

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOLGU DUVARLI BETONARME  
ÇERÇEVELERİN DEPREM ETKİLERİ  
ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**Erkan DURMAZGEZER**

**Mayıs, 2013**

**İZMİR**

**DOLGU DUVARLI BETONARME  
ÇERÇEVELERİN DEPREM ETKİLERİ  
ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

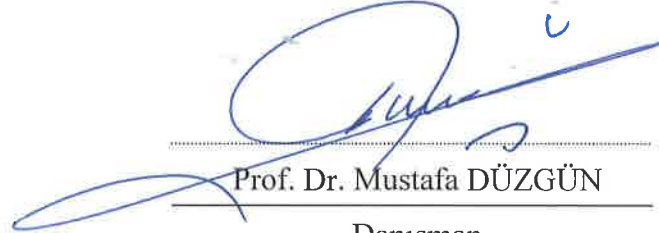
**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı**


**Erkan DURMAZGEZER**

**Mayıs, 2013**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ERKAN DURMAZGEZER, tarafından PROF. DR. MUSTAFA DÜZGÜN yönetiminde hazırlanan “DOLGU DUVARLI BETONARME ÇERÇEVELERİN DEPREM ETKİLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr. Mustafa DÜZGÜN  
Danışman

  
Prof. Dr. Atilla ORBAY  
Jüri Üyesi

  
Doç. Dr. Kasım Armağan KORKMAZ  
Jüri Üyesi

  
Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Bana mesleğimi sevdiren, lisans yıllarımdan bu yana mesleki bilgilerimden gerekse hayat tecrübelerinden faydalandığım, tez çalıőmam süresince desteğini esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa DÜZGÜN'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Lisans yılarımdan itibaren birlikte çalışma fırsatı bulduğum, bana her konuda yardımcı olan ve yol gösteren, tez çalıőmamın őekillenmesinde büyük emeği geçen, kendisinden çok őey öğrendiğim çok değerli öğretim görevlisi hocam Sayın Dr. Özgür BOZDAĞ'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalıőmam süresince, bana değerli vaktini ayıran ve her konuda desteğini aldığım değerli hocam Sayın Yard. Doç. Dr. Carmen AMADDEO'ya sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen beni bu günlere getiren sevgili annem Binnaz DURMAZGEZER ve babam Haluk DURMAZGEZER'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

# DOLGU DUVARLI BETONARME ÇERÇEVLERİN DEPREM ETKİLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

## ÖZ

Dolgu duvarların, deprem etkileri altındaki betonarme çerçevelerin davranışını etkilediği pek çok araştırmacı tarafından yapılan deneysel ve analitik araştırmalar sonucunda belirlenmiştir. Mevcut şartnameler, dolgu duvarlı çerçevelerin analiz, tasarım ve modellenmesi konusunda yeterince kriter ortaya koyamamaktadır. Bu çalışmada, betonarme yapılarda dolgu duvarların genel yapı davranışına olan etkisi incelenmiştir.

Çalışmada, dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız betonarme çerçevelerin düzlem içi yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Dolgu duvarın yatay yük etkileri altında davranışını temsilen eşdeğer diyagonal çapraz çubuk ve çerçeve ile dolgu duvar arasındaki ara yüz etkileşimini de hesaba katan hassas sonlu elemanlar modelleri kullanılmıştır. Dolgu duvarlı çerçevenin eşdeğer diyagonal çubuklarla modellenmesinde tekli, üçlü ve beşli eşdeğer diyagonal çubuklu modeller kullanılmıştır. Dolgu duvarlı çerçevenin sonlu elemanlarla analizinde ise temas ara yüz şartlarını hesaba katan sonlu eleman modeli dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar modellemesinde analiz hassasiyeti için gerekli olan uygun eleman sayısı adedi belirlenmeye çalışılmıştır. Gerek diyagonal çubuklu gerekse sonlu elemanlarla modellenmiş dolgu duvarlı çerçevelerin yatay yükler altında doğrusal olmayan davranışının incelenmesinde artımsal itme analizi yöntemi kullanılmıştır. Çerçevelerin, düşey yük ve artımsal itme yükleri altında tepe seviyelerinin yer değiştirme analizleri yapılmıştır. Tek kat – tek açıklıklı, tek kat – iki açıklıklı, beş kat – üç açıklıklı düzlem çerçeve modellerinde dolgu duvarlı ve duvarsız çerçeveler için kapasite eğrileri, kat deplasmanları, plastik dönmeler elde edilmiş ve bunların her bir model için karşılaştırılması yapılmıştır.

**Anahtar sözcükler:** Dolgu duvarlı çerçeve yapıları, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu, tuğla birimleri, itme analizi

# **THE RESEARCH ON BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE FRAMED INFILLED WALLS EFFECTED BY EARTHQUAKE**

## **ABSTRACT**

The effect of infilled panels on the response of reinforced concrete frames subjected to seismic action is widely recognised by many researchers and has been carried subject of numerous experimental and analytical investigations. Current codes do not have an adequate guidance for treating the modeling, analysis and design of infilled structures. In this study, the effect of infill walls on structural behavior is investigated.

In this study, the behaviour of reinforced concrete frame structures with and without infill walls under in plane loads are analyzed. In these investigations, various types of equivalent diagonal strut modelings and a precised finite-element micromodel by considering contact interface conditions between the frame and the infill is used. One, three and five equivalent diagonal struts modelings which represents the infilled frame structure is used. On the other hand, the finite element micromodel by considering contact interface conditions is introduced. The optimum number of division which is required for analysis sensitivity for the model with finite elements is tried to be determined. After determining the required mesh density for finite element model, incremental nonlinear static pushover analysis has been carried out for both the models with finite elements and equivalent struts. The lateral load capacities of the frame are investigated due to dead, live and earthquake loads. The capacity curves, storey displacements, plastic rotations are obtained for the planar frames having one story – one bay, one story – two bays, two storeys – two bays and five storeys – three bays and compared for each of models. The lateral load capacities of brick infilled frames and without infilled frames are compared.

**Keywords:** Infilled framed structures, equivalent diagonal compression strut, pushover analysis

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

TEZ SINAVI SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xvi

### **BÖLÜM BİR – GİRİŞ .....** 1

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	3
---------------------------------------	---

### **BÖLÜM İKİ – DOLGU DUVARLI ÇERÇEVE SİSTEMLERİN DÜZLEM İÇİ YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI VE DOLGU ELEMANLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ .....** 5

2.1 Giriş.....	5
2.2 Dolgu Duvarlı Çerçevelere Etkiyen Kuvvetler ve Genel Davranış Özellikleri. 6	
2.2.1 Dolgu Duvarlı Çerçevelere Etkiyen Kuvvetler.....	10
2.2.2 Dolgu Duvarlı Çerçevelerin Genel Davranış Özellikleri.....	10
2.3 Düzlem İçi Yatay Yük Etkisi Altında Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Görülen Hasar Mekanizmaları .....	10
2.3.1 Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Dolgu Duvar Panelinde Oluşan Hasarlar ..	10
2.3.1.1 Dolgu Duvar Panelinde Kayma Çatlağı Oluşumu.....	13
2.3.1.2 Dolgu Duvar Panelinde Basınç Çatlağı Oluşumu.....	21
2.3.1.3 Dolgu Duvar Panelinde Eğilme Çatlağı Oluşumu.....	23
2.3.2 Yatay Yük Etkisi Altındaki Dolgu Duvarlı Çerçevelerin Duvar Panellerinde Farklı Göçme Türlerine Ait Göçme Zarfı.....	23

2.3.3 Yatay Yük Etkisi Altındaki Dolgu Duvarlı Çerçevelerin Çerçeve Sisteminde Oluşan Hasarlar.....	24
2.3.3.1 Çerçeve Sisteminde Oluşan Eğilme Göçme Mekanizması.....	25
2.3.3.2 Çerçeve Elemanlarda Eksenel Yük Göçmesi .....	26
2.3.3.3 Kolon Elemanlarda Kayma Göçmesi Oluşumu.....	27
2.3.3.4 Kolon – Kiriş Bölgesi Birleşim Bölgesi Hasarı Oluşumu .....	28
2.4 Taşıyıcı Sistemde Kullanılan Duvar Türleri ve Özellikleri.....	29
2.4.1 Kil Tuğla Birimleri .....	29
2.4.2 Beton - Gaz Beton Tuğla (Panel) Birimleri .....	30
2.4.3 Harç.....	31
2.4.4 Dolgu Duvar Yapımında Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri	33
2.4.4.1 Tuğla Birimlerin Mekanik Özellikleri .....	34
2.4.4.2 Bağlayıcı Harçların Mukavemet Özellikleri.....	36
2.4.5 Tuğla Birimleri ile Oluşturulmuş Dolgu Duvar Panellerin Mekanik Özellikleri .....	38

## **BÖLÜM ÜÇ – DÜZLEM İÇİ YÜK ETKİLERİ ALTINDA DOLGU DUVARLI DÜZLEM ÇERÇEVELERİN MODELLENME TEKNİKLERİ ..... 43**

3.1 Giriş.....	43
3.2 Birim Elemanlardan Oluşturulan Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Makro Modelleme.....	43
3.3 Birim Elemanlardan Oluşturulan Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Mikro Modelleme (Sonlu Eleman Ağ Modellemesi).....	47
3.3.1 Dolgu Duvar – Çerçeve Ara Yüz Elemanı Olarak “Gap” Elemanı ve Problemin Matematiksel İfadesi .....	48
3.3.2 Mikro Modellemede Genel Ara Yüz Eleman Tanımı .....	52
3.3.3 Dolgu Duvarlı Düzlemsel Çerçeve Sistemlerin Analizi İçin Kullanılabilecek Örnek Bir Modelleme.....	54
3.4 Dolgu Duvarın Eşdeğer Tekil Diyagonal Basınç Çubuklu Modellenmesine İlişkin Çalışmalar ve Parametrik Örnekler .....	56

3.4.1 Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuk Genişliğinin Hesabına Yönelik Çalışmalar .....	57
3.4.2 Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuk Genişliği Hesabına İlişkin Parametrik Örnekler .....	70
3.4.3 Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuk Genişliği ile İlgili Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.....	74

**BÖLÜM DÖRT – DÜZLEM İÇİ YÜK ETKİSİ ALTINDAKİ DOLGU DUVARLI DÜZLEM ÇERÇVELERİN EŞDEĞER DİYAGONAL BASINÇ ÇUBUĞU VE SONLU ELEMANLAR İLE MODELLENMESİ..... 75**

4.1 Giriş .....	76
4.2 Yer Değiştirme Esaslı Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi Algoritması ve Plastik Mafsal Hipotezi Kavramı .....	73
4.3 Tez Çalışmasında Esas Alınacak Dolgu Duvarlı Düzlem Çerçeve Modeller ve Teorik Açıklamaları .....	82
4.3.1 Tez Çalışmasında Kullanılacak Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuk Modelleri.....	82
4.3.2 Tez Çalışmasında Kullanılacak Sonlu Eleman Ağ Modeli .....	84
4.3.3 Sonlu Elemanlar Ağ Modeli Duvar Paneli ile Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuklarının Mekanik Özelliklerinin Benzeştirilmesi.....	85

**BÖLÜM BEŞ – DÜZLEM İÇİ YÜK ETKİSİ ALTINDAKİ DOLGU DUVARLI DÜZLEM ÇERÇEVE MODELLERİN YER DEĞİŞTİRME ESASLI DOĞRUSAL OLMAYAN HESAP YÖNTEMİYLE ANALİZİ .....**

5.1 Giriş .....	87
5.2 Dolgu Duvarlı Düzlem Çerçevenin Sonlu Eleman Ağ Modelinde Optimum Bölme Sayısının Belirlenmesi .....	88
5.2.1 Dolgu Duvar Panelinin Sonlu Eleman Ağı ile Modellendiği Örneklerin Değerlendirilmesi .....	95

5.3 Tek Kat Tek Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin Düzlem İçi Yük Etkisi Altında Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Çözümü .....	96
5.4 Tek Kat İki Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin Düzlem İçi Yük Etkisi Altında Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Çözümü .....	101
5.5 İki Kat İki Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin Düzlem İçi Yük Etkisi Altında Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Çözümü .....	103
5.6 Beş Kat Üç Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin Düzlem İçi Yük Etkisi Altında Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Çözümü .....	106
<b>BÖLÜM ALTI – TARTIŞMA VE SONUÇLAR .....</b>	<b>112</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>119</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Dolgu Duvarların Yapıda Uygunsuz Konumlandırılması Sonucu Oluşan Mekanizma Durumları .....	2
Şekil 2.1 Genel Anlamda Duvar Türleri .....	6
Şekil 2.2 Dolgu Duvarlı Çerçevelere Etkiyen Kuvvetler ve Düzlem İçi Kuvvet Etkisi Altındaki Genel Deformasyon Şekli .....	7
Şekil 2.3 Altında Dolgu Duvar Olan ve Olmayan Kirişlerdeki Çatlaklar .....	8
Şekil 2.4 İki Yanında Bant Pencere Olan Kolon .....	8
Şekil 2.5 Kolon Boyunun Kısılması Sonucu Kolon Kesme Kuvveti Mertebesinin Artışı ( $V_k > V$ ) .....	9
Şekil 2.6 Dolgu Duvar Elemanların Çerçeve İçindeki Yerleşiminin Yapı Davranışına Etkisi .....	9
Şekil 2.7 Dolgu Duvar ve Çerçeve Sisteminde Düzlem İçi Yük Etkileri Altındaki Genel Deformasyonlar .....	10
Şekil 2.8 Dolgu Duvarlı Çerçevelerin Duvar Elemanlarında Görülen Hasar Türleri .....	11
Şekil 2.9 Yatay Kuvvet Etkisi Altında Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Diyagonal Boyunca Görülen Asal Gerilmeler .....	12
Şekil 2.10 Dolgu Duvar Derz Birleşiminin İsimlendirilmesi ve Derzlerde Oluşan Gerilme .....	12
Şekil 2.11 Duvar Panelindeki Gerilme Durumu ve Tuğla Birimindeki Gerilme Dağılımı .....	14
Şekil 2.12 Kritik Kayma Kuvveti Grafikleri .....	17
Şekil 2.13 Dolgu Duvarlarda Harç Derzleri Boyunca Görülen Kayma Çatlakları .....	17
Şekil 2.14 Dolgu Duvar Panellerinde Harç Derzleri Boyunca Görülen Yatay Kayma Çatlağı .....	18
Şekil 2.15 Dolgu Duvar Panelinde Karşılaşılan Yatay ve Adımlı Çatlaklar .....	18
Şekil 2.16 Dolgu Duvar Panelinde İki Eksenli Çekme – Basınç Gerilmesi Durumu .....	19
Şekil 2.17 Diyagonal Çekme Çatlağı Oluşumu .....	20

Şekil 2.18 Dolgu Duvar Paneli Yükseklik / Açıklık Oranına Bağlı Olarak Dolgu Duvar Panelinde Oluşan ( $V_t$ ) Kayma Kuvveti Grafiği.....	21
Şekil 2.19 Dolgu Duvar Panelinin Köşelerindeki Basınç Gerilmesi Nedeniyle Çatlak Oluşumu.....	22
Şekil 2.20 Dolgu Duvar Panelinde Eğilme Çatlağı Oluşumu .....	23
Şekil 2.21 Mann ve Müller Teorisine Göre Dolgu Duvar Paneli İçin Oluşturulan Göçme Zarfı .....	24
Şekil 2.22 Dolgu Duvarlı Çerçevelerin Çerçeve Elemanlarında Görülen Hasar Türleri.....	24
Şekil 2.23 Kolon Eleman Uçlarında Eğilme Sonucu Oluşan Göçme Mekanizması .....	25
Şekil 2.24 Açıklık Boyunca Meydana Gelen Eğilme Göçme Mekanizması .....	25
Şekil 2.25 Kolonda Çekme Hasarı Oluşumu.....	26
Şekil 2.26 Donatı Mesnetlenme Göçmesi .....	27
Şekil 2.27 Kolon Elemanda Kayma Göçmesi Oluşumu .....	27
Şekil 2.28 Dolgu Duvarın Yükleme Yapılan Köşesinde Oluşan Normal ve Kayma Gerilmesi Dağılımı .....	28
Şekil 2.29 Kolon – Kiriş Birleşim Bölgesi Hasarı .....	28
Şekil 2.30 Kil Tuğla Birimi .....	29
Şekil 2.31 Beton ve Gaz Beton Panelleri .....	30
Şekil 2.32 Kil Tuğla Birimlerinin Elastisite Modülü – Basınç Dayanımı Grafiği	35
Şekil 2.33 Ayrıma (Yarma) Deneyi Düzenegi .....	36
Şekil 2.34 Yanal Basınç Uygulanmış Durumda Harç Dayanımı Grafiği.....	38
Şekil 2.35 Farklı Tür Bileşenlerden Oluşan Harçların Gerilme – Birim Şekil Değişirme Diyagramları .....	38
Şekil 2.36 Basınç Etkisi Altındaki Tuğla Eleman ve Bağlayıcı Harçların Bağımsız ve Kompozit Davranışı.....	39
Şekil 2.37 Tuğla Birimi, Bağlayıcı Harç ve Dolgu Duvar Panelinin Tipik Gerilme – Birim Şekil Değişirme İlişkileri .....	40
Şekil 2.38 Basınç Etkisi Altındaki Tuğla Dolgu Duvarların Gerilme – Birim Şekil Değişirme Grafikleri .....	40

Şekil 3.1 Yatay Yük Etkisi Altında Dolgu Duvarda Oluşan Basınç Bölgesi ve Dolgu Duvarları Temsil Eden Eşdeğer Diyagonal Çapraz Çubuk Modeli .....	43
Şekil 3.2 Diyagonal Çapraz Çubuk Modelinin Düzenlenmiş Durumu ve Çoklu Çubuk Modelleri.....	44
Şekil 3.3 Eşdeğer Payanda Modeli .....	45
Şekil 3.4 Dolgu Duvarlı Çerçevelerin Yatay Kayma Etkisi Altındaki Davranışının Temsili için Leuchars ve Scrivener Tarafından Önerilen Model .....	46
Şekil 3.5 Dolgu Duvarında Kayma Göçmesi Beklenen Çerçevelerde Crisafulli Tarafından Önerilen Model .....	46
Şekil 3.6 Dolgu Duvarlı Çerçevenin Sonlu Eleman Ağ Modeli .....	48
Şekil 3.7 a) Birbirine Temas Eden Cisimlerin Üç Boyutlu Gösterimi b) Temas Noktalarındaki “i” Nokta Çiftlerinin Lokal Koordinat Sistemi ve Bu Sistemin Pozitif Yönleri.....	49
Şekil 3.8 a) Signori Tek Eksenli Temas Yasası b) Coulomb Sürtünme Yasası.....	51
Şekil 3.9 Dolgu Duvar Paneli ile Çerçeve Arasındaki Yay Elemanın Temsili.....	52
Şekil 3.10 Dolgu Duvar Paneli ile Çerçeve Arasındaki Ara Yüz Elemanı .....	52
Şekil 3.11 Dolgu Duvar Sistemin Dikdörtgen Sonlu Elemanlarla Modellenmesi	52
Şekil 3.12 a) 12 Serbestlik Dereceli Kenar Sonlu Elemanı b) 10 Serbestlik Dereceli Geçiş Sonlu Elemanı c) 8 Serbestlik Dereceli İç Bölge Sonlu Elemanı .....	56
Şekil 3.13 Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuğu Etkili Genişliği ve Dolgu Duvar – Çerçeve Arasındaki Temas Uzunluğunun Hesaplanmasında Kullanılan Parametreler.....	59
Şekil 3.14 $\lambda h < 7.85$ olması durumunda w/d Grafiği Oranı .....	62
Şekil 3.15 Düşey Yük Etkisinin Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuğu Etkili Genişliği Değeri Üzerindeki Etkisi .....	66
Şekil 3.16 Şekil Faktörü $L/h = 1$ Olan Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Düşey Yük Katkısının da Hesaba Katılarak Hesaplandığı Boyutsuz “Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuğu Genişliği” Oranı .....	68

Şekil 3.17 Şekil Faktörü $L/h = 1.5$ Olan Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Düşey Yük Katkısının da Hesaba Katılarak Hesaplandığı Boyutsuz “Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuğu Genişliği” Oranı .....	69
Şekil 3.18 Papiya ve Arkadaşları Tarafından Önerilen Modelin, Düşey Yük Etkisinin Hesaba Dahil Edilmediği FEMA356(2000) Modeli ile Karşılaştırılması ( $L/h = 1$ ) .....	69
Şekil 3.19 Diyagonal Basınç Çubuğu Hesabına İlişkin Tek Kat – Tek Açıklıklı Çerçeve Modeli .....	70
Şekil 4.1 İdeal Elasto – Plastik Malzemede Yükleme ve Boşalma .....	78
Şekil 4.2 Birleşim Noktasında Kolon ve Kirişte Oluşan Plastik Mafsal .....	79
Şekil 4.3 Betonarme Kesitteki Eğilme Momenti – Eğrilik İlişkisi ve Betonarme Kesitin Eğilme Etkisi Altında Çatlama Rijitliğinin Değişimi .....	79
Şekil 4.4 Karşılıklı Etkileşim Diyagramı .....	80
Şekil 4.5 Dolgu Duvarı Temsil Eden İki Ucu Mafsallı Çubukların Eksenel Yük – Plastik Şekil Değiştirme Grafiği .....	82
Şekil 4.6 Tez Çalışmasında Kullanılacak Olan Diyagonal Basınç Çubuklu Düzlem Çerçeve Modelleri .....	83
Şekil 4.7 Eşdeğer Üçlü ve Beşli Diyagonal Basınç Çubuklu Modellerde Genişlik Oranları .....	83
Şekil 4.8 Tez Çalışmasında Kullanılacak Olan Sonlu Eleman Ağ Modeli .....	84
Şekil 4.9 Sonlu Eleman Ağ Modelinde Çerçeve Elemanı İçerisinde Konumlandırılacak Dolgu Duvar Panel Elemanın Gerilme – Birim Şekil Değiştirme İlişkisi .....	85
Şekil 4.10 Dolgu Duvarlı Düzlem Çerçeve Eleman İçerisine Konumlanacak Panelin, Sonlu Eleman Ağ ve Eşdeğer Diyagonal Çubuk Eleman Mekanik Özellikleri .....	86
Şekil 5.1 Düzlemsel Sonlu Eleman Ağ Modeli.....	88
Şekil 5.2 Sonlu Eleman Ağ Modelinde Çerçeve Elemanı İçerisinde Konumlandırılacak Dolgu Duvar Panel Elemanın Gerilme – Birim Şekil Değiştirme İlişkisi .....	89

Şekil 5.3 Sonlu Eleman Ağ Modelinde Etkili Basınç Bölgesi (20x15 bölmeli duvar paneli) .....	91
Şekil 5.4 Sonlu Eleman Ağ Modelinde Etkili Basınç Bölgesi (16x12 bölmeli duvar paneli) .....	92
Şekil 5.5 Sonlu Eleman Ağ Modelinde Etkili Basınç Bölgesi (12x9 bölmeli duvar paneli) .....	93
Şekil 5.6 Sonlu Eleman Ağ Modelinde Etkili Basınç Bölgesi (8x6 bölmeli duvar paneli) .....	94
Şekil 5.7 Sonlu Eleman Ağ Modelinde Etkili Basınç Bölgesi (4x3 bölmeli duvar paneli) .....	94
Şekil 5.8 Sonlu Elemanlar Bölme Sayısının 1. Serbest Titreşim Moduna Etkisi	95
Şekil 5.9 Çerçeve Tepe Noktasının Yatay Deplasmanının Sonlu Elemanlar Bölme Sayısına Göre Değişimi.....	95
Şekil 5.10 Doğrusal Olmayan Davranışı İncelenecek Tek Katlı Tek Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modelleri .....	97
Şekil 5.11 Eşdeğer Diyagonal Çubuklu Modellerde Diyagonal Çubuk Elemanlara Atanacak Plastik Mafsal Elemanların Normal Kuvvet – Eksenel Kısalma İlişkisi.....	98
Şekil 5.12 Tek Kat Tek Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin Statik İtme Eğrileri .....	99
Şekil 5.13 Tek Kat Tek Açıklıklı Modellerin Doğrusal İki Çizgiyle İdealleştirilmiş Statik İtme Eğrileri (Göçme Bölgesine Kadar) .....	99
Şekil 5.14 Düzlem İçi Yatay Kuvvet Etkisi Altındaki Tek Kat Tek Açıklıklı Düzlem Çerçevelerde Mafsallaşma Oluşum Sırası .....	100
Şekil 5.15 Doğrusal Olmayan Davranışı İncelenecek Tek Katlı İki Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modelleri .....	101
Şekil 5.16 Tek Kat İki Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin Statik İtme Eğrileri .....	102
Şekil 5.17 Tek Kat İki Açıklıklı Modellerin Doğrusal İki Çizgiyle İdealleştirilmiş Statik İtme Eğrileri (Göçme Bölgesine Kadar) .....	102
Şekil 5.18 Doğrusal Olmayan Davranışı İncelenecek İki Katlı İki Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modelleri .....	103

Şekil 5.19 İki Kat İki Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin Statik İtme Eğrileri .....	104
Şekil 5.20 İki Kat İki Açıklıklı Modellerin Doğrusal İki Çizgiyle İdealleştirilmiş Statik İtme Eğrileri (Göçme Bölgesine Kadar) .....	105
Şekil 5.21 İki Kat İki Açıklıklı Dolgu Duvarlı Düzlem Çerçeve Modellerin Kat Seviyeleri Elastik Deplasmanları .....	105
Şekil 5.22 Doğrusal Olmayan Davranışı İncelenecek Beş Katlı Üç Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modelleri .....	107
Şekil 5.23 Beş Kat Üç Açıklıklı Eşdeğer Diyagonal Çubuklu Modellerde, Diyagonal Çubuk Elemanlara Atanacak Plastik Mafsallık Özellikleri .	108
Şekil 5.24 Beş Kat Üç Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin Statik İtme Eğrileri .....	109
Şekil 5.25 Beş Kat Üç Açıklıklı Modellerin Doğrusal İki Çizgiyle İdealleştirilmiş Statik İtme Eğrileri (Göçme Bölgesine Kadar) .....	109
Şekil 5.26 Beş Kat Üç Açıklıklı Dolgu Duvarlı Düzlem Çerçeve Modellerin Kat Seviyeleri Elastik Deplasmanları .....	110

## TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Ebatlarına Göre Yatay Tuğla Birimlerinin Özellikleri .....	30
Tablo 2.2 Gaz Beton Tuğla Panel Standart Boyutları .....	31
Tablo 2.3 Yapı Türüne Bağlı Olarak Kullanılacak ASTM Harç Türleri .....	32
Tablo 2.4 Dolgu Duvar İçin Harç Oranları .....	33
Tablo 2.5 Farklı Koşullar Altında Beton Tuğla Birimlerinin Harç Dayanımları .	34
Tablo 2.6 Farklı Harç Türlerinin Ortalama Basınç Dayanımı Değerleri .....	37
Tablo 2.7 Tuğla Duvar Elastisite Modülleri.....	41
Tablo 2.8 Farklı Tür Malzemelerin Sürtünme Katsayıları .....	53
Tablo 3.2 Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuğu Genişliği Hesabı.....	74
Tablo 5.1 Tek Katlı Tek Açıklıklı Düzlem Çerçeve Sonlu Elemanlar Ağ Modelinde Kullanılan Çerçeve En Kesit ve Donatıları.....	89
Tablo 5.2 Sonlu Eleman Ağ Modellemesinde (20x15 bölmeli) Dolgu Duvar ile Çerçeve Arasındaki Bağlantı Elemanlarının Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri.....	90
Tablo 5.3 Sonlu Eleman Ağ Modellemesinde (16x12 bölmeli) Dolgu Duvar ile Çerçeve Arasındaki Bağlantı Elemanlarının Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri.....	91
Tablo 5.4 Sonlu Eleman Ağ Modellemesinde (12x9 bölmeli) Dolgu Duvar ile Çerçeve Arasındaki Bağlantı Elemanlarının Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri.....	92
Tablo 5.5 Sonlu Eleman Ağ Modellemesinde (8x6 bölmeli) Dolgu Duvar ile Çerçeve Arasındaki Bağlantı Elemanlarının Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri.....	93
Tablo 5.6 Sonlu Eleman Ağ Modellemesinde (4x3 bölmeli) Dolgu Duvar ile Çerçeve Arasındaki Bağlantı Elemanlarının Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri.....	94
Tablo 5.7 Sonlu Eleman Modellemesinde Bölme Sayısının Yapı Tepe Yatay Deplasmanına ve 1. Serbest Titreşim Moduna Etkisi .....	95

Tablo 5.8 Tek Kat Tek Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin İdealleştirilmiş Statik Eğri Koordinatları .....	100
Tablo 5.9 Model 1A'nın (boş çerçeve) göçme anında ulaşılan deplasman değerine göre (0.017m) diğer diyagonal çubuklu modellerde oluşan dönme değerleri.....	100
Tablo 5.10 Tek Kat İki Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin İdealleştirilmiş Statik Eğri Koordinatları .....	102
Tablo 5.11 Model 1B'nin (boş çerçeve) göçme anında ulaşılan deplasman değerine göre (0.017m) diğer diyagonal çubuklu modellerde oluşan dönme değerleri.....	103
Tablo 5.12 İki Kat İki Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin İdealleştirilmiş Statik Eğri Koordinatları .....	105
Tablo 5.13 Model 1C'nin (boş çerçeve) Göçme Anında Ulaşılan Deplasman Değerine Göre (0.061m) Diğer Diyagonal Çubuklu Modellerde Oluşan Dönme Değerleri .....	106
Tablo 5.14 Beş Katlı Üç Açıklıklı Sonlu Elemanlar Düzlem Çerçeve Ağ Modelinde Kullanılan Çerçeve En Kesit ve Donatıları.....	108
Tablo 5.15 Beş Kat Üç Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin İdealleştirilmiş Statik Eğri Koordinatları .....	110
Tablo 5.16 Model 1D'nin (boş çerçeve) göçme anında ulaşılan deplasman değerine göre (0.15m) diğer diyagonal çubuk modellerde oluşan dönme değerleri.....	111

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Binaların depreme karşı dayanıklı olarak analiz ve tasarımı inşaat mühendisliğinin çok önemli konularından biridir. Yapı sistemini oluşturan tüm elemanların; tüm elemanların yük taşıma, sönüm, rijitlik, burulma, enerji yutma kapasitesi gibi yapısal davranış özelliklerini etkilediği göz ardı edilmemelidir. Dolgu duvar panelleri, binalarda kullanım fonksiyonlarına bağlı olarak taşıyıcı sistem içerisinde konumlandırılan mekan ayırıcı yapı elemanlarıdır. Dolgu duvarlar, taşıyıcı sistem analizlerinde yatay yük taşıyıcı yapısal eleman olarak düşünülmemesine rağmen, deprem etkisi altında taşıyıcı çerçeve elemanlar ile etkileşime girer. Yapısal analizlerde dolgu duvarların, çerçeveye katkısı ile ilgili iki türlü kabul yapılmaktadır. Birinci kabul, dolgu duvarların yapısal olarak çerçeveye düşey yük katkısı yaptığı; ancak etkileşimin fiziksel olarak olmadığına yönelik basitleştirici kabuldür. Mevcut tasarım yöntemlerimizin de kabul ettiği bu durumda, dolgu duvarların taşıyıcı sistem üzerinde düşey yük etkisinin göz önünde bulundurulmasına rağmen bu elemanların yatay yük taşıyıcı özellikleri ihmal edilmektedir. Çerçeve sistem, boş çerçeve olarak dikkate alınmakta ve serbest şekil değiştirme yapabilmektedir. Dolgu duvarların yapı rijitliğine olan katkısının ihmal edilmesinin başlıca nedenleri:

- a) Dolgu duvar katkısını dikkate alan hesap modeli oluşturmanın güç ve karmaşık olması
- b) Dolgu duvarların katkısını dikkate alan hesap metodlarının proje aşamasında yeterli uygulanabilirliğe sahip olmaması
- c) Dolgu duvarların yapının rijitliğine olan etkisi bilinmesine rağmen hesap açısından duvarın yapacağı katkının güvenli yönde kalmak amacıyla ihmal edilmesi

- d) Kargir nitelikteki dolgu duvarların deprem etkileri altında kısa bir sürede göçmesi ve göçmeden sonraki evrede, duvar panellerinin genel yapı sistemine olan rijitlik katkı mertebesinin bilinmemesi, bu durumun modellemeye yansıtılmasındaki güçlüklerdir.

İkinci kabul ise duvar panelleri ile çerçeve arasında bir etkileşim olduğu ve bu etkileşimin yapı sistemine ek bir rijitlik kazandıracığı yönündedir. Yapıda kullanılan duvar panelinin kalınlığı az bile olsa, bu durum yapının deprem performansının değişmesinde etkili olmaktadır. Dolgu duvar rijitliğinin hesaba katılmasıyla birlikte çerçevenin rijitlik mertebesi artar ve çerçeve sisteminin doğal titreşim periyodu azalır. Bu yüzden deprem etkisi altında oluşacak gerçek davranışın bilinmesi, dolgu duvarlar ile çerçevenin birlikte analizi ile mümkün olacaktır. Örneğin yapıda, mimari nedenlere bağlı olarak dolgu duvarların kat boyunca kısmi olarak konumlandırılması kısa kolon etkisi olarak tanımladığımız taşıyıcı sistem düzensizliğine neden olur. Bu sebeple deprem etkisi altında çerçeve elemanlar, tasarımda öngörülen kesme kuvvetinden daha fazla bir etkiye maruz kalarak hasara uğrayabilir. Dolgu duvarların planda ve yapı yüksekliğince uygunsuz yerleşimine bağlı olarak Şekil 1.1’de gösterildiği üzere yapıda kısa kolon, burulma ve yumuşak kat etkileri oluşabilmektedir.



a) Kısa kolon mekanizması



b) Yumuşak kat mekanizması

Şekil 1.1 Dolgu duvarların yapıda uygunsuz konumlandırılması sonucu oluşan mekanizma durumları

## 1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Dolgu duvarlı çerçevelerin modellenmesi ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda çeşitli araştırmacıların sunmuş olduğu, düzlem içi yanal kuvvet etkisi altında dolgu duvar sistemini idealize ettiği düşünülen çapraz çubuklu (makro) modeller tanıtılacak ve bu modellerin tez kapsamında tanımlanacak sonlu eleman ağ modeli (mikro model) ile karşılaştırılması yapılacaktır. Gerek eşdeğer diyagonal çapraz çubuklu gerekse sonlu eleman ağ modelin yatay yük etkileri altındaki davranışının analizleri “doğrusal elastik olmayan artımsal statik itme” yöntemi ile yapılmış; açıklık ve kat adetlerinin artmasına bağlı olarak, her bir modele ilişkin göçme yükü, göçme anındaki kat ötelemeleri, yatay yük – yer değiştirme grafiği, çerçeve sisteminde kolon ve kirişlerde oluşan plastik kesit dönmeleri gibi parametrik değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Buradan, dolgu duvarlı çerçevelerin; kat adedi ve çerçeve açıklıklarının artmasına bağlı olarak, iki farklı modelleme ile davranışının analizine yönelik değerlendirmeler yapılmıştır.

Tez çalışmasında, dolgu duvarlı çerçevelerin “sonlu eleman ağ modellemesi” ile analizinde, düzlem içi yatay yük etkileri altında, çerçeve ile dolgu duvarın oluşturduğu panelin birleşim bölgelerindeki ayrışma sınırlarının, yeterli hassasiyetle belirlenmesine yönelik link elemanlar modellemeye dahil edilmiştir. Bu amaçla modelde, dolgu duvar paneli ile çerçeve arasında doğrusal olmayan ‘yay’ elemanlar konumlandırılarak bu iki eleman arasındaki yük aktarımının gerçekçi bir şekilde tanımlanması yapılmış ve bu sayede yatay yük etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde, temas boyu uzunluğunun belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçlara yönelik olarak tez çalışmasının ikinci bölümünde, dolgu duvarlı çerçeve sistemlerinin kendi düzlemleri içindeki yük etkileri altında davranışı incelenmiştir. Duvar yapımında kullanılan dolgu elemanların (tuğla, gazbeton) ve harçların malzeme mekanik özellikleri yine bu bölümde sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, dolgu duvar panellerin yük etkileri altında göçme davranışları ve dolgu duvarlı bu paneller ile çerçeve sistemin birlikte modellenmesinin incelenmesi yapılmıştır.

Dördüncü bölümde, tez çalışmasında esas alınacak modellerin teorik açıklamaları yapılmıştır. Çalışmada kullanılacak doğrusal olmayan analiz yöntemi, yine bu bölümde tanıtılmıştır.

Tez çalışmasının esasını oluşturan olan beşinci bölümde, SAP2000 yapı analiz programında eşdeğer diyagonal çubuk ve sonlu eleman ağ modelleri ile oluşturulmuş düzlem çerçevelerin artımsal itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Diyagonal çubuklu modellerden elde edilen analiz sonuçları ile sonlu eleman ağ modelinden elde edilen sonuçların kıyaslanması yapılmıştır. Her bir modele ilişkin yatay yük – yer değiştirme eğrisi grafiği, göçme yükü, kat yer değiştirmeleri (elastik bölge) bulunmuştur. Ayrıca diyagonal çubuk modelleri için, boş çerçevenin dayanımını yitirdiği tepe noktası deplasmanı anında, kolon ve kiriş elemanlarında oluşan plastik dönmelerin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışmada düzlem dışı kuvvetlerin analizi yapılmamış ve sadece düzlem içi kuvvetlerin dolgu duvarlı çerçeve sistemi üzerine etkileri incelenmiştir.

Altıncı bölümde, beşinci bölümde gerçekleştirilen uygulamalardan elde edilen sonuçların yorumlanması ve modellerin uygulanabilirliği irdelenmiştir.

## **BÖLÜM İKİ**

### **DOLGU DUVARLI ÇERÇEVE SİSTEMLERİN DÜZLEM İÇİ YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI VE DOLGU ELEMANLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

#### **2.1 Giriş**

Dolgu duvarlı çerçeve sistemlerinin deprem etkileri altındaki davranışı, boş çerçeve sistemine göre farklılık göstermektedir. Yapılarımızda dolgu duvar yapımında çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Dolgu duvar yapımında genellikle kil malzemeli tuğla birim elemanlar kullanılmakla birlikte, gazbeton bloklar, bims beton bloklar, alçı blok veya buna benzer panel elemanlar da kullanılmaktadır. Bu bölümde öncelikli olarak dolgu duvarlı çerçevelerde düzlem içi etkiler sonucu gözlenen genel deformasyonlar ve bu duruma bağlı olarak oluşan hasar türleri tanıtılacaktır.

Özellikle deprem etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde kullanılan dolgu elemanların özellikleri, tüm yapının davranışını etkilemektedir. Bu amaçla, dolgu duvar yapımında kullanılan dolgu elemanların türleri ve mekanik özellikleri de bu bölümde tanıtılacaktır.

Dolgu duvarlı çerçevelerin analitik modellenmesinde mikro (bölgesel) ve makro (genelleştirilmiş) olmak üzere iki türlü yöntem kullanılmaktadır. İlk grup modelleme, yapının bölgesel etkilerini detaylı olarak göz önünde bulundurarak sistemi çok sayıda sonlu eleman parçalarına bölme üzerine dayanır. İkinci grup ise dolgu duvarlı çerçeve paneli üzerine yapılmış yükleme deneylerinden yola çıkarak sistemin fiziksel davranışını dikkate alarak yapılan modelleme tekniğidir (diyagonal çubuk modeli). Bu bölümde, dolgu duvarlı çerçeve sistemlerinin mikro ve makro modellenmesinde kullanılan teknikler anlatılacaktır. Diyagonal basınç çubuğu modeline ilişkin olarak çeşitli araştırmacılar tarafından basınç çubuğu genişliği hesabında kullanılan parametreler ve denklemler bu bölümün sonunda ayrıca verilmiştir.

## 2.2 Dolgu Duvarlı Çerçevelere Etkiyen Kuvvetler ve Genel Davranış Özellikleri

Taşıyıcı çerçeve iskeletin boşlukları genellikle pişmiş kilden elde edilen tuğladan oluşturulan duvar panelleri ile doldurulur. Ayrıca duvar yapımında pişirilmeden hidrasyon ile sertleşmiş hafif ya da normal ağırlıkta beton bloklar da kullanılmaktadır. Duvar yapımında genellikle; pişmiş kil tuğlalar, gazbeton - beton bloklar kullanılmaktadır. Duvar türleri Şekil 2.1’de gösterildiği gibi genel anlamda dört gruba ayrılabilir:

- a) Kil Tuğla Dolgu Duvarlar
- c) Beton Bloklü Duvarlar

- b) Gaz beton Dolgu duvarlar
- d) Alçı Panel Duvarlar

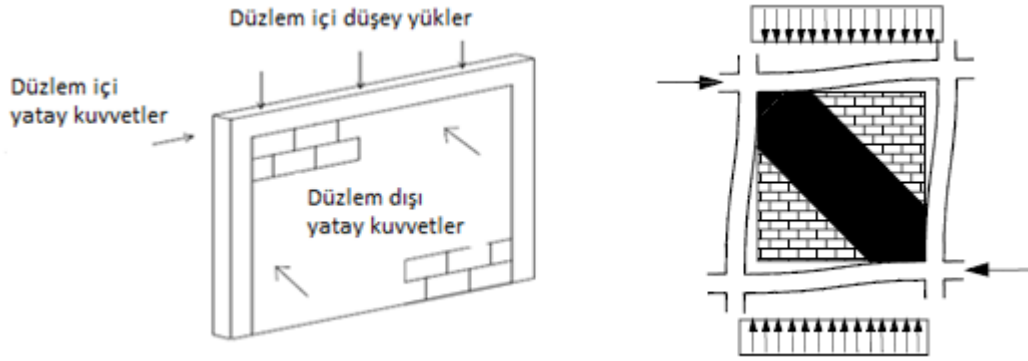


Şekil 2.1 Genel anlamda duvar türleri

Tez çalışmasında, dolgu duvarı temsil etmek üzere, tuğla birimlerden oluşturulan iki yüzü sıvalı duvar panelleri dikkate alınmıştır.

### 2.2.1 Dolgu Duvarlı Çerçevelere Etkiyen Kuvvetler

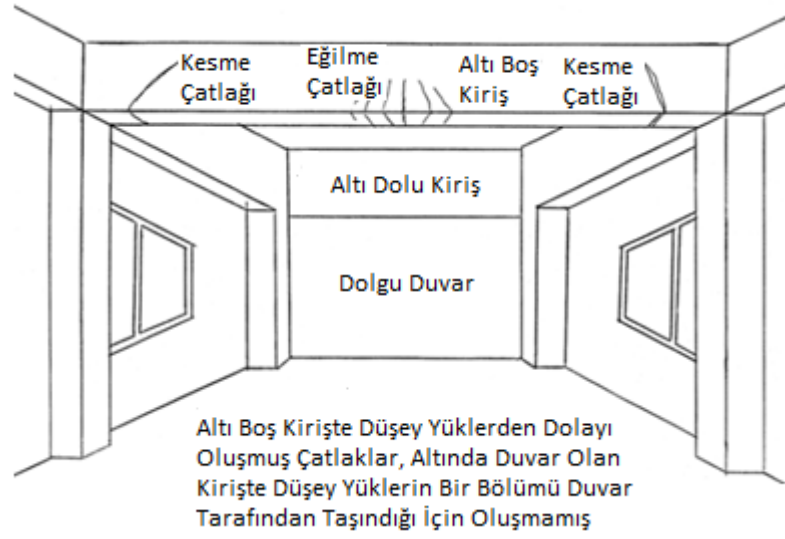
Dolgu duvarlı betonarme çerçevesi sistem üzerine etkiyecek yükler, düzlem içi ve düzlem dışı olmak üzere iki şekilde incelenebilir. Yerçekimi kuvveti, düşey yönde etki ederek kiriş elemanlarda eğilme etkisi, kolon elemanlarda basınç etkisi yaratacaktır. Dolgu duvarlı çerçevelerin analizinde, sistem stabilitesinin sağlanabilmesi ve yapıdaki dolgu duvarların çerçevelerden ayrılmaması için düzlem dışı etkilerin sınırlandırılması gerekmektedir. Şekil 2.2’de dolgu duvarlı çerçeve sistemlerine etkiyen kuvvetlerin genel bir gösterimi ve düzlem içi kuvvet etkisi altındaki deformasyon şeklinin temsili sunulmuştur.



Şekil 2.2 Dolgu duvarlı çerçevelere etkiyen kuvvetler ve düzlem içi kuvvet etkisi altındaki genel deformasyon şekli (Amato ve ark, 2009)

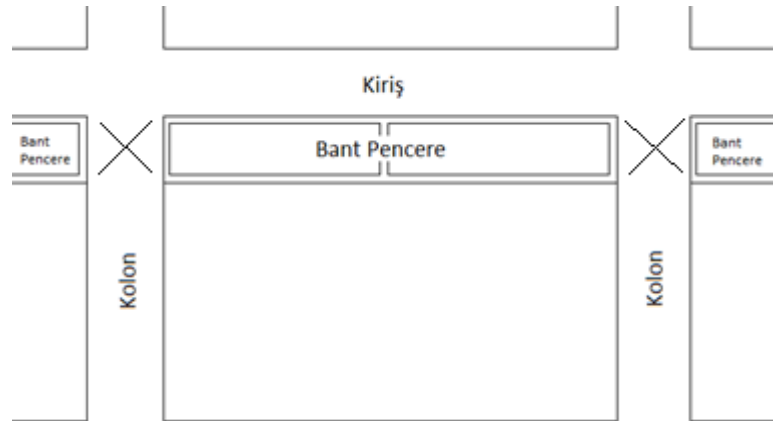
### 2.2.2 Dolgu Duvarlı Çerçevelerin Genel Davranış Özellikleri

Dolgu duvarın çerçeve içinde düzenlenme biçimi, düşey ve yatay yük etkileri altında çerçeve davranışını oldukça farklı biçimlerde etkilemektedir. Altında dolgu duvarı olmayan kirişlerin daha çok sehim yaptığı bilinmekte ve gözlenmektedir. Depreme maruz kalmış bazı yapılarda, Şekil 2.3’te gösterildiği üzere altında dolgu duvarı olmayan kirişlerin açıklık ortalarında eğilme, mesnet bölgelerinde kesme çatlakları oluştuğu gözlenmiştir. Oysa aynı boyutta ve açıklıkta; fakat altında dolgu duvar olan kirişlerde bu çatlaklar yoktur. Bu fark, kirişin düşey yükünü altındaki dolgu duvara aktarmasının bir sonucudur (Bayülke, 2003). Bu durum, yapılarıdaki dolgu duvarların kirişlerin düşey yüklerini taşımaya katkısının olduğunu gösterir.

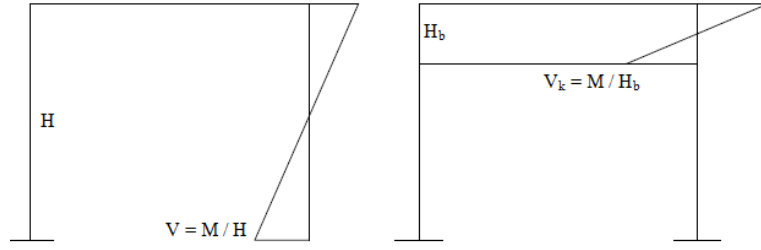


Şekil 2.3 Altında dolgu duvar olan ve olmayan kirişlerdeki çatlaklar (Bayülke, 2003)

Şekil 2.4'te gösterildiği üzere, dolgu duvarların neden olduğu kısa kolon kırılması, duvarın mimari nedenlerle bant pencere olarak yapılmasının bir sonucudur. Bant pencere nedeni ile kolonun boyu ( $H$ ) yerine bant pencere yüksekliği olan ( $H_b$ ) olmaktadır. Kolonda oluşan kesme kuvveti, kısa kolonun yüksekliği ile ters orantılıdır. Bu nedenle Şekil 2.5'te gösterildiği gibi kısa kolonlu durumda, normal duruma göre büyük kolon kesme kuvvetleri oluşacaktır ( $V_k \gg V$ ). Mimari nedenlerde dolayı bant pencere oluşumu engellenemiyorsa, kolonun bu bölgesinde sargı donatısının hesabının uygun olarak yapılması gerekmekte veya bant pencere ile kolon arasında belli bir genişlikte dolgu elemanlar konumlandırılmalıdır.

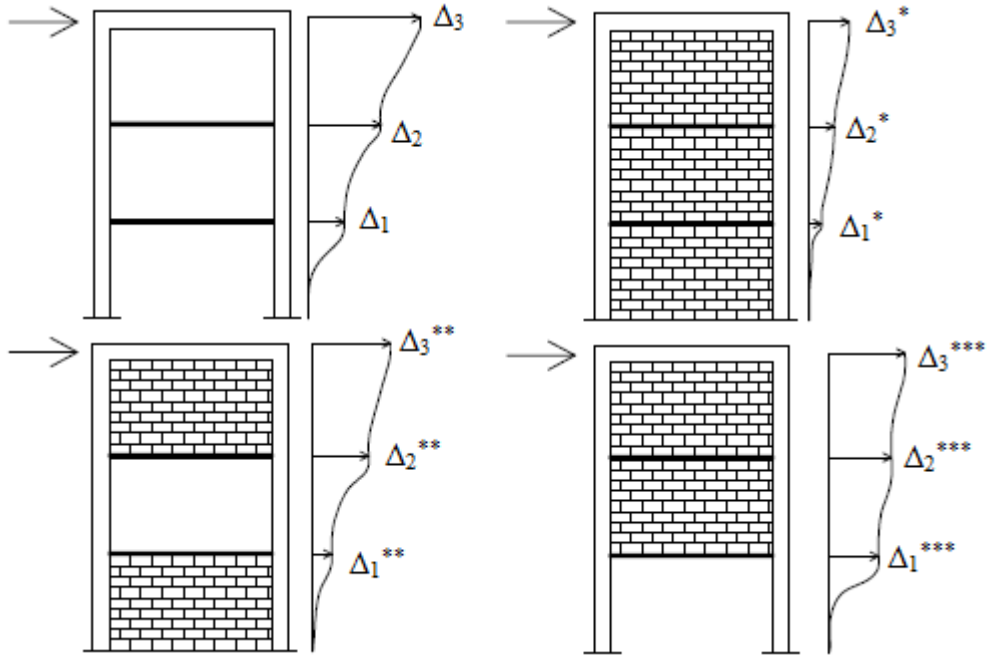


Şekil 2.4 İki yanında bant pencere olan kolon (Bayülke, 2003)



Şekil 2.5 Kolon boyunun kısalması sonucu kolon kesme kuvveti mertebesinin artışı ( $V_k \gg V$ ) (Bayülke, 2003)

DBYBHY(2007)'de birbirine dik her iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir  $i$ . kattaki ortalama görelî kat ötelemesi oranının bir üst veya bir alt kattaki görelî kat ötelemesi oranına bölünmesi ile tanımlanan rijitlik düzensizlik katsayısının ikiden fazla olması durumunda yumuşak kat oluştuğu belirtilmiştir.



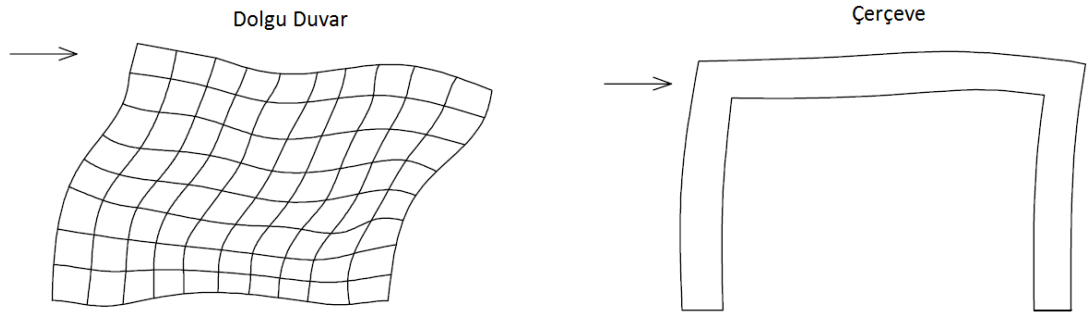
Şekil 2.6 Dolgu duvar elemanlarının çerçeve içindeki yerleşiminin yapı davranışına etkisi

Genellikle büyük yerleşim merkezlerinde yapıların caddeye bakan yüzlerinde zemin katın ticari amaçlarla kullanımı yaygın olduğundan birçok binada zemin kat yüksekliği, normal katlara göre daha yüksek olarak tasarlanmaktadır ve bu katlarda çerçeveler arasında yeterli mertebede dolgu duvar bulunmamaktadır. Bu durumda deprem etkisi altındaki yapıda, yumuşak kat etkileri görülmesi daha muhtemel

olmaktadır. Ayrıca ara kat çerçeve elemanları arasında dolgu duvar konumlandırılmamış deprem etkisi altında bir yapı için, istenmeyen mertebede görelî kat ötelemeleri gözlenebilir. Bu durumlar, dolgu duvar elemanlarının yapı davranışına olan etkisini göstermektedir (Şekil 2.6).

### 2.3 Düzlem İçi Yatay Yük Etkisi Altında Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Görülen Hasar Mekanizmaları

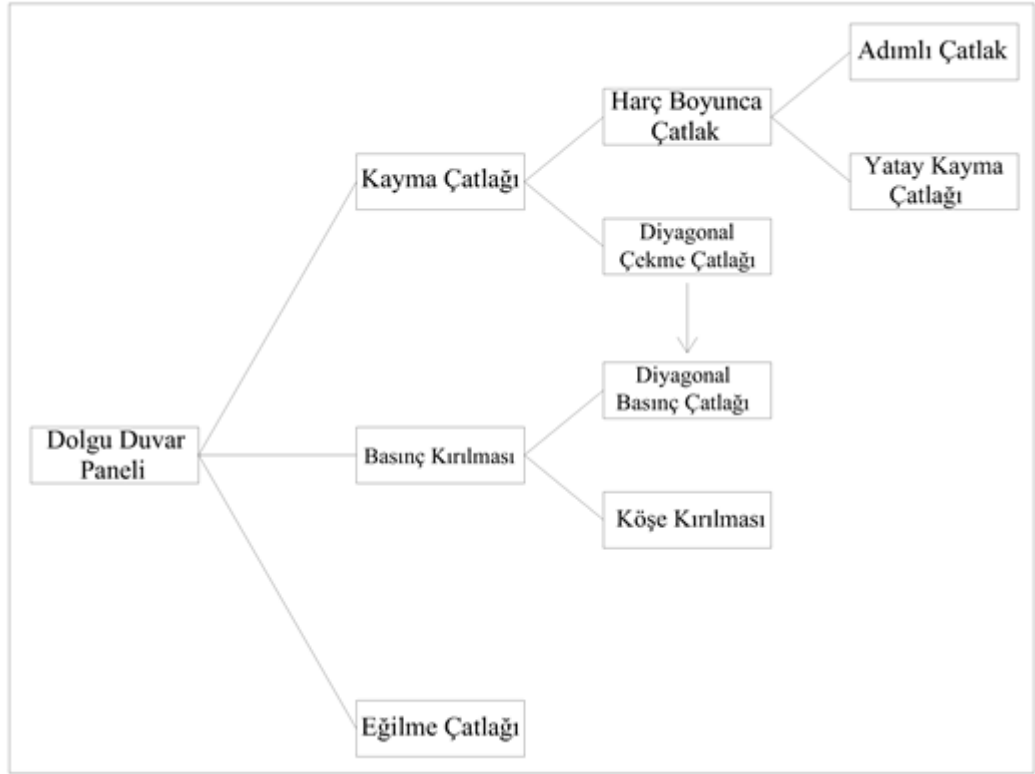
Düzlem içi yük etkisi altında dolgu duvarlı çerçevelerin göçme türünün tahmininin yapılması zordur. Çerçeve ve dolgu duvar görelî rijitliği, yapının boyutu ve yapıyı oluşturan eleman bileşenlerinin dayanımları, göçme türü tahmininde kullanılabilir en önemli parametrelerdir. Şekil 2.7’de dolgu duvar paneli ve çerçeve sisteminde düzlem içi yük etkisi altındaki genel deformasyonlar gösterilmiştir. Dolgu duvarlı çerçeve sisteminin göçmesi, dolgu duvar ve çerçevede oluşan bir veya daha fazla basit göçme mekanizması ile oluşmaktadır. Bu bölümde, dolgu duvar ve çerçeve sisteminde oluşabilecek tüm göçme türleri, şekilleriyle birlikte ayrı bölümler halinde tanımlanacaktır.



Şekil 2.7 Dolgu duvar ve çerçeve sisteminde düzlem içi yük etkileri altındaki genel deformasyonlar

#### 2.3.1 Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Dolgu Duvar Panelinde Oluşan Hasarlar

Dolgu duvar panelinin göçmesi, tuğla birimlerinin arasındaki derzlerin çatlayıp ayrışmasıyla, tuğla birimlerin ufalanıp parçalanması ya da bunların kombinasyonları ile oluşmaktadır. Oluşan hasar durumu, malzeme özelliklerine ve duvar panelindeki gerilme oluşumuna bağlı olarak değişmektedir. Şekil 2.8’de çeşitli etkiler sonucunda dolgu duvar panelinde meydana gelebilecek hasar türleri sunulmuştur.



Şekil 2.8 Dolgu duvarlı çerçevelerin duvar elemanlarında görülen hasar türleri (Crisafulli, 1997)

Yatay yük etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde duvar panelinin orta bölgesinde oluşan asal çekme gerilmesi, asal basınç gerilmesi ile karşılaştırıldığında çok küçük mertebededir ve ihmal edilebilir. Bu durum Şekil 2.9’da temsil edilmiştir. Bu sayede, yanal yük etkisine maruz dolgu duvarlı çerçevelerin temsili eşdeğer diyagonal basınç çubuğu ile yapılabilmektedir.

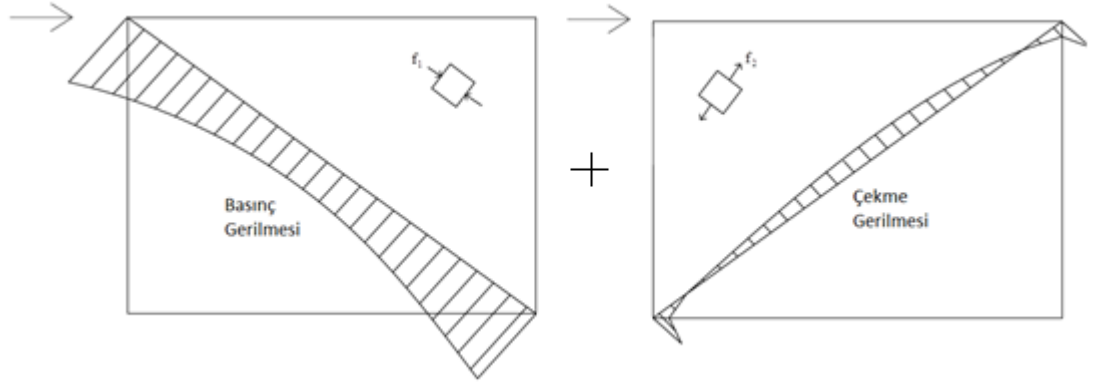
Şekil 2.9’da temsili yapılan diyagonal boyunca oluşan asal gerilmeler, Şekil 2.10’da gösterilen yatay ve düşey harç asal gerilmeleri cinsinden yazılabilir. Sisteme etkiyecek yatay yük, dolgu duvar paneli üzerinde iki eksenli gerilme durumu yaratacaktır. Şekil 2.9’da temsili yapılan asal gerilme durumu Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3’de sunulmuştur.

$$f_n = f_1 \sin^2\theta + f_2 \cos^2\theta \quad (2.1)$$

$$f_p = f_1 \cos^2\theta + f_2 \sin^2\theta \quad (2.2)$$

$$\tau = - (f_1 - f_2) \sin \theta \cos \theta \quad (2.3)$$

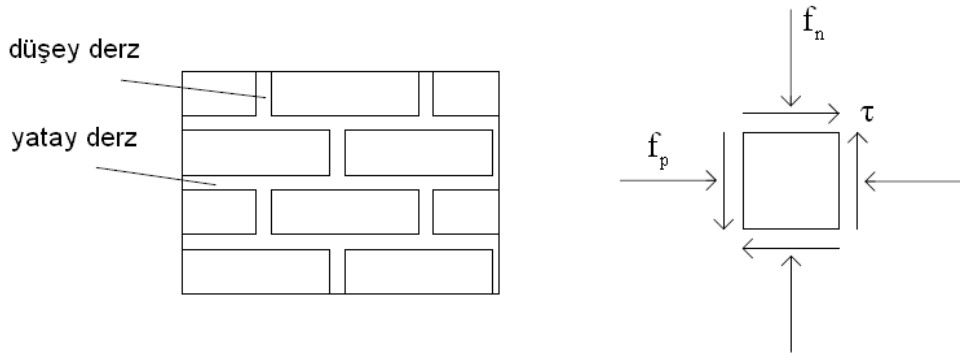
$f_p$  yatay derze paralel etkiyen gerilmeyi,  $f_n$  yatay derz normal gerilmesini,  $\theta$  ise ölçülen  $f_1$  gerilmesi doğrultusu ile yatay derz arasındaki açıyı temsil etmektedir.



(a)  $f_1$  basınç asal gerilmesi

(b)  $f_2$  asal çekme gerilmesi

Şekil 2.9 Yatay kuvvet etkisi altında dolgu duvarlı çerçevelerde diyagonal boyunca görülen asal gerilmeler



Şekil 2.10 Dolgu duvar derz birleşiminin isimlendirilmesi ve derzlerde oluşan gerilme

Panel orta noktasında  $f_2$  asal çekme gerilmesi ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3'deki  $f_2$  ihmal edilir ve denklemler duvar paneli orta noktası için yazılıp ( $f_2 = 0$ ) taraf tarafa oranlanırsa, dolgu duvarlı çerçevelerde duvar elemanına etkiyen normal ve kayma kuvvetlerin duvar boyutlarıyla orantılı olduğu görülecektir. Denklem 2.4'te  $h_m$  ve  $L_m$  sırasıyla çerçeve içindeki dolgu duvar panelinin yükseklik ve açıklık uzunluğudur.

$$\frac{f_n}{\tau} = \tan \theta = \frac{h_m}{L_m} \quad (2.4)$$

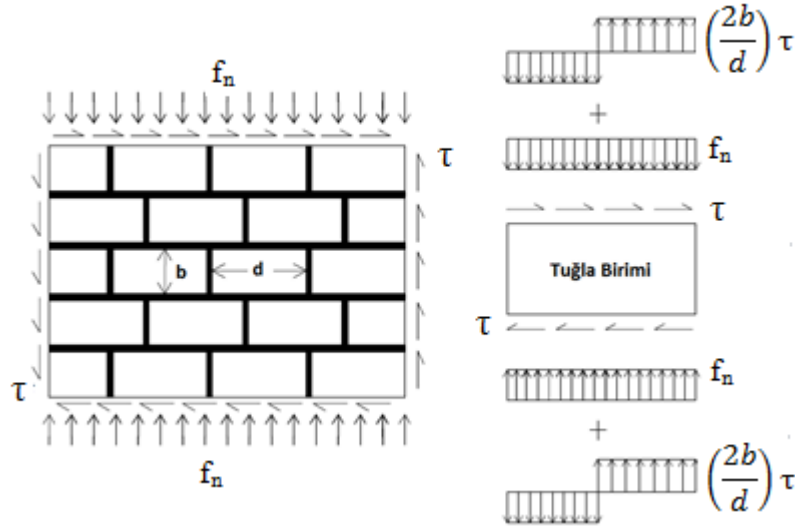
Denklem 2.4'e göre dolgu duvar elemanında normal gerilmenin ( $f_n$ ); kayma gerilmesine ( $\tau$ ) oranı, dolgu duvarlı çerçevelerin hasar türünün belirlenmesinde önemli derecede etkili olmaktadır. Denklem 2.4'den de görüleceği üzere bu oran  $h_m/L_m$  (şekil faktörü) ile doğrudan ilişkilidir.

### 2.3.1.1 Dolgu Duvar Panelinde Kayma Çatlağı Oluşumu

Deprem sonrası yapılan gözlemlerde ve deneysel çalışmalarda, dolgu duvarlı çerçevenin dolgu duvar panelinde gözlenen en yaygın olan hasar türü kayma çatlağıdır. Bu hasar mekanizmasını genellikle harç birleşimindeki kayma dayanımı, tuğla birimlerinin çekme dayanımı değeri, tuğla panelinde oluşan normal ve kayma gerilmelerinin mertebeleri belirlemektedir. Bu parametrelere bağlı olarak duvar paneline etkiyen düşey aksenal gerilmenin, kayma gerilmesi ile birlikte etkimesi sonucunda dolgu duvar paneli boyunca çaprazlama çatlak oluşumu veya harç derzleri boyunca ayrışmalar gözlenebilir.

Mann ve Müller(1982) basınç ve kayma etkileri altında dolgu duvar davranışını açıklayan göçme (hasar) teorisi geliştirmiştir. Bu teori dolgu duvar kesiti için düşünülmüş (Şekil 2.11) ve aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Yatay harç derzine paralel doğrultudaki gerilme olan  $f_p$ , ihmal edilebilecek mertebededir.
- Dolgu duvar paneli boyunca,  $\tau$  kayma gerilmesi ve  $f_n$  aksenal basınç gerilmesi düzgün yayılıdır. Bu değerler duvar elemana etkiyen ortalama gerilmeyi temsil etmektedir.
- Kayma gerilmeleri düşey derzler tarafından aktarılmaz. Bu varsayım genel olarak doğru olmaktadır; çünkü duvar yapımı sırasında düşey derz yerleşimi genellikle uygunsuz olarak yapılmaktadır (sıkıştırma vb.) ve düşey derzlere dik doğrultuda gerilme etkilediği varsayılır. ( $f_p = 0$ )



Şekil 2.11 Duvar panelindeki gerilme durumu ve tuğla birimindeki gerilme dağılımı (Mann ve Müller, 1982)

Yatay harç derzlerindeki kayma gerilmeleri, her bir tuğla birim elemanı üzerinde dönme etkisi(tork) yaratır ve bu etkinin Şekil 2.11b’de gösterildiği gibi düşey kuvvet çifti ile dengelenmesi gerekmektedir. Bu kuvvet çifti, düşey gerilme dağılımını değiştirecektir ve Denklem 2.5 ve 2.6’da sunulduğu üzere tuğla birimlerinin yarısına  $f_{n1}$  diğer yarısına  $f_{n2}$  kuvveti etkiyecektir.

$$f_{n1} = f_n + \left(\frac{2b}{d}\right)\tau \quad (2.5)$$

$$f_{n2} = f_n - \left(\frac{2b}{d}\right)\tau \quad (2.6)$$

Burada  $b$  ve  $d$  sırasıyla tuğla biriminin yüksekliği ve uzunluk değeridir.  $f_{n1}$  ve  $f_{n2}$  nin negatif değer alması çekme durumunu temsil eder. Bileşik gerilme etkisi altındaki  $(\tau, f_{n1}, f_{n2})$  dolgu duvarlı çerçevelerde, dolgu duvarlarda görülen hasar durumları alt başlıklar halinde incelenecektir.

### Dolgu Duvar Panellerinde Harç Derzleri Boyunca Çatlak Oluşumu

Dolgu duvar sistemine etkileyen düşük eksenel kuvvet mertebesi nedeniyle oluşması beklenen kayma – sürtünme mekanizması, sistemde harç derzleri boyunca

adımlı çatlak oluşumu yaratabilir. Buna göre harç derzlerinin kayma dayanımı formülasyonu Denklem 2.7 ile sunulmuştur. Denklem 2.7 ile elde edilen dolgu duvar kayma dayanımı değeri alt limit olarak düşünülmelidir; çünkü düşey derzlerin herhangi bir kayma kuvveti aktarmayacağı varsayımı yapılmaktadır.

$$\tau_m = \tau_0^* + \mu^* f_n \quad (2.7)$$

Burada  $\tau_m$  tuğla birimlerinin arasındaki harç derzlerinin kayma dayanımını;  $\tau_0^*$ ,  $\mu^*$  ise sırasıyla indirgenmiş kohezyon ve indirgenmiş sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Bu parametreler Denklem 2.8' de sunulmuştur.

$$\tau_0^* = \frac{\tau_0}{1 + \mu \frac{2b}{d}} \quad (2.8 a)$$

$$\mu^* = \frac{\mu}{1 + \mu \frac{2b}{d}} \quad (2.8 b)$$

Stafford Smith ve Riddington(1978) yatay yük etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerin duvar panelinde oluşan gerilme durumunu incelemişler ve harç derzlerinin kayma dayanımı değerinin aşıldığında, göçmenin duvar orta bölgesinde oluştuğunu görmüşlerdir. İlgili araştırmacılar yaptıkları gerilme analizlerinde, duvar panelinde oluşacak yatay kayma çatlaklarının Denklem 2.9 ile sunulan kayma kuvveti altında oluşmaya başlayacağı sonucuna varmışlardır.

$$V_s = \frac{\tau_0 A_m}{1.43 - \mu \left( \frac{h_m}{L_m} - 0.2 \right)} \quad (2.9)$$

Burada  $h_m$  ve  $L_m$  sırasıyla dolgu duvar panelinin yüksekliği ve açıklığıdır.  $A_m$  yatay düzlemde duvar paneli alanı;  $V_s$  ise duvar paneli orta bölgesinde kayma göçmesi oluşturacak kritik kesme kuvvetidir.

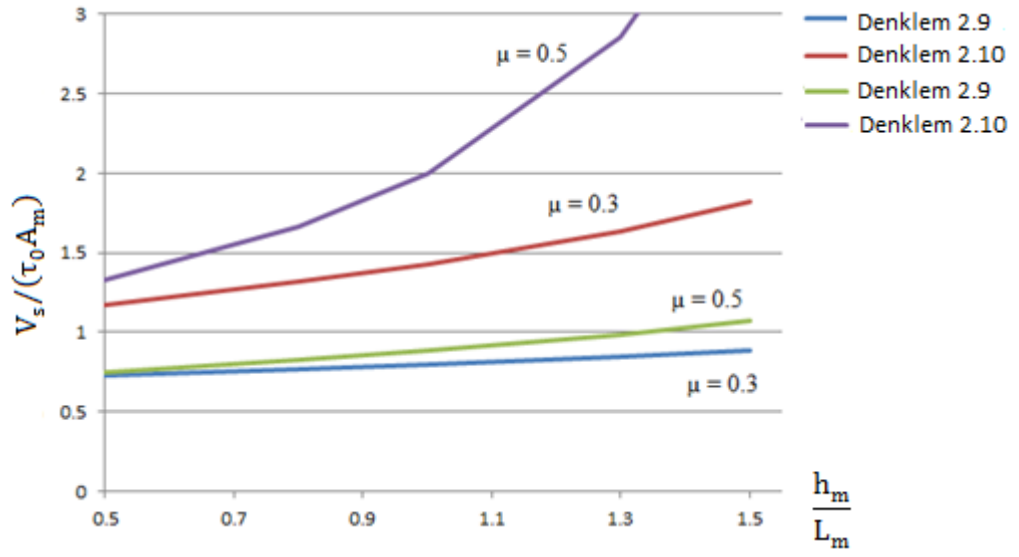
Paulay ve Priestley(1992),  $V_s$  değerini Denklem 2.7'yi tureterek hesaplamaya çalışmıştır. İlgili çalışmacıların elde ettiği kritik kesme kuvveti Denklem 2.10'da sunulmuştur.

$$V_s = \frac{\tau_0 A_m}{1 - \mu \left( \frac{h_m}{L_m} \right)} \quad (2.10)$$

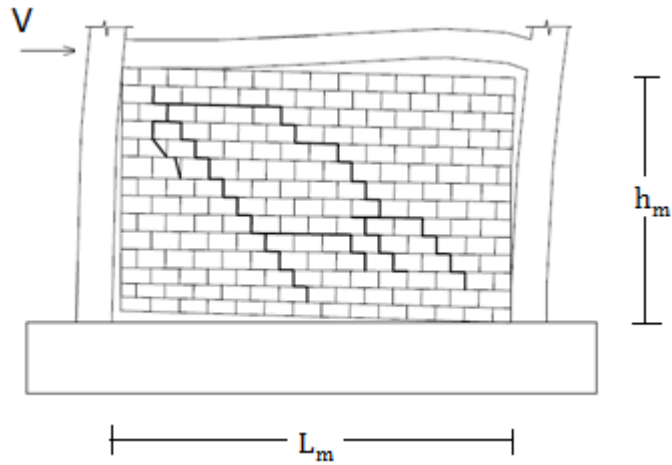
şekil 2.12'de  $V_s$  kesme kuvvetinin dolgu duvar yksekliliğinin aıklılığına oranına ( $h_m/L_m$ ) bağlı fonksiyonunu gösterimi yapılmıştır. Kesme kuvvetinin şekildeki temsili, göreli bir ifade olan  $V_s / (\tau_0 A_m)$  olarak alınacaktır. Bu göreli ifade dolgu duvar paneli ortalama kayma dayanımının harç kayma dayanımına oranı olarak düşünülebilir. Denklem 2.10'a göre  $V_s$ 'nin  $h_m/L_m$  oranıyla birlikte olarak artması sonucunda tuğla birimlerini bir arada tutan yatay derzlerde kenetlenme etkisinin de artacağı görülmektedir. Denklem 2.10 ile elde edilen değer daha yüksektir. Bunun nedeni, kayma gerilme dağılımının panel enine kesitinde üniform olduğu varsayımıdır.

Denklem 2.9'a göre panel orta bölgesinde meydana gelecek en büyük kesme gerilmesi  $1.43 V_s / A_m$  olmaktadır. Paulay ve Priestley(1992),  $\mu$  (sürtünme katsayısı) değerini 0.3 olarak önermiştir. Sürtünme katsayısının artmasıyla birlikte Denklem 2.10 ile elde edilen kritik kayma kuvveti ( $V_s$ ) değeri çok büyük olmaktadır. Bu durumda Denklem 2.10'n geçerliliği yeniden gözden geçirilmelidir.

Tuğla birimlerini bir arada tutan harç birleşimlerinin tuğla birimlerine göre zayıf olduğu veya dolgu duvarlı çerçevede oluşan kayma gerilmesinin normal gerilmeden fazla olduğu durumlarda dolgu duvar panelinde oluşan çatlama genellikle harç birleşimi boyunca olmaktadır. şekil 2.13'te harç derzleri boyunca oluşan adımlı kayma çatlağı temsili sunulmuştur. Yapılan pek çok deneye göre, bu tür çatlağın basınç yükleme yapılan köşe tarafında başladığı görülmüştür.

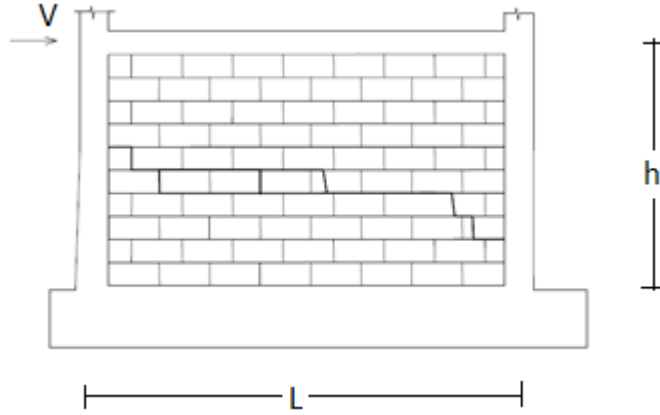


Şekil 2.12 Denklemler 2.9 ve 2.10'a göre oluşturulan kritik kayma kuvveti grafikleri



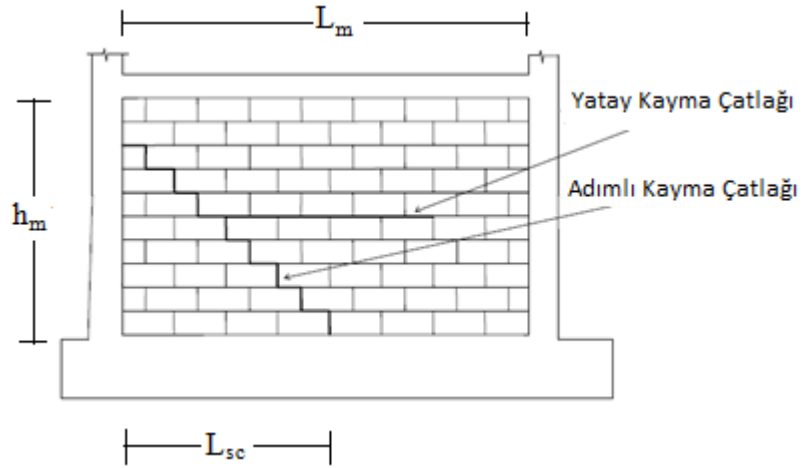
Şekil 2.13 Dolgu duvarlarda harç derzleri boyunca görülen kayma çatlakları (Crisafulli, 1997)

Harç derzleri boyunca yatay kayma çatlakları oluşumu da Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Çatlak oluşumu, basınç yüklemesi yapılan köşenin bir miktar altından başlayarak diyagonal olarak gözlenir ve dolgu duvar panelinin orta bölgelerinde çatlak yatay olarak devam etmektedir.



Şekil 2.14 Dolgu duvar panellerinde görülen harç derzleri boyunca yatay kayma çatlakları (Crisafulli, 1997)

Harç derzleri boyunca kayma çatlakları oluşmasında, dolgu duvar panelini oluşturan tuğla birimlerinin boyutlar önemi rol oynar. Potansiyel adımlı çatlakın yatay izdüşüm uzunluğu  $L_{sc}$ , tuğla birimlerinin boyutlarına bağlıdır ve Denklem 2.11 ile hesaplanabilir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 Dolgu duvar panelinde karşılaşılan yatay ve adımlı çatlaklar (Crisafulli, 1997)

$$L_{sc} = \frac{d}{2b} h_m \quad (2.11)$$

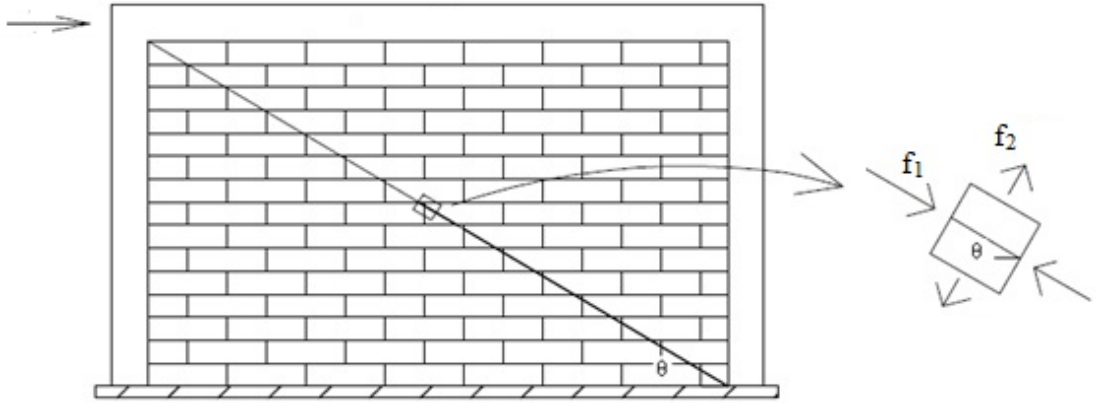
Burada  $d$  ve  $b$  sırasıyla tuğla biriminin uzunluğu ve yüksekliğidir (Şekil 2.11). Dolgu duvar panelinin uzunluğu ( $L_m$ ), diyagonal çatlakın yatay izdüşümünden ( $L_{sc}$ )

büyük olursa harç derzleri boyunca adımlı kayma çatlakları tam olarak oluşmayabilir. Yatay kayma çatlakları oluşma şartı Denklem 2.12’de verilmiştir.

$$\frac{h_m}{L_m} < \frac{2b}{d} \quad (2.12)$$

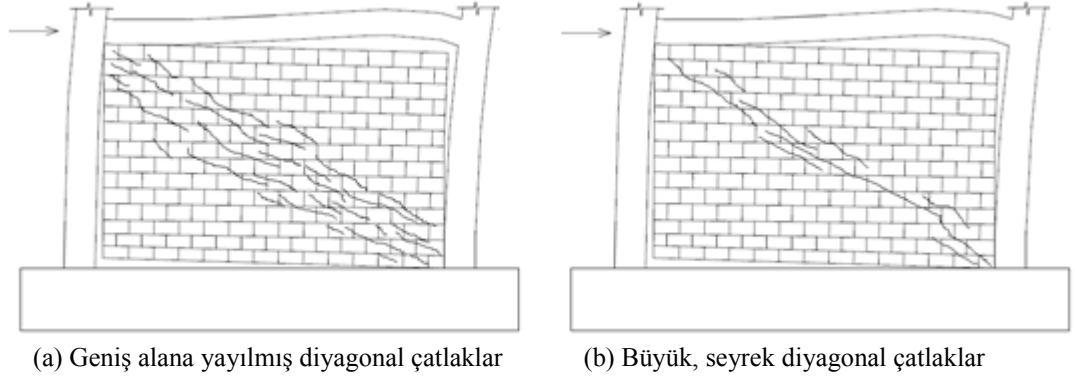
### Dolgu Duvar Panellerinde Diyagonal Çekme Çatlakları Oluşumu

Yatay yük etkisi altında dolgu duvar panelinde oluşan gerilme durumu genelde, diyagonal çekme çatlakları şeklinde oluşur. Bu çatlaklar, dolgu duvar panelinin orta bölgesindeki asal çekme gerilmelerinden oluşur; çünkü bu bölgede asal çekme gerilmesi daha yüksektir. Paneli orta bölgesinde başlayan diyagonal çatlak yatay kuvvetin artmasıyla birlikte diyagonal boyunca uç bölgelere doğru ilerler (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 Dolgu duvar panelinde iki eksenli çekme – basınç gerilme durumu (Crisafulli, 1997)

Bu tür çatlaklara, harç derzlerinin dolgu duvarı oluşturan tuğla birimlerinden güçlü olması durumunda veya duvar panelinde oluşan normal gerilmenin kayma gerilmesine üstün olduğu durumlarda (duvar paneli yüksekliğinin uzunluğuna olan oranı yüksek) rastlanmaktadır. Diyagonal çekme çatlakları dağılımı, duvar paneli özelliklerine bağlı olduğu kadar, panel – çerçeve ara yüz şartlarına da bağlıdır. Dolgu duvar panelinin enine doğrultuda güçlendirilmesiyle ya da panel – ara yüz şartlarının iyileştirilmesiyle birlikte bu tür çatlakların küçüldüğü; ama diyagonal boyunca geniş bir alana dağılım gösterdiği deneysel çalışmalarda görülmüştür (Şekil 2.17a). Aksi durumda hasar genellikle bir veya iki büyük çatlak şeklinde oluşur (Şekil 2.17b).



Şekil 2.17 Diyagonal çekme çatlak oluşumu (Crisafulli, 1997)

Tuğla elemanlarda çatlak oluşumu basınç ve çekme gerilmelerinin birlikte etkimesi sonucu oluşabilmektedir.  $f_2$  asal çekme gerilmesi,  $f'_{tb}$  tuğla elemanı çekme dayanımı değerine ulaştığında bu tür bir göçmenin oluştuğu varsayılmaktadır. Mann ve Müller(1982) dolgu duvar panelinin kayma dayanımının ( $\tau_m$ ) Denklem 2.13 ile bulunmasının uygun olacağını düşünmüştür.

$$\tau_m = \frac{f'_{tb}}{2.3} \sqrt{1 + \frac{f_n}{f'_{tb}}} \quad (2.13)$$

Stafford Smith ve Riddington(1978) yaptıkları sonlu eleman ağ modeli analizlerinde, dolgu duvar paneli orta bölgesinde oluşan asal çekme gerilmesi mertebesini düşünerek diyagonal çekme hasarı oluşturacak  $V_t$  kesme kuvvetini yaklaşık olarak hesaplamışlardır (Denklem 2.14). Burada  $f'_{tm}$  dolgu duvar panelinde izin verilebilir çekme gerilmesidir ve bu değer 0.07 MPa olarak alınması tavsiye edilmektedir.

$$V_t = 1.72 A_m f'_{tm} \quad (2.14)$$

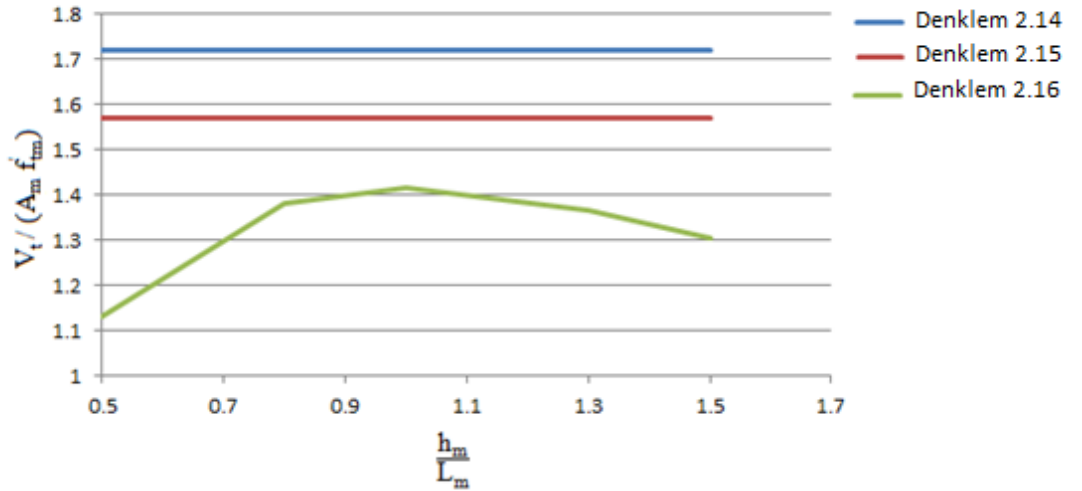
Priestley ve Calvi(1991)  $V_t$  ifadesine, diyagonal yüklenmiş dolgu duvar elemanının çekme gerilmesi ilişkisiyle ulaşmıştır (Denklem 2.15). Buradaki  $f'_{tm}$  “duvar panelinin direk çekme dayanımı”dır. Denklem 2.15’in elde edilmesinde dolgu duvar paneli malzemesinin izotropik olduğu kabulü yapılmıştır.

$$V_t = \frac{\pi}{2} d_m t f'_{tm} \cos \theta = \frac{\pi}{2} A_m f'_{tm} \quad (2.15)$$

Seneinejad ve Hoobs(1995) diğer çalışmalara benzer olarak, diyagonal yük etkisi altındaki dolgu duvar panelinin dayanımını hesaplamaya çalışmışlar ve Denklem 2.16'yı önermişlerdir.

$$V_t = \sqrt{2} A_m f'_{tm} \sin 2\theta \quad (2.16)$$

Şekil 2.18'de Denklem 2.14, 2.15, 2.16 da sunulan kesme kuvvetlerinin grafik şeklinde sunumu yapılmıştır. Denklem 2.14 ve 2.15'de kesme kuvveti değerinin, dolgu duvar paneli boyutlarından bağımsız olarak hesaplandığı görülmektedir; ancak Denklem 2.16'de görülmektedir ki duvar panel boyutlarının normal gerilme/kayma gerilmesi üzerinde doğrudan etkisi bulunmaktadır.



Şekil 2.18 Panel yükseklik / açıklık oranına bağlı olarak dolgu duvar panelinde oluşan  $V_t$  kayma kuvveti grafiği

### 2.3.1.2 Dolgu Duvar Panelinde Basınç Çatlağı Oluşumu

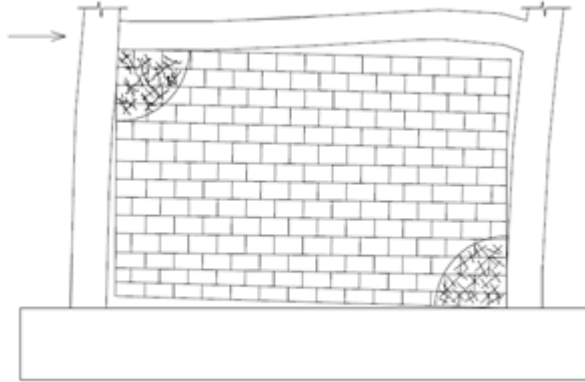
Dolgu duvar panelinde köşe çatlaması durumu ve diyagonal boyunca oluşan mekanizmalar, basınç çatlağı durumu ile ilişkilendirilmelidir. Bu tür hasar, normal gerilmenin yüksek mertebede olduğu durumda gerçekleşebilir. Denklem 2.8, 2.9 deki

$f_{n1}$ 'in dolgu duvar paneli basınç dayanımını aşmasıyla birlikte basınç çatlakları oluşması muhtemeldir. Denklem 2.5 veya 2.6'daki  $f_{n1} = f'_m$  olarak varsayılırsa, dolgu duvar paneli basınç mukavemeti Denklem 2.17 olarak düşünülebilir.

$$f'_m = \tau_m \frac{2b}{d} + f_n \quad (2.17)$$

### Köşe Çatlama Durumu

Dolgu duvarlı çerçevelerde, yükleme yapılan bölgeye yakın kısımlarda iki eksenli gerilme durumuna bağlı olarak duvar panelinde köşe çatlama mekanizması gerçekleşebilmektedir (Şekil 2.19). Bu tür hasar oluşumu genellikle çelik çerçeveli dolgu duvarlı yapılarda (çerçevenin esnek olduğu) görülmektedir.



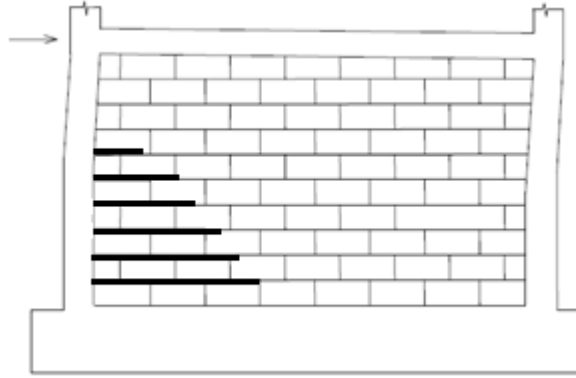
Şekil 2.19 Dolgu duvar panelinin köşelerinde basınç gerilmesi nedeniyle çatlak oluşumu (Crisafulli, 1997)

### Diyagonal Basınç Çatlağı Durumu

Bu tür mekanizma Şekil 2.16'da görülen diyagonal çekme çatlağı ile ilişkilidir. Dolgu duvar panelinde diyagonal çekme çatlağı oluştuğundan sonra, diyagonal boyunca çekme gerilme mertebesi azalmaktadır. Diyagonal basınç çatlağı, çekme çatlak oluşumunun hemen sonrasında oluşan bir mekanizmadır. İçi boş tuğla türü ile oluşturulan dolgu duvar panellerinde bu tür göçme mekanizması ani(gevrek) olarak gerçekleşmektedir.

### 2.3.1.3 Dolgu Duvar Panelinde Eğilme Çatlağı Oluşumu

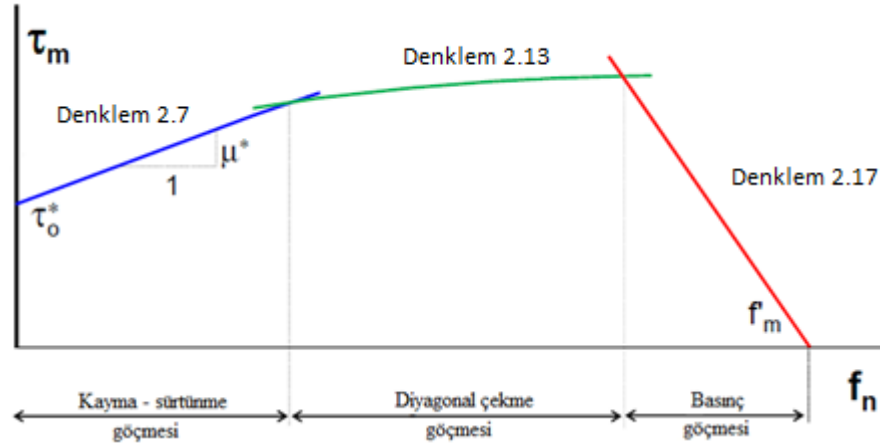
Çok katlı dolgu duvarlı çerçeveler gibi eğilme etkilerinin ağır bastığı, çerçeve kolonlarının zayıf olduğu veya dolgu duvar birimlerinin çekme dayanımlarının zayıf olması nedeniyle eğilme çatlakları duvar paneli çekme bölgesinde oluşabilmektedir. Bu durumun temsili Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Bu tür çatlak oluşumu sıkça gözlenmemektedir; çünkü duvar paneli ile çerçeve ara yüzünde ayrışma olasılığı daha yüksektir. Devirici moment genellikle eşdeğer basınç çubuğu mekanizmasıyla karşılanmaktadır.



Şekil 2.20 Dolgu duvar panelinde eğilme çatlağı oluşumu (Crisafulli,1997)

### 2.3.2 Yatay Yük Etkisi Altındaki Dolgu Duvar Panellerinde Farklı Göçme Türlerine Ait Göçme Zarfı

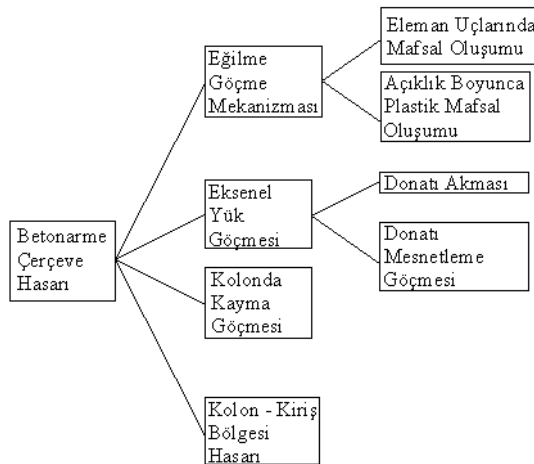
Denklem 2.7, 2.13 ve 2.17’de dolgu duvar paneline etkiyen normal kuvvete bağlı olarak farklı göçme türlerinin denklemi sunulmuştur. Şekil 2.21’de bu göçme türlerine ilişkin zarf eğrisi oluşturulmaya çalışılmıştır. Buna göre dolgu duvar paneline etkiyen gerilmenin türünün ve büyüklüğünün öngörülebilmesiyle sistemin hangi tür göçmeye maruz kalacağı önceden tahmin edilebilir.



Şekil 2.21 Mann ve Müller teorisine göre dolgu duvar paneli için oluşturulan göçme zarfı (Crisafulli,1997)

### 2.3.3 Yatay Yük Etkisi Altındaki Dolgu Duvarlı Çerçeveselerde Çerçeve Sisteminde Oluşan Hasarlar

Bu bölümde, dolgu duvar panelini çevreleyen çerçeve sisteminin yatay yük etkisi altındaki hasar durumları incelenecektir. Çerçeve elemanların karakteristik özelliklerine ve dolgu duvar paneli – çerçeve etkileşimine bağlı olarak farklı tür göçme mekanizmaları oluşabilmektedir. Çerçeve elemanlarındaki hasar oluşumu genellikle eğilmeye bağlı olarak plastik mafsallarla, kayma göçmesi ile, aksel kuvvet altında donatı akması ile veya bu etkilerin kombinasyonları ile oluşmaktadır. Şekil 2.22’de deneysel çalışmalar sonucu çerçeve elemanlarda gözlemlenen hasar durumları gösterilmiştir.

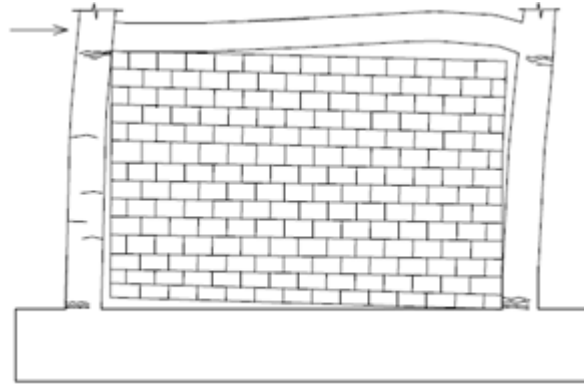


Şekil 2.22 Dolgu duvarlı çerçevelerin çerçeve elemanlarında görülen hasar türleri (Crisafulli,1997)

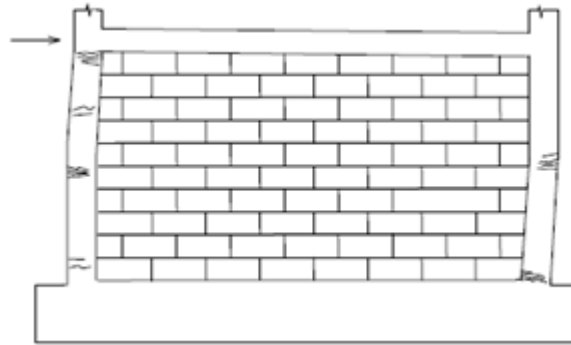
### 2.3.3.1 Çerçeve Sisteminde Oluşan Eğilme Göçme Mekanizması

Şekil 2.23’de bu tür göçme mekanizmasının temsili gösterilmiştir. Bu mekanizma durumu, eğilme momentinin maksimum olduğu bölge olan kolon eleman uçlarında oluşmaktadır. Dolgu duvar panelinde hasar olmadığı durum, tam bir göçme mekanizması olarak adlandırılmaz; çünkü bu durumda sistem, mafsallı diyagonal çubuklu sistem davranışı gösterir ve yük taşımaya devam eder.

Dolgu duvar panelinde yatay kayma çatlakları mekanizması oluştuğunda, plastik mafsal oluşumu her iki kolonda da meydana gelebilir. Bu mafsalların biri kolon uç bölgesinde, diğeri kolon orta bölgesinde görülür. Bu durumun temsili Şekil 2.24’te gösterilmiştir.



Şekil 2.23 Kolon eleman uçlarında eğilme sonucu oluşan göçme mekanizması (Crisafulli, 1997)



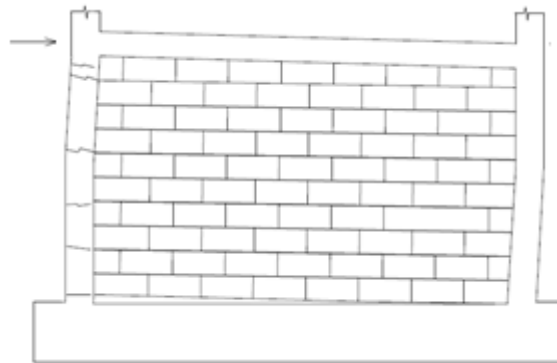
Şekil 2.24 Açıklık boyunca meydana gelen eğilme göçme mekanizması (Crisafulli, 1997)

### 2.3.3.2 Çerçeve Elemanlarda Eksenel Yük Göçmesi

Yatay kuvvet etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde, yükün mertebesinin artmasıyla birlikte dolgu duvar – çerçeve arasında ayrışmalar meydana gelir. Bu durumda çerçeve sistemi, dolgu duvar paneli ile birlikte diyagonal çubuklu kafes çerçeve sistemi olarak temsil edilebilir. Bu durumun bir sonucu olarak çerçeve elemanlardaki eksenel kuvvet mertebesi artacaktır. Kolonlarda, basınç nedeniyle göçme mekanizması oluşumu sıkça rastlanan bir durum değildir; çünkü betonarme kesitlerin basınç mukavemetinin çekme mukavemetine oranla fazla olduğu bilinmektedir. Yine de tekrarlı yük etkisi altında kolon elemanlarda burkulmaya bağlı olarak boyuna donatı hasarı meydana gelebilir. Betonarme elemanlarda çatlak oluşumu genellikle çekme etkisi sebebiyle olur. Çekme etkisi nedeniyle çerçeve elemanlarda oluşan göçme türleri aşağıda sunulacaktır.

#### Çekme Etkisi Sonucunda Kolon Elemanlarda Boyuna Donatı Akması

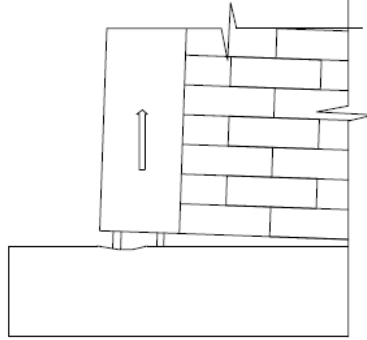
Çekme etkisi sonucunda boyuna donatı akmasına, genellikle yüksek katlı ve dolgu duvar yüksekliğinin açıklığına oranı yüksek olan yapılarda rastlanmaktadır. Yatay kuvvet etkisiyle birlikte çekme kolonunda yatay çekme çatlakları oluşur. (Şekil 2.25) Çerçeve yatay deplasmanı mertebesi arttıkça, kolon boyuna donatıları çekme etkisi ile birlikte akmaya başlar. Dolgu duvar paneli de, çerçevenin dönme hareketine bağlı olarak döner ve çatlak genellikle çerçevenin taban kısmında oluşur.



Şekil 2.25 Kolonda çekme türü hasar oluşumu (Crisafulli, 1997)

### Çekme Etkisine Bağlı Olarak Donatı Mesnetlenme Göçmesi Oluşumu

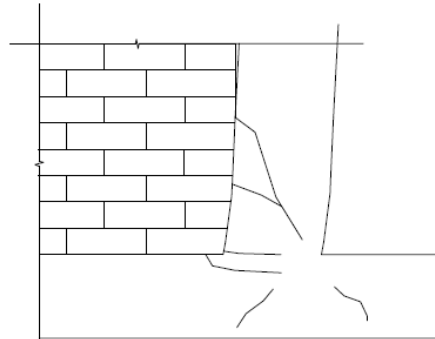
Bu tür göçme Şekil 2.26’da olduğu gibi, çekme kolondaki boyuna donatının mesnetlenme bölgesinde zorlanma etkisi sonucunda oluşur. Boyuna donatının mesnet içerisinde yeterli bindirme boyu mesafesi bırakılmasıyla birlikte bu tür bir göçmenin önüne geçilecektir.



Şekil 2.26 Donatı mesnetlenme göçmesi

### 2.3.3.3 Kolon Elemanlarda Kayma Göçmesi Oluşumu

Yatay yük etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde kolon elemanlar, dolgu duvar paneli ile etkileşim içerisindeydir. Bu etkileşim sonucunda kolonlarda kayma göçmesi oluşabilmektedir. Kesme etkisi bakımından en büyük zorlama, dolgu duvar paneli ile çerçeve sisteminin temas ettiği nokta olan yükleme bölgesi etrafında olur. Bu durumda Şekil 2.27’de gösterildiği gibi kolon kesitinde bir veya daha fazla sayıda büyük diyagonal çatlak oluşumu gözlemlenebilir.

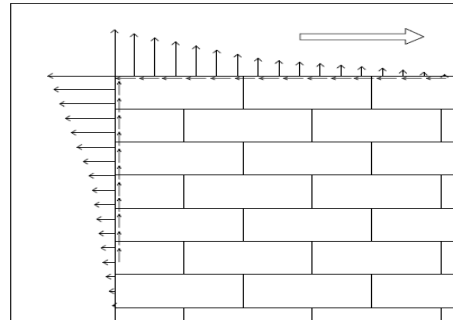


Şekil 2.27 Kolon elemanda kayma göçmesi oluşumu (Crisafulli, 1997)

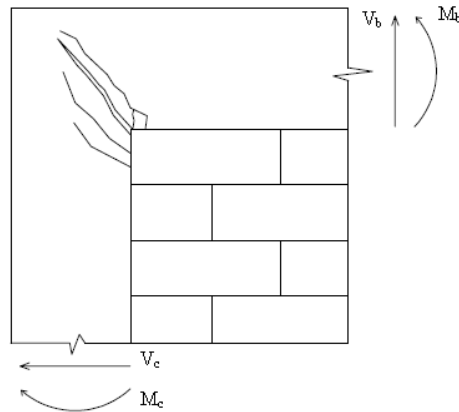
Kolon kesme dayanımı, büyük ölçüde enine kesitte bulunan donatı miktarı ve beton dayanımı ile ilişkilidir. Sistemdeki mevcut aksenal kuvvetin mertebesi de kolon kesme dayanım parametresi olarak belirleyici olabilmektedir.

#### 2.3.3.4 Kolon – Kiriş Birleşim Bölgesi Hasarı Oluşumu

Yatay yük etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde yükleme yapılan bölgede Şekil 2.28’de gösterildiği gibi dolgu duvar ile çerçeve arasındaki temas uzunluğu boyunca, yüksek mertebede normal ve kayma gerilmeleri oluşur. Bu gerilme durumu nedeniyle kolon – kiriş birleşim bölgesinin iç ve dış köşesi boyunca geniş diyagonal çatlak oluşumu gözlenebilir. Bu durumun temsili Şekil 2.29’da sunulmuştur. Bu tür bir hasar oluşumu ile birlikte yatay kuvvet, kat kirişlerinden kolon ve dolgu duvar panel elemanlarına uygun bir şekilde aktarılamamaktadır.



Şekil 2.28 Yükleme yapılan köşede normal ve kayma gerilmesi dağılımı (Crisafulli, 1997)



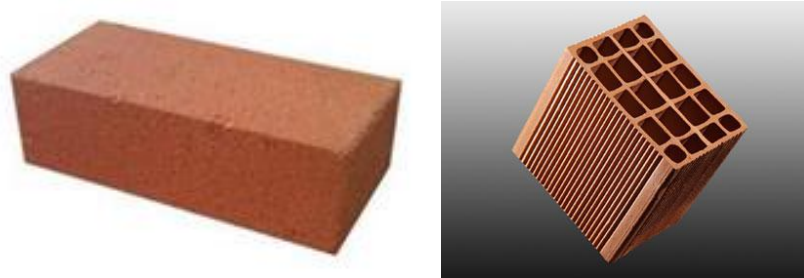
Şekil 2.29 Kolon – kiriş birleşim bölgesi hasarı (Crisafulli, 1997)

## 2.4 Taşıyıcı Sistemlerde Kullanılan Duvar Türleri ve Özellikleri

Özellikle deprem etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde kullanılan tuğla birimlerinin mekanik özellikleri, tüm yapının davranışını etkilemektedir. Bu amaçla duvar yapımında kullanılan tuğla birimlerinin türleri ve mekanik özellikleri alt başlıklarda tanıtılacaktır.

### 2.4.1 Kil Tuğla Birimleri

Kil tuğlalar genellikle boyutları 120 mm x 90 mm x 45 mm ile 300 mm x 180 mm x 120 mm arasında değişkenlik gösteren, farklı şekil ve boyutlarda imal edilen dikdörtgen birimlerdir. Birim hacim ağırlıkları 13 kN / m<sup>3</sup> ile 22 kN / m<sup>3</sup> aralığında değişkenlik göstermektedir. Kil ve şistler, yaklaşık olarak bünyelerinde %65 oranında silikon oksit ve %20 oranında aliminyum oksit içerir. Ayrıca bünyelerindeki mangan, fosfor, magnezyum, fosfor, potasyum gibi metalik bileşenler kil tuğlalarına ayırıcı renk verir ve durabilitesini artırıcı yönde etki yapar.



Şekil 2.30 Kil tuğla birimi

Kil tuğlası yapımında killi bileşenler, fırınlarda 750 °C ile 1300 °C arasında ısıtılma tabii tutulur. Isıl işlem sırasında, kil bileşeni karışımına su ilave edilir ve yüksek sıcaklık sayesinde kütle kenetlenerek kil karışımı yumuşar. Kısmi olarak vitrifikasyon başlar ve sıcaklık bir süre boyunca sabit tutulur. Bu süre, tuğlanın boyutu, hacmi ve fırın özelliklerine bağlı olarak kırk saat ile yüz elli saat arasında değişmektedir. Soğutma işleminin kontrollü olması, tuğlaların kalitesini büyük oranda etkiler.

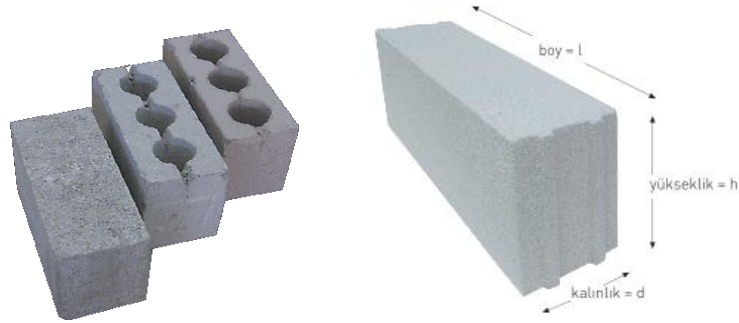
Tablo 2.1 Ebatlarına göre yatay delikli tuğla birimlerinin özellikleri (www.artuğtuğla.com)

Tuğla Birim Özelliği	8.5'lik Yatay Delikli Tuğla	10'luk Yatay Delikli Tuğla	13.5'lik Yatay Delikli Tuğla
Yükseklik x En x Boy	8.5 x 19 x 19 cm	10 x 19 x 19 cm	13.5 x 19 x 19 cm
1 Adet Ağırlık	2000 - 2200 gram	2400 - 2500 gram	3000 - 3100 gram
Metrekareye Tuğla Adedi	25	25	25
Hacim Ağırlığı	619 kg/m <sup>3</sup>	632 kg /m <sup>3</sup>	641 kg/m <sup>3</sup>

#### 2.4.2 Beton – Gaz beton Tuğla (Panel) Birimleri

Beton tuğla birimleri genel olarak su, mineral agrega ve Portland çimento karışımı ile elde edilir. Beton tuğla dayanımında en önemli faktörler; su – çimento oranı, kullanılan agrega türü, birim hacim ağırlık ve kür işlemlerinin uygulanmasıdır.

Bilinen ismiyle “gaz beton” olarak bilinen beton tuğlalar, süngertaşı, cüruf, perlit gibi farklı tür agregaların kullanılmasıyla tuğla biriminin birim hacim ağırlığını düşürmek mümkündür; ancak birim hacim ağırlığın azalmasıyla birlikte beton dayanımının da azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 2.31 Beton ve gaz beton tuğla birimleri (www.ytong.com.tr)

Gaz beton paneller betonarme yapı sistemlerinde dış ve iç duvar malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil olarak düz, geçmeli ve U türü olarak üçe grupta incelenebilir. Düz ve geçmeli duvar blokları her türlü betonarme, çelik, ahşap, prefabrike ve yığma yapıların iç ve dış duvarlarında kullanılabilir. U bloklar ise genellikle hatıl yapımında kalıp kullanımını ortadan kaldıran, beton hatıl kullanılması halinde yüzeylerde oluşan ısı kayıplarını engelleyen “U” kesitli bloklardır. Gaz beton panel elemanların standart boyutları Tablo 2.2’de sunulmuştur.

Tablo 2.2 Gaz beton tuğla panel standart boyutları (www.tgub.org.tr)

Gaz beton Panel Birim Özelliği	Düz Duvar Blokları	Geçmeli Duvar Blokları
Yükseklik x En x Boy	25 cm x 7.5 - 50 cm x 60 cm	25 cm x 15 - 50 cm x 60 cm
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	600 kg/m <sup>3</sup>	600 kg /m <sup>3</sup>

### 2.4.3 Harç

Harçlar, çimentolu (bağlayıcı) malzeme, agrega ve su karışımından oluşur ve tuğla birimlerinin yapısal olarak birbirlerini tutması için kullanılır. Harcı oluşturan malzemelerin her biri harcın davranışını doğrudan etkiler. Çimento; harcın durabilitesini, erken dayanım kazanmasını ve basınç dayanımını, kireç; işlenebilirliği, suyun harç bünyesinde tutulmasını ve elastikliği, su; çimentonun hidrasyonunu sağlamaktadır.

Harç, taze iken işlenebilir olmalı, sertleştiğinde ise dış yük etkisi altında tuğla birimlerini bir arada tutabilir seviyede olmalıdır. Harçlar, dolgu duvarların ses ve termal özelliklerini de etkiler. Harç yapımında, priz hızlandırıcı ve su püskürtücü karışımlar da kullanılmaktadır. Harçların içinde kullanılan mineral agregaların organik madde içermemesi ve düzgün granülometreli mineral agrega kullanılması harç dayanımını artırmaktadır. Dolgu duvarlı çerçevelerin yatay yük etkisi altında davranış ve hasar durumu incelenirken duvar harç özelliklerinin de dikkate alınması gerekmektedir.

Amerika Beton Enstitüsü (ACI) ve American Society for Testing and Materials (ASTM)'in tuğla standartlarında harç içerisindeki kireç madde miktarına bağlı olarak harç sınıflandırılması yapılmıştır. Bu sınıflandırma Tablo 2.3'de sunulmuştur.

Tablo 2.3 Yapı türüne bağlı olarak kullanılacak ASTM harç türleri (ACI 530.1, 1992)

ASTM Harç Tipi	Yapıya Uygunluk
M	Dolgu duvarın yüksek basınç yüküne, don etkisine, kasırga veya deprem gibi yatay yüke sıkça maruz kaldığı durumlar. İstinat yapılarında da bu tür harç önerilmektedir.
S	Yüksek eğilme bağ dayanımı istenen yapılarda, basınç ve yanal yüke maruz kalan yapılarda önerilmektedir.
N	Yapılarda sıfır kotu üzerindeki dolgu duvar panellerinde, iç duvar ve kısımlarında, dolgu duvar kaplamalarında ve yapısal olmayan kısımlarda kullanılması önerilmektedir.
O	Yük taşımayan duvar ve kısımlarında, basınç dayanımı 0.7 MPa değerini aşmayacak duvarlarda ve hava şartları nedeniyle aşınmaya maruz kalmayacak yapılarda kullanılması önerilmektedir.

ASTM harç tipi sınıflandırılması ACI 530.1(1992)'de çimento, kireç ve kum hacim oranları bakımından sınıflandırılmıştır. Bu oranlama aşağıda sunulmuştur.

M tipi harç: 1 hacim Portland çimentosu, ¼ hacim kireç, 3 ½ hacim kum

S tipi harç: 1 hacim Portland çimentosu, ½ hacim kireç, 4 ½ hacim kum

N tipi harç: 1 hacim Portland çimentosu, 1 hacim kireç, 6 hacim kum

O tipi harç: 1 hacim Portland çimentosu, 2 hacim kum, 9 hacim kum

Yapılarda kullanılan harçların birim hacim ağırlıkları  $17 \text{ kN/m}^3$  ile  $20 \text{ kN/m}^3$  arasında değişmektedir (Amrhein, 1992). ASTM standardına göre harç içindeki belirli tür malzemelerin çelik korozyonu ve harç kalitesi açısından sınırlandırılması gerekmektedir. ASTM, harç içinde kullanılan çimento malzemelerini Portland çimentosu ve dolgu duvar çimentosu olarak ikiye ayırmıştır. Her iki grup çimento da M, S, N alt gruplarından oluşmaktadır. Harcı oluşturan malzemelerin hacimsel oranları bilinmiyorsa gerekli harç dayanımını ve eşdeğer harç sınıfını elde edebilmek amacıyla ASTM standardı tablosundan faydalanılabilir (Tablo 2.4). Portland çimentosu adhezyonu yüksek bir malzemedir ve bu tür çimentoyla oluşturulan harç dayanımını su – çimento oranı büyük ölçüde etkiler. Harcın işlenebilirliğini, priz süresinin geciktirilmesini ve istenilen dayanımı sağlamak için Portland çimentosu, sönmüş kireç ile birlikte kullanılmaktadır.

Tablo 2.4 Dolgu duvar için harç oranları

Harç	Tip	Hacimsel Oranlar ( Çimentolu Malzemeler )									Nemli ve Gevşek Şartlarda Ölçülmüş Agreganın Hacmi
		Portland Çimentosu veya Harmanlanmış Çimento	Dolgu Duvar Çimentosu			Harç Çimentosu			Sönmüş Kireç veya Kireç Macunu		
			M	S	N	M	S	N			
Çimento - Kireç	M	1	—	—	—	—	—	—	1/4	Çimentolu bağlayıcı malzemelerin ayrı hacimleri toplamının 2 1/4 ünden az ve 3 katından fazla olamaz.	
	S	1	—	—	—	—	—	1/4 ile 1/2 arası			
	N	1	—	—	—	—	—	1/2 ile 1 1/4 arası			
	O	1	—	—	—	—	—	1 1/4 ile 2 1/2 arası			
Harç Çimentosu	M	1	—	—	—	—	—	1	—		
	M	—	—	—	—	1	—	—	—		
	S	1/2	—	—	—	—	—	1	—		
	S	—	—	—	—	—	1	—	—		
	N	—	—	—	—	—	—	1	—		
Dolgu Duvar Çimentosu	O	—	—	—	—	—	—	1	—		
	M	—	—	—	1	—	—	—	—		
	M	—	1	—	—	—	—	—	—		
	S	1/2	—	—	1	—	—	—	—		
	S	—	—	1	—	—	—	—	—		
Dolgu Duvar Çimentosu	N	—	—	—	1	—	—	—	—		
	O	—	—	—	1	—	—	—	—		
	O	—	—	—	1	—	—	—	—		

#### 2.4.4 Dolgu Duvar Yapımında Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Dolgu duvarın yapının deprem ve düşey yükler altında davranışına, rijitlik periyod, sönüm gibi dinamik özelliklerine önemli katkıları olduğu göz ardı edilmemelidir. Yapılarda yatay yük taşımadığı varsayılan dolgu duvar elemanlarının taşıma güçlerine ulaşana kadar perde duvar davranışı gösterdiği ve betonarme çerçevesi yapılar da çerçeveler arasında konumlandırılan dolgu duvarların sınırlı da olsa yatay yük taşıma gücü olduğu belirtilmiştir (FEMA178, 1998).

Yapılarda kullanılacak tuğla malzemelerinin diğer yapı malzemeleri gibi belirli mukavemet ve diğer fiziki özellikleri karşılaması gerekmektedir. Yapı mühendislerini genellikle malzemelerin dayanım ve deformasyona bağlı olan özellikleri ilgilendirmektedir. Bu alt başlıkta tuğla birimlerin ve harç ile birbirine bağlanmış dolgu duvar panellerinin basınç dayanımı, elastisite modülü, Poisson oranı gibi dayanım ve deformasyona bağlı özellikleri sunulacaktır.

#### 2.4.4.1 Tuğla Birimlerinin Mekanik Özellikleri

Tuğla birimlerinin basınç dayanımı genellikle direk basınç testiyle elde edilmektedir. Basınç dayanımı deneyine tabi tutulacak tuğla birimi örneklerinde, deney sonuçlarının sağlıklı bir şekilde elde edilebilmesi için, yükün uygulandığı tuğla yüzeyi Poisson oranı düşük bir malzeme ile tesviye edilmelidir. Bu işleme “kapaklama” denir. Kapaklama işlemi genellikle sülfür, alçı, kontrplak malzemelerle yapılmaktadır. Deney sırasında, tuğla birimi ile deney aletinin merdanesi arasındaki sürtünme tuğla biriminin davranışını etkileyebilmektedir. Merdane, tuğla biriminin uçlarının yanal deformasyon yapmasını engeller; bu durumda test numunesinin basınç dayanımı gerçeğe kıyasla daha yüksek mertebede elde edilir. Bu etki, eleman uzunluğunun, eleman kalınlığına olan oranının büyük olduğu numunelerde daha fazla olmaktadır.

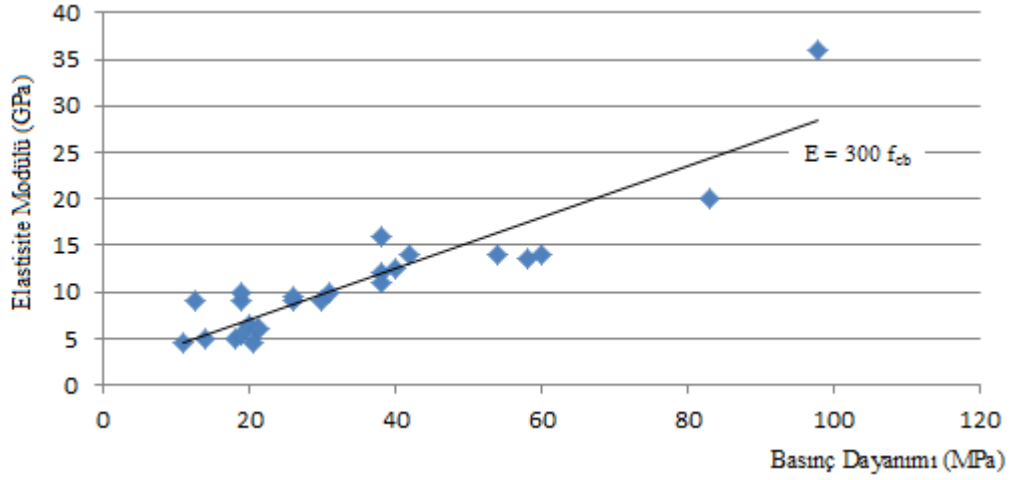
Crisafulli(1997) boyutları 290 mm x 90 mm x 75 mm olan beton tuğla birimleri üzerinde gerçekleştirdiği deneylerde kapaklama malzemesi olarak Poisson oranı düşük olan çeşitli malzemeler kullanılmıştır. Beş adet test numunesinden elde edilen sonuç doğrultusunda beton tuğla birimlerinin basınç dayanımları Tablo 2.5’te sunulmuştur. Sahlin(1971) beton tuğla birimlerinin elastisite modülü değerlerinin 3000 MPa ile 12000 MPa arasında değişkenlik gösterdiğini çalışmalarında sunmuştur.

Tablo 2.5 Farklı koşullar altında beton tuğla birimlerinin basınç dayanımları (Crisafulli,1997)

Uzunluk / Genişlik	75/90 = 0.83	75/90 = 0.83	75/90 = 0.83	230/75 = 3.07	230/75 = 3.07
Kapaklama Malz.	Alçı	Yumuşak Levha	Mantar	Alçı	Alçı
Basınç Dayanımı (MPa)	37.2	35.5	29.4	30.6	25.4

Kil tuğla birimlerinin elastisite modülü değerleri genellikle beton tuğla birimlerine göre daha düşük olarak elde edilmiştir. Kil tuğla birimlerinin basınç dayanımı ile elastisite modülü değeri arasında  $E = 300 f_{cb}$  ilişkisinin olduğu görülmüştür (Sahlin,1971). İlgili çalışmacının yapmış olduğu deneysel testlerin sonucu Şekil

2.32’de sunulmuştur. Şekil 2.32’deki grafikten kil tuğlaların basınç dayanımlarının 10 MPa ile 60 MPa arasında değişkenlik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 2.32 Kil tuğla birimlerinin deneysel elastisite modülü – basınç dayanımı grafiği (Sahlin,1971)

Tuğla birimlerinin Poisson oranı değerleri çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. McNary ve Abrams(1985) tuğla birimlerinin Poisson oranı değerlerinin 0.1 ile 0.22 arasında değiştiğini çalışmalarında sunmuşlardır. Bu çalışmalarda tuğla malzemesi türü belirtilmemiştir.

Tuğla birimlerinin çekme dayanımları eğilme testi, ayırma testi, çekme testi gibi teknikler ile bulunur. Dolgu duvarlı, betonarme ve çelik çerçevesi yapılarında yüklemenin düzlem içi olduğu durum incelenecekse, tuğla birimlerinin çekme dayanımlarının belirlenmesinde ayırma (yarma) deneyi en güvenilir yöntemdir. Bu testte tuğla birimlerinin birbirine zıt yüzlerine çizgisel basınç yükü uygulanır ve bu durum üniform yanal çekme gerilmesine neden olur. Çekme dayanımı bu testte

$$f_{tb} = \frac{2P}{\pi A_t} \text{ formülasyonu ile hesaplanır. Burada;}$$

$f_{tb}$ : Çekme dayanımı

P: Testte ölçülen basınç kuvveti

$A_t$ : Ayırma (yarma) düzlemi boyunca kesit alanıdır.

Beton tuğla bloklar üzerinde elde edilen test sonuçları, tek eksenli çekme dayanımının, tek eksenli basınç dayanımına bağlı olduğunu göstermektedir. Ayırma (yarma) deneyi için ampirik formül aşağıda sunulmuştur.

$$f_{tb}=0.34\sqrt{f_{cb}} \quad (2.18)$$

Çeşitli araştırmacılar tuğla birimlerinin çekme dayanımını, basınç mukavemeti değerlerinin belirli bir oranı şeklinde öngörmüşlerdir. Pratik olarak, tuğla birimlerinin çekme dayanımı değeri, basınç dayanımı değerinin onda biri olarak alınabilmektedir.



Şekil 2.33 Ayırma (yarma) deneyi düzeneği

#### 2.4.4.2 Bağlayıcı Harçların Mukavemet Özellikleri

Harçların basınç mukavemetinin belirlenmesinde 50 mm'lik küp numuneler veya uzunluk/çap oranı iki olan farklı boyutlardaki silindir numuneler kullanılabilir. (ASTM C109, 1998) Bu standartta silindir numunelerden elde edilen dayanımın genellikle daha düşük mertebede olduğu belirtilmektedir.

Tablo 2.6'te küp ve silindir numunelerden elde edilmiş 28 günlük harç dayanımları sunulmuştur. Bu tablo Amrhein(1992) tarafından oransal olarak farklı çimento: kireç: kum karışımları ile oluşturulan numuneler üzerinde yapılan testler sonucunda oluşturulmuştur.

Dolgu duvar içindeki harç derzleri, çok eksenli basınç etkisine maruz kalır. Bu nedenle çeşitli araştırmacılar tarafından yanal basınç etkisi altındaki harçların deneysel testleri gerçekleştirilmiştir. Hilsdorf(1969) yanal basınç etkisi altındaki harçların dayanımıyla ilgili olarak Denklem 2.19’u sunmuştur.

Tablo 2.6 Farklı harç türlerinin ortalama basınç dayanımı değerleri (Amrhein, 1992)

Tür	Çimento Hacimsel Oranı Çimento : Kireç : Kum	$f_j$ (MPa) Küp 50 mm x 50 mm	$f_j$ (MPa) Silindir 50 mm x 50 mm
M	1 : 1/4 : 7/2	17.2	14.5
S	1 : 1/2 : 9/2	12.4	10.3
N	1 : 1 : 6	5.2	4.3
O	1 : 2 : 9	2.4	-

$$f_{cj} = f_j + 4.1 \sigma_j \quad (2.19)$$

Burada:

$f_{cj}$ : yanal basınç da dahil edildiği durumdaki harç dayanımı

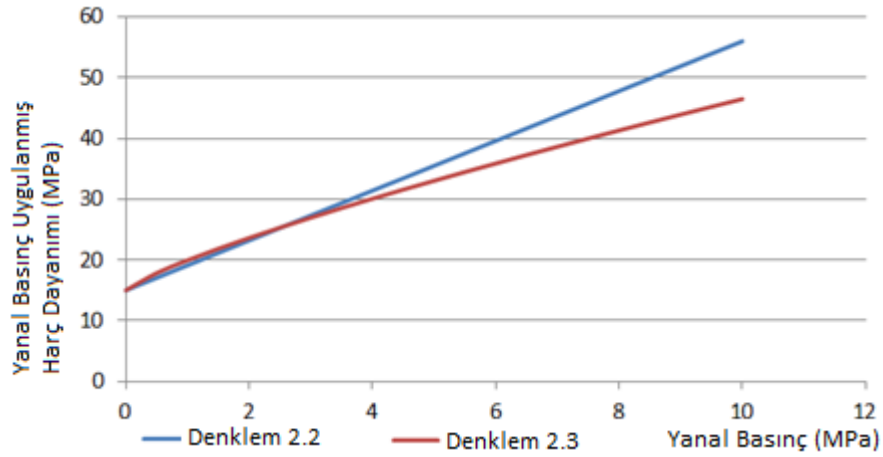
$f_j$ : eksenel basınç dayanımı değeri

$\sigma_j$ : yanal basınç

Hendry(1990) harç numunelerine yanal basınç büyüklüğü 0 – 11 MPa arasında değişen üç eksenli basınç testi uygulayarak bir takım testler gerçekleştirmiştir. Bu testler sonucunda sunulan doğrusal olmayan ilişki Denklem 2.20’de sunulmuştur.

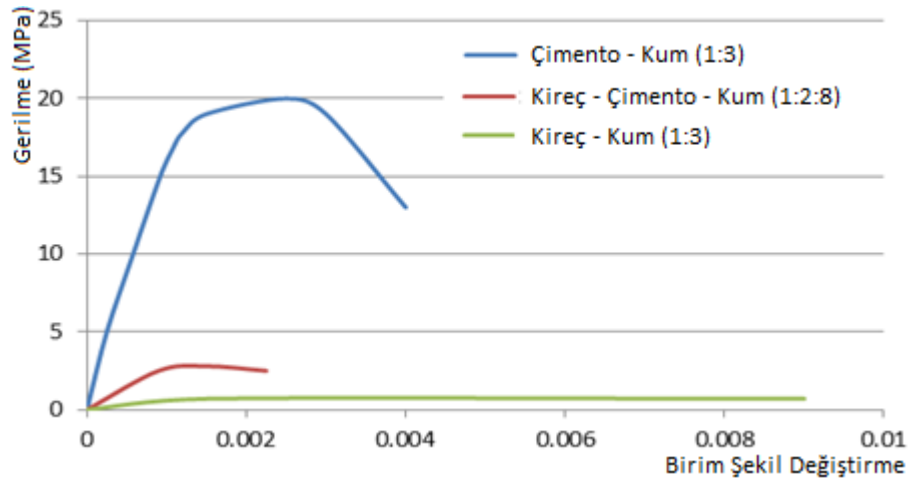
$$\frac{f_{cj}}{f_j} = 1 + 2.91 \left( \frac{\sigma_j}{f_j} \right)^{0.805} \quad (2.20)$$

Tek eksenli basınç dayanımı 15 MPa olan harç numunesinin artan yanal basınç etkisi altındaki grafik gösterimi Şekil 2.34 'de gösterilmiştir. Şekil 2.34'de görüldüğü üzere yanal basınç uygulanmış harç numunelerinin dayanımları önemli mertebede artmaktadır.



Şekil 2.34 Yanal basınç uygulanmış durumda harç dayanımı grafiği

Harçların basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi özelliklerini, harç içindeki kireç muhtevası önemli derecede etkilemektedir. Harç içindeki kireç miktarının artmasıyla birlikte harç elastisite modülü azalmaktadır. Şekil 2.35'te farklı tür bileşenlerden oluşan harçların gerilme - birim şekil değiştirme ilişkileri sunulmuştur.



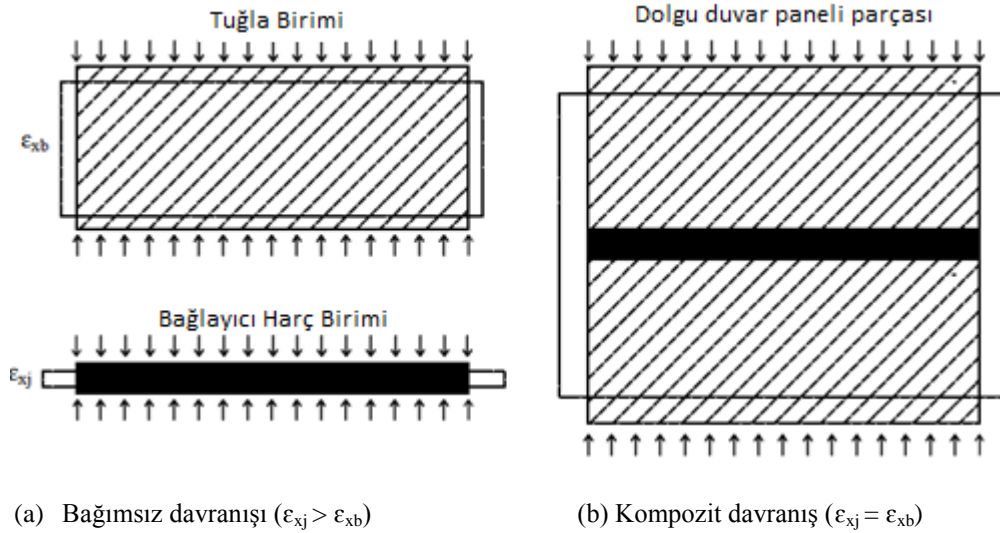
Şekil 2.35 Farklı tür bileşenlerden oluşan harçların gerilme - birim şekil değiştirme diyagramları (Sahlin, 1971)

#### 2.4.5 Tuğla Birimleri ile Oluşturulmuş Dolgu Duvar Panellerin Mekanik Özellikleri

Dolgu duvar davranışının çerçeve sistemlere olan etkisinde, duvarın rijitliğini etkileyen dolgu duvar elastisite modülünün önemi büyüktür. Dolgu duvar birimleri

arasında konumlandırılan harç malzemelerinin mekanik özellikleri, tuğla birimlerinininkinden farklı olduğu için dolgu duvar elastisite modülü değeri her bir doğrultu için farklıdır. Dolgu duvar elastisite modülü değeri; birim elemanların (tuğla ve harç) mekanik özelliklerine, duvar yüksekliğine, bağlayıcı harcın kalınlığına ve içerisindeki su muhtevasına, işçiliğe, duvara uygulanacak basınç yüklemesinin yönüne bağlıdır. Dolgu duvar elastisite modülü değeri, sıvalı ve sıvasız durumlara göre de farklı değerler almaktadır.

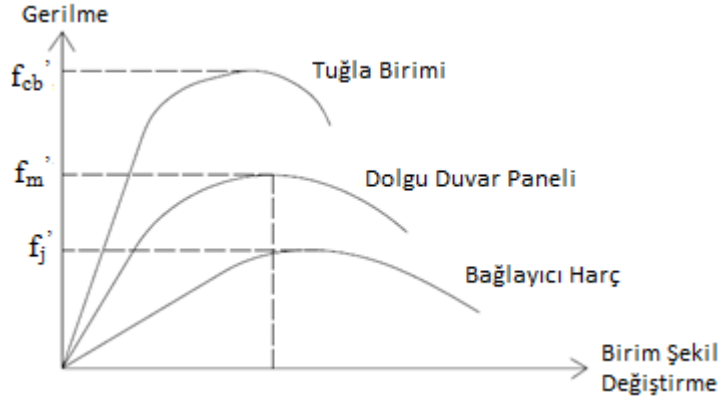
Dolgu duvar paneli basınç etkisine maruz kaldığında, tuğla ve bağlayıcı harç elemanı yatay olarak genişler. Genel olarak, harç malzemelerinin tuğla birimlere göre Poisson oranı değeri daha fazla, elastisite modülü değeri daha düşük mertebededir. Sonuç olarak, bu elemanlar birbirlerinden bağımsız olarak düşünüldüğünde aynı basınç yükü etkisi altında birbirlerinden farklı mertebede birim şekil değiştirme yapacaklardır (Şekil 2.36a). Bu birimler dolgu duvar içerisinde bir bütün olarak düşünülürse, sürtünme nedeniyle tuğla birimi – bağlayıcı harç ara yüzlerinde oluşacak bağ dayanımı sayesinde her iki elemanın da yanal deformasyonu birbirine eşit olacaktır (Şekil 2.36b).



Şekil 2.36 Basınç etkisi altında tuğla eleman ve bağlayıcı harçların bağımsız ve kompozit davranışı (Crisafulli, 1997)

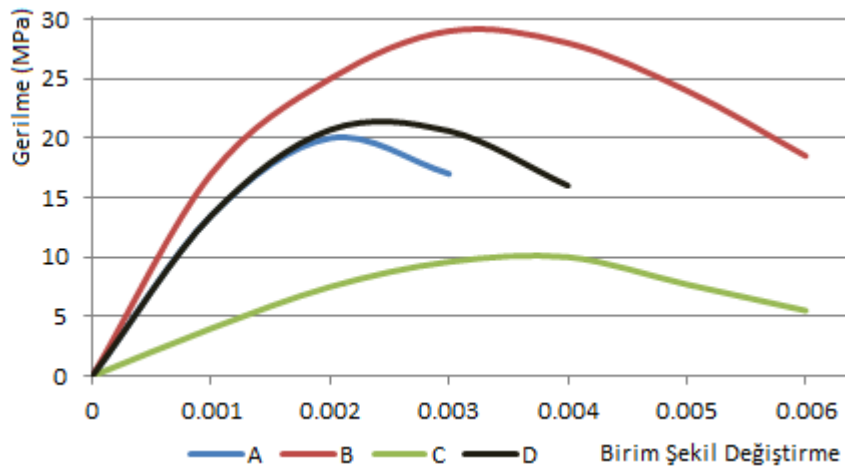
Şekil 2.37’de bağlayıcı harç birimi, tuğla birimi ve bu elemanlardan oluşturulmuş dolgu duvar prizmasının gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir. Buna göre dolgu duvarın basınç dayanımı, her zaman tuğla birim dayanımından düşük,

bağlayıcı harç dayanımından fazladır. (Paulay ve Priestley, 1992) Bu durumun temsili Şekil 2.37’te gösterilmiştir. Burada  $f_{cb}'$ ,  $f_m'$  ve  $f_j'$  sırasıyla tuğla birimi (eksenel), dolgu duvar, bağlayıcı harçların (eksenel) basınç dayanımıdır.



Şekil 2.37 Tuğla birimi, bağlayıcı harç ve dolgu duvar panelinin tipik gerilme – birim şekil değiştirme ilişkileri (Crisafulli, 1997)

Dolgu duvarların gerilme – birim şekil değiştirme ilişkileri çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Şekil 2.38’de basınç etkisi altındaki dolgu duvar prizmalarının gerilme – birim şekil değiştirme ilişkileri sunulmuştur. (Hendry, 1990) Tuğla birimlerinin harç bağlayıcı malzemesinin hacimsel oranlarının çimento: kireç: kum için 1: 1/4: 3 olduğu belirtilmiştir. Burada A: delikli kil tuğla birimlerinden oluşturulmuş duvar panelini, B,D: deliksiz kil tuğla birimlerinden oluşturulmuş duvar panelini, C: gaz beton bloklarından oluşturulmuş duvar panelini temsil etmektedir.



Şekil 2.38 Basınç etkisi altındaki tuğla dolgu duvarların gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri (Hendry, 1990)

Deneysel çalışmalar sonucunda Hendry(1990) tarafından elde edilen verilere göre kil tuğla birimlerin dayanımlarını yitirdiği anda gözlenen maksimum birim şekil değiştirme aralığının 0.002 ile 0.0045 olduğu görülmektedir. Abrams ve ark(1985) tarafından farklı karışımlardaki bağlayıcı harçlı dolgu duvar prizmalarının yapabildiği maksimum birim şekil değiştirme değerleri 0.0055 ile 0.0088 olduğu rapor edilmiştir. Naraine ve Sinha(1989) kil tuğlalardan oluşturdukları duvar prizmaları üzerinde yaptıkları testler sonucunda maksimum birim şekil değiştirme değerlerini 0.006 ile 0.0061 arasında olduğunu raporlamışlardır.

Beklen(2009) çeşitli araştırmacılar tarafından sunulan çalışmalarını derleyerek tuğla birimlerden oluşturulmuş dolgu duvarların elastisite modülü değerlerini tablo halinde sunmuştur. Bu derleme Tablo 2.7’de sunulmuştur. Burada  $E_d$  basınç altındaki duvarın elastisite modülü,  $E_c$  duvar panelini çevreleyen çerçeve betonunun elastisite modülü değeridir. Derlemede tuğla duvar birimlerinin türleri belirtilmemiştir.

Tablo 2.7 Tuğla duvar elastisite modülleri (Beklen, 2009)

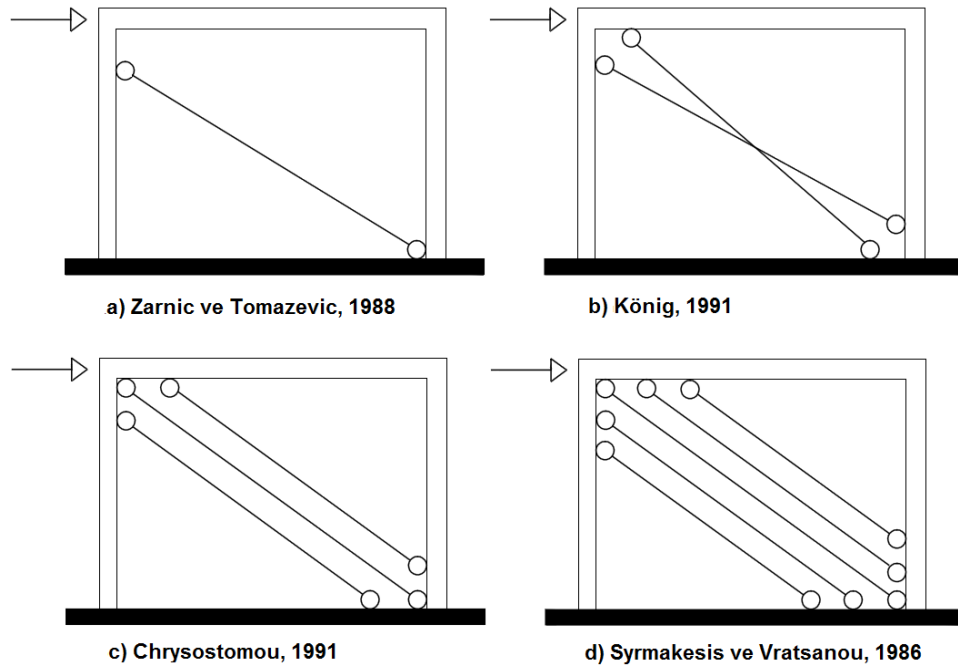
$E_d$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	Çalışmayı Yapan, Yıl	Üniversite	$E_d / E_c$
5200	30000	Aydoğdu,1995	YTÜ	1/6
6000	28500	Erkaya,1996	İTÜ	1/5
1240	30000	Yalçın,1999	İTÜ	1/24
5000	28500	Tüzün,1999	DEU	1/6
2850	28500	Çağatay,2002	ÇÜ	1/10
6000	12000	Öktem,2003	İTÜ	1/2
15200	29600	Erçetin,2004	CBÜ	1/2
1393	28500	Karslıoğlu,2005	KSÜ	1/20
700	25310	Dündar,2006	ÇÜ	1/36
1650	25000	Özdoğdu, 2006	SAÜ	1/15
17000	28500	Budak, 2006	YTÜ	1/1.7
714	29600	Çağlayan, 2006	CBÜ	1/40
1000	28000	Tarakçı, 2006	PAÜ	1/28
3000	32000	Dönmez, 2006	İTÜ	1/10
1000		DBYBHY,2007		

Karaduman(2004), yaptığı çalışmada G2 harç sınıflı gazbeton kullanmış ve sıvasız dolgu duvarın elastisite modülünü 1500 MPa; sıva etkisi göz önüne alındığında bu değer 2091 MPa olduğunu görmüştür. Buna göre dolgu duvarların elastisite modülü incelemesinde, sıva etkisinin görmezden gelinmesi yanlış bir yaklaşım olmaktadır.



kuvvetlerinin hassasiyeti açısından uygun bulunmamaktadır. Çerçeve elemanlardaki kayma kuvvetleri ve eğilme moment değerleri gerçekçi olmamakta ve plastik mafsalların oluşum bölgeleri uygun olarak ifade edilememektedir. Bu nedenle çeşitli araştırmacılar tarafından diyagonal çoklu çapraz çubuk modelleri sunulmuştur. Şekil 3.2'de sunulan modeller, tekil eşdeğer diyagonal çapraz çubuklu model ile karşılaştırıldığında dolgu duvar panelinin çerçeve elemanlara olan etkisini daha iyi ifade etmektedir.

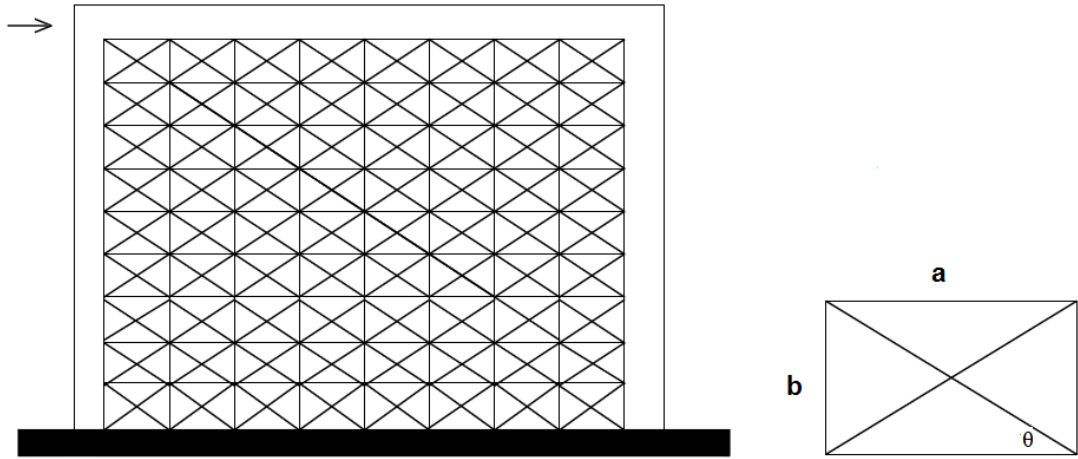
Şekil 3.2'a'da sunulan model Zarnic ve Tomazevic(1988) 'in deney sonuçlarından elde ettikleri veriler doğrultusunda sunulmuştur. Bu testlerde dolgu duvar üst bölgesindeki hasar, muhtemelen deney sırasında yükleme için kullanılan aletin kalibrasyonunun hatalı olması sonucu diyagonal dışında gerçekleşmiştir. Bu model kayma kuvvetlerinin, kolon üst bölgesinde hasar yaptığı durumda uygulanabilir; ancak araştırmacılar tarafından bu tür bir göçme mekanizmasına sıklıkla rastlanmamıştır. Şekil 3.2 b, c, d' de sunulan modeller ise çerçeve iç kuvvetlerinin daha hassas olarak elde edilmesine yöneliktir.



Şekil 3.2 Diyagonal çapraz çubuk modelinin düzenlenmiş durumu ve çoklu çubuk modelleri

Şekil 3.3’de gösterildiği gibi Andraus(1985) diyagonal çubuk modelini genelleştirerek ve dolgu duvar panelini kafes türü sistem şeklinde temsil etmeye çalışmıştır. Her sonlu eleman hücresi dört düğüm noktasına sahiptir. Dikey payandalar için dolgu duvar birkaç dikey şerite bölünür ve her bir şerit yerine aksel rijitlik ile ilişkilendirilen kafes elemanlar yerleştirilir. Diyagonal payandalarda ise öncelikle dolgu duvar, kayma panellerine ayrıştırılır. Her bir dolgu duvar hücresi için biri çekme, diğeri basınç elemanı olmak üzere iki adet diyagonal payanda yerleştirilir. Payandaların elastisite modülü ve kalınlıkları orijinal duvar ile aynıdır. Payanda en kesit alanı ( $A_d$ ) Denklem 3.1 ile hesaplanabilir (Dündar, 2006). Burada  $\nu$  dolgu duvar elemanın Poisson oranıdır.

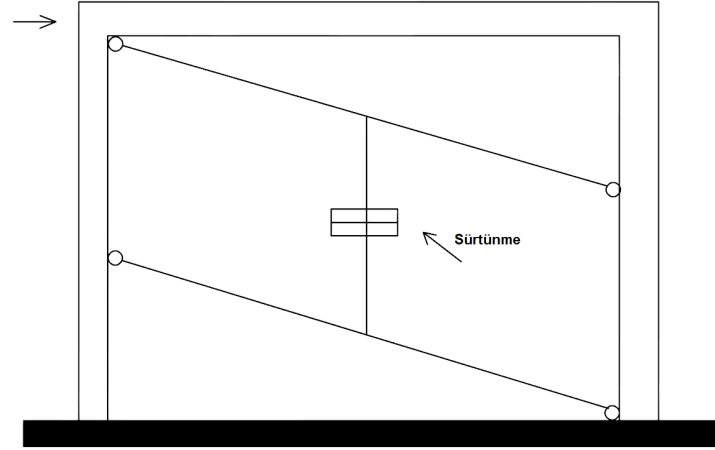
$$A_d = \frac{a^2 t}{4b(1+\nu) \cos^3 \theta} \quad (3.1)$$



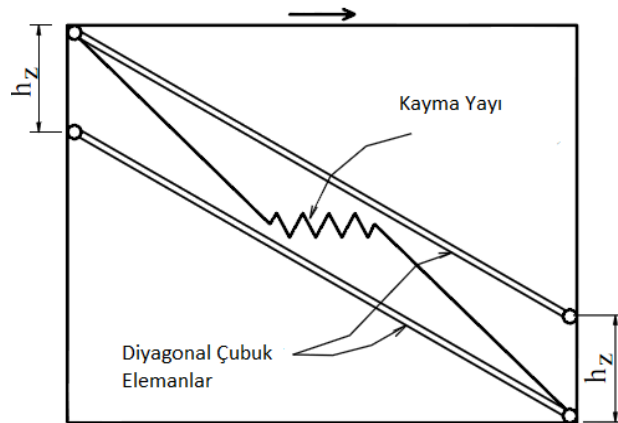
Şekil 3.3 Eşdeğer payanda modeli (Dündar, 2006)

Yatay yük etkisi altında, dolgu duvarlı çerçevelerde analitik yöntem olarak kullanılan eşdeğer diyagonal çapraz çubuk modellerinde, dolgu duvarda meydana gelecek yatay kayma çatlağı tam olarak ifade edilememektedir. Leuchars ve Scrivener(1976) kolon orta bölgesinde oluşabilecek iç kuvvetlerin temsili ve dolgu duvarda oluşabilecek kayma çatlağının temsili için Şekil 3.4'de temsili yapılan modeli sunmuştur.

Dolgu duvarlı çerçevelerde, yatay yük etkisi altında en sık görülen hasar türlerinden biri de dolgu duvar panellerinde oluşan kayma göçmesidir. Bu nedenle Crisafulli(1997) tarafından, özellikle bu göçme mekanizması etkilerini hesaba katan bir model geliştirilmeye çalışılmıştır (Şekil 3.5). Bu modelde her iki yönde kullanılan kayma yayı ve ikili çubuk kullanılarak dolgu duvar panelinin kayma ve basınç etkileri birbirinden ayrı olarak hesaba katılmak istenmiştir. Eşdeğer diyagonal çubukların birbirlerine paralel oldukları ve aralarında  $h_z$  düşey mesafe olduğu kabul edilmektedir. Bu değer, yatay yük etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevede dolgu duvar ile çerçeve arasındaki temas boyu uzunluğudur ve çerçeve yüksekliğinin yarısı veya üçte biri olarak kabul edilebilmektedir.



Şekil 3.4 Dolgu duvarlı çerçevelerin yatay kayma etkisi altındaki davranışının temsili için Leuchars, Scrivener(1976) tarafından önerilen model



Şekil 3.5 Dolgu duvar sisteminde, kayma göçmesi beklenen dolgu duvarlı çerçevelerde Crisafulli(1997) tarafından önerilen model

Şekil 3.5'de sunulan modele göre, sistem tepkisinin başlangıç fazı genel olarak kayma yayı ile kontrol edilir. Dolgu duvar kayma dayanımı aşıldığında panel elemanlarda yatay kayma çatlakları başlar. Bu andan itibaren mekanizma değişir ve çerçeve elemanlardaki iç tesir değerleri görece artış gösterir. Çerçeve meydana gelen kesme kuvvetleri ve eğilme momentlerinin Şekil 3.2'de sunulan üçlü diyagonal çubuk modeli ile yaklaşık olarak aynı olduğu ilgili araştırmacı tarafından belirtilmiştir. Kayma yayının özellikleri, dolgu duvar panel özelliğinin gerçek davranışını yansıtacak şekilde hesaplanmalıdır. Kayma yay rijitliği ( $K_s$ ), eşdeğer diyagonal çapraz çubukların toplam rijitliğinin belirli bir oranı ( $\gamma_s$ ) olarak hesap edilmektedir (Denklem 3.2).

$$K_s = \gamma_s \frac{A_{ms} E_m}{d_m} \cos^2 \theta \quad (3.2)$$

Burada  $A_{ms} E_m$  : eşdeğer diyagonal çapraz çubukların aksenal rijitliği

$d_m$  : Çerçevenin diyagonal uzunluğu

$\theta$  : Diyagonal çapraz çubuğun yatay ile yaptığı açı (derece)

$\gamma_s$  : Dolgu duvar rijitliğinin kayma yayına aktarılacak oranı (0.5 - 0.75)

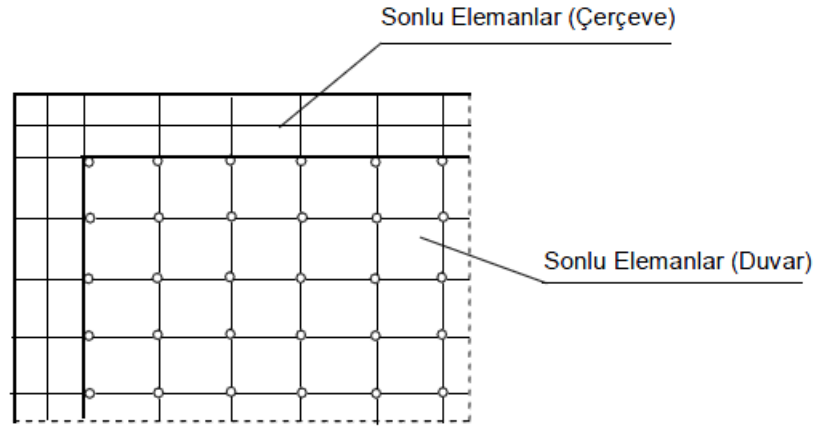
olmaktadır.

### **3.3 Birim Elemanlardan Oluşturulan Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Mikro Modelleme (Sonlu Eleman Ağ Modellemesi)**

Dolgu duvarlı çerçevelerin sonlu elemanlar ağı ile modellenmesi ilk olarak Mallick ve Savern(1967) tarafından yapılmıştır. Sonlu eleman ağ modelinin kullanılmasıyla birlikte çerçevelerde oluşan lokal çatlama, ufalanma etkileri ve duvar panellerinde oluşan gerilme dağılımları daha sağlıklı belirlenmektedir. Dolgu duvarlı çerçeve modeli oluşturulurken her bir eleman için en uygun sonlu eleman parçasının kullanılması hesap hassasiyetini artıracaktır. Şekil 3.6'da örnek bir sonlu eleman ağ modeli sunulmuştur.

Sonlu eleman ağı ile modellenen dolgu duvarlı çerçevelerde, gerçek davranışın temsil edebilmesi için panel – çerçeve ara yüzlerinin uygun olarak modellenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde analiz sonucunda elde edilen sonuçların geçerliliği tartışmaya açık olacaktır.

Sonlu eleman analiz programının kütüphanesinden, analiz için yeterli serbestlik derecesine sahip elemanların kullanılması uygun olacaktır. Çalışmada, dolgu duvarlı çerçevelerin düzlem içi etkileri incelenecek olduğundan düzlem gerilme durumunun yeterli olacağı düşünülecektir.



Şekil 3.6 Dolgu duvarlı çerçevenin sonlu eleman ağ modeli (Beklen, 2009)

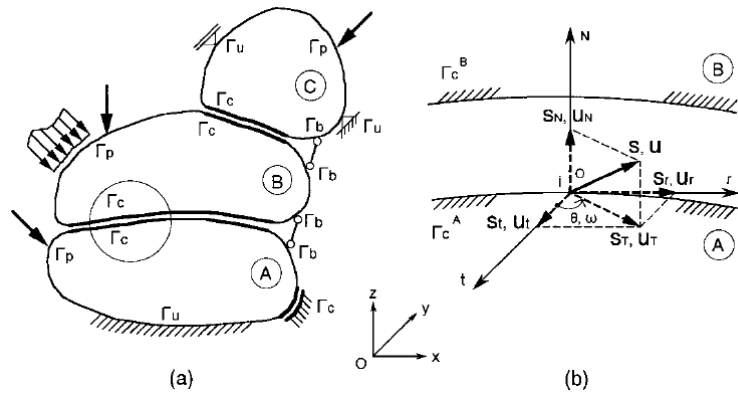
### ***3.3.1 Dolgu Duvar – Çerçeve Ara Yüz Elemanı Olarak “Gap(Boşluk) Elemanı ve Problemin Matematiksel İfadesi***

Dolgu duvar – çerçeve ara yüz etkileşiminin tanımlanmasında “gap(boşluk)” elemanlar da sıklıkla kullanılmaktadır. Ara yüzü temsil eden bu elemana başlangıç bir boşluk değeri atanır. Eksenel yük etkisi altında bu boşluk kapanmaya başlayacak ve bu işlem tamamlandıktan sonra dolgu duvar – çerçeve arasında yük aktarımı gerçekleşecektir.

Doudoumis(2001), dolgu duvar - çerçeve arasındaki temas probleminin artımsal yük durumundaki formülasyonunu sunmuştur. Buna göre elastik cisimlerin yarıstatik üç boyutlu tek doğrultudaki temas problemi, aşağıdaki varsayımlar altında sunulmuştur:

- a) Küçük birim şekil değiştirme ve deplasmanlar kabulü vardır.
- b) Doğrusal elastik malzeme kabulü vardır.
- c) Her cismin (dolgu duvar ve çerçeve elemanı)  $\Gamma_u$ ,  $\Gamma_p$ ,  $\Gamma_c$ ,  $\Gamma_b$  olmak üzere dört adet sınır şartı vardır.  $\Gamma_u$ ,  $\Gamma_p$  sırasıyla önceden belirlenmiş olan deplasman ve yüzey kuvvetlerinin;  $\Gamma_b$  cisimler arasında iki taraflı bağlantıların; ve  $\Gamma_c$  Coulomb ve Signorini türü sürtünme yasalarını da sağlayan iki yönlü temas sınır şartlarıdır.
- d) Her cisme ait  $\Gamma_c$  sınırı pürüzsüzdür.
- e)  $\Gamma_u$  ve  $\Gamma_b$  sınır şartlarının uygulanmasında, sürtünen cisimlerin rijit cisim hareketi yapmasının engellendiği varsayımı vardır.

Şekil 3.7'de birbirine temas eden cisimlerin üç boyutlu gösterimi, temas noktalarındaki "i" nokta çiftlerinin lokal koordinat sistemi ve bu sistemin pozitif yönleri gösterimi yapılmıştır.



Şekil 3.7 (a) Birbirine temas eden cisimlerin (duvar ara yüz modellemesi) üç boyutlu gösterimi  
 (b) Temas noktalarındaki "i" nokta çiftlerinin lokal koordinat sistemi ve bu sistemin pozitif yönleri (Doudoumis, 2001)

İki cisim arasındaki (A ve B cismi) herhangi "i" temas çifti noktası için O-N-T-R lokal Kartezyen koordinat sistemi belirlenmiştir. Şekil 3.7'de gösterildiği üzere O-N

lokal ekseni sınıra normal doğrultuda ve A cisminin dışarı doğrudur. O-N, O-T ve O-R lokal eksenlerinin doğrultuları sırasıyla şu şekilde tanımlanır:

- A cisminin  $s = \{s_t, s_r, s_N\}$  pozitif reaksiyonlarının (sınır gerilmelerinin) bileşkesi
- $u_A$  ve  $u_B$  pozitif sınır deplasmanları
- Görelî pozitif sınır deplasmanları  $u = u_A - u_B = \{u_t, u_r, u_N\}$ .

Ortak reaksiyonlar  $s = \{s_t, s_r, s_N\}$  ve görelî deplasmanlar  $u = \{u_t, u_r, u_N\}$ , temas sınır şartlarının formüle edilmesinde kullanılmaktadır. Bu vektörleri  $s_N = \{0, 0, s_N\}$ ,  $u_N = \{0, 0, u_N\}$ ,  $s_T = \{s_t, s_r, 0\}$ ,  $u_T = \{u_t, u_r, 0\}$  şeklinde normal ve teğetsel  $\Gamma_c$  sınır bileşenlerine ayırabiliriz:

$$|s_T| = \cos \theta \cdot s_t + \sin \theta \cdot s_r \quad (3.3)$$

$$|u_T| = \cos \omega \cdot u_t + \sin \omega \cdot u_r \quad (3.4)$$

Burada  $\theta$  ve  $\omega$ , sırasıyla  $s_t$  ve  $u_t$  teğetsel bileşenlerin O-T eksenine yaptığı açıdır (Şekil 3.7b). Signorini'nin tek eksenli temas yasası  $u_N$  ve  $s_N$  normal bileşenler ile ilişkilidir ve temsili Denklem 3.5'te gösterilmiştir.

$$s_N \leq 0 \quad u_N \leq 0 \quad s_N \cdot u_N = 0 \quad (3.5)$$

Coulomb'un sürtünme yasası, cisimlerin görelî olarak teğetsel kayması durumunda; ancak cisimlerin temas durumunu kaybetmediği durumu tanımlar ve temsili Denklem 3.6, 3.7, 3.8'de yapılmıştır.

$$f_t = |s_t| + \mu \cdot s_N = \cos \theta \cdot s_t + \sin \theta \cdot s_r + \mu \cdot s_N \leq 0 \quad (3.6)$$

$$\text{Eğer } f_t = |s_t| + \mu \cdot s_N < 0 \text{ ise } \delta u_T = 0 \quad (3.7)$$

$$\text{Eğer } f_t = |s_t| + \mu \cdot s_N = 0 \text{ ise } \delta u_T = -|\delta u_T| \cdot (s_T / |s_T|) \quad (3.8)$$

Burada:

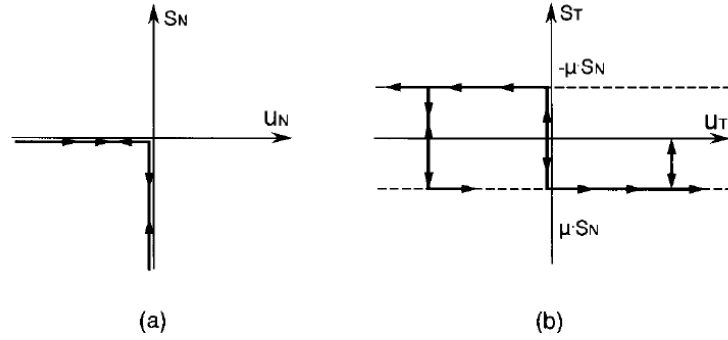
$f_t$  "kayma fonksiyonu"

$\mu = \tan \phi$  "sürtünme katsayısı"

$\delta u_T = u_T$ 'nin sonsuz küçük artımsal ifadesi

$|\delta u_T| = \delta u_T$ 'nin normudur.

Signorini yasası tersinirdir ( $s_N$  değeri sadece  $u_N$ 'nin nihai değerine bağlıdır); ancak Coulomb yasası tersinir değildir ( $s_N$  değeri sadece  $u_N$ 'nin zaman değişkenine bağlıdır) (Şekil 3.8a ve Şekil 3.8b). Bu nedenle, problemin artımsal formülasyonu kullanılmalıdır. Başlangıç temas sınır şartları bilindiğinde dış yüklerin sonsuz küçük artımı nedeniyle oluşan deplasman ve gerilmelerin belirsiz artımsal değeri tanımlanmalıdır. Sınır şartlarına bağlı olarak türetilen formülasyonlar Doudomis(2001) tarafından sunulmuştur.



Şekil 3.8 a) Signorini'nin tek eksenli temas yasası b) Coulomb'un sürtünme yasası (Doudomis, 2001)

Dolgu duvar – çerçeve ara yüz etkileşiminin tanımlanmasında “yay” elemanlar da sıklıkla kullanılmaktadır. Bu elemanlar dolgu duvar paneli ile çerçeve arasında karşılıklı iki düğüm noktasından bağlanır. Analiz öncesinde yaylara atanan “rijitlik katsayısı” sayesinde başlangıç durum şartı belirlenir. Elemanın her iki düğüm noktası da iki serbestlik derecesine sahiptir. Yay elemanı basınç ve kayma kuvvetlerini aktarabilmekte, çekme kuvvetlerini ise aktaramamaktadır. Dolgu duvar – çerçeve arasında çekme bağ dayanımı zayıf olduğundan kayma türü etkileşimin hesaba alınmaması analiz hassasiyeti açısından bir olumsuzluk yaratmayacaktır. Şekil 3.9'da yay elemanının temsili sunulmuştur. Yay elemanının sistem içerisinde aktif olmasını sağlayacak normal ve teğetsel rijitlik değerleri uygun olarak atanmalıdır. Çalışma kapsamında teğetsel rijitlik değeri alınmayacaktır.



kuvvetin belirli bir kritik oranına ulaştığında birbirine temas eden yüzeyler göreceli sürtünme hareketine başlar. Burada bahsedilen “belirli oran” sürtünme katsayısı olarak ifade edilir ve cismin imal edildiği malzemeye bağlıdır. King ve Pandey(1978) tarafından yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen sürtünme katsayıları Tablo 3.1’de sunulmuştur. Yine de bu çalışma sonucunun revize edilmesi gerekebilir; çünkü beton yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısının beton – tuğla sürtünme katsayısı değerinden küçük olması uygunsuz olabilir.

Tablo 3.1 Farklı tür malzemelerin sürtünme katsayıları (King ve Pandey, 1978)

Sürtünen Birimler	Sürtünme Katsayısı ( $\mu$ )
Çelik - Tuğla	0.5
Çelik - Harç	0.44
Beton - Çelik	0.41
Beton - Tuğla	0.62
Beton - Harç	0.42
Beton - Beton	0.44

Coulomb sürtünme teorisine göre yapısal elemanların ara yüz davranışlarının uygun olarak modellenenilmesi için üç durum göz önüne alınmalıdır.

**Sıkı Temas Durumu Var, Kayma Durumu Yok**

Yüzeyler temas halinde iken ara yüz elemanlarında  $f_n$  normal basınç gerilmesi mevcuttur.  $\tau$  kayma gerilmesinin Denklem 3.9’u sağladığı durumda kayma gerçekleşmez.

$$\tau < \mu f_n \quad (3.9)$$

$\mu$  ara yüz sürtünme katsayısıdır. Ara yüzeyler, basınç gerilmesine maruz kaldığında  $f_n$  değeri pozitif alınır.

### **Kayma ve Sürtünmenin Bir Arada Olduğu Kritik Durum**

Yüzeyler halen temas durumundadır; ancak ara yüz sürtünme dayanımı kayma gerilmesine eşit olduğu için kayma durumu başlamıştır. Denklem 3.10 ile ifade edilmiştir.

$$\tau = \mu f_n \quad (3.10)$$

### **Dolgu Duvar ile Çerçeve Temasının Olmadığı Durum**

Bu durumda yüzeyler birbirlerinden ayrılmıştır. Ara yüzey elemanlarında normal ve kayma gerilmeleri oluşmamaktadır. Genellikle ara yüz modellerinde yüzeye normal doğrultuda oluşan çekme gerilmelerinin bu tür ayrılmaya neden olduğu düşünülmektedir ve bu nedenle ara yüz elemanlarına çekme bağı dayanımı atanmaz; ancak belli bir mertebeye kadarki çekme gerilmesi için ara yüz elemanlarına çekme dayanımı atanabilir. Bu durumda dolgu duvar – çerçeve arasındaki etkileşim daha iyi temsil edilebilir.

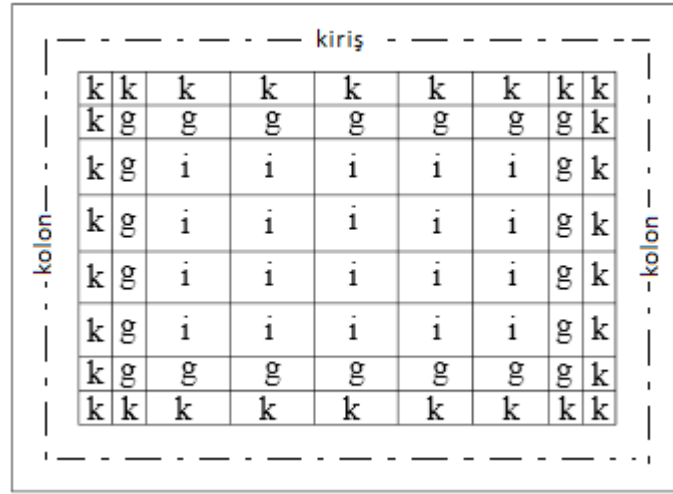
### ***3.3.3 Dolgu Duvarlı Düzlemsel Çerçeve Sistemlerin Analizi İçin Kullanılabilecek Örnek Bir Modelleme***

Düşey düzlemde iç kısımları herhangi bir yapı malzemesiyle doldurulmuş taşıyıcı çerçeve sistemler, yük etkisinde dolgu ile birlikte yer değiştirirler. Dolgu ile çerçevenin bu ortak hareketi salt boş çerçeve sistemin hareketine göre taşıma gücünde ve rijitlikte önemli artışlar ortaya koyar. Düzgün(1988) oluşturduğu sonlu elemanlar ağ modelinde, çerçeve elemanların deformasyonlarını çubukların deformasyonu şeklinde; dolgu duvar elemanların deformasyonlarını da dikdörtgen düzlem levhaların deformasyonları şeklinde yazmıştır. Bu nedenle çubuk ve dolgu sonlu eleman parçalarının her birinin deplasman davranışını elde etmek için, Hermit Polinomlarına bağlı şekil fonksiyonları kullanılmıştır. Düzgün(1988), bu şekil fonksiyonlarının sonlu bir elemanın düğüm noktalarında ve komşu sonlu elemanlar

için benzer deplasman şartlarının ifadesinde çok iyi neticeler verdiğini çalışmasında göstermiştir.

Dolgu duvarlı düzlemsel çerçeve sistemlerin analizi için geliştirilen bu örnek analitik yöntemin kabulleri (Düzgün,1988):

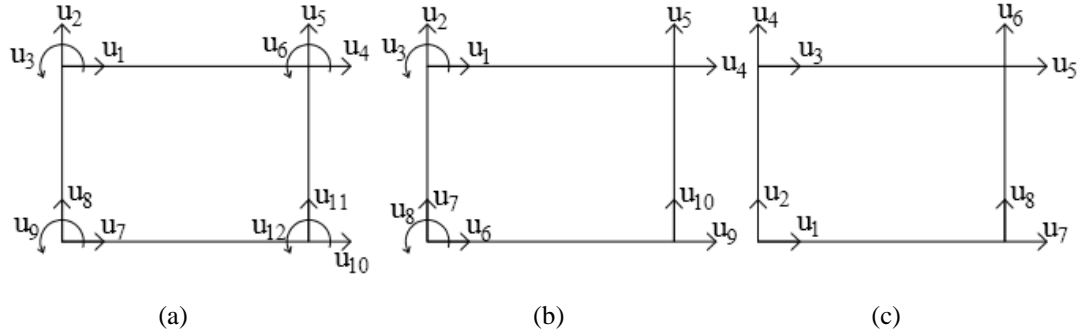
- Dolgu duvarın deformasyonları, çerçeve tarafından sınırlandırılmıştır.
- Dolgu duvar ile çerçeve arasında aderans mevcuttur.
- Dolgu duvar ile çerçeve arasındaki sınırlarda uygunluk şartlarının sürekliliği tam olarak sağlanmıştır.
- Sistemin malzemeleri, homojen, izotrop ve doğrusal elastiktir.
- Deprem ve rüzgar gibi dinamik kuvvetler, kat hizalarında etkiyen eşdeğer statik yatay kuvvetlerdir.



Şekil 3.11 Dolgu duvar sistemin dikdörtgen sonlu elemanlarla modellenmesi (Düzgün, 1988)

Yerdeğiştirme sırasında, çerçeve ile dolgunun ortak davranışından dolayı, dolgu sistemin kenar bölgesi, çerçeve ile aynı şekil değiştirme etkisindedir. Buna karşılık dolgunun iç bölgesinin çerçeveden etkilenmesi, kenar bölgelerdeki kadar olmamaktadır. Şekil 3.11'deki sonlu elemanlar modellemesinde, kenar bölgedeki sonlu elemanlar "K", geçiş bölgesindeki sonlu elemanlar "G" ve iç bölgedeki sonlu elemanlar "İ" ile isimlendirilmiştir. Buna göre dolgu duvar sistemin toplam rijitlik matrisi; 12 serbestlik dereceli kenar elemanların, 10 serbestlik dereceli geçiş

elemanlarının ve 8 serbestlik dereceli düzlemsel dikdörtgen sonlu elemanların rijitliklerinin toplamı olarak ele alınmıştır. Bu elemanların serbestlik dereceleri Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 (a) 12 serbestlik dereceli kenar sonlu elemanı (b) 10 serbestlik dereceli geçiş sonlu elemanı (c) 8 serbestlik dereceli iç bölge sonlu elemanı (Düzgün,1988)

### 3.4 Dolgu Duvarın Eşdeğer Tekil Diyagonal Basınç Çubuklu Modellenmesine İlişkin Çalışmalar ve Parametrik Örnekler

Bölüm 3.2’de düzlem içi yatay kuvvet etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde, duvarların “eşdeğer diyagonal basınç çubuğu” ile modellenebileceği belirtilmişti. Bu tür modelleme basit düzeyde olsa da düzlem içi yatay kuvvet etkisi altındaki çerçeve rijitliğini yeterli mertebede temsil etmektedir. Konuyla ilgili olarak pek çok araştırmacı, eşdeğer diyagonal basınç çubuk genişliğini deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda elde etmişlerdir. Bu çalışmalar Bölüm 3.4.1’de, çalışmalara ilişkin parametrik örnekler Bölüm 3.4.2’de sunulacaktır. Örnekler tek kat, tek açıklıklı düzlem çerçeve üzerinde sunulacaktır.

### 3.4.1 Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuğu Genişliğinin Hesabına Yönelik Çalışmalar

#### **Polyakov(1956)**

Dolgu duvarlı çerçevelerin yatay yük etkisi altında düzlem içi rijitlik değerlerinin hesaplanmasında deneysel ve analitik olmak üzere pek çok çalışma gerçekleştirmiştir. Düzlem içi yatay yük etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde duvar rijitliklerinin temsillerinde en etkili modelleme tekniğinin “eşdeğer diyagonal basınç çubuğu yöntemi” olduğunu düşünmüştür. Eşdeğer basınç çubuğu genişlik formülünü ilk olarak sunan araştırmacılardan biridir.

#### **Holmes(1961)**

Holmes(1961) dolgu duvarlı çerçevelerde Polyakov’un ortaya attığı “eşdeğer diyagonal basınç çubuğu” yöntemini ilk olarak geliştiren araştırmacılardan biridir. Denklem 3.11’de eşdeğer diyagonal basınç çubuğunun elastik kısılmasına bağlı olarak düzlem içi etkiler sonucunda göçme durumuna ulaşan dolgu duvarlı çerçevelerin, yapabileceği maksimum yatay deplasmanın formülü sunulmuştur:

$$S_H = e'_c d \cos a \quad (3.11)$$

Burada;

$S_H$  = Dolgu duvarlı çerçevenin tepe noktasının yapabileceği maksimum yatay deplasman değeri (mm)

$e'_c$  = Göçme anındaki dolgu duvarlı çerçevenin, dolgu duvarında oluşan birim şekil değiştirme değeri (mm/mm)

$d$  = Dolgu duvar diyagonal uzunluğu (mm)

$a$  = Dolgu duvar diyagonalinin yatay ile yaptığı açı (derece)

Holmes(1956) çalışmalarında ayrıca yatay yük etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde basınç etkisi sebebiyle oluşan köşe çatlamları ile ilgili olarak Denklem 3.12'yi sunmuştur:

$$H = \frac{24 EI e'_c d}{h^3 \left(1 + \frac{I}{I_0} \cot \alpha\right) \cos \alpha} + Af_c \cos \alpha \quad (3.12)$$

Burada bir önceki sayfadaki tanımlamalara ek olarak;

H = Köşe çatlama göçmesi oluşturacak yatay kesme kuvveti (kN)

E = Kolon Young(elastisite) modülü değeri (kN/mm<sup>2</sup>)

I = Kolon eylemsizlik momenti değeri (mm<sup>4</sup>)

h = Çerçeve yüksekliği (mm)

I<sub>0</sub> = Kiriş atalet momenti değeri (mm<sup>4</sup>)

A = Etkili göğüsleme kirişi genişlik en kesit alanı (mm<sup>2</sup>)

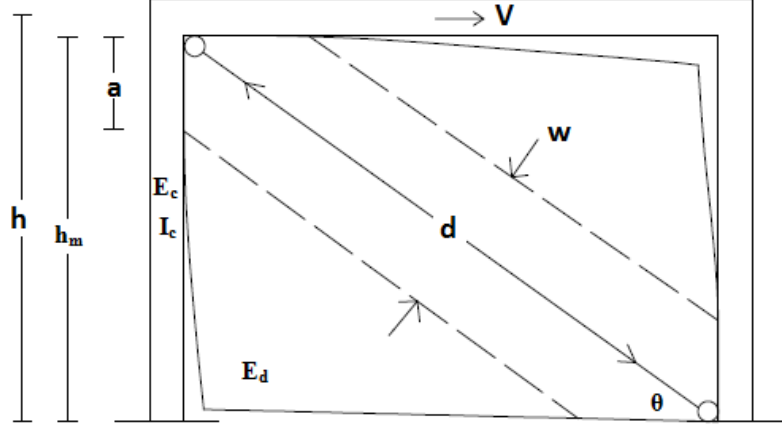
f<sub>c</sub> = Dolgu duvar malzemesinin basınç dayanımı (kN/mm<sup>2</sup>)

Araştırmacı tarafından, A en kesit alanı değerinin t(d/3) olarak hesaplanması uygun görülmüştür. Burada t değeri dolgu duvar malzemesinin kalınlık değeri (mm) olmaktadır. Denklem 3.11 ve Denklem 3.12 birlikte düşünüldüğünde dolgu duvarlı çerçeve sisteminin düzlem içi yatay etkiler altında göçme durumundaki rijitliği hesaplanmış olmaktadır.

### **Stafford Smith ve Carter(1969)**

Araştırmacılar eşdeğer diyagonal basınç çubuğu teorisinin gelişimine katkıda bulunmayı sürdürmüşlerdir. Formülasyonlarında, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu etkili genişliği değerinin çerçeve ve dolgu duvar görece rijitliğine bağlı olduğunu göstermeye çalışmışlardır. Düzlem içi yatay yük etkisi altında, dolgu duvar ile çerçeve arasındaki temas noktaları belli oranda (köşe bölgeler hariç) kaybolur (Şekil 3.13). Tez çalışmasında da kullanılacak olan bu değer formülü Denklem 3.13'te sunulmuştur.

$$\frac{a}{h} = \frac{\pi}{2 \lambda h} \quad (3.13)$$



Şekil 3.13 Eşdeğer diyagonal basınç çubuğunun ve temas uzunluğu hesaplanmasında kullanılan parametreler

Burada;

$a$  = Düzlem içi yatay yük etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde duvar paneli ile çerçeve sistemi arasındaki temas uzunluğu değeri (mm)

$h$  = Çerçeve ekseninden itibaren kolon yüksekliği (mm)

$\lambda$  = Dolgu duvar ile çerçeve görelî rijitliğini temsil eden parametre ( $\text{mm}^{-1}$ )

Dolgu duvar ile çerçeve görelî rijitliğini temsil eden parametre Denklem 3.14 ile hesaplanabilir.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_d t \sin 2\theta}{4 E_c I_c h_m}} \quad (3.14)$$

Burada yukarıdakilere ek olarak:

$E_d$  = Dolgu duvar Young(elastisite) modülü ( $\text{kN/mm}^2$ )

$t$  = Dolgu duvar kalınlığı (mm)

$\theta$  = Dolgu duvar diyagonalinin yatay ile yaptığı açı (derece)

$E_c$  = Kolon eleman Young Modülü ( $\text{kN/mm}^2$ )

$I_c$  = Kolon elemanı atalet momenti ( $\text{mm}^4$ )

$h_m$  = Dolgu duvar boy uzunluğu (mm)

### **Mainstone(1971)**

Mainstone(1971) ölçekli olarak beton dolgu duvarlı ve tuğla duvarlı numuneler üzerinde birtakım deneysel çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarında  $\lambda$  görelî rijitlik parametresini de kullanmıştır. Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliğini,  $\lambda h$  boyutsuz parametresine bağılı olarak tuğla ve beton dolgu duvarlı çerçeveler için elde etmiştir. Denklem 3.15 ve 3.16,  $\lambda h$  boyutsuz parametresinin dört ve beş arasında olması durumunda; Denklem 3.17 ve 3.18 ise bu parametrenin beşten büyük olması durumunda kullanılabilir.

$$\frac{w}{d} = 0.175(\lambda h)^{-0.4} \quad \text{tuğla duvar} \quad (3.15)$$

$$\frac{w}{d} = 0.115(\lambda h)^{-0.4} \quad \text{beton duvar} \quad (3.16)$$

$$\frac{w}{d} = 0.16(\lambda h)^{-0.3} \quad \text{tuğla duvar} \quad (3.17)$$

$$\frac{w}{d} = 0.11(\lambda h)^{-0.3} \quad \text{beton duvar} \quad (3.18)$$

Burada:

$w$  = Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği (mm)

$d$  = Dolgu duvar diyagonal uzunluğu (mm)

$\lambda$  = Dolgu duvar ile çerçeve görelî rijitliğini temsil eden parametre ( $\text{mm}^{-1}$ )

$h$  = Çerçeve ekseninden itibaren kolon yüksekliği (mm)

### **Liauw ve Kwan (1971)**

Düzlem içi yatay kuvvet etkileri altında dolgu duvarlı çerçevelerde eşdeğer diyagonal basınç çubuğu değerinin hesaplanmasında Liauw ve Kwan(1971) Denklem 3.19’u önermişlerdir.

$$w = \frac{0.95 h \cos \theta}{\sqrt{\lambda h}} \quad (3.19)$$

Burada:

w = Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği (mm)

h = Çerçeve ekseninden itibaren kolon yüksekliği (mm)

$\theta$  = Dolgu duvar diyagonalinin yatay ile yaptığı açı (derece)

$\lambda$  = Dolgu duvar ile çerçeve görelî rijitliğini temsil eden parametre ( $\text{mm}^{-1}$ )

Araştırmacılar, sistemdeki çerçevenin çok rijit olduğu ve dolgu duvar panelinin rijitliğinin düşük olduğu durumlarda bile, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu değerinin bir üst limitinin olduğu sonucuna varmıştır. Buna göre, Denklem 3.19 eşdeğer diyagonal basınç çubuğu maksimum değerinin hesaplanmasında kullanılabilir.

### **Decanni ve Fantin (1986)**

Decanni ve Fantin(1986) düzlem içi yatay kuvvet etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde, dolgu duvarların çatlamış ve çatlamamış durumları için  $\lambda h$  boyutsuz parametresine bağlı kalarak iki çift denklem takımı geliştirmiştir. Daha sonra Crisafulli(1997) bu çalışmaları düzenlemiştir. (Denklem 3.20, 3.21, 3.22, 3.23) Dolgu duvarın çatlamış ve çatlamamış olduğu durum için ( $\lambda h < 7.85$ ) w/d grafik çizimi Şekil 3.14’de oluşturulmuştur.

Dolgu duvarın çatlamamış olduğu durum:

$$\lambda h < 7.85 \text{ olması durumunda } w = \left( \frac{0.748}{\lambda h} + 0.085 \right) d \quad (3.20)$$

$$\lambda h > 7.85 \text{ olması durumunda } w = \left( \frac{0.393}{\lambda h} + 0.130 \right) d \quad (3.21)$$

Dolgu duvarın çatlamış olduğu durum:

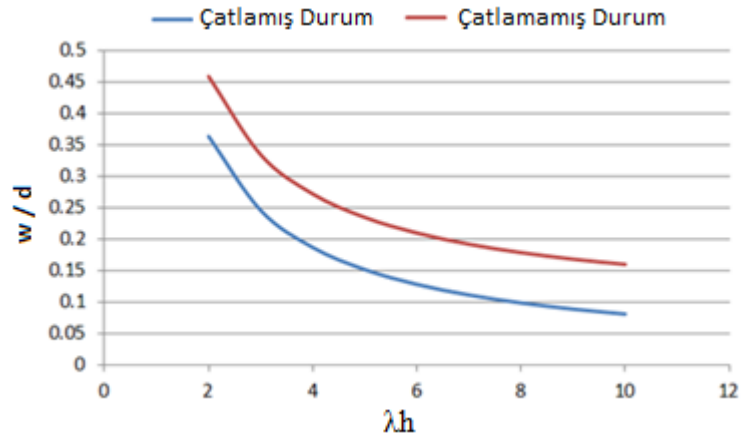
$$\lambda h < 7.85 \text{ olması durumunda } w = \left( \frac{0.707}{\lambda h} + 0.010 \right) d \quad (3.22)$$

$$\lambda h > 7.85 \text{ olması durumunda } w = \left( \frac{0.470}{\lambda h} + 0.400 \right) d \quad (3.23)$$

w = Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği (mm)

h = Çerçeve ekseninden itibaren kolon yüksekliği (mm)

d = Dolgu duvar diyagonal uzunluğu (mm)



Şekil 3.14  $\lambda h < 7.85$  olması durumunda w/d oranı grafiği

### **Moghaddam ve Dowling (1988)**

Moghaddam ve Dowling(1988) ölçekli dolgu duvar modelleri üzerinde gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda eşdeğer diyagonal basınç çubuğu etkili genişliğini, dolgu duvar diyagonal uzunluğunun altıda biri olarak hesaplamışlardır.

### **Eurocode 8 (1988)**

Avrupa’da yürürlükte olan Eurocode 8 şartnamesi, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu etkili genişliği değerinin 0.15d alınması durumunda mühendislik hassasiyeti açısından yeterli olacağını bildirmiştir. Ayrıca bu şartnamede, dolgu duvarların üçlü eşdeğer diyagonal çubuk sistemi ile modellenebileceğinden bahsedilmiş ve bu durumda çerçeve iç kuvvetlerinin daha hassas olarak hesaplanabileceği öngörülmüştür.

### **Paulay ve Priestley(1992)**

Araştırmacılar, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu etkili genişliği değerinin 0.15d alınması durumunda, mühendislik hassasiyeti açısından yeterli olacağını bildirmiştir.

### **Durrani ve Luo (1992)**

Araştırmacılar, Mainstone(1971)’un dolgu duvarlı çerçeveler üzerinde elde ettiği denklemi düzenlemeye çalışmıştır. Dolgu duvar rijitliğinin ifade edilmesi amacıyla  $\gamma$  parametresi tanımlanmıştır. Bu parametre ile birlikte eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliğinin hesaplanması amaçlanmıştır.

$$w = \gamma d \sin 2\theta \quad (3.24)$$

$$\gamma = 0.32 \sqrt{\sin 2\theta} \left( \frac{H^4 E_d t}{m E_c I_c h_m} \right)^{-0.1} \quad (3.25)$$

$$m = 6 \left( 1 + \frac{6 \tan \left( \frac{E_b I_b H}{E_c I_c L} \right)}{\pi} \right) \quad (3.26)$$

Burada:

$w$  = Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği (mm)

$\gamma$  = Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği hesabında kullanılan parametre

$d$  = Dolgu duvar diyagonal uzunluğu (mm)

$\theta$  = Dolgu duvar diyagonalinin yatay ile yaptığı açı (derece)

$H$  = Çerçeve ekseninden itibaren kolon yüksekliği (mm)

$E_d$  = Dolgu duvar Young(elastisite) modülü ( $\text{kN/mm}^2$ )

$t$  = Dolgu duvar kalınlığı (mm)

$m$  = Kiriş ve kolonun görelî rijitliğiyle ilgili boyutsuz parametre

$E_c$  = Kolon Young(elastisite) modülü ( $\text{kN/mm}^2$ )

$I_c$  = Kolon elemanı atalet momenti ( $\text{mm}^4$ )

$h_m$  = dolgu duvar boyu yüksekliği (mm)

$E_b$  = Kiriş Young(elastisite) modülü ( $\text{kN/mm}^2$ )

$I_b$  = Kiriş elemanı atalet momenti ( $\text{mm}^4$ )

$L$  = Dolgu duvar boyu uzunluğu (mm)

### **Bennett, Flanagan, Adham, Fisher ve Tenbus (1996)**

Araştırmacılar, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliğinin Denklem 3.27 ile hesaplanabileceğini bildirmişlerdir.

$$w = \frac{\pi}{C \lambda \cos \theta} \quad (3.27)$$

$w$  = Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği (mm)

$C$  = Dolgu duvar hasar derecesine bağlı olarak geliştirilmiş deney sabiti

$\lambda$  = Dolgu duvar ile çerçeve görelî rijitliğini temsil eden parametre ( $\text{mm}^{-1}$ )

$\theta$  = Dolgu duvar diyagonalinin yatay ile yaptığı açı (derece)

Deneysel sabit olan  $C$  katsayısı, düzlem içi yatay etkiler altında çerçeve sisteminde oluşan hasar derecesine bağlı olarak değişmektedir. Bu katsayının çerçeve türü ve dolgu duvar malzemesine bağlı olduğuna da değinilmiştir.

### **Al -Chaar (2002)**

Al-Chaar(2002) dolgu duvarlı çerçevelerin düzlem içi yatay rijitliklerinin hesaplanmasında Denklem 3.28, 3.29 ve 3.30'un kullanılabileceğini bildirmiştir. Dolgu duvar yüksekliğinin açıklığına olan oranının 1 ile 1.5 arasında olması durumunda ara değer hesabı yapılmalıdır.

$$L/h=1.5 \text{ için } w = 0.0835 Cd \left(1 + \frac{2.574}{\lambda h}\right) \quad (3.28)$$

$$L/h=1 \text{ için } w = 0.1106 d \left(1 + \frac{6.027}{\lambda h}\right) \quad (3.29)$$

$$C = - 0.3905 L/h + 1.7829 \quad (3.30)$$

Burada:

w = Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği (mm)

C = Dolgu duvar boyutlarına bağlı olarak değişen katsayı

D = Dolgu duvar diyagonal uzunluğu (mm)

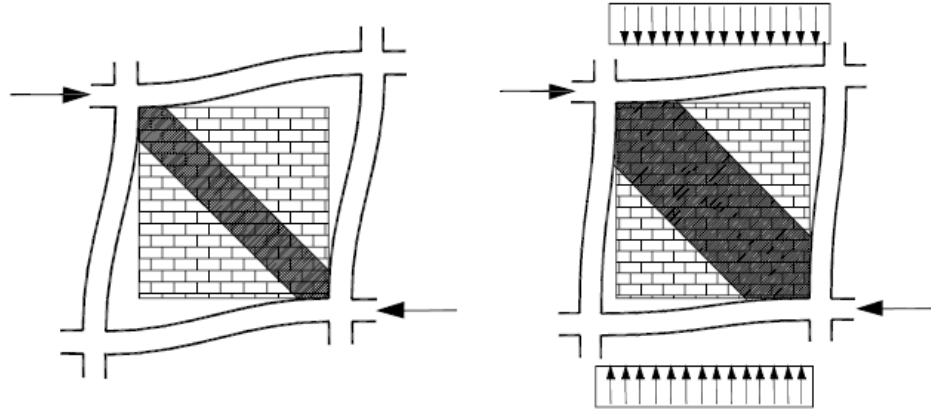
$\lambda$  = Dolgu duvar ile çerçeve görelî rijitliğini temsil eden parametre ( $\text{mm}^{-1}$ )

H = Çerçeve ekseninden itibaren kolon yüksekliği (mm)

h = Dolgu duvar boy uzunluğu (mm)

### **Papia, Cavaleri, Fossetti ve Amato (2009)**

Araştırmacılar, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği hesabında düzlem içi düşey yük mertebesinin dikkate alınması gerektiğini çalışmalarında sunmuşlardır. FEMA 356(2000)'da dolgu duvarlı çerçeveli sistemlerin davranışı hakkında kapsamlı bilgi verilmiş olsa da ilgili araştırmacılar buradaki bazı detayların, düşey yük etkisi altındaki sistemi yeterince ifade edemediğini, bu düşey yüklerin dolgu duvar – çerçeve etkileşimini etkileyeceğinin göz önünde bulundurulması gerektiğini belirtmişlerdir (Şekil 3.15). Düşey yük etkisi altında dolgu duvar sistemi ile onu çevreleyen çerçeve sisteminin temas boyu değeri artacaktır ve bu durum eşdeğer diyagonal basınç çubuğu etkili genişliğini artırıcı bir etki yapacaktır.



Şekil 3.15 Düşey yük etkisinin eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişlik değeri üzerindeki etkisi (Papia ve ark, 2009)

Dolgu duvarlı çerçeve sistemini temsil eden eşdeğer diyagonal basınç çubuklu çerçeve modelin yatay rijitlik değeri Denklem 3.31 ile hesaplanabilir.

$$D_i = \frac{k_d \cos^2 \theta}{1 + \frac{k_d}{k_c} \sec^2 \theta + \frac{1}{4} \frac{k_d}{k_b} \cos^2 \theta} + 24 \frac{E_f I_c}{h^3} \left[ 1 - 1.5 \left[ 3 \frac{I_b}{I_c} \frac{h'}{l'} + 2 \right]^{-1} \right] \quad (3.31)$$

Burada;

$k_d$  = Eşdeğer diyagonal basınç çubuğun aksenal rijitliği (kN/mm)

$k_c$  = Kolon eleman aksenal rijitliği (kN/mm)

$k_b$  = Kiriş eleman aksenal rijitliği (kN/mm)

$I_b$  = Kiriş eleman atalet momenti (mm<sup>4</sup>)

olup bu değerler Denklem 3.32 ile hesaplanabilmektedir.

$$k_d = \frac{E_d t w}{d}; \quad k_c = \frac{E_f A_c}{h'}; \quad k_b = \frac{E_f A_b}{l'} \quad (3.32)$$

$D_i$  rijitlik parametresi, sisteme etkileyen düşey mertebesi ve dolgu duvar – çerçeve sistemi arasındaki temas yüzeyi seviyesinin de hesaba katılması ile birlikte gerçekleştirilecek olan “sonlu elemanlar” analizleri ile de belirlenebilir. İlgili

çalışmada, rijitlik parametresinin elde edildiği sonlu elemanlar çalışmasında, temas yüzeyi çekme dayanımının olmadığı ve sürtünmeden meydana gelen kayma gerilmelerinin, basınç gerilmeleri ile orantılı şekilde çerçeve sistemine iletiildiği belirtilmiştir. Bu sayede, yatay yük etkisi sebebiyle çerçeve – dolgu duvar ayrışma etkileri daha kolay belirlenebilecektir. Sisteme etkileyen düşey yükün mertebesini ifade eden boyutsuz  $\varepsilon_v$  parametresi Denklem 3.33 ile belirlenmektedir.

$$\varepsilon_v = \frac{F_v}{2 A_c E_f} \quad (3.33)$$

Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu hesabında kullanılacak görelî rijitlik parametresi  $\lambda^*$ , Denklem 3.34'teki gibi hesaplanacaktır. Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu etkili genişliği hesabında kullanılacak k parametresi de Denklem 3.35 ile hesaplanacaktır.

$$\lambda^* = \frac{E_d t h'}{E_f A_c} \left( \frac{h'^2}{l'^2} + \frac{1}{4} \frac{A_c l'}{A_b h'} \right) \quad (3.34)$$

$$k = 1 + (18\lambda^* + 200) \varepsilon_v \quad (3.35)$$

Buna göre, düşey yük etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerin, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliğinde kullanılacak denklem aşağıda sunulmuştur (Denklem 3.36).

$$\frac{w}{d} = k \frac{c}{z} \frac{1}{(\lambda^*)^\beta} \quad (3.36)$$

Denklem 3.36'daki diğer parametreler Denklem 3.37, 3.38, 3.39 ile hesaplanacaktır.

$$c = 0.249 - 0.0116v + 0.567v^2 \quad (3.37)$$

$$\beta = 0.146 + 0.0073v + 0.126v^2 \quad (3.38)$$

$$l/h = 1 \text{ durumunda } z = 1$$

$$l/h = 1.5 \text{ durumunda } z = 1.5 \quad (3.39)$$

Burada;

$w$  = Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği (mm)

$d$  = Dolgu duvar diyagonal uzunluğu (mm)

$z$  = Deneysel sabit

$\gamma^*$  = Rijitlik parametresi ( $\text{mm}^{-1}$ )

$\nu$  = Dolgu duvar paneli Poisson oranı

$E_d$  = Diyagonal boyunca dolgu duvar Young modülü değeri ( $\text{kN} / \text{mm}^2$ )

$t$  = Duvar kalınlığı (mm)

$h'$  = Kiriş ekseninden itibaren ölçülen kolon yüksekliği (mm)

$E_f$  = Çerçeve elemanlarının Young modülü değeri ( $\text{kN} / \text{mm}^2$ )

$A_c$  = Kolon en kesit alanı değeri ( $\text{mm}^2$ )

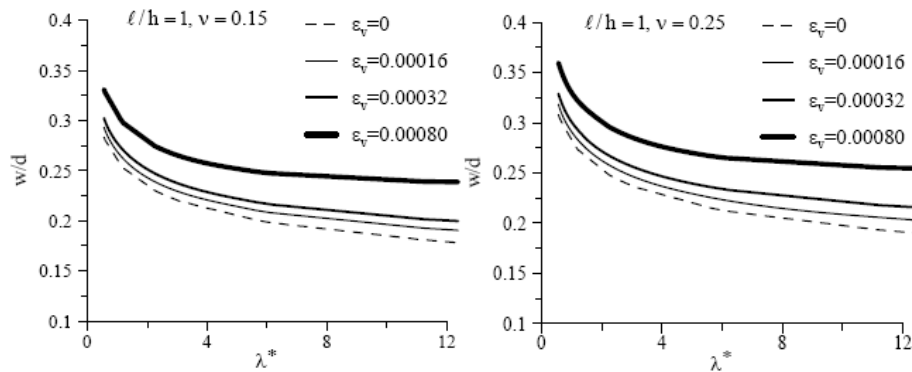
$l'$  = Çerçeve uzunluğu (mm)

$A_b$  = Kiriş en kesit alanı ( $\text{mm}^2$ )

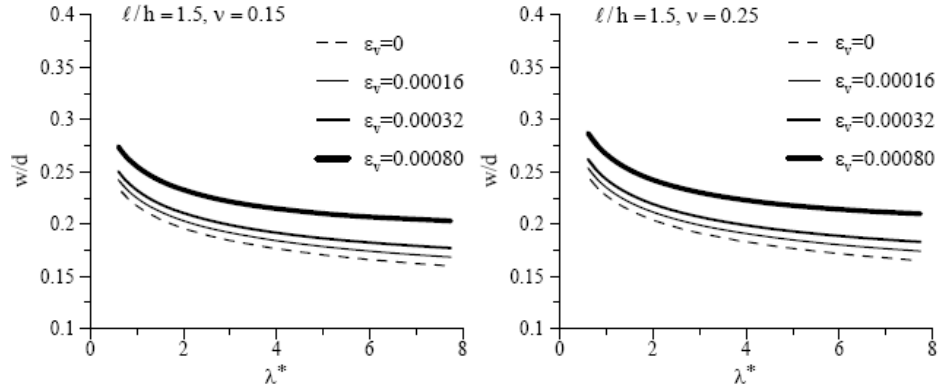
$l$  = Dolgu duvar boyu uzunluğu (mm)

$h$  = Dolgu duvar yüksekliği (mm)

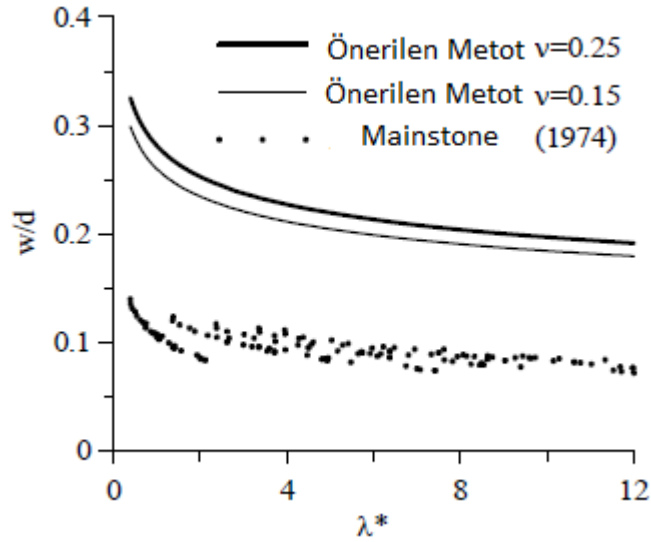
Farklı dolgu duvar panel boyutlarına sahip dolgu duvarlı çerçevelerde, düşey yük etkisinin de hesaba katılmasıyla elde edilen boyutsuz eşdeğer diyagonal basınç çubuğu etkili genişlik değerlerinin grafik gösterimi Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Şekil 3.18'da de araştırmacılar tarafından önerilen modelin, düşey yük etkisinin hesaba dahil edilmediği FEMA 356(2000) modeli ile karşılaştırma grafiği sunulmuştur.



Şekil 3.16 Şekil faktörü  $l/h = 1$  olan dolgu duvarlı çerçevelerde düşey yük katkısının da hesaba katılarak hesaplandığı boyutsuz “eşdeğer diyagonal basınç çubuğu” genişliği oranı (Papia ve ark, 2009)



Şekil 3.17 Şekil faktörü  $l/h = 1.5$  olan dolgu duvarlı çerçevelerde düşey yük katkısının da hesaba katılarak hesaplandığı boyutsuz “eşdeğer diyagonal basınç çubuğu” genişliği oranı (Papia ve ark, 2009)



Şekil 3.18 Papia ve ark(2009) tarafından önerilen modelin, düşey yük etkisinin hesaba dahil edilmediği FEMA 356(2000) modeli ile karşılaştırılması  $\left(\frac{l}{h} = 1\right)$

### **Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (2007)**

DBYBHY(2007) yönetmeliğimizde Bilgilendirme Eki 7F’de ‘dolgu duvarların güçlendirilmesi için yöntemler’ başlığı altında Stafford Smith ve Carter(1969) tarafından analitik parametre olarak sunulan  $\lambda$  parametresi değeri kullanılarak eşdeğer diyagonal basınç çubuğu diyagonal genişliği değerinin Denklem 3.40 ile

hesaplanmasının mümkün olduğu belirtilmiştir. Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu aksel rijitliği ise Denklem 3.41 ile ifade edilmiştir. Buna göre:

$$w = 0.175 (\lambda h)^{-0.4} d \quad (3.40)$$

$$k_{\text{duvar}} = \frac{w t E_d}{d} \quad (3.41)$$

Burada;

$w$  = Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği (mm)

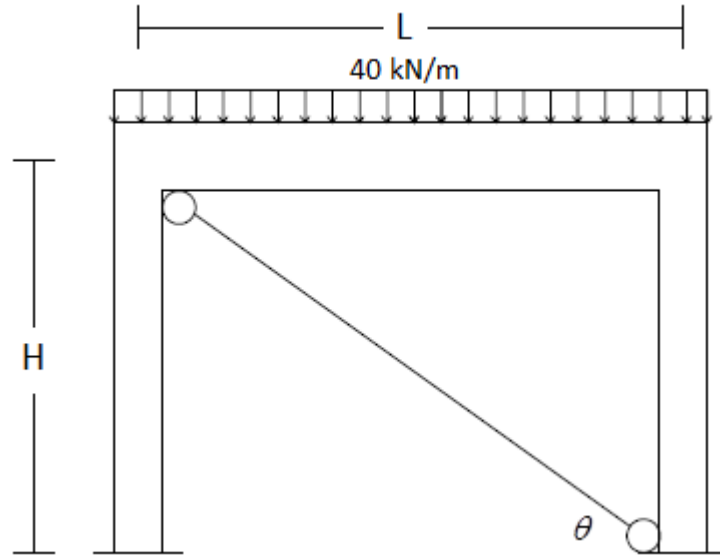
$\lambda$  = Dolgu duvar ile çerçeve görelî rijitliğini temsil eden parametre ( $\text{mm}^{-1}$ )

$h$  = Çerçeve ekseninden itibaren kolon yüksekliği (mm)

$d$  = Dolgu duvar diyagonal uzunluğu (mm)

### 3.4.2 Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuk Genişliği Hesabına İlişkin Parametrik Örnekler

Bu bölümde, Bölüm 3.4.1’de sunumu yapılan eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği hesabına yönelik parametrik çalışmaların tek katlı tek açıklıklı çerçeve üzerinde örnekleme yapılacaktır (Şekil 3.19). İlgili parametreler aşağıdadır.



Şekil 3.19 Diyagonal basınç çubuğu hesabına ilişkin tek kat – tek açıklıklı çerçeve modeli

$d = \text{Dolgu duvar diyagonal uzunluğu} = 4940 \text{ mm}$   
 $\theta = \text{Dolgu duvar diyagonalinin yatay ile yaptığı açđ} = 35.94 \text{ derece}$   
 $H = \text{Çerçeve ekseninden itibaren kolon yüksekliği} = 2900 \text{ mm}$   
 $E_d = \text{Dolgu duvar Young(elasticite) modülü} = 4 \text{ kN/mm}^2$   
 $t = \text{Dolgu duvar kalınlığı} = 200 \text{ mm}$   
 $E_c = \text{Kolon Young(elasticite) modülü} = 28 \text{ kN/mm}^2$   
 $I_c = \text{Kolon elemanı atalet momenti} = 1.25 \times 10^8 \text{ mm}^4$   
 $h_m = \text{Dolgu duvar boyu yüksekliği} = 2650 \text{ mm}$   
 $E_b = \text{Kiriş Young(elasticite) modülü} = 28 \text{ kN/mm}^2$   
 $I_b = \text{Kiriş elemanı atalet momenti} = 2.6 \times 10^9 \text{ mm}^4$   
 $L = \text{Çerçeve ekseninden itibaren çerçeve açıklığı} = 4000 \text{ mm}$   
 $\text{Kolonlar boyutları} = 350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$   
 $\text{Kiriş boyutları} = 250 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$

### **Holmes(1961)**

Araştırmacı tarafından, A en kesit alanı değerinin  $t(d/3)$  olarak hesaplanması uygun görölmüştür. O halde, örneğ için eşdeğer diyagonal basınç çubuğu değerinin  $d/3 = 1646 \text{ mm}$  alınmasının uygun olduğu görölmüştür.

### **Stafford Smith ve Carter(1969)**

Dolgu duvar ile çerçeve görelri rijitliğini temsil eden parametre:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_d t \sin 2\theta}{4 E_c I_c h_m}} = 1.196 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$$

Düzlem içi yatay yük etkisi altında, dolgu duvar ile çerçeve arasındaki temas noktaları belli oranda (köşe bölgeler hariç) kaybolur. Temas uzunluğu:

$$\frac{a}{h} = \frac{\pi}{2 \lambda h} \text{ ise } a = 1312 \text{ mm}$$

### **Mainstone(1971)**

“ $\lambda h$ ” boyutsuz parametresi 3.47 olarak hesaplanmıştır. Bu parametrenin dört ile beş arasında olması durumunda Denklem 3.15 ve Denklem 3.16; parametrenin beşten büyük olması durumunda ise Denklem 3.17 ve Denklem 3.18 kullanılabilir. Belirtilen aralık içerisinde bulunmamasına rağmen eşdeğer diyagonal genişlik hesabında fikir sahibi olunması açısından Denklem 3.17 ve Denklem 3.18 kullanılmıştır.

Tuğla duvar için  $\frac{w}{d} = 0.16(\lambda h)^{-0.3} = 0.11$  olarak hesaplanmıştır.

Buna göre eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği  $w = 0.11 \times 4940 = 545$  mm olarak hesaplanmıştır.

### **Liau ve Kwan (1971)**

İlgili araştırmacılar tarafından önerilen eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği:

$$w = \frac{0.95 h \cos \theta}{\sqrt{\lambda h}} = 1196 \text{ mm olarak hesaplanmıştır.}$$

### **Decanni ve Fantin (1986)**

Dolgu duvarın çatlamış ve çatlamamış olduğu durum için ( $\lambda h = 3.47 < 7.85$ ) eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği hesaplanmıştır.

Dolgu duvarın çatlamamış olduğu durum:

$$\lambda h < 7.85 \text{ olması durumunda } w = \left( \frac{0.748}{\lambda h} + 0.085 \right) d = 1484 \text{ mm}$$

Dolgu duvarın çatlamış olduğu durum:

$$\lambda h < 7.85 \text{ olması durumunda } w = \left( \frac{0.707}{\lambda h} + 0.010 \right) d = 1055 \text{ mm}$$

### **Moghaddam ve Dowling (1988)**

İlgili çalışmacılar eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliğini, dolgu duvar diyagonal uzunluğunun altıda biri olarak hesaplamışlardır. Bu değer  $d/6 = 823$  mm olarak hesaplanmıştır.

### **Eurocode 8 (1988)**

Avrupa'da yürürlükte olan Eurocode 8 şartnamesi, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu etkili genişliği değerinin  $0.15d$  alınması durumunda mühendislik hassasiyeti açısından yeterli olacağını bildirmiştir. Bu değer  $0.15d = 741$  mm olarak hesaplanmıştır.

### **Paulay ve Priestley(1992)**

Araştırmacılar, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu etkili genişliği değerinin  $0.15d$  alınması durumunda, mühendislik hassasiyeti açısından yeterli olacağını bildirmiştir. Bu değer  $0.15d = 741$  mm olarak hesaplanmıştır.

### **Durrani ve Luo (1992)**

Araştırmacılar ' $\gamma$ ' ve ' $m$ ' parametrelerine bağlı olarak eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği hesap formülü sunmuşlardır. Bu değer  $w = \gamma d \sin 2\theta = 881$  mm olarak hesaplanmıştır.

### **Al -Chaar (2002)**

Araştırmacılar,  $L/h = 1$  ve  $1.5$  oranları için eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği formülasyonu sunmuştur. Örnek soru  $L/h$  oranı  $1.38$ 'tir ve buna karşılık olarak eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği  $1041$  mm olarak hesaplanmıştır.

### **Papia, Cavaleri, Fossetti ve Amato (2009)**

Araştırmacılar, düşey yük etkisinin eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği üzerindeki artırıcı etkisini de hesaba katan formülü oluşturmuşlardır. Buna göre dolgu duvar Poisson oranı 0.15 için yapılan hesaplarda, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişlik değeri 1219 mm olarak hesaplanmıştır.

### **Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)**

Stafford Smith ve Carter(1969) tarafından analitik parametre olarak sunulan  $\lambda$  parametresi değeri kullanılarak eşdeğer diyagonal basınç çubuğu diyagonal genişliği değeri DBYBHY(2007)'ye göre hesaplanmıştır. Buna göre bu değer  $w = 0.175 (\lambda h)^{-0.4}$   $d = 526$  mm olarak hesaplanmıştır.

#### ***3.4.3 Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuk Genişliği ile İlgili Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması***

Tablo 3.2’de her bir araştırmacıya göre (veya yönetmeliğe) sunulan parametrik denklemlerin uygulanması sonucu hesaplanan eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişlik değerlerinin gösterimi yapılmıştır.

Tablo 3.2 Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği hesabı

Araştırmacılar/Yönetmelikler(Yıl)	Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuğu Genişliği (mm)
Holmes(1961)	1646
Stafford Smith ve Carter(1969)	878
Mainstone(1971)	545
Liau ve Kwan(1971)	1196
Decanni ve Fantin(1986)	1484
Moghaddam ve Dowling(1988)	823
Eurocode 8(1988)	741
Paulay ve Priestley(1992)	741
Durrani ve Luo(1992)	881
Al-Chaar(2002)	1041
Papia, Cavaleri, Fossetti ve Amato(2009)	1219
DBYBHY(2007)	526

## **BÖLÜM DÖRT**

### **DÜZLEM İÇİ YÜK ETKİSİ ALTINDAKİ DOLGU DUVARLI DÜZLEM ÇERÇEVELERİN EŞDEĞER DİYAGONAL BASINÇ ÇUBUĞU VE SONLU ELEMANLAR İLE MODELLENMESİ**

#### **4.1 Giriş**

Bu tez çalışmasında düzlem içi yük etkisi altındaki dolgu duvarlı düzlem çerçevelerin modellenmesinde iki tip yöntem kullanılacaktır. Bu modeller eşdeğer diyagonal basınç çubuğu ve sonlu eleman ile modellemedir. Oluşturulan her iki modelin düşey ve yatay yük etkileri altında davranışı incelenecektir. Bunun için düşey yükler sabit kalmak kaydıyla yatay yükler adım adım artırılarak dolgu duvarlı düzlem çerçevenin göçme bölgesine kadar olan davranışı incelenecektir. Yapı sistemlerinin artımsal yatay yük etkileri altında analizi günümüz inşaat mühendisliğinde yeni ve yaygınlaşmakta olan “performansa dayalı tasarım” yönteminde kullanılan bir kavramdır. Bu kavramla birlikte yer değiştirme ve şekil değiştirmeye bağlı performans kriterini esas alan yapısal değerlendirme kavramı, deprem bölgelerindeki mevcut yapıların deprem güvenliklerinin belirlenmesi ve yeterli güvenlikte olmayan yapıların güçlendirme çalışmaları sırasında ortaya konulmuş ve geliştirilmiştir; ancak dolgu duvarlı çerçevelerin performans noktalarının belirlenmesi ile ilgili belirli bir kriter bulunmamaktadır. Bu nedenle tez çalışmasında oluşturulan düzlem çerçeve modellerin performans talep noktaları hesaplanmayacak; ancak modellerin artımsal yatay yük etkisi altında göçme bölgesine kadar olan davranışları incelenecektir. Bu bağlamda, öncelikle tez çalışmasında kullanılacak doğrusal olmayan analiz yöntemin algoritması ve bu analizde yapılan kabuller sunulmuştur.

Daha sonra dolgu duvarlı çerçeveli yapıların modellenmesine ilişkin olarak, tez çalışmasında kullanılacak düzlem çerçeve modelleri tanıtılacak ve bu modellerde yapılan kabuller sunulacaktır. İkinci bölümde tanımlanan eşdeğer diyagonal basınç çubuk modellerine bağlı olarak tekli, üçlü ve beşli diyagonal basınç çubuklu modeller

tanıtılacaktır. Ayrıca Bölüm 3.3’de sunulan mikro modelleme türüne bağlı olarak sonlu eleman ağ modelinde, dolgu duvar ile çerçeve arasındaki yük aktarımını sağlayacak yay elemanların, rijitlik katsayısının mertebesine ilişkin bir yorum yapılacaktır.

#### **4.2 Yer Değiştirme Esaslı Doğrusal Olmayan Hesap Yöntem Algoritması ve Plastik Mafsalsal Hipotezi Kavramı**

Son yıllarda özellikle kentsel alanlarda meydana gelen depremlerde yapılardaki hasarın çok büyük kayıplara neden olması, depreme dayanıklı yapı tasarımında hasar kontrolünün de göz önüne alınması gerektiğini göstermiştir. Buna bağlı olarak kuvvete dayalı tasarımın yerini alması için yer değiştirmeye dayalı tasarım ve değerlendirme ile ilgili çalışmalar önem kazanmaktadır. Yer değiştirmeye bağlı performans kriterini esas alan, yapı kapasitesi belirlenmiş bir yapının değerlendirilmesinde kullanılan başlıca yöntemler aşağıda sunulmuştur:

- a) Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi
- b) Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi
- c) Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi

Doğrusal olmayan statik analiz yöntemleri, temel olarak yapının yatay kuvvet taşıma kapasitesini ifade eden kapasite eğrisinin belirlenmesini, bu kapasite eğrisinden yararlanarak göz önüne alınan deprem için yapının elastik olmayan maksimum deplasmanının (talebinin) hesaplanmasını ve bu deplasman değerine kadar statik olarak itilmiş yapının performansının belirlenmesini içermektedir. dolgu Duvar panelinin, eşdeğer diyagonal çubuk veya sonlu eleman ağ modeli ile idealize edildiği modeller için performans noktası belirleme kriteri bulunmamaktadır; ancak tez çalışmasında bu yapıların statik itme eğrileri üzerinden işlem yapılacağı için doğrusal olmayan hesap yönteminin adımları sunulmuştur (Celep, 2008):

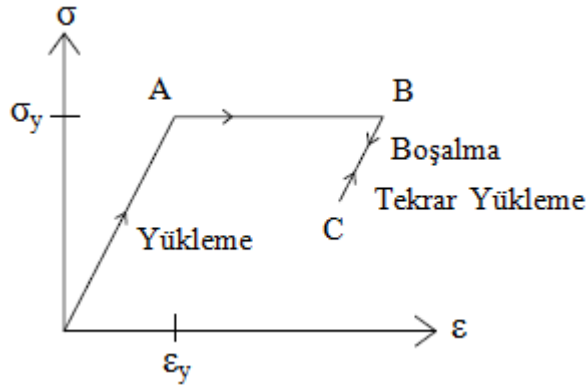
- a) Mevcut taşıyıcı sistem  $G + nQ$  yükleri altında çözümlenerek kesit etkileri hesaplanır.

- b) Taşıyıcı sistemde plastik mafsal oluşması beklenen kesitlerin  $G + nQ$  yüklemesindeki normal kuvvetler altında pozitif ve negatif eğilme moment kapasiteleri hesaplanır.
- c) Taşıyıcı sisteme birinci titreşim modu ve kat kütleleri ile orantılı uygulanan yatay yük etkisi altındaki statik itme eğrisi elde edilir. Bulunan bu eğri modal kapasite eğrisine dönüştürülür.
- d) Göz önüne alınan depreme bağlı olarak ve zemin karakteristik periyodları dikkate alınarak, periyod – spektral ivme eğrisi oluşturulur. Bu eğriden spektral yer değiştirme – spektral ivme eğrisine geçilir.
- e) Bulunan deprem talep ve sistem kapasite eğrileri kullanılarak binanın performans noktası elde edilir.
- f) Performans noktasında bulunan modal yerdeğiştirme talebinden, taşıyıcı sisteme ait iç kuvvet, yer değişme ve şekil değiştirme talebi belirlenir.
- g) Bulunan şekil değiştirmeler, kesit hasarlarına karşı gelen beton ve donatı şekil değiştirmeleri ile karşılaştırılarak kesitin bulunduğu hasar bölgesi belirlenir.
- h) Kiriş ve kolonların uç kesitleri için belirlenen hasar bölgeleri esas alınarak, taşıyıcı sistemin verilen deprem etkisindeki deprem performansı belirlenir.
- i) Bina için belirlenen performans düzeyinin kabul edilip edilmeyeceği kontrol edilir.

Bu yöntem, yapıda birinci modun etkili olduğu düşük katlı yapılarda ve binada burulma düzensizliğinin sınırlı olduğu durumda yeterli yaklaşım sağlar (Celep, 2008).

DBYBHY(2007)'de, binaların deprem güvenliğinin değerlendirilmesinin performans kavramına dayalı olarak yapılması gerektiği belirtilmiştir. Bu tür bir yapısal analizde, malzemelerin iç kuvvet – şekil değiştirme bağıntılarının bilinmesi gerekmektedir. Buna göre tez çalışmasında, malzemenin ideal elasto-plastik davranış göstereceği varsayımı yapılacaktır. Tek eksenli gerilme durumunda ideal elasto – plastik malzemenin davranışı Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Buna göre, malzeme elastik davranışın sonunda akmaya ulaşmakta, bundan sonra gerilmede bir artış olmaksızın elastik şekil değiştirmeler üzerine plastik şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Boşalma elastik olarak oluşurken plastik şekil değiştirmeler geri dönmeyerek kalmaktadır.

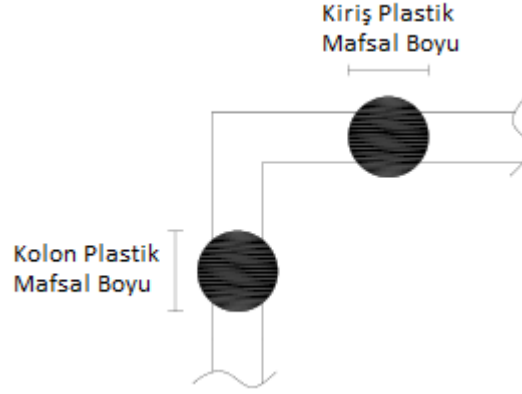
Taşıyıcı sistemin düşey yükler ve deprem yükleri altında malzemenin elasto – plastik kabullerle çözümünün yapılması, değişik açılardan uygulaması zordur. Böyle bir çözümde yük süperpozisyonu ilkesi geçerli olmayacağı için, her yükleme durumunun ayrı ele alınarak çözülmesi gerekmektedir. Bu tür yöntemde plastik mafsal kullanılması çözümü basitleştirecektir. Bu durumda plastik mafsal özelliklerinin belirlenmesi için, kesit geometrisi ve donatının analiz öncesinde tahmin edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.1 İdeal elasto-plastik malzemedeki yükleme ve boşalma

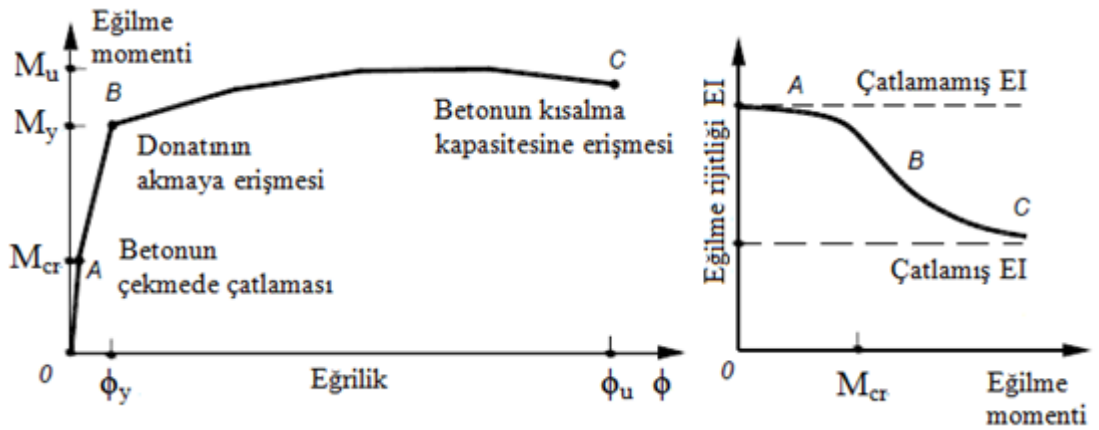
Toplam şekil değiştirmelerin, doğrusal şekil değiştirmelere oranı olarak tanımlanan süneklik oranının ( $\mu$ ) büyük olduğu ve doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin küçük bir bölgeye yayıldığı sistemlerde, doğrusal olmayan bu şekil değiştirmelerin “plastik mafsal” adı verilen belirli kesitlerde toplandığı ve bunun

dışındaki bölgelerde sistemin “doğrusal – elastik” davranış gösterdiği varsayılır. Bu hipoteze “plastik mafsallık hipotezi” denmektedir ve buna göre yapı analizlerinde Şekil 4.2’de gösterildiği üzere, plastik şekil değiştirmelerinin meydana gelmesinin beklendiği kesitlere, topaklaşmış mafsallık atamaları yapılmaktadır.



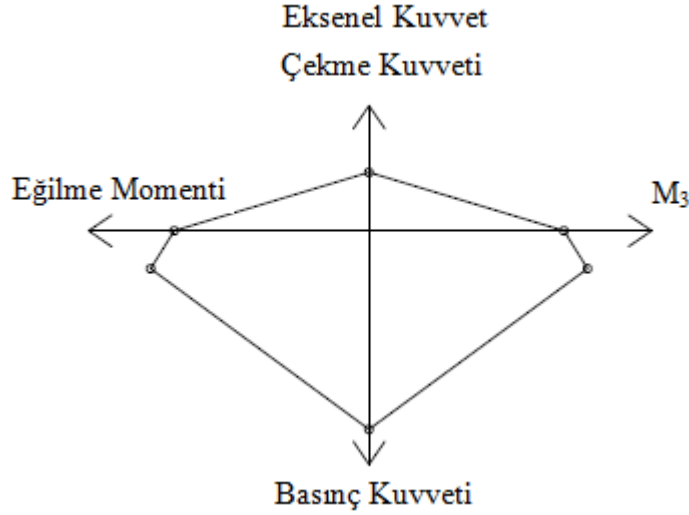
Şekil 4.2 Birleşim noktasında kolon ve kirişte oluşan plastik mafsallık (Korkmaz ve Uçar, 2006)

Plastik mafsallık özelliklerinin tanımlanmasında kesitin, moment-eğrilik değişimi bilinmelidir. Tez çalışmasında, plastikleşmenin kirişlerde tek eksenli eğilme momenti etkisiyle, kolonlarda ise tek eksenli eğilme momenti ve normal kuvvetin etkileşiminden meydana geldiği kabul edilmiştir. Kolon ve kiriş elemanlarına ait moment – plastik bağıntısı pekleşen-rijit-plastik olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.3’te basit eğilme etkisi altındaki bir betonarme kesitin moment – eğrilik değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Betonarme kesitteki eğilme momenti –eğrilik ilişkisi ve betonarme kesitin eğilme etkisi altında çatlama rijitliğinin değişimi (Celep, 2008)

Bileşik eğilme etki altında veya düzlemsel analiz yapılacaksa kesite normal kuvvet ve eğilme etkisinin birlikte etki etkimesi durumunda plastik mafsallik özellikleri belirlenirken karşılıklı etkileşim diyagramına da ihtiyaç duyulmaktadır. Bir kesitin taşıyabileceği eğilme momenti ve normal kuvvet çiftinin bulunarak bir eksen takımında gösterilmesiyle bu iki etkinin karşılıklı etkileşimi elde edilir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Karşılıklı etkileşim diyagramı

DBYBHY(2007) 'ye göre "plastik mafsallik boyu" olarak adlandırılan plastik şekil değiştirme bölgesinin uzunluğu  $L_p$ , düzlem içi yatay kuvvet etkisi altında çalışan doğrultaki kesit boyutunun yarısı olarak alınacaktır. Plastik mafsallik boyu uzunluğu ile ilgili bir başka öneri de Denklem 4.1'de sunulduğu üzere Paulay ve Priestley(1992) tarafından yapılmıştır.

$$L_p = 0.08L + 0.022 d_b f_y \quad (4.1)$$

Burada;

$L$  = Plastik mafsallik boyu hesaplanacak eleman uzunluğu (m)

$d_b$  = Kesitte kullanılan boyuna donatı çapı (m)

$f_y$  = Kesitte kullanılacak boyuna donatının akma dayanımı (MPa)

Eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlama kesite ait etkin eğilme rijitlikleri  $(EI)_e$  kullanılacaktır. Daha kesin bir hesap yapılmadıkça, etkin eğilme rijitlikleri için DBYBHY(2007)'de belirtilen değerler kullanılacaktır.

a) Kirişlerde:  $(EI)_e = 0.40 EI$

b) Kolonlarda ve Perdelerde:

$N_d / (A_c f_{cm}) < 0.10$  olması durumunda:  $(EI)_e = 0.40 EI$

$N_d / (A_c f_{cm}) > 0.40$  olması durumunda:  $(EI)_e = 0.80 EI$

Burada;

$A_c$  = Kolon veya perdenin brüt kesit alanı

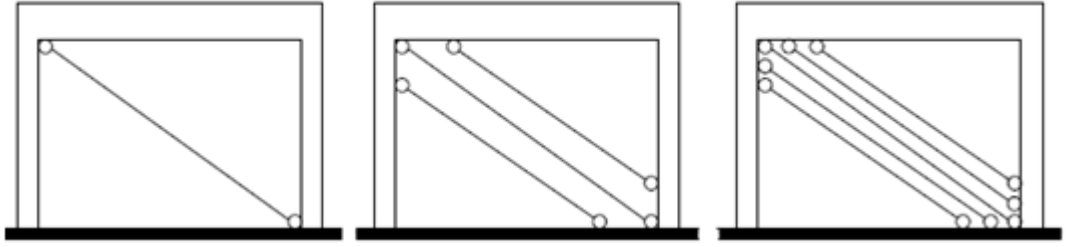
$f_{cm}$  = Mevcut beton malzeme dayanımı

$(EI)_e$  = Çatlama kesite ait etkin eğilme rijitliği

$EI$  = Çatlamamış kesite ait eğilme rijitliği

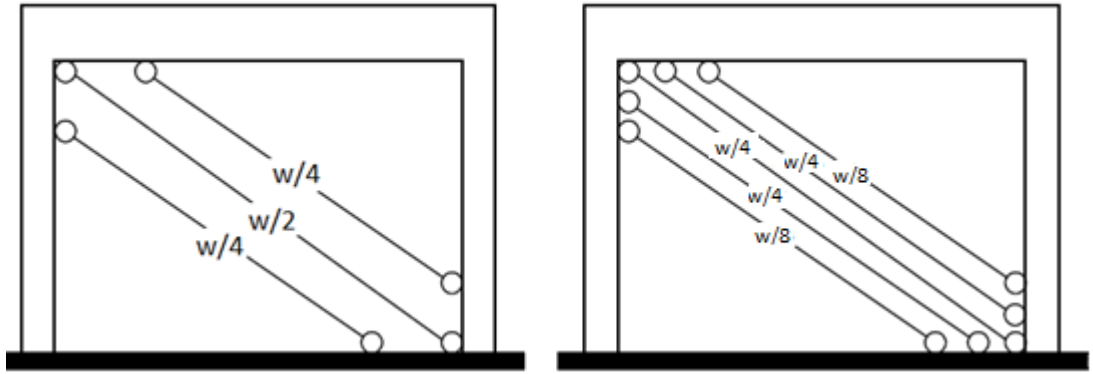
Tez çalışmasında dolgu duvarların eşdeğer diyagonal basınç çubuk modeli ile temsil edildiği örneklerde, iki ucu mafsallı çubukların kapasitelerine basınç kırılması ile ulaşacağı kabulü yapılmıştır. Buna göre dolgu duvarlı çubukları temsil eden iki ucu mafsallı fiktif çubukların aksenal kuvvet – plastik aksenal kısalma temsili grafiği  $(N - \Delta_p)$  Şekil 4.5'teki gibidir. Eşdeğer diyagonal elemanlar için tanımlanan plastik mafsallar, çubukların orta noktasında konumlandırılacaktır. Dolgu duvarların sonlu eleman ağ modeli ile tanımlanacağı örneklerde Şekil 2.38'dekine benzer bir gerilme – birim şekil değiştirme bağlantısı kullanılacak olup dolgu duvar elemanına plastik mafsala ataması yapılmayacaktır. Ancak Bölüm 5'teki örneklerde, farklı modellerin analiz açısından birbirleri ile karşılaştırılabilmesi açısından  $N - \Delta_p$  ve  $\sigma - \varepsilon$  bağıntılarının uyumluluğu sağlanmaya çalışılacaktır.





Tek diyagonal çubuklu model    Üçlü diyagonal çubuk modeli    Beşli diyagonal çubuk modeli  
Şekil 4.6 Tez çalışmasında kullanılacak olan diyagonal basınç çubuklu düzlem çerçeve modelleri

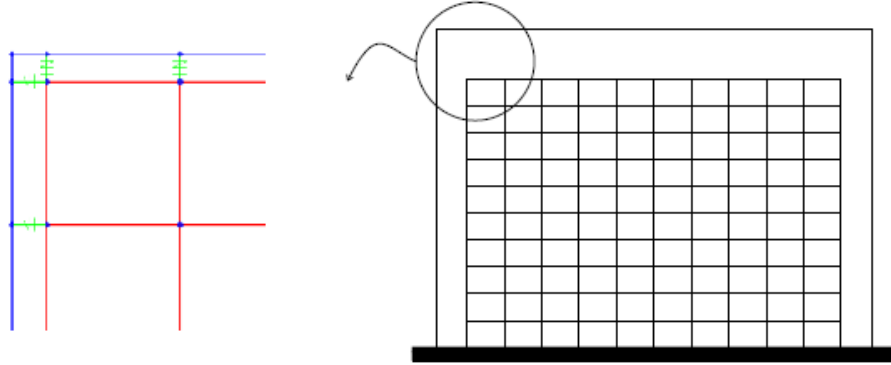
Bölüm 5’te sunulacak olan örneklerde, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu etkili genişliği değeri, DBYBHY(2007) Bölüm 7’de sunulan denklem ile hesaplanacaktır (Denklem 2.60). Düzlem içi yatay yük etkisi altında, dolgu duvar panelinde oluşacak olan gerilme dağılımına bağlı olarak, hesaplanacak etkili genişlik değeri üçlü ve beşli diyagonal basınç çubuklu elemanlara uygun olarak dağıtılmalıdır. Buna göre Şekil 4.7’de gösterilen üçlü ve beşli diyagonal basınç çubuklu modeller için, her bir çubuğa atanacak etkili genişlik oranlarının gösterimi yapılmıştır. Eşdeğer diyagonal basınç çubuklu düzlem çerçevelerdeki iç çubukların etki alanları, kenar çubukların etki alanının iki katıdır. Bu düşünceden hareketle diyagonal çubukların alansal dağılımı Şekil 4.7’deki gibi yapılmıştır.



Üç çubuklu diyagonal çubuk modeli    Beş çubuklu diyagonal çubuk modeli  
Şekil 4.7 Eşdeğer üçlü ve beşli diyagonal basınç çubuklu modellerde genişlik oranları

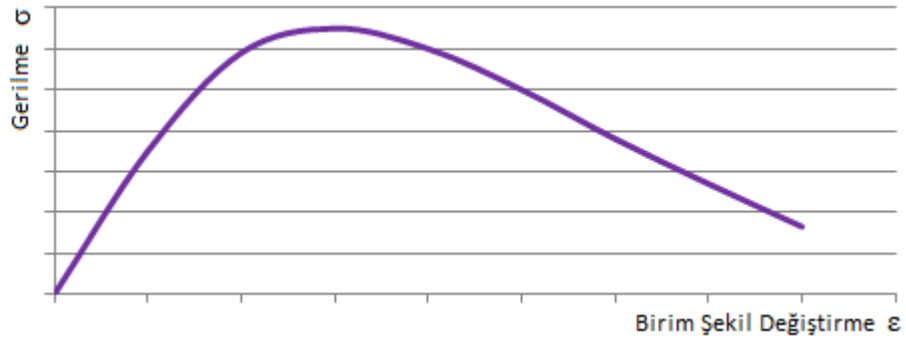
### 4.3.2 Tez Çalışmasında Kullanılacak Sonlu Eleman Ağ Modeli

Tez çalışmasında kullanılacak bir diğer model türü ise sonlu elemanlar ağ modelidir (Şekil 4.8). Dolgu duvar panel elemanının sonlu eleman ağ modellemesi ile temsil edildiği modelde, panel – çerçeve arasındaki etkileşim göz önüne alınmaya çalışılmış ve bu sayede düzlem içi yatay yük etkisi altındaki dolgu duvarlı çerçevelerde temas boyu uzunluğunun görülmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 4.8 Tez çalışmasında kullanılacak olan sonlu eleman ağ modeli

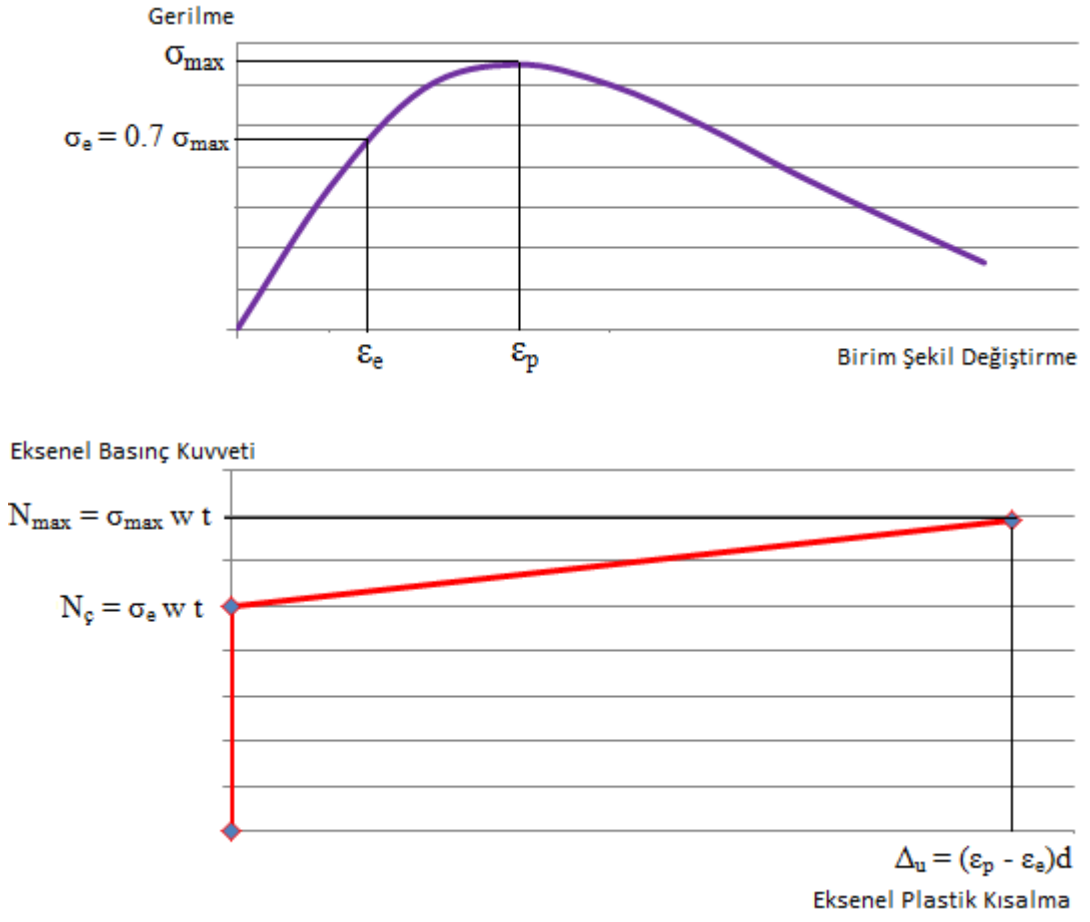
Dolgu duvar panelini temsilen “shell” (kabuk) eleman kullanılacaktır. Çalışmalarda hazırlanan duvarlı yapı modelleri için, dolgu duvar ile betonarme çerçeve arası etkileşimde, bitişik duvar ve çerçeve düğüm noktalarının birbirleri ile bağlantısını sağlamak amacıyla aksenal basınç kuvveti ileten; ancak çekme kuvveti transfer etmeyen, görelî rijitliğı fazla, kütlesi ve ağırlığı olmayan link elemanlar tanımlanmıştır (Şekil 4.8). Tez çalışmasında yapılacak örneklerde bu yay elemanların rijitliğı Denklem 3.41 ile sunulan eşdeğer diyagonal basınç çubuk rijitliğı mertebesinde alınacaktır. Ara yüz noktalarında doğrusal olmayan aksenal yay elemanların konumlandırılmasıyla birlikte, bu noktalarda kayma etkilerinin ihmal edildiğı varsayımı yapılmaktadır. Sonlu eleman ağ modelinde çerçeve elemanı içerisinde konumlandırılacak dolgu duvar panel elemanın gerilme – birim şekil değıştirme grafiğı Şekil 4.9’da sunulmuştur.



Şekil 4.9 Sonlu eleman ağ modelinde çerçeve elemanı içerisinde konumlandırılacak dolgu duvar panel elemanın gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi

#### ***4.3.3 Sonlu Elemanlar Ağ Modeli Duvar Paneli ile Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuklarının Mekanik Özelliklerinin Benzeştirilmesi***

Bölüm 5'teki örneklerde, farklı tür modellerin analiz açısından birbirleri ile karşılaştırılabilmesi açısından, diyagonal çubuklardaki Şekil 4.5 ile gösterilen  $N - \Delta_p$  grafiğinin ve Şekil 4.9 ile gösterilen sonlu eleman ağ modelindeki  $\sigma - \epsilon$  grafiklerinin uyumlu olması gerekmektedir. Bu durumun idealleştirmesi Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Buna göre sonlu eleman ağ modeli içerisinde konumlandırılacak dolgu duvar elemanın maksimum gerilme değeri, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu alanı ile çarpılarak, çubuk elemanın göçme yükü değeri hesaplanmıştır. Eşdeğer diyagonal basınç çubuk elemanın göçme yükündeki aksenal plastik kısalma değeri ise, sonlu eleman ağ modelindeki maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirme ile maksimum gerilmenin %70'ine karşılık gelen elastik birim şekil değiştirmenin farkının alınıp bu değerlerin eşdeğer diyagonal basınç çubuğu uzunluğu ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. İdealleştirmenin bir fikir vermesi açısından, Bölüm 5'teki örneklerde, eşdeğer diyagonal basınç çubuklu modeller ile sonlu eleman ağ modelinin karşılaştırılması yapılacaktır.



Şekil 4.10 Dolgu duvarlı düzlem çerçeve eleman içerisine konumlanacak panelin, sonlu eleman ağ ve eşdeğer diyagonal çubuk eleman mekanik özellikleri

## BÖLÜM BEŞ

### DÜZLEM İÇİ YÜK ETKİSİ ALTINDAKİ DOLGU DUVARLI DÜZLEM ÇERÇEVE MODELLERİN YER DEĞİŞTİRME ESASLI DOĞRUSAL OLMAYAN HESAP YÖNTEMİYLE ANALİZİ

#### 5.1 Giriş

Bu bölümde Bölüm 4’de tanımlanan ve dolgu duvarlı çerçeve sistemini temsil ettiği düşünülen eşdeğer diyagonal basınç çubuğu ve sonlu eleman ağ modellerinin düzlem içi yük etkisi altındaki davranışı incelenecektir.

İlk olarak tek katlı tek açıklıklı sonlu eleman ağ modeline göçme yükü uygulanacak ve bu etki altında dolgu duvar paneli ile çerçeve arasında konumlandırılan link elemanların aksenal yük mertebesi bulunarak dolgu duvar - çerçeve ara yüzünün ayrışma mertebesi incelenecektir. Panel elemanını temsil edecek olan sonlu eleman bölmelerinin adedi arttıkça sayısal hata payı azaltılmış olacaktır; ancak eleman adedinin artmasıyla birlikte analiz süresi artar. Bu nedenle hata payını en aza indirgeyen ve analiz süresinin en uygun şekilde olmasını sağlayacak sonlu elemanlar bölme adedi belirlenmeye çalışılacaktır.

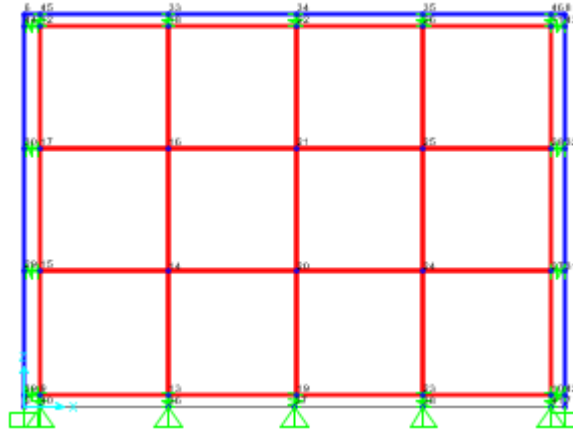
Sonlu eleman ağ modelinde uygun bölme sayısı belirlendikten sonra Bölüm 4’de tanımlanan makro modellerin, artımsal yük etkisi altında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilecektir. Analizlerde tek kat tek açıklıklı, tek kat iki açıklıklı, iki kat iki açıklıklı ve beş kat üç açıklıklı düzlem çerçeve modeller kullanılacaktır. Modellerin yatay yük – yer değiştirme eğrisi grafiği, göçme yükü mertebeleri, elastik bölgedeki kat yer değiştirmeleri ve belirli bir deplasman yüzdesine ulaşmış çerçeve sisteminde sol alt kolon ucunda oluşan plastik dönmelerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Örneklere ait modellemeler ve yapı analizleri SAP2000 programı ile yapılacaktır. Herhangi bir yapı sisteminin SAP2000 programı ile analizinin yapılmasında genel olarak aşağıdaki yol izlenmektedir:

- Yapı statikği modelinin oluşturulması
- Malzeme özelliklerinin tanımlanması
- Kesit özelliklerinin tanımlanması
- Yüklerin veya yük kombinasyonlarının tanımlanması
- Çözüm (analiz)

## 5.2 Dolgu Duvarlı Düzlem Çerçevenin Sonlu Eleman Ağ Modelinde Optimum Bölme Sayısının Belirlenmesi

Bu bölümde hata payını en aza indirgeyen ve analiz süresinin en uygun şekilde olmasını sağlayacak sonlu elemanlar bölme adedi belirlenmeye çalışılacaktır. Bu amaçla dolgu duvarı temsil eden “shell (kabuk)” eleman 20x15, 16x12, 12x9, 8x6 ve 4x3 elemana bölünecektir. Düzlemsel sonlu eleman ağ modeline ait örnek düzlem çerçeve model Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Çerçeve en kesit donatı detayı Tablo 5.1’de; çerçeve sisteminin içerisinde konumlandırılacak dolgu duvar panelinin gerilme – birim şekil değiştirme grafiği de Şekil 5.2’de sunulmuştur.



Şekil 5.1 Düzlemsel sonlu eleman ağ modeli

### Dolgu duvarlı çerçeve sistemi parametreleri

$H$  = Çerçeve ekseninden itibaren kolon yüksekliği = 2900 mm

$E_d$  = Dolgu duvar Young(elastisite) modülü = 4 kN/mm<sup>2</sup>

$t$  = Dolgu duvar kalınlığı = 200 mm

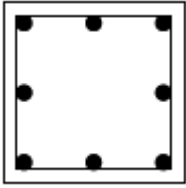

$E_c$  = Kolon Young(elastisite) modülü = 28 kN/mm<sup>2</sup>

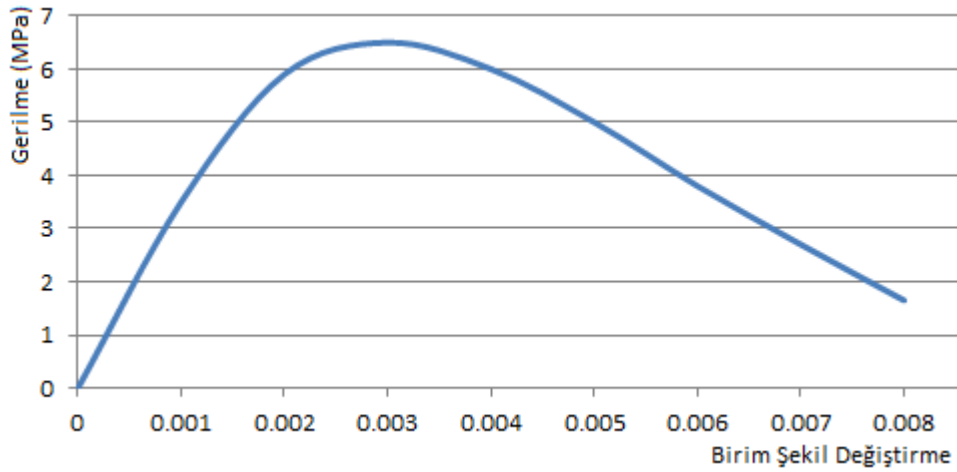
$h_m = \text{Dolgu duvar boyu yüksekliği} = 2650 \text{ mm}$

$E_b = \text{Kiriş Young(elastisite) modülü} = 28 \text{ kN/mm}^2$

$L = \text{Çerçeve ekseninden itibaren çerçeve açıklığı} = 4000 \text{ mm}$

Tablo 5.1 Tek katlı tek açıklıklı düzlem çerçeve ağ modelinde kullanılan çerçeve kesit ve donatıları

En Kesitler		
	(Kolon)	(Kiriş)
Enkesit Boyutları	35 x 35 cm	25 x 50 cm
Eleman Boyuna Donatısı	8 $\phi$ 16	$A_s = 4\phi$ 12   $A_s' = 4\phi$ 12
Eleman Enine Donatısı	$\phi$ 8/10	$\phi$ 8/15



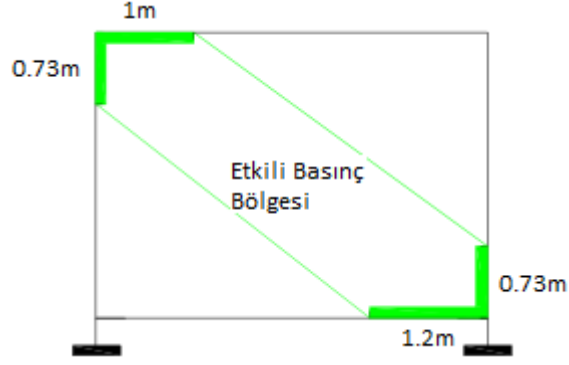
Şekil 5.2 Sonlu eleman ağ modelinde çerçeve elemanı içerisinde konumlandırılacak dolgu duvar panel elemanın gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi (Kaushik ve ark, 2008)

Sonlu eleman ağ modeline ait, dolgu duvar ile çerçeve arasında konumlandırılan doğrusal olmayan yay elemanın eksenel rijitliği Denklem 3.41 ile hesaplanmış ve  $K_g = w t E_d / d = 85000 \text{ kN/m}$  olarak hesaplanmıştır. 500 kN tekil yük etkisi altında çerçeve ile dolgu duvar elemanı arasındaki temas boyu uzunlukları karşılaştırılacaktır. Bu amaçla dolgu duvar panelinin sırasıyla 20 x 15, 16x12, 12x9, 8x6 ve 4x3 sonlu eleman parçasına bölündüğü modeller için, ara yüzey link bağlantı

elemanların yatay kuvvet etkisi altındaki aksenal iç kuvvet değerleri Tablo 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6’da sunulmuştur. Düzlem içi yatay yük etkisi altındaki sonlu eleman ağ modelinin, dolgu duvar - çerçeve ara yüzlerindeki yay elemanlarda aksenal basınç kuvveti bulunmadığı bölgelerde temas bölgesinin kaybolduğu sonucuna varılmıştır. 500 kN’luk düzlem içi yatay kuvvet etkisi altındaki düzlem çerçeve modellerinin ara yüzey temas noktalarının temsili Şekil 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 ve 5.7’de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 Sonlu eleman ağ modellemesinde (20 x 15 bölmeli) dolgu duvar ile çerçeve arasındaki bağlantı elemanlarının aksenal basınç kuvveti değerleri

Sol Üst Uçtan Sağ Üst Uca Doğru Link Elemanların Eksenal Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sağ Üst Uçtan Sağ Alt Uca Doğru Link Elemanların Eksenal Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sol Üst Uçtan Sol Alt Uca Doğru Link Elemanların Eksenal Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sol Alt Uçtan Sağ Alt Uca Doğru Link Elemanların Eksenal Basınç Kuvveti Değerleri (kN)
108.6	0	135.45	0
82.98	0	167.2	0
62.30	0	109.22	0
41.68	0	62.95	0
24.25	0	0.83	0
8.79	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	32.14	0	0
0	105.1	0	0
0	133.3	0	6.97
0	125.7	0	17.94
0			29.75
0			42.53
0			58.39
0			77.27
0			95.79

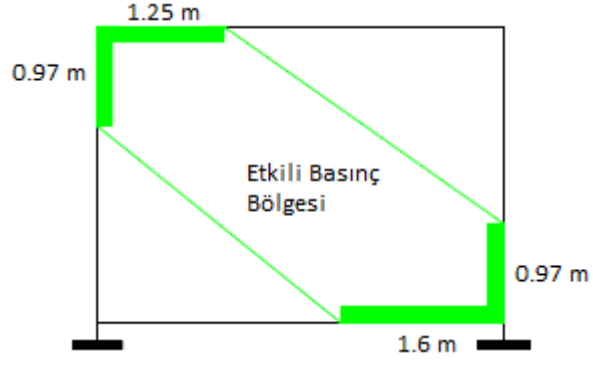


Şekil 5.3 Sonlu eleman ağ modelinde etkili basınç bölgesi (20x15 bölmeli duvar paneli)

20 x 15 bölmeli modelde etkili diyagonal basınç bölgesi genişliği 1.26 m olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.3 Sonlu eleman ağ modellemesinde (16 x 12 bölmeli) dolgu duvar ile çerçeve arasındaki bağlantı elemanlarının aksel basınç kuvveti değerleri

Sol Üst Uçtan Sağ Üst Uca Doğru Link Elemanların Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sağ Üst Uçtan Sağ Alt Uca Doğru Link Elemanların Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sol Üst Uçtan Sol Alt Uca Doğru Link Elemanların Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sol Alt Uçtan Sağ Alt Uca Doğru Link Elemanların Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri (kN)
93.45	0	150.89	0
79.67	0	144.89	0
61.99	0	100.64	0
43.98	0	52.49	0
26.79	0	3.53	0
10.47	0	0	0
0	0	0	0
0	20.8	0	0
0	63.34	0	3.9
0	103.12	0	12.81
0	135.21	0	21.83
0	129.47	0	31.8
0			43.71
0			58.38
0			76.91
0			95.32

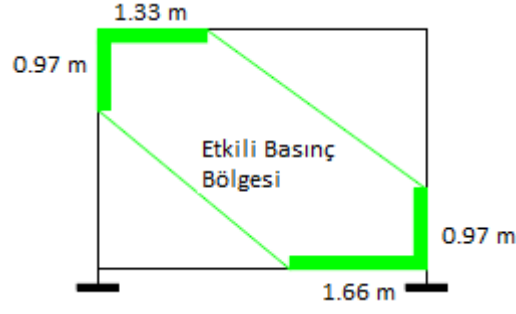


Şekil 5.4 Sonlu eleman ağ modelinde etkili basınç bölgesi (16x12 bölmeli duvar paneli)

16 x 12 bölmeli modelde etkili diyagonal basınç bölgesi genişliği 1.65 m olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.4 Sonlu eleman ağ modellemesinde (12 x 9 bölmeli) dolgu duvar ile çerçeve arasındaki bağlantı elemanlarının aksel basınç kuvveti değerleri

Sol Üst Uçtan Sağ Üst Uca Doğru Link Elemanların Aksel Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sağ Üst Uçtan Sağ Alt Uca Doğru Link Elemanların Aksel Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sol Üst Uçtan Sol Alt Uca Doğru Link Elemanların Aksel Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sol Alt Uçtan Sağ Alt Uca Doğru Link Elemanların Aksel Basınç Kuvveti Değerleri (kN)
115.8	0	185.18	0
94.95	0	160.54	0
66.17	0	87.72	0
36.67	0	12.51	0
8.45	0	0	0
0	0	0	0
0	36.12	0	0
0	100.22	0	6.22
0	154.22	0	21.71
0	155.45	0	38.1
0			59.19
0			84.65
0			111.44

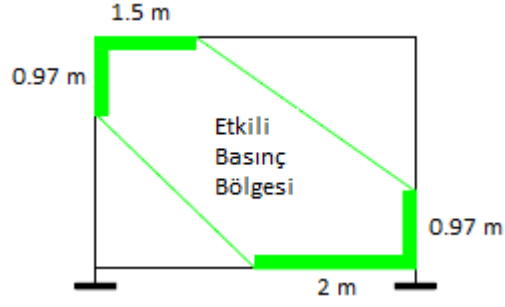


Şekil 5.5 Sonlu eleman ağ modelinde etkili basınç bölgesi (12x9 bölmeli duvar paneli)

12 x 9 bölmeli modelde etkili diyagonal basınç bölgesi genişliği 1.7 m olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.5 Sonlu eleman ağ modellemesinde (8 x 6 bölmeli) dolgu duvar ile çerçeve arasındaki bağlantı elemanlarının aksel basınç kuvveti değerleri

Sol Üst Uçtan Sağ Üst Uca Doğru Link Elemanların Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sağ Üst Uçtan Sağ Alt Uca Doğru Link Elemanların Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sol Üst Uçtan Sol Alt Uca Doğru Link Elemanların Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sol Alt Uçtan Sağ Alt Uca Doğru Link Elemanların Eksenel Basınç Kuvveti Değerleri (kN)
191.36	0	257.78	0
128.28	0	180.9	0
54.62	0	17.87	0
2.35	0	0	0
0	60.8	0	7.36
0	201.9	0	59.32
0	204.71	0	116.64
0			190.87
0			204.71

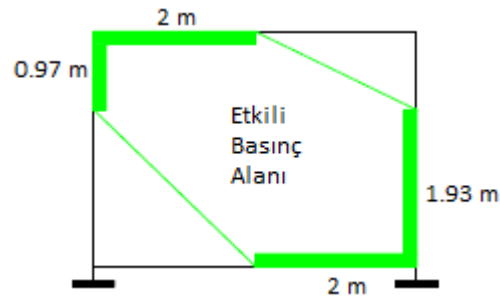


Şekil 5.6 Sonlu eleman ağ modelinde etkili basınç bölgesi (8x6 bölmeli duvar paneli)

8 x 6 bölmeli modelde etkili diyagonal basınç bölgesi genişliği 1.78 m olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.6 Sonlu eleman ağ modellemesinde (4 x 3 bölmeli) dolgu duvar ile çerçeve arasındaki bağlantı elemanlarının aksenal basınç kuvveti değerleri

Sol Üst Uçtan Sağ Üst Uca Doğru Link Elemanların Aksenal Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sağ Üst Uçtan Sağ Alt Uca Doğru Link Elemanların Aksenal Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sol Üst Uçtan Sol Alt Uca Doğru Link Elemanların Aksenal Basınç Kuvveti Değerleri (kN)	Sol Alt Uçtan Sağ Alt Uca Doğru Link Elemanların Aksenal Basınç Kuvveti Değerleri (kN)
198.85	0	324.16	0
89.91	0	81.47	0
5.6	118.85	0	2.56
0	286.85	0	91.82
0			198.03



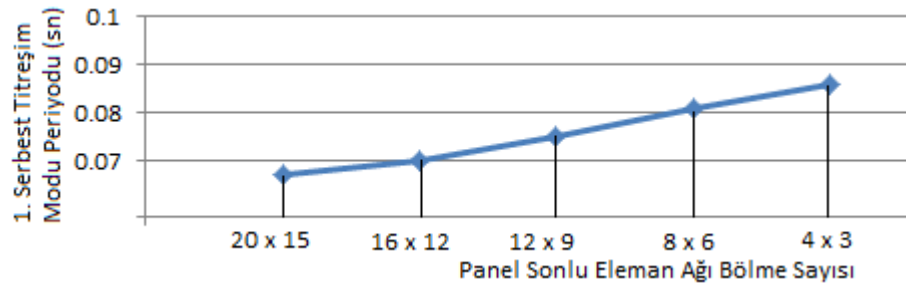
Şekil 5.7 Sonlu eleman ağ modelinde etkili basınç bölgesi (4x3 bölmeli duvar paneli)

4 x 3 bölmeli modelde etkili diyagonal basınç bölgesi genişliği 2.47 m olarak ölçülmüştür. Hata payını en aza indirgeyen ve analiz süresinin en uygun şekilde olmasını sağlayacak sonlu elemanlar bölme adedi belirlenmeye çalışılacaktır. Bu

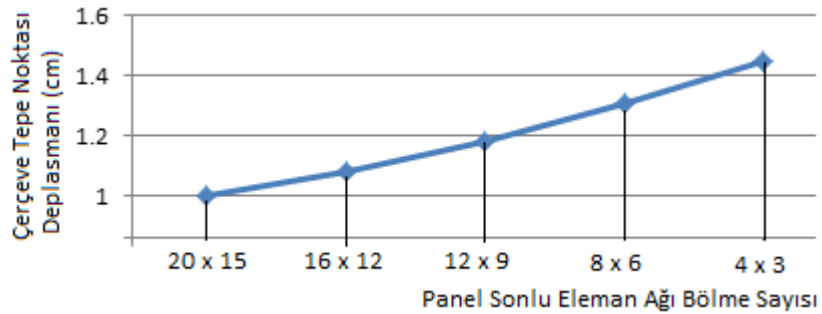
nedenle sonlu eleman ağ modelinde 500 kN yük etkisi altında, bölme adedine bağlı olarak çerçeve tepe noktası yatay deplasmanı ve 1.titreşim mod periyodu mertebesi karşılaştırılması yapılacaktır. Bu karşılaştırma Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Tablo 5.7’de sunulmuştur.

Tablo 5.7 Sonlu eleman modellemesinde bölme sayısının yapı tepe noktası yatay deplasmanına ve 1.serbest titreşim moduna etkisi

Sonlu Eleman Ağı Bölme Sayısı	Tepe Noktası Yatay Deplasmanı (cm)	1. Titreşim Modu Periyodu (sn)
20 x 15	1	0.068
16 x 12	1.08	0.070
12 x 9	1.18	0.075
8 x 6	1.31	0.081
4 x 3	1.45	0.087



Şekil 5.8 Sonlu elemanlar bölme sayısının 1. serbest titreşim moduna etkisi



Şekil 5.9 Çerçeve tepe noktasının yatay deplasmanının sonlu elemanlar bölme sayısına göre değişimi

### 5.2.1 Dolgu Duvar Panelinin Sonlu Eleman Ağı ile Modellendiği Örneklerin Değerlendirilmesi

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’un incelenmesinden de görüleceği gibi dolgu duvarı ifade eden sonlu eleman ağ modelinin bölme sayısının artmasıyla birlikte çerçeve tepe

noktası yatay deplasmanı ve 1. Serbest titreşim modu açısından daha hassas değerler elde edilmektedir. Duvar paneli bölme sayısının 4 x 3 olduğu durumda dolgu duvarlı çerçeve sisteminin yatay rijitliği 34.48 kN/mm iken, 20 x 15 olduğu durumda 50 kN / mm'dir. Buna göre, panel bölme adedinin artmasıyla birlikte dolgu duvarlı düzlem çerçeve sistemin yatay rijitliğinin arttığı görülmektedir. Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu etkili genişlik değerinin hesaplanmasına yönelik olarak ise, sonlu eleman ağ adedinin artmasıyla birlikte dolgu duvar - çerçeve arasındaki temas uzunluğu bölgesinin daha hassas olarak hesaplandığı ve Bölüm 3.4.3, Tablo 3.2'de sunulan değerlerle uyumluluğunun arttığı görülmektedir. Bu nedenle, artımsal itme analizi ile karşılaştırılması yapılacak örneklerde, sonlu eleman ağ modeline ait modelin itme eğrisinin panel bölme sayısına bağlı olacağı da anlaşılmaktadır. Bu bölümdeki diğer örneklerde, hesap hassasiyeti açısından 20 x 15 bölme sayısını kullanılacaktır.

### **5.3 Tek Kat Tek Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin Düzlem İçi Yük Etkisi Altında Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Çözümü**

Doğrusal olmayan artımsal itme analizi yapılacak tek katlı tek açıklıklı modellerin temsili Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Düzlem çerçeve modellerine ait en kesit ve donatı detayları Tablo 5.1'de sunulmuştur.

#### Dolgu duvarlı çerçeve sistemi parametreleri

H = Çerçeve ekseninden itibaren kolon yüksekliği = 2900 mm

$E_d$  = Dolgu duvar Young(elastisite) modülü = 4 kN/mm<sup>2</sup>

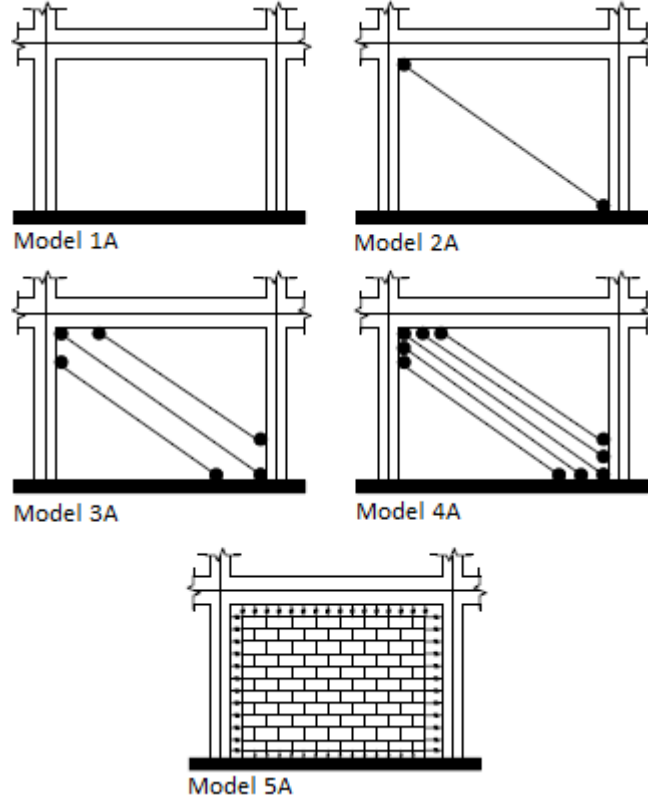
t = Dolgu duvar kalınlığı = 200 mm

$E_c$  = Beton Young(elastisite) modülü = 28 kN/mm<sup>2</sup>

L = Çerçeve ekseninden itibaren çerçeve açıklığı = 4000 mm

$\lambda$  = Göreli rijitlik parametresi =  $1.19 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$

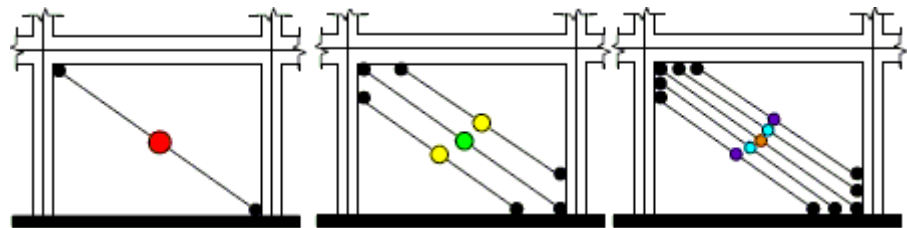
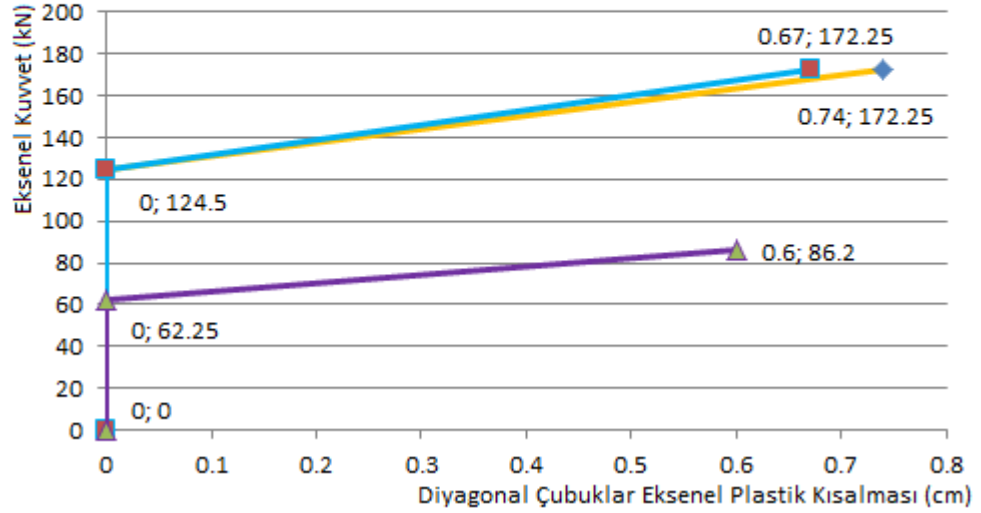
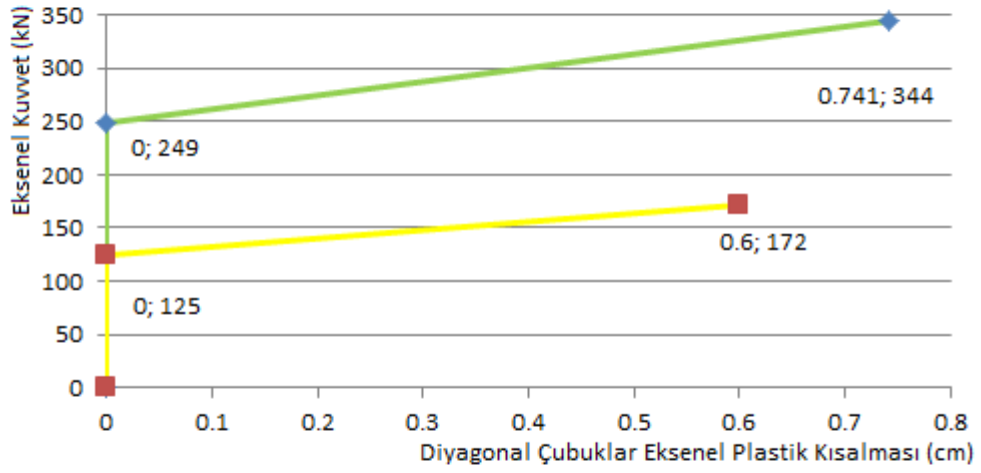
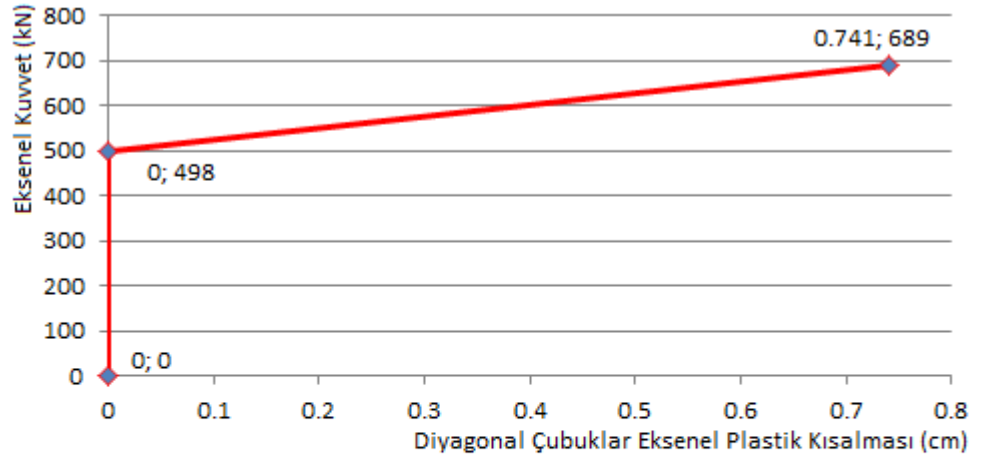
Model 5A'ya ait dolgu duvar ile çerçeve arasında konumlandırılan doğrusal olmayan yay elemanın rijitliği Denklem 3.41 ile hesaplanmıştır. Buna göre  $K_g = 85000 \text{ N/mm}$  alınacaktır. Eşdeğer tekil diyagonal çubuk en kesit boyutları = 20 cm x 53 cm olarak hesaplanmıştır.



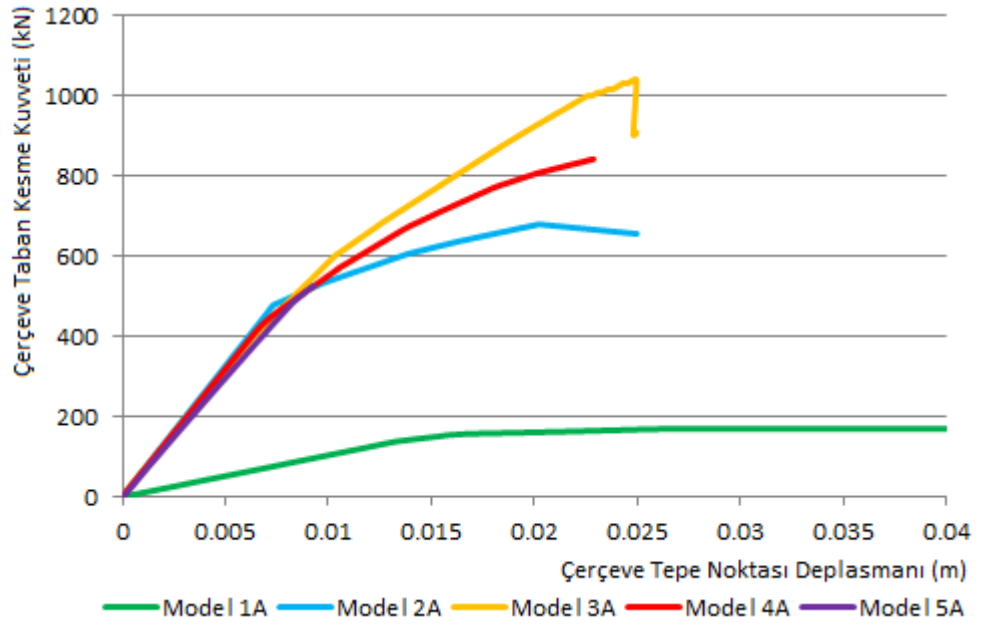
Şekil 5.10 Doğrusal olmayan davranışı incelenecek tek katlı tek açıklıklı çerçeve modelleri

Şekil 5.2’de çerçeve elemanı içerisinde kullanılacak dolgu duvar paneli için gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi sunulmuştur. Şekil 5.11’de diyagonal çubuk elemanlarda kullanılacak aksenal yük – aksenal deplasman ilişkileri sunulmuştur. Buna göre modellerde eşdeğer diyagonal basınç çubuk sayısının artmasıyla birlikte, her bir çubuk elemanının taşıyabileceği yük mertebesi düşürülmüştür. Dolgu duvarın çoklu diyagonal basınç çubuğu ile idealleştirildiği modellerde, çerçeve köşe bölgesine yakın olan ve uzunluğu diğerlerine göre daha kısa olan diyagonal elemanların aksenal kılma kapasitesi daha düşük olmaktadır.

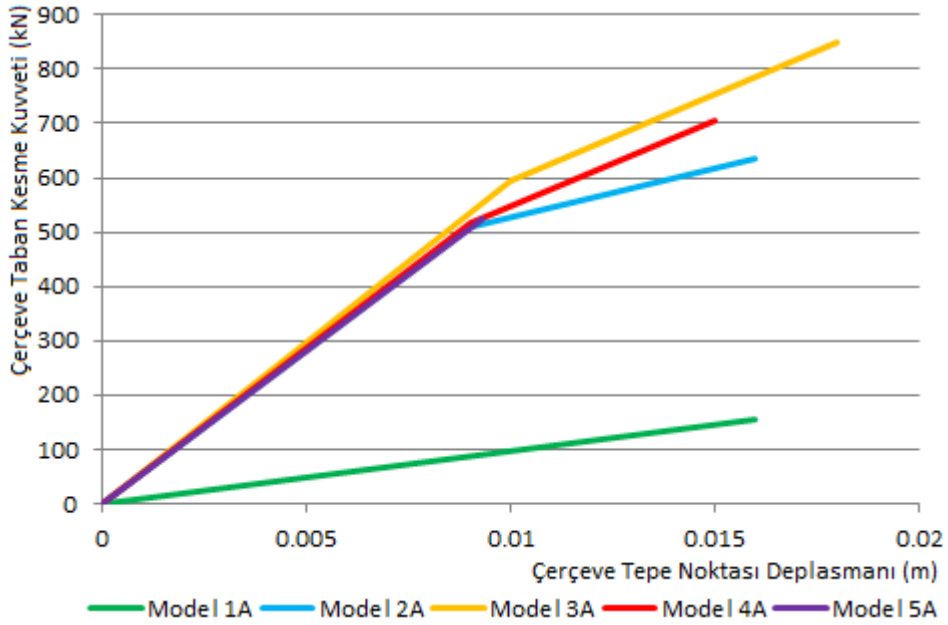
Şekil 5.10’da temsili gösterilen modellerin, doğrusal olmayan analizi sonucunda elde edilen itme eğrisi grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 5.12’de yapılmıştır. Bu eğriler göçme bölgesine kadar Şekil 5.13’de doğrusal iki çizgi kullanılarak idealleştirilmiştir. Modellere ait idealleştirilmiş statik itme eğrilerinin koordinatları Tablo 5.8’de sunulmuştur.



Şekil 5.11 Eşdeğer diyagonal çubuklu modellerde, diyagonal çubuk elemanlara atanacak plastik mafsal elemanların normal kuvvet – aksenal kısalma ilişkisi



Şekil 5.12 Tek kat tek açıklıklı düzlem çerçeve modellerin statik itme eğrileri



Şekil 5.13 Tek kat tek açıklıklı modellerin doğrusal iki çizgiyle idealleştirilmiş statik itme eğrileri (göçme bölgesine kadar)

Tablo 5.9'da ise doğrusal olmayan analiz sonucunda, boş çerçevenin göçme anında (tepe noktası deplasmanı = 0.017m) ulaşılan deplasman değerine göre diğer diyagonal çubuklu modellerde oluşan plastik mafsalsal dönme değerleri sunulmuştur.

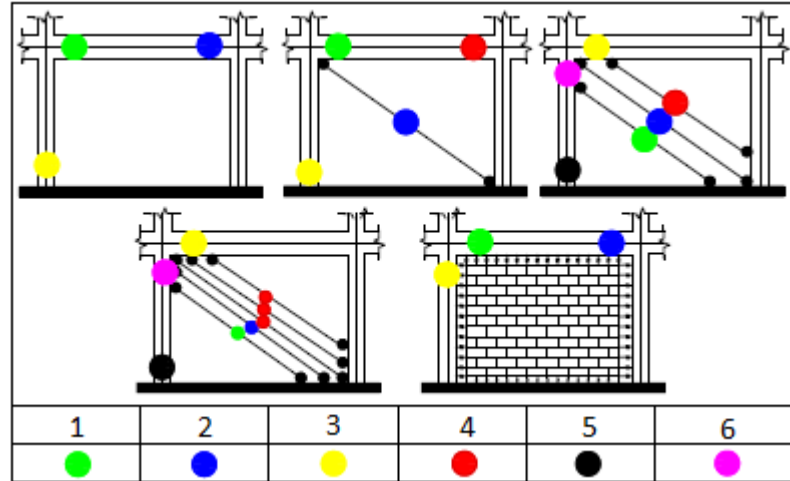
Tablo 5.8 Tek kat tek açıklıklı düzlem çerçeve modellerin idealleştirilmiş statik eğri koordinatları

	Model 1A	Model 2A	Model 3A	Model 4A	Model 5A
Elastik Sınır Şekil Değişirme (m)	0.016	0.009	0.01	0.009	0.0093
Elastik Sınır Taban Kesme Kuvv. (kN)	155	510	594	516	526
Göçme Durumu Şekil Değişirme (m)	0.017	0.016	0.018	0.015	?
Göçme Dur. Taban Kesme Kuv. (kN)	155	635	860	705	?

Tablo 5.9 Model 1A'nın (boş çerçeve) göçme anında ulaşılan deplasman değerine göre (0.017m) diğer diyagonal çubuklu modellerde oluşan dönme değerleri

	İlk Plastik Kesit Yeri	Sol Kolon Eleman Alt Ucunda Oluşan Plastik Mafsala Dönmesi (rad)	Kiriş Elemanda Oluşan Maksimum Plastik Mafsala Dönmesi (rad)
Model 1A	Kiriş Sol Ucu	0.000418	0.00240
Model 2A	Kiriş Sol Ucu	0.00397	0.00153
Model 3A	Duvar	0.00323	0.00102
Model 4A	Duvar	0.00314	0.00087

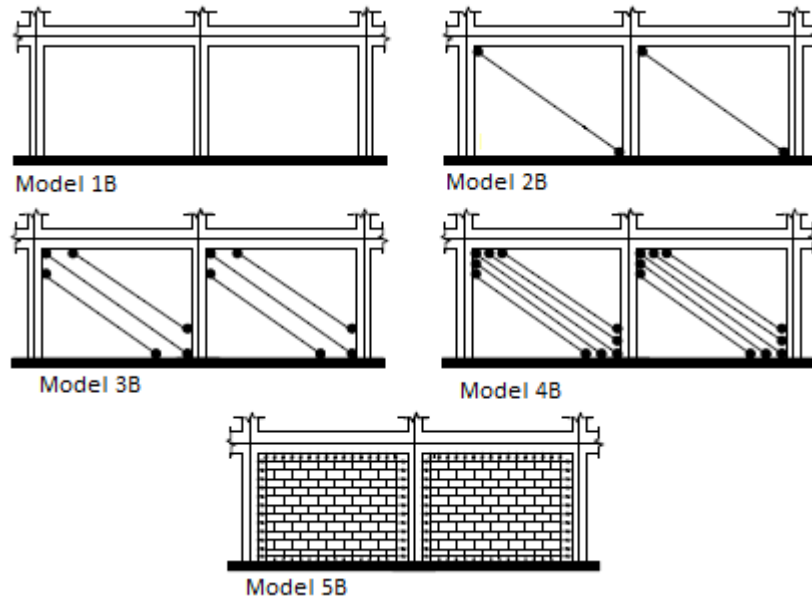
Şekil 5.14'de artımsal yük etkisi altındaki her bir düzlem çerçeve sistemi için, kesit hasar oluşum sırası gösterilmiştir.



Şekil 5.14 Düzlem içi yatay kuvvet etkisi altındaki tek kat tek açıklıklı düzlem çerçevelerde mafsallaşma oluşum sırası

#### 5.4 Tek Kat İki Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin Düzlem İçi Yük Etkisi Altında Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Çözümü

Doğrusal olmayan artımsal itme analizi yapılacak tek katlı iki açıklıklı modellerin temsili Şekil 5.15’de gösterilmiştir. Çerçeve sistemi yük parametreleri, çerçeve en kesit boyutları ve donatı seçimi Bölüm 5.2 ve Bölüm 5.3’de sunulan modeller ile aynı alınmıştır (Tablo 5.1). Şekil 5.11’de gösterilen eşdeğer diyagonal basınç çubuk elemanların plastik mafsallık özellikleri de bu bölümde aynıdır.

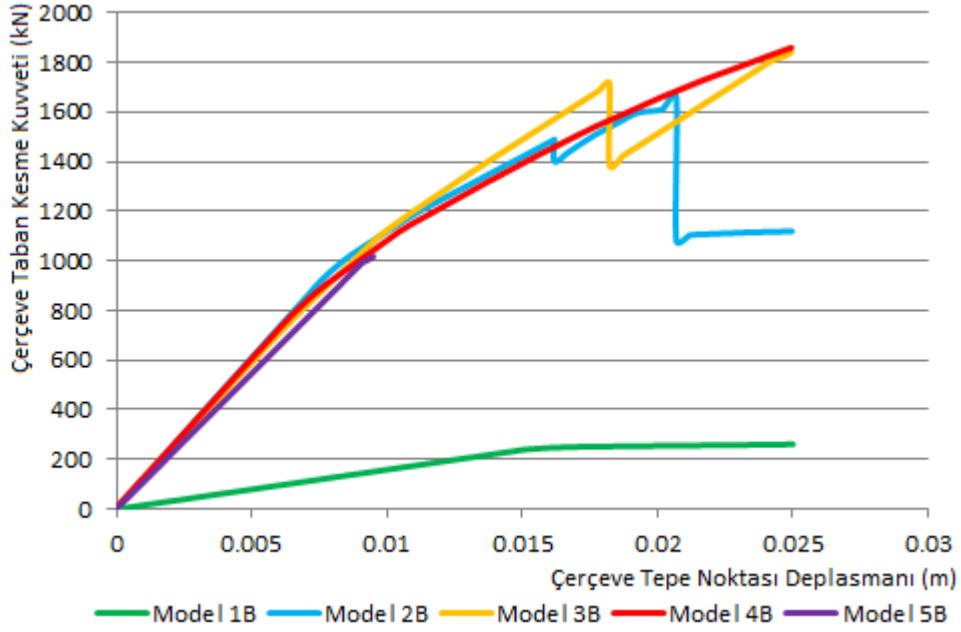


Şekil 5.15 Doğrusal olmayan davranışı incelenecek tek katlı iki açıklıklı çerçeve modelleri

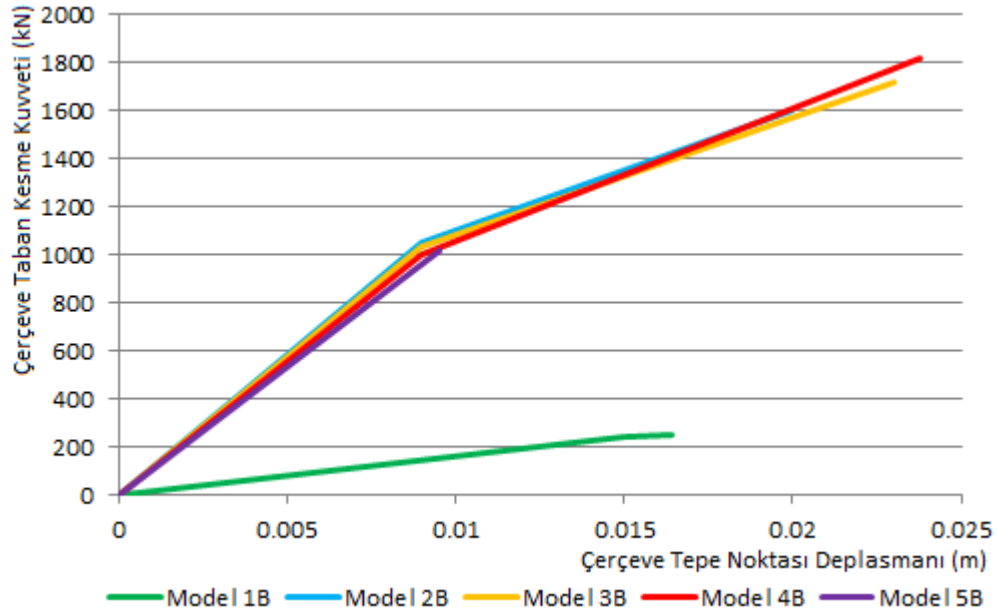
Şekil 5.15’de temsili gösterilen modellerin, doğrusal olmayan yöntemler sonucunda elde edilen itme eğrisi grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 5.16’de yapılmıştır. Bu eğriler Şekil 5.17’de doğrusal iki çizgi kullanılarak idealleştirilmiştir. Modellere ait idealleştirilmiş statik itme eğrilerinin koordinatları Tablo 5.10’da sunulmuştur. Tablo 5.11’de ise doğrusal olmayan analiz sonucunda, boş çerçevenin göçme anında (tepe noktası deplasmanı = 0.017m) ulaşılan deplasman değerine göre diğer diyagonal çubuklu modellerde oluşan plastik mafsallık dönme değerleri sunulmuştur.

Tablo 5.10 Tek kat iki açıklıklı düzlem çerçeve modellerin idealleştirilmiş statik eğri koordinatları

	Model 1B	Model 2B	Model 3B	Model 4B	Model 5B
Elastik Sınır Şekil Değişirme (m)	0.015	0.009	0.009	0.009	0.0095
Elastik Sınır Taban Kesme Kuvveti (kN)	240	1052	1033	1008	1017
Göçme Durumu Şekil Değişirme (m)	0.017	0.02	0.023	0.0238	?
Göçme Durumu Taban Kesme Kuv. (kN)	248.5	1661	1718	1816	?



Şekil 5.16 Tek kat iki açıklıklı düzlem çerçeve modellerin statik itme eğrileri

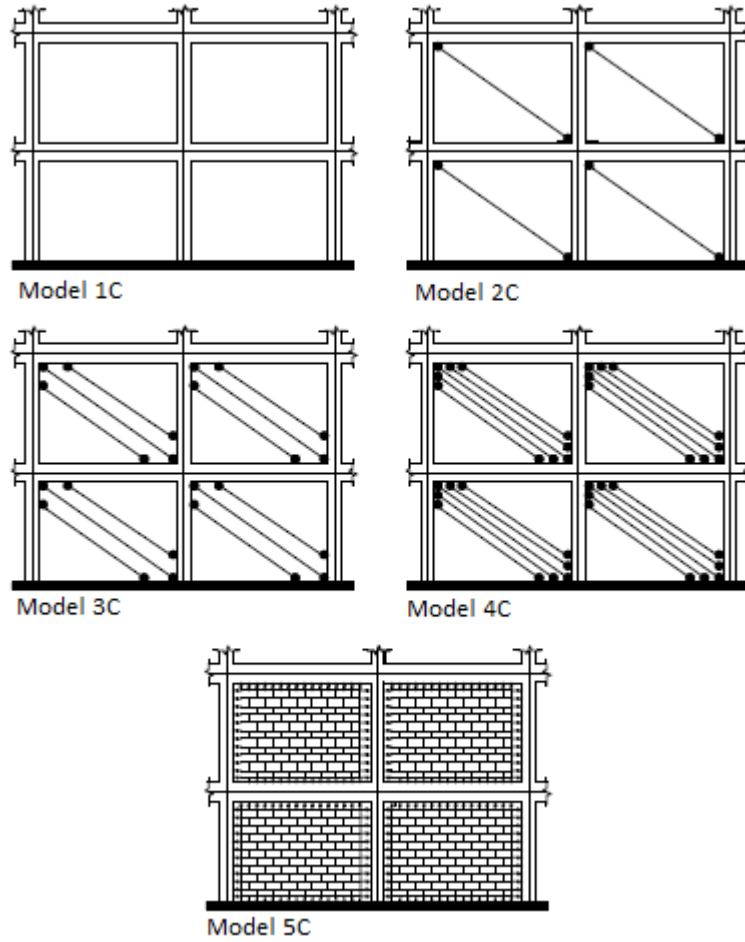


Şekil 5.17 Tek kat iki açıklıklı modellerin doğrusal iki çizgiyle idealleştirilmiş statik itme eğrileri (göçme bölgesine kadar)

Tablo 5.11 Model 1B'nin (boş çerçeve) göçme anında ulaşılan deplasman değerine göre (0.017m) diğer diyagonal çubuklu modellerde oluşan dönme değerleri

	İlk Plastik Kesit Yeri	Sol Kolon Eleman Alt Ucunda Oluşan Plastik Mafsalsal Dönmesi (rad)	Kiriş Elemanda Oluşan Maksimum Plastik Mafsalsal Dönmesi (rad)
Model 1B	Kiriş Sol Ucu	0.000418	0.00108
Model 2B	Duvar	0.018	$1.16 \times 10^{-7}$
Model 3B	Duvar	0.00317	$2.00 \times 10^{-13}$
Model 4B	Duvar	0.00311	Mafsallaşma Yok

### 5.5 İki Kat İki Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin Düzlem İçi Yük Etkisi Altında Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Çözümü

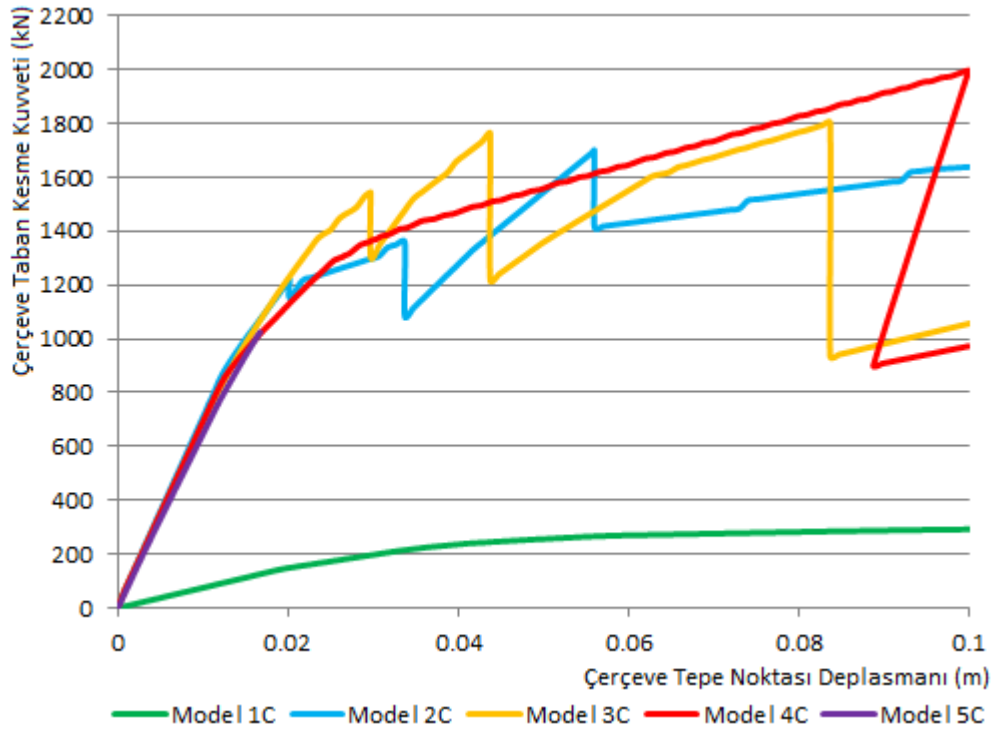


Şekil 5.18 Doğrusal olmayan davranışı incelenecek iki katlı iki açıklıklı çerçeve modelleri

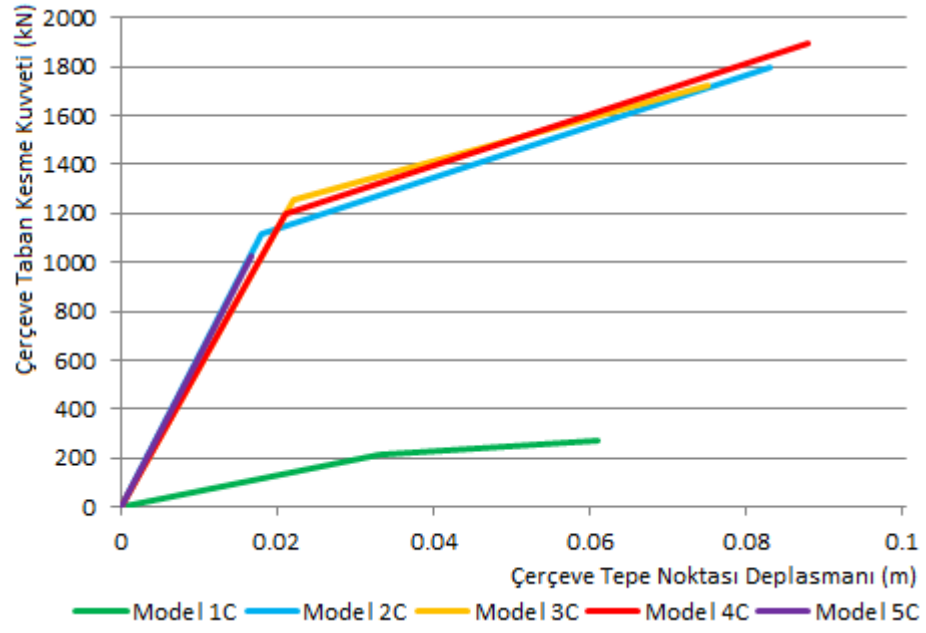
Doğrusal olmayan artımsal itme analizi yapılacak iki kat iki açıklıklı modellerin temsili Şekil 5.18'de gösterilmiştir. Çerçeve yük parametreleri, en kesit boyutları ve

en kesit donatı seçimi Bölüm 5.2, 5.3 ve 5.4'teki düzlem çerçeve modelleri ile aynı alınmıştır. Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu elemanlarının en kesit boyutları ve plastik mafsallık özellikleri de Bölüm 5.2, 5.3 ve 5.4'deki örneklerle aynıdır ve Şekil 5.11'deki gibidir.

Şekil 5.18'de temsili gösterilen modellerin, doğrusal olmayan yöntemler sonucunda elde edilen itme eğrisi grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 5.19'da yapılmıştır. Bu eğrilerin göçme bölgesine kadar olan kısmı Şekil 5.20'de doğrusal iki çizgi kullanılarak idealleştirilmiştir. Şekil 5.21'de ise düzlem çerçeve modellerin kat deplasmanları grafiği (elastik bölgede) sunulmuştur. Modellere ait idealleştirilmiş statik itme eğrilerinin koordinatları Tablo 5.12'de sunulmuştur. Tablo 5.13'de ise doğrusal olmayan analiz sonucunda, boş çerçevenin göçme anında (tepe noktası deplasmanı = 0.061m) ulaşılan deplasman değerine göre diğer diyagonal çubuklu modellerde oluşan plastik mafsallık dönme değerleri sunulmuştur.



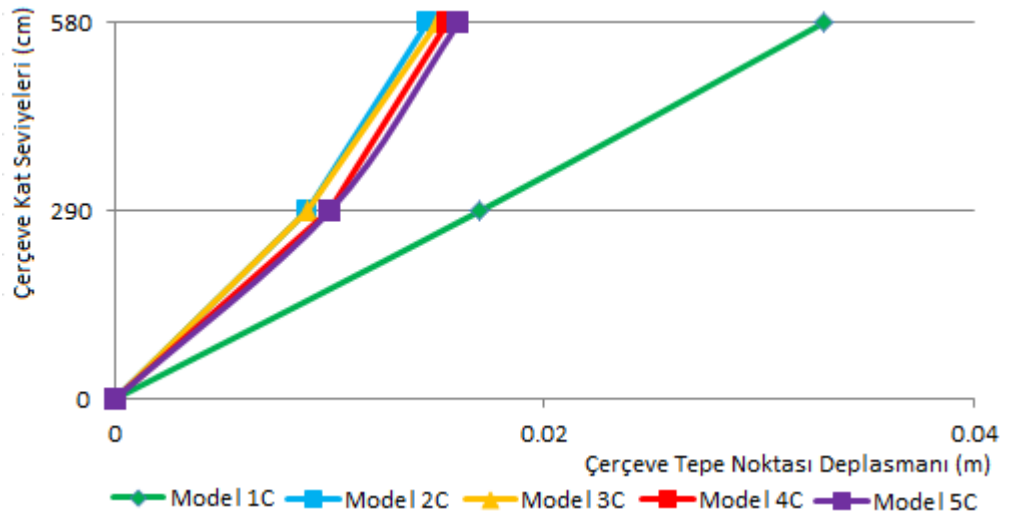
Şekil 5.19 İki kat iki açıklıklı düzlem çerçeve modellerin statik itme eğrileri



Şekil 5.20 İki kat iki açıklıklı modellerin doğrusal iki çizgiyle idealleştirilmiş statik itme eğrileri (göçme bölgesine kadar)

Tablo 5.12 İki kat iki açıklıklı düzlem çerçeve modellerin idealleştirilmiş statik eğri koordinatları

	Model 1C	Model 2C	Model 3C	Model 4C	Model 5C
Çerçeve Tepe Nokt. Elastik Sınır Dep. (m)	0.033	0.018	0.022	0.021	0.0167
Elastik Sınır Taban Kesme Kuvveti (kN)	215	1115	1253	1200	1024
Göçme Durumu Çerç. Tepe Nokt. Dep. (m)	0.061	0.083	0.075	0.088	?
Göçme Durumu Taban Kesme Kuv. (kN)	271	1794	1727	1892	?



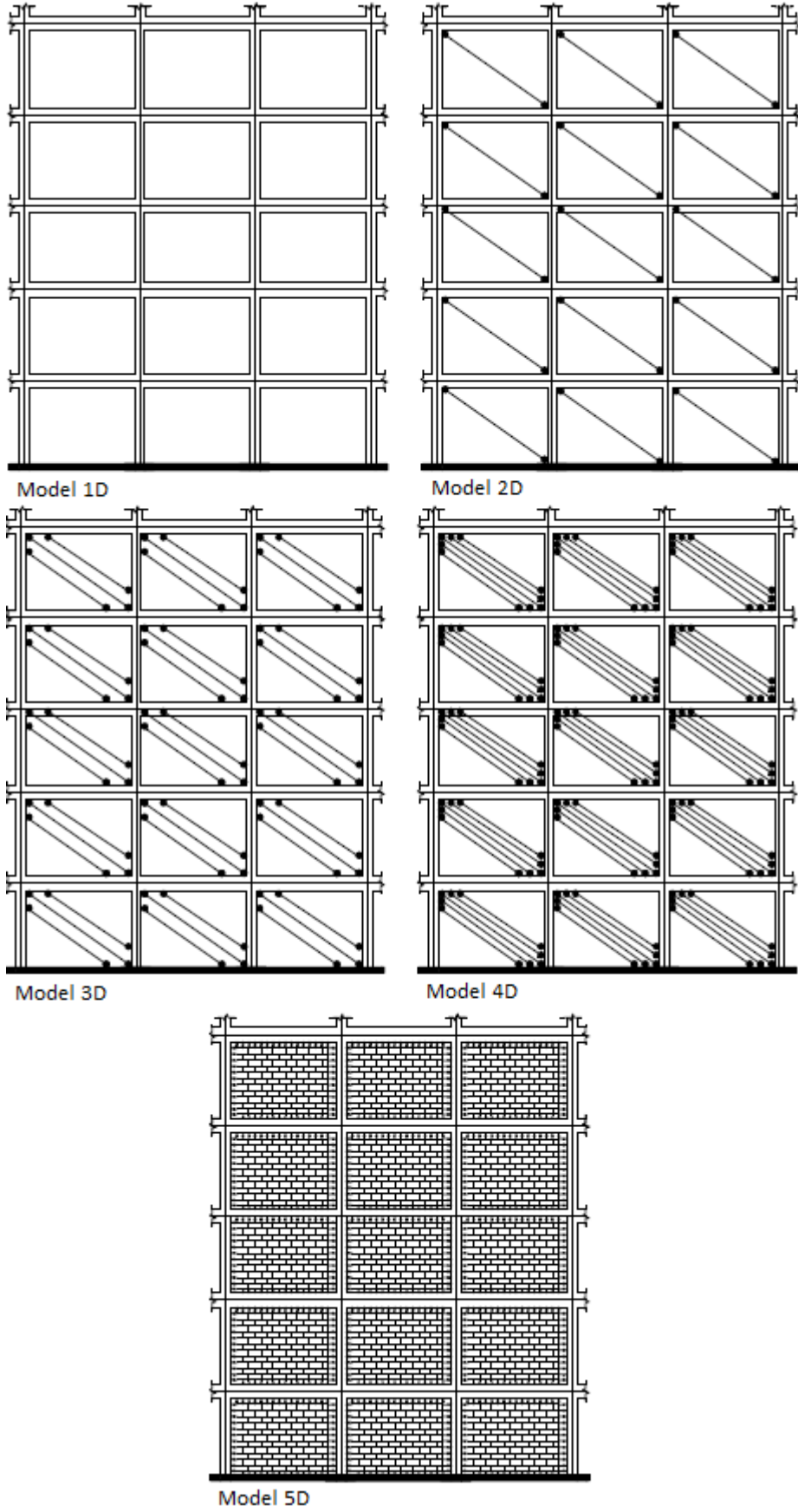
Şekil 5.21 İki kat iki açıklıklı dolgu duvarlı düzlem çerçeve modellerin kat seviyeleri elastik deplasmanları

Tablo 5.13 Model 1C'nin (boş çerçeve) göçme anında ulaşılan deplasman değerine göre (0.061m) diğer diyagonal çubuklu modellerde oluşan dönme değerleri

	İlk Plastik Kesit Yeri	Sol Kolon Eleman Alt Ucunda Oluşan Plastik Mafsal Dönmesi (rad)	Kiriş Elemanda Oluşan Maksimum Plastik Mafsal Dönmesi (rad)
Model 1C	Kiriş Sol Ucu	0.0086	0.00494
Model 2C	Duvar	0.0132	0.00494
Model 3C	Duvar	0.0113	0.00138
Model 4C	Duvar	0.0102	0.00041

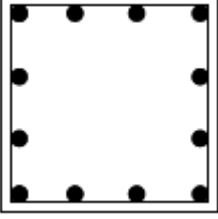
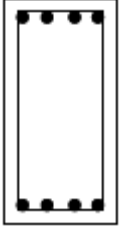
## 5.6 Beş Kat Üç Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerin Düzlem İçi Yük Etkisi Altında Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Çözümü

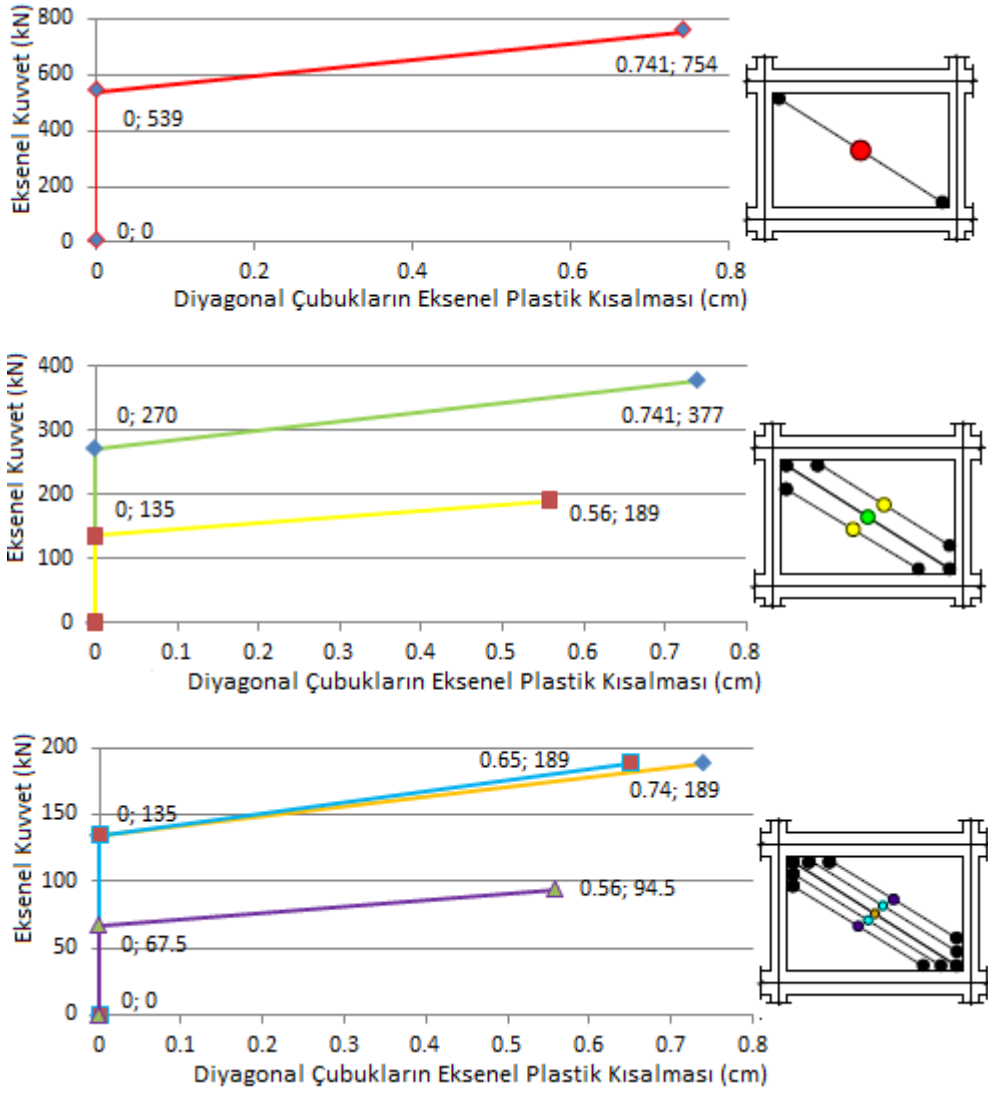
Doğrusal olmayan artımsal itme analizi yapılacak beş katlı üç açıklıklı modellerin temsili Şekil 5.22'de gösterilmiştir. Modellere ilişkin çerçeve kesit boyut ve donatı detayları Tablo 5.14'de sunulmuştur. Eşdeğer tekil diyagonal çubuk genişliği Denklem 3.40 ile hesaplanmıştır. Buna göre eşdeğer diyagonal basınç çubuğu 20 x 58 cm boyutundadır. Dolgu duvarın üçlü ve beşli eşdeğer diyagonal çapraz çubukla temsil edildiği modellerde çubukların alansal dağıtımı Şekil 4.7'deki gibi yapılacaktır. Dolgu duvarın sonlu eleman ağ elemanlarla ile temsil edildiği modelde de duvar panelinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği Şekil 5.2'deki gibi alınacaktır. Eşdeğer diyagonal çubuklara atanacak mafsal özellikleri ise Şekil 5.23'de sunulmuştur. Üçlü ve beşli diyagonal çubuk modellerde, eşdeğer diyagonal kenar çubukların çerçeve sistemine bağlandığı nokta koordinatları Denklem 3.13 ile hesaplanmıştır. Şekil 5.22'de temsili gösterilen modellerin, doğrusal olmayan yöntemler sonucunda elde edilen itme eğrisi grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 5.24'de yapılmıştır. Bu eğrilerin, çerçeve göçme bölgesine kadar olan kısmı Şekil 5.25'de doğrusal iki çizgi kullanılarak idealleştirilmiştir.  $H$  = Çerçeve ekseninden itibaren kolon yüksekliği = 2900 mm;  $E_d$  = Dolgu duvar Young(elastisite) modülü = 4 kN/mm<sup>2</sup>;  $t$  = Dolgu duvar kalınlığı = 200 mm;  $h_m$  = Dolgu duvar boyu yüksekliği = 2650 mm;  $E_b$  = Beton (elastisite) modülü = 28 kN/mm<sup>2</sup>,  $L$  = Çerçeve ekseninden itibaren çerçeve açıklığı = 4000 mm;  $\lambda$  = Görelî rijitlik parametresi =  $9.3 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$  olarak alınmıştır.



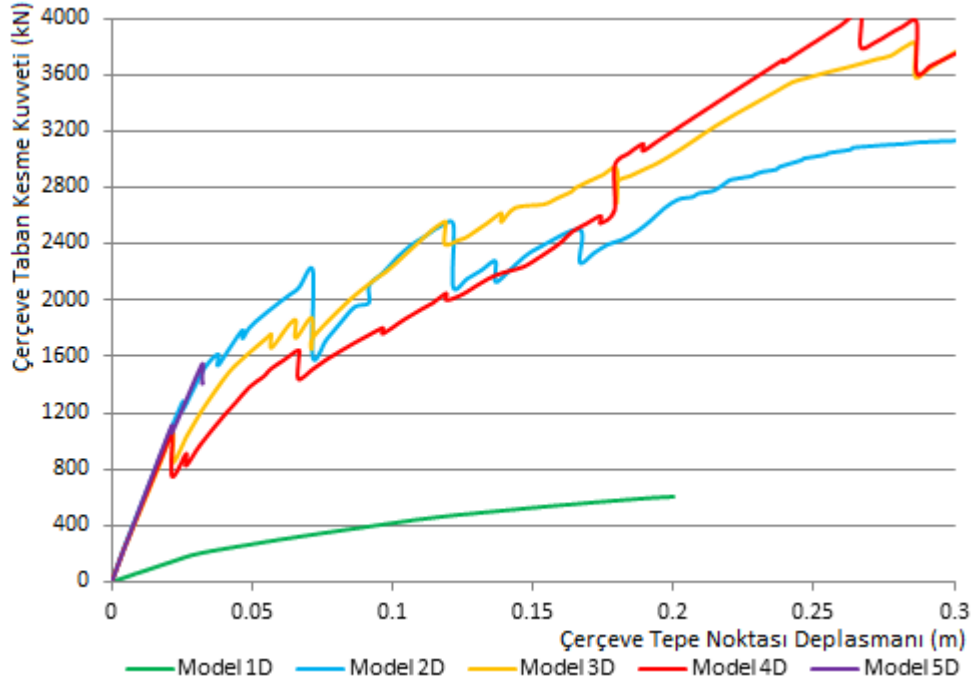
Şekil 5.22 Doğrusal olmayan davranışı incelenecek beş katlı üç açıklıklı düzlem çerçeve modelleri

Tablo 5.14 Beş katlı üç açıklıklı düzlem çerçeve modellerinde kullanılan kesitler

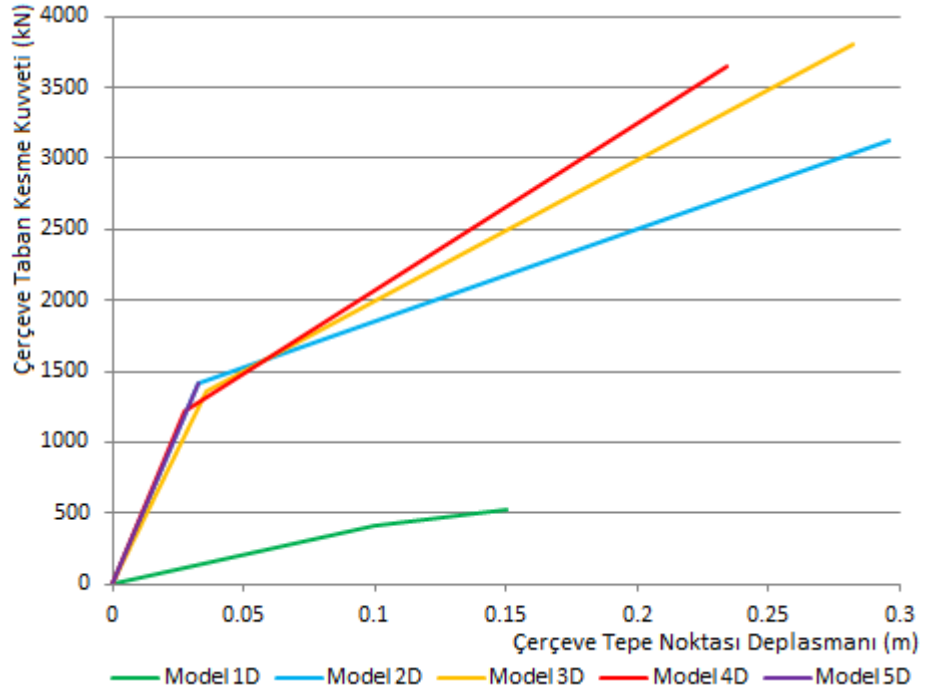
En Kesitler		
En kesit Boyutları	45 cm x 45 cm	25 x 50 cm
Boyuna Donatı	12 $\phi$ 18	$A_s = 4\phi 12$   $A_{s'} = 4\phi 12$
Enine Donatı	$\phi 8/10$	$\phi 8/15$



Şekil 5.23 Beş kat üç açıklıklı eşdeğer diyagonal çubuklu modellerde, diyagonal çubuk elemanlara atanacak plastik mafsallik özellikleri

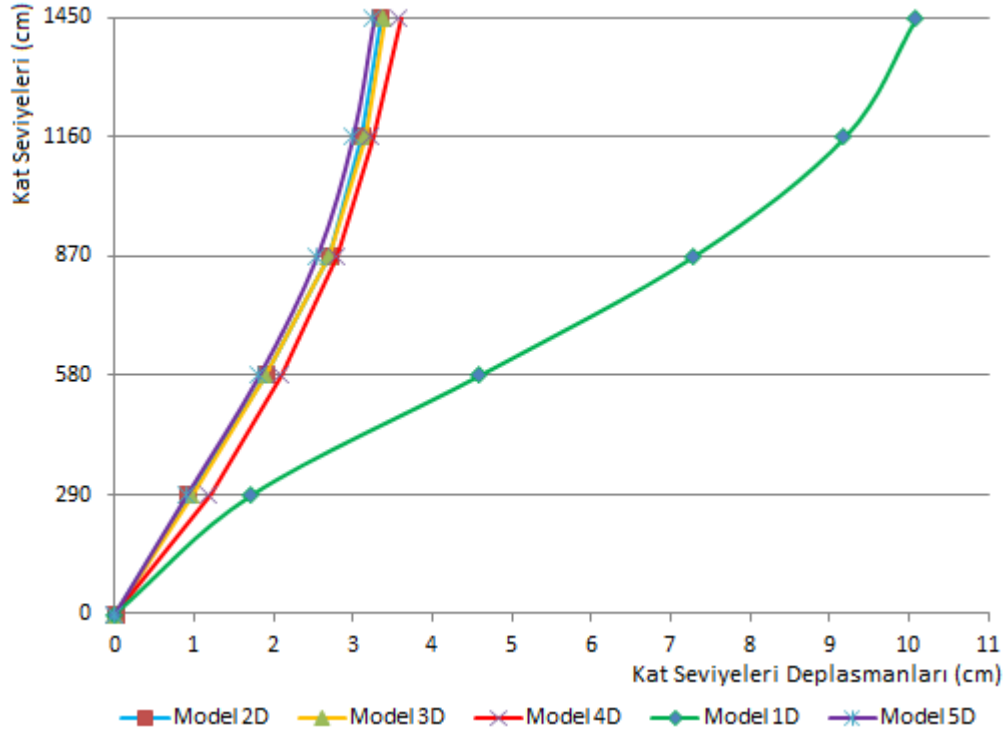


Şekil 5.24 Beş kat üç açıklıklı düzlem çerçeve modellerin statik itme eğrileri



Şekil 5.25 Beş kat üç açıklıklı modellerin doğrusal iki çizgiyle idealleştirilmiş statik itme eğrileri (göçme bölgesine kadar)

Şekil 5.26’da ise altındaki beş kat üç açıklıklı düzlem çerçeve modellerin, kat deplasmanları grafiği sunulmuştur.



Şekil 5.26 Beş kat üç açıklıklı dolgu duvarlı düzlem çerçeve modellerin kat seviyeleri elastik deplasmanları

Modellere ait idealleştirilmiş statik itme eğrilerinin koordinatları (göçme bölgesine kadar) Tablo 5.15’de sunulmuştur. Tablo 5.16’da ise doğrusal olmayan analiz sonucunda, boş çerçevenin göçme anında (tepe noktası deplasmanı = 0.15m) ulaşılan deplasman değerine göre diğer diyagonal çubuklu modellerde oluşan plastik mafsalsal dönme değerleri sunulmuştur.

Tablo 5.15 Beş kat üç açıklıklı düzlem çerçeve modellerin idealleştirilmiş statik eğri koordinatları

	Model 1D	Model 2D	Model 3D	Model 4D	Model 5D
Çerçeve Tepe Nokt. Elastik Sınır Dep. (m)	0.1	0.033	0.036	0.027	0.033
Elastik Sınır Taban Kesme Kuvveti (kN)	410	1415	1355	1215	1415
Göçme Durumu Çerç. Tepe Nokt. Dep. (m)	0.15	0.30	0.282	0.301	?
Göçme Durumu Taban Kesme Kuv. (kN)	525	3131	3800	3765	?

Tablo 5.16 Model 1D'nin (boş çerçeve) göçme anında ulaşılan deplasman değerine göre (0.15m) diğer diyagonal çubuklu modellerde oluşan dönme değerleri

	İlk Plastik Kesit Yeri	Sol Kolon Eleman Alt Ucunda Oluşan Plastik Mafsal Dönmesi (rad)	Kiriş Elemanda Oluşan Maksimum Plastik Mafsal Dönmesi (rad)
Model 1D	Kiriş Sol Ucu	0.008	0.0048
Model 2D	Duvar	0.0332	0.0037
Model 3D	Duvar	0.0185	0.00097
Model 4D	Duvar	0.00137	0.00051

## BÖLÜM ALTI

### TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Tez çalışmasında, dolgu duvarlı çerçevelerin modellenmesinde eşdeğer diyagonal basınç çubuk modeli ile, sonlu eleman ağ modeli kullanılmıştır. Birçok araştırmacının dolgu duvarların modellenmesinde kullandığı tekli diyagonal basınç çubuğu kavramı, bu çalışmada geliştirilerek üçlü ve beşli eşdeğer diyagonal basınç çubuk modelleri üretilmiştir. Bu modeller düzlem içi yük etkisi altında dolgu duvar – çerçeve arasındaki etki yüzeyinin temsil edilmesine yönelik olarak oluşturulmuştur. Sonlu eleman ağ modellemesinde ise, dolgu duvar ile çerçeve arasında teması sağlayacak ve gerçek modeli daha iyi ifade ettiğini varsaydığımız link elemanlar kullanılmıştır.

İlk aşamada, düzlemsel dolgu duvarlı çerçeve sistemini temsil ettiği düşünülen sonlu eleman ağ modelinin SAP2000 yapı analiz programı ile düzlem içi yük etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Bu modelde duvar için kullanılan panel elemanlar 20x15, 16x12, 12x9, 8x6 ve 4x3'e bölünerek sonuçlardaki farkın ne kadar anlamlı olduğu irdelenmeye çalışılmıştır. Sonlu eleman ağ bölme adedinin artmasıyla birlikte dolgu duvar panelindeki etkin basınç bölgesi diyagonal genişliği mertebesi azalarak Tablo 3.2'de sunulan eşdeğer diyagonal basınç çubuğu etkili genişliği değerleriyle uyumluluk göstermiştir. Ayrıca dolgu duvarı temsil eden panel elemanın bölme sayısının artırılmasıyla birlikte yapı birinci serbest titreşim modunun ve düzlem içi yük etkisi altında sistemin tepe noktası deplasmanının daha hassas olarak hesaplandığı görülmüştür. Analiz hassasiyeti açısından sonlu eleman ağ bölme sayısının artırılması uygun olsa da, bu durum analiz süresini uzatmakta ve yöntemin kullanılabilirliği kısıtlanmaktadır. Bu çalışmada ele alınan örneklerde, duvar panelini temsil eden elemanın 16 x 12 veya 20 x 15 adet elemana bölünmesi analiz hassasiyeti ve analiz süresi bakımından uygun görülmüştür. Sonlu eleman ağ modelinde çerçeve ile dolgu duvar ara yüzünde kullanılan link elemanlarda sadece eksenel basınç kuvveti dikkate alınmış; çekme kuvveti ve kayma etkileri ihmal edilmiştir. Hem basınç, hem çekme, hem de kayma etkilerinin dikkate alınacağı modeller üzerinde de analiz yapıp değerlendirilmelidir.

Analiz açısından uygun panel bölme adedi belirlendikten sonra bu model ile birlikte tekli, üçlü, beşli eşdeğer diyagonal basınç çubuklu düzlem çerçeve modellerinin, düzlem içi artımsal yük etkileri altında analizleri gerçekleştirilmiştir. Örneklerde tek kat – tek açıklıklı, tek kat – iki açıklıklı, iki kat - iki açıklıklı ve beş kat – üç açıklıklı modeller kullanılmıştır. Her bir örnek düzlem çerçeve modeli için statik itme eğrisi, plastik mafsallarda kesitlerdeki dönmeler (sadece eşdeğer diyagonal çubuk modelleri için), elastik durumda ve göçme durumundaki şekil değiştirmeler, taban kesme kuvveti değerlerinin irdelemesi yapılmıştır. Artımsal düzlem içi yük etkisi altındaki tek katlı – tek açıklıklı düzlem çerçeve modellerinde meydana gelen plastikleşme sıraları da gösterilmiştir. Ayrıca çok katlı düzlem modellerinde kat seviyelerindeki elastik yatay kat ötelemeleri değerleri sunulmuştur. Bütün bu örnekler üzerinde yapılan hesaplamaların sonuçları aşağıda açıklanmıştır:

#### Tek Kat Tek Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerinin Analiz Sonuçları Değerlendirmesi

- Model 1A’da gösterilen içerisinde dolgu duvarı olmayan boş düzlem çerçeve sisteminin elastik sınır şekil değiştirme mertebesinin 1.7 cm olduğu görülmüştür. Buna göre dolgu duvarlı çerçeve sistemini temsil eden diğer düzlem çerçeve modellerinin, boş çerçeveye göre elastik bölgede %50 mertebelerinde daha az deplasman yapabildiği görülmüştür.
- Elastik bölgede, sınır taban kesme kuvveti değeri her iki düzlemsel dolgu duvarlı çerçeve modeli için yaklaşık olarak aynı mertebededir. Boş çerçeve modelinin elastik bölgedeki taban kesme kuvveti, dolgu duvarlı düzlem modellerindeki taban kesme kuvveti değerlerine göre yaklaşık %70 daha azdır.
- Göçme durumundaki en büyük şekil değiştirmeyi üç diyagonal düzlem çerçeve modeli; en az şekil değiştirmeyi ise tekli ve beşli diyagonal basınç çubuklu düzlem çerçeve sistemi yapmıştır; ancak mühendislik yaklaşımı açısından tekli, üçlü ve beşli eşdeğer diyagonal basınç çubuklu modellerin davranışlarının aynı olduğu kabul edilebilir.

- Artımsal düzlem içi yük etkisi altındaki sonlu eleman ağ modelinin plastik bölgeye geçmeden göçtüğü görülmüştür. Model 1A ile gösterilen boş çerçevenin başlangıç yatay rijitliğinin 10 kN/mm; dolgu duvarlı çerçevelerin (Model 2A, 3A, 4A, 5A) yatay rijitliğinin yaklaşık olarak 54 kN/mm olduğu görülmüştür. Buna göre tek kat tek açıklıklı sistemde, dolgu duvar etkisinin hesaba katıldığı modeller için bulunan çerçeve yatay rijitlik mertebesi, boş çerçeve sistemine göre 5.4 kat daha fazla bulunmuştur.

#### Tek Kat İki Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerinin Analiz Sonuçları Değerlendirmesi

- Model 1B’de gösterilen içerisinde dolgu duvarı olmayan boş düzlem çerçeve sisteminin elastik sınır şekil değiştirme mertebesinin 1.5 cm olduğu görülmüştür. Buna göre dolgu duvarlı çerçeve sistemini temsil eden diğer düzlem çerçeve modellerinin, boş çerçeveye göre elastik bölgede %55 - %60 mertebelerinde daha az deplasman yapabildiği görülmüştür.
- Elastik bölgede, sınır taban kesme kuvveti değeri her iki düzlemsel dolgu duvarlı çerçeve modeli için yaklaşık olarak aynı mertebededir. Boş çerçeve modelinin elastik bölgedeki taban kesme kuvveti, dolgu duvarlı düzlem modellerindeki taban kesme kuvveti değerlerinin yaklaşık dörtte biridir.
- Göçme durumundaki en büyük şekil değiştirmeyi üç diyagonalli düzlem çerçeve modeli; en az şekil değiştirmeyi ise beş diyagonalli basınç çubuklu düzlem çerçeve sistemi yapmıştır. Mühendislik yaklaşımı açısından tekli, üçlü, beşli eşdeğer diyagonal çubuklu modellerin davranışlarının aynı olduğu kabul edilebilir.
- Model 1B ile gösterilen boş çerçevenin başlangıç yatay rijitliğinin 16 kN/mm; dolgu duvarlı çerçevelerin (Model 2B, 3B, 4B, 5B) yatay rijitliğinin 120 kN/ mm olduğu görülmüştür. Buna göre tek kat iki açıklıklı sistemde, dolgu duvar

etkisinin hesaba katıldığı modeller için bulunan çerçeve yatay rijitlik mertebesi, boş çerçeve sistemine göre 7.5 kat daha fazla bulunmuştur.

### İki Kat İki Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerinin Analiz Sonuçları Değerlendirmesi

- Model 1C’de gösterilen içerisinde dolgu duvarı olmayan boş düzlem çerçeve sisteminin elastik sınır şekil değiştirme mertebesinin 3.3 cm olduğu görülmüştür. Buna göre dolgu duvarlı çerçeve sistemini temsil eden diğer düzlem çerçeve modellerinin, boş çerçeveye göre elastik bölgede %60 mertebesinde daha az deplasman yapabildiği görülmüştür.
- Elastik bölgede, sınır taban kesme kuvveti değeri her iki düzlemsel dolgu duvarlı çerçeve modeli için yaklaşık olarak aynı mertebededir. Boş çerçeve modelinin elastik bölgedeki taban kesme kuvveti, dolgu duvarlı düzlem modellerindeki taban kesme kuvveti değerlerine göre yaklaşık beşte biridir.
- Göçme durumundaki en büyük şekil değiştirmeyi beşli diyagonal çubuklu çerçeve sistemi, en az şekil değiştirmeyi üçlü diyagonal basınç çubuklu düzlem çerçeve sistemi yapmıştır. Mühendislik yaklaşımı açısından tekli, üçlü, beşli eşdeğer diyagonal çubuklu modellerin davranışlarının aynı olduğu kabul edilebilir.
- Model 1C ile gösterilen boş çerçevenin başlangıç yatay rijitliğinin 6.5 kN/mm; dolgu duvarlı çerçevelerin (Model 2C, 3C, 4C, 5C) yatay rijitliğinin 58 kN/ mm olduğu görülmüştür. Buna göre iki kat iki açıklıklı sistemde, dolgu duvar etkisinin hesaba katıldığı modeller için bulunan çerçeve yatay rijitlik mertebesi, boş çerçeve sistemine göre 8.92 kat daha fazla bulunmuştur.
- Şekil 5.21’de düzlem çerçeve modellerinin elastik bölge için kat seviyeleri deplasman grafiği sunulmuştur. Buna göre dolgu duvarlı çerçeve sistemini temsil eden Model 2C, 3C, 4C ve 5C’nin kat seviyeleri elastik deplasman değerleri

mühendislik pratiği bakımından aynı alınabilir. Beklendiği üzere boş çerçeve sisteminin (Model 1C) elastik bölgedeki kat seviyeleri elastik deplasmanları mertebesi, dolgu duvarlı çerçeveleri temsil eden modellerinkine göre daha fazladır.

### Beş Kat Üç Açıklıklı Düzlem Çerçeve Modellerinin Analiz Sonuçları Değerlendirmesi

- Model 1D’de gösterilen içerisinde dolgu duvarı olmayan boş düzlem çerçeve sisteminin elastik sınır şekil değiştirme mertebesinin 10 cm olduğu görülmüştür. Buna göre dolgu duvarlı çerçeve sistemini temsil eden diğer düzlem çerçeve modellerinin, boş çerçeveye göre elastik bölgede %66 - %73 mertebelerinde daha az deplasman yapabildiği görülmüştür.
- Model 1D ile gösterilen boş çerçevenin başlangıç yatay rijitliğinin 4.1 kN/mm; dolgu duvarlı çerçevelerin (Model 2D, 3D, 4D, 5D) yatay rijitliğinin 45 kN/ mm olduğu görülmüştür. Buna göre beş kat üç açıklıklı sistemde, dolgu duvar etkisinin hesaba katıldığı modeller için bulunan çerçeve yatay rijitlik mertebesi, boş çerçeve sistemine göre 10.97 kat daha fazla bulunmuştur.
- Şekil 5.26’da düzlem çerçeve modellerinin elastik bölgede için kat seviyeleri yatay deplasman grafiği sunulmuştur. Buna göre dolgu duvarlı çerçeve sistemini temsil eden Model 2D, 3D, 4D ve 5D’nin kat seviyeleri elastik deplasman değerleri mühendislik pratiği bakımından aynı alınabilir. Beklendiği üzere boş çerçeve sisteminin (Model 1D) elastik bölgedeki kat seviyeleri elastik deplasmanları mertebesi, dolgu duvarlı çerçeveleri temsil eden modellerinkine göre daha fazladır.

### Genel Değerlendirmeler

- Dolgu duvarın olmadığı modelde, ilk plastik mafsallın kiriş elemanlarda olduğu görülmüştür. Dolgu duvarın üçlü ve beşli eşdeğer diyagonal basınç çubuğu ile

modellendiği örneklerde ise ilk plastik mafsallaşmanın dolgu duvar üzerinde meydana geldiği ve daha sonra yük mertebesinin artmasıyla birlikte plastik mafsalların sırasıyla kiriş ve kolon elemanlarda oluştuğu görülmüştür. Bu farklılık yapılar da dolgu duvar etkisiyle meydana gelen yapısal davranış değişiminin dikkate alınması için gerekli en önemli göstergesidir.

- Çerçeve tepe deplasmanlarının aynı olduğu durumda (boş çerçevenin dayanımını yitirdiği deplasman referans olarak alınmıştır); dolgu duvarların göz önüne alındığı çerçevelerde meydana gelen plastik mafsalların dönme değerleri, dolgu duvarların olmadığı çerçevelerde meydana gelen plastik mafsallara ait dönme değerlerine göre daha yüksek mertebededir. Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu adedinin artmasıyla birlikte, çerçevelerde oluşan plastik mafsal dönme değerlerinde kademeli olarak azalma görülmüştür. Çerçeve kesit ve dolgu duvar mafsal özelliklerinin aynı, çerçeve açıklık ve kat adedinin artırıldığı durumlarda (Bölüm 5.4 ve Bölüm 5.5), her bir çerçeve modeli için plastik mafsal dönmeleri kademeli olarak artış göstermiştir.
- Tez çalışmasındaki örneklerde, sonlu eleman ağ modeli için dolgu duvar ile çerçeve arasındaki yük aktarımını sağlayan ara yüz link elemanlarının rijitlik değerleri ile eşdeğer diyagonal basınç çubuğu aksenal rijitliğinin aynı mertebede alınmasıyla birlikte her iki model türü için artımsal statik eğrilerinin elastik bölgede çakıştığı görülmüştür.
- Tez çalışmasında statik itme eğrilerinin (pushover) elde edilmesinde kullanılan artımsal itme analizinin en önemli sakıncası, sadece birinci titreşim modunun dikkate alınması ve yüksek mod etkilerinin hesaplara yansıtılmamasıdır. Bu nedenle çok katlı yapıların dolgu duvarlar ile birlikte statik itme eğrileri elde edilirken diğer mod katkılarını da dikkate alan analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi gerekir.

Bu sonuçlara göre dolgu duvarların, boş çerçeveye sistemine göre analiz sonuçlarını önemli oranda değiştirdiği görülmektedir. Bu nedenle dolgu duvarların

yapı rijitliğini artırıcı yöndeki etkilerini ihmal eden çözüm yöntemleri, yapı analizi açısından yanıltıcı olabilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Al-Chaar,G. (2002). *Evaluating Strength and Stiffness of Unreinforced Masonry Infill Structures*. Construction Engineering Research Laboratory.
- Aliaari, M. ve Memari, A.M., (2004). *Analysis of Masonry Infilled Steel Frames with Seismic Isolator Subframes*.
- Amrhein, J.E.,(1992). *Reinforced Masonry Engineering Handbook*(5. Baskı), Los Angeles: Masonry Institute of America.
- Asteris, P.G (2008). *Finite Element Micro Modeling of Infilled Frames*.
- ASTM International (2004). *ASTM International's Masonry Standarts for the Buildings Industry* (5.Baskı). Philadelphia
- ATC 40 (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Reinforced Concrete Buildings, Applied Techlonogy Council, California*
- Atkinson, R.H, Noland, J.L ve Abrams, D.P., (1985). *A Deformation Failure Theory for Stack-Bond Brick Masonry Prisms in Compression*. Proceedings of the Seventh International Brick Masonry Conference
- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2007). *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*. 26454 Sayılı Resmi Gazate, Ankara.
- Bayülke, N. (2003). *Betonarme Yapının Dolgu Duvarı*. Türkiye Mühendislik Haberleri, 4, 426, 85-98.
- Bennett,R., Flanagan, R., Adham, S.,Fischer, W. ve Tenbus, M. (1996). *Evaluation and Analysis of the Performance of Masonry Infills During the Northridge Earthquake*. National Science Foundation.

- Beklen, C. (2009). *Binalarda Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana
- Crisafulli, F.J (1997). *Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills*. Doktora Tezi, Canterbury Üniversitesi
- Celep, Z. (2008). *Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme*. İstanbul.
- Dorji,J.(2009). *Seismic Performance of Brick Infilled RC Frame Structures in Low and Medium Rise Buildings in Bhutan*. Yüksek Lisans Tezi, Queensland University of Technology
- Doudoumis, I.N.,(2001). *A Mathematical Programming Incremental Formulation for Unilateral Frictional Contact Problems of Linear Elasticity*. Taylor & Francis Group, Selanik, Yunanistan
- Drysdale, R.G. ve Wong, H.E (1985). *Interpretation of the Compressive Strength of Masonry Prisms*. Proceedings of the Seventh International Brick Masonry Conference, Melbourne, Avustralya
- Durrani, A.J. ve Luo, Y.H.(1994). *Seismic Retrofit of Flat – Slab Buildings with Masonry Infills*. Proc.of the NCER Workshop on Seismic Response of Masonry Infills Tech. Report NCEER
- Dündar, E. (2006). *Çok Katlı Betonarme Yapılarda Bölme Duvarların Deprem Davranışına Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana
- Düzgün, M. (1988). *Dolgu Duvarlı Düzlemsel Çerçevelerin Farklı Yüklemeler Altındaki Davranışının Analizi için Yaklaşık Bir Hesap Yöntemi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir

- El-Dakhakhni, W., Elgaaly, M., ve Hamid, A. (2003). *Three-Strut Model for Concrete Masonry- Infilled Steel Frames*. Journal of Structural Engineering.
- Eurocode 8 (2004). *Design of Structures of Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2000). *Pre-Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA 356, Building Seismic Safety Council, Washington.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1989). *A handbook for Seismic Evaluation of Existing Buildings*, FEMA 178, Building Seismic Safety Council, Washington.
- Fiorato, A.E., Sozen, M.A. ve Gamble, W.L. (1970). *An Investigation of the Interaction of Reinforced Concrete Frames with Masonry Filler Walls*, Illinois Universitesi
- Flanagan, R.D., Tenbus, M.A. ve Bannet, R.M., (1994), *Numerical Modeling of Clay-Tile Infills*, Kalifornia
- Hamid, A.A ve Drysdale, R.G.(1982). *Effect of Strain Gradient on Tensile Strength of Concrete Blocks*, Masonry: Materials, Properties and Performance, ASTM STP 778
- Hendry,A.W. (1990). *Structural Masonry*, Macmillan Education Ltd., Londra
- Holmes, M. (1961). *Steel Frames with Brickwork and Concrete Infilling*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers.
- International Building Code (2003). *International Code Council*, Country Club Hills

- İrtem, E., Türker, K., Hasgöl, U. (2005). *Dolgu Duvarlarının Betonarme Bina Davranışına Etkisi*. ITÜ Dergisi, 4, 3-13.
- Karaduman, A. (2005). *Dolgu Duvarlı Çerçevelerin Yatay Yükler Altındaki Davranışları Üzerine Deneysel Bir Çalışma*. Mühendislik Bilimleri Dergisi, Pamukkale Üniversitesi, 11,3, 345 - 349.
- Kaushik, H.B., Rai D.C., Jain, S.K., (2008). *A Rational Approach to Analytical Modeling of Masonry Infills In Reinforced Concrete Frame Buildings*, The 14<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering, Pekin, Çin
- Klingner, R.E. ve Bertero, V.V. (1978). *Earthquake Resistance of Infilled Frames*
- Korkmaz, A. ve Uçar, T. (2006). *Betonarme Binaların Deprem Davranışında Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi*. 8, 101-108
- König, G. (1991). *The State of the Art in Earthquake Engineering Research, Experimental and Numerical Methods in Earthquake Engineering*
- Leuchars, J.M. ve Scrivener, J.C. (1976). *Masonry Infill Panels Subjected to Cyclic In-Plane Loading*
- Leuchars, J.M J.C. (1973). *Masonry Infill Panels*, Canterbury Üniversitesi
- Liau, T.C. ve Kwan, K.H. (1985). *Static and Cyclic Behaviours of Multistorey Infilled Frames with Different Interface Conditions*.
- Liau, T.C ve Kwan, K.H (1984). *Non-Linear Behaviour of Non-Integral Infilled Frames*.
- Mainstone, R.J. (1971). *On the Stiffness and Strengths of Infilled Frames*.

- Mallick, D.V. ve Severn, R.T. (1967). *The Behaviour of Infilled Frames Under Static Loading*.
- Mann, W. ve Muller, H. (1982). *Failure of Shear – Stress Masonry*, Proceedings of the Seventh International Brick and Block Masonry Conference, Melbourne, Avustralya.
- Moghaddam, H. ve Dowling, P. (1988). *Earthquake Resistant Design of Brick Infilled Frames*, Proceedings of the Eighth International Brick and Block Masonry Conference.
- Naraina, K. ve Sinha, S., (1989). *Loading and Unloading Stress- Strain Curves for Brick Masonry*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers.
- Page, A.W. (1992). *Modeling the In-Plane Behaviour of Solid Masonry Under Static Loading*.
- Papia, M., Cavaleri, L. ve Fossetti, M. (2003). *Infilled Frames: Developments in the Evaluation of the Stiffening Effect of Infills*.
- Papia, M., Cavaleri, L., Fossetti, M. ve Amato, G. (2009). An Updated Model of Equivalent Diagonal Strut for Infill Panels, *Palermo Üniversitesi*.
- Paulay, T. ve Priestley, M.J.N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. Amerika Birleşik Devletleri.
- Polyakov, S. (1956). *Masonry Infilled Framed Buildings (An Investigation into the Strength and Stiffness of Masonry Infilling)*. Rusya.
- Priestley, M.J.N., ve Calvi, G.M. (1991). *Towards a Capacity Design Assessment Procedure for Reinforced Concrete Frames*.

Sahlin, S. (1971). *Structural Masonry*. Prentice-Hall, New Jersey.

SAP2000 *Three Dimensional Static and Dynamic Finite Element Analysis and Design of Structure*. Computers and Structures Inc.2000. Berkeley, California.

Sayin, B., Kaplan, S.A. (2005). Deprem Etkisi Altındaki Betonarme Yapılarda Dolgu Duvarların Modelleme Teknikleri, *Deprem Sempozyumu, Kocaeli*.

Syrmakezis, C.A ve Vrantanou, V.Y. (1986). *Influence of Infill Walls to R.C Frames Response*, Yunanistan.

Stafford Smith, B. (1962). *Lateral Stiffness of Infilled Frames*.

Stafford Smith, B. ve Carter,C. (1969). *A Method of Analysis for Infilled Frames*.

Stafford Smith, B. (1962). *Methods for Predicting for Lateral Stiffness and Strength of Multi-Storey Infilled Frames*

Stafford Smith, B. Ve Riddington, J.R (1978). *The Design of Masonry Infilled Steel Frames for Bracing Structures*

Stafford Smith, B.ve Coull, A. (1991). *Infilled Framed Structures*.

TS500 (2000). *Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları*, Türk standartları Enstitüsü, Ankara

Tucker, C.J. (2007). *Predicting the In-Plane Capacity of Masonry Infilled Frames*, Doktora Tezi, Tennessee Technological University

Zarnic, R. ve Tomazevic, M. (1985). *Study of the Behaviour of Masonry Infilled Reinforced Concrete Frames Subjected to Seismic Loading*, Melbourne

Zarnic, R. Ve Tomazevic, M. (1994). *Modeling of Response of Masonry Infilled Frames*, Viyana