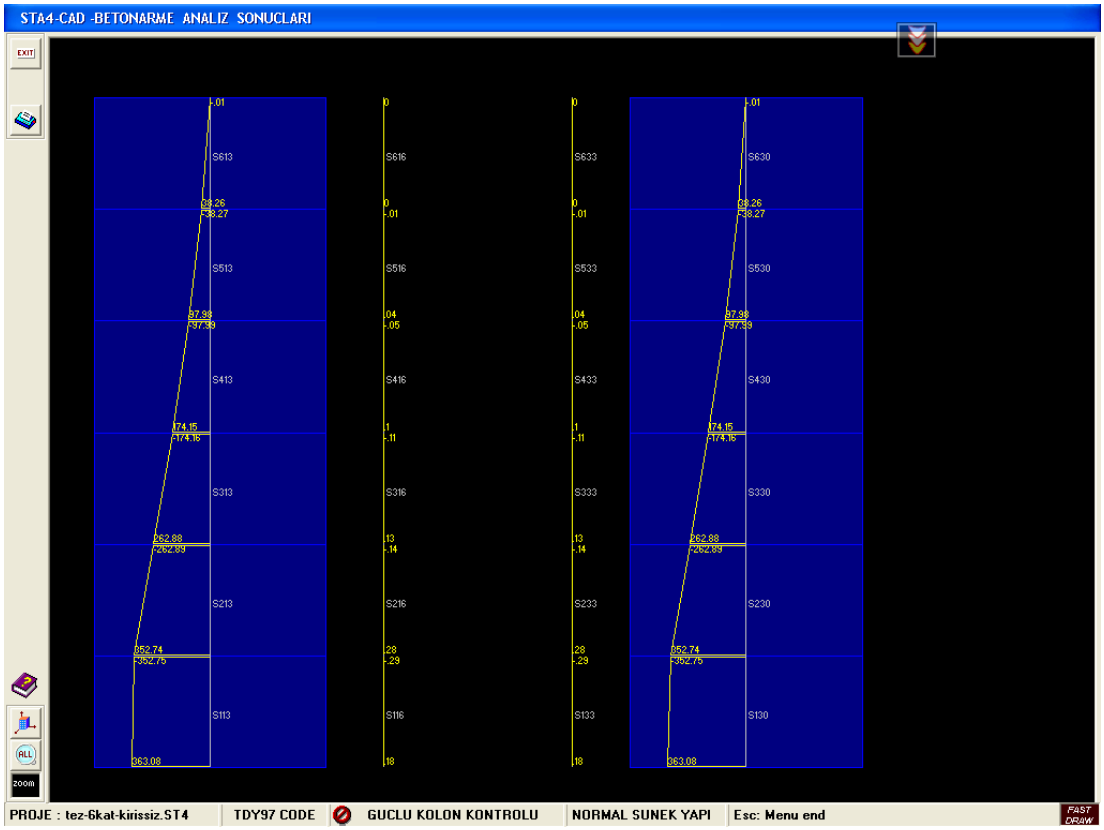
Çözüm 2 : Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen perde sonlu eleman kullanılarak simetriden faydalanmak suretiyle ilk katta 23 adet, üst katlarda 19 adet perde eleman ile normal katlarda 2 adet çubuk eleman ve her katta 30 adet düğüm noktası alınmış ve STA4CAD programından elde edilen yatay yük değerlerinin ¼'ü sisteme etkitilerek bulunmuştur.



Şekil.10.1. 6 katlı sistemin Çözüm 1'e göre STA4CAD'de modellenmesi (Plan)



Şekil.10.2. 6 katlı sistemin Çözüm 1'e göre STA4CAD'de modellenmesi (3 boyutlu)



Şekil.10.3. STA4CAD'de 9x aksı üzerindeki elemanların moment diyagramları

Tablo.10.1. Çözüm 1'den elde edilen sonuçlar

KAT NO	F_x (t)	F_y (t)	Δ_x (m)	Δ_y (m)
1	100.159	100.159	0.00020	-0.00016
2	19.866	19.866	0.00087	-0.00064
3	39.797	39.797	0.00185	-0.00134
4	59.695	59.695	0.00302	-0.00217
5	79.593	79.593	0.00429	-0.00307
6	96.081	96.081	0.00559	-0.00399

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen perde sonlu eleman kullanılarak 6 katlı perdeli sisteme döşemeler dikkate alınmaksızın x doğrultusunda deprem yükü etkitilerek oluşturulan veri giriş ve sonuç dosyası EK.2'de yer almaktadır.

Tablo.10.2. EK 2'den elde edilen sonuçlar (x doğrultusu)

KAT NO	F_x (t)	Δ_x (m)
1	25.04	0.000201851
2	4.97	0.000737243
3	9.95	0.00148842
4	14.92	0.00235630
5	19.90	0.00326382
6	24.02	0.00415840

Tablo.10.3. Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)

KAT NO	STA4CAD (m)	Gens.for (m)
1	0.00020	0.00020
2	0.00087	0.00074
3	0.00185	0.00149
4	0.00302	0.00236
5	0.00429	0.00326
6	0.00559	0.00416

6 katlı perdeli sistemde, orta çekirdekteki perdeleri birbirine bağlayan çubuk eleman sistemden çıkarılarak geliştirilen perde sonlu eleman kullanılmış, x doğrultusunda aynı yatay yükler etkisinde sistem yeniden çözülerek aşağıdaki tablodaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo.10.4. Orta çekirdekteki çubuk elemanın sistemden çıkarılmasıyla elde edilen sonuçlar (x doğrultusu)

KAT NO	F_x (t)	Δ_x (m)
1	25.04	0.000219262
2	4.97	0.000838823
3	9.95	0.00173789
4	14.92	0.00280197
5	19.90	0.00393950
6	24.02	0.00508561

Tablo.10.5. Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)

KAT NO	STA4CAD (m)	Gens.for (m)
1	0.00020	0.00022
2	0.00087	0.00084
3	0.00185	0.00174
4	0.00302	0.00280
5	0.00429	0.00394
6	0.00559	0.00509

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen perde sonlu eleman kullanılarak 6 katlı perdeli sisteme, döşemelerin eşdeğer çubuk elemanlar olarak kabul edilmesiyle, x doğrultusunda deprem yükü etkitilerek oluşturulan veri giriş ve sonuç dosyası EK.3'de yer almaktadır.

Tablo.10.6. EK 3'den elde edilen sonuçlar (x doğrultusu-döşemeli)

KAT NO	F_x (t)	Δ_x (m)
1	25.04	0.000193484
2	4.97	0.000692508
3	9.95	0.00138350
4	14.92	0.00217347
5	19.90	0.00299142
6	24.02	0.00378944

Tablo.10.7. Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)

KAT NO	STA4CAD (m)	Gens.for (m)
1	0.00020	0.00019
2	0.00087	0.00069
3	0.00185	0.00138
4	0.00302	0.00217
5	0.00429	0.00299
6	0.00559	0.00379

6 katlı perdeli sistemde, orta çekirdekteki perdeleri birbirine bağlayan çubuk eleman sistemden çıkarılarak döşemelerin eşdeğer çubuk elemanlar olarak kabul edilmesiyle, geliştirilen perde sonlu eleman modeli kullanılmış, x doğrultusunda aynı yatay yükler etkisinde sistem yeniden çözülerek aşağıdaki tablodaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo.10.8. Orta çekirdekteki çubuk elemanın sistemden çıkarılmasıyla elde edilen sonuçlar (x doğrultusu-döşemeli)

KAT NO	F_x (t)	Δ_x (m)
1	25.04	0.000211505
2	4.97	0.000795531
3	9.95	0.00163382
4	14.92	0.00261757
5	19.90	0.00366104
6	24.02	0.00470371

Tablo.10.9. Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)

KAT NO	STA4CAD (m)	Gens.for (m)
1	0.00020	0.00021
2	0.00087	0.00080
3	0.00185	0.00163
4	0.00302	0.00262
5	0.00429	0.00366
6	0.00559	0.00470

6 katlı perdeli sistemde STA4CAD adlı bilgisayar programı ve geliştirilen perde sonlu eleman modeli kullanılarak x doğrultusunda farklı hesaplar için elde edilen sonuçlar, döşeme etkisi ile çekirdekteki U perdeleri birbirine bağlayan çubuk eleman etkisi dikkate alınmak ve alınmamak suretiyle beş farklı durum için aşağıdaki tabloda karşılaştırılmıştır.

Tablo.10.10. 6 katlı perdeli sistemde x doğrultusundaki bütün sonuçların karşılaştırılması

KAT NO	**Sta4Cad (m)**	**Gens.for (m) Döşemesiz Kirişli**	**Gens.for (m) Döşemesiz Kirişsiz**	**Gens.for (m) Döşemeli Kirişli**	**Gens.for (m) Döşemeli Kirişsiz**
1	0.00020	0.00020	0.00022	0.00019	0.00021
2	0.00087	0.00074	0.00084	0.00069	0.00080
3	0.00185	0.00149	0.00174	0.00138	0.00163
4	0.00302	0.00236	0.00280	0.00217	0.00262
5	0.00429	0.00326	0.00394	0.00299	0.00366
6	0.00559	0.00416	0.00509	0.00379	0.00470

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen perde sonlu eleman kullanılarak 6 katlı perdeli sisteme döşemeler dikkate alınmaksızın y doğrultusunda deprem yükü etkitilerek oluşturulan veri giriş ve sonuç dosyası EK.4'de yer almaktadır.

Tablo.10.11. EK 4'den elde edilen sonuçlar (y doğrultusu)

KAT NO	F_y (t)	Δ_y (m)
1	25.04	0.000186591
2	4.97	0.000712638
3	9.95	0.00144717
4	14.92	0.00230371
5	19.90	0.00321294
6	24.02	0.00412625

Tablo.10.12. Çözümlerin karşılaştırılması (y doğrultusunda yerdeğiştirmeler)

KAT NO	STA4CAD (m)	Gens.for (m)
1	-0.00016	0.00019
2	-0.00064	0.00071
3	-0.00134	0.00145
4	-0.00217	0.00230
5	-0.00307	0.00321
6	-0.00399	0.00413

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen perde sonlu eleman kullanılarak 6 katlı perdeli sisteme, döşemelerin eşdeğer çubuk elemanlar olarak kabul edilmesiyle, y doğrultusunda deprem yükü etkitilerek oluşturulan veri giriş ve sonuç dosyası EK.5'de yer almaktadır.

Tablo.10.13. EK 5'den elde edilen sonuçlar (y doğrultusu-döşemeli)

KAT NO	F_y (t)	Δ_y (m)
1	25.04	0.000145444
2	4.97	0.000495085
3	9.95	0.000946215
4	14.92	0.00143706
5	19.90	0.00192393
6	24.02	0.00238202

Tablo.10.14. Çözümlerin karşılaştırılması (y doğrultusunda yerdeğiştirmeler)

KAT NO	STA4CAD (m)	Gens.for (m)
1	-0.00016	0.00015
2	-0.00064	0.00050
3	-0.00134	0.00095
4	-0.00217	0.00144
5	-0.00307	0.00192
6	-0.00399	0.00238

6 katlı perdeli sistemde STA4CAD adlı bilgisayar programı ve geliştirilen perde sonlu eleman modeli kullanılarak y doğrultusunda farklı hesaplar için elde edilen sonuçlar, döşeme etkisi dikkate alınmak ve alınmamak suretiyle üç farklı durum için aşağıdaki tabloda karşılaştırılmıştır.

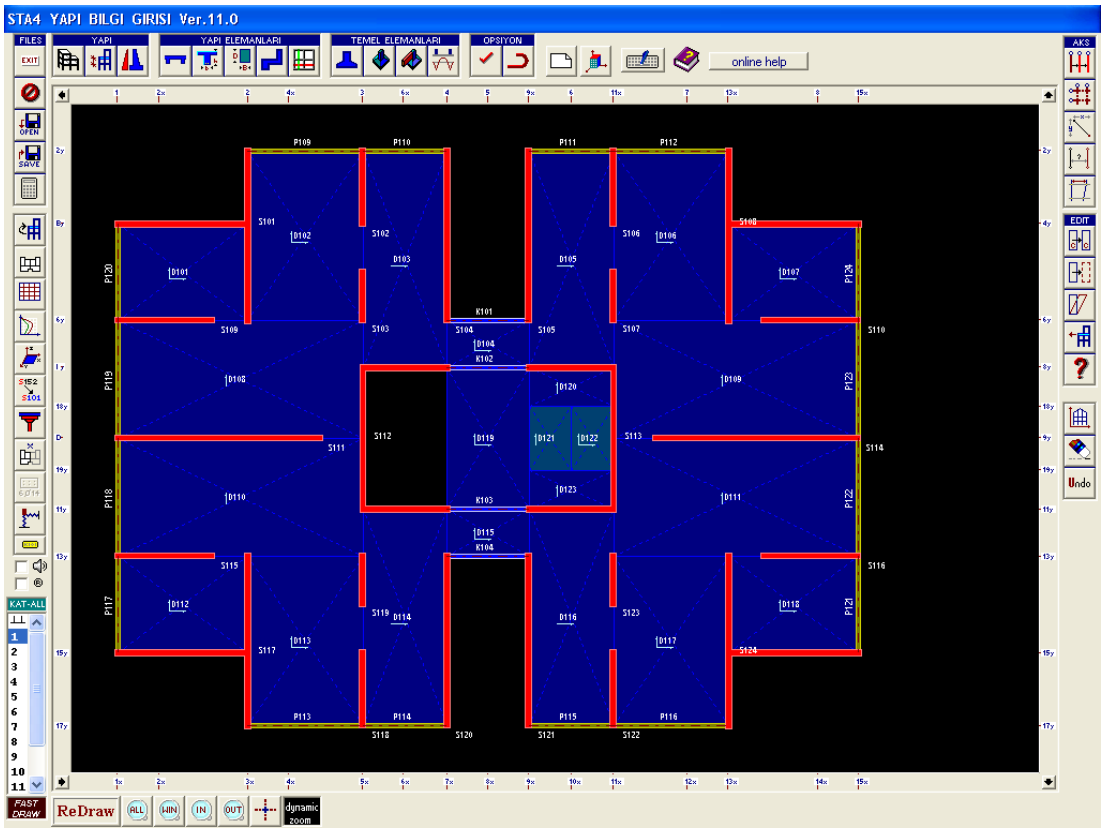
Tablo.10.15. 6 katlı perdeli sistemde y doğrultusundaki bütün sonuçların karşılaştırılması

KAT NO	**Sta4Cad (m)**	**Gens.for (m) Döşemesiz**	**Gens.for (m) Döşemeli**
1	-0.00016	0.00019	0.00015
2	-0.00064	0.00071	0.00050
3	-0.00134	0.00145	0.00095
4	-0.00217	0.00230	0.00144
5	-0.00307	0.00321	0.00192
6	-0.00399	0.00413	0.00238

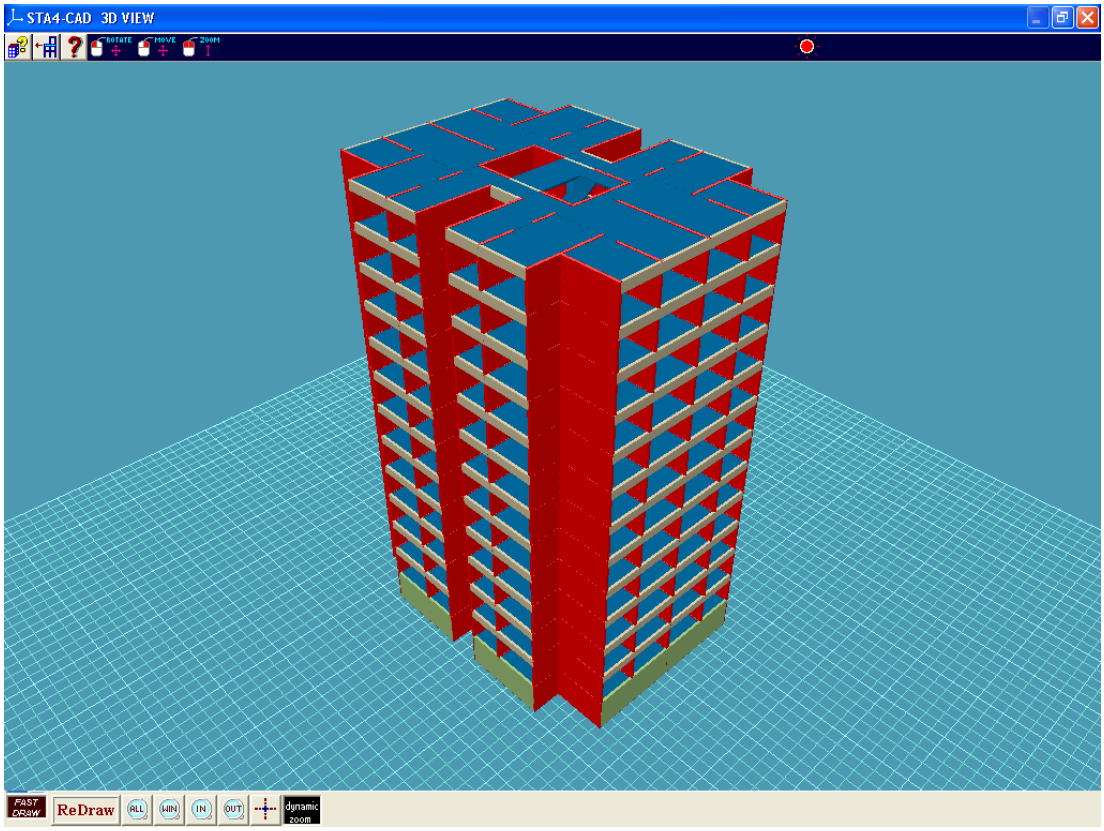
10.2. 13 Katlı Düzlem Perde-Kiriş Sistemin Farklı Çözümler İle Elde Edilen Hesap Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çözüm 1 : STA4CAD kullanılarak bodrum katta 16 adet dış perde ve normal katlarda 5 adet benzer olmak üzere 13 katta toplam 328 adet perde eleman ve her katta bodrum perdelerinin hizasında 16 adet, çekirdekte ise 4 adet çubuk eleman modellenerek bulunmuştur.. (Şekil.10.4), (Şekil.10.5)

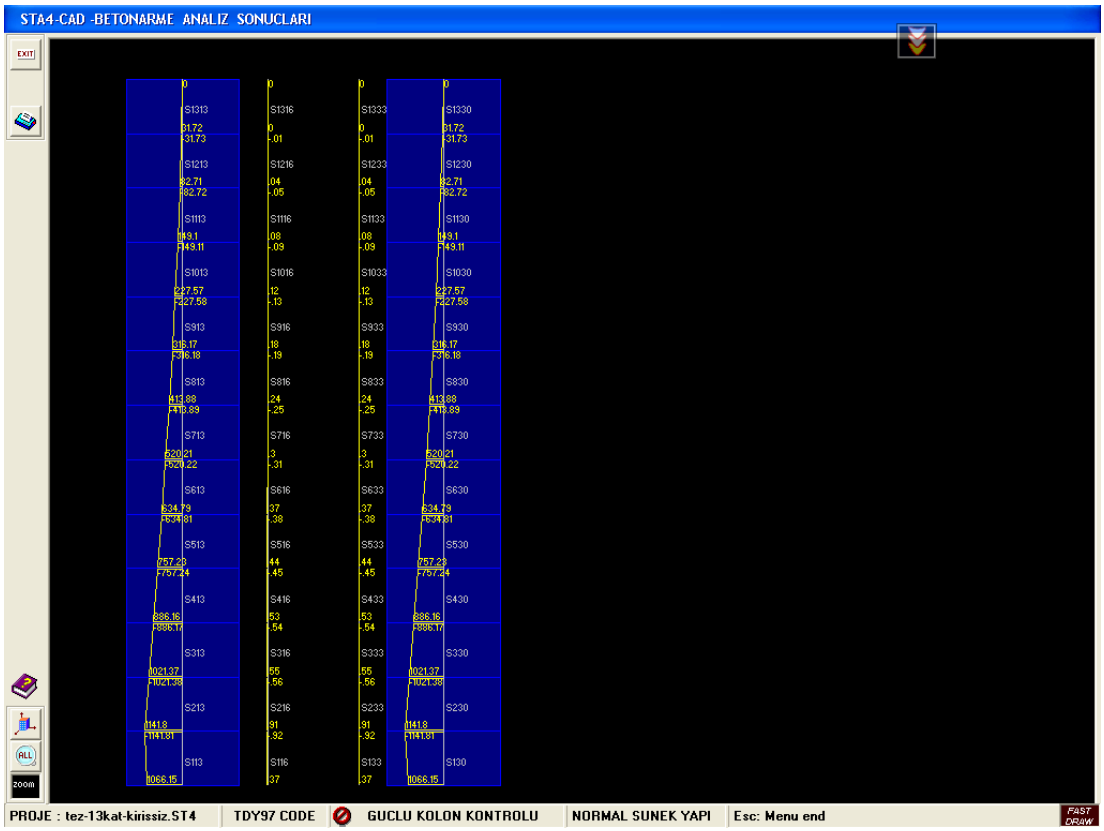
Çözüm 2 : Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen perde sonlu eleman kullanılarak simetriden faydalanmak suretiyle ilk katta 23 adet, üst katlarda 19 adet perde eleman ile normal katlarda 2 adet çubuk eleman ve her katta 30 adet düğüm noktası alınmış ve STA4CAD programından elde edilen yatay yük değerlerinin ¼'ü sisteme etkitilerek bulunmuştur.



Şekil.10.4. 13 katlı sistemin Çözüm 1'e göre STA4CAD'de modellenmesi (Plan)



Şekil.10.5. 13 katlı sistemin Çözüm 1'e göre STA4CAD'de modellenmesi (3 boyut)



Şekil.10.6. 13 katlı sistemde 9x aksındaki elemanların moment diyagramları

Tablo.10.16. Çözüm 1'den elde edilen sonuçlar

KAT NO	F_x (t)	F_y (t)	Δ_x (m)	Δ_y (m)
1	100.159	100.159	0.0004	-0.0004
2	4.260	4.968	0.0022	-0.0018
3	8.533	9.951	0.0049	-0.0041
4	12.800	14.927	0.0085	-0.0070
5	17.006	19.903	0.0128	-0.0106
6	21.335	24.881	0.0178	-0.0147
7	25.602	29.857	0.0232	-0.0192
8	29.869	34.834	0.0291	-0.0240
9	34.137	39.810	0.0352	-0.0291
10	38.404	44.786	0.0416	-0.0343
11	42.671	49.762	0.0482	-0.0397
12	46.938	54.739	0.0547	-0.0451
13	84.698	91.727	0.0614	-0.0505

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen perde sonlu eleman kullanılarak 13 katlı perdeli sisteme döşemeler dikkate alınmaksızın x doğrultusunda deprem yükü etkitilerek oluşturulan veri giriş ve sonuç dosyası EK.6'de yer almaktadır.

Tablo.10.17. EK.6'dan elde edilen sonuçlar (x doğrultusu)

KAT NO	**F_x (t)**	**Δ_x (m)**
1	25.04	0.000376604
2	1.24	0.00161087
3	2.49	0.00355034
4	3.73	0.00605729
5	4.98	0.00901810
6	6.22	0.0123313
7	7.46	0.0159058
8	8.71	0.0196612
9	9.95	0.0235278
10	11.20	0.0274480
11	12.44	0.0313765
12	13.68	0.0352823
13	22.93	0.0391471

Tablo.10.18. Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)

KAT NO	STA4CAD (m)	Gens.for (m)
1	0.0004	0.00038
2	0.0022	0.0016
3	0.0049	0.0036
4	0.0085	0.0061
5	0.0128	0.0090
6	0.0178	0.0123
7	0.0232	0.0159
8	0.0291	0.0197
9	0.0352	0.0235
10	0.0416	0.0274
11	0.0482	0.0314
12	0.0547	0.0353
13	0.0614	0.0391

13 katlı perdeli sistemde, orta çekirdekteki perdeleri birbirine bağlayan çubuk eleman sistemden çıkarılarak geliştirilen perde sonlu eleman kullanılmış, x doğrultusunda aynı yatay yükler etkisinde sistem yeniden çözülerek aşağıdaki tablodaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo.10.19. Orta çekirdekteki çubuk elemanın sistemden çıkarılmasıyla elde edilen sonuçlar (x doğrultusu)

KAT NO	**F_x (t)**	**Δ_x (m)**
1	25.04	0.000489544
2	1.24	0.00226061
3	2.49	0.00516377
4	3.73	0.00902565
5	4.98	0.0136981
6	6.22	0.0190419
7	7.46	0.0249258
8	8.71	0.0312284
9	9.95	0.0378386
10	11.20	0.0446583
11	12.44	0.0516037
12	13.68	0.0586073
13	22.93	0.0656218

Tablo.10.20. Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)

KAT NO	STA4CAD (m)	Gens.for (m)
1	0.0004	0.0005
2	0.0022	0.0023
3	0.0049	0.0052
4	0.0085	0.0090
5	0.0128	0.0137
6	0.0178	0.0190
7	0.0232	0.0249
8	0.0291	0.0312
9	0.0352	0.0378
10	0.0416	0.0447
11	0.0482	0.0516
12	0.0547	0.0586
13	0.0614	0.0656

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen perde sonlu eleman kullanılarak 13 katlı perdeli sisteme, döşemelerin eşdeğer çubuk elemanlar olarak kabul edilmesiyle, x doğrultusunda deprem yükü etkitilerek oluşturulan veri giriş ve sonuç dosyası EK.7'de yer almaktadır.

Tablo.10.21. EK.7'dan elde edilen sonuçlar (x doğrultusu-döşemeli)

KAT NO	**F_x (t)**	**Δ_x (m)**
1	25.04	0.000345363
2	1.24	0.00143407
3	2.49	0.00311525
4	3.73	0.00525957
5	4.98	0.00776134
6	6.22	0.0105280
7	7.46	0.0134782
8	8.71	0.0165417
9	9.95	0.0196597
10	11.20	0.0227850
11	12.44	0.0258833
12	13.68	0.0289342
13	22.93	0.0319267

Tablo.10.22. Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)

KAT NO	STA4CAD (m)	Gens.for (m)
1	0.0004	0.0003
2	0.0022	0.0014
3	0.0049	0.0031
4	0.0085	0.0053
5	0.0128	0.0078
6	0.0178	0.0105
7	0.0232	0.0135
8	0.0291	0.0165
9	0.0352	0.0197
10	0.0416	0.0228
11	0.0482	0.0259
12	0.0547	0.0289
13	0.0614	0.0319

13 katlı perdeli sistemde, orta çekirdekteki perdeleri birbirine bağlayan çubuk eleman sistemden çıkarılarak döşemelerin eşdeğer çubuk elemanlar olarak kabul edilmesiyle, geliştirilen perde sonlu eleman modeli kullanılmış, x doğrultusunda aynı yatay yükler etkisinde sistem yeniden çözülerek aşağıdaki tablodaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo.10.23. Orta çekirdekteki çubuk elemanın sistemden çıkarılmasıyla elde edilen sonuçlar (x doğrultusu-döşemeli)

KAT NO	**F_x (t)**	**Δ_x (m)**
1	25.04	0.000420588
2	1.24	0.00186791
3	2.49	0.00419245
4	3.73	0.00723795
5	4.98	0.0108730
6	6.22	0.0149776
7	7.46	0.0194420
8	8.71	0.0241677
9	9.95	0.0290678
10	11.20	0.0340690
11	12.44	0.0391122
12	13.68	0.0441554
13	22.93	0.0491694

Tablo.10.24. Çözümlerin karşılaştırılması (x doğrultusunda yerdeğiştirmeler)

KAT NO	STA4CAD (m)	Gens.for (m)
1	0.0004	0.0004
2	0.0022	0.0019
3	0.0049	0.0042
4	0.0085	0.0072
5	0.0128	0.0109
6	0.0178	0.0150
7	0.0232	0.0194
8	0.0291	0.0242
9	0.0352	0.0291
10	0.0416	0.0341
11	0.0482	0.0391
12	0.0547	0.0442
13	0.0614	0.0492

13 katlı perdeli sistemde STA4CAD adlı bilgisayar programı ve geliştirilen perde sonlu eleman modeli kullanılarak x doğrultusunda farklı hesaplar için elde edilen sonuçlar, döşeme etkisi ile çekirdekteki U perdeleri birbirine bağlayan çubuk eleman etkisi dikkate alınmak ve alınmamak suretiyle beş farklı durum için aşağıdaki tabloda karşılaştırılmıştır.

Tablo.10.25. 13 katlı perdeli sistemde x doğrultusundaki bütün sonuçların karşılaştırılması

KAT NO	Sta4Cad (m)	Gens.for (m) Döşemesiz Kirişli	Gens.for (m) Döşemesiz Kirişsiz	Gens.for (m) Döşemeli Kirişli	Gens.for (m) Döşemeli Kirişsiz
1	0.0004	0.0004	0.0005	0.0003	0.0004
2	0.0022	0.0016	0.0023	0.0014	0.0019
3	0.0049	0.0036	0.0052	0.0031	0.0042
4	0.0085	0.0061	0.0090	0.0053	0.0072
5	0.0128	0.0090	0.0137	0.0078	0.0109
6	0.0178	0.0123	0.0190	0.0105	0.0150
7	0.0232	0.0159	0.0249	0.0135	0.0194
8	0.0291	0.0197	0.0312	0.0165	0.0242
9	0.0352	0.0235	0.0378	0.0197	0.0291
10	0.0416	0.0274	0.0447	0.0228	0.0341
11	0.0482	0.0314	0.0516	0.0259	0.0391
12	0.0547	0.0353	0.0586	0.0289	0.0442
13	0.0614	0.0391	0.0656	0.0319	0.0492

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen perde sonlu eleman kullanılarak 13 katlı perdeli sisteme döşemeler dikkate alınmaksızın y doğrultusunda deprem yükü etkitilerek oluşturulan veri giriş ve sonuç dosyası EK.8'de yer almaktadır.

Tablo.10.26. EK.8'den elde edilen sonuçlar (y doğrultusu)

KAT NO	**F_y (t)**	**Δ_y (m)**
1	25.04	0.000429285
2	1.24	0.00194729
3	2.49	0.00432198
4	3.73	0.00742385
5	4.98	0.0111408
6	6.22	0.0153673
7	7.46	0.0200045
8	8.71	0.0249603
9	9.95	0.0301506
10	11.20	0.0355008
11	12.44	0.0409470
12	13.68	0.0464375
13	22.93	0.0519360

Tablo.10.27. Çözümlerin karşılaştırılması (y doğrultusunda yerdeğiştirmeler)

KAT NO	STA4CAD (m)	Gens.for (m)
1	-0.0004	0.0004
2	-0.0018	0.0019
3	-0.0041	0.0043
4	-0.0070	0.0074
5	-0.0106	0.0111
6	-0.0147	0.0154
7	-0.0192	0.0200
8	-0.0240	0.0250
9	-0.0291	0.0302
10	-0.0343	0.0355
11	-0.0397	0.0410
12	-0.0451	0.0464
13	-0.0505	0.0519

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen perde sonlu eleman kullanılarak 13 katlı perdeli sisteme, döşemelerin eşdeğer çubuk elemanlar olarak kabul edilmesiyle, y doğrultusunda deprem yükü etkitilerek oluşturulan veri giriş ve sonuç dosyası EK.9'de yer almaktadır.

Tablo.10.28. EK.9'dan elde edilen sonuçlar (y doğrultusu-döşemeli)

KAT NO	**F_y (t)**	**Δ_y (m)**
1	25.04	0.000314161
2	1.24	0.00132124
3	2.49	0.00283236
4	3.73	0.00474264
5	4.98	0.00696501
6	6.22	0.00942233
7	7.46	0.0120463
8	8.71	0.0147774
9	9.95	0.0175650
10	11.20	0.0203680
11	12.44	0.0231560
12	13.68	0.0259101
13	22.93	0.0286194

Tablo.10.29. Çözümlerin karşılaştırılması (y doğrultusunda yerdeğiştirmeler)

KAT NO	STA4CAD (m)	Gens.for (m)
1	-0.0004	0.0003
2	-0.0018	0.0013
3	-0.0041	0.0028
4	-0.0070	0.0047
5	-0.0106	0.0070
6	-0.0147	0.0094
7	-0.0192	0.0120
8	-0.0240	0.0148
9	-0.0291	0.0176
10	-0.0343	0.0204
11	-0.0397	0.0232
12	-0.0451	0.0259
13	-0.0505	0.0286

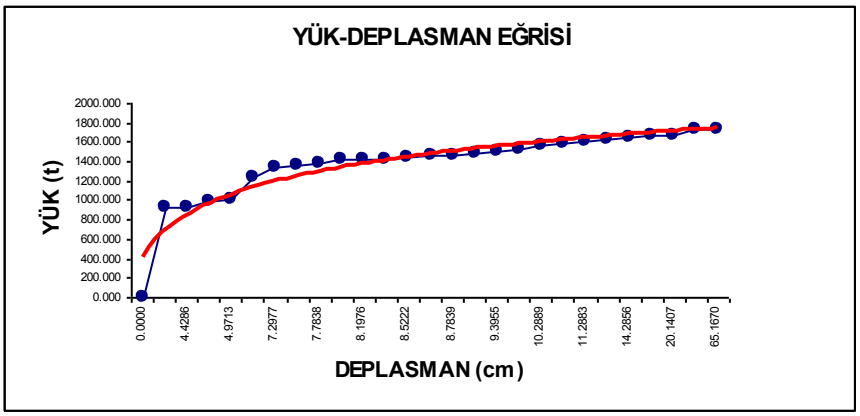
13 katlı perdeli sistemde STA4CAD adlı bilgisayar programı ve geliştirilen perde sonlu eleman modeli kullanılarak y doğrultusunda farklı hesaplar için elde edilen sonuçlar, döşeme etkisi dikkate alınmak ve alınmamak suretiyle üç farklı durum için aşağıdaki tabloda karşılaştırılmıştır.

Tablo.10.30. 13 katlı perdeli sistemde y doğrultusundaki bütün sonuçların karşılaştırılması

KAT NO	**Sta4Cad (m)**	**Gens.for (m) Döşemesiz**	**Gens.for (m) Döşemeli**
1	-0.0004	0.0004	0.0003
2	-0.0018	0.0019	0.0013
3	-0.0041	0.0043	0.0028
4	-0.0070	0.0074	0.0047
5	-0.0106	0.0111	0.0070
6	-0.0147	0.0154	0.0094
7	-0.0192	0.0200	0.0120
8	-0.0240	0.0250	0.0148
9	-0.0291	0.0302	0.0176
10	-0.0343	0.0355	0.0204
11	-0.0397	0.0410	0.0232
12	-0.0451	0.0464	0.0259
13	-0.0505	0.0519	0.0286

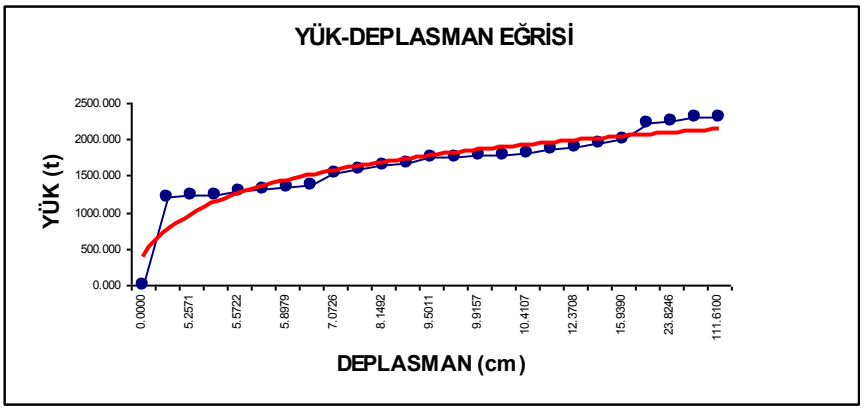
10.3. 6 Katlı Düzlem Perde-Kiriş Sisteminin Yük Artımı Yöntemi İle Hesabında Elde Edilen Sonuçlar

BÖLÜM.8'de adım adım anlatılan yük artımı yöntemi esaslarına uygun olarak geliştirilen perde sonlu eleman modeli ile 6 katlı perdeli sistem, döşemeler dikkate alınmaksızın düşey yük ve x doğrultusunda yatay yükler etkisinde analiz edilmiştir. Yapılan hesaplarda en son katın yatay deplasmanı, toplam kat yüksekliğinin 1/60'ına ulaştığında sistemin göçme durumuna geldiği kabul edilmiştir. Bu çözüme ait veri giriş ve sonuç dosyası EK.10'da yer almaktadır. EK.10'da elde edilen sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki grafik oluşturulmuştur.



Şekil.10.7. 6 katlı sistemin x doğrultusunda yük artımı yöntemiyle hesap sonuçları

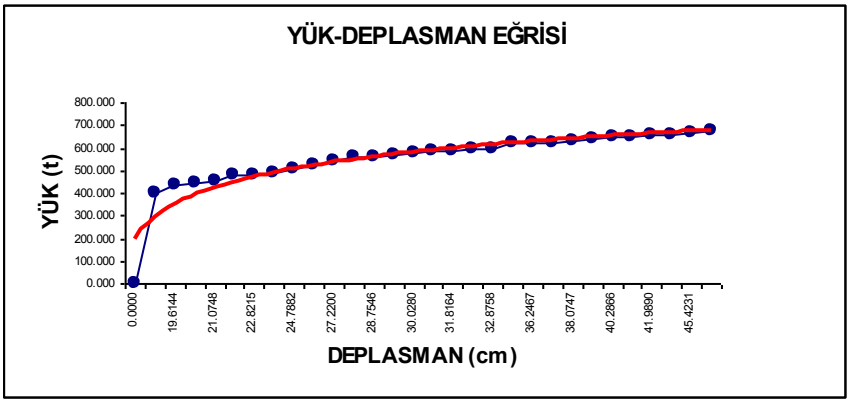
Bir sonraki aşamada 6 katlı perdeli sistem, döşemeler dikkate alınmaksızın düşey yük ve y doğrultusunda yatay yükler etkisinde analiz edilmiştir. Bu çözüme ait veri giriş ve sonuç dosyası EK.11'de yer almaktadır. EK.11'de elde edilen sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki grafik oluşturulmuştur.



Şekil.10.8. 6 katlı sistemin y doğrultusunda yük artımı yöntemiyle hesap sonuçları

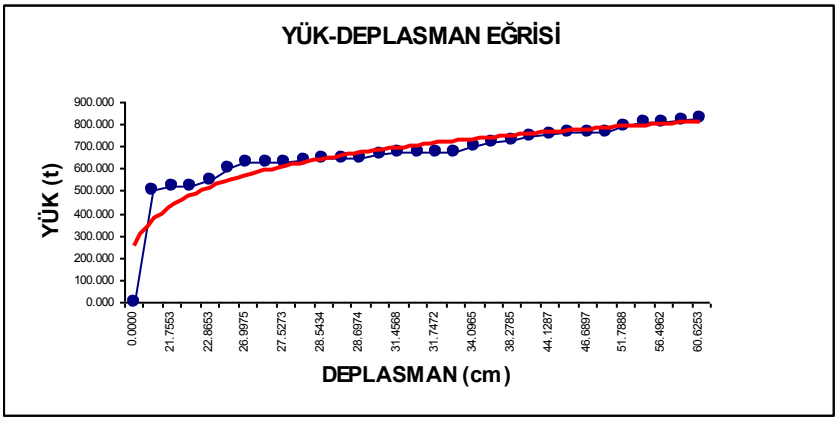
10.4. 13 Katlı Düzlem Perde-Kiriş Sisteminin Yük Artımı Yöntemi İle Hesabında Elde Edilen Sonuçlar

Yük artımı yöntemi esaslarına uygun olarak geliştirilen perde sonlu eleman modeli ile 13 katlı perdeli sistem, döşemeler dikkate alınmaksızın düşey yük ve x doğrultusunda yatay yükler etkisinde analiz edilmiştir. Yapılan hesaplarda en son katın yatay deplasmanı, toplam kat yüksekliğinin 1/60'ına ulaştığında sistemin göçme durumuna geldiği kabul edilmiştir. Yük artımı 50 adım sonunda yeterli yakınsaklığın sağlandığı kararıyla sonlandırılmıştır. Bu çözüme ait veri giriş ve sonuç dosyası EK.12'de yer almaktadır. EK.12'de elde edilen sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki grafik oluşturulmuştur.



Şekil.10.9. 13 katlı sistemin x doğrultusunda yük artımı yöntemiyle hesap sonuçları

Bir sonraki aşamada 13 katlı perdeli sistem, döşemeler dikkate alınmaksızın düşey yük ve y doğrultusunda yatay yükler etkisinde analiz edilmiştir. Bu çözüme ait veri giriş ve sonuç dosyası EK.13'de yer almaktadır. EK.13'de elde edilen sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki grafik oluşturulmuştur.



Şekil.10.10. 13 katlı sistemin y doğrultusunda yük artımı yöntemiyle hesap sonuçları

BÖLÜM 11. SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1. [35] de geliştirilmiş perde sonlu eleman modeli kat adedi farklı yapı sistemlerine uygulanmıştır. Bu sonlu eleman yardımı ile kat aralarında perde elemanları bölmeden, tek eleman olarak alıp çözüm yapıldığında, çözümün uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. Böylece bilinmeyen sayısı büyük ölçüde azaltılmıştır.

2. Geliştirilen perde sonlu elemanın planda yatayla farklı açılar yaptığı göz önüne alındığından, V, U, L şeklindeki perdelerin çözümü mümkün olabilmekte, çok uzun perdelerin yan yana gelmiş elemanların birleşmesi ile oluştuğu öngörülebilmekte, bunun sonucu çok uzun perdeler ve çekirdek perdelerin tek kesit olarak alınmasının sakıncaları ortadan kaldırılmaktadır. Bu tez çalışmasında çözülen örnekler tünel kalıp uygulaması yapılar ve bu tür perdelerin çoğunlukta olduğu taşıyıcı sisteme sahip yapılardır.

3. Çok katlı yapı sistemlerinde kat seviyesinde döşeme düzlemi içinde rijit hareket kabulü ile döşeme üzerindeki düğüm noktaları bir referans noktasına bağlandığından bilinmeyen sayısı önemli ölçüde azalmaktadır.

4. Geliştirilen perde sonlu elemanların düğüm noktalarında kat düzlemi içinde ortogonal iki dönme serbestliği ve kat düzlemine dik (düşey) bir doğrusal serbestlik bulunduğundan bu noktalara gerek perde düzlemi içinde, gerek perde düzlemine dik her doğrultuda çubuk eleman bağlanabilmekte, bunun sonucu uzay perde - çerçeve sistemlerin hesabı kolaylıkla yapılabilmektedir.

5. İdeal elasto - plastik malzeme kabul edilen perdelerin düzlemi içindeki gerilmelerin elastik olmayan davranışı incelenirken, düşeye dik şekildeğiştirmelerin çok küçük hatta kat hizalarında rijit diyafram etkisi ile sıfır olduğu dikkate alınır ve kayma gerilmelerinin etkisi ihmal edilirse, perdelerde akma koşuluna erişme düşey ε_z şekildeğiştirmenin bir ε_e elastik

akma sınırına ulaşması şeklinde tanımlanabilir. Geliştirilen elemanda düğüm noktalarındaki bu şekildeğiştirme bileşenlerinin düğüm noktaları serbestliklerinden biri olması bu kontrolü kolaylaştırmaktadır.

6. Belirli bir yük değeri için perde sonlu elemanlar yüzeyi içinde bu akma sınırına ulaşılmış ve aşılmış bölgeleri ardışık yaklaşımla tanımlayan yayılı plastikleşme düşünmek yerine, bu çalışmada plastik şekildeğiştirmelerin düğüm noktalarında toplandığı ve o düğüm noktasının üstünde kalan elemanlarla, altında kalan elemanların o noktada plastik yerdeğiştirme kadar farklı düşey yerdeğiştirme yapabileceği kabul edilmiştir. Çubuk sistemlerdeki plastik mafsal hipotezine benzer olan bu kabule göre, yük artımı yöntemi ile hesapta belirli bir yük parametresi için bir düğüm noktasında düşey şekildeğiştirme akma sınır değerine ulaşmışsa, bundan sonraki yük artımlarında üstteki elemanlar ile alttaki elemanlar arasında o noktadaki düşey düğüm noktası kuvveti bileşeni artmayacak üst elemanlar, alt elemanlardan o noktada ayrılacaktır. Özellikle, düğüm noktası perde mesnet kesitindeki bir nokta ise sonraki yük artımlarında bu noktadaki düşey yerdeğiştirme parametresi serbest bırakılacaktır.

7. Genelde tabanından mesnetli konsol gibi çalışan çok katlı yapı perdelerinde göçme iki şekilde oluşmaktadır:

    a. Biri hariç bütün mesnet noktalarında plastikleşmenin (düşeyde ayrılma) oluşması (bir nokta etrafında elemanın dönmesi gibi), diğer bir deyişle mesnet düğüm noktalarının ε_e elastik şekildeğiştirme sınırına gelmiş olmaları,

    b. Mesnetteki bütün noktalarda, ε_e elastik şekildeğiştirme değerine ulaşılmamış olsa bile, herhangi bir düğüm noktasında ε_p plastik şekildeğiştirme sınırına ulaşılmış olmasıdır.

Ancak bu tez çalışması kapsamında incelenen sistemde bodrum kat çevre perdelerinin mevcudiyeti nedeniyle plastik şekildeğiştirmeler, önce temel seviyesinde değil zemin kat seviyesindeki düğüm noktalarında ortaya çıkmıştır.

8. Plastik şekildeğiştirmeler düğüm noktalarında toplanıp, eleman içinde lineer elastik davranış kabulü yapıldığından sonlu eleman ve sistem rijitlik matrisi değişmemektedir. Geliştirilen yük artımı yöntemi ile hesapta sistem

rijitlik matrisi yalnız ilk adımda indirgenmekte daha sonraki adımlarda sadece ilave bilinmeyen olarak alınan plastik yerdeğiştirme değerlerine karşı gelen satır ve sütunlar indirgenmektedir.

9. Perde - çerçeve sistemlerinin lineer olmayan hesabı yapılırken elastik sınırın aşılmasının yalnız perde düğüm noktalarında değil çubuk uç kesitlerinde de oluşabileceği göz önüne alınmıştır. Kiriş uç kesitlerinde karşılıklı etki dikkate alınmadan gerek eğilme gerek burulma momentlerinin belirli bir plastik moment değerine ulaştığı yük parametresinde plastik mafsalların oluşacağı öngörülmektedir. Kolon uç kesitlerinde ise bileşik eğik eğilmeye ve burulmaya bağlı olarak akma koşuluna ulaşılacağı varsayılmıştır. İncelenen sistemde plastik mafsalların öncelikle perdeleri bağlayan bağ kirişlerinde oluştuğu gözlenmiştir.

10. Uzay perde çerçeveli yapı sistemlerinin önce elastik çözümünü yapan sonra sabit düşey artan yatay yükler altında göçme yükünü hesaplayan Fortran programlama dilinde, Microsoft Developer Studio da derlenen bilgisayar programı kullanılmıştır.

11. Statikçe eşdeğer deprem yükleri altındaki lineer hesap bölümü, STA4CAD bilgisayar programı sonuçları ile de karşılaştırılmış ve oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

12. Sistemde döşemelerin kalınlıkları az dahi olsa perdelerle birlikte çerçeve etkisi yaratacağı dikkate alınmış ve bunun, sistemin rijitliğini arttırdığı belirtilmiştir. Örneğin lineer hesapta döşeme rijitliklerinin dikkate alınması en üst kat yer değiştirmesini 6 katlı yapıda her iki doğrultu dikkate alındığında ortalama %25, 13 katlı yapıda ise ortalama %35 oranında azaltmaktadır.

13. Statik itme analizi sonucunda göçme sınırına karşı gelen yük parametresinin, deprem yönetmeliğinde statikçe eşdeğer deprem yükü metoduyla 13 katlı yapıda x doğrultusunda yaklaşık olarak 5,2 ve y doğrultusunda yaklaşık olarak 6,3 olduğu bulunmuştur. Bu değerler tüm yatay yüklerin perdelerle karşılandığı sistemler için yönetmelikte verilen R=6 yapı davranış katsayısının uygunluğunu göstermektedir.

14. Bu tez çalışmasında uygulanan yöntemin farklı kat adetli ve özellikli yeterli sayıda örneğe uygulanması ile perdeleri çubuk elemanlarla idealize eden programlarda yapılan kabullerin daha gerçekçi olması yönünde öneriler getirilebilecektir.

KAYNAKLAR

[1] **Saygun, A.I.**, 1979. Eğri eksenli, kutu kesitli kirişlerin hesabı için bir sonlu elemanlar yöntemi, *Doçentlik Tezi*, İstanbul.

[2] **Girgin, K.**, 1996. Betonarme yapı sistemlerinde ikinci mertebe limit yükün ve göçme güvenliğinin belirlenmesi için bir yük artımı yöntemi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. .Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[3] **Özer, E**., 1987. Determination of second-order limit load by a method of load increments, *Bulletin of Technical University of Istanbul*, **40-4**, 815-836.

[4] **İrtem, E.**, 1991. Uzay çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yukün hesabı için bir yuk artımı yöntemi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[5] **Taşkın, B.**, 2001. Sismik titreşimler altında betonarme perde ve çerçeve sistemlerin doğrusal olmayan stokastik analizi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[6] **Lefas, I.D. and Kotsovos, M., D.,** 1990. Nlfe analysis of RC structures and design implications, *Journal of Structural Engineering*, **116-1,** 146-164.

[7] **Khatri, D. and Anderson J.,C,** 1995. Analysis of reinforced concrete shear wall components using the ADINA nonlinear concrete model, *Computers and Structures*, **56-2/3,** 485-504.

[8] **Zienkiewicz, O.,C, Valliapan, S. and King, L, P.**, 1969. Elasto-plastic solutions of engineering problems 'initial stress', finite element approach, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **1**, 75-100.

[9] **Owen, D.,R.J. and Figueiras, J., A.**, 1983. Anisotropic elasto-plastic finite element analysis of thick and thin plates and shells, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **19**, 541-566.

[10] **Demir, F.**, 1998. Betonarme yapılarda sonlu eleman yönteminin uygulamaları, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[11] **Xucheng, W. and Xiaoning, W.,** 1995. Simplified method for elasto-plastic finite element analysis of hardening materials, *Computers and Structures*, **55-4,** 703-708.

[12] **Ziemian, R.,D. and Mcguire, W.,** 2002. Modified tangent modulus approach, a contribution to plastic hinge analysis, *Journal of Structural Engineering*, **128,** 1301-1307.

[13] **Bayrak, O., and Sheikh, S., A.,** 2001. Plastic hinge analysis, *Journal of Structural Engineering*, **127-9,** 1092-1100.

[14] **Karabinis, A. ,1. and Kiousis, P., D.,** 2001. Plasticity model for reinforced concrete elements subjected to overloads, *Journal of Structural Engineering*, **127-11,** 1251-1256.

[15] **İpek, M.,** 1987. Approximate concideration of beam stiffnesses in shear walled structures, *13. Regional Seminar on Earthquake Engineering*, İstanbul, September 14-24.

[16] **TS-500**, 1984. Betonarme yapıların hesap ve yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[17] **Köksal, T.,** 1995. Sonlu Elemanlar Metodu, Y. T. Ü. Matbaası, İstanbul.

[18] **Çakıroğlu, A., Özden, E. ve Özmen, G.,** 1992. Yapı Sistemlerinin Hesabı İçin Matris Metodları ve Elektronik Hesap Makinasi Programları, Cilt I., İ. T. Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

[19] **Çakıroğlu, A., Özden, E. ve Özmen, G.,** 1992. Yapı Sistemlerinin Hesabı İçin Matris Metodları ve Elektronik Hesap Makinasi Programları, Cilt II., İ. T. Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

[20] **Özden, K.,** 1997. Sonlu elemanlar ders notları.

[21] **Çakıroğlu, A. ve Özer, E.,** 1980. Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.

[22] **Özer, E.,** 1997. İleri yapı statiği ders notları.

[23] **Ersoy, U.,** 1985. Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, Cilt I, O.D.T.Ü., Evrim Yayınevi ve Ticaret Ltd. Şti., İstanbul.

[24] **Pala, S. ve Saygun, A.,** 1992. A rectangular plane stress element with 12 degrees of freedom, *Bulletin of Technical University of Istanbul,* **45-1-3**.

[25] **Zienkiewicz, O. C,** 1971. The Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-HILL Book Company, London.

[26] **Przemieniecki, J. S.,** 1968. Theory of Matrix Structural Analysis, McGraw-HILL Book Company, London.

[27] **Keskinel, F. ve Karadoğan F.,** 1992. Açıklamalı Örneklerle Fortran IV ve 77., Birsen Yayınevi, İstanbul.

[28] **Meek, J. L.,** 1991. Computer Methods in Structural Analysis, Chapman & Hall, Australia.

[29] **Bathe, K. J.,** 1982. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, New Jersey.

[30] **Cook, R. D., Malkus, D.C.S. and Plesha, M. E.,** 1988. Concepts and Applications of Finite Element Analysis.

[31] **Celep, Z. ve Kumbasar, N.,** 1995. Örneklerle Betonarme, İ.T.Ü., Sema Matbaacılık, İstanbul.

[32] **TS-498**, 1984. Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[33] **Özden, K., Altan, M. ve Aydoğan, M.,** 1987. Betonarme Kesitlerin Boyutlandırılması, Uran Mühendislik A. Ş., Yayın no.3, İstanbul.

[34] **İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Betonarme Yapılar Birimi,** 1990. Betonarme Tablo ve Abaklar, İ. T. Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

[35] **Cengiz, E.,Y.**, 2004. Yeni bir perde sonlu elman modeli ve çok katlı perde-çerçeveli yapı sistemlerinin göçme güvenliğinin belirlenebilmesi için yük artımı yöntemi, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

EKLER

EK.1. GENS.FOR BİLGİSAYAR PROGRAMI, ALT PROGRAMLARI YAZILIMI DİSKET KOPYASI

EK.2. 6 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE X DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.3. 6 KATLI DÜZLEM PERDE-KİRİŞ SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE X DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.4. 6 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.5. 6 KATLI DÜZLEM PERDE-KİRİŞ SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.6. 13 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİNİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE X DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.7. 13 KATLI DÜZLEM PERDE-KİRİŞ SİSTEMİNİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE X DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.8. 13 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİNİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.9. 13 KATLI DÜZLEM PERDE-KİRİŞ SİSTEMİNİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.10. 6 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE DÜŞEY YÜKLER VE X DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK YÜK ARTIMI YÖNTEMİYLE HESABI İÇİN OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.11. 6 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE DÜŞEY YÜKLER VE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK YÜK ARTIMI YÖNTEMİYLE HESABI İÇİN OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.12. 13 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE DÜŞEY YÜKLER VE X DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK YÜK ARTIMI YÖNTEMİYLE HESABI İÇİN OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.13.13 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE DÜŞEY YÜKLER VE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK YÜK ARTIMI YÖNTEMİYLE HESABI İÇİN OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.14.ÇİZİMLER (BODRUM KAT KALIP PLANI, NORMAL KAT KALIP PLANI, ÖRNEK OLARAK 13 KATLI SİSTEMDE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM DURUMUNDA YÜK ARTIMI YÖNTEMİNE GÖRE OLUŞAN PLASTİK MAFSALLARIN NORMAL KAT, BODRUM KATI VE TEMEL HİZASI NOKTA YERLEŞİM PLANLARI)

EK.2. 6 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE X DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.3. 6 KATLI DÜZLEM PERDE-KİRİŞ SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE X DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.4. 6 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.5. 6 KATLI DÜZLEM PERDE-KİRİŞ SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.6. 13 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİNİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE X DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.7. 13 KATLI DÜZLEM PERDE-KİRİŞ SİSTEMİNİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE X DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.8. 13 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİNİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.9. 13 KATLI DÜZLEM PERDE-KİRİŞ SİSTEMİNİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.10.6 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE DÜŞEY YÜKLER VE X DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK YÜK ARTIMI YÖNTEMİYLE HESABI İÇİN OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.11.6 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE DÜŞEY YÜKLER VE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK YÜK ARTIMI YÖNTEMİYLE HESABI İÇİN OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.12.13 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE DÜŞEY YÜKLER VE X DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK YÜK ARTIMI YÖNTEMİYLE HESABI İÇİN OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.13.13 KATLI DÜZLEM PERDE SİSTEMİN ÇÖZÜM 2'YE GÖRE DÜŞEY YÜKLER VE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM YÜKÜ ETKİTİLEREK YÜK ARTIMI YÖNTEMİYLE HESABI İÇİN OLUŞTURULAN VERİ GİRİŞ VE SONUÇ DOSYASI

EK.14.ÇİZİMLER (BODRUM KAT KALIP PLANI, NORMAL KAT KALIP PLANI, ÖRNEK OLARAK 13 KATLI SİSTEMDE Y DOĞRULTUSUNDA DEPREM DURUMUNDA YÜK ARTIMI YÖNTEMİNE GÖRE OLUŞAN PLASTİK MAFSALLARIN NORMAL KAT, BODRUM KATI VE TEMEL HİZASI NOKTA YERLEŞİM PLANLARI)

ÖZGEÇMİŞ

Ayşegül KANLI, 19.03.1980 tarihinde İzmir'de doğmuştur. 1998 yılında İzmir Kız Lisesi'ni başarıyla bitirmiş, lisans öğrenimini 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde tamamlamış, 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başlamıştır.