<u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>

BETONARME BOŞLUKLU DÖŞEMELERİN ANALİTİK VE DENEYSEL OLARAK İRDELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet GEZER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

ARALIK 2018



<u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>

BETONARME BOŞLUKLU DÖŞEMELERİN ANALİTİK VE DENEYSEL OLARAK İRDELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet GEZER (501161020)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Beyza TAŞKIN

ARALIK 2018



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501161020 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mehmet GEZER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "BETONARME BOŞLUKLU DÖŞEMELERİN ANALİTİK VE DENEYSEL OLARAK İRDELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	Doç. Dr. Beyza TAŞKIN İstanbul Teknik Üniversitesi	
Jüri Üyeleri :	Prof. Dr. Ercan YÜKSEL İstanbul Teknik Üniversitesi	
	Prof. Dr. Bilge DORAN Yıldız Teknik Üniversitesi	

Teslim Tarihi: 16 Kasım 2018Savunma Tarihi: 13 Aralık 2018





Eşime,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen ve mühendisliğe karşı bakış açımı ve motivasyonumu diri tutan danışman hocam sayın Doç. Dr. Beyza TAŞKIN'a, sayın Dr. İnş. Müh. Kerem PEKER'e, İnş. Yük. Müh. Ahmet KAPTAN'a, İnş. Yük. Müh. Sinem KOLGU'ya, deneyler sırasında yardımcı olan İnş. Müh. Uğur Melih TÜYSÜZ'e ve İnş. Müh. Ahmet KARABACAK'a, çizimlerde yardımcı olan İnş. Teknikeri Ahmet GÜRGAN'a ve tüm Erdemli Proje çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitimim boyunca maddi ve manevi desteğini yanımda hissettiren aileme ve dostlarıma gösterdikleri sabır ve anlayış için teşekkür ederim. Özellikle tüm tez dönemimde farklı meslekte olmasına rağmen elinden geleni yapan ve her zaman yanımda olan eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2018

Mehmet Gezer İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

<u>Sayfa</u>

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	XXV
1. GİRİŞ	1
1.1 Boşluklu Döşeme ve Yapım Amaçları	1
1.2 Tarihi ve Gelişimi	2
1.3 Yapılan Çalışmalar	6
2. PLAK ELEMAN DAVRANIŞI GENEL TEORİLERİ VE UYGULAM	A 9
2.1 Plak Eleman Davranışı Genel Teorileri	9
2.1.1 Membran davranışı	9
2.1.1.1 Kafes sistem elemanı	9
2.1.1.2 Plak eleman	11
2.1.2 Eğilme ve Kesme Davranışı	15
2.1.2.1 Kiriş	15
2.1.2.2 Kalın plak	
2.1.2.3 İnce plak	24
2.2 Sonlu Elamanlar Yöntemi ve Genel Teorilerin İlişkisi	
2.2.1 Şekil fonksiyonları	
2.2.1.1 Narin kirişin şekil fonksiyonlarının çıkarılması	35
2.2.1.2 İnce plak elemanın şekil fonksiyonlarının çıkarılması	
2.2.2 Rijitlik matrisi ile şekil fonksiyonlarının ilişkisi	
2.2.2.1 Narin kirişin rijitlik matrisinin şekil fonksiyonlarıyla çıkarılma	s1 39
2.2.2.2 İnce plak elemanın rijitlik matrisinin şekil fonksiyonlarıyla	
çıkarılması	41
2.3 Ortotropik Plak (Boşluklu Döşeme)	44
2.3.1 İzotropik plak ile ortotropik plak arasındaki hesap farklılıkları	44
2.3.2 Ortotropik plak modelinin sonlu elemanlar yönteminde uygulanmas	s145
3. BOŞLUKLU KESİT ANALİZİ VE PARAMETRİK ÇALIŞMALAR	47
3.1 Kesit Analizi	
3.1.1 Genel kesit analizi esasları	49
3.1.1.1 Çatlama durumu	50
3.1.1.2 Akma durumu	51
3.1.1.3 Güç tükenmesi durumu	52
3.1.2 Boşluklu ve boşluksuz döşeme kesit analizleri karşılaştırılması	53
3.2 Parametrik Çalışmalar	57

3.2.1 Şekil çalışması	.57
3.2.1.1 Parametrelerin tanıtımı	.58
3.2.1.2 Sonuç ve değerlendirme	.58
3.2.2 Kesit analizi çalışması	.61
3.2.2.1 Parametrelerin tanıtımı	.61
3.2.2.2 Xtract programında malzeme tanımları ve analizlerin yapımı	. 62
3.2.2.3 Analiz sonuçları ve değerlendirme	.63
4. PROJE ÖRNEĞİ	. 65
4.1 Genel Bina Bilgileri	.68
4.2 Kirişsiz Döşeme Sisteminde Ön Boyutlandırma ve Zımbalama Ön Tasarımı	.71
4.2.1 Ön boyutlandırma	.71
4.2.2 Zımbalama ön hesabı	.71
4.3 Deprem Etkisi Altında Tasarım İçin Genel Esaslar	.72
4.3.1 Bina kullanım sınıfı	.72
4.3.2 Deprem tasarım sınıfı	.73
4.3.3 Bina yüksekliği ve bina yükseklik sınırları	.73
4.3.4 Bina performans hedefi	.74
4.4 Deprem Etkisi Altında Binanın Dayanıma Göre Hesabı ve Tasarımı	.74
4.4.1 R, D, R _a (T), S _{aR} (T) katsayılarının belirlenmesi	.74
4.4.2 Kirissiz dösemelerin hesabına ilişkin özel koşul	.75
4.4.3 Doğrusal hesap için taşıyıcı sistem modellenmesi	.76
4.4.4 Doğrusal hesap yönteminin seçilmesi	.81
4.4.5 Mod birleştirme yöntemiyle doğrusal deprem hesabı	.81
4.4.6 Deprem etkilerinin birleştirilmesi	.84
4.5 Analiz Sonuçları Ve Değerlendirme	. 85
4.6 Betonarme Döşeme Tasarımı	.90
4.6.1 Eğilme tasarımı	.90
4.6.2 Kesme tasarımı	.93
4.6.3 TBDY döşeme tasarımında özel koşullar	.96
4.6.3.1 Düzlem içi kuvvet kontrolleri	.96
4.6.3.2 Deprem yükünün döşemelerden perdeye aktarımının kontrolü	100
4.6.3.3 Zımbalama kontrolü	103
5. DENEY VE ANALİTİK ÇALIŞMA	107
5.1 Deney Numunelerinin Tanıtımı	107
5.2 Deney Yapım Aşamaları ve Alınan Ölçümler	108
5.3 Deney Numunelerinin Sayısal Modellenmesi	110
5.4 Deneysel ve Analitik Çalışmanın Karşılaştırılması	111
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	115
6.1 Boşluklu Döşemenin Plak Eleman Olarak Modellenmesi	115
6.2 Optimum Boşluk Şekli	115
6.3 Etkin Kesit Rijitliği Çarpanı	116
6.4 Yapı Tasarımında Dikkat Edilmesi Gerekenler	116
6.5 Deneysel ve Analitik Çalışmanın Çıkarımları	117
KAYNAKLAR	119
EKLER	121
ÖZGEÇMİŞ	173

KISALTMALAR

: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY **TS500** : Türk Standardı : Bina Kullanım Sınıfı BKS : Deprem Tasarım Sınıfı DTS BYS : Bina Yükseklik Sınıfı : Deprem Düzeyi DD DGT : Dayanıma Göre Tasarım ŞGDT : Şekildeğiştirmeye Göre Değerlendirme ve Tasarım



SEMBOLLER

Α	: Kafes sistem alanı
$\mathbf{A}_{\mathbf{s}}$: Çekme donatısı alanı
A _s '	: Basınç donatısı alanı
$\mathbf{A_{sb}}$: Kesme sürtünmesi için gerekli bağlantı donatısı
$\mathbf{A}_{\mathbf{t}}$: Ampirik doğal titreşim periyodu hesabında kullanılan eşdeğer alan
\mathbf{A}_{wj}	: j'inci perdenin gövde enkesit alanı
a	: Eşdeğer dikdörtgen beton basınç bloğu yüksekliği
$\alpha, \beta, \omega_{xy}$: Membran davranışına ait birim şekildeğiştirme
b, h	: Kesit parametreleri
C^0, C^1, C^2	: Süreklilik tipi
Ct	: Ampirik doğal titreşim periyodu hesabında kullanılan katsayı
c	: Beton basınç bloğu yüksekliği
D	: Dayanım fazlalığı katsayısı
D _e	: Eğilme rijitliği
$\mathbf{D}_{\mathbf{k}}$: Kesme rijitliği
∂	: Parçalı diferansiyel denklem operotörü
d	: Diferansiyel denklem operotörü
d'	: Paspayı
d	: etkili yükseklik (yükseklik-paspayı)
Δ_{i}	: Azaltılmış göreli kat ötelemesi
δ _i	: Etkin göreli kat ötelemesi
Ε	: Elastisite modülü
E _c	: Beton elastisite modülü
$\mathbf{E}_{\mathbf{s}}$: Çelik elastisite modülü
$E_{d}^{(x)}, E_{d}^{(y)}, E_{d}^{(z)},$: Deprem yükleri
$\epsilon, \epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \gamma_{xy}$: Birim şekildeğiştirme
ε _c	: Beton basınç birim şekildeğiştirmesi
ε _s	: Çekme bölgesi çelik birim şekildeğiştirmesi
ε _s '	: Basınç bölgesi çelik birim şekildeğiştirmesi

ε _u	: maksimum birim şekildeğiştirme
F _a	: Zımbalama bölgesi içinde kalan plak yükleri
$\mathbf{F_c}$: Basınca çalışan beton kuvveti
$\mathbf{F_s}$: Çekmeye çalışan çelik kuvveti
F _s '	: Basınca çalışan çelik kuvveti
$\mathbf{F_s}$: Kısa periyotlar için yerel zemin etki katsayısı
$\mathbf{F}_{\mathbf{z}}$: Eğilme ve kesme davranışına ait genel dış yük
\mathbf{F}_1	: 1saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
f , f ₁ , f ₂	: Membran ya da kafes davranışına ait dış yük
f _{ctd}	: eksenel yük altında eksenel beton çekme dayanımı
f _r	: Eğilme yükü altında çatlama durumunda eksenel beton çekme dayanımı
G	: Kayma modülü
γxz, γyz, γx, γy	: Plak eleman eğilme ve kesme davranışına ait kayma açısı
$\mathbf{H}_{\mathbf{N}}$: Bina yüksekliği
Ι	: Atalet momenti
i, j	: Başlangıç ve bitiş indisleri
kA	: Boşluklu döşeme için alan düzeltme katsayısı
kG	: Boşluklu döşeme için kayma alanı düzeltme katsayısı
kI	: Boşluklu döşeme için atalet düzeltme katsayısı
kV	: Boşluklu döşeme için hacim düzeltme katsayısı
k ₁	: Eşdeğer dikdörtgen beton basınç bloğu yüksekliği için katsayı
κ, γ	: Kiriş elemana ait birim şekildeğiştirme
$\kappa_{xx}, \kappa_{yy}, \rho_{xy}, \gamma_x, \gamma_y$: Plak eleman eğilme ve kesme davranışına ait birim şekildeğiştirme
KÇatlama	: Çatlama eğiriliği
K _{Akma}	: Akma eğiriliği
ƘGüçTükenmesi	: Güç Tükenmesi eğiriliği
ξ, η	: Göreli koordinat takımı
L	: Eleman boyu
l_{wj}	: j'inci perdenin planda uzunluğu
M , V	: Kiriş elemana ait iç kuvvet
$\mathbf{M}_{ ext{Catlama}}$: Çatlama momenti
M _{Akma}	: Akma momenti

$\mathbf{M}_{\mathbf{G}\ddot{\mathbf{u}}\mathbf{\varsigma}\mathbf{T}\ddot{\mathbf{u}}\mathbf{kenmesi}}$: Güç Tükenmesi momenti
m _{xx} , m _{yy} , m _{xy}	: Plak eleman eğilme ve kesme davranışına ait moment
Ν	: Şekil fonksiyonu
Ν	: Kafes sistem eksenel kuvveti
n	: modüler oran
$\mathbf{n}_{\mathbf{x}}, \mathbf{n}_{\mathbf{y}}, \mathbf{n}_{\mathbf{xy}}$: Gerilme [Kuvvet/Uzunluk]
p , p _x , p _y	: Yayılı yük
R	: Yapı davranış katsayısı
R _a (T)	: Deprem azaltma katsayısı
S	: Birinci alan momenti
S _s	: Kısa periyotlar için harita spektral ivme katsayısı
S ₁	: 1 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
S _{DS}	: Kısa periyotlar için tasarım spektral ivme katsayısı
S _{D1}	: 1saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı
σ _s	: Çekme donatısı gerilmesi
σ_{s} '	: Basınç donatısı gerilmesi
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$: Gerilme [Kuvvet/Alan]
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$: Plak eleman eğilme ve kesme davranışına ait gerilme [Kuvvet/Alan]
$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \tau_{12}, \tau_{21}$: Asal eksen gerilmesi [Kuvvet/Alan]
T_A, T_B	: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyotları
T _{PA}	: Ampirik olarak hesaplanan hakim doğal titreşim periyodu
t	: Plak kalınlığı
θπ	: İkinci mertebe gösterge değeri
U	: Birim şekildeğiştirme enerjisi
ui	: Azaltılmış kat ötelemesi
u _{x1} ,u _{x2} ,u _{x3} ,u _{x4}	: Sonlu elemanlar yönteminde membran davranışına ait x- doğrultusu yerdeğiştirmeleri
u _{y1} ,u _{y2} ,u _{y3} ,u _{y4}	: Sonlu elemanlar yönteminde membran davranışına ait y- doğrultusu yerdeğiştirmeleri
up	: Zımbalama çevresi
u, u _(x)	: Kafes sistem elemanına ait yerdeğiştirme
u _x ,u _y	: Plak eleman yerdeğiştirmesi
$\mathbf{V}_{\mathbf{pd}}$: Zımbalama tasarım yükü
V _{pr}	: Zımbalama dayanımı
V _{max}	: Maksimum kesme kuvveti

: Beton kesme de çatlama dayanımı
: Kesme dayanımı beton katkısı
: Kesme dayanımı enine donatı katkısı
: Mod birleştirme yöntemiyle hesaplanan taban kesme kuvveti
: Eşdeğer deprem yükü yöntemiyle hesaplanan taban kesme kuvveti
: Asal eksen kesme kuvveti
: Plak eleman eğilme ve kesme davranışına ait kesme kuvveti
: Poisson orani
: yayılı moment yükü
: Kiriş elemana ait yerdeğiştirme
: Plak eleman eğilme ve kesme davranışına ait yerdeğiştirme
: Koordinat takımı
: Boşluklu Döşeme kesit parametreleri
: Kesit ağırlık merkezi ile tabanı arası mesafe

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Sayfa</u>

Çizel	ge 3.1 : Eşit kalınlıklara sahip plastik kör kalıp maliyeti	60
Çizel	ge 3.2 : Optimize edilmiş kalınlıklara sahip plastik kör kalıp maliyeti	60
Çizel	ge 3.3 : Kesit analizi çalışmasının alternatifleri	62
Çizel	ge 4.1 : Kirişsiz döşeme zımbalama kontrolü.	72
Çizel	ge 4.2 : TBDY (2018) bina kullanım sınıfı	72
Çizel	ge 4.3 : TBDY (2018) deprem tasarım sınıfı	73
Çizel	ge 4.4 : TBDY (2018) bina yükseklik sınıfları	73
Çizel	ge 4.5 : TBDY (2018) bina performans hedefi.	74
Çizel	ge 4.6 : TBDY (2018) bina taşıyıcı sistemleri için taşıyıcı sistem davranış	
	katsayısı, dayanım fazlalığı katsayısı ve izin verilen bina yükseklik	
	sınıfları.	74
Çizel	ge 4.7 : TBDY (2018) betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının etkin kesit	
	rijitliği çarpanları.	76
Çizel	ge 4.8 : Deprem durumu kat kütleleri hesabı.	81
Çizel	ge 4.9 : Proje örneği periyotları ve kütle katılım oranları	82
Çizel	ge 4.10 : Deprem hesabından kullanılabilecek periyot sınırları	83
Çizel	ge 4.11 : Mod birleştirmeden bulunan deprem yükünün eşdeğer deprem yükü	ne
	göre ölçeklendirilmesi	83
Çizel	ge 4.12 : Sünek olmayan tasarıma esas P1 çekirdek perdesi kesme kuvvetleri.	.85
Çizel	ge 4.13 : Sünek olmayan tasarıma esas P2 çekirdek perdesi kesme kuvvetleri.	.86
Çizel	ge 4.14 : X-Doğrultusu göreli kat öteleme oranlarının kontrolü	88
Çizel	ge 4.15 : Y-Doğrultusu göreli kat öteleme oranlarının kontrolü	88
Çizel	ge 4.16 : X-Doğrultusu ikinci mertebe gösterge değeri	89
Çizel	ge 4.17 : Y-Doğrultusu ikinci mertebe gösterge değeri	89
Çizel	ge 4.18 : Proje örneği kesme dayanım hesabı	93
Çizel	ge 4.19 : Döşemenin düzlem içi sınır değerleri	96
Çizel	ge 4.20 : Kesme sürtünmesi için gerekli bağlantı donatısı (A _{sb}) 1	03
Çizel	ge 5.1 : Deney numuneleri, içerikleri ve amaçları 1	08



ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sayfa</u>

Şekil 1.1 : Boşluklu döşeme	2
Sekil 1.2 : Mantar döşeme [1]	2
Şekil 1.3 : Turner konseptine göre betonarme mantar döşeme (Gasparini,2002)	3
Sekil 1.4 : Günümüz Pantheon [2]	4
Sekil 1.5 : Pantheon kesit [3]	4
Sekil 1.6 : Dairesel kör kalıp [4]	5
Sekil 1.7 : Elips kör kalıp [5]	5
Şekil 1.8 : Kare kör kalıp [6]	5
Sekil 2.1 : Membran kuvvetleri.	9
Şekil 2.2 : Kafes sistem elemanı	9
Şekil 2.3 : Kafes eleman temel denklemleri	10
Şekil 2.4 : Plak eleman membran davranışına ait gerilmeler ve şekildeğiştirmeler	11
Şekil 2.5 : Plak elemanın membran davranışına ait temel denklemler	11
Şekil 2.6 : Plak eleman yerdeğiştirmeleri ve şekil değiştirmiş hali	12
Şekil 2.7 : Plak eleman membran davranışına ait gerilme ve birim şekildeğiştirme	
ilişkisi	12
Şekil 2.8 : Plak elemana etki eden yükler ve membran kuvvetleri	14
Şekil 2.9 : Plak eleman düzlem dışı kuvvetler	15
Şekil 2.10 : Kiriş elemanın serbestlikleri ve etki eden yükler	15
Şekil 2.11 : Eğime ve kesme altında kiriş yer değişimleri	16
Şekil 2.12 : Kiriş elemana ait temel denklemler	17
Şekil 2.13 : Kiriş eleman yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme ilişkisi.	17
Şekil 2.14 : Kiriş eleman denge kuvvetleri bileşenleri	17
Şekil 2.15 : Plak elemanın eğilme ve kesme davranışına ait serbestlikler ve	
kuvvetler	18
Şekil 2.16 : Plak eleman dönme yerdeğiştirmelerinin düzlem içi yerdeğiştirmelerle	е
ilişkisi	19
Şekil 2.17 : Plak elemanın eğilme ve kesme davranışına ait yerdeğiştirmeler	20
Şekil 2.18 : Plak elemanın eğilme ve kesme davranışına ait şekildeğiştirmeleri	21
Şekil 2.19 : Plak elemanın eğilme ve kesme davranışına ait temel denklemler	21
Şekil 2.20 : Plak eleman eğilme ve kesme davranışına ait iç kuvvetler ve dış	
yükler	23
Şekil 2.21 : Ince plak elemanın eğilme davranışına ait temel denklemler	24
Şekil 2.22 : Seçilen eksen takımındaki ve asal eksenlerdeki gerilmeler arasındaki	
ilişki.	26
Şekil 2.23 : Plak eleman eş moment eğrileri	27
Şekil 2.24 : Seçilen eksen takımında ve asal eksen takımındaki kesme kuvvetlerini	n
arasındaki ilişki.	28
Şekil 2.25 : Doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme için birim şekildeğiştirme	•••
enerjisi	29
Şekil 2.26 : Dış yüklerin yaptığı iş.	30

Şekil 2.27 : Sonlu elemanlar ve genel teoriler arasındaki yerdeğiştirme farklılıkları.3	1
Şekil 2.28 : Plak elemanın eğilme ve kesme davranışına ait N_3 şekil fonksiyonu (C^0	
süreklilik tipi)	2
Şekil 2.29 : Tek boyutlu bir elemanın şekil fonksiyonları	3
Şekil 2.30 : Pascal üçgeninde interpolasyon	ł
Şekil 2.31 : Pascal karelerinde interpolasyon. 34	1
Şekil 2.32 : Narin kiriş eleman genel teori ve sonlu elemanlar yöntemi	
yerdeğiştirmeleri	5
Şekil 2.33 : Ince plak eleman genel teori ve sonlu elemanlar yöntemi	_
yerdeğiştirmeleri	1
Şekil 2.34 : Boşluksuz ve boşluklu birim kesit parametreleri	j
Şekil 3.1 : Betonarme kesit gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi	,
Sekil 3.2 : Boşluksuz ve boşluklu kesit analızınde örnek ($t_u = t_a = 10$ cm) kesit	•
boyutlari	5
Sekil 3.4 : Desluktuz ve besluktu kosit englizinde ärrek $(t - t - 7ar)$ kosit	,
Sekii 5.4 : Boşluksuz ve boşluklu kesit allarızınde ofnek $(t_u - t_a - 7 \text{ cm})$ kesit	=
Sakil 3.5 • Sekil calismasi hosluk cesitleri ve kesit parametreleri	2 2
Sekil 3.6 · Kesit analiz calışmaşı boşluklu keşit parametreleri	, 1
Sekil 3.7 · TBDY (2018) beton ve celik malzeme özellikleri	2
Sekil 3.8 : Xtract program malzeme özellikleri tanımı	3
Sekil 4.1 : Proje örneği lokasyonu	ŝ
Sekil 4.2 : Tipik kat kalıp planı)
Sekil 4.3 : Proje örneği kesiti)
Sekil 4.4 : DD-2 deprem düzeyi yatay elastik tasarım spektrumu	l
Şekil 4.5 : Proje örneği seçilen boşluksuz ve boşluklu döşeme kesiti	l
Şekil 4.6 : Deprem yükü azaltma katsayısı75	5
Şekil 4.7 : Azaltılmış tasarım ivme spektrumu75	5
Şekil 4.8 : Bağ kirişleri ve kolonların etkin kesit rijitliği çarpanlarının ETABS'de	
dikkate alınması77	7
Şekil 4.9 : Perdelerin etkin kesit rijitliği çarpanlarının ETABS'de dikkate alınması.77	7
Şekil 4.10 : Boşluksuz döşemelerin etkin kesit rijitliği çarpanlarının ETABS'de	_
dikkate alinmasi	/
Şekil 4.11 : Boşluksuz, boşluklu ve eşdeger kesit	,
Şekil 4.12 : Boşluklu doşemelerin etkin kesit rijitligi çarpanlarının ETABS'de	•
Cikkale ainmasi	י ו
Sokil 4.15 : Proje örneğinin üç boyutlu beşan modeli	י ו
Sekil 4 15 · Kat kesme kuvvetleri	;
Sekil 4.16 · Sünek olmayan tasarıma esas P1 ve P2 cekirdek perdesi kesme	,
kuvvetleri	7
Sekil 4.17 : Döseme donatısı icin düzenlenen gömülü hatıl detavı)
Sekil 4.18 : Proje örneği maksimum M11 momenti	L
Sekil 4.19 : Proje örneği maksimum M22 momenti	2
Şekil 4.20 : Kolon çevresi boşluklu kesitte düzenlenen çiroz detayı	3
Şekil 4.21 : Proje örneği maksimum V13 kesme kuvveti	1
Şekil 4.22 : Proje örneği maksimum V23 kesme kuvveti	5
Şekil 4.23 : Proje örneği dayanım fazlalılığı ile arttırılmış yük birleşimleri zarf	
kuvveti-F1197	7

Sekil 4 24 · Proje örneği dayanım fazlalılığı ile arttırılmış yük birleşimleri zarf	
kuvveti_F??	98
Sekil 4 25 • Proje örneği dayanım fazlalılığı ile arttırılmış yük hirleşimleri zarf	70
kuvveti E12	00
Sekil 4 26 • TRDV (2018) dösemenin denrem väklerini däsev tasivici sisteme))
aktarması	100
Sekil 4 27 · X-Doğrultuşu eğilme dayanımı için gerekli olan donatı alanı	100
sonuclari	101
Sakil 1 28 · V-Doğrultuşu eğilme dayanımı için gerekli olan donatı alanı	101
sonuclari	102
Sekil 4 29 · TRDV (2018) zimbalama detavlari	102 104
Sekil 4 30 · TBDV (2018) zimbalama kontrolü için maksimum V13 keşme	104
kuvveti	105
Sakil 1 31 • TRDV (2018) zimbalama kontrolü için maksimum V23 keşme	103
kuvveti	106
Sakil 51 · Deney numunesi alman ölçümler	100 100
Solvil 5.2 · Deney numunesi düzeneği	109
Sekil 5.2 · Dency numunesi eatlak uzunluğu	109
Sekil 5.5 . 2a numunesi çallak uzunluğu	111
Sekil 5.5 : Denov numunosi 20 analitik va denovaal calisma karailastirilmasi	111 112
Sekil 5.6 : Deney numunesi 2b analitik ve deneysel çalışma karşılaştırılması.	113 111
Sekil A 1 : Kara tabanlı sakil adışmaşı sonuq grafikləri	173
Sekil A.1. Kalt tabanlı şekil çalışması sonuç grafikleri	123 124
Sekil A.2 : Daire tabanlı şekil çalışması sonuç grafikleri	124
Sekil B.1 : Kogit analizi calisması C20 MİN	125
Sekil B.2 : Kesit analizi çalışması-C20Alvilly	121
Sekil B.2 : Kesit analizi çalışması $C20A(0.004)$.	120
Sekil B. <i>A</i> · <i>K</i> coit analizi calismasi C20A(0.000)	149 120
Sekil D.4 : Kesit analizi çalışması-C20AMAKS	130 121
Sekil B.6 : Kesit analizi çalışması C20 D (0.004)	121
Sekil B.7 : Kesit analizi çalışması $C20B(0.004)$.	134 122
Sekil B.9 : Kesit analizi çalışması C20 B MAKS	133 134
Sekil B.O. Kosit analizi çalışması C20A MİN	. 134
Sekil D.7 . Kesit analizi çalışınası-C30A(0.004)	133
Sekil D.10 : Kesit analizi çalışması- $C30A(0.004)$.	130 127
Sekil B 17 : Keşit analizi çalışmaşı C20AMAKS	. 13/ 139
Sekil B 13 · Koşit analizi çalışmaşı C20 P MİN	130 130
Sekil B.1 4 : Keşit analizi çalışmaşı C30 B (0.004)	137 170
Sekil B 15 : Keşit analizi çalışması $C_{3}OB(0.004)$.	140 1/1
Sekil D.15 : Kesit analizi çalışması-C50D(0.000).	141
Sekil D.10 : Kesit analizi çalışması-C50DMAKS	144 172
Sekil B.17 : Kesit analizi çalışması C40A(0.004)	143 111
Sekil B 10 : Kesit analizi çalışması $C40A(0.004)$.	1/15
Sekil D .17. Kesit analizi çalışması-C40A(0.000)	143
Sekil D.20 : Kesit analizi çalışması-C40AMAKS	140 147
Solui D 21 . Resit analizi çalışması $C40D(0.004)$	14/ 1/0
Solui B 23 · Kesit analizi calismasi $C40D(0.004)$.	14ð 170
Solui B 24 · Kesit analizi calienesi C40DMAKS	147 150
Solvil C 1 • Donov numunosi 10	130 151
Solvil C 2 . Donov numunosi 1b	151
Şски U.2: Deney nununesi-10	132

Şekil C.3 : Deney numunesi-2a.	153
Şekil C.4 : Deney numunesi-2b	
Şekil C.5 : Deney numunesi-3a.	155
Şekil C.6 : Deney numunesi-3b	156
Şekil C.7 : Deney numunesi-4a1.	157
Şekil C.8 : Deney numunesi-4a2.	158
Şekil C.9 : Deney numunesi-4b	159
Şekil C.10 : Deney numunesi-4c.	160
Şekil C.11 : Deney numunesi-5a1.	161
Şekil C.12 : Deney numunesi-5a2.	162
Şekil C.13 : Deney numunesi-5b1	163
Şekil C.14 : Deney numunesi-5b2	164
Şekil C.15 : Deney numunesi-5c1	165
Şekil C.16 : Deney numunesi-5c2.	166
Şekil D.1 : Malzeme tanımları	
Şekil D.2 : Yarı-rijit diyafram tanımı.	168
Şekil D.3 : Yük biçimleri	
Şekil D.4 : Kütle kaynağı	
Şekil D.5 : Modal analiz yük durumu	169
Şekil D.6 : Azaltılmış tasarım spektrumunun modele eklenmesi	169
Şekil D.7 : Dinamik analiz yük durumları	170
Şekil D.8 : Statik analiz yük durumları	171
Şekil D.9 : Yük birleşimlerinin tanımlanması.	171

BETONARME BOŞLUKLU DÖŞEMELERİN ANALİTİK VE DENEYSEL OLARAK İRDELENMESİ

ÖZET

Tarih boyunca yapılan yapılar, ihtiyaç dolayısıyla birçok değişime uğramıştır. Bu ihtiyaçlar bazen mimari olarak bazen statik olarak bu değişime yön vermiştir. Mimari olarak daha büyük açıklıklar ve kirişsiz elde edilen düz tavan ve statik olarak daha hafif ve sünek yapılar her zaman bir ihtiyaç olmuştur. Böylelikle, tasarımcı kirişsiz mantar döşeme veya döşemelerde ağırlık azaltmak için çalışmalar yapmıştır. Son zamanlarda ilerleyen teknoloji ve analiz metotlarıyla birçok farklı sistemler çözülebilmektedir. Döşeme içinde boşluklar bırakılarak oluşturulan boşluklu döşeme de son yıllarda büyük açıklıklı kirişsiz döşemelerde sık kullanılmaya başlamıştır. Ancak boşluksuz kesit olarak yapılan bütün hesap kabullerinin yanında boşluklu döşemenin nasıl analizlerde dikkate alınacağı ve yönetmeliklerdeki karşılıkları araştırılması gereken konulardır. Bu sebeple, tez kapsamında 6 ana başlıkta boşluklu döşemenin boşluksuz bir döşemeye göre hesaplara ve teorilere uygunlukları araştırılmıştır.

Başlangıç olarak bu döşeme türünün ilk çalışmaları olarak kabul edilebilecek mantar döşeme çalışmalarından ve döşemedeki ağırlık çalışmalarından bahsedilmiştir.

İkinci bölümde ise plak teorileri genel olarak düzlem içi kayma ve eğilme, düzlem dışı kesme ve eğilme davranışları ve sonlu elemanlar yöntemi arasındaki ilişki kurulmuştur. Plak teorileri diferansiyel olarak kinematik, bünye ve denge denklemleri yazılmıştır. Elde edilen denklemler ile sonlu elemanlar yönteminde kullanılacak olan rijitlik matrisinin şekil fonksiyonları ile enerji yöntemleri kullanılarak çıkarılması anlatılmıştır. Daha sonra ortotropik bir kesit olarak düşünülen boşluklu döşemenin yazılan üç ana denklemde sadece bünye denklemlerinin değişeceği diğer iki denklemin aynı olacağı gösterildi. Boşluklu döşeme kesitinin boşluksuz bir kesite göre değişecek olanın rijitlikler, alan, kayma alanı ve hacim olduğu anlaşıldıktan sonra bu değişimi ifade eden düzeltme katsayılarının hesabı verilmiştir. Bu düzeltme katsayıları ile boşluklu döşemenin boşluksuz bir plak eleman olarak modellenebileceği gösterildi.

Üçüncü bölümde genel olarak kesit analizinde daha önce kullanılan elastik yöntemden ve şu an kullanılan taşıma gücü yönteminden bahsedilmiştir. Daha sonra boşluklu ve boşluksuz döşeme kesitine ait genel kesit analizi esasları ve karşılaştırmalı çözümler yapılmıştır. Boşluklu döşeme kesitinin basınca çalışan plak kalınlığının kesitteki basınç bloğu yüksekliğinden büyük olduğu sürece boşluksuz döşeme ile aynı taşıma gücüne sahip olduğu gösterildi. Son olarak uygun boşluklu döşeme tasarımı için parametrik şekil çalışması yapılmıştır. Kare ve altıgen tabanlı şeklin daire tabanlı şekle göre daha fazla beton hacmi kazancı sağladığı görülmüştür. Maliyet hesapları kare tabanlı şekil için hazırlanmıştır. Boşluk genişliğinin artmasıyla daha az maliyetli olduğu görülmüştür. Ancak boşluk genişliği ile birlikte birim boyda azalan kayma alanı, gevrek göçme durumu olan kesme kuvvetini baskın hale getirmektedir. Buna ek olarak gerilme yığılmaları da büyük problem olmaya başlamaktadır. Kesit analizi parametrik çalışmasıyla da uygun miktarda donatı oranı, beton sınıfı, sargı donatısı ile boşluklu döşeme modelinin boşluksuz plak olarak modellenebilme şartı olan basınç bloğu yüksekliğinin basınca çalışan plak kalınlığını geçmemesi durumunun hangi durumlarda sağladığı verilmiştir. Birçok alternatif kesitlerde farklı donatı oranlarında kullanılabilecek etkin kesit rijitliği çarpanları bulunmuştur.

Dördüncü bölümde ise boşluklu döşeme sistemine sahip yüksek katlı bir yapının TBDY şartlarını sağlayan bir proje örneği yapılmıştır. Proje örneğinin taşıyıcı sistemi yönetmelik koşullarına göre oluşturulduktan sonra analizleri tamamlanmış ve döşeme için eğilme ve kesme tasarımı yapılmıştır. TBDY döşeme için kontrol edilmesi gereken özel şartlar olan döşemelerin perdeye deprem yükünü aktardığı, düzlem içi gerilme sınırlarının sağlandığı ve zımbalama yönünden problem olmadığı hesapsal olarak gösterilmiştir.

Beşinci bölümde ise tez kapsamında ve betonarme hesap kabulleri, boşluksuz döşeme için geçerli olup olmadığı araştırılmaktadır. Deneyleri tamamlanan numunelerde malzeme deney sonuçları sonucu elde edilen parametreler kullanılarak ve yönetmelik değerleri kullanılarak deneyi yapılan boşluklu döşeme kesitinin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Sistem olarak yüklenen yük ve açıklık ortasında okunan yerdeğiştirme grafikleri matematiksel modelden elde edilen grafikler ile karşılaştırılmıştır. Kesit olarak deney sonucu açıklık ortasında elde edilen moment dönme grafikleri matematiksel modelde tanımlanan değerler ile kıyaslanmıştır.

Son bölümde ise tez kapsamı boyunca elde edilen sonuçlar ve dikkat edilmesi gereken konular hakkında önerilerde bulunulmuştur.

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL EXAMINATION OF REINFORCED CONCRETE VOIDED SLABS

SUMMARY

Structures made throughout history have undergone many changes due to need. These needs have sometimes been architecturally and sometimes statically. Architecturally larger openings and flat roofs and statically lighter and ductile structures have always been a need. In this way, the designer has made efforts to reduce weight in slabs and design mushroom slabs. A number of different systems are being solved by recent technological analysis methods. The voided slab formed by leaving gaps in the flooring has been frequently used in large-span in recent years. However, in addition to the acceptance of all calculation made without a gap, it is important to consider how the voided slab is taken into consideration in the analysis and the provisions in the regulations should be investigated. For this reason, in the scope of thesis, six main headings were examined and checked the conformity of the voided slabs to the calculation and theories according to a normal slab without voids.

Initially, the first studies of this type of slabs can be considered as mushroom flooring and the studies on the weight of the floor was mentioned.

In the second part, plate theories, in-plane shear and bending, out-of-plane shear and bending behaviours were investigated. In order to explain the bending and shear behaviour in the plane, kinematic, constitutive and equilibrium equations were written as differential in the truss and plate element. In order to explain the bending and shear behaviour in the out-of-plane, kinematic, constitutive and equilibrium equations were written as differential in the beam and plate element. Finite element methods to be used in the stiffness matrix, shape functions are obtained by using energy methods are described. For example, shape functions and stiffness matrices were calculated for beam and thin plate elements. Voided slab was considered as an orthotropic cross-section. Only the constitutive equations of three basic equations in general plate theories change between the orthotropic section and the isotropic section. After the recognize that stiffness, area and volume of the voided slab section will change only according to the slab without void, calculation of this exchange expressing correction coefficients are given. With these correction coefficients, it was shown that the voided slab could be modelled as slab without void according to the plate theories.

In the third chapter, generally the elastic method used in the section analysis and the currently used capacity design method are mentioned. Then, general cross-sectional analysis principles and comparative solutions were made for the section with and without void. It has been shown that the compression-bearing plate thickness of the voided slab section has the same carrying capacity as the void-free slab as long as the compression-bearing flange thickness in the section analysis is greater than the height of the compression block. In case the compression block height is greater than the compression-bearing flange thickness, the results show differences. Parametric studies were made for convenient voided slab design based on shape of void and

section analysis. Parametric studies made on three void shapes as square, hexagonal 16, 18, 20 cm, body thickness W = 5, 10, 15 cm and void width D = 30, 41, 52, 63, 74 cm alternatives are examined loss of inertia in unit area and changes in volume of concrete in unit area. Square-based shapes for plastic, machine, packaging, formwork, transportation, casualty and profit costs were calculated. As a result, more solutions that are economical can be seen with the increasing width of the selected alternative gap widths. However, due to the width of the body, the shear area drops for the shear force start to become a problem in larger gap widths. The loss of inertia increases with the gap width. However, since the loss of inertia is not too much, this reduction does not affect the cost unless the limit is in the limit state. C20, C30, C40 concrete class alternatives were evaluated in the other parametric study. Upper and lower flange thickness F = 6, 8, 10 cm, void height H = 10, 13, 16, 20, 24, 28 cm, body thickness W = 10, 15, 20 cm and void width 52 cm alternatives section's results were evaluated. In addition to the cross-sectional alternatives, an alternative crosssection analysis was carried out 0.002 reinforcement ratios corresponding to approximately the minimum reinforcement, 0.02 reinforcement ratios corresponding to maximum reinforcement and 0.004 and 0.008 reinforcement ratios as intermediate values. Finally, the body was modelled as confined concrete, which was formed by arranging the tie or stirrup along the voided slab section body, and all alternatives were evaluated according to the confined concrete model. All alternate sections are analyzed to determine the moment, curvature, compression block height, ductility ratio and effective cross section rigidity for linear calculation. In the cross-sectional study, it has been observed in which conditions of the void slab section should not exceed the flange thickness of the compression block height in order to model some coefficients as a used plate element. Based on the ratio of reinforcement, at the minimum reinforcement ratio of 0.12, 0.004 reinforcement ratio of 0.20, 0.008 reinforcement ratio of 0.40 and maximum reinforcement ratio of 0.80 effective section stiffness factor was found. As the section height increased, this factor was found to be above the mean values. It has been observed that the ductility ratio increased from minimum reinforcement to 0.008 reinforcement ratio but decreased at maximum rate of reinforcement.

In the fourth chapter, an example of a project that provides the Turkish Seismic Code-2018 conditions of a high-rise building with a voided slab system was made. After the construction of the project sample has been established according to the code requirements, analyzes are completed and reinforced concrete design for slab was made. It has been shown that the special conditions to be checked for TSC-2018 slab convey the earthquake load to the wall, the in-plane stress limits are provided and there is no punching problem in this project sample.

In the fifth chapter, in the scope of the thesis and in the acceptance of reinforced concrete calculation, it is investigated whether it is valid for voided slabs. The mathematical model of the voided slab section was tested by using the parameters obtained because of the material test results and using the values of the codes. As a system, the displacement graphs read in the middle of the span and loaded load were compared with the graphs obtained from the mathematical model. As a cross-section, the results of the moments and rotation obtained from the middle of the test were compared with the values defined in the mathematical model. Moment-rotational graphs with displacement meter placed in the middle section and moment-curvature values from mathematical modelling are compared. Reaching the yielding remains at

a distance of 2d in the case of a narrow body 2a and d in a large body 2b sample. In the codes, it is observed that the void in unit area changes the value of the plastic hinge length when considering the acceptance of the plastic hinge length d in the middle of the opening in a normal filled section. While it is not expected a non-linear behaviour from the slabs, it is expected to behave ductile like an earthquake. As seen in the voided slab results, the section continues to displace at similar strength after reaching the yield point. It is observed that the effective section stiffness multiplier changes depending on the section size, material strength and elasticity values.

In the last chapter, suggestions were made about the results and issues to be considered during the thesis scope.



1. GİRİŞ

Döşeme, yapı tasarımındaki düşey yük akışının genellikle ilk safhasında bulunan ve kendi ağırlığıyla beraber üzerinde bulunan yükleri varsa kirişlere yoksa kolon ve perdelere aktaran bir yapı elamanıdır. Aynı zamanda, yüksek miktarda düzensiz mesnetler yani kolon ve perde gibi düşey taşıyıcı elemanların bir arada daha yüksek performansla çalışmasını sağlayan bir yapı elamanıdır. Bu, yatay yük akışının sağlanması için önemli bir özelliktir.

Günümüzde birçok betonarme döşeme sistemi kullanılmaya başlamıştır. Bunlar genel olarak; bir doğrultuda çalışan plak döşeme, bir doğrultuda çalışan dişli döşeme, iki doğrultuda çalışan plak döşeme ve iki doğrultuda çalışan dişli döşemedir. Bunlara ek olarak son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlayan boşluklu döşeme de betonarme döşeme sistemleri arasına girmiştir.

1.1 Boşluklu Döşeme ve Yapım Amaçları

Plak döşeme kirişsiz ya da kirişli olarak düzenlenebilmektedir. Birçok avantajından dolayı son zamanlarda kirişsiz plak döşeme olarak düzenlemeye gidilmiştir. Bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Kalıp işçiliği önemli miktarda basitleşmektedir.
- Kalıp işçiliğinin basitliği daha hızlı ve ekonomik olmasını sağlar.
- Mimari açıdan daha estetik bir yapı olmasını sağlar.
- Kirişli tasarıma göre daha ince bir plakla geçilen kat, yüksek binalarda ciddi oranda hacim kazancı sağlar.

Boşluklu döşeme sistemi, kirişsiz döşemenin özelleşmiş bir halidir. Kirişsiz plak döşemenin sağladığı avantajların yanında birçok faydası mevcuttur. Boşluklu döşeme plak içerisinde boşluklar oluşturularak hazırlanan bir döşeme sistemidir. (Şekil 1.1)



Şekil 1.1 : Boşluklu döşeme.

Kirişsiz plak döşemelerin büyük açıklıklarının orta bölümlerinde beton plak içinde boşluklar bırakılarak oluşturulan boşluklu döşeme, kendi ağırlığından dolayı gerekli olacak donatıdan kazanç ve bina ağırlığının azalmasıyla sistemin daha az deprem kuvvetine maruz kalması gibi avantajlar sağlayacağı söylenebilir.

1.2 Tarihi ve Gelişimi

Avrupa'da döşeme sisteminin tarihine baktığımızda Robert Maillart'ın çalışmaları karşımıza çıkmaktadır. 1908'de kiriş kullanmadan betonarme bir döşemenin yapılıp yapılamayacağına dair deneysel çalışmalar yapmıştır. Mesnet bölgelerinde yüksek gerilmelerden dolayı oluşan kesme ve eğilme etkilerini karşılaması için kolon üst uçlarına geniş başlıklar kullanarak ilk kirişsiz döşeme sistemini yapmıştır. 1909 yılında patentini almış ve 1910 yılında Zürih'de bir depo inşaatında bunu ilk kez kullanmıştır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 : Mantar döşeme [1].

Amerika Bileşik Devlerine baktığımızda ise Robert Mailart'dan önce 1905 yılında mantar döşeme hakkında Turner'in çalışmaları olmuş ve bu konuda oluşturduğu kavram Şekil 1.3'de gösterilmiştir.



Şekil 1.3 : Turner konseptine göre betonarme mantar döşeme (Gasparini,2002).

Mantar döşeme çalışmalarıyla öncelikle kirişler olmadan daha geniş hacimlere ulaşıldıktan sonra daha geniş açıklıklar elde etmek için döşemenin ağırlığını azaltmakta bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu ağırlık azaltma çalışmaları mantar döşeme çalışmalarından çok daha öncelere dayanmaktadır. Örneğin Roma'da yapılan Pantheon bunun ilk örneklerindendir (Şekil 1.4) ve kesit planı Şekil 1.5'de gösterilmiştir.



Şekil 1.4 : Günümüz Pantheon [2].



Şekil 1.5 : Pantheon kesit [3].

Günümüzde de teknolojinin gelişmesiyle analiz programları uygun hale gelmiş ve zımbalama konularında edinilen bilgilerle kirişsiz döşeme sistemi sıklıkla kullanılır hale gelmiştir. Özellikle yüksek binalar, köprüler, alışveriş merkezleri, otoparklar gibi büyük açıklığa ve daha estetik düz bir tavana ihtiyaç duyulan yapılarda çokça kullanılmaya başlamıştır. Bu yapılardaki büyük açıklıklar ya ardgerme ya da boşluklu döşemelerle çözüme ulaştırılmaya başlanmıştır. Ancak boşluklu döşeme, uygulama olarak daha kolay ve maliyet olarak daha uygun olduğu için ardgermeye göre daha fazla tercih edilmiştir.

Boşluklu döşeme içinde kullanılan kör kalıplar, birçok özel firma tarafından üretilmeye başlanmıştır. Bu kör kalıplar yüksek yoğunluklu polietilenden dairesel (Şekil 1.6), elips (Şekil 1.7) ve kare (Şekil 1.8) şeklinde üretilip yaygın biçimde kullanılmaya başlamıştır.



Şekil 1.6 : Dairesel kör kalıp [4].



Şekil 1.7 : Elips kör kalıp [5].



Şekil 1.8 : Kare kör kalıp [6].

1.3 Yapılan Çalışmalar

Boşluklu döşeme sisteminin düşey yük yönetmeliklerindeki yeri ve tasarımı için teknik rapor hazırlanmıştır. Bu çalışma da 9 farklı döşeme sistemi üzerinde konutlar veya ofislerden depolama bölgesinde hesaba katılması gereken 5 farklı yükleme tipinde ve 16 farklı açıklıkta toplam da 720 adet analiz yapılmıştır. Boşluklu döşeme sisteminde kesit özellikleri olarak yalnız atalet, alan ve hacim değişikleri dikkate alınarak düşey yük tasarımı yapılmıştır. Toplam da üç adet teknik rapor yayımlanmıştır. Birinci raporda yukarda bahsi geçen düşey yük tasarımı anlatılmıştır. İkinci raporda ise maliyet analizleri yapılarak boşluklu döşemenin farklı açıklıklarda farklı yükleme tiplerinde diğer döşeme sistemlerine göre nerede kaldığını göstermektedir. Son raporda ise deprem yönetmeliğinin sağlaması gereken en temel iki durumu olan eğilme ve kesme kuvveti için rijit diyafram kabulü yapmadan çözülen sonuçlara göre tasarımı anlatılmıştır (Tuncan ve Taşkın, 2014).

Boşluklu döşeme sistemine ait atalet değişimlerinin dayandığı plak teorileri denklemleri yazılarak gösterilmiştir. Boşluklu döşemede genellikle kirişsiz döşemelerde kullanılmaktadır. Bu döşeme sistemlerinde zımbalama büyük önem taşıdığı için bu konuda detaylı açıklamalar ve zımbalama donatıları Eurocode'a göre anlatılmıştır. Son olarak teorik bilgileri kullanarak Abaqus programında eğilme altında boşluklu döşemenin düşey yük ve yerdeğiştirme grafikleri karşılaştırılmıştır. Zımbalama etkileri için deneyler yapılarak Sap2000 programıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Coronelli ve diğ., 2016).

Boşluklu döşemenin tarihi ve gelişimi ile ilgili açıklamalar yapılarak Amerikan yönetmeliği ACI 318-11'e göre eğilme, kesme davranışı ve zımbalama durumu kontrolleri bir örnek çözülerek anlatılmıştır (CRSI, 2014).

Farklı boşluk yüksekliği içeren, farklı açıklıklarda ve farklı kalınlıklarda döşeme sistemlerinde rijitlik ve hacim değişiklikleri dikkate alınarak sayısal yöntemlerle ve Sap2000 programında analizler yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarında tepki kuvvetleri, yerdeğiştirmeler ve moment değerleri gösterilmiştir. Boşluklu döşeme zati ağırlık tasarrufu sağladığı için moment değerleri %7-10 arasında daha az olduğu gözlemlenmiştir. Boşluk bırakılarak oluşturulan döşeme de daha az moment olduğu için ve atalet daha düşük olduğu için aynı yükler altında boşluksuz döşeme ile benzer yerdeğiştirme değerleri okunmaktadır. Donatı moment değerlerine göre koyulduğu
için donatı miktarında %20'e varan kazanç sağlanmaktadır. Sonuç olarak boşluksuz döşemenin rijitlik düzeltme katsayısı ve hacim azaltma katsayısı ile modellenebileceği gösterilmiştir (Bhagat ve Parikh, 2014).

Güney Afrika Ulusal Standartlarına (SANS10100, 2000) ve TMH7 Bölüm 3 (1989)'e göre boşluklu döşemenin düşey yük eğilme ve kesme davranışı incelenmiştir. Küresel boşluk bırakılarak oluşturulan boşluklu döşemelerde eğilme ve kesme davranışı için rijitlik düzeltmesi yapılarak analizler Strand7 programında yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarından beton miktarı, donatı alanı, döşeme kalınlığı ve maliyet hesapları farklı açıklıklarda grafikleri çizilmiştir. Kaset döşeme ve ardgerme kullanılan sistemlerde de aynı kategoride sonuçlar elde edilerek karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, boşluk tipinde kullanılan minimum kesme donatılarıyla boşluklu döşeme rijitlik düzeltme katsayısı 0.55 alınırken deneylerle de desteklenen bu çalışma da 0.85 değerlerine kadar çıkabildiği görülmektedir. Diğer bir sonuç ise boşluk bırakmak için kullanılan malzemenin maliyetinden dolayı en yüksek maliyet boşluklu döşemededir (Marais, 2009).

Boşluklu döşeme için bırakılacak boşluğun önemi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda küre boşluktan kare boşluğa kadar farklı tipik şekillerde, şekillerin köşelerinin yarıçapları ve boşluk plastiğinin ortasındaki bırakılan delik ile beton girmiş bölgenin çapı bakımından olmak üzere üç tip parametre üzerinde analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları olarak da eğilme ve kesme yükleri altında yük ve yerdeğiştirme grafikleri incelenmiştir. Daha sonra çatlak dağılımları her boşluk alternatifi için bulunmuştur. Hedef bir yapı belirlenerek kat planının farklı noktalarında beton basınç bloğu yüksekliğinin boşluk yüksekliğine bağlı olarak çizilen sınır değerlerinde olup olmadığı kontrol edilmiştir. Sonuç olarak boşluklu döşeme de %45'e varan ağırlık kazancı sağlayan şekil kare şekildir. Ancak gerilme yığılmaları ve çatlak dağılımı düşünüldüğünde 50mm yarıçapa sahip köşelerin olduğu kesit optimum kesit olarak belirlenmiştir (Chung ve diğ., 2010).



2. PLAK ELEMAN DAVRANIŞI GENEL TEORİLERİ VE UYGULAMA

2.1 Plak Eleman Davranışı Genel Teorileri

Plaklar düzlem içi ve/veya düzlem dışı yükleri aktaran perde duvarları, yüksek kirişleri ve döşemeleri matematiksel olarak modellemek için kullanılan sistemlerdir. Bir yapı elemanının düzlem içi davranışını membran davranış ve düzlem dışı davranışını eğilme ve kesme davranışı olarak genel iki başlık altında toplanabilir.

2.1.1 Membran davranışı

Düzlem içi davranışı tanımlayan membran davranışı, eksenel yükün etkin olduğu iki boyutlu yapı elemanı olarak modellenen perde duvar ve döşemelerde karşılaşılan bir durumdur. Düzlem içi kuvvetleri elemanı etkileyen çevresel yükler (f) ve yayılı yükler (p_x/p_y) oluşturur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Membran kuvvetleri.

2.1.1.1 Kafes sistem elemanı

Kafes sistem elemanı plak elemanın membran davranışını anlamak için ele alınması gereken en basit halidir. Kafes sistem elemanı kendi ekseninde tek yönde düzlem içi kuvveti aktarırken (Şekil 2.2) plak eleman membran davranışı olarak birbirine dik iki yönde düzlem içi kuvvetleri aktarır.



Şekil 2.2 : Kafes sistem elemanı.

Kafes sistem elemanı da dâhil bütün yapı eleman modellerinde sağlanması gereken üç denklem vardır. Bunlar Şekil 2.3 'de görüldüğü gibi kinematik denklemler, bünye denklemleri ve denge denklemleridir.



Şekil 2.3 : Kafes eleman temel denklemleri.

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} \tag{2.1}$$

$$N = EA\varepsilon \tag{2.2}$$

$$-\frac{dN}{dx} = p \tag{2.3}$$

Kafes sistem elemanı için denklem 2.1 kinematik denklemini, denklem 2.2 bünye denklemini ve denklem 2.3 denge denklemini göstermektedir. Kinematik denklemi bünye denkleminin içine ve bünye denklemini denge denklemleri içine yazıldığında ikinci dereceden bir diferansiyel denklem bulunur.

$$-EA\frac{d^2u}{dx^2} = p \tag{2.4}$$

İkinci dereceden bir diferansiyel denklemin çözümü için iki adet sınır koşulu gereklidir. Bunlar x=0 noktasında;

$$-N_1 = f_1 \to -EA\left(\frac{du}{dx}\right)_1 = f_1 \tag{2.5}$$

x=L noktasında;

$$N_2 = f_2 \to EA\left(\frac{du}{dx}\right)_2 = f_2 \tag{2.6}$$

şeklindedir. Denklem 2.5 ve denklem 2.6 ile yerdeğiştirmeler bulunur ve temel üç denklem (kinematik, bünye, denge) kullanılarak şekildeğiştirmeler (ε) ile iç kuvvetler (N) bulunabilir.

2.1.1.2 Plak eleman

Plak elemanın membran davranışı birbirine dik iki eksenli düzlem içi kuvvetlerden dolayı iki eksenli normal gerilme, kayma gerilmesi ve bu gerilmelerden dolayı oluşan şekildeğiştirmelerle ifade edilebilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Plak eleman membran davranışına ait gerilmeler ve şekildeğiştirmeler.

Membran davranışında kalınlık boyunca gerilme değişmediği için genel olarak membran kuvvetleri olarak σ_{xx} (kN/m²) yerine n_{xx} (kN/m) kullanılır. Kafes sistemde olduğu gibi plak elemanda da temel üç denklemin sağlanması gerekir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : Plak elemanın membran davranışına ait temel denklemler.

Genellikle birbirine çok karıştırılan yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme nerdeyse aynı yerlerde kullanılıyor. Ancak yerdeğiştirme herhangi bir yönde elemanın yerinin değişmesini ifade ederken şekildeğiştirme elemanın hacimsel olarak değişmesini ifade eder. Şekil 2.6 plak elamanın yerdeğiştirmeleri (u_x , u_y , ω_{xy}) ve şekildeğiştirmiş elemanın halini göstermektedir.

Denklem 2.7 plak elamanın membran davranışı için kinematik denklemlerini göstermektedir. Şekil 2.5 izlenecek olursa şekil 2.7'de bünye denklemleri için gerilme ve birim şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Plak eleman yerdeğiştirmeleri ve şekil değiştirmiş hali.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}$$
(2.7)



Şekil 2.7 : Plak eleman membran davranışına ait gerilme ve birim şekildeğiştirme ilişkisi.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{Et} (n_{xx} - \nu n_{yy})$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{Et} (n_{yy} - \nu n_{xx})$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{n_{xy}}{Gt}$$
(2.8)

G=E/2(1+ ν) alınarak;

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{cases} = \frac{1}{Et} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{cases} n_{xx} \\ n_{yy} \\ n_{xy} \end{cases}$$
(2.9)

esneklik formülasyonunda bulunan bünye denklemi, rijitlik formülasyonuna göre yazılırsa denklem 2.10 elde edilir.

$$\begin{cases}
 n_{xx} \\
 n_{yy} \\
 n_{xy}
 \end{cases} = \frac{Et}{1 - \nu^2} \begin{vmatrix}
 1 & \nu & 0 \\
 \nu & 1 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{2}(1 - \nu)
 \end{vmatrix} \begin{cases}
 \varepsilon_{xx} \\
 \varepsilon_{yy} \\
 \gamma_{xy}
 \end{cases}$$
(2.10)

Bünye denklemleri de elde edildikten sonra Şekil 2.8'de plak eleman üzerine etki eden yükler (p_x,p_y) ve membran kuvvetleri (n_{xx}, n_{yy}, n_{xy}) gösterilmiştir. Daha sonra sırayla x ve y yönünde denge denklemleri yazılarak temel üç denklemden denge denklemi de bulundu (2.11). Kafes sistemde olduğu gibi kinematik denklemleri bünye denklemlerine ve elde edilen denklemi denge denklemlerine yazarak dış yük ile yerdeğiştirme arasında doğrudan bir ilişki kurulmuş olur (2.12).

$$-\left(\frac{\partial n_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial n_{yx}}{\partial y}\right) = p_x$$

$$-\left(\frac{\partial n_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial n_{xy}}{\partial y}\right) = p_y$$
(2.11)



Şekil 2.8 : Plak elemana etki eden yükler ve membran kuvvetleri.

$$-\frac{Et}{1-v^{2}}\begin{bmatrix}\frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} + \frac{1-v}{2}\frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}} & \frac{1+v}{2}\frac{\partial^{2}}{\partial x\partial y}\\\frac{1+v}{2}\frac{\partial^{2}}{\partial x\partial y} & \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}} + \frac{1-v}{2}\frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_{x}\\u_{y}\end{bmatrix} = \begin{cases}p_{x}\\p_{y}\end{cases}$$
(2.12)

Denklem 2.12'deki diferansiyel denklem çözümü için iki bilinmeyene (u_x, u_y) ait fonksiyonların bilinmesine ve iki bilinmeyenli ikinci dereceden bir diferansiyel denklem olduğundan 4 sınır koşuluna ihtiyaç vardır. Denklem 2.13'de örnek olarak yerdeğiştirme fonksiyonları verilmiştir. Sınır durumu olarak da plak elamanda kinematik durumdan $u_x(x,y)=u_{xo}(x,y)$ ve $u_y(x,y)=u_{yo}(x,y)$ olmak üzere iki sınır durumu ve dinamik durumdan yani çevresel yükler ile membran kuvvetleri denge denklemleri yazılarak elde edilen iki sınır durumu olmak üzere 4 tane bulunmuş olur. Böylelikle denklem çözülerek yerdeğiştirmeler elde edilir ve bu yerdeğiştirmeye bağlı şekildeğiştirmeler ve gerilmeler bulunabilir.

$$u_{x}(x, y) = c_{1} + c_{2}x + c_{3}y + c_{4}x^{2} + c_{5}xy + c_{6}y^{2}$$

$$u_{y}(x, y) = d_{1} + d_{2}x + d_{3}y + d_{4}x^{2} + d_{5}xy + d_{6}y^{2}$$
(2.13)

2.1.2 Eğilme ve Kesme Davranışı

Düzlem dışı davranış olan eğilme ve kesme davranışı, plak düzlemine dik yükler altında olan iki boyutlu yapı elemanı olarak modellenen perde duvar ve döşemelerde karşılaşılan bir durumdur. Şekil 2.9'daki gibi plak eleman düzlemine dik bir kuvvet uygulandığında çökme ve dönme serbestlik dereceleri olan bir matematiksel bir model oluşturulur.



Şekil 2.9 : Plak eleman düzlem dışı kuvvetler.

2.1.2.1 Kiriş

Kiriş eleman çökme ve dönme serbestlik derecesi olan ve yayılı düşey yük ile yayılı moment yükü barındıran bir matematiksel model olarak tasarlanabilir (Şekil 2.10). Plak elamanın eğilme ve kesme davranışında çökme ve iki yönde dönme serbestlik derecesi barındırırken kiriş çökme ve tek yönde dönme serbestlik derecesi barındırır. Kiriş bu sebepten dolayı plak elemanın eğilme ve kesme davranışı bakımından özel bir hali olduğu söylenebilir.



Şekil 2.10 : Kiriş elemanın serbestlikleri ve etki eden yükler.

Kiriş elemanı eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri altında yerdeğiştirme yaparak kayma açısı (kayma şekildeğiştirmesi) oluşturur. Şekildeğiştirmemiş kesit, kiriş merkezinden geçen kiriş aksına diktir. Ancak eğilme momentine ve kesme kuvvetine maruz kaldıktan sonra şekil değiştirmiş kesit ve aksa dik doğru ile yapılan açı kayma açısıdır. Şekil 2.11'de mavi renk şekildeğiştirmemiş, yeşil renk sadece eğilme momentinden dolayı şekil değiştirmiş ve kırmızı renkte olan hem kesme kuvvetinden hem de eğilme momentinden şekil değiştirmiş kirişin dx kadar bir parçasını göstermektedir. Kayma açısı, Şekil 2.11'de 3 numaralı kiriş parçasında eğilmeden kaynaklanan dönme ve kesme kuvvetinden kaynaklanan çökmenin birim boya bölünmesiyle elde edilen dönmenin toplamına eşittir. Eğilme momentinden dolayı oluşan dönme, saat yönünün tersi hareket pozitif açı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.11 : Eğime ve kesme altında kiriş yer değişimleri.

Kafes sistem ve plak elemanın membran kuvvetlerinde olduğu gibi kirişler için Şekil 2.12'de olan temel üç denklem sırayla sağlanır. Şekil 2.13 kinematik denklemler olan yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme ilişkisini gösterirken Şekil 2.14 ise çökme ve dönme yönlerine doğru denge denklemlerinin bileşenlerini göstermektedir. Bu yaklaşımla hazırlanan model kayma şekildeğiştirmelerini de dikkate alınmış modeldir. Genellikle kullanılan kiriş eğilme kirişidir. Eğilme kirişi, kayma şekildeğiştirmelerinin sıfır kabul edildiği narin kirişlerdir.



Şekil 2.12 : Kiriş elemana ait temel denklemler.



Şekil 2.13 : Kiriş eleman yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 2.14 : Kiriş eleman denge kuvvetleri bileşenleri.

$$\kappa = \frac{d\theta}{dx}$$
(2.14)
$$\gamma = \theta + \frac{dw}{dx}$$

$$M = D_e \kappa$$

$$V = D_e \gamma$$
(2.15)

$$\frac{dV}{dx} + p = 0$$

$$\frac{dM}{dx} - V + q = 0$$
(2.16)

Kiriş eleman için kinematik, bünye ve denge denklemleri yazıldıktan sonra sırayla birbiri cinsinden yazılarak yerdeğiştirme ile dış yük arasında doğrudan bir ilişki kurulmuş olur (2.17).

$$-D_{k}\frac{d^{2}w}{dx^{2}} - D_{k}\frac{d\vartheta}{dx} = p$$

$$D_{k}\frac{dw}{dx} + \left(-D_{e}\frac{d^{2}}{d^{2}x} + D_{k}\right)\vartheta = q$$
(2.17)

Plak elemanın membran davranışında elde edilen denkleme benzer şekilde kiriş elemanda da iki bilinmeyen ve ikinci dereceden diferansiyel denklem mevcuttur. Çözüm de benzer şekilde ihtiyaç duyulan 4 sınır durumu, ikisi kinematik durumdan yani yerdeğiştirmelerin oluşturduğu sınır durumlarıyla ikisi de dinamik durum olan yüklerden dolayı oluşacak sınır durumlarıyla karşılanır. Ancak yerdeğiştirmelere ait denklem 2.18 örneğine benzer şekilde fonksiyonlarının bilinmesi gereklidir.

$$w(x) = c_1 + c_2 x + c_3 x^2 + c_4 x^3$$

$$\vartheta(x) = d_1 + d_2 x + d_3 x^2 + d_4 x^3$$
(2.18)

2.1.2.2 Kalın plak

Plak elemanın eğilme ve kesme davranışı düzlem dışı kuvvetlerden dolayı iki eksenli normal gerilme, kayma gerilmesi, çökme ve iki yönde dönme yerdeğiştirmeleri ve bu yerdeğiştirmelerden dolayı oluşan şekildeğiştirmelerle ifade edilir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 : Plak elemanın eğilme ve kesme davranışına ait serbestlikler ve kuvvetler.

Plak teorisinde de klasik kiriş teorisine benzer olarak bazı kabuller mevcuttur. Plak eleman kalınlığı sabit olmalı ve malzeme homojen ve izotropik olmalıdır. Mesnetlerden dolayı ya da büyük yerdeğiştirmelerden dolayı membran kuvvetleri yani eksenel yük oluşumu olmamalıdır. Şekil 2.15'de de görüldüğü gibi eksen takımı plak elemanın merkezinde olan orta düzleminde (mid-plane) oturtulmuştur. Bu orta düzlemde birim şekil değişimi sıfır olmalıdır. Bu şart plak elemanın çökme yerdeğiştirmesinin kalınlıktan çok küçük olduğu durumda sağlamaktadır (w<<t). Klasik kiriş teorisindeki yüksüz durumdaki düzlem kesit yükleme sonrasında da düzlem kalır prensibine benzer olarak plak elemanda, yüksüz durumda orta düzlemin normali bir doğrudur ve yükleme sonrasında da bir doğru olarak kalır. Plak elemandaki bu kabul, Şekil 2.16'da gösterildiği üzere dönmenin aynı yöndeki yerdeğiştirmenin düzlem dışı eksende uzaklığa bölünmesiyle bulunmasına olanak sağlamaktadır (2.19). Son olarak düzlem dışı eksende (z) oluşan gerilme (σ_{zz}) diğer gerilme bileşenleriyle karşılaştırıldığında nerdeyse sıfırdır ve aynı şekilde bu eksendeki birim şekildeğiştirme (ε_{zz}) sıfır olacaktır. Böylelikle kalınlık boyunca çökme yerdeğiştirmesi (w) ihmal edilmiş olmaktadır. İnce plak da bu varsayımlara ek olarak kayma şekildeğiştirmeleri (γ_x ve γ_y) sıfır kabul edilmektedir.



Şekil 2.16 : Plak eleman dönme yerdeğiştirmelerinin düzlem içi yerdeğiştirmelerle ilişkisi.

$$u_x = z \mathcal{G}_x$$

$$u_y = z \mathcal{G}_y$$
(2.19)

Plak elemanın eksen takımı orta düzleme göre yazıldığından Şekil 2.17'de belirtildiği gibi üç farklı düzlemde çökme, dönme ve düzlem içi yerdeğiştirmeler arasındaki ilişki ifade edilebilir. Plak elemanın eğilme ve kesme davranışı için dikey yerdeğiştirme (w) ve iki yönde dönme yerdeğiştirmesi (ϑ_x ve ϑ_y) olmak üzere üç serbestlik derecesi ve bunlara bağlı olarak dikey kuvvet ve dönme serbestlik derecelerine denk gelen moment kuvvetleri olarak ifade edilebilir.



Şekil 2.17 : Plak elemanın eğilme ve kesme davranışına ait yerdeğiştirmeler.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x},$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$$
(2.20)

Yerdeğiştirmeler belli olduktan sonra plak eleman için şekil değişimlerini ifade etmek için üç adet birim şekildeğiştirme ($\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}$) ve iki adet kayma açısı (γ_{xz}, γ_{yz}) denklem 2.20'deki şekilde yerdeğiştirmeler cinsinden yazılabilir. Denklem 2.20'de görüldüğü gibi birim şekil değişimleri z eksenine bağımsız ve kayma açıları da bağlı gibi görünmesine rağmen denklem 2.19'daki eşitlikler bu denklemde yerine yazılırsa birim şekil değişimlerinin z eksenine bağlı olduğu ve kayma açılarının z eksenine göre bağımsız olduğu yani kalınlık boyunca değişmediğini göstermektedir (2.21).

$$\varepsilon_{xx} = z \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = z \frac{\partial \mathcal{G}_y}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = z \left(\frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{G}_y}{\partial x} \right),$$

$$\gamma_x = \mathcal{G}_x + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \gamma_y = \mathcal{G}_y + \frac{\partial w}{\partial y}$$

(2.21)

Plak eleman, yerdeğiştirmelere kinematik olarak bağlı şekildeğiştirmeleri üç adet eğrilik ve iki adet kayma açısı (Şekil 2.18) ve bunlara bağlı olarak oluşan iç kuvvetler olarak tanımlanabilir (Şekil 2.19). Denklem 2.22 eğriliklerin birim şekildeğiştirmelerle ilişkisi verilmiştir. Denklem 2.23'de kinematik denklemlerin son hali verilmiştir.

$$\mathcal{E}_{xx} = Z\mathcal{K}_{xx}, \quad \mathcal{E}_{yy} = Z\mathcal{K}_{yy}, \quad \gamma_{xy} = Z\rho_{xy}$$
 (2.22)



Şekil 2.18 : Plak elemanın eğilme ve kesme davranışına ait şekildeğiştirmeleri.



Şekil 2.19 : Plak elemanın eğilme ve kesme davranışına ait temel denklemler.

$$\kappa_{xx} = \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial x}, \quad \kappa_{yy} = \frac{\partial \mathcal{G}_y}{\partial y}, \quad \rho_{xy} = \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{G}_y}{\partial x},$$

$$\gamma_x = \mathcal{G}_x + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \gamma_y = \mathcal{G}_y + \frac{\partial w}{\partial y}$$

(2.23)

Kinematik denklemler bulunduktan sonra bünye bağıntıları kullanılarak şekildeğiştirme ile gerilmeler arasındaki ilişki bulunabilir (2.24).

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{1 - v^2} \left(\varepsilon_{xx} + v \varepsilon_{yy} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{1 - v^2} \left(\varepsilon_{yy} + v \varepsilon_{xx} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1 + v)} \gamma_{xy}$$
(2.24)

Birim boya göre momentlerin (kNm/m) hesabı için gerilmenin z eksenine göre integrali alınır (2.25).

$$m_{xx} = \int_{t} z\sigma_{xx} dz, \quad m_{yy} = \int_{t} z\sigma_{yy} dz, \quad m_{xy} = \int_{t} z\tau_{xy} dz$$
(2.25)

Denklem 2.21'deki birim şekil değişimleri ($\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}$) denklem 2.24 yerine yazılarak bulunan gerilmeler ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$) denklem 2.25'de yerine koyup düzenlendiğinde ve matris formuna getirildiğinde denklem 2.26'daki hali almaktadır.

$$\begin{cases}
m_{xx} \\
m_{yy} \\
m_{xy}
\end{cases} = D_e \begin{bmatrix}
1 & \nu & 0 \\
\nu & 1 & 0 \\
0 & 0 & \frac{1}{2}(1-\nu)
\end{bmatrix} \begin{cases}
\kappa_{xx} \\
\kappa_{yy} \\
\rho_{xy}
\end{cases}$$
(2.26)

Birim boya göre kesme kuvvetlerin (kN/m) hesabı da denklem 2.27'de ifade edildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\begin{cases} v_x \\ v_y \end{cases} = D_k \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} \gamma_x \\ \gamma_y \end{cases}$$
 (2.27)

 D_e plak elemanda eğilme rijitliğini tanımlarken D_k ise plak elemanın kesme rijitliğini tanımlamaktadır (2.28).

$$D_{e} = \frac{Et^{3}}{12(1-v^{2})}, \quad D_{k} = \frac{Gt}{\eta}, \quad \eta = \frac{A}{I^{2}} \int_{A} \frac{S^{2}}{b^{2}} dA$$
(2.28)

Bünye denklemlerinden iç kuvvetler de bulunduktan sonra dış kuvvetlerin ve iç kuvvetlerin denge denklemleri Şekil 2.20'de belirtildiği pozitif yönlere göre yazılır. Denge denklemleri üç adet serbestlik derecesi bulunan plak elemanın her serbestlik derecesi için sırasıyla hesaplanır (2.29).



Şekil 2.20 : Plak eleman eğilme ve kesme davranışına ait iç kuvvetler ve dış yükler.

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}dx\right)dy + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y}dy\right)dx + pdxdy = 0$$

$$\left(\frac{\partial m_{xx}}{\partial x}dx\right)dy + \left(\frac{\partial m_{yx}}{\partial y}dy\right)dx - (v_xdy)dx + q_xdxdy = 0$$

$$\left(\frac{\partial m_{yy}}{\partial y}dy\right)dx + \left(\frac{\partial m_{xy}}{\partial x}dx\right)dy - (v_ydx)dy + q_ydxdy = 0$$
(2.29)

Sonuç olarak diğer elemanlarda olduğu gibi kinematik denklemler bünye denklemlerine ve elde edilen denklem denge denklemlerine yazıldığında yerdeğiştirmeler ve dış yükler arasında doğrudan bir ilişki kurulmuş olur (2.30).

$$\begin{bmatrix} -D_{k} \left(\frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}} \right) & -D_{k} \frac{\partial}{\partial x} & -D_{k} \frac{\partial}{\partial y} \\ D_{k} \frac{\partial}{\partial x} & D_{k} - D_{e} \left(\frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} + \frac{1}{2}(1-\nu)\frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}} \right) & -\frac{1}{2}(1+\nu)D_{e} \frac{\partial^{2}}{\partial x \partial y} \\ D_{k} \frac{\partial}{\partial y} & -\frac{1}{2}(1+\nu)D_{e} \frac{\partial^{2}}{\partial x \partial y} & D_{k} - D_{e} \left(\frac{1}{2}(1-\nu)\frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}} \right) \end{bmatrix}$$
(2.30)
$$\begin{bmatrix} w\\ g\\ x\\ g\\ y\\ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p\\ q\\ x\\ q\\ y \end{bmatrix}$$

Bu denklemde de çözüme gitmek için üç adet kinematik durumdan kaynaklı yerdeğiştirme sınır durumlarına, dinamik durumdan üç adet yük sınır durumuna ve yerdeğiştirmelerin fonksiyonlarının bilinmesi gerekir.

2.1.2.3 İnce plak

İnce plak elemanın kalın plak elemandan farklılığının temel nedeni, kayma açılarının sıfır kabul edilmesidir. Kayma açısının sıfır olması, kalın plak elemanda olan yerdeğiştirmeler ince plak elemanda sadece düzlem dışı çökme (w) ile ifade edilebiliyor demektir. (2.31).

$$\vartheta_x = -\frac{\partial w}{\partial x}, \quad \vartheta_y = -\frac{\partial w}{\partial y}$$
(2.31)

Temel üç denklem kinematik, bünye ve denge denklemleri, bu eşitlik (2.31) kullanılarak yeniden düzenlenirse ince plak için kinematik denklem (2.32), bünye denklemi (2.33) ve denge denklemi (2.34) bulunmuş olur (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 : İnce plak elemanın eğilme davranışına ait temel denklemler.

$$\kappa_{xx} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

$$\kappa_{yy} = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

$$\rho_{xy} = -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$
(2.32)

$$m_{xx} = D_e \left(\kappa_{xx} + \nu \kappa_{yy}\right)$$

$$m_{yy} = D_e \left(\kappa_{yy} + \nu \kappa_{xx}\right)$$

$$m_{xy} = \frac{1}{2} D_e (1 - \nu) \rho_{xy}$$
(2.33)

$$v_{x} = \frac{\partial m_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial m_{yx}}{\partial y}$$

$$v_{y} = \frac{\partial m_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial m_{xy}}{\partial x}$$

$$-\left(\frac{\partial^{2} m_{xx}}{\partial x^{2}} + 2\frac{\partial^{2} m_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^{2} m_{yy}}{\partial y^{2}}\right) = p$$
(2.34)

Temel denklemler yazıldıktan sonra yerdeğiştirme ve dış yük arasındaki doğrudan ilişkiyi bulmak için bu denklemler sırayla birbiri içine yazılır (2.35). İnce plak için yazılan bu denklem incelendiğinde klasik kiriş teorisinde tek bir yönde EI(d⁴w/dx⁴)=p denklemi yazılarak yük karşılanırken ince plakta ilk ve son terimle iki yönde bu yükün karşılandığı ve ek olarak burulmadan kaynaklı ikinci terimle de yük karşılandığı görülmektedir. Gerçekte aynı elamanın çubuk model yerine kabuk eleman modellendiğinde burulmanın katkısından dolayı daha az iç kuvvet gözlenmektedir.

$$D_e \left(\frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right) w = p$$
(2.35)

Plak elemanlar da bulunan gerilmeler, normal ve kayma gerilmeleridir. Eksen takımı birbirine dik herhangi bir yönde seçilebilir. Ancak betonarme elemanın kayma gerilmelerinin sıfır olduğu normal gerilmelerinin maksimum olduğu asal gerilmelere de maruz kalacağından asal gerilmelerin de bulunması gereklidir. Kolon, kiriş ve

kafes elemanlarında genelde seçilen eksen takımı asal eksenler olduğu için asal gerilmeler plak eleman çözümü yapıldığında daha önemli hale gelmektedir. Şekil 2.22'de asal eksenler ile seçilen eksen takımındaki gerilmelerin nasıl bir denge içinde olduğu gösterilmektedir. Seçilen eksen takımı saat yönünde döndürülerek $\tau_{12}=\tau_{21}=0$ olduğu α açısı bulunmaya çalışılmaktadır. Çünkü bu açı değerinde kayma gerilmeleri sıfır olduğundan normal gerilmeler maksimum değerini almaktadır. Denklem 2.36'da asal gerilmelerin seçilen eksen takımında bulunan gerilmeler cinsinden bulunmasını göstermekte ve bu asal gerilmelere benzer şekilde m= $\int \sigma dz$ eşitliği kullanılarak asal moment değerleri bulunur (2.37). Asal gerilme ve momentleri bulmak için gerekli olan α açısı denklem 2.36 ya da 2.37'deki kayma bileşenlerini (τ_{12} ya da m₁₂) sıfır yapan açı denklem 2.37 ile bulunur.



Şekil 2.22 : Seçilen eksen takımındaki ve asal eksenlerdeki gerilmeler arasındaki ilişki.

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx} \cos^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha + \sigma_{yy} \sin^2 \alpha$$

$$\sigma_{22} = \sigma_{xx} \sin^2 \alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha + \sigma_{yy} \cos^2 \alpha$$

$$\tau_{12} = -\frac{1}{2} (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha$$
(2.36)

$$m_{11} = m_{xx} \cos^2 \alpha + m_{xy} \sin 2\alpha + m_{yy} \sin^2 \alpha$$

$$m_{22} = m_{xx} \sin^2 \alpha - m_{xy} \sin 2\alpha + m_{yy} \cos^2 \alpha$$

$$m_{12} = -\frac{1}{2} \left(m_{xx} - m_{yy} \right) \sin 2\alpha + m_{xy} \cos 2\alpha$$
(2.37)

$$\tan \alpha = 2 \frac{\tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}, \quad \tan \alpha = 2 \frac{m_{xy}}{m_{xx} - m_{yy}}$$
(2.38)

Plak elemanda asal kesme kuvvetleri de asal momentler kadar önemli bir konudur. Öncelikle denklem 2.37 incelendiğinde ilk iki denklem toplanırsa $m_{xx}+m_{yy}=m_{11}+m_{22}$ eşitliği bulunmaktadır. Bu eşitlik $m_{xx}+m_{yy}$ değerinin bu eleman çözümünün değişmezi (invaryantı) olduğunu göstermektedir. Bu değişmez, denklem 2.39 ile belli aşamalardan geçerek seçilen eksen takımı için denklem 2.34 kullanılarak kesme kuvvetleri eşitlikleri yazmaya olanak sağlar (2.39).

$$m_{xx} + m_{yy} = -D_e \left(1 + \nu\right) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \rightarrow m = \frac{m_{xx} + m_{yy}}{1 + \nu} = -D_e \nabla^2 w$$

$$m = -D_e \nabla^2 w \rightarrow D_e \nabla^2 \nabla^2 w = p \rightarrow -\nabla^2 m = p$$
(2.39)

$$v_{x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_{e} \nabla^{2} w \right), \quad v_{y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(-D_{e} \nabla^{2} w \right)$$

$$v_{x} = \frac{\partial m}{\partial x}, \quad v_{y} = \frac{\partial m}{\partial y}$$
(2.40)

Seçilen eksen takımına göre denklem 2.40'da tanımlanan m(x,y) momentinin plak eleman üzerinde eş momentler eğrisi çıkarılırsa bu eğrilere teğet olan 2 numaralı eksende kesme kuvveti sıfır ve 1 numaralı 2 eksenine dik eksende moment maksimum değerini alır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 : Plak eleman eş moment eğrileri.

Asal kesme kuvveti de asal momentlere benzer olarak seçilen eksen takımına göre ve asal eksenlere göre kesme kuvvetleri dengesi yazılarak bulunabilir (Şekil 2.24). Daha sonra asal eksende maksimum kesme kuvveti 1 numaralı eksende bulunmak istenirse denklem 2.40 kullanılarak elde edilecek $\partial v_1 / \partial \beta = 0$ olması ve v_2 asal kesme kuvvetinin de sıfır olması gereklidir. Denklem 2.42'da maksimum eksenel kuvvet ve bunun için gerekli β açısı gösterilmiştir.



Şekil 2.24 : Seçilen eksen takımında ve asal eksen takımındaki kesme kuvvetlerinin arasındaki ilişki.

$$v_{1} = v_{x} \cos \beta + v_{y} \sin \beta$$

$$v_{2} = -v_{x} \sin \beta + v_{y} \cos \beta$$

$$\tan \beta = \frac{v_{y}}{v_{x}}$$

$$v_{max} = \sqrt{v_{x}^{2} + v_{y}^{2}}$$
(2.41)

2.2 Sonlu Elamanlar Yöntemi ve Genel Teorilerin İlişkisi

Boşluklu döşeme bir plak eleman olarak modelleneceğinden öncesinde plak elemanın diferansiyel olarak bütün denklemleri tanımlandı. Daha sonra, sonlu elemanlar programlarında bir yapı çözümünde kullanılan rijitlik matrisinin şekil fonksiyonları yardımıyla çıkarılmasıyla genel plak teorileri ve sonlu elemanlar yöntemi arasındaki ilişki bu şekilde kurulmuş olur. Bu bölümün amacı plak elemanların sonlu elemanlarda kullanımını açıklamaktır.

Elastik bir yapının gerilme-birim şekildeğiştirme probleminde çözüme ulaşmanın iki yolu vardır. Bunlardan biri diferansiyel yöntemlerdir. Diferansiyel yöntem, elastik bir cismin kinematik, bünye ve denge denklemleriyle birlikte hooke's kanunlarına ve sınır durumlarına uygun biçimde tanımlanıp çözüme ulaştırılmasıdır. Diğer yöntem ise enerji yöntemidir. Enerji yöntemi, elastik bir cismin temel denklemlerini bir

ekstremum problemi haline getirip fiziksel olarak bir değer bularak çözüme ulaşmaktır. Enerji yöntemiyle bulunan sonuç skaler ve yaklaşıktır. Ancak kesin sonucun bilinmediği durumlarda doğruya en yakın sonuç bulmaya yardımcı olur. Bölüm 2.1'de anlatılan genel teorilerde her bir elemanın sonunda en önemli kısım yerdeğiştirmelerin nasıl bir fonksiyonda olacağının bilinmesi gerektiğidir. Ancak enerji yönteminde yaklaşık bir yerdeğiştirme fonksiyonu kullanılmaktadır.

Enerji yöntemiyle çözüme ulaşmak için birim şekildeğiştirme enerjisine ve dış yükün yaptığı enerjiye ihtiyaç vardır. Birim şekildeğiştirme enerjisi Şekil 2.25'de doğrusal olmayan davranış gösteren malzeme için sağ taraftaki doğrusal davranış gösteren malzeme için sol taraftaki eğrinin altında kalan kırmızı olarak belirtilen kısmın alanı olarak ifade edilir (2.43).



Şekil 2.25 : Doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme için birim şekildeğiştirme enerjisi.

$$U = \int_{V} (\int_{0}^{\varepsilon_{u}} \sigma d\varepsilon) dV$$
 (2.43)

Tek bir şekildeğiştirme ve buna bağlı tek gerilme durumunda denklem 2.43 geçerlidir. Ancak plak elemanda birçok şekildeğiştirme ve gerilme olduğundan denklem 2.44'deki aşamalardan geçtikten sonra enerji yöntemi kullanılabilir.

$$U = \int_{V} (\int_{0}^{\varepsilon} \sigma^{T} d\varepsilon) dV$$

=
$$\int_{V} (\int_{0}^{\varepsilon} (E\varepsilon)^{T} d\varepsilon) dV = \int_{V} \frac{1}{2} \varepsilon^{T} E\varepsilon dV$$

=
$$\int_{V} \frac{1}{2} \varepsilon^{T} \sigma dV$$
 (2.44)

Dış yük ile yerdeğiştirme arasındaki ilişki de malzeme davranışına benzer olarak çizildikten (Şekil 2.26) sonra dış yükün yaptığı iş hesaplanabilir (2.45).



Şekil 2.26 : Dış yüklerin yaptığı iş.

$$W_{d} = \int_{0}^{u_{1}} p du = \int_{0}^{u_{1}} (ku) du = \frac{1}{2} k u_{1}^{2} = \frac{1}{2} p_{1} u_{1}$$
(2.45)

Tekil yük olduğunda bu yazılan iş denklemi yeterlidir. Ancak tekil yükler (P_i ve M_i) ve yayılı yükler (q ve m) olduğunda yapılan iş denklemi yeniden düzenlenir (2.46).

$$W_{d} = \frac{1}{2} \int (qu) ds + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} P_{i} u_{i} + \frac{1}{2} \int (m \vartheta) ds + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} M_{i} \vartheta_{i}$$
(2.46)

Sonlu elemanlar çözümlerinde yayılı yükler de uygun düğüm noktalarında tekil yük olarak da yazılabileceğinden öncelikle denklem 2.47 olarak sadeleştirilebilir ve ardından denklem 2.48 de tekil yükler (Q_i) ve tekil yükle iş yapan yerdeğiştirme (u_i) olacak şekilde yazılabilir.

$$W_{d} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} P_{i} u_{i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} M_{i} \mathcal{G}_{i}$$
(2.47)

$$W_d = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} Q_i u_i$$
 (2.48)

Dış yüklerden dolayı yapılan iş ile potansiyel enerji arasındaki ilişki U_d =- W_d şeklindedir. Toplam potansiyel enerji, iç ve dış kuvvetlerin yaptığı enerjinin toplamına eşit olduğundan denklem 2.49 olarak yazılabilir. Bu denklemde ε_0 ve σ_0 yükleme başlamadan önce var olan birim şekildeğiştirme ve gerilmedir.

$$\Pi = U_i - W_d = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon^T \sigma dV - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Q_i u_i$$

$$= \frac{1}{2} \int_V \varepsilon^T \left[E(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \right] dV - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Q_i u_i$$
(2.49)

2.2.1 Şekil fonksiyonları

Sonlu elemanlar yönteminde modellenen yapı sistemi birçok elemente ayrılır ve her bir elementin düğüm noktalarında oluşan yerdeğiştirme ve iç kuvvetler o elementin yerdeğiştirmesini ve iç kuvvetini ifade eder. Şekil 2.27'de membran davranışına ait teorideki yerdeğiştirmeler (u_x, u_y) ve sonlu elemanlar yöntemindeki yerdeğiştirmeler (u_{x1}, u_{x2}, u_{x3}, u_{x4}, u_{y1}, u_{y2}, u_{y3}, u_{y4}) sol tarafta gösterilmiştir. Aynı şekilde eğilme ve kesme davranışına ait teorideki yerdeğiştirmeler (w, ϑ_x , ϑ_y) ve sonlu elemanlar yöntemindeki yerdeğiştirmeler (w₁, w₂, w₃, w₄, θ_{x1} , θ_{x2} , θ_{x3} , θ_{x4} , θ_{y1} , θ_{y2} , θ_{y3} , θ_{y4}) sağ tarafta gösterilmiştir.



Şekil 2.27 : Sonlu elemanlar ve genel teoriler arasındaki yerdeğiştirme farklılıkları.

Şekil fonksiyonları genel teoriler ile sonlu elemanlar yöntemi yerdeğiştirmeleri arasında ilişkiyi kurmayı sağlar. Bir membran elemanda bu ilişkiyi ifade etmek için 16 adet şekil fonksiyonuna ihtiyaç varken (2.50) kalın bir plak elemanda ise bu ilişki 36 adet şekil fonksiyonu ile ifade edilebilir (2.51).

$$u_{x} = N_{1}u_{x1} + N_{2}u_{x2} + N_{3}u_{x3} + N_{4}u_{x4} + N_{5}u_{y1} + N_{6}u_{y2} + N_{7}u_{y3} + N_{8}u_{y4}$$

$$u_{y} = N_{9}u_{x1} + N_{10}u_{x2} + N_{11}u_{x3} + N_{12}u_{x4} + N_{13}u_{y1} + N_{14}u_{y2} + N_{15}u_{y3} + N_{16}u_{y4}$$
(2.50)

$$w = N_{1}w_{1} + N_{2}w_{2} + N_{3}w_{3} + N_{4}w_{4} + N_{5}\theta_{x1} + N_{6}\theta_{x2} + N_{7}\theta_{x3} + N_{8}\theta_{x4} + N_{9}\theta_{y1}$$

$$+ N_{10}\theta_{y2} + N_{11}\theta_{y3} + N_{12}\theta_{y4}$$

$$\theta_{x} = N_{13}w_{1} + N_{14}w_{2} + N_{15}w_{3} + N_{16}w_{4} + N_{17}\theta_{x1} + N_{18}\theta_{x2} + N_{19}\theta_{x3} + N_{20}\theta_{x4}$$

$$+ N_{21}\theta_{y1} + N_{22}\theta_{y2} + N_{23}\theta_{y3} + N_{24}\theta_{y4}$$

$$\theta_{y} = N_{25}w_{1} + N_{26}w_{2} + N_{27}w_{3} + N_{28}w_{4} + N_{29}\theta_{x1} + N_{30}\theta_{x2} + N_{31}\theta_{x3} + N_{32}\theta_{x4}$$

$$+ N_{33}\theta_{y1} + N_{34}\theta_{y2} + N_{35}\theta_{y3} + N_{36}\theta_{y4}$$

$$(2.51)$$

Şekil fonksiyonlarının bazı özellikleri barındırması gerekir. Şekil fonksiyonu eleman üzerinde hangi koordinattaki yerdeğiştirmenin katsayısı ise o koordinatta değeri 1 olmalı ve diğer şekil fonksiyonları sıfır olmalıdır. Örneğin membran elemanda Şekil 2.27'de 1 numaralı düğüm noktasındaki u_{x1} ve u_{y1} yerdeğiştirmelerine karşılık gelen şekil fonksiyonları denklem 2.50'da N1 ve N5 1 numaralı düğüm noktasının koordinatlarında 1 olması gerekirken aynı koordinat için diğer şekil fonksiyonlarının değerleri sıfır olmalıdır. Şekil fonksiyonunun diğer bir özelliği ise elemanın herhangi bir koordinatında bütün şekil fonksiyonlarının toplamının 1 değerine eşit olması gerektiğidir. Şekil fonksiyonları üç farklı tipte düzenlenebilir. Bunlar C⁰, C¹ ve ya C² tipi süreklilik tipleridir. C⁰ süreklilik tipinde koordinatların sağındaki ve solundaki çökme yerdeğiştirmesinin eşit olduğu ancak dönme ve eğrilik değerlerinin eşit olmadığı anlamına gelirken C¹ süreklilik tipinde çökme ve dönmenin eşit eğriliğin eşit olmadığı ve C² süreklilik tipinde ise çökme, dönme ve eğrilik değerlerinin eşit olduğu yani sürekli gittiği anlamına gelmektedir. Yapı sistemlerinde genellikle C¹ tipi süreklilik kullanılır. Şekil fonksiyonları bu süreklilik tiplerine göre ifade ettikleri yerdeğiştirmeye ait koordinatlarda 1 değerini alırken diğer koordinatlara doğru doğrusal ya da doğrusal olmayan şekilde sıfır değerine doğru gider (Şekil 2.28). Bu şekilde w3 yönünde çökme yerdeğiştirmesinin genel eleman denkleminde w olan çökmeye etki katsayısı yani şekil fonksiyonu N₃=1 iken diğer koordinatlarda bu şekil fonksiyonunun değeri C⁰ süreklilik tipinde olduğu için doğrusal bir şekilde sıfıra doğru gitmektedir.



Şekil 2.28 : Plak elemanın eğilme ve kesme davranışına ait N_3 şekil fonksiyonu (C^0 süreklilik tipi).

Şekil fonksiyonlarının kullanılmasında önemli diğer bir konu ise interpolasyondur. Şekil fonksiyonu katsayısı olduğu yerdeğiştirme koordinatında 1 değerini alırken diğer köşe koordinatlarda sıfır değerini alır. Ancak bu sıfıra doğru gidişin nasıl bir eğimle olacağına kullanılan interpolasyon fonksiyonu ile belirlenir.

Tek boyutlu bir elemanda örneğin bir kiriş elemanda global koordinatta yerdeğiştirme denklem 2.52'de belirtildiği şekillerde kabul edilebilir. Buradaki w_e çökme yerdeğiştirmesi genel teorilerdeki elemanın çökme yerdeğiştirmesidir.

$$w_{e}(x) = \{1 \ x\} \begin{cases} c_{1} \\ c_{2} \end{cases}$$

$$w_{e}(x) = \{1 \ x \ x^{2} \ \dots\} \begin{cases} c_{1} \\ c_{2} \\ c_{3} \\ \vdots \end{cases}$$
(2.52)

Tek boyutlu elemanı sonlu elemanlar yönteminde i ve j olmak üzere iki düğüm noktasıyla ifade edersek w_e eleman yerdeğiştirmesinin bu iki düğüm noktası cinsinden ifade edilebilir (2.53). Daha sonra bulunan c_1 ve c_2 katsayıları denklem 2.52'de yerine yazılırsa eleman yerdeğiştirmesi ile sonlu elemanlar yöntemindeki düğüm noktalarında bulunan yerdeğiştirmeler arasındaki ilişki bulunmuş olur (2.54).

$$\begin{cases} w_i = c_1 + c_2 x_i \\ w_j = c_1 + c_2 x_j \end{cases} \rightarrow \begin{cases} w_i \\ w_j \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & x_i \\ 1 & x_j \end{bmatrix} \begin{cases} c_1 \\ c_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} c_1 \\ c_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & x_i \\ 1 & x_j \end{bmatrix}^{-1} \begin{cases} w_i \\ w_j \end{cases}$$
(2.53)

$$w_{e} = \{1 \quad x\} \begin{bmatrix} 1 & x_{i} \\ 1 & x_{j} \end{bmatrix}^{-1} \begin{cases} w_{i} \\ w_{j} \end{cases} \rightarrow w_{e} = \left(\frac{x_{j} - x}{x_{j} - x_{i}}\right) w_{i} + \left(\frac{x - x_{i}}{x_{j} - x_{i}}\right) w_{j} \rightarrow w_{e} = N_{i}(x) w_{i} + N_{j}(x) w_{j}$$

$$(2.54)$$



Şekil 2.29 : Tek boyutlu bir elemanın şekil fonksiyonları.

İki boyutlu elemanlarda ise interpolasyon üçgen veya dikdörtgen elemanda yapılabilir. Pascal üçgenleri (Şekil 2.30) veya pascal kareleri (Şekil 2.31) kullanılarak interpolasyon yapıldığında örnek olarak denklem 2.55 veya denklem 2.56 şeklinde interpolasyon fonksiyonu seçilebilmektedir.



Şekil 2.30 : Pascal üçgeninde interpolasyon.

$$\frac{|k=1|}{w_e(x, y) = c_1 + c_2 x + c_3 y}$$

$$\frac{|k=2|}{w_e(x, y) = c_1 + c_2 x + c_3 y + c_4 x^2 + c_5 x y + c_6 y^2}$$

$$\frac{|k=3|}{w_e(x, y) = c_1 + c_2 x + c_3 y + c_4 x^2 + c_5 x y + c_6 y^2 + c_7 x^3 + c_8 x^2 y + c_9 x y^2 + c_{10} y^3}$$
(2.55)



Şekil 2.31 : Pascal karelerinde interpolasyon.

$$\begin{bmatrix} k = 1 \\ w_e(x, y) = c_1 + c_2 x + c_3 y + c_4 xy \\ \hline k = 2 \end{bmatrix}$$

$$w_e(x, y) = c_1 + c_2 x + c_3 y + c_4 xy + c_5 x^2 + c_6 x^2 y + c_7 x^2 y^2 + c_8 xy^2 + c_9 y^2$$
(2.56)

2.2.1.1 Narin kirişin şekil fonksiyonlarının çıkarılması

Genel teorilerde olduğu gibi bir kirişi tanımlamak için iki adet yerdeğiştirmeye (w, ϑ) ihtiyaç duyulmaktadır. Narin bir kiriş elemanda yani kesme kuvvetinden dolayı oluşacak yerdeğiştirmeler ihmal edildiği durumda kayma açısı $\gamma=0$ olduğundan ϑ dönme yerdeğiştirmesini de w yerdeğiştirmesi ile ifade etmek mümkün olmaktadır. Bu yüzden sadece w yerdeğiştirmesine ait fonksiyona ihtiyaç duyulmaktadır (2.57).

$$w_{e}(x) = c_{1} + c_{2}(x - x_{i}) + c_{3}(x - x_{i})^{2} + c_{4}(x - x_{i})^{3}$$

$$\gamma = \mathcal{G} - \frac{dw}{dx} = 0 \longrightarrow \mathcal{G} = \frac{dw}{dx} = c_{2} + 2c_{3}(x - x_{i}) + 3c_{4}(x - x_{i})^{2}$$
(2.57)

Kiriş eleman üzerinde genel teorilere ve sonlu elemanlar yöntemine ait yerdeğiştirmeler Şekil 2.32'de gösterilmiştir. Düğüm noktalarına (i, j) göre sınır durumları (w(x=x_i)=w_i, w(x=x_j)=w_j, $\vartheta(x=x_i)=\vartheta_i$, $\vartheta(x=x_j)=\vartheta_j$) yazılarak bilinmeyen c₁, c₂, c₃, c₄ katsayıları bulunarak(2.58) şekil fonksiyonları cinsinden eleman yerdeğiştirmesi elde edilmiş olur (2.59).



Şekil 2.32 : Narin kiriş eleman genel teori ve sonlu elemanlar yöntemi yerdeğiştirmeleri.

$$x = x_{i} \rightarrow \frac{c_{1} = w_{i}}{c_{2} = \theta_{i}}$$

$$x = x_{j} \rightarrow \frac{c_{1} + c_{2}L + c_{3}L^{2} + c_{4}L^{3} = w_{j}}{c_{2} + 2c_{3}L + 3c_{4}L^{2} = \theta_{j}} \rightarrow \frac{c_{3} = \frac{1}{L^{2}} \left[3w_{j} - 3w_{i} - 4\theta_{i}L - 4\theta_{j}L \right]}{c_{4} = \frac{1}{L^{3}} \left[2w_{i} - 2w_{j} + 3\theta_{i}L + \theta_{j}L \right]}$$
(2.58)

$$\begin{bmatrix}
\xi = \frac{x - x_i}{L}, & \frac{d\xi}{dx} = \frac{1}{L} \\
w_e(\xi) = (1 - 3\xi^2 + 2\xi^3) w_i + [L(\xi - 2\xi^2 + \xi^3)] \theta_i \\
+ (3\xi^2 - 2\xi^3) w_j + [L(-\xi^2 + \xi^3)] \theta_j
\end{cases}$$
(2.59)

Her düğüm noktası yerdeğiştirmesinin kiriş elemanı yerdeğiştirmesine katkısını ifade eden şekil fonksiyonları denklem 2.59'dan elde edilir(2.60).

$$N_{w_{i}} = 1 - 3\xi^{2} + 2\xi^{3}$$

$$N_{\theta_{i}} = L(\xi - 2\xi^{2} + \xi^{3})$$

$$N_{w_{j}} = 3\xi^{2} - 2\xi^{3}$$

$$N_{\theta_{j}} = L(-\xi^{2} + \xi^{3})$$
(2.60)

2.2.1.2 İnce plak elemanın şekil fonksiyonlarının çıkarılması

İnce plak eleman da kiriş elemana benzer şekilde şekil fonksiyonları bulunabilir. Plak eleman genel teorilerde anlatıldığı gibi üç adet yerdeğiştirme (w, ϑ_x, ϑ_y) ile ifade edilebilir. İnce plak elemanda yani kesme kuvvetinden dolayı oluşacak yerdeğiştirmeler ihmal edildiği durumda kayma açıları $\gamma_x=0$, $\gamma_y=0$ olduğundan ϑ_x ve ϑ_y dönme yerdeğiştirmelerini de w yerdeğiştirmesi ile ifade etmek mümkün olmaktadır. Bu yüzden sadece w yerdeğiştirmesine ait fonksiyona ihtiyaç duyulmaktadır (2.61).

$$w_{e} = \left\{ 1 \quad \xi \quad \eta \quad \xi^{2} \quad \xi\eta \quad \eta^{2} \quad \xi^{3} \quad \xi^{2}\eta \quad \xi\eta^{2} \quad \eta^{3} \quad \xi^{3}\eta \quad \xi\eta^{3} \right\} \begin{bmatrix} c_{1} \\ c_{2} \\ \vdots \\ c_{12} \end{bmatrix}$$
(2.61)

İnce plak eleman üzerinde genel teorilere ve sonlu elemanlar yöntemine ait yerdeğiştirmeler Şekil 2.33'de gösterilmiştir. İnce plak eleman üzerinde genel teorilere ve sonlu elemanlar yöntemine ait yerdeğiştirmeler Şekil 2.33'de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde yerdeğiştirmelerin ve genel teorilerde yerdeğiştirmelerin yön kabulleri birbirinden farklılık gösterebilir. Ancak yön kabulüne uygun denklemleri çıkarıp ona göre analiz yapılması durumunda ana fikir aynı olduğundan bir sonuç farkı olmamaktadır. Burada eleman yerdeğiştirmeleri de sonlu elemanlar yöntemindeki yerdeğiştirmeler ile aynı yönde kabul edilmiştir. Bu yön kabullere uygun biçimde kayma açıları yazılıp sıfıra eşitleyerek w yerdeğiştirmesi cinsinden dönme yerdeğiştirmeleri de bulunmuş olur (2.62).



Şekil 2.33 : İnce plak eleman genel teori ve sonlu elemanlar yöntemi yerdeğiştirmeleri.

$$\begin{split} & \gamma_{x} = \theta_{y} + \frac{\partial w}{\partial x}; \quad \gamma_{y} = \theta_{x} - \frac{\partial w}{\partial y}; \quad \xi = \frac{x - x_{i}}{L_{x}}; \quad \frac{d\xi}{dx} = \frac{1}{L_{x}} \quad \eta = \frac{y - y_{i}}{L_{y}}; \quad \frac{d\eta}{dy} = \frac{1}{L_{y}} \\ & \theta_{y} = \frac{-1}{L_{x}} \Big\{ 0 \quad 1 \quad 0 \quad 2\xi \quad \eta \quad 0 \quad 3\xi^{2} \quad 2\xi\eta \quad \eta^{2} \quad 0 \quad 3\xi^{2}\eta \quad \eta^{3} \Big\} \begin{bmatrix} c_{1} \\ c_{2} \\ \vdots \\ c_{12} \end{bmatrix} \\ & \theta_{x} = \frac{1}{L_{y}} \Big\{ 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad \xi \quad 2\eta \quad 0 \quad \xi^{2} \quad 2\xi\eta \quad 3\eta^{2} \quad \xi^{3} \quad 3\xi\eta^{2} \Big\} \begin{bmatrix} c_{1} \\ c_{2} \\ \vdots \\ c_{12} \end{bmatrix} \end{aligned}$$
(2.62)

Düğüm noktalarına (1, 2, 3, 4) göre sınır durumları (w($\xi=0,\eta=0$)=w₁, w($\xi=0,\eta=1$)=w₂, w($\xi=1,\eta=1$)=w₃, w($\xi=1,\eta=0$)=w₄, $\vartheta_x(\xi=0,\eta=0)=\theta_{x1}$, $\vartheta_x(\xi=0,\eta=1)=\theta_{x2}$, $\vartheta_x(\xi=1,\eta=1)=\theta_{x3}$, $\vartheta_x(\xi=1,\eta=0)=\theta_{x4}$, $\vartheta_y(\xi=0,\eta=0)=\theta_{y1}$, $\vartheta_y(\xi=0,\eta=1)=\theta_{y2}$, $\vartheta_y(\xi=1,\eta=1)=\theta_{y3}$, $\vartheta_y(\xi=1,\eta=0)=\theta_{y4}$) yazılarak bilinmeyen c₁, c₂, c₃, ... c₁₂ katsayıları bulunarak şekil fonksiyonları cinsinden eleman yerdeğiştirmesi elde edilmiş olur (2.63).

$$\begin{split} w(\xi,\eta) &= N_{w_{1}}w_{1} + N_{w_{2}}w_{2} + N_{w_{3}}w_{3} + N_{w_{4}}w_{4} + N_{\theta_{x1}}\theta_{x1} + N_{\theta_{x2}}\theta_{x2} + N_{\theta_{x3}}\theta_{x3} \\ &+ N_{\theta_{x4}}\theta_{x4} + N_{\theta_{y1}}\theta_{y1} + N_{\theta_{y2}}\theta_{y2} + N_{\theta_{y3}}\theta_{y3} + N_{\theta_{y4}}\theta_{y4} \\ \\ &= \begin{bmatrix} N_{w_{1}} \\ N_{\theta_{x1}} \\ N_{\theta_{x1}} \\ N_{w_{2}} \\ N_{w_{2}} \\ N_{w_{2}} \\ N_{\theta_{x2}} \\ N_{\theta_{x2}} \\ N_{\theta_{x2}} \\ N_{\theta_{x3}} \\ N_{\theta_{x3}} \\ N_{\theta_{x3}} \\ N_{\theta_{x3}} \\ N_{\theta_{x3}} \\ N_{\theta_{x4}} \\ N_{\theta_{x4}} \\ N_{\theta_{x4}} \\ N_{\theta_{x4}} \\ N_{\theta_{x4}} \\ N_{\theta_{x4}} \\ N_{\theta_{x4}} \\ N_{\theta_{x4}} \\ N_{\theta_{x4}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - \xi\eta - (3 - 2\xi)\xi^{2}(1 - \eta) - (1 - \xi)(3 - 2\eta)\eta^{2} \\ (1 - \xi)(3 - 2\xi)\xi^{2}(1 - \eta) - (1 - \xi)(3 - 2\eta)\eta^{2} \\ (1 - \xi)(3 - 2\eta)\eta^{2} + \xi(1 - \xi)(1 - 2\xi)\eta \\ -\xi(1 - \xi)(1 - \eta)\eta^{2}L_{y} \\ (1 - \xi)\xi^{2}\eta L_{x} \\ (3 - 2\xi)\xi^{2}(1 - \eta) + \xi\eta(1 - \eta)(1 - 2\eta) \\ \xi\eta(1 - \eta)^{2}L_{y} \\ (1 - \xi)\xi^{2}(1 - \eta)L_{x} \end{bmatrix}$$

2.2.2 Rijitlik matrisi ile şekil fonksiyonlarının ilişkisi

Genel teorilerden sonlu elemanlar yönteminde kullanılan rijitlik matrisinin bulunması, boşluklu döşeme elemanı gibi düz plak elemandan farklılıkları olan bir elemanı, sonlu elemanlar yönteminde düz plak çözümünde bir takım değişikler yaparak çözüme gitmek için çok önemli bir adımdır. Şekil fonksiyonlarının da tanımlanmasıyla rijitlik matrisinin çıkarılması adım adım denklem 2.64'de belirtilmiştir. Bu denklemde rastgele (arbitrary) bir yerdeğiştirme uygulanarak denklem 2.49'daki potansiyel enerji denklemi minimum enerji prensibi gereği sıfıra eşitlenerek sonlu elemanlar yönteminde kullanılan rijitlik matrisinin genel hali bulunmuş olacaktır (2.64).

$$\varepsilon = Lu = LNd^{e} = Ba^{e} \qquad \delta u = \delta (Na^{e}) = N\delta a^{e}$$

$$\varepsilon = Ba^{e} \qquad (\delta u)^{T} = (N\delta a^{e})^{T} = (\delta a^{e})^{T} N^{T}$$

$$\delta \varepsilon = \delta (Ba^{e}) = B\delta a^{e} \qquad (\delta u)^{T} = (N\delta a^{e})^{T} = (\delta a^{e})^{T} B^{T}$$

$$(\delta \varepsilon)^{T} = (B\delta a^{e})^{T} = (\delta a^{e})^{T} B^{T}$$

$$(\delta a^{e})^{T} \left\{ \int_{V} B^{T} \sigma dV - \sum_{i=1}^{n} N^{T} Q_{i} \right\} = 0 \rightarrow \int_{V} B^{T} \sigma dV - \sum_{i=1}^{n} N^{T} Q_{i} = 0$$

$$\frac{\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_{0}) + \sigma_{0};}{\left(\int_{V} B^{T} EB dV\right)} a^{e} - \int_{V} B^{T} E\varepsilon_{0} dV + \int_{V} B^{T} \sigma_{0} dV - \sum_{i=1}^{n} N^{T} Q_{i} = 0$$

$$(2.64)$$

Denklem 2.64'deki ifadeleri daha genel halde yazarsak denklem 2.65 elde edilir. Daha sonra genel ifadeleri denklem 2.66'daki gibi tanımlayabiliriz.

$$K^e a^e = f^e \tag{2.65}$$

$$K^{e} = \int_{V} B^{T} E B dV$$

$$f_{\varepsilon_{0}}^{e} = \int_{V} B^{T} E \varepsilon_{0} dV$$

$$f_{\sigma_{0}}^{e} = \int_{V} B^{T} \sigma_{0} dV$$

$$f_{\sigma_{0}}^{e} = \int_{V} B^{T} \sigma_{0} dV$$

$$f_{NY}^{e} = \sum_{i=1}^{n} N^{T} Q_{i}$$

$$(2.66)$$

2.2.2.1 Narin kirişin rijitlik matrisinin şekil fonksiyonlarıyla çıkarılması

Narin kiriş elemanında birim şekildeğiştirme olarak $\varepsilon_{xx}=z\kappa_{xx}$ eşitliği kullanılarak potansiyel enerji denklemleri yazılıp minimum enerji prensibine göre sıfıra eşitlenerek kiriş elemanın rijitlik matrisi kolaylıkla bulunur. Narin kiriş elemanında kayma açısı da sıfır olduğundan başka birim şekildeğiştirme olmamaktadır. Öncelikle narin kirişin birim şekildeğiştirmesi için eğrilik bulunur (2.67).

$$\kappa_{xx} = \frac{d^{2}w}{dx^{2}} = \frac{d^{2}w}{d\xi^{2}} \left(\frac{1}{L}\right)^{2} = \frac{d^{2}N}{d\xi^{2}} \left(\frac{1}{L}\right)^{2} a^{e}$$

$$= \left(\frac{1}{L}\right)^{2} \left[-6 + 12\xi \quad L\left(-4 + 6\xi\right) \quad 6 - 12\xi \quad L\left(-2 + 6\xi\right)\right] \begin{bmatrix} w_{i} \\ \theta_{i} \\ w_{j} \\ \theta_{j} \end{bmatrix}$$
(2.67)

Daha sonra bulunan eğrilik ile birim şekil değiştirme ilişkisi kurularak rijitlik matrisi hesabında gerekli olan B matrisi bulunur (2.68).

$$\varepsilon_{xx} = z\kappa_{xx} = Ba^{e}$$

$$B = z\left(\frac{1}{L}\right)^{2} \left[-6 + 12\xi \quad L\left(-4 + 6\xi\right) \quad 6 - 12\xi \quad L\left(-2 + 6\xi\right)\right]$$

$$a^{e} = \begin{bmatrix} w_{i} \\ \theta_{i} \\ w_{j} \\ \theta_{j} \end{bmatrix}$$
(2.68)

Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan narin bir kiriş elemanı rijitlik matrisini oluşturmak için bütün değişkenler denklem 2.65'de yerine koyularak bulunabilir (2.69). Denklem 2.69'da kullanılan B matrisinin z çarpanı $\int z^2 dA = I$ eşitliği kullanılarak dikkate alınmıştır.

$$K^{e} = \int_{x_{i}}^{x_{j}} B^{T} EB dx = L \int_{0}^{1} B^{T} EB d\xi = EI \left(\frac{1}{L}\right)^{3}$$

$$\begin{bmatrix} -6+12\xi \\ L(-4+6\xi) \\ 6-12\xi \\ L(-2+6\xi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -6+12\xi & L(-4+6\xi) & 6-12\xi & L(-2+6\xi) \end{bmatrix}$$

$$K^{e} = \frac{EI}{L^{3}} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^{2} & -6L & 2L^{2} \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^{2} & -6L & 4L^{2} \end{bmatrix}$$
(2.69)

2.2.2.2 İnce plak elemanın rijitlik matrisinin şekil fonksiyonlarıyla çıkarılması

İnce plak eleman narin bir kiriş elemana göre iki adet daha fazla birim şekildeğiştirme ile ifade edilmektedir. Bu üç adet birim şekildeğiştirmeyi de üç adet eğrilikle ifade etmek mümkündür (2.70). Denklem 2.70'de yön kabulü rijitlik matrisi oluşturmak için Şekil 2.33'de belirtilen yönlere göre yapılmıştır.

$$\kappa_{xx} = \frac{\partial \vartheta_{y}}{\partial x} = -\frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}} = -\frac{\partial^{2} w}{\partial \xi^{2}} \left(\frac{1}{L_{x}}\right)^{2} = -\frac{\partial^{2} N}{\partial \xi^{2}} \left(\frac{1}{L_{x}}\right)^{2} a^{e}$$

$$\kappa_{yy} = -\frac{\partial \vartheta_{x}}{\partial y} = -\frac{\partial^{2} w}{\partial y^{2}} = -\frac{\partial^{2} w}{\partial \eta^{2}} \left(\frac{1}{L_{y}}\right)^{2} = -\frac{\partial^{2} N}{\partial \eta^{2}} \left(\frac{1}{L_{y}}\right)^{2} a^{e}$$

$$\rho_{xy} = -\frac{\partial \vartheta_{x}}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta_{y}}{\partial y} = -2\frac{\partial^{2} w}{\partial x \partial y} = -2\frac{\partial^{2} w}{\partial \xi \partial \eta} \left(\frac{1}{L_{x}}L_{y}\right) = -2\frac{\partial^{2} N}{\partial \xi \partial \eta} \left(\frac{1}{L_{x}}L_{y}\right) a^{e}$$
(2.70)

İnce plak eleman da rijitlik matrisi çıkarılması için kullanılan denklem 2.64'ün plak elemanlarda poisson oranının gerilme üzerinde etkisi dolayısıyla bir takım değişikler yapılarak kullanılması gerekir (2.71).

$$\begin{split} \varepsilon_{xx} &= z\kappa_{xx} = B_{xx}a^{e}; \quad \varepsilon_{yy} = z\kappa_{yy} = B_{yy}a^{e}; \quad \gamma_{xy} = z\rho_{xy} = B_{xy}a^{e} \\ \int_{V} B_{xx}^{T}\sigma_{xx}dV + \int_{V} B_{yy}^{T}\sigma_{yy}dV + \int_{V} B_{xy}^{T}\tau_{xy}dV - \sum_{i=1}^{n} N^{T}Q_{i} = 0 \\ \sigma_{xx} &= \frac{E}{1-v^{2}} \left(\varepsilon_{xx} - v\varepsilon_{yy}\right); \quad \sigma_{yy} = \frac{E}{1-v^{2}} \left(\varepsilon_{yy} - v\varepsilon_{xx}\right); \quad \tau_{xy} = \frac{E}{2(1+v)}\gamma_{xy} \\ \hline \left(\int_{V} B_{xx}^{T} \frac{E}{1-v^{2}} \left(B_{xx} - vB_{yy}\right)dV + \int_{V} B_{xy}^{T} \frac{E}{2(1+v)}B_{xy}dV\right)a^{e} - \sum_{i=1}^{n} N^{T}Q_{i} = 0 \end{split}$$
(2.71)
$$\to K^{e}a^{e} = f^{e} \end{split}$$

Eğrilikler belirlenip birim şekildeğiştirmeler eğrilik cinsinden yazıldıktan sonra ince plak eleman için bulunan şekil fonksiyonları (2.63) denklem 2.70'de yerine koyularak B matrisleri bulunur. B matrisleri denklem 2.71'de yerlerine koyularak şekil fonksiyonları kullanılarak sonlu elemanlar yönteminde kullanılmak için rijitlik matrisleri bulunmuş olur (2.72 ve 2.73).

$$\begin{split} & \mathsf{K}_{11} = \begin{bmatrix} 4\left(\alpha^{2} + \beta^{2}\right) + \frac{1}{5}\left(14 - 4\nu\right) & \text{simetrik} \\ \left[2\alpha^{2} + \frac{1}{5}\left(1 + 4\nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{4}{3}\alpha^{2} + \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y}^{2} \\ - \left[2\beta^{2} + \frac{1}{5}\left(1 + 4\nu\right)\right]L_{y} & -\nu L_{x}L_{y} & \left[\frac{4}{3}\beta^{2} + \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y}^{2} \\ \left[2\left(\beta^{2} - 2\alpha^{2}\right) - \frac{1}{5}\left(14 - 4\nu\right) - \left[2\alpha^{2} + \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} & \left[-\beta^{2} + \frac{1}{5}\left(1 + 4\nu\right)\right]L_{x} \\ \left[2\alpha^{2} + \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{2}{3}\alpha^{2} - \frac{1}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y}^{2} & 0 \\ \left[-\beta^{2} + \frac{1}{5}\left(1 + 4\nu\right)\right]L_{x} & 0 & \left[\frac{2}{3}\beta^{2} - \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{x}^{2} \end{bmatrix} \end{split}$$

$$\begin{aligned} & \mathsf{K}_{22} = \begin{bmatrix} 4\left(\alpha^{2} + \beta^{2}\right) + \frac{1}{5}\left(14 - 4\nu\right) & \mathsf{simetrik} \\ -\left[2\alpha^{2} + \frac{1}{5}\left(1 + 4\nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{4}{3}\alpha^{2} + \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y}^{2} & 0 \\ \left[-\left[2\beta^{2} + \frac{1}{5}\left(1 + 4\nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{4}{3}\alpha^{2} + \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y}^{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2\left(\alpha^{2} + \beta^{2}\right) + \frac{1}{5}\left(14 - 4\nu\right) & \left[-\alpha^{2} + \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)L_{y}\right] & \left[\beta^{2} - \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)L_{x}\right] \\ \left[\alpha^{2} - \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{1}{3}\alpha^{2} + \frac{1}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y}^{2} & 0 \\ \left[-\beta^{2} + \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{1}{3}\alpha^{2} + \frac{1}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} & \left[2\beta^{2} + \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} \\ \left[-\alpha^{2} + \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{2}{3}\alpha^{2} - \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} & \left[2\beta^{2} + \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} \\ \left[-\alpha^{2} + \frac{1}{5}\left(1 + 4\nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{2}{3}\alpha^{2} - \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y}^{2} & 0 \\ - \left[2\beta^{2} + \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{2}{3}\alpha^{2} - \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y}^{2} & 0 \\ - \left[2\beta^{2} + \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{2}{3}\alpha^{2} - \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y}^{2} & 0 \\ - \left[2\beta^{2} + \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{2}{3}\alpha^{2} - \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y}^{2} \\ \left[2\beta^{2} - \frac{1}{5}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{4}{3}\alpha^{2} + \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y}^{2} \\ \left[2\beta^{2} + \frac{1}{5}\left(1 + 4\nu\right)\right]L_{y} & \left[\frac{4}{3}\alpha^{2} + \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{y}^{2} \\ \left[2\beta^{2} + \frac{1}{5}\left(1 + 4\nu\right)\right]L_{z} & -\nu L_{x}L_{y} & \left[\frac{4}{3}\beta^{2} + \frac{4}{15}\left(1 - \nu\right)\right]L_{z}^{2} \\ \end{bmatrix}$$
$$K_{41} = \begin{bmatrix} -2(2\beta^{2} - \alpha^{2}) - \frac{1}{5}(14 - 4\nu) & \left[\alpha^{2} - \frac{1}{5}(1 + 4\nu)\right]L_{y} & \left[2\beta^{2} + \frac{1}{5}(1 - \nu)\right]L_{x} \\ \left[\alpha^{2} - \frac{1}{5}(1 + 4\nu)\right]L_{y} & \left[\frac{2}{3}\alpha^{2} - \frac{4}{15}(1 - \nu)\right]L_{y}^{2} & 0 \\ - \left[2\beta^{2} + \frac{1}{5}(1 - \nu)\right]L_{x} & 0 & \left[\frac{2}{3}\beta^{2} - \frac{1}{15}(1 - \nu)\right]L_{x}^{2} \end{bmatrix}$$

$$K_{42} = \begin{bmatrix} -2(\alpha^{2} + \beta^{2}) + \frac{1}{5}(14 - 4\nu) & \left[\alpha^{2} - \frac{1}{5}(1 - \nu)L_{y}\right] & \left[\beta^{2} - \frac{1}{5}(1 - \nu)L_{x}\right] \\ \left[-\alpha^{2} + \frac{1}{5}(1 - \nu)\right]L_{y} & \left[\frac{1}{3}\alpha^{2} + \frac{1}{15}(1 - \nu)\right]L_{y}^{2} & 0 \\ \left[-\beta^{2} + \frac{1}{5}(1 - \nu)\right]L_{x} & 0 & \left[\frac{1}{3}\beta^{2} + \frac{1}{15}(1 - \nu)\right]L_{x}^{2} \end{bmatrix}$$

$$K_{43} = \begin{bmatrix} 2(\beta^{2} - 2\alpha^{2}) - \frac{1}{5}(14 - 4\nu) & \left[2\alpha^{2} + \frac{1}{5}(1 - \nu)L_{y}\right] & \left[\beta^{2} - \frac{1}{5}(1 - \nu)L_{x}\right] \\ - \left[2\alpha^{2} + \frac{1}{5}(1 - \nu)\right]L_{y} & \left[\frac{2}{3}\alpha^{2} - \frac{1}{15}(1 - \nu)\right]L_{y}^{2} & 0 \\ \left[\beta^{2} - \frac{1}{5}(1 - \nu)\right]L_{y} & \left[\frac{2}{3}\alpha^{2} - \frac{1}{15}(1 - \nu)\right]L_{y}^{2} & 0 \\ \left[\beta^{2} - \frac{1}{5}(1 + 4\nu)\right]L_{x} & 0 & \left[\frac{2}{3}\beta^{2} - \frac{4}{15}(1 - \nu)\right]L_{x}^{2} \end{bmatrix}$$

$$K_{44} = \begin{bmatrix} 4(\alpha^{2} + \beta^{2}) + \frac{1}{5}(14 - 4\nu) & simetrik \\ \left[2\alpha^{2} + \frac{1}{5}(1 + 4\nu)\right]L_{y} & \left[\frac{4}{3}\alpha^{2} + \frac{4}{15}(1 - \nu)\right]L_{y}^{2} \\ \left[2\beta^{2} + \frac{1}{5}(1 - 4\nu)\right]L_{x} & \nu L_{x}L_{y} & \left[\frac{4}{3}\beta^{2} + \frac{4}{15}(1 - \nu)\right]L_{x}^{2} \end{bmatrix}$$

Her bir düğüm noktası için rijitlik değerleri hesaplandıktan sonra Şekil 2.33'de belirtilen 4 düğüm noktalı ince bir plak eleman için rijitlik matrisi ve kullanılan katsayılar denklem 2.74'de belirtilmiştir.

$$K^{e} = \frac{Eh^{3}}{12(1-v^{2})L_{x}L_{y}} \begin{bmatrix} K_{11} & Simetrik \\ K_{21} & K_{22} & \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix}$$
(2.74)
$$\alpha = \frac{L_{x}}{L_{y}}; \quad \beta = \frac{L_{y}}{L_{x}}$$

2.3 Ortotropik Plak (Boşluklu Döşeme)

Genel teorilerdeki plak elemanlar izotropik elemanlardı. Ancak boşluklu döşeme plaklar içinde boşluklar bırakılarak oluşturuluyor. Bu boşluklar nizami bir şekilde oluşturulduğu için plak eleman çözümüne benzer şekilde bir takım değişikliklerle ortotropik bir plak olarak düşünülerek çözüme gidilebilir. Bunun için genel teorilerde anlatılan izotropik plak ile ortotropik plak arasındaki farklılıklar ve sonlu elemanlar yönteminde uygulanması büyük öneme sahiptir.

2.3.1 İzotropik plak ile ortotropik plak arasındaki hesap farklılıkları

Plak elemanlar için ve genel olarak bir eleman modeli için sağlaması gereken temel üç denklem vardır. Bunlardan kinematik denklemler ve denge denklemleri izotropik ve ortotropik malzeme için değişmemektedir. Ancak bünye denklemi farklılık göstermektedir. İzotropik bir plak elemanda birbirine dik iki yatay eksene göre rijitlikler aynı iken ortotropik bir plak elemanda ise rijitlikler farklılık gösterebilir. Bu farklılıktan dolayı izotropik bir plak elemanın burulma momentleri $m_{xy}=m_{yx}$ eşitliğini sağlarken ortotropik bir plak elemanda sağlanmayabilir. Ancak burulma birim şekildeğişmeleri ($\rho_{xy}=\rho_{yx}$) hacimsel bir ifade olduğu için değişmemektedir. Bu bilgiler ışığında izotropik plak eleman için denklem 2.75 ve ortotropik plak eleman için denklem 2.76 olarak moment değerleri yazılabilir.

$$\begin{cases}
m_{xx} \\
m_{yy} \\
m_{xy}
\end{cases} = \frac{Et^{3}}{12(1-\nu^{2})} \begin{bmatrix}
1 & \nu & 0 \\
\nu & 1 & 0 \\
0 & 0 & \frac{1}{2}(1-\nu)
\end{bmatrix} \begin{cases}
\kappa_{xx} \\
\kappa_{yy} \\
\rho_{xy}
\end{cases}$$
(2.75)

$$\begin{cases} m_{xx} \\ m_{yy} \\ m_{ort} \end{cases} = \begin{bmatrix} D_{e,xx} & D_{e,v} & 0 \\ D_{e,v} & D_{e,yy} & 0 \\ 0 & 0 & D_{e,ort} \end{bmatrix} \begin{cases} \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \rho_{xy} \end{cases}$$
(2.76)

Denklem 2.76'da $D_{e,xx}$ x yönündeki eğilme rijitliğini tanımlarken $D_{e,yy}$ y yönündeki eğilme rijitliğini tanımlamaktadır. Aynı denklemde m_{ort} burulma momentinin ve $D_{e,ort}$ burulma rijitliğinin ortalama değerini ifade etmektedir (2.77). Ortalama burulma momenti birbirine dik iki yatay yöne rijitlikleri oranında paylaştırılır (2.78).

$$m_{ort} = \frac{1}{2} \left(m_{xy} + m_{yx} \right)$$

$$D_{e,ort} = \frac{1}{2} \left(D_{e,xy} + D_{e,yx} \right)$$
(2.77)

$$m_{xy} = \frac{2D_{xy}}{D_{xy} + D_{yx}} m_{ort}$$

$$m_{yx} = \frac{2D_{yx}}{D_{xy} + D_{yx}} m_{ort}$$
(2.78)

Kesme kuvveti de eğilme davranışına benzer şekilde bünye denklemlerinde kayma alanı değişiminden dolayı farklılıklar göstermektedir. Denklem 2.79 ile izotropik bir plak elemanın kesme kuvvetinin bünye denklemi olarak ifade edersek denklem 2.80 ile de ortotropik bir plak elemanın kesme kuvvetinin bünye denklemi ifade edilebilir. Bu denklemde $D_{k, x} x$ yönünde kesme rijitliğini ifade ederken $D_{k, y}$ ise y yönünde kesme rijitliğini göstermektedir.

$$\begin{cases} v_x \\ v_y \end{cases} = \begin{bmatrix} D_k & 0 \\ 0 & D_k \end{bmatrix} \begin{cases} \gamma_x \\ \gamma_y \end{cases}$$
 (2.79)

$$\begin{cases} v_x \\ v_y \end{cases} = \begin{bmatrix} D_{k,x} & 0 \\ 0 & D_{k,y} \end{bmatrix} \begin{cases} \gamma_x \\ \gamma_y \end{cases}$$
(2.80)

2.3.2 Ortotropik plak modelinin sonlu elemanlar yönteminde uygulanması

Ortotropik bir plak eleman için bir önceki bölümde anlatıldığı gibi izotropik bir plak elemana göre değişenler rijitlikler yani eylemsizlik momentleri ve kayma alanlarıdır. Eylemsizlik momentlerine ve kayma alanlarına ek olarak çıkarılan her bir boşluk için ortotropik plak elemanın ağırlığını izotropik elemana göre tanımlamak için birim hacimde azalma miktarı bulunur. Genel felsefe izotropik elemanda ve ortotropik elemanda birim boyda eylemsizlik momenti, birim boyda kayma alanı ve birim boyda beton hacimleri bulunur. Daha sonra sonlu elemanlar yönteminde hiç boşluk yokmuş gibi modeli oluşturulurken uygun rijitlikleri ve ağırlığı sağlayacak değişikler yaparak ortotropik plak özelliklerinde bir eleman modellemesi gerçekleştirilmiş olur. Şekil 2.34'de boşluklu ve boşluksuz döşeme kesiti için parametreler gösterilmiştir.



Şekil 2.34 : Boşluksuz ve boşluklu birim kesit parametreleri.

Birim kesit parametrelerine göre izotropik bir plak elemana ve ortotropik plak (boşluklu döşeme) elamanına ait birim boyda eylemsizlik momenti, birim boyda kayma alanı ve birim boyda beton hacmi bulunur. Daha sonra bu değerler oranlanarak sonlu elemanlar da ortotropik plak elemanı tanımlamak için izotropik plak elemanda hangi rijitliklerin ve hacim katsayılarının değiştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Denklem 2.81'de boşluksuz (izotropik plak) ve boşluklu döşeme (ortotropik plak) kesitinin Şekil 2.34'de verilen birim kesit parametrelerine göre eylemsizlik momenti düzeltme katsayısı (kI_{1/m}), kayma alanı düzeltme katsayısı (kG_{1/m}) ve hacim düzeltme katsayısı (kV_{1/m}) değerleri verilmiştir. Kayma alanı hesaplanırken η istenirse daha detaylı hesaplanabileceği gibi pratik olarak kayma alanı gövde alanı ile de hesaplanabilir (2.81).

$$\begin{cases} I_{boşluksuz} = \frac{1}{12}bd^{3} \\ I_{boşluksuz,1/m} = \frac{1}{12}d^{3} \\ A_{boşluksuz} = bd \\ A_{boşluksuz,1/m} = d \\ \eta_{boşluksuz,1/m} = 6/5 \\ G_{boşluksuz,1/m} = A_{boşluksuz} / \eta_{boşluksuz} \\ V_{boşluksuz,1/m} = b^{2}d / b^{2} \end{cases} \begin{cases} I_{boşluklu} = \frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3} \\ I_{boşluklu,1/m} = \left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = \left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{1}{12}bd^{3} - \frac{1}{12}xy^{3}\right)/b \\ A_{boşluklu,1/m} = b\left(\frac{$$

(2.81)

 $kI_{1/m} = I_{boşluklu,1/m} / I_{boşluksuz,1/m}$ $\star A_{1/m} = A_{boşluklu,1/m} / A_{boşluksuz,1/m}$ $kG_{1/m} = G_{boşluklu,1/m} / G_{boşluksuz,1/m}$ $kV_{1/m} = V_{boşluklu,1/m} / V_{boşluksuz,1/m}$

3. BOŞLUKLU KESİT ANALİZİ VE PARAMETRİK ÇALIŞMALAR

Bir betonarme yapı tasarlanmak için izlenecek yollar vardır. İlk aşama yapı taşıyıcı sitemini seçmektir. Döşeme sistemi olarak kirişsiz boşluklu döşeme seçildikten sonra yapı ömrü boyunca yapıya etki edecek yükleri belirlemek ve bu yükler altında ön tasarım olarak seçilen kesitlerin rijitlikleri ile kesit zorları bulunması yani yapısal çözümleme vardır. Son aşama ise bu kesit zorlarına uygun dayanım, birim şekildeğiştirme ve çatlak genişliği açısından belirli bir güvenliği sağlayacak şekilde boyutlandırma ve donatılandırma yapıldıktan sonra bu tasarıma uygun olarak yerinde yapmaktır.

3.1 Kesit Analizi

Kesit analizi kesit zorlarına göre boyutlandırma ve donatılandırma işlemidir. Kesit analizi için genel olarak iki yöntem vardır. İlk yöntem beton ve çelik malzemesinin doğrusal ve elastik davrandığını kabul eden "Emniyet Gerilmeleri Yöntemi" veya "Elastik Yöntem" olarak isimlendirilebilir. İkinci yöntem ise TS-500'ün uygun gördüğü "Sınır Durumları Yöntemi" olarak isimlendirilebilir. Bu sınır durumlar "Taşıma Gücü" ve "Kullanılabilirlilik" durumlarında güvenliğin sağlanmasıdır.

Emniyet gerilmeleri yönteminde, beton malzemesinin basınç dayanımına kadar ve çelik malzemesinin çekme akma dayanımına kadar doğrusal ve elastik davrandığı kabul edilmektedir. Donatı alanı, modüler oran olan $n=E_s/E_c$ ile çarpılarak eşdeğer beton alanına dönüştürülür. Eşdeğer bu kesitte gerilme analizi yapılarak beton ve çelik malzemesinin yönetmeliklerde verilen emniyet gerilmelerini güvenle taşıyabileceği gösterilmektedir. Ancak beton malzemesinin, yük geçmişi, yükleme hızı, sünme ve rötre etkileri ve tekrarlı yük etkileri gibi birçok değişkene bağlı olarak doğrusal ve elastik olmadığı günümüzde bilinmektedir. Beton malzemesi zamana bağlı şekildeğiştirme yapan bir malzeme olduğu için yükleme hızı önemli bir parametredir. Münih Teknik üniversitesinde Prof. Rüsch tarafından yapılan farklı sabit şekildeğiştirme hızı altında beton numune değerlerinin gösterdiği farklı basınç dayanımları ve maksimum şekildeğiştirmelerin farklı sonuçları yükleme hızının önemini göstermektedir (Ersoy, 2016). Tekrarlı yükler altında yapılan çalışmalarda betonun yük geçmişine bağlı olarak farklı başlangıç elastisite modülü ile başladığı gözlemlenmiştir (Aslani ve Jowkarmeimandi, 2012). Buda elastik yöntemde sabit kabul edilen beton elastisite modülünün sabit olmayabileceğini göstermiştir. Illinois ve Lehigh üniversitelerinin ortak çalışmalarıyla sabit eksenel yük altında beton ve çelik gerilmeleri belli zaman aralıklarıyla ölçülmüştür. Beton ve çelik malzemesinde hesap değerlerinden çok farklı gerilmelerin okunduğu gözlemlenmiştir. Bunlar, betonarme bir kesitte gerilme hesabının doğru bir şekilde yapılamayacağını göstermiştir (Ersoy, 2016). Böylelikle, taşıma gücü yöntemi kabul görmüş kullanılmaya başlanmıştır.

Sınır durumlar yöntemi, taşıma gücü yani güç tükenme durumuna karşı denk gelen kapasite tasarımı ve servis yükleri altında kullanılabilirlik sınır durumlarına göre tasarımı esas almaktadır. Taşıma gücü, elastik yöntemin aksine beton ve çelik malzemesinin doğrusal olmayan gerçek davranışının esas alındığı yöntemdir. Taşıma gücünde de bazı kabuller yapılmaktadır. Yapılan ilk kabul, şekildeğiştirmeden önceki düzlem kesit şekildeğiştirmeden sonra düzlem kalır. Bu, şekildeğiştirmelerin doğrusal bir şekilde dağıldığını kabul etmektir. İkinci kabul ise taşıma gücü anında betonun çekme dayanımı ihmal edilir. Donatı ile beton arasında tam aderans vardır yani donatı lifinde okunan şekildeğiştirme komşu beton lifinde okunan şekildeğiştirme ile aynıdır. Basınç bölgesindeki beton gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi eksenel basınç altında denenen numune özellikleri ile benzerdir. Donatı gerilmeşekildeğiştirme ilişkisi elasto-plastiktir. Basınç bölgesindeki en dıştaki beton lifi yönetmeliklerde belirtilen maksimum basınç birim şekildeğiştirmesine (ε_{cu}) ulaştığında kesit taşıma gücüne yani güç tükenmesine ulaşmıştır. Maksimum birim şekildeğiştirme beton malzemenin maksimum gerilmesine değil daha sonrasına denk gelmektedir. Bunun anlamı beton malzemesi maksimum gerilmeye ulaştığında henüz maksimum birim şekildeğiştirmeye ulaşmamış olduğundan kesit yük taşımaya devam edecek ve en dıştaki lif yükünü "betonarme de uyum" ya da "gerilme uyumu" olarak isimlendirdiğimiz özelliği sayesinde komşu liflere aktaracaktır. Bu şekilde bulunan kesit taşıma gücü, analiz sonucu kesite gelen tasarım momentini güvenle taşıyabileceği ve kullanılabilirlilik durumunu da sağladığı gösterilerek sınır durumlar yöntemi uygulanmış olmaktadır. Betonarme bir kesitte salt eğilmeye ya da eksenel yük etkisi altında birleşik eğilmeye çalışan elamanlarda tasarıma bağlı olarak farklı

kırılma türleri görülmektedir. Betonarme bir eleman kırılma durumuna taşıma gücüne yani güç tükenmesi durumuna ulaştığında gelir. Moment taşıma gücüne de en dıştaki beton lifi maksimum şekildeğiştirmeye ulaştığında gelir. Ancak beton lifi bu aşamaya gelene kadar çekme bölgesindeki donatıdaki şekildeğiştirme kırılma türünü belirlemektedir. Eğer çekme bölgesindeki donatı kırılma durumuna gelmeden akma şekildeğiştirmesine ulaşmışsa kırılmaya donatı hâkim olur ve kırılma sünek olur. Bu kırılma türüne "Çekme Kırılması" denir. Çekme bölgesindeki donatı akmadan kırılma meydana geliyorsa kırılmaya beton malzemesi hâkim olacak ve kırılma gevrek gerçekleşecektir. Bu kırılma türüne "Basınç Kırılması" denir. Bu iki durum arasında yani en dıştaki beton lifi yönetmelikte belirtilen maksimum şekildeğiştirmeye ulaştığı anda çekme bölgesindeki donatı da akmaya aynı anda ulaşıyorsa bu kırılma türüne de "Dengeli Kırılma" denir. Bu kırılma türü de gevrek meydana gelmektedir. Sünek bir tasarım, yapı elamanlarının deprem gibi dinamik yükler altında daha fazla enerji tüketimi sağladığı için denge altı donatılandırma yani cekme kırılması istenen özelliktir. Deprem gibi bilinmezi fazla olan bir dinamik yük altında tasarım kuvvetlerini aşan bir yük durumunda kırılma kaçınılmaz olacaktır. Ancak kırılma meydana gelecekse de bu kırılma sünek olması istenmektedir. Çünkü sünek bir kırılma tedbir ve tahliye için zaman tanırken gevrek kırılma bu fırsatı tanımadan ani göçmeye sebep olmaktadır. Eksenel yük, moment kapasitesini ve sünekliği ciddi oranda etkilediği için bu yüke yönetmelikler sınır getirmektedir.

3.1.1 Genel kesit analizi esasları

Bir betonarme kesit önce çekme bölgesinde beton malzemesinin çekme dayanımına ulaşmasıyla çatlama momentine ulaşır. Daha sonra çekme bölgesinde çelik malzemesinin akma durumuna ($\varepsilon_s = \varepsilon_{sy}$) ulaşmasıyla akma momentine ve son olarak en dıştaki beton lifi maksimum şekildeğiştirmeye ($\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$) ulaştığında güç tükenmesi durumuna gelir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Betonarme kesit gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.

3.1.1.1 Çatlama durumu

Betonarme kesit, çatlama durumuna gelene kadar beton malzemesindeki gerilmeler çok küçük kalacağından beton malzemesi davranışı doğrusal kabul edilebilir yani bölüm 3.1'de kısaca bahsedilen elastik yöntem kullanılabilir. Betonarme kesit yük almaya başladığı zaman başlangıçta tarafsız eksen üstü yani basınç bölgesinde basınca çalışırken tarafsız eksen altında yani çekme bölgesinde çekme kuvvetini taşımaktadır. Eksenel çekme deneylerinde bulunan çekme kuvveti dayanımı eğilme durumunda iki katı olarak (f_r=2.f_{ctd}) alınabilmektedir (TS500, 2000, Bölüm 3.3.2). Hesap adımları olarak ilk olarak modüler oran olarak bilinen n=E_s/E_c bulunur. Bu şekilde denklem 3.1 ile betona dönüştürülmüş kesit alanı bulunur.

$$A = bh + (n-1)(A_s + A_s')$$
(3.1)

Eğer basınç donatısı ile çekme donatısı birbirinden farklı ise ağırlık merkezi denklem 3.2 ile bulunarak bu ağırlık merkezine göre atalet momenti hesaplanır (3.3).

$$y_{alt} = \frac{1}{A} \left[bh \frac{h}{2} + A_s d'(n-1) + A_s' d(n-1) \right]$$
(3.2)

$$I = \frac{1}{12}bh^{3} + bh\left(\frac{h}{2} - y_{alt}\right)^{2} + (n-1)A_{s}(y_{alt} - d')^{2} + (n-1)A_{s}'(h - y_{alt} - d')^{2}$$
(3.3)

Sonuç olarak çatlama anındaki moment ve eğrilik basit eğilme altındaki mukavemet eşitliklerinden bulunabilir (3.4).

$$M_{\text{catlama}} = \sigma \frac{I}{y_{alt}} = f_r \frac{I}{y_{alt}}$$

$$\kappa_{\text{catlama}} = \frac{\varepsilon}{y_{alt}} = \frac{f_r / E}{y_{alt}}$$
(3.4)

Kesite etki eden normal kuvvet, çekme yönü pozitif kabul edilerek gerilme değeri denklem 3.5'deki gibi düzenlenerek moment ve eğrilik değerleri hesaplanabilir.

$$\sigma = f_r - \frac{N}{A} \tag{3.5}$$

3.1.1.2 Akma durumu

Betonarme kesit, akma durumuna çekme bölgesindeki donatı malzemesinin akma birim şekildeğiştirmesine ulaştığında gelir. Akma anındaki çözüm basınç donatısının akma şekildeğiştirmesine ulaşıp ulaşmamasına göre değişmektedir. Öncelikle Şekil 3.1 kullanılarak kuvvet (3.6) ve moment (3.7) denge denklemleri yazılır. Beton malzemesi, basınç bloğu derinliği (c) boyunca basınca çalışmaktadır. Ancak bu basınç gerilmesi dağılımını yönetmelik(TS-500) her beton sınıfı için değişmekle beraber k₁ katsayısı ile eşdeğer dikdörtgen olarak tanımlamaktadır.

$$\sum F = 0 \longrightarrow F_c + F_s' = F_s + N \longrightarrow 0.85 f_{cd} ba + A_s' \sigma_s' - A_s f_{yd} - N = 0$$
(3.6)

$$\sum M = M_r \to M_r = F_c (h - d' - a/2) + F_s'(h - 2d') - N(h/2 - d')$$

= 0.85 $f_{cd} ba(h - d' - a/2) + A_s' \sigma_s'(h - 2d') - N(h/2 - d')$ (3.7)

Başlangıç olarak basınç donatısı akmış kabul edilerek işleme devam edilir. Daha sonra akma gerilmesine ulaşıp ulaşmadığı kontrol edilir. Denklem 3.6'da basınç donatısının gerilmesi yerine f_{yd} yazılarak beton basınç bloğu derinliği (c) bulunur. Denklem 3.8 yardımıyla başlangıçta akmış kabul edilen basınç donatısının akıp akmadığı kontrol edilir.

$$\frac{\varepsilon_{s'}}{\varepsilon_{sv}} \ge \frac{c-d'}{h-d'-c} \to \sigma_{s'} \ge f_{yd} \frac{c-d'}{h-d'-c}$$
(3.8)

Basınç donatısı akma gerilmesine ulaşmışsa bulunan beton basınç bloğu derinliği (c) doğru değerdir ve denklem 3.7'de yerine yazılarak akma momenti bulunur. Basınç donatısı akma gerilmesine ulaşamamışsa denklem 3.6'da basınç donatısı gerilmesi yerine fyd(c-d')/(h-d'-c) yazılarak beton basınç bloğu derinliği (c) hesaplanır. Bulunan değer ile birlikte hesaplanan basınç donatısının gerilmesi denklem 3.7'de yerine yazılarak akma momenti bulunur. Eğrilik genel ifadesi olarak Şekil 3.1'de belirtilen şekildeğiştirme doğrusunun eğimi olarak tanımlanabilmektedir. Genel bu felsefe ile çekme bölgesindeki donatının birim şekildeğiştirmesinin tarafsız eksene oranıyla akma durumundaki eğrilik değeri de denklem 3.9 ile hesaplanabilir.

$$\kappa_{akma} = \varepsilon_{sy} / (h - d' - c) \tag{3.9}$$

3.1.1.3 Güç tükenmesi durumu

Güç tükenmesi durumu, basınç bölgesindeki en dıştaki beton lifinin yönetmeliklerde verilen maksimum birim şekildeğiştirmeye (ε_{cu}) ulaştığında gerçekleşmektedir. Akma durumuna benzer olarak basınç donatısının akmaya ulaşıp ulaşmadığına göre hesap adımları değişmektedir. Öncelikle basınç donatısının akmaya ulaştığı kabul edilerek basınç donatısı gerilmesi yerine akma gerilmesi yazılarak denklem 3.7'den beton basınç bloğu derinliği (c) bulunur. Akma durumunda sınır, çekme donatısının akma birim şekildeğiştirmesi olduğu için basınç donatısıyla çekme donatısının şekildeğiştirmeleri ile tarafsız eksene uzaklıklar arasında ilişki kuruluyordu. Ancak güç tükenmesi durumunda sınır, beton malzemesinin birim şekildeğiştirmesi olduğu için beton malzemesi ve basınç donatısının şekildeğiştirmeleri ile tarafsız eksene uzaklıklar arasında ilişki kuruluyordu. Ancak güç tükenmesi durumunda sınır, beton malzemesinin birim şekildeğiştirmesi olduğu için beton malzemesi ve basınç donatısının şekildeğiştirmeleri ile tarafsız eksene uzaklıklar arasında ilişki donatısının akmaya ulaşıp ulaşamadığı kontrol edilir (3.10).

$$\frac{\varepsilon_{s}'}{\varepsilon_{cu}} \ge \frac{c-d'}{c} \to \sigma_{s}' \ge \varepsilon_{cu} E_{s} \frac{c-d'}{c}$$
(3.10)

Eğer basınç donatısı akma gerilmesine ulaşmışsa bulunan basınç bloğu derinliği (c) doğru değerdir yani kabul geçerlidir. Bulunan bu değerler denklem 3.8'de yerine koyularak bulunan moment değeri güç tükenmesi momentidir. Basınç donatısı akma gerilmesine ulaşamamışsa denklem 3.7'de basınç donatısı gerilmesi yerine $\varepsilon_{cu}E_{s}(c-d')/c$ yazılarak yeni beton basınç bloğu derinliği (c) bulunur. Bu değerler denklem 3.8'de yerine koyularak güç tükenmesi momenti bulunmuş olur. Kesitte normal kuvvet mevcut ise N çekme yönü pozitif kabul edilerek yazılmış denklem 3.7 ve denklem 3.8'de yerlerine koyularak güç tükenmesi durumuna ait moment ve eğrilik değerleri hesaplanabilir.

Bu bölümde anlatılanlar el hesabı için anlatılmış olup kesit analizinde boşluklu ve boşluksuz olarak yapılan kesit analizinde hangi değerlerin değişip hangi değerlerin neredeyse aynı olduğunu göstermek için yapılmıştır. Daha sonra bu benzerlikler kullanılması ve farklı özellikler gerekli değişikler yapılarak bir boşluklu döşemenin boşluksuz bir plak eleman olarak tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Sonraki bölümlerde yapılan parametrik kesit çalışmalarında kesit birçok life bölünerek beton ve çelik malzemesinin adım adım gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi takip edilerek gerçek sonuca daha yakın sonuçlar üzerinde çalışılmıştır.

3.1.2 Boşluklu ve boşluksuz döşeme kesit analizleri karşılaştırılması

Boşluklu ve boşluksuz kesitin adım adım çatlama, akma ve güç tükenmesi durumları Şekil 3.2'de verilen kesit parametreleri ile hesaplanacaktır. Donatı çekme ve basınç bölgesinde 5\u00f616 seçilmiştir. Malzeme C30/B420C alınmıştır.



Şekil 3.2 : Boşluksuz ve boşluklu kesit analizinde örnek ($t_u = t_a = 10$ cm) kesit boyutları.

Çatlama durumuna ait karşılaştırma için başlangıçta modüler oran ve ardından betona dönüştürülmüş eşdeğer kesit alanı bulunur. Kesitler simetrik ve basınç donatısı ile çekme donatısı aynı olduğundan dolayı kesit ağırlık merkezi ortasındadır. Kesit atalet değişimlerinden dolayı boşluklu döşeme kesitinin boşluksuza göre daha çabuk çatlamaya ulaşmasına rağmen eğrilikler aynı olmaktadır (3.10).

$$\begin{cases} Boşluksuz \\ n = E_s / E_c = 200000 / 32000 = 6.25 \\ I = \frac{1}{12} 0.67 x 0.4^3 + 2 \left[(6.25 - 1)10.05 (20 - 2.5)^2 \right] x 10^{-8} \\ = 3.8965 x 10^{-3} m^4 \\ M_{\zeta atlama} = \left(2x1.25 x 10^3 \right) \frac{3.8965 x 10^{-3}}{0.2} = 48.71 k N m \\ \kappa_{\zeta atlama} = \frac{2.5 / 32000}{0.2} = 3.91 x 10^{-4} \\ \end{cases}$$
(3. 10)
$$\begin{cases} Boşluklu \\ n = E_s / E_c = 200000 / 32000 = 6.25 \\ I = I_{bogluksuz} - \frac{1}{12} 0.52 x 0.2^3 = 3.55 x 10^{-3} m^4 \\ M_{\zeta atlama} = \left(2x1.25 x 10^3 \right) \frac{3.55 x 10^{-3}}{0.2} = 44.38 k N m \\ \kappa_{\zeta atlama} = \frac{2.5 / 32000}{0.2} = 3.91 x 10^{-4} \\ \end{cases}$$

Akma durumuna ait karşılaştırma için öncelikle basınç bloğu derinliğinin boşluklu kesit için üst plak kalınlığını geçmediği ve iki kesitinde basınç donatısının akmadığı kabul edilerek çözüm yapılacaktır (3.11).

$$\begin{cases} Boşluksuz = Boşluklu\\ \Sigma F = 0 \to 0.85x20x670x(0.82xc) - 1005x365\\ +1005x365x \frac{c-25}{400-25-c} = 0 \to c = 38mm\\ \sigma_s' = 365 \frac{38-25}{375-38} = 14.08Mpa \le 365Mpa\\ F_c = 0.85x20x670x0.82x38 = 354.91kN\\ F_s' = 1005x14.08 = 14.15kN\\ M_{Akma} = F_c x(400-25-0.82x38/2)\\ +F_s' x(400-2x25) = 132.52kNm\\ \kappa_{Akma} = \frac{365/200000}{(0.4-0.025-0.038)} = 5.42x10^{-3}(1/m) \end{cases}$$
(3.11)

Denklem 3.11 de görüldüğü gibi güç tükenmesi durumunda da akmaya benzer şekilde basınç bloğu derinliği (c) basınca çalışan plak kalınlığını geçmediği sürece aynı moment taşıma gücüne sahip olacaktır (3.12). Betonarme boşluklu ve boşluksuz kesitlerde çatlama momenti haricinde taşıma gücü olarak bir farklılık gözlenmemektedir.

$$\begin{cases} Boşluksuz = Boşluklu\\ \sum F = 0 \to 0.85x20x670x(0.82xc) - 1005x365\\ +1005x0.003x200000x\frac{c-25}{c} = 0 \to c = 30mm\\ \sigma_s' = 0.003x200000x\frac{30-25}{30} = 100Mpa \le 365Mpa\\ F_c = 0.85x20x670x0.82x30 = 280.2kN\\ F_s' = 1005x100 = 100.5kN\\ M_{GiiqTiikenmesi} = F_c x(400 - 25 - 0.82x30/2)\\ +F_s' x(400 - 2x25) = 136.8kNm\\ \kappa_{GiiqTiikenmesi} = \frac{0.003}{0.03} = 0.1(1/m) \end{cases}$$
(3.12)

Beton basınç alanı ve donatıları eşit olan bütün kesitlerin aynı şekildeğiştirme eğrisine, aynı gerilme bloğuna ve aynı çelik malzemesi kuvvetine sahip olduğundan aynı taşıma gücü momentine sahip olduğu bu açıklamalarla gösterilmiştir (Şekil 3.3). Bu yaklaşımla boşluklu döşeme, çekme bölgesinde içinde kalan ve çatlama gerçekleştikten sonra çekmeye çalışmadığı için bu beton malzemesinin yeteri miktarda azaltılabileceği görülmüştür.



Şekil 3.3 : Taşıma gücü eşit olan özdeş kesitler.

Boşluklu ve boşluksuz kesitin akma ve güç tükenmesi durumları Şekil 3.4'de verilen kesit parametreleri ve 14\u00f620 çekme ve 14\u00f620 basınç donatısı ile hesap tekrarlanacaktır. Bu şekilde yüksek donatı oranlarıyla basınç bloğu yüksekliğinin plak kalınlığını geçtiği durum örneklendirilerek taşıma gücü açısından boşluklu ve boşluksuz döşemenin arasındaki ilişki incelenecektir.



Şekil 3.4 : Boşluksuz ve boşluklu kesit analizinde örnek (t_u= t_a =7cm) kesit boyutları.

Denklem 3.13'de boşluksuz kesitin basınç donatısı akmadığı kabul edilerek hesap yapıldı ve akmadığı kontrol edildi. Akmaya ulaşana kadar adım adım basınç bloğu yüksekliği plak kalınlığına kadar gelir. Plak kalınlığında hala akmaya ulaşmamışsa basınç gerilmeleri, plak kalınlığından sonra daha küçük bir alanla karşılandığı için boşluklu kesitte (3.14) boşluksuz kesite (3.13) göre daha büyük basınç bloğu yüksekliği gözlenir. Denklem 3.13 ve 3.14 karşılaştırıldığında akma momenti olarak basınç bloğu yüksekliğinin plak kalınlığını geçmesiyle boşluklu kesitin boşluksuz kesite göre daha az moment taşıdığı ve bu moment için daha fazla eğrilik değerini aldığı yani daha fazla dönme yerdeğiştirmesi yaptığı anlaşılmıştır.

$$Boşluksuz$$

$$\Sigma F = 0 \rightarrow 0.85x20x670x(0.82xc) - 4396x365$$

$$+4396x365x \frac{c-25}{400-25-c} = 0 \rightarrow c = 114mm$$

$$\sigma_{s}' = 365 \frac{114-25}{375-114} = 124.46Mpa \leq 365Mpa$$

$$F_{c} = 0.85x20x670x0.82x114 = 1064.74kN$$

$$F_{s}' = 4396x124.46 = 547.13kN$$

$$M_{Akma} = F_{c}x(400-25-0.82x114/2)$$

$$+F_{s}'x(400-2x25) = 541kNm$$

$$\kappa_{Akma} = \frac{365/200000}{(0.4-0.025-0.114)} = 7x10^{-3}(1/m)$$

$$Bosluklu$$

$$\begin{cases} Boşluklu \\ \Sigma F = 0 \rightarrow 0.85x20x(670x70 + 150x(0.82c - 70)) - 4396x365 \\ +4396x365x\frac{c - 25}{400 - 25 - c} = 0 \rightarrow c = 132mm \\ \sigma_s' = 365\frac{132 - 25}{375 - 132} = 160.72Mpa \le 365Mpa \\ F_c = 0.85x20x(670x70 + 150x(0.82x132 - 70)) = 894.81kN \\ F_s' = 4396x160.72 = 706.53kN \\ M_{Akma} = F_cx(400 - 25 - 0.82x132/2) \\ +F_s'x(400 - 2x25) = 534.41kNm \\ \kappa_{Akma} = \frac{365/200000}{(0.4 - 0.025 - 0.132)} = 7.51x10^{-3}(1/m) \end{cases}$$

$$(3.14)$$

Güç tükenmesi durumu için basınç bloğu derinliği plak kalınlığını geçmediği için moment ve eğrilik açısından boşluklu ve boşluksuz kesitin farkı olmadığı gözlemlenmiştir (3.15). Ancak deprem gibi bir bilinmezi düşünerek hareket etmek gerekirse ve yukarıdaki iki farklı kesit için akma ve güç tükenmesi momentleri ve eğrilikleri göz önünde bulundurulduğunda basınç bloğu derinliğinin plak kalınlığını geçmediği durumlarda boşluklu kesit gerekli modifikasyonlar yapılarak yapı modeline eklenebileceği gözlemlenmiştir.

$$\begin{cases} Boşluksuz = Boşluklu\\ \Sigma F = 0 \rightarrow 0.85x20x670x(0.82xc) - 4396x365\\ +4396x0.003x200000x\frac{c-25}{c} = 0 \rightarrow c = 45mm\\ \sigma_s' = 0.003x200000x\frac{45-25}{45} = 266.67Mpa \le 365Mpa\\ F_c = 0.85x20x670x0.82x45 = 420.29kN\\ F_s' = 4396x266.67 = 1172.28kN\\ M_{GücTükenmesi} = F_cx(400 - 25 - 0.82x45/2)\\ +F_s'x(400 - 2x25) = 560.15kNm\\ \kappa_{GücTükenmesi} = \frac{0.003}{0.045} = 0.067(1/m) \end{cases}$$
(3.15)

3.2 Parametrik Çalışmalar

Yapılan incelemelerle döşeme kesiti içinde boşluklar bırakılarak boşluklu döşeme kesiti oluşturup yapı içinde dayanım kaybı olmadan kullanılabileceği anlaşılmış ve anlatılmıştır. Ancak bu incelemeleri parametrik çalışmalarla destekleyerek yapı sisteminin talebine uygun şekil ve boyutların seçimi yapılabilir. Öncelikle şekil olarak boşluğun belirlenmesi ve daha sonra boşluğun boyutları değiştirilerek uygun boşluklu döşeme seçimi yapılabilir. Bu amaçla şekil çalışması ve kesit analizi olmak üzere iki ayrı parametrik çalışma yapılmıştır.

3.2.1 Şekil çalışması

Betonarme döşeme kesiti içinde farklı şekillere sahip plastikler kullanılarak farklı boşluklu döşeme kesitleri oluşturulabilmektedir. Bu farklı kesitlerin yapı siteminde yaptığı değişiklikler ve boşluk oluşturmak için kullanılan kör kalıp elemanın maliyeti uygun kesit seçmek için araştırılması gereken konulardır. Yapı sisteminde yaptığı değişiklikler olarak boşluklu döşeme ile boşluksuz döşeme kesiti arasında birim alanda atalet ve birim alanda beton hacminin değişimi göz önüne alınırken kör kalıp elamanın maliyeti için birim alanda gerekli olan adet sayısı ve plastik, makine, paketleme, kalıp, taşıma, zayiat+kar maliyetleri göz önüne alınmıştır.

3.2.1.1 Parametrelerin tanıtımı

Boşluklu döşeme için kullanılacak olan plastik elemanın birçok geometriye sahip olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında boşluklu döşeme plastiğinin tabanda iz düşümünün kare, altıgen ve daire olma ihtimalleri üzerinde durulmuştur. İz düşümünde kare elemanında bir kenarı D ile tanımlanırken altıgen elemanda en büyük köşegen ve daire elemanda çap D olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.5). Üst ve alt plak kalınlığı F, gövde genişliği W ve boşluk yükseklikleri H ile tanımlanmıştır. Kesit tabanından tavanına doğru bir miktar eğim planlanarak gerçek duruma en yakın sonuç araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında plak kalınlığı F=8, boşluk yüksekliği H=10,12,14,16,18,20, gövde genişliği W=5,10,15 ve bosluk genişliği D=30,41,52,63,74 değerlerine sahip bütün alternatiflerin birim alanda atalet kaybı ve birim alanda beton hacmi değişikleri incelenmiştir.



Şekil 3.5 : Şekil çalışması boşluk çeşitleri ve kesit parametreleri.

3.2.1.2 Sonuç ve değerlendirme

Kare, altıgen ve daire tabanlı boşlukların tümünde atalet kaybı boşluksuz gövde genişliğinin artmasıyla azalmaktadır. Boşluk yüksekliği bütün alternatif boşluklarda atalet kaybını arttırmaktadır. Birim boydaki atalet kaybı boşluk genişliği arttıkça artıyor ve bu artış miktarı boşluk yüksekliğinin artmasıyla daha da büyümektedir. Bütün alternatif boşlukların dolu kesite göre atalet kaybı aynı olmaktadır. Çünkü Şekil 3.5'de de görüldüğü gibi kesit bazında üç alternatifte benzer ölçülere sahiptir (Şekil A.1, Şekil A.2 ve Şekil A.3).

Birim alandaki beton hacmi beklendiği gibi gövde genişliği ve boşluk yüksekliği arttıkça artmaktadır. Birim alandaki beton hacmi boşluk genişliği ile azalmakta ve bu azalma oranı, boşluk yüksekliği arttıkça artmaktadır. Kare ve altıgen tabana sahip boşluklar birim alanda aynı hacimde beton içermektedir. Ancak daire tabanlı boşluk iki boşluk arası gövde bölgesindeki fazla beton alanından bu değer kare ve altıgen alternatifine göre daha fazla çıkmaktadır (Şekil A.1, Şekil A.2 ve Şekil A.3).

Birim alandaki boşluk adedi boşluk yüksekliğinden etkilenmemekle birlikte gövde genişliği (W) arttıkça azalmaktadır. Boşluk genişliği (D) arttıkça beklendiği gibi birim alandaki adet azalmaktadır. Gövde genişliği (W) arttıkça boşluk genişliği (D) değeri bu değer karşısında çok küçük kaldığı için birim alandaki adet sayısını etkilememeye başlamaktadır. Altıgen ve daire tabanlı boşluk birim alanda daha fazla adede ihtiyaç duyarken kare tabanlı boşluk daha az adetle geçilebilmektedir (Şekil A.1, Şekil A.2 ve Şekil A.3).

Kesit özelliklerinin yanında boşluk için kullanılacak olan plastik elemanın maliyeti de kesit özellikleri kadar önemlidir. Plastik malzeme için 6 ana parametrede maliyetler hesaplanmıştır. Plastik maliyet doğrudan kullanılacak olan plastik malzemesinin maliyetidir. Boşluklu döşeme kör kalıpları özel bir şekli ve kalıbı olduğu için boşluk genişliğine göre değişen makine ve kalıp maliyetleri göz önüne alınmıştır. Kör kalıplar, paketleme ve taşıma yapılarak sahaya teslimi için çıkan maliyetler ve bu sırada verilen zayiat ve kar maliyetleri de hesaba katılmıştır. Bu maliyetler başlangıç olarak tüm boşluk genişliği için 2 mm kalınlığında plastik kör kalıp düşünülerek maliyet hesapları yapılmıştır (Çizelge 3.1). Plastik kalınlıkları boşluk genişliği arttıkça üzerinde çalışma olanağı sağlaması için daha fazla kalınlığa ihtiyaç duymasından dolayı boşluk genişliğine göre optizimize edilen kalınlıklarda maliyetler tekrardan hazırlandı (Çizelge 3.2). Kesit özellikleri bakılarak en uygun kesit kare olarak seçilmiştir. Bu yüzden maliyet analizleri kare bir plastik kör kalıp için 52cm'lik boşluk genişliği için normalize edilerek hesaplanmıştır.

Normalize adet maliyetleri		_	Bos	şluk Geniş	liği	
		30	41	52	63	74
Plastik		0.12	0.19	0.27	0.36	0.47
Makine		0.32	0.33	0.35	0.39	0.42
Paketleme		0.05	0.07	0.09	0.11	0.13
Kalıp		0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Taşıma		0.01	0.03	0.04	0.06	0.08
Zayiat+Kar		0.10	0.16	0.23	0.32	0.42
Toplam Adet Normalize Maliyeti		0.61	0.79	1.00	1.26	1.54
	W5	8.16	4.73	3.08	2.16	1.60
Adet	W10	6.25	3.84	2.60	1.88	1.42
	W15	4.94	3.19	2.23	1.64	1.26
	W5	5.01	3.75	3.08	2.73	2.46
Maliyet/m2	W10	3.84	3.05	2.60	2.37	2.18
	W15	3.03	2.53	2.23	2.07	1.94
	W5	1.63	1.22	1.00	0.89	0.80
Normalize Maliyet/m ²	W10	1.48	1.17	1.00	0.91	0.84
	W15	1.36	1.13	1.00	0.93	0.87

Çizelge 3.1 : Eşit kalınlıklara sahip plastik kör kalıp maliyeti.

Çizelge 3.2 : Optimize edilmiş kalınlıklara sahip plastik kör kalıp maliyeti.

Normaliza adat maliyatlari			Boşluk Genişliği					
Normalize adet manyetteri		30	41	52	63	74		
Plastik		0.09	0.17	0.27	0.40	0.58		
Makine		0.32	0.33	0.35	0.39	0.42		
Paketleme		0.05	0.07	0.09	0.11	0.13		
Kalıp		0.02	0.02	0.02	0.02	0.02		
Taşıma		0.01	0.03	0.04	0.06	0.08		
Zayiat+Kar		0.10	0.16	0.23	0.32	0.42		
Toplam Adet Normalize Maliyeti		0.58	0.77	1.00	1.30	1.65		
	W5	8.16	4.73	3.08	2.16	1.60		
Adet	W10	6.25	3.84	2.60	1.88	1.42		
	W15	4.94	3.19	2.23	1.64	1.26		
	W5	4.76	3.66	3.08	2.81	2.65		
Maliyet/m2	W10	3.65	2.97	2.60	2.44	2.34		
	W15	2.88	2.47	2.23	2.13	2.09		
	W5	1.55	1.19	1.00	0.91	0.86		
Normalize Maliyet/m2	W10	1.40	1.14	1.00	0.94	0.90		
	W15	1.29	1.11	1.00	0.96	0.94		

Sonuç olarak, seçilen alternatif boşluk genişliklerinde genişliğin artmasıyla daha ekonomik çözümler görülmektedir. Ancak gövde genişliğine bağlı olarak gerilme yığılmaları ve kesme kuvveti için kayma alanı düşmesi daha büyük boşluk genişliklerinde problem olmaya başlamaktadır. Betonarme eleman da gerilme yığılmaları için ve kesme kuvveti için gövde kalınlığı boyunca çiroz veya etriye ile

alınan önlemlerle boşluk genişliğinin artması, plastik maliyeti azaltmakla birlikte birim alandaki beton hacmini azaltmasıyla da toplam maliyeti azaltmaktadır. Boşluk genişliği artmasıyla atalet kaybı artmaktadır. Ancak atalet kaybı değişimi çok fazla olmadığı için sınır durumda olmadığı sürece bu azalma maliyeti etkilememektedir.

3.2.2 Kesit analizi çalışması

Boşluklu döşeme kesiti modelinin sonlu elemanlar yönteminde iki boyutlu plak eleman olarak modellenmesinin mümkün olduğu bu bölümde taşıma gücü olarak aynı sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Ancak bu yaklaşım, "boşluklu döşeme kesitinin basınç bloğu yüksekliğinin plak kalınlığını geçmemesi" özel şartını da beraberinde getirmektedir. Farklı beton sınıflarında, farklı boşluklu kesit özelliklerinde ve farklı donatı miktarlarında kesit analizleri yapılarak boşluklu döşeme kesiti tasarımı için ön tasarım aşamasında uygun boşluğun oluşturulması amaçlanmıştır.

3.2.2.1 Parametrelerin tanıtımı

Bu çalışma kapsamında C20, C30, C40 beton sınıfı alternatifleri değerlendirilmiştir. Boşluk kesiti üst ve alt plak kalınlığı F=6,8,10, H=10,13,16,20,24,28, gövde genişliği W=10, 15, 20 ve boşluk genişliği 52cm olarak bütün alternatif kesitler analiz edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir (Şekil 3.6). Kesit alternatiflerine ek olarak yaklaşık olarak minimum donatıya denk gelen 0.002 donatı oranında, maksimum donatıya denk gelen 0.02 donatı oranında ve ara değerler olarak 0.004 ve 0.008 donatı oranlarında alternatif kesit analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak boşluklu kesit gövdesi boyunca etriye ya da çiroz düzenlenerek oluşturulan sarılmış beton olarak gövde modellenmiş ve bütün alternatifler sargılı beton modeline göre değerlendirilmiştir. Kesitler, C20AMİN22F6H10W10 şeklinde isimlendirilmiştir.



Şekil 3.6 : Kesit analiz çalışması boşluklu kesit parametreleri.

Beton sınıfı	F(cm)	H(cm)	W(cm)	Donatı Oranı	Sargılı Olma Durumu
C20	6	10	10	0.002(min)	A(Sargısız)
C30	8	13	15	0.004	B(Sargılı)
C40	10	16	20	0.008	
		20		0.020(maks)	
		24			
		28			

Çizelge 3.3 : Kesit analizi çalışmasının alternatifleri.

3.2.2.2 Xtract programında malzeme tanımları ve analizlerin yapımı

Beton ve çelik malzeme özellikleri TBDY (2018) EK5A'da verilmiştir (Şekil 3.7). Çelik B420C malzemesi için TBDY (2018) Tablo 5A.1'den f_{sy}=420 Mpa, f_{su} =500Mpa, ε_{sv} =0.0021, ε_{sh} =0.008 ve ε_{su} =0.08 olarak alınmıştır. Beton malzemesi dayanım ve elastisite modülü özellikleri de TS500 (2000)'den alınarak Xtract programına girilmiştir (Şekil 3.8). Beton malzemesi için en dış lifteki birim şekildeğiştirme 0.003'e ulaştıktan sonra kesit TS500 (2000)'e göre güç tükenmesi durumuna gelmektedir. Ancak bu çalışmada beton birim şekildeğiştirmesi 0.005'e kadar malzeme özelliğinde görüldüğü şekilde yük taşımaya devam etmektedir. Daha sonra diğer beton liflerinde basınç şekildeğiştirmesi gözlenmekte ve son olarak donatının maksimum 0.08 olan birim şekildeğiştirmeye ulaşmasıyla kesit nihai momente ulaşmaktadır. Boşluklu döşeme kesiti bütün alternatifler için oluşturularak akma ve nihai durum için moment (M), eğrilik (C), basınç bloğu yüksekliği (h) ve son olarak süneklik oranı (Cd) değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra düşey yük durumunda kullanılan yük birleşim katsayıları (1.4G+1.6Q) dikkate alınarak ve yatay yükler için akmaya denk gelen durum dikkate alınarak doğrusal hesap yöntemlerinde kullanılabilecek etkin kesit rijitliği çarpanları da hesaplanmıştır.



Şekil 3.7 : TBDY (2018) beton ve çelik malzeme özellikleri.



Şekil 3.8 : Xtract programı malzeme özellikleri tanımı.

3.2.2.3 Analiz sonuçları ve değerlendirme

Bütün alternatif kesitlerde analizler yapılarak akma ve nihai durum için moment, eğrilik ve basınç bloğu yüksekliğinin basınca çalışan yönde plak kalınlığına oranları, süneklik oranları ve doğrusal hesap için uygun etkin kesit rijitliği çarpanları verilmiştir (EK B). Moment ve eğrilik değerleri farklı kesit özellikleri ile beklendiği şekilde değişmektedir.

TBDY (2018) eğilme için etkin kesit rijitliği çarpanını 0.25 olarak vermiştir. Ancak yönetmelik kesit boyutundan, donatı oranından ve beton sınıfından bağımsız olarak bu değeri verdiği için alternatif kesitlerde ortalama bir kesit yüksekliğinde ortalama donatı oranı ve donatı sınıfında bu değerin yaklaşık olarak 0.25 olduğu gözlemlenmiştir. Donatı oranı bazında bakıldığında minimum donatı oranında 0.12, 0.004 donatı oranında 0.20, 0.008 donatı oranında 0.40 ve maksimum donatı oranında 0.80 etkin kesit rijitliği çarpanı bulunmuştur. Kesit yüksekliği arttıkça bu çarpanın ortalama değerlerin üzerinde olduğu görülmüştür. Beton sınıfına göre etkin kesit rijitliği çarpanı değişimi ihmal edilecek kadar azdır.

Kesit çalışmasında en önemli amaç, boşluklu döşeme kesitinin bazı katsayılar kullanılmış plak eleman olarak modellemek için basınç bloğu yüksekliğinin plak kalınlığını geçmemesi gerektiği koşulunun hangi durumlarda sağlandığını gözlemlemektir. Çalışılan kesitlerde ve beton sınıflarında donatı oranı minimumda ise beton basınç bloğu yüksekliği plak kalınlığını hiçbir zaman geçmemektedir. Ancak donatı oranı arttıkça plak kalınlıklarını geçmeye başlamaktadır. Basınç bloğu yüksekliği, beton sınıfının artmasıyla plak kalınlığı içinde kalmaya başlamaktadır. Beton sınıfına benzer şekilde boşluklu döşeme gövde bölgesine koyulan enine donatılar ile sargılı beton malzemesi kullanılarak oluşturulan kesitlerde beton basınç bloğu yüksekliğinin sargısız beton malzemesi kullanılarak oluşturulan kesitlere göre plak kalınlığı içinde kalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Kesit toplam yüksekliği arttıkça plak kalınlığının da benzer oranda artması gerektiği aksi halde plak kalınlığının basınç bloğu yüksekliği için yetersiz olduğu anlaşılmıştır.

Süneklik oranlarında minimum donatıdan 0.008 donatı oranına doğru arttığı ancak maksimum donatı oranında ciddi oranda düştüğü gözlemlenmiştir. Beton sınıfının artmasıyla bu düşüş azalmakta ve benzer kesitlerde nerdeyse aynı süneklik oranları görülmüştür. Süneklik oranı boşluk yüksekliği ile genelde düşme eğilimindedir. Ancak maksimum donatı oranlarında bu düşüş azalmakta ve bütün boşluk yüksekliklerinde benzer oranlar görülmektedir.

4. PROJE ÖRNEĞİ

Boşluklu döşeme sistemine sahip bir yapının Etabs programında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne uygun biçimde modellenmesi ve değerlendirilmesi için aşağıdaki adımların takibi gereklidir. Aşağıdaki adımların detaylarında birçok farklı yol mevcuttur. Ancak burada yapılan çalışmanın genel adımları özetlenmiştir.

Modelleme:

- 1. Malzeme özelliklerinin tanımlanması (Şekil D.1)
- 2. Kesit özelliklerinin tanımlanması,

-Etkin kesit rijitliği çarpanlarının belirlenmesi (TBDY Tablo 4.2),

-Boşluklu döşeme düzeltme katsayılarının belirlenmesi (2.81 ve 4.1)

a. Çubuk

-Kolon (Şekil 4.8)

-Bağ kirişi (Şekil 4.8)

b. Kabuk

-Perde (Shell-Thin)(Şekil 4.9)

-Boşluksuz Döşeme (Shell-Thin)(Şekil 4.10)

-Boşluklu Döşeme (Shell-Thin)(Şekil 4.12)

- 3. Aks sistemi tanımlanarak projeye uygun yapı elemanlarının üç boyutlu modellenmesi (Şekil 4.14)
- Diyafram davranışı gösterecek olan boşluklu döşeme dâhil bütün döşemeler seçilerek Assign>Shell>Diaphragms sekmesinden yarı-rijit (Semi-rigid) diyafram atamasının yapılması (Şekil D.2)
- 5. Yükleme biçimlerinin Define>Load Pattern sekmesinden tanımlanması ve atanması (Şekil D.3)

- Modal analizde gerekli ola kütle kaynağı Define>Mass Source sekmesinden G+nQ olacak şekilde tanımlanması (Şekil D.4)
- Define>Modal Case sekmesinden modal analiz yük durumunun oluşturulması (Şekil D.5)
- Tasarım depremi olan DD2 deprem yer hareketi düzeyine ait katsayıların tayini (https://tdth.afad.gov.tr/)
- 9. Yatay elastik tasarım spektrumunun oluşturulması (TBDY Şekil 2.1)
- Bina Kullanım Sınıfı (Çizelge 4.2), Deprem Tasarım Sınıfı(Çizelge 4.3), Bina Yükseklik Sınıfı (Çizelge 4.4) ve bina performans hedefine göre değerlendirme ve tasarım yönteminin belirlenmesi (Çizelge 4.5)
- TBDY Bölüm 4'e göre Yapı Davranış Katsayısı (R), Dayanım Fazlalılığı Katsayısı (D), Deprem Azaltma Katsayısı (R_a(T)) ve Azaltılmış tasarım spektrumunun belirlenmesi ve modele girilmesi (Şekil D.6)
- 12. Dinamik analize ait yük durumlarının oluşturulması (Şekil D.7)
- 13. Statik analize ait yük biçimlerinin tanımlanması (Şekil D.8)
- 14. Yük birleşimlerinin girilmesi (Şekil D.9)

Değerlendirme ve Tasarım:

- 1. Boyutların ön kontrolleri ve Zımbalama ön hesabı (Bölüm 4.2)
- Doğrusal yöntemi olarak dinamik analiz yönteminin seçilmesi ve modal analizde yeterli mod sayısının dikkate alınması (Çizelge 4.9)
- 3. TBDY yapıların deprem hesabında göz önüne alınacak maksimum periyot sınırının hesaplanması ve statik analizde dikkate alınması (Çizelge 4.10)
- Mod birleştirme yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz taban kesme kuvvetinin statik analizden hesaplanan taban kesme kuvvetiyle kıyaslanması ve gerekli durumda dinamik analize büyütme katsayısı uygulanması (Çizelge 4.11)
- 5. Göreli kat ötelemelerinin kontrolü (Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15)
- 6. İkinci mertebe gösterge değerinin hesabı (Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.17)

- Eğilme tasarımı: TS500'e uygun minimum donatı alt ve üst donatı olarak seçilir. Sünek tasarıma esas iç kuvvetleri içeren yük birleşimlerine göre çıkan moment değerleri seçilen donatının kapasitesinden büyük olan yerler belirlenerek uygun eğilme donatıları eklenir (Bölüm 4.6.1).
- Kesme tasarımı: boşluklu ve boşluksuz döşeme kesitine göre ayrı olarak hesaplanan beton kesme dayanımına göre programda dayanım fazlalılığı katsayısı ile çarpılmış yük birleşimlerinde filtreleme yapılarak gerekli yerlere kesme donatısı eklenir (Bölüm 4.6.2).
- 9. TBDY döşeme tasarımında özel şartlar
 - <u>Düzlem içi kuvvet kontrolleri:</u> gerilme sınır değerleri etkili döşeme yüksekliği ile çarpılarak D ile arttırılmış tasarım kuvvetlerini içeren yük birleşimleriyle karşılaştırılır (Bölüm 4.6.3.1).

Çekme Sınır Durumu:

 f_{ctd} > \rightarrow OK \checkmark

 $f_{ctd} < \textbf{\rightarrow} \rho f_{yd} \textbf{>} \textbf{\rightarrow} OK \checkmark$

Basınç Sınır Durumu:

 $0.85 f_{cd} > \rightarrow OK \checkmark$

Kayma Sınır Durumu:

 $0.65f_{ctd} + \rho f_{yd} > \rightarrow OK \checkmark$ $0.65(f_{ck})^{0.5} > \rightarrow OK \checkmark$

 b. <u>Deprem yükünün döşemelerden perdeye aktarımının kontrolü:</u> döşemeye gelen D ile arttırılmış tasarım kesme kuvvetlerinin aktarılabilmesi için gerekli olan A_{sb} bağlantı donatısının hesabının yapılması ve gerekli eğilme donatısıyla toplamının koyulan donatıdan

küçük olmasının kontrolüdür (Bölüm 4.6.3.2).

c. <u>Zımbalama kontrolü:</u> yönetmelikte verilen gerilme sınır değerinin etkili döşeme yüksekliği ile çarpılarak bulunan sınır kuvvet değerlerinin D ile arttırılmış düşey kayma kuvveti olan v13 ve v23 kuvvetlerinden büyük olduğunun gösterilmesidir (Bölüm 4.6.3.3).

$$\begin{aligned} f_{ctd} > \tau_{pd} & \rightarrow OK \checkmark \\ f_{ctd} < \tau_{pd} & \rightarrow \tau_{pr} = 0.5 f_{ctd} + \rho f_{yd} < 1.5 f_{ctd} \text{ (Çiroz, Sehpa)} \\ \tau_{pr} = 0.75 f_{ctd} + \rho f_{yd} < 1.75 f_{ctd} \text{ (Kayma Kaması)} \\ \rho f_{yd} > f_{ctd} \text{ ve } \tau_{pr} > \tau_{pd} & \rightarrow OK \checkmark \end{aligned}$$

4.1 Genel Bina Bilgileri

Boşluklu döşeme sistemine sahip proje örneği İstanbul İli, Bakırköy İlçesi'nde yer almaktadır (Şekil 4.1). Bina 4.65m yüksekliğinde giriş katı, 3.7m yüksekliğinde 14 normal kat ve 4.2m yüksekliğinde çatı katı ile toplam 16 kattan oluşmaktadır (Şekil 4.3). Bina ofis olarak kullanılacaktır. Ortogonal aks sistemine sahip olan bina da X-X doğrultusunda 6.1m ile 8.8m arasında farklı açıklıklara sahip 5 aks, Y-Y doğrultusunda 7.9m ile 8.9m arasında farklı açıklıklara sahip 4 aks bulunmaktadır (Şekil 4.2). Yapının taşıyıcı sistemi süneklik düzeyi yüksek perdeler ile boşluklu kirişsiz döşemelerden oluşturulmuştur. Birçok perde bir araya getirilerek iki ana perde sistemi kurulmuş ve aralarında bağ kirişleri düzenlenerek çekirdek perde oluşturulmuştur.



Şekil 4.1 : Proje örneği lokasyonu

Beton malzemesi olarak C50 ve çelik malzemesi olarak B420C kullanılacaktır. Proje örneği için tüm bina modellemesi yapılacak ancak boşluklu döşeme sistemi üzerine yoğunlaşarak ön boyutlandırma ve kesin hesaplar döşeme sistemi için yapılacaktır. Diğer taşıyıcı sistem ön boyutlandırılması ve değerlendirilmesi yapılmayacaktır. Kaplama yükü olarak 3 kN/m² hareketli yük olarak ofislerde 2 kN/m² koridor yani çekirdek bölgesinin iç kısmında 5 kN/m² ve cephe yükleri olarak 8 kN/m yük alınmıştır.



Şekil 4.2 : Tipik kat kalıp planı.

(DOW FLOOD DOUD IZOLASYON 1	SER YANIJ MEVIL BE PE F DRENAI IE GEOTEKTIL KEÇE 2000 XPS & CM 50	IAMIK TTRICI					
	BETONARME DO		1 1				ÇATI KAT +77.25
B59 OFIS R			YJMERD.	DUA ODASI 858 OFIS +73.20	Я	8	15. KAT
ANLION B55 ORS R				DUA ODASI B55 OFIS +69-50	8		14. KAT
ANLION BS2 OFFS RED DUA COASI				DUA ODASI B51 OFIS +65.80	9	E.	13. KAT
ANLION BAS OFS				DUA ODASI B47 OFIS +62.10	8	Ē	12. KAT
ANLION BHI ORS	 Г., У.MERD.			DUA ODASI B43 OFIS +58.40	8	R	11. KAT +58.25
ANLION BAD OFS				DUA ODASI B39 OFIS +54.70	Э	R	10. KAT +54.55
ANLION B36 ORS	ц			DUA ODASI B35 OFIS +51.00	E	E	9. KAT +50.85
ANLION B32 ORS R DUA ODAS				DUA ODASI B31 OFIS +47.30	E	ß	8. KAT +47.15
ANLION B28 ORS				DUA ODASI B27 OFIS +43.60	E	ß	7. KAT +43.45
ANLION B24 OFS				DUA ODASI 823 OFIS +39,90	E	E.	6. KAT +39.75
				DUA ODASI B19 OFIS +36.20	A	E.	5. KAT +36.05
				DUA ODASI B15 OFIS +32.50	Д	Ē	4. KAT +32.35
ANLION BIZ OFS 55 DUA ODAS				DUA ODASI B11 OFIS +28.80	Д	Ē	3. KAT +28.65
ANLION BOB ORS				DUA ODASI 807 OFIS +25.10		MEMORETER STREET PANNIG R MENCULAR MAINS al LILDIAM TOLUM TOLUM TOLUM TOLUM	2. KAT +24.95
ANLION BOA OFS				DUA ODASI BO3 OFIS +21.40	Fam Dolgo Famura linking (Con) Genetical (Kep 200 gr/m ² - V75 8 CA 500 IPA - V75	Lun Dolgi. Econan Techau (Soni) Geoldesii Rep: 200 g/m ² J75 B CM 500 IEFA J75 B CM 500 IEFA J75 CM 500 IEFA J75 CM 500 IEFA J75 CM 500 IEFA J75 CM 500 J75 J75 J75 J75 J75 J75 J75 J75 J75 J75	1. KAT +21.25
	YMERD.	ASAN. HOLŪ	···	HOL B61 MAĞAZA +17.10			ZEMÍN KAT

Şekil 4.3 : Proje örneği kesiti.

Tasarımı yapılacak proje örneğine ait DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyi'nde Yatay Elastik Spektrum'un elde edilmesi için kısa periyot ve 1 saniye periyot için harita spektral ivme katsayıları gereklidir. Bu değerler https://tdth.afad.gov.tr/ adresinden $S_s=1.102$ $S_1=0.303$ olarak alınmıştır. Proje öreğinin yerel zemin sınıf ZC olarak belirlenmiştir. Bu yerel zemin sınıfına ve harita spektral ivme katsayılarına uygun $F_s=1.2$ ve $F_1=1.5$ olarak TBDY (2018) Tablo 2.1'den bulunmuştur. Daha sonra tasarım spektral ivme katsayıları olan $S_{DS}=1.322$ ve $S_{D1}=0.455$ olarak bulunmuştur. Köşe periyotları olan $T_A=0.069$ ve $T_B=0.344$ bulunduktan sonra TBDY (2018)'de belirtilen şekilde yatay elastik tasarım spektrumu elde edilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 : DD-2 deprem düzeyi yatay elastik tasarım spektrumu.

Düşey elastik tasarım spektrumu oluşturulmayacaktır. Çünkü proje örneği TBDY (2018) Bölüm 4.4.3.1 'de belirtilen bina sınıflarına girmediği için Bölüm 4.4.3.2'de verilen yaklaşık hesap olan denklem ile düşey deprem etkisi hesaba katılacaktır.

4.2 Kirişsiz Döşeme Sisteminde Ön Boyutlandırma ve Zımbalama Ön Tasarımı

4.2.1 Ön boyutlandırma

Kirişsiz döşemelerin kalınlıkları için TBDY (2018) Bölüm 7.11.2'de TS500 (2000)'de verilen sınırların geçerli olduğu belirtilmektedir. TS500 (2000) Bölüm 11.4.2'de tablasız kirişsiz döşeme kalınlığı için $h \ge l_n/30$ ve $h \ge 180$ mm sınırları verilmiştir. Proje örneğinde maksimum açıklık 8900 mm olduğu düşünülerek h=30cm seçilmiştir. Boşluklu döşeme kesiti de Şekil 4.5'de verildiği gibi öngörülmüştür.





4.2.2 Zımbalama ön hesabı

Kirişsiz döşeme sisteminin TS500 (2000) Bölüm 8.3'e göre zımbalama ön hesabı yapılacaktır. 1.4G+1.6Q yük birleşimine göre bulunan eksenel yükler N₁ ve N₂ ve plak yüklerinin ifadesi F_a belirlenerek V_{pd}= N₂-N₁-F_a bulunmuştur. Daha sonra C50 beton malzemesi için f_{ctd}=1.65 Mpa ve düşey yüklerin eğilme etkisi ihmal edilerek γ =1 alınmıştır. Son olarak, bu değerler kullanılarak V_{pr}= $\gamma f_{ctd}u_pd$ hesaplanmış ve seçilen kesit, zımbalama donatısız sadece beton dayanımı ile zımbalama etkilerini karşılayacağı görülmüştür (Çizelge 4.1).

KOLON	N_2	N ₁	b+d/2	h+d/2	Fa	V_{pd}	V_{pr}	V <v< td=""></v<>
ROLON	[kN]	[kN]	m	m	[kN]	[kN]	[kN]	V pd ⊃ V pr
70x70	4224	3856	0.8375	0.8375	5	363	760	\checkmark
105x70	4742	4281	1.1875	0.8375	7	454	919	\checkmark
140x70	7175	6658	1.5375	0.8375	9	508	1078	\checkmark

Çizelge 4.1 : Kirişsiz döşeme zımbalama kontrolü.

4.3 Deprem Etkisi Altında Tasarım İçin Genel Esaslar

Proje örneği Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) Bölüm 3'e göre tasarım için gerekli olan genel esasları belirlemek için kullanılacaktır. Proje örneğinin TBDY (2018)'e göre hangi özelliklere sahip olduğu ve tasarım ve değerlendirmelerin hangi yöntemle yapılacağını belirlemek için önemli bir bölümdür.

4.3.1 Bina kullanım sınıfı

Proje örneği kullanım amacı ofis olduğundan dolayı bina kullanım sınıfı (BKS) 3 olarak bulunmuş ve bu örnek için bina önem katsayısı (I)'nın 1 olarak alınması uygun görülmüştür. (Çizelge 4.2).

Bina Kullanım Sınıfı	Binanın Kullanım Amacı	Bina Önem Katsayısı (I)
BKS = 1	 Deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar, değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içeren binalar a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminalleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri, vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları) b) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kışlalar, cezaevleri, vb. c) Müzeler d) Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar 	1.5
BKS = 2	İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar Alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler, vb.	1.2
BKS = 3	Diğer binalar BKS=1 ve BKS=2 için verilen tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb.)	1.0

Çizelge 4.2 : TBDY (2018) bina kullanım sınıfı.

4.3.2 Deprem tasarım sınıfı

Proje örneğinin DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyi'nde kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı S_{DS} =1.322 ve 1 saniye periyot için tasarım ivme katsayısı S_{D1} =0.455 olduğundan TBDY (2018) Tablo 3.2'den BKS=3 için deprem tasarım sınıfı DTS=1 olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.3).

DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa	Bina Kullanım Sınıfı		
Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	BKS = 1	BKS = 2, 3	
<i>S</i> _{DS} < 0.33	DTS = 4a	DTS = 4	
$0.33 \le S_{\rm DS} < 0.50$	DTS = 3a	DTS = 3	
$0.50 \le S_{\rm DS} \le 0.75$	DTS = 2a	DTS = 2	
$0.75 \le S_{ m DS}$	DTS = 1a	DTS = 1	

Çizelge 4.3 : TBDY (2018) deprem tasarım sınıfı.

4.3.3 Bina yüksekliği ve bina yükseklik sınırları

Bina yüksekliğini belirlemek için önemli olan bina tabanının belirlenmesi gereklidir. Bodrum kat mevcut olan yapılarda temel seviyesi ya da zemin kat seviyesi TBDY (2018) Bölüm 3.3.1'e göre bina tabanı olarak tanımlanabilir. Proje örneğinde bodrum kat mevcut olmadığından bina yüksekliği 60.65 m olarak belirlenmiştir. TBDY (2018) Tablo 3.3'de proje örneğinin yüksekliği için bina yükseklik sınıfını (BYS) 2 olarak tanımlamıştır (Çizelge 4.3).

Bina	Bina Yükseklik Sınıfları ve Deprem Tasarım Sınıflarına Göre Tanımlanan Bina Yükseklik Aralıkları [m]				
Yukseklik Sinifi	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS = 3, 3a	DTS = 4, 4a		
BYS = 1	$H_{ m N}>70$	$H_{\rm N} > 91$	$H_{\rm N} > 105$		
BYS = 2	$56 < H_{ m N} \le 70$	$70 < H_{\rm N} \leq 91$	$91 < H_{\rm N} \le 105$		
BYS = 3	$42 < H_{\rm N} \le 56$	$56 < H_{ m N} \le 70$	$56 < H_{ m N} \le 91$		
BYS = 4	$28 < H_{ m N} \leq 42$	$42 < H_{\rm N} \le 56$			
BYS = 5	$17.5 < H_{ m N} \le 28$	$28 < H_{\rm N} \le 42$			
BYS = 6	$10.5 < H_{ m N} \le 17.5$	$17.5 < H_{ m N} \le 28$			
BYS = 7	$7 < H_{\rm N} \leq 10.5$	10.5 < H	I _N ≤17.5		
BYS = 8	$H_{ m N} \leq 7$	$H_{ m N} \leq 10.5$			

Çizelge 4.4 : TBDY (2018) bina yükseklik sınıfları.

4.3.4 Bina performans hedefi

Proje örneğinin DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyi için TBDY (2018) Tablo 3.4(a)'da dayanıma göre değerlendirme ve tasarım yaklaşımı Bölüm 4 koşulları sağlaması durumunda performans hedefi olan kontrollü hasar'ın sağlanacağını belirtmektedir (Çizelge 4.5).

Deprem	$DTS = 1, 1a^{(1)}, 2$	2, 2a ⁽¹⁾ , 3, 3a, 4, 4a	$DTS = 1a^{(2)}, 2a^{(2)})$		
Yer H. Düzeyi	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	
DD-3	_	_	SH	ŞGDT	
DD-2	KH	DGT ⁽⁵⁾	KH	DGT ^(3,4)	
DD-1		_	KH	ŞGDT	

Çizelge 4.5 : TBDY (2018) bina performans hedefi.

4.4 Deprem Etkisi Altında Binanın Dayanıma Göre Hesabı ve Tasarımı

4.4.1 R, D, R_a(T), S_{aR}(T) katsayılarının belirlenmesi

Tasarım için gerekli olan taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) ve dayanım fazlalığı katsayısı (D) TBDY (2018) Tablo 4.1'den R=6 ve D=2.5 seçilmiştir (Çizelge 4.6). Taşıyıcı sistem olarak boşluklu perde sistemlerde R=7 alınabilmektedir. Ancak boşluklu döşemelere yoğunlaşmak amacıyla ek şartlara tabi olan boşluklu perde taşıyıcı sistemi değil de boşluksuz perde taşıyıcı sistemi gibi R=6 seçilmiştir.

Çizelge 4.6 : TBDY (2018) bina taşıyıcı sistemleri için taşıyıcı sistem davran	nış
katsayısı, dayanım fazlalığı katsayısı ve izin verilen bina yükseklik sınıfları.	

Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı <i>R</i>	Dayanım Fazlalığı Katsayısı D	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları BYS
A. YERİNDE DÖKME BETONARME BİNA TAŞIYICI SİSTEM	LERİ		
A1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler			
A11. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçevelerle karşılandığı binalar	8	3	$BYS \ge 3$
A12. Deprem etkilerinin tamamının <i>süneklik düzeyi yüksek</i> bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdelerle karşılandığı binalar	7	2.5	$BYS \geq 2$
A13. Deprem etkilerinin tamamının <i>süneklik düzeyi yüksek</i> boşluksuz betonarme perdelerle karşılandığı binalar	6	2.5	$BYS \geq 2$
A14. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>süneklik düzeyi yüksek</i> betonarme çerçeveler ile <i>süneklik düzeyi yüksek</i> bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.4.3.4.5)	8	2.5	BYS≥2
A15. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>süneklik düzeyi yüksek</i> betonarme çerçeveler ile <i>süneklik düzeyi yüksek</i> boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.4.3.4.5)	7	2.5	BYS ≥ 2
A16. Deprem etkilerinin tamamının çatı düzeyindeki bağlantıları mafsallı olan ve yüksekliği 12 m'yi geçmeyen <i>süneklik düzeyi yüksek</i> betonarme kolonlar tarafından karşılandığı tek katlı binalar	3	2	-

Taşıyıcı sistem davranış katsayısı süneklik ile bağlantılı bir kavramdır. Ancak düşük periyotlarda bir hareketin süneklik düzeyi düşük olduğundan TBDY (2018) deprem azaltma katsayısı olarak T_B köşe periyodundan düşük periyotlarda daha düşük bir azaltma uygularken daha büyük periyotlarda daha büyük bir azaltma uygulayarak Bölüm 4.2.1.2'deki denklemler ile tanımlamıştır (Şekil 4.6). Deprem yükü azaltma katsayısı bulunduktan sonra daha önce belirlenen yatay elastik ivme spektrumu bu katsayılara bölünerek azaltılmış tasarım ivme spektrumu elde edilir (Şekil 4.7).









4.4.2 Kirişsiz döşemelerin hesabına ilişkin özel koşul

Kirişsiz döşemelerde TBDY (2018) Bölüm 4.3.4.4'e göre özel bir koşul olarak deprem yüklerinin tamamının süneklik düzeyi yüksek bağ kirişli (boşluklu) ve/veya boşluksuz perdeler tarafından karşılanan sistemlerde hesap iki aşamalı olarak yapılacaktır. Birinci aşama hesapta çerçeve kolonları alttan ve üstten mafsallı alınacaktır. İkinci aşama hesapta ise bu elemanların bağlantıları monolitik olarak modellenecektir. Perde kolon ve döşemelerdeki iç kuvvetler, iki aşamadan elde edilenlerin elverişsiz olanı olarak hesaplanacaktır. Göreli kat ötelemeleri ikinci aşama hesaptan elde edilecektir.

4.4.3 Doğrusal hesap için taşıyıcı sistem modellenmesi

TBDY (2018) Bölüm 4.5.1'e göre bina taşıyıcı sistemleri daima üç boyutlu olarak modellenecektir ve birbirine dik iki yatay doğrultudaki deprem etkisi daima göz önüne alınacaktır. Sönüm oranı %5 alınmıştır. Kolon ve bağ kirişleri çubuk sonlu elamanı olarak, perde ve döşemelerde kabuk sonlu elemanları olarak modellenecektir. Doğrusal hesap için TBDY (2018) Bölüm 4.5.8.1'e göre dayanıma göre tasarım (DGT) kapsamında betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının kesit özelliklerinin modellenmesinde Tablo 4.2'de verilen etkin kesit rijitliği çarpanları kullanılacaktır (Çizelge 4.7).

Betonarme Taşıyıcı Sistem Elemanı	Etkin Kesit Rijitliği Çarpanı		
Perde – Döşeme (Düzlem İçi)	Eksenel	Kayma	
Perde	0.50	0.50	
Bodrum perdesi	0.80	0.50	
Döşeme	0.25	0.25	
Perde – Döşeme (Düzlem Dışı)	Eğilme	Kesme	
Perde	0.25	1.00	
Bodrum perdesi	0.50	1.00	
Döşeme	0.25	1.00	
Çubuk eleman	Eğilme	Kesme	
Bağ kirişi	0.15	1.00	
Çerçeve kirişi	0.35	1.00	
Çerçeve kolonu	0.70	1.00	
Perde (esdeğer cubuk)	0.50	0.50	

Çizelge 4.7 : TBDY (2018) betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının etkin kesit rijitliği çarpanları.

ETABS programında çatlamış kesit rijitliği çarpanları bağ kirişi ve kolon için sadece eğilme altında çarpan uygulanacağından 0.15 ve 0.70 değerleri programda 1 ve 2 ekseni etrafında eğilme rijitlik katsayılarını bu değerlerle değiştirerek dikkate alınmaktadır (Şekil 4.8). Perde elemanlarda ise yerel eksenlere bakılarak uygun eksenel, kayma, eğilme ve kesme çarpanları uygulanmalıdır. Perde yerel aksları incelendiğinde 2 yönünün (yeşil) eksenel çalışma yönü olduğu ve 1 yönünün (kırmızı) kesme kuvveti yönü olduğu anlaşılmıştır (Şekil 4.9). Döşeme elemanında boşluk yoksa benzer şekilde yerel akslarına bakılarak uygun çarpanlarla çatlamış kesit özelliği dikkate alınmıştır (Şekil 4.10). Boşluklu döşeme kesitlerinde ise etkin kesit rijitliğinin yanında atalet, eksenel alan, kayma alanı ve hacim değişikliklerini bu tez kapsamında bölüm 2.3.2'de belirtildiği şekilde düzenlenecektir.

roperty/Stiffness Modification Factors	X Property/Stiffness Modification Factors	
Property/Stiffness Modifiers for Analysis	Property/Stiffness Modifiers for Analysis	
Cross-section (axial) Area	Cross-section (axial) Area 1	
Shear Area in 2 direction 1	Shear Area in 2 direction 1	
Shear Area in 3 direction 1	Shear Area in 3 direction 1	
Torsional Constant	Torsional Constant 1	
Moment of Inertia about 2 axis 0.15	Moment of Inertia about 2 axis 0	7
Moment of Inertia about 3 axis 0.15	Moment of Inertia about 3 axis 0	7
Mass 1	Mass 1	
Weight 1	Weight 1	
i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	Trega	
OK Cancel	OK Can	el

Şekil 4.8 : Bağ kirişleri ve kolonların etkin kesit rijitliği çarpanlarının ETABS'de dikkate alınması.

Property/Stiffness Modifiers for Analysis Membrane f11 Direction 1 Membrane f12 Direction 0.5 Membrane f12 Direction 0.5 Bending m11 Direction 0.25 Bending m12 Direction 0.25 Bending m12 Direction 0.25 Shear v13 Direction 1 Shear v23 Direction 1 Mass 1 Weight 1		Property/Stiffness Modification Factors	×
Membrane f11 Direction 1 Membrane f22 Direction 0.5 Membrane f12 Direction 0.5 Bending m11 Direction 0.25 Bending m22 Direction 0.25 Bending m12 Direction 0.25 Bending m12 Direction 0.25 Bending m12 Direction 1 Shear v13 Direction 1 Shear v23 Direction 1 Mass 1 Weight 1	\times	Property/Stiffness Modifiers for Analysis	
Membrane f22 Direction 0.5 Membrane f12 Direction 0.5 Bending m11 Direction 0.25 Bending m22 Direction 0.25 Bending m12 Direction 0.25 Bending m12 Direction 0.25 Shear v13 Direction 1 Shear v23 Direction 1 Mass 1 Weight 1		Membrane f11 Direction	1
Membrane f12 Direction 0.5 Bending m11 Direction 0.25 Bending m22 Direction 0.25 Bending m12 Direction 0.25 Shear v13 Direction 1 Shear v23 Direction 1 Mass 1 Weight 1		Membrane f22 Direction	0.5
Bending m11 Direction 0.25 Bending m22 Direction 0.25 Bending m12 Direction 0.25 Shear v13 Direction 1 Shear v23 Direction 1 Mass 1 Weight 1	< $>$	Membrane f12 Direction	0.5
Bending m22 Direction 0.25 Bending m12 Direction 0.25 Shear v13 Direction 1 Shear v23 Direction 1 Mass 1 Weight 1	\sim	Bending m11 Direction	0.25
Bending m12 Direction 0.25 Shear v13 Direction 1 Shear v23 Direction 1 Mass 1 Weight 1		Bending m22 Direction	0.25
Shear v13 Direction 1 Shear v23 Direction 1 Mass 1 Weight 1		Bending m12 Direction	0.25
Shear v23 Direction 1 Mass 1 Weight 1		Shear v13 Direction	1
Mass 1		Shear v23 Direction	1
Weight 1		Mass	1
		Weight	1
		OK	Cancel
		ОК	Cancel

Şekil 4.9 : Perdelerin etkin kesit rijitliği çarpanlarının ETABS'de dikkate alınması.

Property/Stiffness Modifiers for Analys	sis
Membrane f11 Direction	0.25
Membrane f22 Direction	0.25
Membrane f12 Direction	0.25
Bending m11 Direction	0.25
Bending m22 Direction	0.25
Bending m12 Direction	0.25
Shear v13 Direction	1
Shear v23 Direction	1
Mass	1
Weight	1
OK	Canaal

Şekil 4.10 : Boşluksuz döşemelerin etkin kesit rijitliği çarpanlarının ETABS'de dikkate alınması.

Boşluklu kesit denklem 4.1'de verildiği şekilde proje örneğine uygun biçimde hesaplanmıştır. Burada asıl amaç daha önce de anlatıldığı gibi iki boyutlu plak elemanın özellikleri boşluklu döşeme kesit özellikleri değiştirilerek modelleme yapmaktır.

$$\begin{cases} I_{boglukkuz} = \frac{1}{12} 67 x 30^{3} \\ = 15750 cm^{4} \\ I_{boglukkuz,1/m} = \frac{1}{12} 30^{3} \\ = 2250 cm^{4} / cm \\ A_{boglukkuz,1/m} = 30 x 67 / 67 \\ = 30 cm^{2} / cm \\ \eta_{boglukkuz,1/m} = 30 x 67 / 67 \\ = 30 cm^{2} / cm \\ \eta_{boglukkuz,1/m} = 2010 / \eta \\ = 1675 cm^{2} \\ V_{boglukkuz,1/m} = 67^{2} x 30 \\ = 134670 cm^{3} \\ V_{boglukkuz,1/m} = 67^{2} x 30 / 67^{2} \\ = 30 cm^{3} / cm^{2} \end{cases}$$

$$k I_{1/m} = 1985.09 / 2250 = 0.8823 \\ k A_{1/m} = 17.58 / 30 = 0.586 \\ k G_{1/m} = 475 / 1675 = 0.2836 \\ k V_{1/m} = 20.36 / 30 = 0.6787 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{boglukku,1/m} = \frac{1}{12} 67 x 30^{3} - \frac{1}{12} 52 x 16^{3} \\ I_{boglukku,1/m} = (\frac{1}{12} 67 x 30^{3} - \frac{1}{12} 52 x 16^{3}) / 67 \\ = 133000.67 cm^{4} \\ I_{boglukku,1/m} = \left(\frac{1}{12} 67 x 30^{3} - \frac{1}{12} 52 x 16^{3} \right) / 67 \\ = 1985.09 cm^{4} / cm \\ A_{boglukku,1/m} = (67 x (7 + 7) + 16 x 15) / 67 \\ = 17.58 cm^{2} / cm \\ \eta_{boglukku,1/m} = 1178 / 2.48 = 475 cm^{2} \\ V_{boglukku} = 67^{2} x 30 - 52^{2} x 16 = 91406 cm^{3} \\ V_{boglukku,1/m} = 17.58 / 30 = 0.586 \\ k G_{1/m} = 475 / 1675 = 0.2836 \\ k V_{1/m} = 20.36 / 30 = 0.6787 \end{cases}$$

$$(4.1)$$

ETABS'de boşluksuz döşeme kesitinden boşluklu döşemeye geçiş aşamasında eksenel rijitliklerini değiştiren alan, eğilme rijitliklerini değiştiren atalet momenti ve kesme rijitliklerini değiştiren etkili kesme alanı değişimi hesaplanan katsayılar ile dikkate alınacaktır. Boşluksuz kesit, boşluklu kesit ve eşdeğer kesit adında üç aşamalı tanım yapılmıştır (Şekil 4.11). Burada boşluksuz kesit, ön tasarım aşamasında elde edilen plak kalınlığında tanımlanan kesittir. Boşluklu kesit, inşaat aşamasında yapılması planlanan kesittir. Eşdeğer kesit matematiksel modelde boşluklu kesit özelliklerine sahip plak eleman kesiti olarak düşünülebilir.


Şekil 4.11 : Boşluksuz, boşluklu ve eşdeğer kesit.

Matematiksel model olarak boşluklu döşeme kesitinin alanına, atalet momentine, kayma alanına ve hacmine aynı zamanda denk gelebilecek bir plak kalınlı d* seçilemeyeceği aşikârdır. Bu sebeple ön tasarımda hesaplanan plak kalınlığı ile bir kabuk elaman modellenerek boşluk bulunan bölgeler hesaplanan kA_{1/m}, kI_{1/m}, kG_{1/m} ve $kV_{1/m}$ değerleri uygun rijitlik katsayıları çarpanları olarak yazılırlar. Alan ile doğrudan ilişkili olan rijitlik katsayıları f₁₁, f₂₂ ve f₁₂ değerleri, eşdeğer plak alanına dönüştürmek için hesaplanan kA_{1/m} ile çarpılır. Atalet momenti ile doğrudan ilişkili olan rijitlik katsayıları geğerleri, eşdeğer plak alanına dönüştürmek için hesaplanan kA_{1/m} ile çarpılır. Atalet momenti ile doğrudan ilişkili olan kesme rijitliği katsayıları v₁₃ ve v₂₃ değerleri, eşdeğer plak kayma alanı ile doğrudan ilişkili olan kesme rijitliği katsayıları v₁₃ ve v₂₃ değerleri, eşdeğer plak kayma alanına dönüştürmek için kG_{1/m} ile çarpılır. Son olarak kütle ve ağırlık katsayıları hesaplanan kV_{1/m} ile çarpılır. Bu düzeltmelere ek olarak TBDY (2018) etkin kesit rijitliği çarpanları da kullanılarak matematiksel model tamamlanır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : Boşluklu döşemelerin etkin kesit rijitliği çarpanlarının ETABS'de dikkate alınması.

Proje örneğine ait kesitler etkin kesit rijitliği çarpanları ile oluşturulduktan sonra 30 cm kalınlığında boşluksuz döşeme kesitleri (sarı), toplam 30 cm kalınlığında boşluklu döşeme kesitleri (yeşil) ve çekirdek bölgesi içinde 15cm kalınlığında plak döşeme kesitleri (mavi) ETABS programında ayrı ayrı kabuk eleman olarak modellenmiştir (Şekil 4.13). Proje örneğinin 3 boyutlu matematiksel modelin görünümü Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.13 : Proje örneği ETABS plan görünüşü.



Şekil 4.14 : Proje örneğinin üç boyutlu hesap modeli.

4.4.4 Doğrusal hesap yönteminin seçilmesi

TBDY (2018) Bölüm 4.6.2.1'e göre dayanıma göre tasarıma tabi olan bütün binalarda modal hesap yöntemleriyle yani mod birleştirme veya mod toplama yöntemlerinden herhangi biriyle çözülebilmektedir. TBDY (2018) Tablo 4.4'deki özel şartların sağlanması durumunda eşdeğer deprem yükü yöntemiyle doğrusal hesap yapılabilmektedir. Ancak proje örneği BYS=2 olduğundan dolayı mod birleştirme yöntemiyle çözüm yapılacaktır.

4.4.5 Mod birleştirme yöntemiyle doğrusal deprem hesabı

Mod birleştirme hesabı TBDY (2018) EK 4B'de ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Ancak ETABS programında modal analiz için modelin kurulması ve depremli durumda yük kaynağı (mass source) dikkatlice tanımlanması yeterlidir. Çünkü yapı periyodunu etkileyen iki büyük parametre vardır. Bunlar kütle ve rijitliktir. Modelin kurulması esnasında yapı rijitliğini oluşturulmuş olur. Ancak verilen bütün yükler deprem durumunda var olmayacağından ve deprem hesabı için kütle önemli bir parametre olduğundan TBDY (2018) Bölüm 4.5.9'da kütlelerin modellenmesini tanımlamıştır. Proje örneğinde var olan yüklemelerde zati, kaplama ve cephe yükleri doğrudan alınırken hareketli yük, n (hareketli yük kütle katılım katsayısı) ile azaltılır. Proje örneğinde n=0.3 olarak TBDY (2018) Tablo 4.3'den alınmış ve deprem durumunda dikkate alınması gereken kütle hesabı yapılmıştır (Çizelge 4.8). Projeye ait modal analiz hesabından elde edilen periyot ve kütle katılım oranları Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Kat	Kat Ağırlıkları	Kat Kütleleri	Kat	Kat Ağırlıkları	Kat Kütleleri
	w _i (kN)	m _i (t)		w _i (kN)	m _i (t)
Çatı Kat	12061	1229	Kat7	12327	1257
Kat14	12299	1254	Kat6	12327	1257
Kat13	12327	1257	Kat5	12470	1271
Kat12	12327	1257	Kat4	12614	1286
Kat11	12327	1257	Kat3	12614	1286
Kat10	12327	1257	Kat2	12614	1286
Kat9	12327	1257	Kat1	12614	1286
Kat8	12327	1257	Zemin Kat	13662	1393
				$m_t =$	20343

Cizelge 4.8 : Deprem durumu kat kütleleri hesabı.

Yükleme	Mad	Periyot	TT	TT	р	N I I	511	ND
Durumu	Mod	Saniye	U_X	$U_{\rm Y}$	ĸz	$20_{\rm X}$	$20_{\rm Y}$	$2K_Z$
Modal	1	1.79	0.600	0.076	0.009	0.600	0.076	0.009
Modal	2	1.66	0.091	0.519	0.055	0.690	0.595	0.063
Modal	3	1.54	0.000	0.053	0.679	0.691	0.648	0.742
Modal	4	0.47	0.031	0.002	0.113	0.721	0.650	0.856
Modal	5	0.45	0.144	0.001	0.027	0.865	0.651	0.883
Modal	6	0.32	0.000	0.209	0.002	0.865	0.860	0.885
Modal	7	0.26	0.002	0.000	0.054	0.867	0.860	0.939
Modal	8	0.21	0.057	0.000	0.002	0.923	0.860	0.941
Modal	9	0.18	0.001	0.000	0.025	0.924	0.860	0.966
Modal	10	0.15	0.000	0.000	0.014	0.924	0.860	0.979
Modal	11	0.15	0.001	0.065	0.000	0.925	0.925	0.980
Modal	12	0.14	0.028	0.001	0.000	0.952	0.926	0.980
Modal	13	0.14	0.000	0.000	0.007	0.953	0.926	0.987
Modal	14	0.13	0.000	0.000	0.004	0.953	0.926	0.991
Modal	15	0.12	0.000	0.000	0.002	0.953	0.926	0.994
Modal	16	0.12	0.000	0.000	0.001	0.953	0.926	0.995
Modal	17	0.12	0.000	0.000	0.000	0.953	0.926	0.995
Modal	18	0.11	0.000	0.000	0.000	0.953	0.926	0.995
Modal	19	0.11	0.000	0.000	0.000	0.953	0.926	0.995
Modal	20	0.11	0.000	0.000	0.000	0.953	0.926	0.995
Modal	21	0.11	0.000	0.000	0.000	0.953	0.926	0.995
Modal	22	0.11	0.000	0.000	0.000	0.953	0.926	0.995
Modal	23	0.11	0.000	0.000	0.000	0.953	0.926	0.995
Modal	24	0.11	0.005	0.018	0.000	0.957	0.943	0.995
Modal	25	0.11	0.011	0.007	0.000	0.968	0.950	0.995

Çizelge 4.9 : Proje örneği periyotları ve kütle katılım oranları.

Modal analizde X ve Y deprem doğrultularında her bir mod için hesaplanan taban kesme kuvveti modal etkin kütleleri toplamının bina toplam kütlesinin %95'inden daha az olmaması koşulu, TBDY (2018) Bölüm 4.8.1.2'de yeterli mod sayısı olarak tanımlanmıştır. Proje örneğinde 25 mod hesaplanarak X ve Y doğrultularının her birinde %95 kütle katılım oranları yakalanmıştır. Mod birleştirme yöntemiyle bulunan taban kesme kuvveti (V_t), TBDY (2018) Bölüm 4.8.4'e göre eşdeğer deprem yükü yöntemiyle hesaplanan taban kesme kuvvetinden (V_{tE}) az olması durumunda, eşdeğer taban kesme kuvveti büyütme katsayısı (β_{tE}) ile çarpılacaktır. Büyütme katsayısının bulunmasında kullanılan deneye dayalı katsayı (γ_E) TBDY (2018) tablo 3.6'da belirtilen düzensizliklerden hiçbirinin proje örneğinde bulunmamasından dolayı 0.8 alınacaktır. Proje örneğinde yukarıda anlatılan kontrol dolayısıyla eşdeğer deprem yöntemi hesabı da yapılacaktır. Ancak eşdeğer deprem yönetmeliğinde hesaba katılacak periyot TBDY (2018) 4.27 denklemi hesabından elde edilen periyodun 1.4 katı ile sınırlandırılmaktadır (4.2).

$$T_{pA} = C_t H_N^{3/4}$$

$$C_t = \frac{0.1}{\sqrt{A_t}} \le 0.07$$

$$A_t = \sum_j A_{wj} \left[0.2 + \left(\frac{l_{wj}}{H_N}\right)^2 \right] \le \sum_j A_{wj}$$
(4.2)

Proje örneğinde bulunan perdelere göre deprem hesabında kullanılabilecek periyot sınırları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Çıkan değerlere göre ETABS programında hesaplanan X doğrultusu periyodu, 1.4*TpA, x 'den küçük olduğu için eşdeğer deprem yükü hesaplarken aynen kullanılabilir. Ancak Y doğrultusu periyodu, sınır periyodundan yüksek olduğu için bu yönde bulunacak eşdeğer deprem yükü hesabında sınır periyot değeri (1.52) kullanılacaktır. Eşdeğer deprem yükü yöntemine göre hesaplanan taban kesme kuvvetleri TBDY (2018) denklem 4.19'da verilen minimum deprem yükünden az olduğu için büyütme katsayısı, bu değere göre hesaplanmış ve 1'den küçük çıktığı için düzeltme yapılmadan mod birleştirme yöntemine göre hesaplanan deprem kuvvetleri esas alınarak tasarıma devam edilmiştir.

Perde	Perde X-		su	Perde	Y-Y Doğrultusu			
Adı	A _{wj, x}	l _{wj, x}	A _{tj, x}	Adı	A _{wj, y}	l _{wj, y}	A _{tj, y}	
P1-A	2.13	4.73	0.44	P1-D	4.12	9.15	0.92	
P1-B	1.08	2.40	0.22	P1-E	2.14	4.75	0.44	
P1-C	2.81	6.25	0.59	P1-F	1.98	4.40	0.41	
P2-A	2.45	5.45	0.51	P2-D	1.98	4.40	0.41	
P2-B	1.08	2.40	0.22	Р2-Е	4.12	9.15	0.92	
P2-C	1.77	3.93	0.36	P2-F	4.12	9.15	0.92	
$\Sigma A_{wj, x}$	11.32	$A_{t, x}$	2.34	$\Sigma A_{wj, y}$	18.45	$A_{t, y}$	4.01	
		$C_{t, x}$	0.07			C _{t, y}	0.05	
		$T_{pA, x}$	1.42			$T_{pA, y}$	1.09	
		1.4*T _{pA, x}	1.99			1.4*T _{pA, y}	1.52	

Çizelge 4.10 : Deprem hesabından kullanılabilecek periyot sınırları.

Çizelge 4.11 : Mod birleştirmeden bulunan deprem yükünün eşdeğer deprem yüküne göre ölçeklendirilmesi.

	X-X Do	ğrultusu		Y-Y Doğrultusu				
V _{t, x} kN	V _{tE, x} kN	V _{t, x(min)}	$\beta_{tE,\ x}$	V _{t,y}	V _{tE, y} kN	V _{t, y(min)}	$\beta_{tE,\;y}$	
	<u>KIN</u>	10555	0.01		KIN CONTROL	10555	0.50	
10649	8382	10556	0.81	14455	9978	10556	0.59	

4.4.6 Deprem etkilerinin birleştirilmesi

TBDY (2018) 4.4.2.1'e göre birbirine dik X ve Y doğrultularında deprem yükleri ayrı ayrı hesaplanacak ve bu yükler doğrultu birleştirmesi yapılarak kullanılacaktır. Düşey deprem etkisi TBDY (2018) 4.4.3.1 'de belirtilen bina sınıflarına girmediği için 4.4.3.2'de verilen yaklaşık hesap olan denklem ile hesaba katılacaktır. S_{DS} =1.322 olduğu için düşey deprem etkisi $E_d^{(2)}$ =(2/3)*1.322*G=0.88G olarak dikkate alınacaktır. Yük birleşimlerine düşey deprem etkisi 0.3 ile çarpılarak girdiği için G yüklemesi 0.26 arttırılarak girilecektir. TBDY (2018) 4.10'a göre sünek ve sünek olmayan eleman tasarımlarında farklı yük birleşimleri dikkate alınacaktır. Sünek olmayan tasarıma ait iç kuvvetlerin hesabında bulunan deprem yükü, dayanım fazlalığı katsayısı ile arttırılacaktır. TBDY (2018) 4.9 ile göreli kat ötelemesini sınırlandırmıştır. Ancak bunun kontrolü, deprem yükleri doğrultularını birleştirmeye gerek kalmadan sağlanabilir. Bu sebeple sünek (ST), sünek olmayan (GT) tasarım ve göreli kat ötelemesi (LR) için üç tip yük birleşimi kullanılması gerekiyor.

Sünek tasarıma esas iç kuvvetler için yük birleşimleri;

- ST01_1.4G+1.6Q
- ST02_1.26G+Q+EXD+0.3EYD
- ST03_1.26G+Q+0.3EXD+EYD
- ST04_0.64G+EXD+0.3EYD
- ST05_0.64G+0.3EXD+EYD

Sünek olmayan tasarıma esas iç kuvvetler için yük birleşimleri;

- GT01_1.26G+Q+[EXD+0.3EYD]*D
- GT02_1.26G+Q+[0.3EXD+EYD]*D
- GT03_0.64G+[EXD+0.3EYD]*D
- GT04_0.64G+[0.3EXD+EYD]*D

Göreli kat ötelemesi ve ikinci mertebe etkilerinin kontrolü için yük birleşimleri;

- LR01_G+Q
- LR02_G+Q+EXD
- LR03_G+Q+EYD
- LR04_G+EXD
- LR05_G+EYD

4.5 Analiz Sonuçları Ve Değerlendirme

TBDY (2018)'e göre uygun biçimde sistem tasarımı ve döşeme tasarımı için gerekli olan sonuçlar sadece verilmiştir. Başlangıç olarak mod birleştirme yöntemiyle hesaplanan deprem yüklerinin katlarda oluşturduğu kat kesme kuvvetleri verilmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 : Kat kesme kuvvetleri.

Döşemelerden perdeye deprem yükünün aktarımının kontrolü için çekirdek perdelere ait dayanım fazlalığı ile artırılmış sünek olmayan davranışa esas yük birleşimleri kullanılarak kesme kuvvetleri bulunmuştur. P1 ve P2 çekirdek perde parçalarına ait X ve Y doğrultusu kesme kuvveti hesap modeli üzerinde Şekil 4.16'da gösterilmiş ve Çizelge 4.12'de P1 ve Çizelge 4.13'de P2 değerleri düzenlenmiştir.

Kat	Perde	Kuvvet	V _{x, max}	V _{x, min}	V _{y, max}	$V_{y,min}$	V _{x, Döşeme}	V _{y, Döşeme}
IXat	İsmi		kN	kN	kN	kN	kN	kN
16	D1	Üst	2549	-3826	3468	-3540	-	-
10	F I	Alt	3007	-4284	4036	-4108	2125	2250
15	D1	Üst	4744	-6419	6395	-6460	2155	2339
15	F I	Alt	4959	-6634	6678	-6743	1050	1290
14	D1	Üst	6011	-7693	8058	-8113	1039	1380
14	F I	Alt	6132	-7813	8205	-8260	602	557
12	D1	Üst	6824	-8445	8762	-8808	092	557
15	F I	Alt	6891	-8512	8806	-8851	425	94
12	D1	Üst	7316	-8876	8890	-8926	423	04
12	ΓI	Alt	7358	-8918	8874	-8910	308	59

Cizelge 4.12 : Sünek olmayan tasarıma esas P1 çekirdek perdesi kesme kuvvetleri.

11	D1	Üst	7666	-9167	8824	-8851		
11	PI	Alt	7702	-9203	8797	-8824	224	40
10	D1	Üst	8026	-9466	8837	-8855	324	40
10	PI	Alt	8070	-9510	8843	-8861	404	254
0	D1	Üst	8494	-9866	9197	-9206	424	354
9	PI	Alt	8551	-9923	9269	-9277	502	۲ ۲٥
o	D1	Üst	9074	-10372	10146	-10147	323	0//
0	PI	Alt	9144	-10442	10288	-10289	651	1252
7	D1	Üst	9798	-10976	11640	-11627	034	1552
/	r I	Alt	9885	-11064	11832	-11819	011	1660
6	D1	Üst	10696	-11765	13501	-13470	811	1009
0	PI	Alt	10804	-11872	13719	-13689	020	1700
5	D1	Üst	11743	-12719	15518	-15468	939	1799
5	F1	Alt	11864	-12840	15740	-15690	1014	1770
4	D1	Üst	12878	-13722	17510	-17441	1014	1770
4	F1	Alt	13005	-13850	17714	-17646	1042	1502
2	D1	Üst	14048	-14749	19306	-19231	1043	1392
3	FI	Alt	14172	-14873	19472	-19396	040	1234
2	D1	Üst	15121	-15554	20706	-20628	949	1234
Z	r1	Alt	15214	-15648	20812	-20734	691	720
1	D1	Üst	15898	-15687	21543	-21466	084	152
1	ΡI	Alt	15939	-15728	21588	-21511		-

Çizelge 4.13 : Sünek olmayan tasarıma esas P2 çekirdek perdesi kesme kuvvet	leri.
---	-------

Vot	Perde	Kuvvet	V _{x, max}	V _{x, min}	V _{y, max}	V _{y, min}	V _{x, Döşeme}	V _{y, Döşeme}
Kat	İsmi	Yeri	kN	kN	kN	kN	kN	kN
16	DO	Üst	3533	-2256	3563	-3491	-	-
10	P2	Alt	4038	-2760	4199	-4128	1014	2(77
15	D2	Üst	5852	-4178	6870	-6805	1814	2077
15	P2	Alt	6088	-4414	7186	-7121	207	1610
1.4	D2	Üst	6895	-5213	8795	-8740	807	1019
14	P2	Alt	7024	-5343	8953	-8898	516	604
12	D2	Üst	7480	-5859	9547	-9502	510	004
15	P2	Alt	7551	-5931	9577	-9532	207	02
10	D2	Üst	7788	-6228	9485	-9448	291	92
12	P2	Alt	7832	-6273	9431	-9394	100	406
11	D2	Üst	7973	-6472	9025	-8998	199	400
11	P2	Alt	8010	-6509	8943	-8915	202	407
10	D2	Üst	8152	-6712	8536	-8518	203	407
10	P2	Alt	8197	-6757	8487	-8469	280	26
0	D2	Üst	8409	-7037	8451	-8443	280	30
9	F2	Alt	8469	-7097	8496	-8488	267	712
0	D2	Üst	8762	-7464	9201	-9201	507	/15
0	P2	Alt	8837	-7539	9359	-9358	191	1441
7	D2	Üst	9202	-8023	10786	-10799	404	1441
1	P2	Alt	9296	-8117	11027	-11040	625	1070
6	DO	Üst	9820	-8752	12980	-13010	033	1970
0	P2	Alt	9938	-8870	13262	-13293	779	2267
5	D2	Üst	10624	-9648	15510	-15560	//0	2207
3	r2	Alt	10759	-9783	15797	-15847	002	2228
4	P2	Üst	11511	-10666	18116	-18185	665	2338

		Alt	11656	-10812	18375	-18444	023	2103
2	2 D2	Üst	12435	-11735	20561	-20637	923	2195
3	P2	Alt	12578	-11877	20764	-20839	952	1011
2	D2	Üst	13164	-12730	22572	-22650	833	1011
2	P2	Alt	13270	-12836	22697	-22775	750	1210
1	D2	Üst	13375	-13586	23916	-23993	750	1219
1	F2	Alt	13421	-13632	23968	-24045	-	-



Şekil 4.16 : Sünek olmayan tasarıma esas P1 ve P2 çekirdek perdesi kesme kuvvetleri.

TBDY (2018) Bölüm 4.9.1'e göre göreli kat ötelemeleri sınırlandırılmıştır. Sınır değerleri dolgu duvarları ya da cephe elemanlarının çerçeve elemanları arasında esnek derz veya bağlantı olup olmamasına bağlı olarak değişmektedir. Proje örneğinde dolgu duvarlarla ile çerçeve elemanları arasında esnek derz veya bağlantı olmaksızın, tamamen bitişik olmasından dolayı TBDY (2018) Denklem 4.34a'ya göre göreli kat ötelemesi kontrolü yapılacaktır. Bu denklemde bulunan λ katsayısı binanın hâkim titreşim periyodu için DD-3 deprem yer hareketine göre hesaplanan elastik tasarım spektral ivmesinin (S_{ae, DD-3}), DD-2 deprem yer hareketine göre

hesaplanan elastik tasarım ivmesine ($S_{ae, DD-2}$) oranı olarak tanımlanmıştır. Proje örneği için köşe kolonların uçlarındaki maksimum azaltılmış ötelemeler (u_i) göreli olarak hesaplanarak R/I ile arttırılmış ve kontrol edilmiştir. Sonuçlar X ve Y doğrultusu için Çizelge 4.14'de ve Çizelge 4.15'de verilmiştir.

Kat	u _i ^(x)	$\Delta_i^{(x)}$	$\delta_i^{\ (x)}$	\mathbf{h}_{i})_S /S	$\lambda S^{(x)}/h$	Sinir	Kontrol (X)
Kat	mm	mm	mm	mm	$\lambda = S_{ae, DD-3} / S_{ae, DD-2}$	$\lambda O_i / \Pi_i$	Siiii	Konuol (X)
16	71	6	34	4200	0.371	0.0030	0.008	\checkmark
15	65	5	30	3700	0.371	0.0030	0.008	\checkmark
14	60	5	30	3700	0.371	0.0030	0.008	\checkmark
13	55	5	30	3700	0.371	0.0030	0.008	\checkmark
12	50	5	30	3700	0.371	0.0030	0.008	\checkmark
11	45	5	30	3700	0.371	0.0030	0.008	✓
10	40	5	30	3700	0.371	0.0030	0.008	1
9	35	5	29	3700	0.371	0.0029	0.008	\checkmark
8	30	5	28	3700	0.371	0.0029	0.008	\checkmark
7	25	5	28	3700	0.371	0.0028	0.008	\checkmark
6	21	4	27	3700	0.371	0.0027	0.008	\checkmark
5	16	4	25	3700	0.371	0.0025	0.008	\checkmark
4	12	4	23	3700	0.371	0.0023	0.008	✓
3	8	3	21	3700	0.371	0.0021	0.008	\checkmark
2	5	3	16	3700	0.371	0.0016	0.008	\checkmark
1	2	2	12	4650	0.371	0.0010	0.008	\checkmark

Çizelge 4.14 : X-Doğrultusu göreli kat öteleme oranlarının kontrolü.

Çizelge 4.15 : Y-Doğrultusu göreli kat öteleme oranlarının kontrolü.

Kat	u ^(y)	$\Delta_{i}^{(y)}$	$\delta_i^{\ (y)}$	h_i	$\lambda - S = \frac{1}{2} \sqrt{S}$	λδ. ^(y) /h.	Sinir	Kontrol (V)
Kat	mm	mm	mm	mm	$\lambda - S_{ae, DD-3} / S_{ae, DD-2}$	$\lambda O_i / \Pi_i$	Siilii	Konuol (1)
16	75	7	41	4200	0.371	0.0036	0.008	\checkmark
15	68	6	36	3700	0.371	0.0037	0.008	\checkmark
14	62	6	36	3700	0.371	0.0036	0.008	\checkmark
13	56	6	35	3700	0.371	0.0035	0.008	\checkmark
12	50	6	34	3700	0.371	0.0034	0.008	\checkmark
11	45	5	33	3700	0.371	0.0033	0.008	\checkmark
10	39	5	31	3700	0.371	0.0032	0.008	\checkmark
9	34	5	30	3700	0.371	0.0030	0.008	\checkmark
8	29	5	29	3700	0.371	0.0029	0.008	\checkmark
7	24	5	27	3700	0.371	0.0027	0.008	\checkmark
6	20	4	26	3700	0.371	0.0026	0.008	\checkmark
5	15	4	24	3700	0.371	0.0024	0.008	\checkmark
4	11	4	22	3700	0.371	0.0022	0.008	\checkmark
3	8	3	19	3700	0.371	0.0019	0.008	\checkmark
2	4	3	15	3700	0.371	0.0015	0.008	\checkmark
1	2	2	11	4650	0.371	0.0009	0.008	\checkmark

TBDY (2018) Bölüm 4.9.2'e göre ikinci mertebe göstergesi değerinin hesaplanması ve verilen sınır değerden küçük olması durumunda, bu etkilerinin tasarıma esas iç kuvvetlerin hesabında göz önüne alınması gerekli değildir. Proje örneği için ikinci mertebe gösterge değerleri hesaplanmış ve betonarme bir yapı olduğu için $C_h=0.5$ alınarak kontrol edilmiştir (Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.17).

Vot	$u_i^{(x)}$	$\Delta_{i}^{(x)}$	$\mathbf{h}_{\mathbf{i}}$	$W_{k,i}$	Σw_k	V_i	$\theta_{II, i}$	<0.12(D/C.D)	Vontrol (V)
Kat	mm	mm	mm	kN	kN	kN	rad	$\leq 0.12(D/C_hK)$	Kolluol (A)
16	55	4	4200	12061	12061	2433	0.005	0.100	\checkmark
15	50	4	3700	12299	24360	3958	0.006	0.100	\checkmark
14	47	4	3700	12327	36688	4802	0.008	0.100	\checkmark
13	43	4	3700	12327	49015	5241	0.010	0.100	\checkmark
12	39	4	3700	12327	61342	5482	0.012	0.100	\checkmark
11	35	4	3700	12327	73670	5644	0.014	0.100	\checkmark
10	31	4	3700	12327	85997	5825	0.015	0.100	\checkmark
9	27	4	3700	12327	98324	6083	0.016	0.100	\checkmark
8	24	4	3700	12327	110651	6416	0.017	0.100	\checkmark
7	20	4	3700	12327	122979	6838	0.017	0.100	\checkmark
6	16	3	3700	12470	135449	7393	0.017	0.100	\checkmark
5	13	3	3700	12614	148063	8065	0.017	0.100	\checkmark
4	10	3	3700	12614	160676	8799	0.015	0.100	\checkmark
3	6	3	3700	12614	173290	9561	0.013	0.100	\checkmark
2	4	2	3700	12614	185904	10238	0.011	0.100	\checkmark
1	2	2	4650	13662	199565	10649	0.006	0.100	\checkmark

Çizelge 4.16 : X-Doğrultusu ikinci mertebe gösterge değeri.

Çizelge 4.17 : Y-Doğrultusu ikinci mertebe gösterge değeri.

Kat	$u_i^{(y)}$	$\Delta_{i}^{(y)}$	\mathbf{h}_{i}	W _{k, i}	Σw_k	V_i	$\theta_{II,i}$	<0.12(D/C B)	Kontrol (V)
Kat	mm	mm	mm	kN	kN	kN	rad	$\leq 0.12(D/C_h R)$	Kolluol (1)
16	72	6	4200	12061	12061	3062	0.006	0.100	✓
15	66	5	3700	12299	24360	5108	0.007	0.100	\checkmark
14	60	5	3700	12327	36688	6238	0.009	0.100	\checkmark
13	55	5	3700	12327	49015	6623	0.011	0.100	\checkmark
12	49	5	3700	12327	61342	6520	0.013	0.100	\checkmark
11	44	5	3700	12327	73670	6210	0.017	0.100	\checkmark
10	39	5	3700	12327	85997	5977	0.020	0.100	\checkmark
9	34	5	3700	12327	98324	6087	0.022	0.100	\checkmark
8	29	5	3700	12327	110651	6693	0.021	0.100	\checkmark
7	24	5	3700	12327	122979	7739	0.020	0.100	\checkmark
6	19	4	3700	12470	135449	9064	0.017	0.100	\checkmark
5	15	4	3700	12614	148063	10496	0.015	0.100	\checkmark
4	11	4	3700	12614	160676	11881	0.013	0.100	\checkmark
3	7	3	3700	12614	173290	13090	0.011	0.100	\checkmark
2	4	2	3700	12614	185904	13975	0.008	0.100	\checkmark
1	2	2	4650	13662	199565	14455	0.007	0.100	\checkmark

4.6 Betonarme Döşeme Tasarımı

4.6.1 Eğilme tasarımı

Kirişsiz döşemeler TS500 (2000) 11.4.1'e göre mesnet koşullarına ve kısa kenarın uzun kenarı oranına bakılmaksızın iki doğrultuda çalışan plak elamanlar olarak hesaplanması gerektiğini söylemektedir. TS500 (2000) 11.4.5'de ise bu tür döşemelerin minimum sağlaması gereken donatı oranları verilmiştir. B420C donatı çeliği kullanıldığı için iki yönde donatı oranı toplamı 0.0035 olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında ve yüksek açıklık değerlerinden dolayı alt ve üst donatı olarak iki yönde ϕ 12/15 seçilmiştir. Seçilen bu donatıya göre güç tükenmesi durumuna karşılık gelen moment değeri 76 kNm/m olarak bulunur ve ETABS programında bu filtreleme yapılarak ilave donatıların yerleri tespit edilir (Şekil 4.18 ve Şekil 4.19). Bu şekilde seçilen donatının taşıyabileceği maksimum değerden daha fazla donatıya ihtiyaç duyan yerler işaretlenmiştir. Köşe kolonlar arasında kalan bölgede gözlenen açıklık momentleri bu bölgede döşemeye koyulan genel donatıdan daha fazlasına ihtiyaç duyduğu gözlemlenmektedir. Bu sebeple kolonlar arasında gömülü hatıl donatısı düzenlenmiştir (Şekil 4.17). Bu gömülü hatıl kolonlar arasında çıkan ilave momentlere bir kiriş gibi destek olması amacıyla yapılmıştır. Daha sonra kolon ve perde mesnetlerine yakın yerlerde ilave momentlerden dolayı $\phi 16/15$ ilave üst donatı düzenlenmiştir. Bu şekilde perde ve kolon mesnet bölgelerinde $\phi 12/15 + \phi 16/15$ üst donatı ve ϕ 12/15 alt donatı düzenlenmiş oldu ve bu donatılar 200 kNm/m moment taşımaktadır. Kolonlar arasında plan dış sınırlarının 1m içerisi boyunca düzenlenen gömülü hatıl ile birlikte $\phi 12/15 + \phi 14/25$ alt ve üst donatı düzenlenmiş oldu ve bu donatılar 133 kNm/m moment taşımaktadır. Bu şekilde eğilme donatısı tasarımı tamamlanmış olmaktadır. TBDY (2018) Bölüm 7.11.13'e göre kolon ve orta seritlerdeki donatı kontrolleri de yapılmıştır.



Şekil 4.17 : Döşeme donatısı için düzenlenen gömülü hatıl detayı.



Şekil 4.18 : Proje örneği maksimum M11 momenti.



Şekil 4.19 : Proje örneği maksimum M22 momenti.

4.6.2 Kesme tasarımı

Boşluksuz ve boşluklu kesit için ayrı ayrı kesme kuvveti dayanımları hesaplanacaktır. Boşluklu kesitte kesme kuvveti yalnızca 15 cm olan gövde kesiti ile taşındığı düşünülerek kesme dayanımı hesaplanacak ve bu dayanım metrede dayanıma çevrilerek kontrol sağlanacaktır (Çizelge 4.18).

Vasit	V _{max}	V _{cr}	V _c	$V_{\rm w}$
Kesh	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
Boşluksuz Kesit	1997	295	236	151
Boşluklu Kesit	448	66	53	53

Çizelge 4.18 : Proje örneği kesme dayanım hesabı.

ETABS programından dayanım fazlalığı katsayısı ile arttırılmış yük birleşimlerinin zarfı olarak v13 ve v23 kesme kuvveti diyagramları çizelgede hesaplanan en düşük kesme dayanımı boşluklu kesitte betonun sağladığı kesme dayanımı 53 kN/m 'ye göre filtreleme yapılarak Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 'de gösterilmiştir. Bu değeri aşan yerler işaretlenmiş ve bazı özel detaylarla tasarım kesme kuvvetlerini güvenle sağlayacağı şekilde tasarım yapılmıştır. Kesme kuvvetinin maksimum olduğu yerlerde kolon ve perde mesnetlerine yakın bölgeler boşluksuz olarak yapıldığı için çizelgede verilen sınırlara göre kontrolü sağlanacaktır. Kolonlar arası eğilme donatısının ihtiyacının fazla olduğu bölgede kesme kuvveti de benzer şekilde fazla olduğundan ve gömülü hatıl ϕ 12/15 etriye ile sarılı olduğundan bu bölgelerin kontrolünde kesme dayanımına etriyenin katkısı olan V_w=151 kN/m olarak dikkate alınmıştır. Kolon etrafında bırakılan ilk boşluktan sonra gelen boşluklu döşeme kesitinin gövdesinde ϕ 10/22.5 olarak çiroz detayları düşünülmüş (Şekil 4.20) ve boşluklu döşemenin bu bölgelerinde kesme dayanımı kontrolü için bu donatıların katkısı olan V_w=53 kN/m olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 4.20 : Kolon çevresi boşluklu kesitte düzenlenen çiroz detayı.



Şekil 4.21 : Proje örneği maksimum V13 kesme kuvveti.



Şekil 4.22 : Proje örneği maksimum V23 kesme kuvveti.

4.6.3 TBDY döşeme tasarımında özel koşullar

4.6.3.1 Düzlem içi kuvvet kontrolleri

Proje örneğinde tipik ara katlarda TBDY (2018) Bölüm 7'de betonarme elemanların tasarımı için verilen özel kurallara göre kontroller yapılacaktır. Bölüm 7.11'de döşemenin tasarımına dair düzlem içi gerilme kuralları mevcuttur. Taşıyıcı sistem elemanı elastik diyafram tanımı yapılarak modellenecek ve dayanım fazlalılığı katsayısı ile arttırılarak bulunan düzlem içi ortalama gerilmeler verilen sınır değerlere göre kontrol edilecektir. Düzlem içi ortalama çekme gerilmeleri f_{ctd}'den büyük olduğu durumda döşemenin eğilme dayanımı için gerekli olandan arta kalan donatı oranı p olmak üzere pfyd sınırını geçmeyecektir. Bu şart sağlanamadığında ilave donatılar eklenecektir. Düzlem içi basınç gerilmeleri 0.85f_{cd} sınırını aşmayacaktır. Kayma gerilmeleri de $\tau_r=0.65f_{ctd}+\rho f_{yd}$ sınırını ve $0.65(f_{ck}^{0.5})$ sınırını aşmayacaktır. Ortalama gerilmelerin kontrol edilmesi gerektiği için gerilme değerleri birimi kN/m olan düzlem içi kuvvetler F11, F22 ve F12'e dönüştürülerek ETABS programında kontrolleri sağlanmıştır. Boşluklu döşeme kesiti, dolu kesite göre alansal olarak kA_{1/m}=0.586 oranıyla eşdeğer kesit kalınlığına çevrilmektedir. Dolu kesit için 300mm döşeme kalınlığı ve boşluklu kesit için 175.8mm eşdeğer döşeme kalınlığı seçilerek sınır düzlem içi kuvvetler hesaplanmıştır (Çizelge 4.19).

Kesit	Ortalama Çekme Gerilmesi	Çekme Kuvveti Sınırı	Basınç Gerilmesi	Basınç Kuvveti Sınırı	Kayma Gerilmesi	Kayma Kuvveti Sınırı
	Mpa	kN/m	Mpa	kN/m	Mpa	kN/m
Boşluklu Kesit	1.65	290	28.05	4932	1.0725	189
Boşluksuz Kesit	1.65	495	28.05	7524	1.0725	322

Çizelge 4.19 : Döşemenin düzlem içi sınır değerleri.

Boşluklu döşeme sınır durumlarına göre sonlu elemanlar programında filtreme yapılarak yönetmelik koşulları sağlanmıştır. F11 ve F22 kuvvetleri filtrelendiğinde çekme sınır değerini aşan yerler de boşluksuz kesit mevcut olduğundan sınır değeri bu kesit için kontrol edilmiştir (Şekil 4.23 ve Şekil 4.24). Basınç gerilmeleri de benzer şekilde filtrelenerek kontrol edilmiştir. Kayma gerilmesi için iki sınır durumu olmasına rağmen modelde $0.65f_{ctd}$ 'yi geçen gerilme olmadığından eğilme dayanımı için gerekli olandan arta kalan donatı ihtiyacı gözlemlenmemiştir (Şekil 4.25).



Şekil 4.23 : Proje örneği dayanım fazlalılığı ile arttırılmış yük birleşimleri zarf kuvveti-F11.



Şekil 4.24 : Proje örneği dayanım fazlalılığı ile arttırılmış yük birleşimleri zarf kuvveti-F22.



Şekil 4.25 : Proje örneği dayanım fazlalılığı ile arttırılmış yük birleşimleri zarf kuvveti-F12.

4.6.3.2 Deprem yükünün döşemelerden perdeye aktarımının kontrolü

TBDY (2018) döşeme tasarımı için özel koşullarından bir diğeri ise döşeme elemanlarının deprem yüklerini düşey taşıyıcı elamanlara güvenle aktarabileceği kontrolüdür. Perde ile döşeme kesişimi boyunca gerekli ise deprem yönünde aktarma donatıları düzenlenerek kesme sürtünmesi ile yük akışının güvenli bir şekilde olduğu gösterilmelidir (Şekil 4.26).



Şekil 4.26 : TBDY (2018) döşemenin deprem yüklerini düşey taşıyıcı sisteme aktarması.

Bodrum katlı binalarda geçiş katlarında kesme kuvveti yönünün değişmesiyle ve dayanım fazlalılığı ile arttırılmış yük birleşimleri kullanıldığı için aktarma elemanlarına ihtiyaç duyulmakta ve depreme dik yönde A_{sa} ile gösterilmiş aktarma donatıları kullanılmaktadır. TBDY (2018) Bölüm 7.11.5'e göre aktarma donatılarının oluşturduğu $2A_{sa}f_{yd}$ ve ardışık iki kat arasındaki dayanım fazlalılığı ile arttırılmış kesme kuvveti farkı olan döşeme üzerindeki kuvvetlerin toplamı deprem yönüne dik bileşende bulunan A_{sb} donatısının oluşturduğu $\mu A_{sb}f_{yd}$ kuvvetinden küçük olmalıdır. Tipik ara katlarda kontrol yaptığımız proje örneğinde yalnızca oluşan kesme kuvvetleri kesme sürtünmesi ile yani aktarma elemanları hesaba katılmadan A_{sb} ile kontrol sağlanacaktır. Tipik ara katlarda döşeme için kullanılacak kesme kuvveti farkları Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13'de verilmiştir. Döşemenin deprem yükünü perdelere aktarması için gerekli olan bağlantı donatısı A_{sb} hesabı yapılmıştır (Çizelge 4.20). Eğilme tasarımında perdelerin bağlantı noktalarında koyulan donatılara göre filtreleme yapılarak eğilmeden arta kalan donatı alanının gerekli olan A_{sb}



Şekil 4.27 : X-Doğrultusu eğilme dayanımı için gerekli olan donatı alanı sonuçları.



Şekil 4.28 : Y-Doğrultusu eğilme dayanımı için gerekli olan donatı alanı sonuçları.

Perde İsmi	YÖN	Kesme Kuvveti	Aktarma Kontrol Boyu	A _{sb}	A _{sb}
		kN	m	cm^2	cm ² /m
D1	Х	2135	10.975	58.49	5.33
F I	Y	2359	9.15	64.63	7.06
D2	Х	1814	9.375	49.70	5.30
r2	Y	2677	9.15	73.34	8.02

Çizelge 4.20 : Kesme sürtünmesi için gerekli bağlantı donatısı (A_{sb}).

4.6.3.3 Zımbalama kontrolü

Kirişsiz döşeme tasarımının en önemli kısımlarından biri de zımbalama kontrolüdür. Zımbalama kontrolü düşey doğrultudaki kayma gerilmelerinin kontrol edilmesidir. TBDY (2018) Bölüm 7.11.7'de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapının çözülmesi durumunda dayanım fazlalığı katsayısı D ile arttırılmış deprem yüklü yük birleşimlerine göre bulunan maksimum düşey kesme kuvveti f_{ctd}*d'den küçük olmalıdır. Aksi halde yönetmelik zımbalama dayanımı sağlamak için birçok seçenek sunmaktadır. Zımbalama donatısı olarak sehpa veya çiroz kullanılması durumunda beton kayma dayanımının $0.5 f_{ctd}$ alınması, zımbalama donatısının kayma dayanımına katkısı f_{ctd}'den küçük olmayacak ve toplam dayanımın 1.5f_{ctd}'yi geçmeyecek şekilde belirlenmesi gerekmektedir (Şekil 4.29). Kayma kaması kullanılması durumunda ise beton kayma dayanımının 0.75f_{ctd} alınması ve kayma kamalarının f_{ctd}'den küçük olmayacak ve toplam dayanımın 1.75f_{ctd}'yi geçmeyecek şekilde belirlenmesi gerekmektedir (Şekil 4.29). Zımbalama donatısı için yukarıda sayılan sehpa veya çiroz ile ya da kayma kamaları ile düzgün yayılı yerleştirilmesi yerine birbirine dik iki yönde kapalı etriye şeritleri veya kayma kaması rayları şeklinde de düzenlenebilmektedir (Şekil 4.29). Bina türü yapılarda kayma davranışı kolon veya perde çevresinde düşey yönde etkin olmasına karşın açıklığa doğru gidildikçe düzlem içi kaymaya dönüşmektedir. Bu sebeple, zımbalama yani düşey kayma etkisinin etkin olduğu bölge (zımbalama bölgesi) TBDY(2018) Bölüm 7.11.13'de döşeme kalınlığının 4 katından az olmamak şartıyla zımbalama donatısının bittiği kesitten d/2 mesafede $f_{ctd}/2$ değerine düştüğü bölge olarak tanımlanmıştır.

Proje örneğinde boşlukların yerleştirilmesi konusunda zımbalama bölgesi dikkate alınmıştır. Boşluklu döşeme kesitinin zımbalama etkisi altında davranışı tam olarak bilinmediği için bu bölgeler boşluksuz döşeme kesiti olarak belirlenmiştir. Zımbalama bölgesinde sınır kesme kuvveti değeri 1650 kN/m²x0.3 m=495 kN/m

olarak belirlenmiş ve ETABS programında bu değere göre filtreleme yapılarak zımbalama kontrolü gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.30 ve Şekil 4.31). Tipik ara kat çözümünde deprem yönetmeliği yük birleşimleri ve sınırları altında zımbalama donatısına ihtiyaç olmadığı anlaşılmıştır. Ancak yapıda sünekliğe katkısı olması için kolon bölgesinde sarılma bölgeleri oluşturmaya benzer şekilde tüm kolon ve perde zımbalama bölgelerinde zımbalama donatısı koyulması tavsiye edilmektedir. Minimum d/2 aralıklı çirozlar koyulabileceğinden ϕ 10/12.5 çiroz zımbalama



Şekil 4.29 : TBDY (2018) zımbalama detayları.



Şekil 4.30 : TBDY (2018) zımbalama kontrolü için maksimum V13 kesme kuvveti.



Şekil 4.31 : TBDY (2018) zımbalama kontrolü için maksimum V23 kesme kuvveti.

5. DENEY VE ANALİTİK ÇALIŞMA

Boşluklu döşeme kesiti sistemi ortotropik bir kesit olarak düşünülüp iki boyutlu plak elemanın bazı rijitlik, kütle ve ağırlık katsayıları değiştirilerek bu değerlerine eşdeğer kalınlıklar seçilerek taşıyıcı sistem çözümüne gidilmektedir. Kapasite tasarımında da beton basınç bloğu yüksekliğinin boşluklu döşeme üst plak kalınlığını geçmediği sürece boşluk olup olmamasının hesapsal olarak bir değişikliği olmadığı gösterilmiştir. Ancak bu ve diğer birçok betonarme sistem çözümü kabullerinin boşluklu döşeme kesiti için de uygunluğu deneylerle kanıtlanmış olması gerekir. Bu kapsamda ABS Yapı Elamanları Sanayi Ticaret Ltd. Şti., Erdemli Proje, Müşavirlik Ltd. Şti. ve İstanbul Teknik Üniversitesi ortak çalışması olarak birçok farklı numunede boşluklu döşeme kesitleri incelenecektir.

5.1 Deney Numunelerinin Tanıtımı

Deney numunelerinin tüm detaylı çizimleri ve düzenekleri EK C'de verilmiştir. Deneylerde düzlem içi eğilme ve kayma, düzlem dışı eğilme ve kesme davranışları incelenecektir. Boşluklu döşeme kesitinin gövde genişliği 7.5 cm dar gövdeli ve 15 cm geniş gövdeli olmak üzere iki tip incelenmiştir (Çizelge 5.1). Numune No:1'de düzlem içi kayma gerilmeleri incelemek ve kayma modülüne ait boşluksuz kesitteki G=E/2(1+v) eşitliğinin boşluklu kesit içinde uygunluğu kontrol edilecektir (Şekil C.1 ve Şekil C.2). Numune No:2'de düzlem dışı eğilme davranışı, dar ve geniş gövdeli kesitlerde incelenmiştir. Burada düzlem kesit düzlem kalır prensibi sonucu doğrusal birim şekildeğiştirme kabulünün geçerliliği kontrol edilecektir (Şekil C.3 ve Şekil C.4). Numune No:3'de düzlem dışı eğilme davranışı, dar ve geniş gövdeli kesitlerde iki açıklıklı yani sürekli çözümlerde yapılan kabullerin geçerliliği araştırılacaktır (Şekil C5 ve Şekil C6). Numune No:4'de düzlem içi eğilme davranışı, dar ve geniş gövdeli farklı boyutlarda incelenecektir (Şekil C.7, Şekil C.8, Şekil C.9 ve Şekil C.10). Numune No:5'de düzlem dışı kesme davranışını dar ve geniş gövdeli enine donatısız, çirozlu ve kapalı etriyeli çeşitleri test edilecektir (Şekil C.11, Şekil C.12, Şekil C13, Şekil C.14, Şekil C15 ve Şekil C.16).

Numune No		Gövde	Çiroz	K.etriye	Açıklık	Amaç	
1	1a	Dar	-	-	-		
	1b	Geniş	-	-	-	Duzieni içi Kayına	
2	2a	Dar	-	-	Tak		
2	2b	Geniş	-	-	Тек	D:-1 D EX:1	
2	3a	Dar	-	-	Cift	- Duziem Dişî Egnîne	
3	3b	Geniş	-	-	Çm		
	4a1	Dar	-	-	-		
4	4a2	Geniş	-	-	-	Dürlen İsi Eğilme	
4	4b	Geniş	-	-	-	Duziem içi Egime	
	4c	Geniş	-	-	-		
	5a1	Dar	-	-			
	5a2	Geniş	-	-			
5	5b1	Dar	Çiroz	-	Tal	D"-law Day Kaswa	
	5b2	Geniş	Çiroz	-	Тек	Duziem Dişi Kesme	
	5c1	Dar	-	K.etriye			
	5c2	Geniş		K.etriye			

Çizelge 5.1 : Deney numuneleri, içerikleri ve amaçları.

5.2 Deney Yapım Aşamaları ve Alınan Ölçümler

2a ve 2b nolu numuneler test edilmiştir. Geri kalan numuneleri ilerleyen zamanlarda tamamlanacaktır. Düzlem dışı eğilme numunesi tek yönde eğilmeye çalışan basit bir kiriş olarak düşünülmektedir. Bunun için basit mesnet görevi görecek bir çelik profil üzerine numune oturtulmuştur. Burada sistem olarak üzerine uygulanan yükyerdeğiştirme grafikleri ve kesit bazında moment eğrilik değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda test düzeneğinde numune altından eşit mesafelerde üç yerdeğiştirme ölçer koyularak düşey yerdeğiştirme hesaplandı. Mesnet bölgelerinde yukarı yönlü hareket olabileceğinden mesnet üst noktalarına bağlı yerdeğiştirme ölçerler koyuldu ve bu şekilde boşluklu döşeme üzerindeki gerçek yerdeğiştirme bulunmuş oldu. Numune beton dökülmeden önce açıklığa yakın donatılar üzerinde 3 adet birim şekildeğiştirme ölçerler yerleştirildi. Beton basınca çalışan üst tarafında beton için birim şekildeğiştirme ölçer yerleştirildi. Bu şekilde uygulanan yüke karşılık yerdeğiştirme grafikleri için hazırlıklar tamamlanmış oldu. Kesit olarak değerlendirmek yani moment-dönme grafiklerini elde etmek için boşluklu döşeme elemanının açıklıkta ön ve arka yüzüne alt ve üst olmak üzere ikişer adet yerdeğiştirme ölçerler yerleştirildi (Şekil 5.1). Bu şekilde deney düzeneği kurulmuş oldu (Şekil 5.2).



Şekil 5.1 : Deney numunesi alınan ölçümler.



Şekil 5.2 : Deney numunesi düzeneği.

5.3 Deney Numunelerinin Sayısal Modellenmesi

Deney numuneleri tek yönde çalışan bir kiriş gibi Sap2000 programında çubuk eleman olarak modellenmiştir. Çubuk elemanlar dolu ve boş olarak ayrı ayrı kesitler oluşturularak tanımlanmıştır. Yükleme tekil bir nokta yerine düzgün biçimde yayılması için üzerine 30cm genişliğinde bir I çelik profil koyulmuş ve yük bu profil üzerinden uygulandığı için profil ağırlığı ve yük akışı benzer şekilde modele yansıtılmıştır.

Çatlama momentini deney sonuçlarında yakalamak için çatlama anına ulaşan bölgeleri yığılı olarak düğüm noktalarına ve çubuk elemanlar EI rijitliğinde bir çözüm yapılmıştır. İkinci çözümde ise doğrudan akma ve kopma durumuna denk gelen değerleri yakalamak için akma momentine ulaşmış bölgeleri yığılı olarak düğüm noktalarına ve çubuk elemanlar etkin kesit rijitliği çarpanı kullanılmış rijitlikte analiz yapılmıştır. Çelik eksenel çekme durumunda kopma dayanımına birim şekildeğiştirmenin 0.30 değerinde ulaşmaktadır. Ancak eğilme durumunda bu birim şekildeğiştirmeden önce kopma dayanımına ulaşıp aynı dayanım ile bu birim şekildeğiştirmesine doğru gideceği tahmin edilmektedir. Bu sebeple, iki çözümde de kopma dayanımına 0.10, 0.08 ve 0.06 birim şekildeğiştirmelerinde ulaştığı varsayımı ile çözümler tekrarlanmıştır. Malzeme deneyleri sonucu, beton malzemesinin ortalama elastisite modülü 22933.7 Mpa, karakteristik dayanımı 24.2 Mpa olarak bulunmuş ve eğilme altında çekme dayanımı 1.5 Mpa alınmıştır. Çelik malzemesi için de akma dayanımı 495 Mpa ve kopma dayanımı 625 Mpa olarak bulunmuştur. TBDY (2018) 'e uygun ortalama beklenen dayanımlara göre hesap yapılmıştır.

Çatlama durumunun dikkate alındığı çözüm için çatlakların 2a ve 2b numuneleri için açıklıkta 4d mesafesinde oluştuğu gözlemlenmektedir (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4). Kesit analizinden elde edilen moment eğrilik değerleri numunelerde 2d uzunluğundaki çatlamış kesit boyu kesit ortasına ve d uzunluğunda kesit ortasındaki boşluğun sağındaki ve solundaki boşluklara denk gelecek şekilde yığılı olarak modellenmiştir. Çubuk elemanlar için çatlama durumu dikkate alındığı için etkin kesit rijitliği kullanılmadan EI rijitliğinde çözüm yapılmıştır.

Doğrudan akma durumunun dikkate alındığı çözümde 2a numunesi için akma momentine ulaşan kesit boyu yani plastik mafsal boyu 2d alınırken 2b numunesi için d alınarak analiz yapılmıştır. Çubuk elemanlar ise kesit analizi sonucu elde edilen etkin kesit rijitliği çarpanı boşluklu döşeme için 0.15 alınırken dolu kesit için 0.13 alınarak çözüm yapılmıştır. Yönetmeliklere uygun çözümde ise TBDY (2018)'e göre etkin kesit rijitliği çarpanı 0.25 alınarak çözüm tekrarlanmıştır.



Şekil 5.3 : 2a numunesi çatlak uzunluğu.



Şekil 5.4 : 2b numunesi çatlak uzunluğu.

5.4 Deneysel ve Analitik Çalışmanın Karşılaştırılması

Kesit ortasına koyulan yerdeğiştirme ölçer ile bulunan moment-dönme grafikleri ile matematiksel modellemeden bulunan moment-eğrilik değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, iki numunede de 4d mesafesindeki çatlamayı modelde düğüm noktalarına yığılı olarak tanımlanması deney sonuçlarına yakın değerler göstermesini sağlamıştır.

Kiriş mesnet bölgesinde plastik mafsal boyu 0.5d'den büyük olmak üzere Celep (2008) Denklem 3.5'de iki farklı eşitlik verilmiştir. Kesit ortasında bu plastik mafsal boyunun iki katı kadar olması beklenmektedir. Bu sebeplerle, plastik mafsal boyu geniş gövdeli 2b numunesi kesitinde d ve dar gövdeli 2a numunesi kesitinde 2d alınarak çözüm yapılmıştır. Sonuç olarak, boşluklu döşemede boşluk genişliğinin birim alanda artmasıyla plastik mafsal boyunun arttığı gözlemlenmiştir. Betonarme de uyum sebebiyle benzer yükler boşluklu döşeme gibi kesit alanı dolu kesite göre az olan bir kesite etki ettirildiğinde gerilme daha geniş bir alana yayılarak akma momentine ulaşan kesit boyunu arttırdığı görülmüştür. Böylelikle, boşluklu döşemelerde dolu kesitlere göre plastik mafsal boyunun arttığı söylenebilmektedir.

Döşemelerden doğrusal olmayan bir davranış beklenmemekle birlikte deprem gibi kesin olmayan bir kuvvet karşısında sünek davranması beklenmektedir. Boşluklu döşeme sonuçlarında görüldüğü gibi kesit akma noktasına ulaştıktan sonra benzer kuvvette yerdeğiştirme yapmaya devam etmektedir.

Yönetmelik elastisite modülüne göre düşük bir değere sahip olan deney numunesi betonu ve yönetmelik akma değerine göre yüksek bir dayanıma sahip çelik malzemesi olmasına rağmen yönetmelikteki ortalama (beklenen) dayanımların kullanılmasıyla elde edilen sonuçların deney sonuçlarına benzer olduğu gözlemlenmektedir. Ancak kesit büyüklüğüne, malzeme dayanımına ve elastisite değerlerine bağlı olarak etkin kesit rijitliği çarpanının değiştiği gözlemlenmektedir (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6).





Şekil 5.5 : Deney numunesi-2a analitik ve deneysel çalışma karşılaştırılması.





Şekil 5.6 : Deney numunesi-2b analitik ve deneysel çalışma karşılaştırılması.
6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Boşluklu Döşemenin Plak Eleman Olarak Modellenmesi

Boşluklu döşeme, plak bir döşemenin içinde boşluklar bırakılarak oluşturulmuş ortotropik kesit olarak düzenlenmektedir. İçi dolu bir plak eleman özelliklerine göre boşluk bırakıldığında değişen ataleti, alanı, kayma alanını ve hacmi dikkate alan değişimlerle boşluklu döşeme, bir plak eleman olarak modellenebilmektedir.

Boşluklu döşeme kesiti, boşluksuz bir döşeme kesitine göre taşıma gücü olarak benzer özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çatlama durumunda ataletin değişimiyle farklılık olmasına rağmen akma ve güç tükenmesi durumlarında aynı değerlere sahip boşluklu veya boşluksuz olarak döşeme kesiti belirlenebilmektedir. Akma ve güç tükenmesi durumlarında aynı değerlere sahip olmasının tek şartı beton basınç bloğu yüksekliğinin boşluklu döşeme de basınca çalışan plak boyunu geçmemesi gerekmektedir.

Kirişsiz boşluklu döşeme tasarımında her kesitin aynı donatı ve kesit özelliğine sahip olmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Tasarım aşamasında minimum şartlar ile belirlenen döşeme kesitine göre beton basınç bloğu yüksekliğinin plak kalınlığını geçen yerlerde bazı önlemler alınarak plak kalınlığını geçmemesi sağlanabilir. Kesit analiz çalışmasında görüldüğü gibi aynı kesit özelliklerine sahip boşluklu döşeme kesitlerinde beton sınıfının artmasıyla ve dolu olan gövde de düzenlenen etriye ya da çiroz gibi enine donatılarla beton basınç bloğu yüksekliği, plak kalınlığı içinde kalması sağlanabilmektedir. Ancak deprem yükü gibi kesin olmayan bir yük karşısında limit tasarım yapmak tavsiye edilmemektedir. Sadece yerel bölgelerde basınç bloğu yüksekliğinin plak kalınlığını geçmesi durumunda kullanılmalıdır.

6.2 Optimum Boşluk Şekli

Uygun boşluk şekli çalışmasında daire tabanlı şekil alternatifine göre altıgen ve kare tabanlı boşluk şekli beton hacmi kazancından dolayı daha uygun görünmektedir. Kare tabanlı alternatif için farklı boşluk genişliklerinde yapılan maliyet analizi çalışmalarıyla boşluk genişliğinin artmasının maliyeti düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ancak gerilme yığılmaları ve kayma alanları kaybı dikkate alınması gerekmektedir. Boşluk genişliği arttıkça maliyet kazancı var ama bunun yanında kesme kuvvetinin baskın bir göçme durumuna sebep olabileceğinden genişlik arttıkça güvenlik önlemlerinin alındığı daha özel bir tasarıma ihtiyaç duymaktadır.

6.3 Etkin Kesit Rijitliği Çarpanı

TBDY (2018)'de etkin kesit rijitliği çarpanı kullanılarak betonarme kesitlerde çatlamış kesit rijitliği olan ikincil rijitlik kullanılmaktadır. Ancak yönetmelikte kesit özelliklerinden ve beton sınıfından bağımsız olarak verildiği için deney sonuçlarında da boşluklu döşeme için uygun olmadığı görülmektedir. Kesit analiz çalışmasında etkin kesit rijitliği çarpanının beton sınıfından bağımsız kabul edilebileceği görülürken donatı oranının değişiminde ciddi oranda değiştiği birçok alternatif kesitte gözlemlenmiştir. Sırayla 0.002, 0.004, 0.008 ve 0.020 donatı oranlarında ortalama etkin kesit rijitliği çarpanları 0.12, 0.20, 0.40, 0.8 olarak bulunmuştur. Boşluklu döşeme kesitinde gövde genişliğinin artmasıyla atalet artmakta ve bu çarpan düşmektedir. Gövde genişliğinin aksine boşluk yüksekliğindeki artışla etkin kesit rijitliği çarpanı artmaktadır. Ancak bu değişim ortalama değere göre maksimum %25 değişmektedir. Kesin sonuç almak için her kesitin kendi etkin kesit rijitliği çarpanını bir derece detaylandırarak donatı oranına göre etkin kesit rijitliği çarpanı kullanılması tavsiye edilmektedir.

6.4 Yapı Tasarımında Dikkat Edilmesi Gerekenler

Boşluklu döşeme kesitine sahip bir proje yapımında deprem ve düşey yük yönetmeliklerine uygun bir şekilde tasarım yapmak için uygun rijitlik, alan, kayma alanı ve hacim düzeltmeleri yapılmalıdır. Yönetmeliklerdeki alanla doğrudan etkili olan gerilme sınır değerleri boşluklu döşeme kesitinde kontrol edilirken gerilme değerleri alansal olarak eşdeğer kesit yüksekliği ile çarpılarak plak eleman üzerinde birim kuvvet (kN/m) olarak kontrol edilmelidir. Boşluklu döşeme kesitinin zımbalama çevresi boyunca çalışma prensibi tam olarak bilinmediği için bu bölgeler boşluksuz olarak düzenlenmelidir. Zımbalama bölgesinde donatıya ihtiyaç olmasa da sünekliğe katkı da bulunacağından donatı koyulması tavsiye edilmektedir.

6.5 Deneysel ve Analitik Çalışmanın Çıkarımları

Boşluklu döşemenin düzlem dışı eğilme davranışını anlamak için yapılan dar gövdeli ve geniş gövdeli kesitlere sahip tek açıklıklı numuneler test edilmiştir. Çatlama momenti değeri eğilme etkisi altındaki eksenel çekme dayanımı olan f_r ile doğrudan ilişkilidir. Ancak bu dayanım değerinin beton dökümü ve beton malzemesinin homojen dağılımı gibi birçok etkiye bağlı olduğundan oluşturulan boşluklu döşeme için çatlamaya etkisini belirlemek zordur. Eğilme altındaki çatlama dayanımı iki numune içinde aynı değer kullanılarak boşluksuz gövde genişliğinden bağımsız olarak 4d uzunluğundaki kesitlerde çatlama meydana geldiği gözlemlenmiştir. 4d uzunluğundaki çatlama davranışı düğüm noktalarına yığılı olarak modellendiğinde iki numunede de deney sonuçlarına benzer sonuçlar vermiştir. Çatlama dayanımındaki belirsizliklerden dolayı etkin kesit rijitliği çarpanları kullanılarak doğrudan akma ve kopma noktaları hedeflenerek modelleme yapılmıştır.

Akma momentine ulaşma uzunluğu yani plastik mafsal boyu değeri geniş gövdeli kesitte d olarak ve dar gövdeli kesitte 2d olarak orta nokta da düğüm noktalarında yığılı olarak modellendiğinde akma değerleri deney sonuçları ile örtüşmektedir. Birim alanda boşluğun artmasıyla gerilmeler daha geniş alana dağılacağından plastik mafsal boyu artış göstermektedir.

Çelik malzemesinin eksenel çekme altında bulunan kopma dayanımı ve kopma uzaması, eğilme altında benzer kopma dayanıma daha erken ulaşabilmektedir. Bu sebeple çeliğin farklı birim şekildeğiştirmelerde kopma dayanıma ulaştığı daha sonra eksenel çekme sırasında ulaştığı maksimum birim şekildeğiştirmeye kadar aynı dayanım ile devam ettiği şekilde modelleme yapılarak deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Geniş gövdeli kesitte %10 ve dar gövdeli kesitte %8 değerinde kopma dayanımına ulaştığı kabulü ile oluşturulan model deney sonuçları ile örtüşmektedir.



KAYNAKLAR

- Aslani, F., Jowkarmeimandi, R. (2012). Stress-strain model for concrete under cyclic loading, Magazine of Concrete Research, 64(8), 673-685.
- Aydoğan, M. ve Omurtag, M.H. (2009). Lecture Notes:Finite Element Method, İTÜ, İstanbul.
- Bhagat, S., Parikh, K.B. (2014). Parametric Study of R.C.C Voided and Solid Flat Plate Slab using SAP 2000, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE).
- Blaauwendraad, J. (2010). Plates and FEM:Surprises and Pitfalls, Springer, Dortrecht.
- Celep, Z. (2008). Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme, Beta Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Celep, Z. (2009). Betonarme Yapılar, Beta Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Chung, J.H., Park, J.H., Choi, H.K., LEE, S.C., Choi, C.S. (2010). An analytical study on the impact of hollow shapes in bi-axial hollow slabs, Korea Concrete Institute, ISBN 978-89-5708-182-2
- **Coronelli, D., Martinelli, L., Foti, F.** (2016). Reinforced Concrete Voided Slabs subjected to gravity and seismic action, Daliform Group, Italy.
- **CRSI** (2014). Design Guide For Voided Concrete Slabs, Concrete Reinforcing Steel Institute, U.S.A.
- Ersoy, U. (2016). Betonarme, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- **ETABS.** Integrated Analysis, Design, and Drafing of Building Systems, Computers and Structures Inc.(CSI).
- Gasparini, D. A. (2002). Contributions of CAP Turner to Development of Reinforced Concrete Flat slabs 1905-1909, Journal of Structural Engineering, vol 128, no. 10, pp. 1243-52.
- Marais, C. C. (2009). Design adjustment factors and the economical application of concrete flat-slabs with internal spherical voids in South Africa. MEng Dissertation, University of Pretoria.
- Özmen, G., Orakdöğen, E., Darılmaz, K. (2014). Örneklerle ETABS 2013, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özmen, G., Orakdöğen, E., Darılmaz, K. (2015). Örneklerle Sap2000-v17, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- SAP2000. Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc.(CSI).

- Taskın, K., Peker, K. (2014). Design factors and the economical application of spherical type voids in RC slabs, In conference proceedings of People, Buildings and Environment 2014, an international scientific conference, Kroměříž, Czech Republic, pp. 448-458, ISSN:1805-6784.
- **TBDY** (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, AFAD, Ankara.
- **TS500** (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tuncan, M., Taşkın, K. (2014). Yeni Nautilus® Kör Kalıp Sistemlerinin TS500'e Göre Farklı Yapı Analizi Programlarında Modellenmesi (Teknik Rapor), Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- **XTRACT** (2004). Cross Section Analysis Program of Structural Engineers. Imbsen Software Systems.
- [1] Mantar döşeme, Zürih. Adres: http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/445089
- [2] Günümüz Pantheon, Roma. Adres: https://www.archdaily.com/802201/adclassics-roman-pantheon-emperor-hadrian
- [3] Pantheon kesit, Roma. Adres: http://www.technicos.org/haber.aspx?haberid =11509&
- [4] Dairesel kör kalıp. Adres: https://www.researchgate.net/figure/Cobiax-Modulessystem_fig1_233551805
- [5] Elips kör kalıp. Adres: http://www.ekahellas.com/products/lightweight-concreteslabs/p/cobiax-cobiax/
- [6] Kare kör kalıp. Adres: http://www.geoplast.com.tr/tr/casseforme/nuovo-nautilusfotograf.html

EKLER

EK A: Şekil çalışması sonuç grafikleri

EK B: Kesit analizi çalışması sonuç grafikleri

EK C: Deney numuneleri

EK D: Etabs modeli veri girişleri









Şekil A.1 : Kare tabanlı şekil çalışması sonuç grafikleri.



Şekil A.2 : Altıgen tabanlı şekil çalışması sonuç grafikleri.



Şekil A.3 : Daire tabanlı şekil çalışması sonuç grafikleri.







Şekil B.1 : Kesit analizi çalışması-C20AMİN.



Şekil B.2 : Kesit analizi çalışması-C20A(0.004).



Şekil B.3 : Kesit analizi çalışması-C20A(0.008).



Şekil B.4 : Kesit analizi çalışması-C20AMAKS.



Şekil B.5 : Kesit analizi çalışması-C20BMİN.



Şekil B.6 : Kesit analizi çalışması-C20B(0.004).



Şekil B.7 : Kesit analizi çalışması-C20B(0.008).



Şekil B.8 : Kesit analizi çalışması-C20BMAKS.



Şekil B.9 : Kesit analizi çalışması-C30AMİN.



Şekil B.10 : Kesit analizi çalışması-C30A(0.004).



Şekil B.11 : Kesit analizi çalışması-C30A(0.008).



Şekil B.12 : Kesit analizi çalışması-C30AMAKS.



Şekil B.13 : Kesit analizi çalışması-C30BMİN.



Şekil B.14 : Kesit analizi çalışması-C30B(0.004).



Şekil B.15 : Kesit analizi çalışması-C30B(0.008).



Şekil B.16 : Kesit analizi çalışması-C30BMAKS.



Şekil B.17 : Kesit analizi çalışması-C40AMİN.



Şekil B.18 : Kesit analizi çalışması-C40A(0.004).



Şekil B.19 : Kesit analizi çalışması-C40A(0.008).



Şekil B.20 : Kesit analizi çalışması-C40AMAKS.



Şekil B.21 : Kesit analizi çalışması-C40BMİN.



Şekil B.22 : Kesit analizi çalışması-C40B(0.004).



Şekil B.23 : Kesit analizi çalışması-C40B(0.008).



Şekil B.24 : Kesit analizi çalışması-C40BMAKS.


Şekil C.1 : Deney numunesi-1a.



Şekil C.2 : Deney numunesi-1b.



Şekil C.3 : Deney numunesi-2a.



Şekil C.4 : Deney numunesi-2b.



Şekil C.5 : Deney numunesi-3a.



Şekil C.6 : Deney numunesi-3b.



Şekil C.7 : Deney numunesi-4a1.



Şekil C.8 : Deney numunesi-4a2.



Şekil C.9 : Deney numunesi-4b.



Şekil C.10 : Deney numunesi-4c.



Şekil C.11 : Deney numunesi-5a1.



Şekil C.12 : Deney numunesi-5a2.



Şekil C.13 : Deney numunesi-5b1.



Şekil C.14 : Deney numunesi-5b2.



Şekil C.15 : Deney numunesi-5c1.



Şekil C.16 : Deney numunesi-5c2.

General Data			
Material Name	C50		
Material Type	Concrete		\sim
Directional Symmetry Type	Isotropic		~
Material Display Color		Change	
Material Notes	Modify	/Show Notes	
Material Weight and Mass			
Specify Weight Density	O Spec	ify Mass Density	
Weight per Unit Volume		2.452E-08	kN/mm³
Mass per Unit Volume		0	kN-s²/mm⁴
Mechanical Property Data			
Modulus of Elasticity, E		37000	N/mm ²
Poisson's Ratio, U		0.2	
Coefficient of Thermal Expansion, A		0.00001	1/C
Shear Modulus, G		15416.6667	N/mm ²
Design Property Data			
Modify/Show M	aterial Property	Design Data	
Advanced Material Property Data			
Nonlinear Material Data			
Hormitodi Hidtoridi Data		Material Damping Pr	operties
Time De OK	ependent Prope	Material Damping Pr rties	operties
Time De OK	ependent Prope	Material Damping Pr rties	operties
Time De OK	spendent Prope	Material Damping Pr rties	operties
Time De OK aterial Property Data General Data Material Name	spendent Prope	Material Damping Pr rties	operties
Time De OK aterial Property Data General Data Material Name Material Type	pendent Prope	Material Damping Pr rties	operties
Time De OK aterial Property Data General Data Material Name Material Type Directional Symmetry Type	B420C Rebar Uniaxial	Material Damping Pr rties	operties
Time De OK aterial Property Data General Data Material Name Material Type Directional Symmetry Type Material Display Color	B420C Rebar Uniaxial	Material Damping Pr tties ancel	operties
Time De OK aterial Property Data General Data Material Name Material Type Directional Symmetry Type Material Display Color Material Notes	B420C Rebar Uniaxial Modify	Material Damping Pr rties ancel Change /Show Notes	
Time De OK aterial Property Data General Data Material Name Material Type Directional Symmetry Type Material Display Color Material Notes Material Weight and Mass	B420C Rebar Uniaxial Modify	Material Damping Pr rties ancel Change /Show Notes	v
Time De Time De OK aterial Property Data Seneral Data Material Name Material Name Directional Symmetry Type Material Display Color Material Display Color Material Notes Material Weight and Mass () Specify Weight Density	B420C Rebar Uniaxial Modify	Material Damping Pr rties ancel Change /Show Notes ify Mass Density	operties
Time De Time De OK Aterial Property Data Seneral Data Material Name Material Type Directional Symmetry Type Material Display Color Material Notes Material Notes Material Weight and Mass © Specify Weight Density Weight per Unit Volume	B420C Rebar Uniaxial Modify	Material Damping Pr tties ancel Change /Show Notes ify Mass Density 7.698E-08	operties
Time De Time De OK aterial Property Data Seneral Data Material Name Material Name Directional Symmetry Type Directional Symmetry Type Material Display Color Material Display Color Material Notes Material Weight and Mass () Specify Weight Density Weight per Unit Volume Mass per Unit Volume	B420C Rebar Uniaxial Modify	Material Damping Pr rties ancel Change /Show Notes ify Mass Density 7.698E-08 0	operties
Time De Time De OK aterial Property Data Seneral Data Material Name Material Name Directional Symmetry Type Material Notes Material N	B420C Rebar Uniaxial Modify	Material Damping Pr ties ancel Change /Show Notes ify Mass Density 7.698E-08 0	operties
Time De Time De OK aterial Property Data General Data Material Name Material Type Directional Symmetry Type Material Display Color Material Notes Material Notes Material Notes Material Weight and Mass () Specify Weight Density Weight per Unit Volume Mass per Unit Volume Mass per Unit Volume Machanical Property Data Modulus of Elasticity, E	B420C Rebar Uniaxial Modify	Material Damping Pr ties ancel Change /Show Notes ify Mass Density 7.698E-08 0 200000	operties ✓ kN/mm ³ kN-s ² /mm ⁴
Time De Time De OK Aterial Property Data Seneral Data Material Name Material Name Material Type Directional Symmetry Type Material Display Color Material Notes Material Notes Material Notes Material Weight and Mass © Specify Weight Density Weight per Unit Volume Mass per Unit Volume Mass per Unit Volume Mass per Unit Volume Machanical Property Data Modulus of Elasticity. E Coefficient of Thermal Expansion, A	B420C Rebar Uniaxial Modify	Material Damping Pr tties ancel Change /Show Notes ify Mass Density 7.698E-08 0 200000 0.0000117	perties
Time De Time De OK aterial Property Data General Data Material Name Material Type Directional Symmetry Type Material Display Color Material Notes Ma	B420C Rebar Uniaxial Modify O Spec	Material Damping Pr rties ancel Change /Show Notes ify Mass Density 7.698E-08 0 200000 0.0000117	operties ↓ kN/mm³ kN-s²/mm⁴ N/mm² 1/C
Time De Time De OK aterial Property Data General Data Material Name Material Name Material Type Directional Symmetry Type Material Notes Material No	spendent Prope C B420C Rebar Uniaxial Modify O Spec	Material Damping Pr tties ancel Change /Show Notes ify Mass Density 7.698E-08 0 200000 0.0000117 Design Data	operties
Time De Time De OK aterial Property Data Seneral Data Material Name Material Name Material Type Directional Symmetry Type Material Display Color Material Display Color Material Notes Material Notes Material Weight and Mass © Specify Weight Density Weight per Unit Volume Mass per Unit Volume Mass per Unit Volume Mass per Unit Volume Mass per Unit Volume Mass per Unit Volume Mass per Unit Volume Mass per Unit Volume Mass per Unit Volume Machanical Property Data Modify/Show Material Property Data Material Property Data	spendent Prope	Material Damping Pr tries ancel Change Change /Show Notes ify Mass Density 7.698E-08 0 20000 0.0000117 Design Data	<pre>operties operties kN/mm³ kN-s²/mm⁴ N/mm² 1/C </pre>
Time De Time De OK Aterial Property Data Seneral Data Material Name Material Name Material Type Directional Symmetry Type Material Notes Material Data	spendent Prope	Material Damping Pr tries ancel Change /Show Notes ify Mass Density 7.698E-08 0 200000 0.0000117 Design Data Material Damping Pr	operties

Şekil D.1 : Malzeme tanımları.

Diaphragms Click to: SR-Diaphragm Add New Diaphragm Modfy/Show Diaphragm Diaphragm Delete Diaphragm Rigidity OK Cancel	SR-Diaphragm Semi Rigid Cancel

Şekil D.2 : Yarı-rijit diyafram tanımı.

Loads	Туре	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load	Click To: Add New	Load
Zati	Dead	~ 1	~	Modify L	oad
Zati	Dead	1			
Kaplama	Dead	0		Modify Later	al Load
Cephe EXS1	Dead Seismic	0	TSC-2018	Delete L	.oad
EXS2	Seismic	0	TSC-2018		
EYS2	Seismic	Ö	TSC-2018		
				ОК	Cancel
iss Source Data	\$	Şekil D.3 : Y	Tük biçimleri.		
ass Source Data Mass Source Name	MassSource	Şekil D.3 : Y	'ük biçimleri. Mass Multiplers for Lo Load Patterr	had Patterns n Multiplier	
ass Source Data Mass Source Name	MassSource	Sekil D.3 : Y	Yük biçimleri.	had Patterns n Multiplier v 1	
ass Source Data Mass Source Name Mass Source	MassSource	Sekil D.3 : Y	Yük biçimleri. Mass Multplers for Lo Load Patterr Zati Cati	n Multipler	Add
Ass Source Data Mass Source Name Ass Source Element Self Mass	MassSource	Şekil D.3 : Y	Tük biçimleri. Mass Mutiplers for Lo Load Patterr Zati Zati Kaplama Cephe	nad Patterns n Multiplier V 1 1 1	Add
Additional Mass	MassSource	Şekil D.3 : Y	Yük biçimleri. Mass Multipliers for Lo Load Patterr Zati Zati Kaplama Cephe Hareketii	had Patterns h Multiplier V 1 1 1 0.3	Add Modify Delete
Additional Mass	MassSource	Şekil D.3 : Y	Tük biçimleri. Mass Mutiplers for Lo Load Patterr Zati Zati Kaplama Cephe Hareketli	a Multiplier Val Patterns Multiplier V 1 1 1 0.3	Add Modify Delete
Additional Mass Additional Mass Additional Mass Additional Mass Additional Mass Additional Mass Additional Mass	MassSource	Şekil D.3 : Y	Tük biçimleri. Mass Mutipiers for Lo Load Patterr Zati Zati Zati Zati Zati Kaplama Cephe Hareketi Mass Options	n Multiplier V 1 1 1 1 0.3	Add Modify Delete
Adgust Diaphragm Lateral Mass ato Diaphragm Valiants ato Diaphragm V	Isss to Move Mass Centroid by Width in X Direction	Şekil D.3 : Y	Tük biçimleri. Mass Multiplers for Lo Load Patterr Zati Zati Zati Kaplama Cephe Hareketi Mass Options ☑ Include Lateral M	and Patterns Multiplier V 1 1 1 0.3 lass	Add Modify Delete
Adgust Diaphragm Lateral M Mass Source	ItassSource	Şekil D.3 : Y	Tük biçimleri. Mass Multiplers for Lo Load Patterr Zati Zati Zati Zati Zati Zati Zati Zati Mass Options ☑ Include Lateral M ☐ Include Vertical M	had Patterns Multiplier V 1 1 1 0.3 lass Mass	Add Modify Delete

Şekil D.4 : Kütle kaynağı.

Modal Case Name		Modal		Design
Modal Case SubType		Eigen	```	V Notes
Exclude Objects in this Group		Not Applicable		
Mass Source		MassSource		
P-Delta/Nonlinear Stiffness				
Use Preset P-Delta Settings	None		Modify/Show	
 Use Nonlinear Case (Loads at E Nonlinear Case 	nd of Case NC	DT Included)		
Loads Applied				
Advanced Load Data Does NOT Ex	ist			Advanced
Other Parameters				
Maximum Number of Modes			25	
Minimum Number of Modes			1	
Frequency Shift (Center)			0	cyc/sec
Cutoff Frequency (Radius)			0	cyc/sec
Convergence Tolerance			1E-09	
Allow Auto Frequency Shifting				
	ОК	Cancel		
Şekil	D.5 : M	Iodal analiz	yük durumı	1. 1 Definition - From File

×

	0.05 O Frequency vs Value
	Function File File Name D:\Kullanıcılar\MGEZER\Desktop\TSC2018.txt
	Header Lines to Skip O Convert to User Defined View File
Define Response Spectrum Functions	Function Graph
Add New Function Modify/Show Spectrum Delete Spectrum OK Cancel	0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 10.0

Şekil D.6 : Azaltılmış tasarım spektrumunun modele eklenmesi.

Load Case Name		EXD		Design	
Load Case Type		Response Spectra	m	Noton	
Exclude Objects in this Gro	aud	Not Applicable		Notes	
Mass Source		Previous (MassSo	Previous (MassSource)		
		Trettous (massoc	uice)		
ids Applied	Lond News	F ormation	Carla Fastar	- 0	
Acceleration U	J1	DD2_ZC_R6_D25	9806.65	Add	
				Delete	
er Parameters					
Modal Load Case		Modal		~	
	a 	Piaid Emguanay f1		~	
	sponse	Rigid Frequency, f			
		Periodic + Rigid Type			
Earthquake Duration	n. td	Fonodio - Frigia Typo			
Directional Combination Ty	/pe	SRSS	1	~	
Absolute Directional	Combination Scale	Factor			
Modal Damping	Constant at 0.05		Modify/Show		
			-		
Diaphragm Eccentricity Case Data	0.05 for All Diaphra	agms DK Cano	Modify/Show		
Diaphragm Eccentricity	0.05 for All Diaphra	agms DK Cano	Modify/Show		
Diaphragm Eccentricity Case Data neral Load Case Name	0.05 for All Diaphro	agms DK Canc	Modify/Show	Design	
Diaphragm Eccentricity Case Data neral Load Case Name Load Case Type Evolutie Objecte in this Gro	0.05 for All Diaphr	agms DK Cano EYD Response Spectru	m	· Design ∨ Notes	
Diaphragm Eccentricity Case Data heral Load Case Name Load Case Type Exclude Objects in this Gro Mass Source	0.05 for All Diaphr	agms DK Cance EYD Response Spectru Not Applicable Province (March	Modify/Show	· Design ✓ Notes	
Diaphragm Eccentricity Case Data heral Load Case Name Load Case Type Exclude Objects in this Gro Mass Source	0.05 for All Diaphro	agms DK Cance EYD Response Spectru Not Applicable Previous (MassSc	Modify/Show	Design V Notes	
Diaphragm Eccentricity Case Data neral Load Case Name Load Case Type Exclude Objects in this Gro Mass Source ads Applied	0.05 for All Diaphra	agms DK Cano Response Spectru Not Applicable Previous (MassSc	Modify/Show	Design Notes	
Diaphragm Eccentricity Case Data Load Case Name Load Case Type Exclude Objects in this Gro Mass Source ads Applied Load Type Acceleration U	0.05 for All Diaphro	agms DK Cance DK Response Spectru Not Applicable Previous (MassSc Function DD2 ZC R6 D25	m Scale Factor 9806.65	Design V Notes Add	
Diaphragm Eccentricity Case Data Case Data Load Case Name Load Case Type Exclude Objects in this Gro Mass Source ads Applied Load Type Acceleration U	0.05 for All Diaphro	agms DK Cance DK Response Spectru Not Applicable Previous (MassSc Function DD2_ZC_R6_D25	m surce) Scale Factor 9806.65	Design Design Add Delete	
Diaphragm Eccentricity Case Data neral Load Case Name Load Case Type Exclude Objects in this Gro Mass Source ads Applied Load Type Acceleration U	0.05 for All Diaphra	agms DK Cance Cance Response Spectru Not Applicable Previous (MassSoc DD2_ZC_R6_D25	Modify/Show eel m surce) Scale Factor 9806.65	Design Design Notes Add Delete Advanced	
Diaphragm Eccentricity Case Data eral Load Case Name Exclude Objects in this Gro Mass Source dds Applied Load Type Acceleration U	0.05 for All Diaphro	agms DK Cance EYD Response Spectru Not Applicable Previous (MassSc DD2_ZC_R6_D25	m surce) Scale Factor 9806.65	Design Design Notes Add Delete Advanced	
Diaphragm Eccentricity Case Data teral Load Case Name Load Case Type Exclude Objects in this Gro Mass Source ds Applied Load Type Acceleration U er Parameters	0.05 for All Diaphro	agms DK Canc DK Canc Feesponse Spectru Not Applicable Previous (MassSc Function DD2_ZC_R6_D25	m surce) Scale Factor 9806.65	Design Design Notes Add Delete Advanced	
Diaphragm Eccentricity Case Data Case Data Load Case Name Load Case Name Exclude Objects in this Gro Mass Source ds Applied Load Type Acceleration U er Parameters Modal Load Case Unded Ca	0.05 for All Diaphra	agms DK Cance DK Cance ExY Response Spectru Not Applicable Previous (MassSc DD2_ZC_R6_D25 Modal Cocc	Modify/Show	Design Design Notes Add Delete Advanced	
Diaphragm Eccentricity Case Data Case Data Load Case Name Load Case Name Exclude Objects in this Gro Mass Source Ids Applied Load Type Acceleration U er Parameters Modal Load Case Modal Combination Methor Load Picid Picid Picid Picit de	0.05 for All Diaphro	agms DK Canc DK Canc EYD Response Spectru Not Applicable Previous (MassSc DD2_ZC_R6_D25 DD2_ZC_R6_D25 Modal CQC Brid Francescu f1	Modify/Show el Modify/Show Sel Scale Factor 9806.65	Design Design Notes Add Delete Advanced	
Diaphragm Eccentricity Case Data Case Data Ineral Load Case Name Load Case Type Exclude Objects in this Gro Mass Source dds Applied Load Type Acceleration U er Parameters Modal Load Case Modal Load Case Modal Combination Methor D Include Rigid Re	0.05 for All Diaphro	agms DK Canc DK Canc DK Response Spectru Response Spectru Not Applicable Previous (MassSc Function DD2_ZC_R6_D25 Modal CQC Rigid Frequency, f1 Bidd Frequency, f2	m surce) Scale Factor 9806.65	Design Design Design Add Delete Advanced	
Diaphragm Eccentricity Case Data neral Load Case Name Load Case Type Exclude Objects in this Gro Mass Source ids Applied Load Type Acceleration U er Parameters Modal Load Case Modal Load Case Modal Combination Methor I Include Rigid Re	0.05 for All Diaphro	agms DK Cance DK Cance C	Modify/Show eel m m surce) Scale Factor 9806.65		
Diaphragm Eccentricity Case Data Case Data Load Case Name Load Case Name Exclude Objects in this Gro Mass Source dds Applied Load Type Acceleration U er Parameters Modal Load Case Modal Combination Methor I Include Rigid Re Earthquake Duration	0.05 for All Diaphr Dup Load Name 12 d esponse	agms DK Cance DK Cance EYD Response Spectru Response Spectru Not Applicable Previous (MassSc DD2_ZC_R6_D25 Modal CQC Rigid Frequency, f1 Rigid Frequency, f2 Periodic + Rigid Type	Modify/Show eel Modify/Show Scale Factor 9806.65 9806.65	Design Design Notes Add Delete Advanced	
Diaphragm Eccentricity Case Data Case Data eral Load Case Name Load Case Type Exclude Objects in this Gro Mass Source dds Applied Load Type Acceleration U er Parameters Modal Load Case Modal Combination Methor Directional Combination Ty	0.05 for All Diaphr Dup Load Name 12 d sponse n, td pp	agms DK Canc DK Canc DK Canc	Modify/Show Modify/Show Modify/Show Scale Factor 9806.65 9806.65		
Diaphragm Eccentricity Case Data Case Data Icad Case Name Load Case Type Exclude Objects in this Gro Mass Source ads Applied Load Type Acceleration U er Parameters Modal Load Case Modal Load Case Modal Combination Methor Include Rigid Re Earthquake Duration Directional Combination Ty Absolute Directional	0.05 for All Diaphri Load Name 12 d esponse n, td pe 1 Combination Scale	agms DK Canc DK Canc DK Response Spectru Response Spectru Not Applicable Previous (MassSc Function DD2_ZC_R6_D25 Modal CQC Rigid Frequency, f1 Rigid Frequency, f2 Periodic + Rigid Type SRSS Factor	Modify/Show		
Diaphragm Eccentricity Case Data Case Data Case Data Case Data Case Name Load Case Name Load Case Type Exclude Objects in this Gro Mass Source Case Type Codd Type Codd Type Codd Type Case Modal Load Case Modal Load Case Modal Combination Method Case Modal Combination Method Case Casthquake Duration Directional Combination Ty Absolute Directional Modal Damping	0.05 for All Diaphr 0.05 for All Diaphr 0.05	agms DK Cance DK Cance C	Modify/Show		

Şekil D.7 : Dinamik analiz yük durumları.

Direction and Eccentricity		Seismic Coefficients	
X Dir Y Dir		0.2 Sec Spectral Accel, Ss	1.102
X Dir + Eccentricity Y Dir	+ Eccentricity	1 Sec Spectral Accel, S1	0.303
X Dir - Eccentricity Y Dir	- Eccentricity	Long-Period Transition Period	6
Ecc. Ratio (All Diaph.)	0.05	Site Class	7C ×
Overwrite Eccentricities	Overwrite	Site Coefficient Es	1.2
Time Period		Site Coefficient, F1	1.5
O Approximate Ct (ft), x =		Calculated Coefficients	1
O Program Calculated Ct (ft), x =			1 3224
User Defined T =	1.81 sec	SD3 = (2/3) * Ex * S1	0.4545
Story Range		3DT=(2/3) FV 3T	0.1010
Top Story for Seismic Loads	15K=23K=77 2! >	Factors	
Bottom Story for Sejemic Loade	Race	Response Modification, R	6
Contrast only for Colorino Longa		System Overstrength, D	2.5
		Occupancy Importance, I	1
OK Cance	el		
OK Cance C-2018 Seismic Loading	el		
OK Cance C-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity	3	Seismic Coefficients	
OK Cance C-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir Y Dir		Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss	1.102
OK Cance GC-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir X Dir X Dir X Dir + Eccentricity Y Dir	+ Eccentricity	Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1 Sec Spectral Accel, S1	1.102
OK Cance GC-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir Y Dir X Dir + Eccentricity Y Dir X Dir - Eccentricity Y Dir	+ Eccentricity - Eccentricity	Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1 Sec Spectral Accel, S1 Long-Period Transition Period	1.102 0.303 6
OK Cance C-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir Y Dir X Dir + Eccentricity Y Dir X Dir - Eccentricity Y Dir Ecc. Ratio (All Diaph.)	+ Eccentricity - Eccentricity 0.05	Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1 Sec Spectral Accel, S1 Long-Period Transition Period Site Class	1.102 0.303 6 ZC ~
OK Cance C-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir + Eccentricity Y Dir X Dir + Eccentricity Y Dir Cc. Ratio (All Diaph.) Overwrite Eccentricities	+ Eccentricity - Eccentricity 0.05 Overwrite	Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1 Sec Spectral Accel, S1 Long-Period Transition Period Site Class Site Coefficient, Fs	1.102 0.303 6 2C ~ 1.2
OK Cance SC-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir Y Dir X Dir + Eccentricity Y Dir X Dir - Eccentricity Y Dir Ecc. Ratio (All Diaph.) Overwrite Eccentricities	+ Eccentricity - Eccentricity 0.05 Overwrite	Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1 Sec Spectral Accel, S1 Long-Period Transition Period Site Class Site Coefficient, Fs Site Coefficient, F1	1.102 0.303 6 2C ~ 1.2 1.5
OK Cance C-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir X Dir Y Dir X Dir + Eccentricity X Dir - Eccentricity Y Dir Ecc. Ratio (All Diaph.) Overwrite Eccentricities	+ Eccentricity - Eccentricity 0.05 Overwrite	Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1 Sec Spectral Accel, S1 Long-Period Transition Period Site Class Site Coefficient, Fs Site Coefficient, F1 Calculated Coefficients	1.102 0.303 6 2C ~ 1.2 1.5
OK Cance GC-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir X Dir Y Dir X Dir Cecentricity Y Dir Construction X Dir Construction Y Dir Construction Construction Construction Construction Construction Operation O Rogram Calculated Ct ft), x =	+ Eccentricity - Eccentricity 0.05 Overwrite	Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1 Sec Spectral Accel, S1 Long-Period Transition Period Site Class Site Coefficient, Fs Site Coefficient, F1 Calculated Coefficients SDS = (2/3) * Fa * Ss	1.102 0.303 6 ZC 1.2 1.5 1.3224
OK Cance C-2018 Seismic Loading C-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir X Dir + Eccentricity X Dir - Eccentricity X Dir - Eccentricity C - Ratio (All Diaph.) Overwrite Eccentricities Time Period Approximate Ct (ft), x = Image: Original Calculated Ct (ft), x = Image: User Defined T =	+ Eccentricity - Eccentricity 0.05 Overwrite 1.52 sec	Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1 Sec Spectral Accel, S1 Long-Period Transition Period Site Class Site Coefficient, Fs Site Coefficient, F1 Calculated Coefficients SDS = (2/3) * Fa * Ss SD1 = (2/3) * Fy * S1	1.102 0.303 6 ZC ∨ 1.2 1.5 1.3224 0.4545
OK Cance GC-2018 Seismic Loading C-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir Y Dir X Dir + Eccentricity X Dir - Eccentricity Y Dir Correction Correction Overwrite Eccentricities Overwrite Eccentricities Orgram Calculated Ct (ft), x = Image	+ Eccentricity - Eccentricity 0.05 Overwrite 1.52 sec	Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1 Sec Spectral Accel, S1 Long-Period Transition Period Site Class Site Coefficient, Fs Site Coefficient, F1 Calculated Coefficients SDS = (2/3) * Fa * Ss SD1 = (2/3) * Fv * S1	1.102 0.303 6 ZC 1.2 1.5 1.3224 0.4545
OK Cance C-2018 Seismic Loading C-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir X Dir + Eccentricity X Dir - Eccentricity X Dir - Eccentricity Y Dir Ecc. Ratio (All Diaph.) Overwrite Eccentricities Overwrite Eccentricities Ime Period Approximate Ct (ft), x = Image Top Story for Seismic Loads	+ Eccentricity - Eccentricity 0.05 Overwrite 1.52 sec 15K=23K=77.25 v	Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1 Sec Spectral Accel, S1 Long-Period Transition Period Site Class Site Coefficient, Fs Site Coefficient, F1 Calculated Coefficients SDS = (2/3) * Fa * Ss SD1 = (2/3) * Fv * S1 Factors	1.102 0.303 6 ZC ~ 1.2 1.5 1.3224 0.4545
OK Cance C-2018 Seismic Loading C-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir X Dir + Eccentricity Y Dir X Dir - Eccentricity Y Dir Ecc. Ratio (All Diaph.) Overwrite Eccentricities Overwrite Eccentricities Ime Period Approximate Cit (ft), x = Image Top Story for Seismic Loads Bottom Story for Seismic Loads	+ Eccentricity - Eccentricity 0.05 Overwrite 1.52 sec 15K-23K=77.2! ~ Base ~	Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1 Sec Spectral Accel, S1 Long-Period Transition Period Site Class Site Coefficient, Fs Site Coefficient, F1 Calculated Coefficients SDS = (2/3) * Fa * Ss SD1 = (2/3) * Fv * S1 Factors Response Modification, R	1.102 0.303 6 ZC 1.2 1.5 1.3224 0.4545
OK Cance C-2018 Seismic Loading C-2018 Seismic Loading Direction and Eccentricity X Dir X Dir + Eccentricity Y Dir X Dir + Eccentricity Y Dir Correction Correction Overwrite Eccentricities Overwrite Eccentricities Overwrite Eccentricities Overwrite Eccentricities Orgram Calculated Q (ft), x = Iw User Defined T = Ronge Top Story for Seismic Loads Bottom Story for Seismic Loads	+ Eccentricity - Eccentricity 0.05 Overwrite 1.52 15K=23K=77.2! ~ Base ~	Seismic Coefficients 0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1 Sec Spectral Accel, S1 Long-Period Transition Period Site Class Site Coefficient, Fs Site Coefficient, F1 Calculated Coefficients SDS = (2/3) * Fa * Ss SD1 = (2/3) * Fv * S1 Factors Response Modification, R System Overstrength, D	1.102 0.303 6 ZC 1.2 1.5 1.3224 0.4545

Şekil D.8 : Statik analiz yük durumları.

Combinations		Click to:	Load Combination Name	ST02-1.26G+Q+EXD+0.3EYD	
GT01-1.26G+Q+D*EXD+0.3D*EYD	^	Add New Combo	Combination Type	Linear Add	
GT03-0.64G+Q+D*EXD+0.3D*EYD GT04-0.64G+Q+0.3D*EXD+D*EYD		Add Copy of Combo	Notes Auto Combination	Modify/Show Not	es
LR01-G+Q LR02-G+Q+EXD		Modify/Show Combo	Define Combination of Load Case/Co	mbo Results	
LR03-G+Q+EYD			Load Name	Scale Factor	
LR04-G+EXD		Delete Combo	G	1.26	Add
LR05-G+EYD			Q	1	Delete
0			EXD	1	
ST02-1.26G+Q+EXD+0.3EYD		Add Default Design Combos	EYD	0.3	
ST04-0.64G+Q+EXD+0.3EXD+E1D ST05-0.64G+Q+EXD+0.3EYD	~	Convert Combos to Nonlinear Cases			

Şekil D.9 : Yük birleşimlerinin tanımlanması.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad	:Mehmet Gezer
Doğum Tarihi ve Yeri	: 29/07/1993-Konya
E-posta	: gzrmehmet42@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Yükseklisans : 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 20/06/2014-17/07/2014 tarihleri arasında Altınsoy İnşaat, Taahhüt, Proje ve Ltd. Şti. 'de şantiye stajı yaptı.
- 02/01/2015-17/01/2015 tarihleri arasında Hasen Yapı İnş. A.Ş. 'de şantiye stajı yaptı.
- İTÜ-Deprem Müh. ve Afet Yön. Enstitüsünde "İstanbul'daki Tarihi Yapılarda Afet Riskinin Azaltılmasına Yönelik İzleme, Değerlendirme ve Güçlendirme için Pilot Çalışmalar" konusu altında yapılan deneylerde gönüllü öğrenci olarak çalışmalara yardımcı oldu.
- 17/02/2016-15/04/2016 tarihleri arasında Erdemli Proje ve Müşavirlik San. Tic. Ltd. Şti. 'de ofis stajı yaptı.
- 28/09/2016 tarihinden beri Erdemli Proje ve Müşavirlik San. Tic. Ltd. Şti. 'de İnşaat Mühendisi olarak çalışıyor.