



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOLGU DUVARLI ÇERÇEVELERİN DAVRANIŞININ ANALİTİK VE  
SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

**Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU**

Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2015

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**03/02/2015**

**Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DOLGU DUVARLI ÇERÇEVELERİN DAVRANIŞININ ANALİTİK VE SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

**Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman: Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN**

Ülkemizdeki yönetmelik ve standartlara göre yapılan hesaplarda dolgu duvarlar halen sadece yük olarak dikkate alınmakta, diğer etkileri ihmal edilmektedir. Bu çalışmanın amacı, tuğla ve gazbeton dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin davranışını, analitik ve sayısal yöntemleri kullanarak irdelemektir.

Bu amaçla gerçekleştirilen çalışma 7 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm giriş bölümü olup; ikinci bölümde, duvarların modellenmesinde kullanılan makro ve mikro modeller, duvarlarda oluşan göçme biçimleri ve duvarların yapı davranışına etkileri gibi genel bilgiler sunulmaktadır. Üçüncü bölümde normal ve güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçeveler konusunda daha önce yapılan çalışmalar irdelenmektedir. Dördüncü bölümde çalışmanın amacı ve kapsamı verilmektedir. Beşinci bölüm yapılan çalışmalar bölümü olup, malzeme modelleri, dikkate alınan çerçeve sistemi, elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında kullanılacak deneysel çalışma ve oluşturulan modeller bu bölümde açıklanmaktadır. Altıncı bölümde analitik ve sayısal modellerin etkinliği, dolgu duvarın çerçevenin rijitlik ve dayanımı üzerindeki etkileri irdelenmektedir. Yedinci bölüm sonuç ve öneriler bölümü olup, bu bölümü kaynaklar listesi izlemektedir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, dolgu duvar çerçeve arasında kullanılan boyutsuz kohezyonlu davranış modelinin, duvar ile çerçeve arasındaki teması ve dolgu duvarlı çerçeve davranışını temsil ettiği belirtilebilir. Dolgu duvarın davranışını idealleştirmek için kullanılan tek, iki ve üç eşdeğer çubuklu modellerden üç çubuklu modelin, dolgu duvarlı çerçevenin başlangıç rijitliğine en yakın sonuçları verdiği anlaşılmıştır. Tuğla dolgu duvarın, çatlak oluşana kadar çerçevenin başlangıç rijitliğine önemli katkı sağladığı, gazbeton dolgu duvarın ise dayanım artışı tuğla duvar kadar olmasa da çatlak oluşuktan sonra da çerçeve dayanımına katkı vermeye devam ettiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Dolgu duvar, Betonarme, Sonlu elemanlar, Eşdeğer çubuk

**2015, x+114 sayfa**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **INVESTIGATION OF BEHAVIOR OF FRAMES WITH INFILL WALLS USING ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS**

**Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU**

Uludağ University  
Graduate School of Natural Science and Applied Science  
Department of Civil Engineering

**Supervisor: Professor Adem DOĞANGÜN**

Infill walls are still considered only as loads in calculations according to codes and standards in our country and other effects are neglected. The object of this study is to scrutinize the behavior of brick and gas concrete infilled reinforced concrete frames using analytical and numerical methods.

For this aim, performed study consist of 7 chapters. The first chapter is introduction while in the second chapter, macro and micro models used in modeling of the walls, failure types developed in the walls and effects of walls to the behavior of the structure are presented. In the third chapter, the earlier studies on frames with normal and strengthened infill walls are investigated. The aim and scope of the study is given in the fourth chapter. In the fifth chapter, the committed study are represented and material models, frame system considered, comparison between experimental and obtained results, created models are explained in details. In the sixth chapter, the effectiveness of analytical and numerical and the influences of infill wall on the rigidity and strength of the frame is intellectualized. The conclusion and recommendation is the seventh chapter and resources chapter go after it.

As a result of studies, surface based cohesive behavior model used between infill wall and frame can be pointed out to represent the behavior of the masonry infilled reinforced concrete frame. One, two and three equivalent strut models are used to idealize the behavior of infill walls and it is clearly understood that three strut model gives the closest results to the initial elasticity modulus of the masonry infilled frame. It is seen that brick infill wall has a significant contribution on to the initial rigidity of the frame until crack initiation. On the other hand, although the contribution of the Gas concrete wall on the strength is not as brick infill wall, it is seen that gas concrete wall keep contribute to the strength even after crack occurred.

**Key Words:** Infill wall, Reinforced concrete, Finite element, Equivalent strut

**2015, x+114 pages**

## TEŞEKKÜR

Engin bilgileriyle tez çalıőmamın yürütülmesinde önemli etken olan ve akademik hayatımın başlangıcında mesleğimi sevmemde önde giden sebeplerden biri olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN'e gösterdiği her türlü ilgi, destek ve anlayış için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalıőmam süresince, bana değerli vaktini ayıran ve her konuda desteğini aldığım, tez çalıőmamın şekillenmesinde büyük emeği geçen, yaptığı değerli öneriler, gösterdiği yakın ilgi ve verdiği destek için Sayın Doç. Dr. Ramazan LİVAOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan ve maddi, manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

**Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Giriş.....	4
2.2. Makro Modeller.....	5
2.2.1. Diyagonal Çubuk Modeli.....	5
2.2.1.1. Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Yanal Rijitlik ve Etkili Genişlik.....	6
2.2.1.2. Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Temas Mesafesi.....	14
2.2.1.3. Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Yanal Dayanım.....	16
2.3. Mikro Modeller.....	18
2.3.1. Çerçevenin Modellenmesi.....	18
2.3.2. Dolgu Duvar Panelinin Modellenmesi.....	19
2.3.3. Duvar Çerçeve Etkileşiminin Modellenmesi.....	21
2.4. Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Oluşan Göçme Türleri.....	23
2.5. Dolgu Duvarların Yapı Davranışı Üzerinde Etkileri.....	28
2.5.1. Burulma Etkisi.....	29
2.5.2. Yumuşak Kat Etkisi.....	31
2.5.3. Zayıf Kat Etkisi.....	32
2.5.4. Kısa Kolon Etkisi.....	34
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	37
3.1. Dolgu duvarlı çerçeveler ile ilgili çalışmalar.....	37
3.2. Güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçeveler ile ilgili çalışmalar.....	45
4. ÇALIŞMANIN AMACI ve KAPSAMI.....	48
5. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	49
5.1. Malzeme Modelleri.....	49
5.1.1 Beton ve Donatı Modeli.....	49
5.1.2 Dolgu Duvar Modeli.....	54
5.1.3 Çerçeve-Duvar Etkileşim Modeli.....	55
5.1.4 Modelin Kalibrasyonu.....	56
5.2. Çerçeve Sistemi.....	58
5.3. Deney Düzeneği.....	61
5.3.1. Eşdeğer Dinamik Yükleme.....	62
5.3.2. Modal Analiz.....	64
5.4. Oluşturulan Modeller ve Bunların Uygulanması.....	67
6. BULGULAR ve İRDELEMELER.....	71
6.1. Sayısal Modellerin Etkinliğinin İrdelenmesi.....	71
6.1.1. Eşdeğer Dinamik Yükleme Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	72
6.1.2. Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması.....	84
6.2. Analitik Modellerin Etkinliğinin İrdelenmesi.....	88
6.2.1. Eşdeğer Dinamik Yükleme Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	88
6.3. Dolgu Duvarın Rijitlik ve Dayanım Üzerindeki Etkisi.....	102

7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	105
KAYNAKLAR .....	107
ÖZGEÇMİŞ .....	113

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$A_c$	: Kolon- dolgu duvar temas gerilmesi
$A_b$	: Kiriş- dolgu duvar temas gerilmesi
$A_d$	: Eşdeğer basınç çaprazının enkesit alanı
$A_w$	: Kolon enkesit etkin gövde alanı
$d_m$	: Eşdeğer basınç çubuğu uzunluğu
$E_m$	: Dolgu duvar elastisite modülü
$E_c$	: Beton elastisite modülü
$E_d$	: Eşdeğer çubuk elastisite modülü
$f_a$	: Duvar orta bölgesinde izin verilebilen gerilme
$f_{cd}$	: Betonun hesap dayanımını
$f'_h$	: Harç basınç dayanımı
$f'_m$	: Tekil tuğla basınç dayanımı
$f_m$	: Etkin duvar basınç dayanımı
$f_{ct}$	: Dolgu duvarın efektif basınç dayanımı
$f_s(t)$	: Eşdeğer statik kuvvet
$h$	: Kiriş aksları arasında kalan kolon yüksekliği
$h'$	: Dolgu duvar yüksekliği
$I$	: Atalet momenti
$I_c$	: Kolon eylemsizlik momenti
$I_{eff}$	: Çapraz basınç gerilmesi
$K_0$	: Duvarın başlangıç rijitliği
$k$	: Yapının rijitliği
$k_m$	: Eşdeğer basınç çubuğunun eksenel rijitliği
$l$	: Kolon aksları arasında kalan kiriş boyu
$l'$	: Dolgu duvar boyu
$m$	: Kütle
$M_a$	: Kolon alt ucundaki kapasite momenti
$M_{\bar{u}}$	: Kolon üst ucundaki kapasite momenti
$M_{ra}$	: Kolon alt ucundaki taşıma gücü momenti
$M_{r\bar{u}}$	: Kolon üst ucundaki taşıma gücü momenti
$M_{cr}$	: Çatlama momenti
$M_y$	: Akma momenti
$M_u$	: Nihai moment
$M_{pc}$	: Kolon plastik moment taşıma gücü
$M_{pb}$	: Kiriş plastik moment taşıma gücü
$M_{pj}$	: Düğüm noktası plastik moment taşıma gücü
$R_c$	: Basınç kırılmasını meydana getirebilmek için gereken diyagonal kuvvet
$r$	: Dolgu duvar en/boy oranı
$t$	: Duvar kalınlığı
$U_m$	: $V_m$ en büyük duvar taşıma yüküne karşılık gelen yer değiştirme
$u(t)$	: Zamana bağlı yer değiştirme
$V$	: Kesme Kuvveti
$V_c$	: Kırılmanın oluştuğu andaki kesme kuvveti
$V_m$	: Duvarın en büyük taşıma gücü



$V_r$	: Kolon kesitinin kesme dayanımı
$V_s$	: Kayma kırılmasını başlatan kesme kuvveti
$V_t$	: Diyagonal çatlağın oluştuğu andaki kesme kuvveti
$V_y$	: Duvar davranış modelinde doğrusal bölge sınırı
$w$	: Eşdeğer basınç çubuğu genişliği
$Z_h$	: Kolon duvar yüzeyinde normalize edilmiş temas uzunluğu
$Z_l$	: Kiriş duvar yüzeyinde normalize edilmiş temas uzunluğu
$Z$	: Dolgu duvar ile kolon arasındaki temas uzunluğu
$Z_u$	: Sargısız beton $\sigma$ - $\varepsilon$ eğrisinin doğrusal bölümünün boyutsuz eğimi
$Z_c$	: Sargılı beton $\sigma$ - $\varepsilon$ eğrisinin doğrusal bölümünün boyutsuz eğimi
$\sigma$	: Gerilme
$\varepsilon$	: Şekil değiştirme
$\theta$	: Dolgu duvar köşegen açısı
$\theta'$	: Eşdeğer basınç çubuğunun yatayla yaptığı açı
$\mu_f$	: Duvar çerçeve arası yüzeyde oluşan sürtünme katsayısı
$\varepsilon'_m$	: Duvar en büyük basınç dayanımına karşılık gelen şekil değiştirme
$\sigma_{c0}$	: Kolon-dolgu duvar arası yüzeyde oluşan gerilme üst sınırı
$\sigma_{b0}$	: Kiriş -dolgu duvar arası yüzeyde oluşan gerilme üst sınırı
$\sigma_c$	: Kolon-dolgu duvar gerçek temas gerilmesi
$\sigma_b$	: Kiriş -dolgu duvar gerçek temas gerilmesi
$\tau_c$	: Kolon-dolgu duvar kayma gerilmesi
$\tau_b$	: Kiriş -dolgu duvar kayma gerilmesi
$v$	: Dolgu duvarın kayma dayanımı
$\alpha$	: Pekleşme bölgesi rijitlik oranı
$\lambda_h$	: Dolgu duvarın yanal rijitliği
$\tau_0$	: Başlangıç kayma dayanımı
$\mu$	: Sürtünme katsayısı
$v$	: Dolgu duvarın kayma dayanımı
$f_c$	: Sargısız betonun basınç dayanımı (Genelde $f_c=f_{ck}$ alınır.)
$f_{cc}$	: Sargılı beton dayanımı $f_{cc} = f_{cl} = K f_c$
$\varepsilon_{coc}$	: Sargılı betonda maksimum gerilme altındaki birim şekil değiştirme
$\varepsilon_{co}$	: Sargısız betonda maksimum gerilme altındaki birim şekil değiştirme
$b_k$	: Etriye dışından etriye dışına ölçülen çekirdek beton alanının küçük boyutu (mm)
$h_k$	: Etriye dışından etriye dışına ölçülen çekirdek beton alanını büyük boyutu (mm)
$\rho_s$	: Sargı donatısının hacimsel oranı
$\sigma_c$	: Beton basınç gerilmesi
$\varepsilon_c$	: Beton birim şekil değiştirmesi
$\varepsilon_{cu}$	: Sargısız beton için en büyük birim şekil değiştirme
$\varepsilon_{20c}$	: Sargılı beton için 0.2 $f_{cc}$ gerilme değerine karşılık gelen birim şekil değiştirme
$A_o$	: Sargı donatısı kesit alanı (mm <sup>2</sup> )
$l_s$	: Kesitteki sargı donatısı ve çirozların toplam uzunluğu (mm)
$f_{ywk}$	: Sargı donatısının minimum akma dayanımı (MPa)
$s$	: Sargı donatısı aralığı (mm)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1.	Dolgu duvarlı çerçeveler ile ilgili yapılan makale sayısı (Anonim 2014)...	4
Şekil 2.2.	Dolgu duvarlı çerçeveler için eşdeğer basınç çubuğu modeli .....	6
Şekil 2.3.	Etkili genişliğin $\lambda_h h$ değerine bağlı olarak değişimi (Smith 1967).....	7
Şekil 2.4.	Diyagonal çubuğun etkili genişliği .....	8
Şekil 2.5.	Etkili genişlik boyunca gerilme dağılımı (Kadir 1974).....	9
Şekil 2.6.	w/d oranının $\lambda_h$ parametresine bağlı olarak değişimi .....	10
Şekil 2.7.	Diyagonal çubuğun etkili genişliğinin değişimi (Mosalam ve ark. 1997).	11
Şekil 2.8.	Farklı diyagonal çubuk modeli ve çoklu çubuk modeli.....	12
Şekil 2.9.	Altı çubuklu modelleme yöntemi (Chrysostomou ve ark. 1992).....	12
Şekil 2.10.	Dolgulu çelik çerçeve için önerilen model (El-Dakhkhni ve ark. 2003) .	13
Şekil 2.11.	İki çubuklu model (Crisafulli ve Carr 2007) .....	14
Şekil 2.12.	Yanal rijitlik katsayısına ( $\lambda h$ ) bağlı temas mesafesinin (z) değişimi (Smith 1967) .....	15
Şekil 2.13.	Duvar çerçeve etkileşimi (a) Smith 1967 (b) Saneinejad ve Hoobs 1995 .	16
Şekil 2.14.	Yığma yapı modelleme yöntemleri (a) makro modelleme, (b) basitleştirilmiş mikro modelleme ve (c) mikro modelleme (Lourenço 2002) .....	20
Şekil 2.15.	Çerçeve-duvar arayüz elamanları: (a) yay eleman, (b) arayüz eleman.....	22
Şekil 2.16.	CC ve DC kırılma türleri (Asteris ve ark. 2011A).....	24
Şekil 2.17.	SS, FF ve DK kırılma türleri (Asteris ve ark. 2011A).....	25
Şekil 2.18.	Dolgu duvarlı çerçevelerde göçme türleri (Mehrabi ve ark. 1994) .....	27
Şekil 2.19.	Duvarda meydana gelen eğilme çatlakları (Crisafulli 1997).....	27
Şekil 2.20.	Donatı sıyrılması hasarı (Crisafulli 1997) .....	28
Şekil 2.21.	Kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarı (Crisafulli 1997).....	28
Şekil 2.22.	(a) Deprem yüklerinin kütle merkezine etkimesi (b) Rijitlik merkezi etrafında dönmesi ve (c) İki merkezin çakışması durumu ( Doğangün 2014) .....	29
Şekil 2.23.	Döşemenin rijit diyafram olarak çalıştığı durumda burulma.....	30
Şekil 2.24.	(DBYBHY 2007).....	30
Şekil 2.24.	Yumuşak kat düzensizliğinden dolayı yıkılan binalar (Anonim 2011) ....	32
Şekil 2.25.	Kolon veya Perde etkin gövde alanının belirlenmesi (Doğangün 2014) ...	33
Şekil 2.26.	Zayıf kat olan binalarda oluşan hasarlar .....	34
Şekil 2.27.	Kısa kolon hasarları (Topçu 2014) .....	35
Şekil 2.28.	Kısa kolon oluşumunu engellemek için alınabilecek önlemler (Doğangün 2014) .....	35
Şekil 2.29.	Kısa kolonların oluşumu (DBYBHY 2007) .....	36
Şekil 5.1.	Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Popovics 1973).....	50
Şekil 5.2.	Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Saenz 1964).....	51
Şekil 5.3.	Thompson ve Park Modeli.....	52
Şekil 5.4.	Kullanılan beton malzeme modellerinin karşılaştırılması .....	53
Şekil 5.5.	CDP modelinde kullanılan gerilme-şekil değiştirme ilişkisi .....	57
Şekil 5.6.	Deney çerçevelerinin boyut ve donatı detayları .....	59
Şekil 5.7.	Çerçeve kolonlarında kullanılan çelik kalıbın detayları .....	59
Şekil 5.8.	Çerçeve kirişinde kullanılan çelik kalıbın detayları .....	60
Şekil 5.9.	Çerçeve temelinde kullanılan çelik kalıbın detayları-1 .....	60
Şekil 5.10.	Çerçeve temelinde kullanılan çelik kalıbın detayları-2 .....	61

Şekil 5.11.	Düzlem içi yüklenen çerçevelerin deney anından bir görünüm .....	62
Şekil 5.12.	Deneylerde kullanılan yer değiştirme genlikleri.....	62
Şekil 5.13.	Konsol yapı (a) Statik yük (b) Dinamik Yük.....	63
Şekil 5.14.	Operasyonel modal analiz yapılırken farklı görünümeler .....	66
Şekil 5.15.	KB12VD Piezoelektrik ivmeölçer .....	67
Şekil 5.16.	(a)Quattro dört kanallı veri toplama ünitesi (b) 30-250 N arasında yük uygulayabilen sarsıcı.....	67
Şekil 5.17.	Yapılan modeller ve üç boyutlu görünümüleri .....	70
Şekil 6.1.	Ayrılmadan önce gazbeton duvarda meydana gelen gerilme dağılımı.....	72
Şekil 6.2.	Gazbeton duvarda meydana gelen maksimum asal gerilmeler 1.....	73
Şekil 6.3.	Gazbeton duvarda meydana gelen maksimum asal gerilmeler 2.....	73
Şekil 6.4.	Gazbeton duvarlı çerçevede meydana gelen plastik mafsallar .....	74
Şekil 6.5.	Gazbeton çerçeve deney sonucundan bir görünüm .....	74
Şekil 6.6.	Gazbeton duvarlı çerçeve deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması .	75
Şekil 6.7.	Ayrılmadan önce tuğla duvarda meydana gelen gerilme dağılımı .....	76
Şekil 6.8.	Tuğla duvarda meydana gelen maksimum asal gerilmeler 1 .....	76
Şekil 6.9.	Tuğla duvarda meydana gelen maksimum asal gerilmeler 2.....	77
Şekil 6.10.	Tuğla duvarlı çerçevede meydana gelen plastik mafsallar .....	77
Şekil 6.11.	Tuğla çerçeve deney sonucundan bir görünüm .....	78
Şekil 6.12.	Tuğla duvarlı çerçeve deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması .....	79
Şekil 6.13.	Gazbeton çerçevede kullanılan boş çerçeve için elastik sonuçlar .....	81
Şekil 6.14.	Gazbeton duvarlı çerçeve için elastik sonuçların karşılaştırılması.....	82
Şekil 6.15.	Tuğla çerçevede kullanılan boş çerçeve için elastik sonuçlar .....	83
Şekil 6.16.	Tuğla duvarlı çerçeve için elastik sonuçların karşılaştırılması.....	84
Şekil 6.17.	İmalatın farklı aşamaları için yapılan zorlanmış testlerden görünümeler 1	85
Şekil 6.18.	İmalatın farklı aşamaları için yapılan zorlanmış testlerden görünümeler 2	85
Şekil 6.19.	Gazbeton duvarlı çerçeve modal analiz sonuçları .....	87
Şekil 6.20.	Tuğla duvarlı çerçeve modal analiz sonuçları .....	87
Şekil 6.21.	Tek çubuklu gazbeton çerçeve (TGÇP) analitik model sonuçları .....	90
Şekil 6.22.	Tek çubuklu gazbeton çerçeve (TGÇP) modellerin karşılaştırılması.....	91
Şekil 6.23.	Tek çubuklu tuğla çerçeve (TTÇP) analitik model sonuçları .....	92
Şekil 6.24.	Tek çubuklu tuğla çerçeve (TTÇP) modellerin karşılaştırılması.....	93
Şekil 6.25.	İki çubuklu gazbeton çerçeve (İGÇP) analitik model sonuçları .....	94
Şekil 6.26.	İki çubuklu gazbeton (İGÇP) çerçeve analitik modelin karşılaştırılması..	95
Şekil 6.27.	İki çubuklu tuğla çerçeve (İTÇP) analitik model sonuçları .....	96
Şekil 6.28.	İki çubuklu tuğla çerçeve (İTÇP) analitik modellerin karşılaştırılması.....	97
Şekil 6.29.	Üç çubuklu gazbeton çerçeve (ÜGÇP) analitik model sonuçları .....	98
Şekil 6.30.	Üç çubuklu gazbeton çerçeve (ÜGÇP) analitik modelin karşılaştırılması	99
Şekil 6.31.	Üç çubuklu tuğla çerçeve (ÜTÇP) analitik model sonuçları .....	100
Şekil 6.32.	Üç çubuklu tuğla çerçeve (ÜTÇP) analitik modelin karşılaştırılması .....	101
Şekil 6.33.	Gazbeton çerçeve ve boş çerçeve analizlerinin karşılaştırılması.....	103
Şekil 6.34.	Tuğla çerçeve ve boş çerçeven analizlerinin karşılaştırılması.....	104

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Dolgu duvarlı betonarme çerçeveler için modellerin avantaj ve dezavantajları (Asteris ve ark. 2013) .....	23
Çizelge 5.1. Duvar için Concrete Damage Plasticity malzeme modeli parametreleri ...	57
Çizelge 5.2. Betonarme çerçeve için kullanılan malzeme özellikleri .....	58
Çizelge 5.3. KB12VD Piezoelektrik ivmeölçer teknik özellikleri.....	66
Çizelge 5.4. Modellenen dolgu duvar ve çerçeve modelleri.....	69
Çizelge 6.1. Elastik analizler için kullanılan malzeme özellikleri.....	80
Çizelge 6.2. Çubuklar için kullanılan malzeme ve geometrik özellikler.....	89
Çizelge 6.3. Çubuklu modellerden elde edilen sonuçlar.....	102

## 1.GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyanın genelinde, betonarme çerçevesi yapılarında dolgu duvarlar, genellikle yapı elemanları arasında kalan boşlukları doldurmak, diğer bir ifadeyle farklı yaşam alanları meydana getirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolgu duvarlar mimari ihtiyaçlara göre farklı boyutlarda olabilir ve farklı malzemelerden oluşturulabilirler. Günümüzde en çok kullanılan malzemeler tuğla, delikli tuğla, briket ve gazbeton olarak adlandırılan hava boşluklu hafif beton bloktur. Dolgu duvarlar boşluksuz olabileceği gibi kullanım yerine göre kapı veya pencere boşluklu da olabilmektedir. Dolgu duvarlı çerçeveler, özellikle deprem yüklerine maruz kaldıklarında, boş çerçeveye oranla genel olarak daha iyi bir davranış sergilemektedir.

Betonarme yapılarında kullanılan dolgu duvarlar, bir taşıyıcı yapı elemanı olarak dikkate alınmayıp, daha çok kalıcı (sabit) yük olarak hesaplara katılmakta ve yapısal özellikleri ihmal edilmektedir. Ancak literatürde verilen birçok çalışma sonucuna göre, dolgu duvarların yapı yatay yük taşıma kapasiteleri üzerinde önemli mertebede etkin oldukları bilinmektedir. Bu nedenle, söz konusu etkiyi özellikle deprem davranışı açısından olumlu yöne taşıyacak şekilde yapı tasarımı yapmak gerekliliği açıktır. Taşıyıcı eleman olarak dikkate alınmasalar da, çerçeve ile dolgu duvar arasında etkileşimin meydana geldiği açıktır. Tasarıma bağlı olarak bu etkileşim yapının performansını olumlu ya da olumsuz yönde etkileyebilmektedir. FEMA-178 (1989), deprem yüklerine maruz kalan dolgu duvarların davranışını “perde duvar” davranışına benzetmektedir. Yani dolgu duvarlar perde duvarlar gibi taşıma yüklerine ulaşıncaya kadar yatay yük taşırlar. Perde duvarın dolgu duvardan farkı ise düşey ve yatay yüklere karşı yapısal bir eleman olarak çalışması ve aynı zamanda nispeten daha sünek bir davranış sergilemesidir. Uygun bir şekilde yapılan dolgu duvarların yapıya özellikle rijitlik ve dayanım açısından fayda sağladığı belirtilebilir.

Yapılan deneysel ve kuramsal çalışmalar, dolgu duvarların; rijitlik, dayanım ve süneklik (önemli bir dayanım kaybı olmaksızın şekil değiştirmeye devam etmesi) dikkate alındığında, taşıyıcı sistemin performansını ve davranışını etkilemesi beklenir. Dolgu duvarların, en bilinen etkileri, yapının kütesini ve rijitliğini arttırmasıdır. Kütesi artan

yapı depreme maruz kaldığında, periyodu, kütle merkezi değiştiğinden dolgu duvarsız sisteme göre farklı olacak ve bu durum, hesaplarda dikkate alınmadığından gerçekte oluşan davranış dikkate alınmamış olacaktır. Aynı zamanda duvarlar yapı rijitlik merkezinin başlangıç konumunu da etkilemektedir. Dolayısıyla planda simetrik olarak yerleştirilmeyen dolgu duvarlar, yapının kütle ve rijitlik merkezleri arasında önemli farklılık oluşmasına ve yapıda burulma momentinin meydana gelmesine de sebep olabilirler (Bayülke 2003).

Deprem sonrası yapılan hasar tespit çalışmalarında ve yanlış uygulamalardan dolayı yapıda meydana gelen hasarlar incelendiğinde, dolgu duvarların özellikle giriş katlarda az kullanılması ya da kullanılmaması sonucunda yumuşak kat oluştuğu gözlenmiştir. Buna ek olarak, bodrum kat aydınlatmaları için duvarlar arasındaki bant pencerelerin kısa kolon oluşturduğu da bilinmektedir. Kısa kolonda meydana gelen kesme kuvveti, hesaplarda dikkate alınan kesme kuvvetinden daha büyük olmakta ve bu yüzden kolonda kesme kırılması meydana gelmektedir. Söz konusu bu uygulama bir taraftan bölme duvarın çerçeve rijitliği üzerindeki etkisini kanıtlarken, diğer taraftan da dolgu duvar düzenlemelerinin yapı davranışı üzerindeki olumsuz etkisini de ortaya koymaktadır.

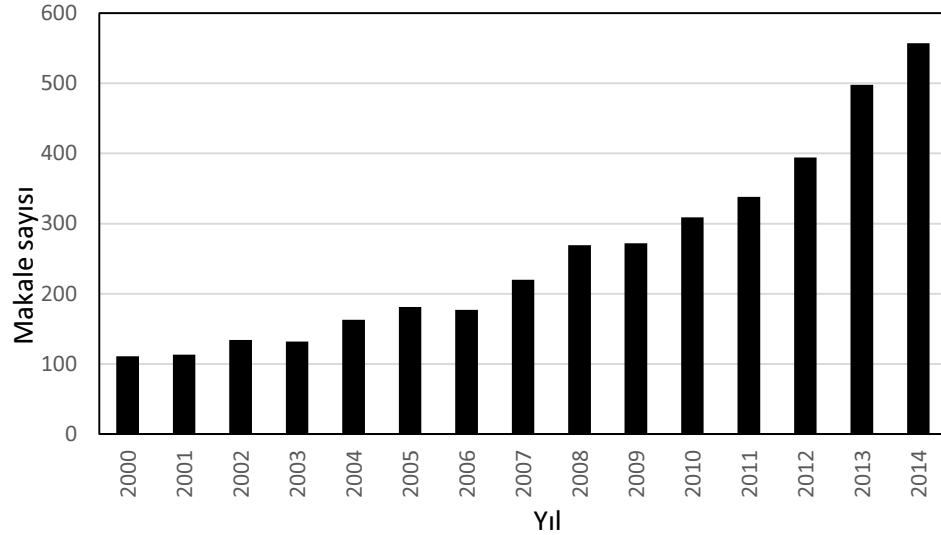
Genel manada dolgu duvarlı yapıların sismik davranışı düşünöldüğünde, yapı sistemi maruz kaldığı yer hareketine taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan tüm elemanların tepkisi ile karşı koymaktadır. Bölme duvarların yapı sistemi içerisinde düzgün bir şekilde yerleştirilmiş olması, yapı yatay rijitliğini önemli bir mertebede arttırabilmekte bununla beraber düşey yük taşıma kapasitesini de daha üst noktalara çıkarabilmektedir. Ancak düşük dayanıma sahip gevrek malzemelerin dolgu duvarlar için kullanılması durumunda, tekrarlı yatay yükler etkisi altında meydana gelen söz konusu kapasite artımı duvarların dayanımlarını başlangıçta kaybetmesi sonucunda gerçekleşmeyecektir. Bu durumda sistem dayanımı; sadece çerçeve sistem veya çerçeve-perde sistem taşıyıcı elemanların dayanımlarından oluşacaktır. Tüm bu gerekçelerden de anlaşılabilceği üzere, dolgu duvarların dayanım, rijitlik, sönüm gibi özelliklerinin çatlaklar oluşmaya başladıktan hemen sonra ciddi oranlarda azalması, duvarların katkısını azaltmaktadır. Oysa dolgu duvar başlangıçta devre dışı kalmasa, çerçeveye katkı vermeye devam edecektir.

Bu çalışmada; tuğla ve gazbeton dolgu duvarların betonarme çerçeve davranışı üzerindeki etkileri; sayısal ve analitik ve sonlu elemanlar yöntemleriyle incelenmiştir. Sayısal modellemede dolgu duvar, çerçeve ve duvar-çerçeve arayüzeyi sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Çerçeve ve dolgu duvar modellenirken homojen malzeme kabul edilmiştir. Analitik modelde dolgu duvar; literatürde mevcut olan tek, iki ve üç çubuklu yaklaşımlarla modellenmiştir. Çubukların modellenmesi için gereken çubuk genişliği ( $w$ ), temas mesafesi ( $z$ ), rijitlik katsayısı ( $\lambda_h$ ) gibi parametreler literatürde mevcut olan yöntem sonuçlarına göre dikkate alınmıştır. Bu modellerin kalibrasyonu için daha önce dolgu duvarlı ve duvarsız betonarme çerçeveler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen sayısal modellerden elde edilen sonuçlar irdelenmekte ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Ayrıca, dolgu duvarın çerçevenin davranışına nasıl bir etki yaptığı, çerçevenin rijitlik, dayanım ve süneklik gibi parametrelerini nasıl etkilediği incelenmektedir. Bunlara ek olarak, duvarı idealleştirmek için kullanılan tek, iki ve üç çubuklu analitik modellerin duvarın davranışını, duvarın çerçeve üzerindeki etkilerini ve duvar ile çerçeve arasındaki etkileşim de dikkate alındığında tüm sistemin davranışını ne ölçüde yansıttığı karşılaştırmalı olarak açıklanmaktadır.

## 2.GENEL BİLGİLER

### 2.1.Giriş

Dünya genelinde meydana gelen depremlerde dolgu duvarlarda meydana gelen göçmeler nedeniyle birçok bina hasar görmüş ve birçok insan yaralanmış ya da yalnızca bu hasarlar nedeniyle hayatını kaybetmiştir. Bunlara en temel örnek olarak kalkan duvar hasarları gösterilebilir. Bunlara ek olarak dolgu duvarlarda meydana gelen önemli hasar düzeyleri nedeniyle yapılarda göçmeler dahi görülmüştür. Tüm bu nedenlerden dolayı, son on beş yılda dolgu duvarların yapının performansına nasıl bir etki yaptığı üzerine yapılan çalışmalarda önemli bir artış görülmektedir (Şekil 2.1).



**Şekil 2.1.** Dolgu duvarlı çerçeveler ile ilgili yapılan makale sayısı (Anonim 2014)

Dolgu duvarlı çerçeveler üzerinde 1950’li yıllardan itibaren kapsamlı deneysel (Polyakov 1960, Smith 1962, 1966, Fiorato ve ark 1970, Mainstone 1971, Zarnic ve Tomazevic 1988, Mehrabi ve ark. 1996) ve analitik çalışmalar (Liau ve Kwan 1984, 1985, Saneinejad ve Hoobs 1995, Mehrabi ve Shing 1997, Asteris 1996, 2003) yapılmıştır. Dolgu duvarların; çerçevenin rijitlik, süneklik ve dayanım gibi parametrelerine önemli bir katkı sağlamalarına rağmen, bu katkı, dolgu duvarlı çerçeve davranışının karmaşık olması dolayısıyla genellikle göz ardı edilmektedir. Hâlbuki tüm bu araştırmalardan dolgu duvar ile çerçeve arasında bir etkileşim olduğu literatürde bilinen bir gerçektir.



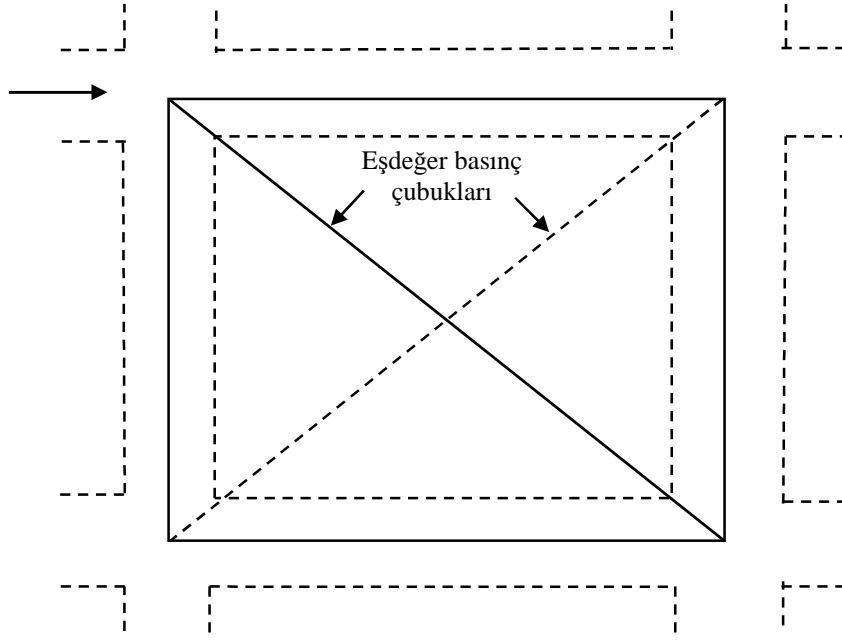
1950'li yıllardan beri dolgu duvarlı çerçevelerin davranışını idealleştirmek için farklı analitik yaklaşımlar önerilmiştir. Kolaylık açısından bu modellemeleri iki farklı grupta toplamak mümkündür: Yerel/mikro-modeller ve basitleştirilmiş/makro modeller. Birinci yöntemde yapının birçok küçük elemana bölünerek bu elemanların mekanik özellikleri davranışı temsil etmek için detaylı bir biçimde ele alınmaktayken, ikinci yöntemde ise dolgu duvarın davranışını fiziksel olarak anlamak için yapılan basitleştirilmiş çalışmalar yer almaktadır. Diğer bir ifadeyle mikro-modeller olabilecek bütün yerel bölgelerdeki göçme durumlarını da göz önüne alarak, yapı elemanlarının davranışını detaylı bir şekilde incelerken, basitleştirilmiş veya makro-modeller bütün göçme durumlarını daha büyük ölçekteki yapıların daha çok bir bütün olarak nasıl davrandığını belirlemeye yönelik bir teknik olarak kullanılmaktadır.

## **2.2.Makro-Modeller**

Dolgu duvarlı çerçeve sistemlerinin araştırmacılar tarafından çalışılmaya başlandığı zamandan bugüne kadar öne çıkan birkaç farklı model olmasına rağmen, bu çalışmada doğruluğu birçok araştırmacı tarafından ispatlanan eşdeğer diyagonal basınç çubuk modeli ele alınacaktır. Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin makro modellenmesi ile ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalar Asteris ve ark. (2011B) tarafından derlenmiştir.

### **2.2.1.Diyagonal Çubuk Modeli**

Dolgu duvarlı çerçeveli sistemlerin karmaşık davranışını anlamak için yapılan ilk deneysel çalışmalar ve gözlemlerden bu yana eşdeğer basınç çubuk modelinin problemin çözümü için hem geometrik hem mekanik özellikler bakımından uygun olacağı görülmüştür. Bu fikir ilk olarak Polyakov (1960) tarafından öne sürülmüştür (Şekil 2.2). Daha sonra bu model birçok araştırmacı tarafından deneysel ve analitik yöntemlerle incelenmiştir. Modelde diyagonal çubuğun etkili genişliği, dolgu duvarlı çerçevenin yanal rijitlik katsayısı, dayanımı ve dolgu duvar ile çerçeve arasındaki etkileşim en önemli parametreler olarak gösterilmektedir. Bu parametreler aşağıda detaylı bir şekilde incelenecektir.



**Şekil 2.2.** Dolgu duvarlı çerçeveler için eşdeğer basınç çubuğu modeli

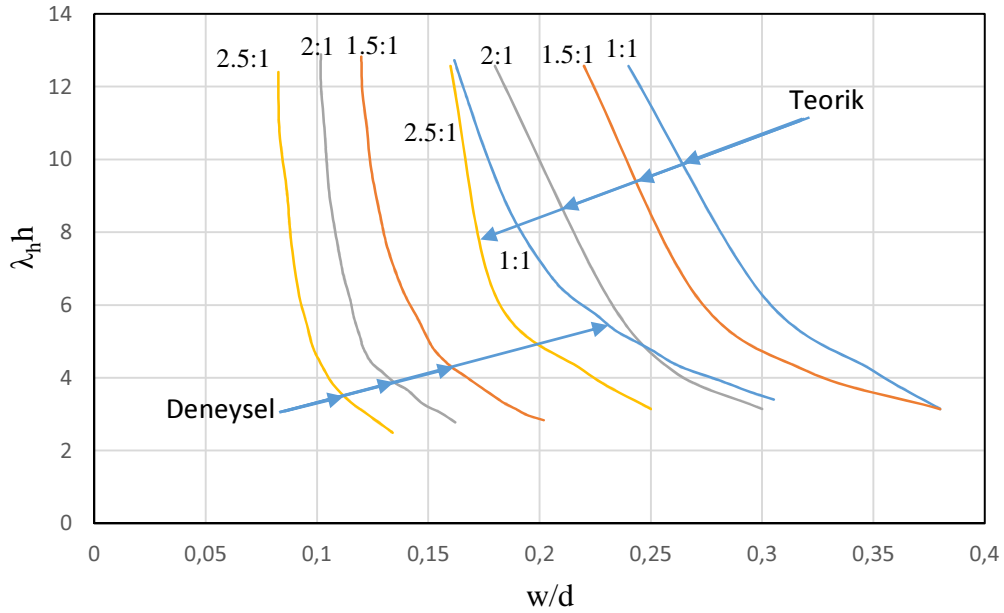
### 2.2.1.1. Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Yanal Rijitlik ve Etkili Genişlik

Polyakov (1960) tarafından ilk olarak öne sürülmüş olan bu modelde, dolgu duvarları diyagonal olarak basınç yüküne maruz bırakılmış ve çerçevesi sistemlerde dolgu duvarın yanal yükler altındaki davranışının eşdeğer basınç çubuğu ile temsil edilebileceği sonucuna varmıştır. Daha sonraları Holmes (1961) bu düşünceden yola çıkarak, duvar ile aynı malzeme ve aynı kalınlıkta bir basınç çubuğu kullanarak, basınç çubuğunun genişliğini belirlemeye çalışmıştır. Holmes (1961) basınç çubuğu etkili genişliği ( $w$ ) ile ilgili ilk yaklaşımı  $d_m$  duvar diyagonal uzunluğunu göstermek üzere Denklem (2.1)' i kullanarak hesaplamıştır.

$$w = \frac{d_m}{3} \quad (2.1)$$

Ancak farklı araştırmacılar basınç çubuğu genişliği ile ilgili farklı öneriler ileri sürmüşlerdir. Smith (1962, 1966, 1967) eşdeğer basınç çubuğu modelini geliştirmek için çelik çerçevesi dolgu duvarlar üzerinde geniş çaplı deneyler yapmıştır. Deney sonuçları ve elde ettiği analitik verileri de göz önüne alarak farklı tablolar önermiştir. Smith (1962),

ilk olarak yaptığı çalışmada, dolgu duvar genişlik/diyagonal uzunluk ( $w/d_m$ ) oranının dolgu duvarın uzunluk/yükseklik ( $l/h$ ) oranına bağlı olarak 0,10 ile 0,25 arasında değiştiğini bulmuştur. Daha sonra, Smith (1966, 1967) bu bilgileri geliştirerek,  $\lambda_{hh}$  ve  $l'/h'$  parametrelerine bağlı olarak yeni grafikler önermiştir (Şekil 2.3). Şekil incelendiğinde  $\lambda_{hh}$  veya  $l'/h'$  oranı arttığı zaman  $w/d_m$  oranının azaldığı görülecektir.

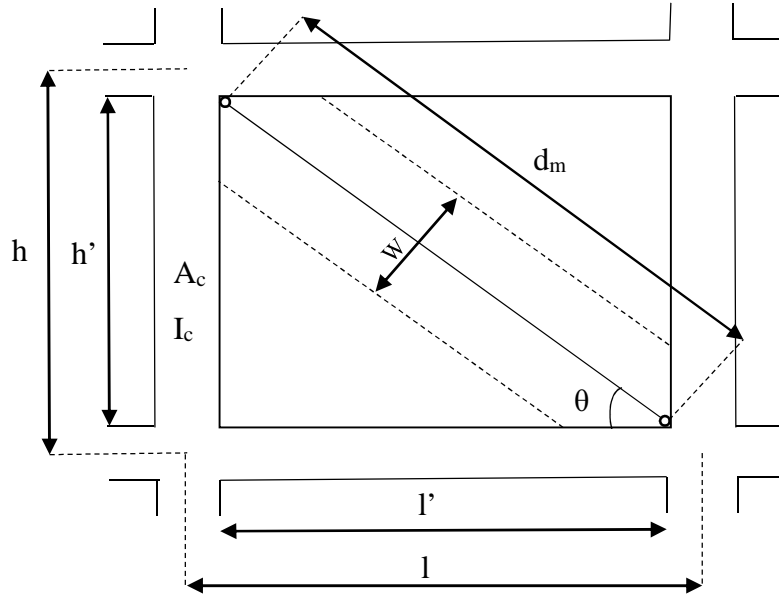


**Şekil 2.3.** Etkili genişliğin  $\lambda_{hh}$  değerine bağlı olarak değişimi (Smith 1967)

Burada  $\lambda_{hh}$  dolgu duvarın çerçeveye göre olan rölatif rijitliğini tanımlayan birimsiz bir katsayıdır ve denklem (2.2)'ye göre hesaplanmaktadır. Burada  $t$  ve  $h'$  sırasıyla dolgu duvarın kalınlığı ve yüksekliğini,  $\theta$  diyagonalin yatayla yaptığı açığı (Denklem (2.3)),  $E_m$  ve  $E_c$  sırasıyla dolgu duvar ve betonun elastisite modülünü ve  $I_c$  kolonun eylemsizlik momentini göstermektedir (Şekil 2.4).

$$\lambda_{hh} = \sqrt[4]{\frac{E_m t \sin 2\theta}{4E_c I_c h'}} \quad (2.2)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{h'}{l'}\right) \quad (2.3)$$



**Şekil 2.4.** Diagonal çubuğun etkili genişliği

Mainstone (1971), çelik çerçevesi dolgu duvarlar üzerinde bir dizi deney yapmıştır. Çoğunlukla küçük ölçekli olan deneyler diyagonal yönde basınca maruz bırakılmıştır. Sonuç olarak Denklem (2.4) elde edilmiştir.

$$w = 0.16\lambda_h' d_m \quad (2.4)$$

Kadir (1974), gerilme dağılımını dikkate alarak, dolgu duvar çerçeve arasındaki temas mesafesine bağlı olarak eşdeğer çubuk genişliği için Denklem (2.6)'yı önermiştir. Burada;

$$Z_1 = \frac{\pi}{\lambda_1} \text{ ve } Z_h = \frac{\pi}{2\lambda_h} \quad (2.5)$$

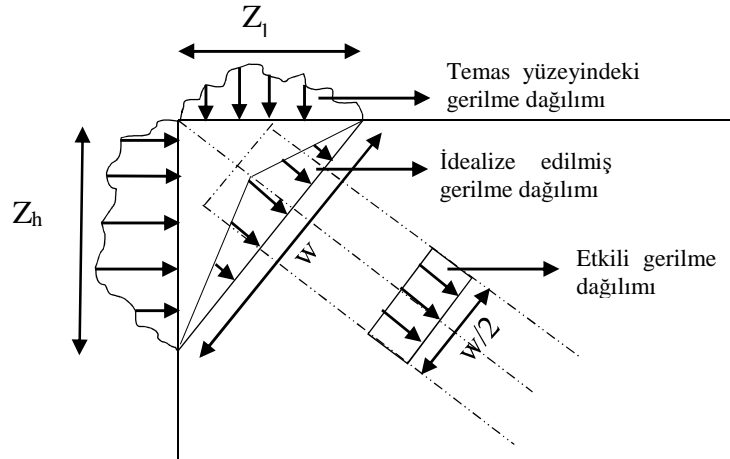
olmak üzere, w aşağıdaki bağıntıdan elde edilmektedir.

$$w = \frac{1}{2} \sqrt{(Z_1)^2 + (Z_h)^2} \quad (2.6)$$

Burada  $Z_1$  ve  $Z_h$  kolon ve kirişin dolgu duvar ile olan temas mesafesini göstermek üzere (Şekil 2.5)' te gösterilmiştir. Denklem (2.5) bağıntısı Denklem (2.6)'da yerine yazıldığında söz konusu genişlik aşağıda verilen bağıntıdan elde edilebilmektedir.

$$w = \frac{\pi}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\lambda_h}\right)^2} \quad (2.7)$$

Eşdeğer çapraz çubuk modelinde şekilden de anlaşılacağı üzere etkili genişliğin ortasına doğru gerilmeler artmakta ve genişliğin uçlarına doğru azalmaktadır. Dolgu duvarın kolon ve kirişten ayrıldığı yerde, başka bir deyişle temas yüzeyinin bittiği noktada ise sıfır olmaktadır. Bu nedenle diyagonal çubuk üniform basınç gerilmesi altında olacaktır (Kadir 1974).



Şekil 2.5. Etkili genişlik boyunca gerilme dağılımı (Kadir 1974)

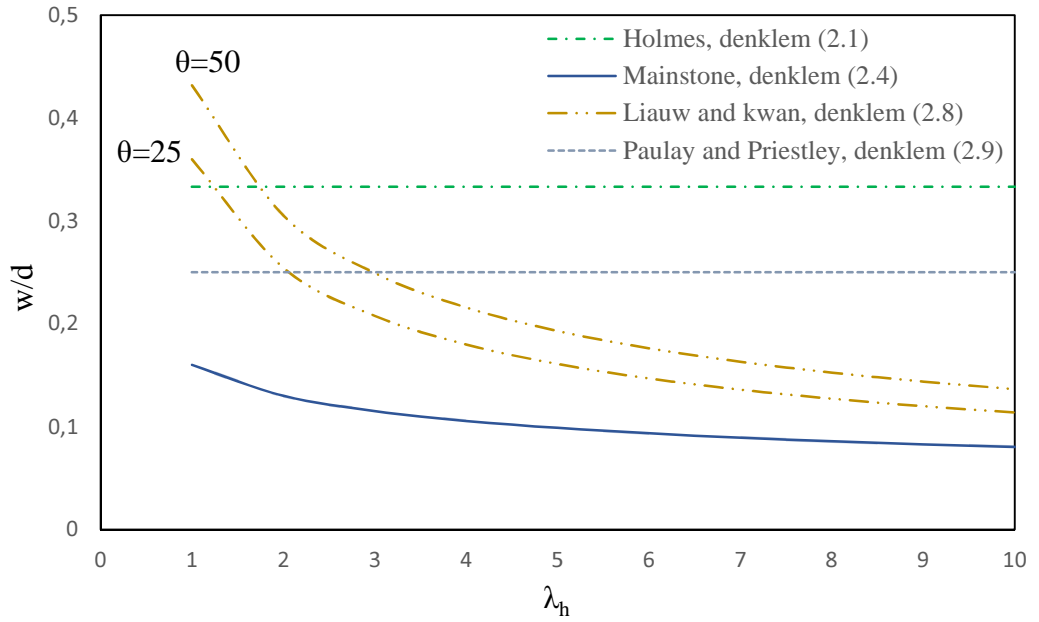
Liau ve Kwan (1984), deneysel çalışmalardan çelik çerçeveli dolgu duvarlar için elde ettikleri verileri kullanarak etkili genişlik için Denklem (2.8)'i bulmuşlardır.

$$w = \frac{0.95h' \cos \theta}{\sqrt{\lambda_h}} \quad (2.8)$$

Diğer taraftan son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalardan Paulay ve Priestley (1992), yüksek genişlik ( $w$ ) değerlerinin daha rijit yapı anlamına geldiğini ve dolayısıyla deprem yüklerine karşı daha yüksek tepki vereceğini belirterek Denklem (2.9)'u önermişlerdir.

$$w = 0.25d_m \quad (2.9)$$

Yukarıda anlatılan deneysel çalışmalarda önerilen  $w/d$  oranları Şekil (2.6)'da gösterilmiştir. Bu şekilde Denklem (2.8)'de önerilen formül daha pratik olması açısından  $\theta$  açısı  $25^\circ$  ve  $50^\circ$  olarak varsayılmıştır. Denklem (2.1) ve (3.4)  $\lambda$  parametresinden bağımsız oldukları için kolaylık açısından yaklaşık bir değer olarak kabul edilebilirler. Ayrıca diğer iki denklem şekil üzerinde incelendiğinde  $\lambda_h$  değeri artarken  $w/d$  oranının azalacağı görülmektedir.  $\lambda_h$ , dolgu duvarın çerçeveye göre rölatif rijitliğini temsil ettiğinden, rölatif rijitlik ( $\lambda_h$ ) arttıkça dolgu duvar ile onu çevreleyen çerçeve arasındaki temas mesafesi ( $z$ ) azalacaktır (Smith 1967).



**Şekil 2.6.**  $w/d$  oranının  $\lambda_h$  parametresine bağlı olarak değişimi

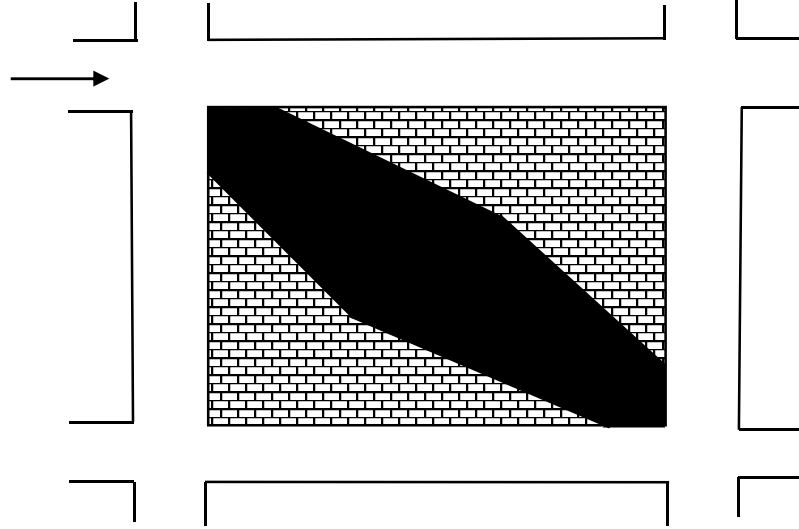
Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007'de (DBYBHY) eşdeğer basınç çubuğu genişliğinin,  $\lambda_h$  Denklem (2.2)'den belirlenmek üzere, Denklem

(2.10) ile hesaplanabileceği belirtilmiştir. Eşdeğer basınç çubuğunun aksenal rijitliği ( $k_m$ ) ise Denklem (2.11)'den hesaplanmaktadır.

$$w = 0.175(\lambda_h h)^{-0.4} d_m \quad (2.10)$$

$$k_m = \frac{wtE_m}{d_m} \quad (2.11)$$

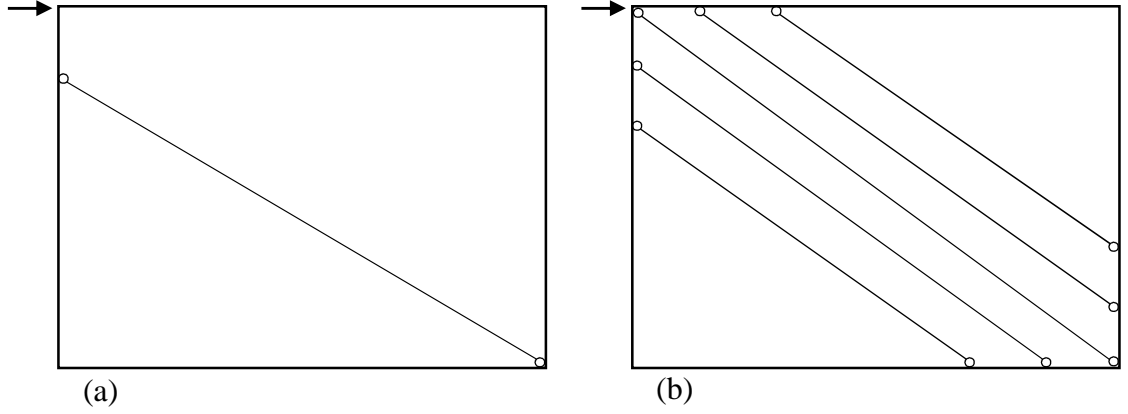
Mosalam ve ark. (1997), şekil değiştirmelerin ve gerilmelerin daha çok köşelerde yoğunlaştığını ve aynı zamanda orta kısımlarda hem gerilme hem de birim şekil değiştirmede hızlı bir düşüş yaşandığını ve bu yüzden etkili genişliğin duvarın orta kısmında daha büyük olması gerektiğini belirtmiştir (Şekil 2.7).



**Şekil 2.7.** Diyagonal çubuğun etkili genişliğinin değişimi (Mosalam ve ark. 1997)

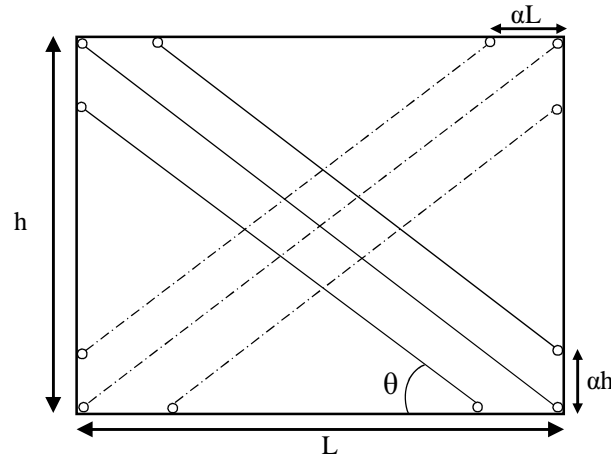
Tek diyagonal çubuklu yaklaşım oldukça basit, kullanışlı ve davranışı genel olarak temsil edebilmesine rağmen, dolgu duvar ve onu çevreleyen çerçeve arasındaki etkileşimi tam olarak yansıtamamaktadır. Bu yüzden sistemde meydana gelen eğilme momenti ve kesme kuvveti tam olarak ifade edilememekte ve dolayısıyla yapıda oluşacak olası plastik mafsallar da tam olarak tespit edilememektedir (Crisafulli 1997). Araştırmacılar bu davranışı tam olarak idealize edebilmek için aynı model üzerinde ancak birden fazla çubuk kullanarak çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Thiruvengadam (1985) davranışı daha iyi modelleyebilmek için çoklu eşdeğer basınç çubuğu kullanılmasını önermiştir. Şekil

(2.8)'de çerçeve dolgu duvar davranışı yansıtabilmek için farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar görülmektedir. Zarnic ve Tomazevic (1988) yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda Şekil (2.8a)'da görülen modeli önermişlerdir. Syrmakesis ve Vratsanou (1986) ise basınç bölgesinin davranışını daha iyi idealize edebilmek için çoklu eşdeğer diyagonal çubuk modelini tavsiye etmişlerdir (Şekil 2.8b).



**Şekil 2.8.** Farklı diyagonal çubuk modeli ve çoklu çubuk modeli

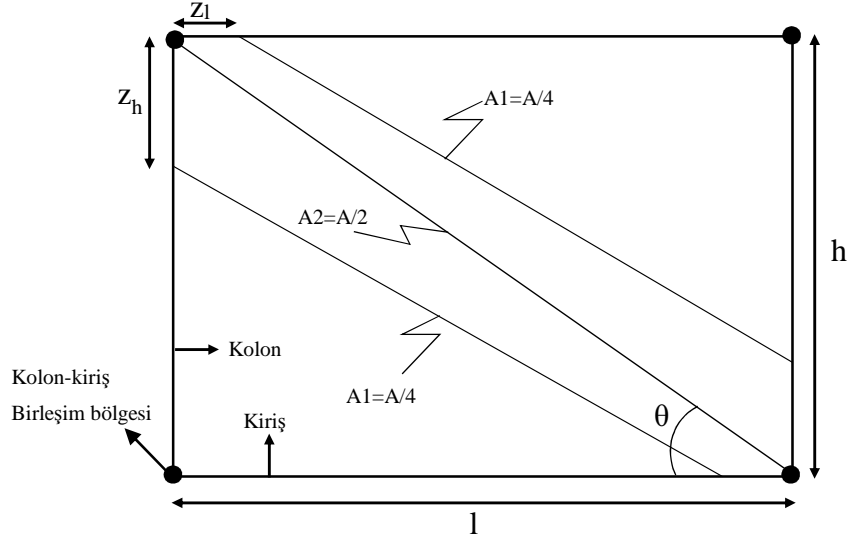
Chrysostomou ve ark. (1992) ise dolgu duvardaki dayanım ve rijitlik azalmasını hesaba katarak dolgu duvarlı çerçevenin deprem yükü altındaki tepkisini belirlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmada Şekil (2.9)'da görüldüğü gibi altı adet sadece basınca çalışan eşdeğer çubuk kullanarak davranışı modellemişlerdir. Bu modelde analiz boyunca sadece 3 çubuk aktif olarak çalışmaktadır.



**Şekil 2.9.** Altı çubuklu modelleme yöntemi (Chrysostomou ve ark. 1992)

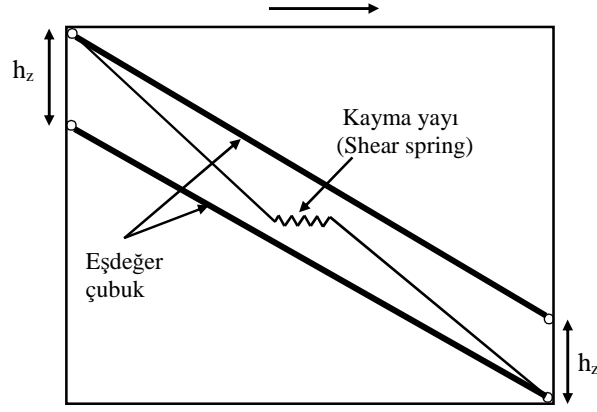


El-Dakhkhni ve ark. (2003) beton dolgu duvarlı çelik çerçeveler üzerinde yaptıkları çalışmaları, önerdikleri üç çubuklu model (Şekil 2.10) yardımıyla modellemiş ve sonuçların önemli ölçüde örtüştüğünü belirtmişlerdir. Diğer modellere göre daha kolay olan bu yöntemde rijitlik ve yük taşıma kapasitesi belirlenmektedir.



**Şekil 2.10.** Dolgulu çelik çerçeve için önerilen model (El-Dakhkhni ve ark. 2003)

Yakın geçmişte, dolgu duvarlı çerçevelerin davranışını temsil etmek için Crisafulli ve Carr (2007) tarafından daha farklı bir model önerilmiştir (Şekil 2.11). İki adet basınç çubuğu ve bir adet kayma yayından oluşan modelde, duvarın basınç ve kayma davranışları ayrı ayrı dikkate alınmaktadır. Basınç davranışını her iki yönde ayrı ayrı olmak üzere iki adet basınç çubuğu, kayma davranışı ise kayma yayı ile temsil edilmektedir. Bu düzenleme duvarın yanal rijitlik ve dayanımını belirlemek ve özellikle derzler boyunca kayma kırılmasının veya diyagonal çekme kırılmasının meydana geldiği durumlar için kullanılan bir yöntemdir.



**Şekil 2.11.** İki çubuklu model (Crisafulli ve Carr 2007)

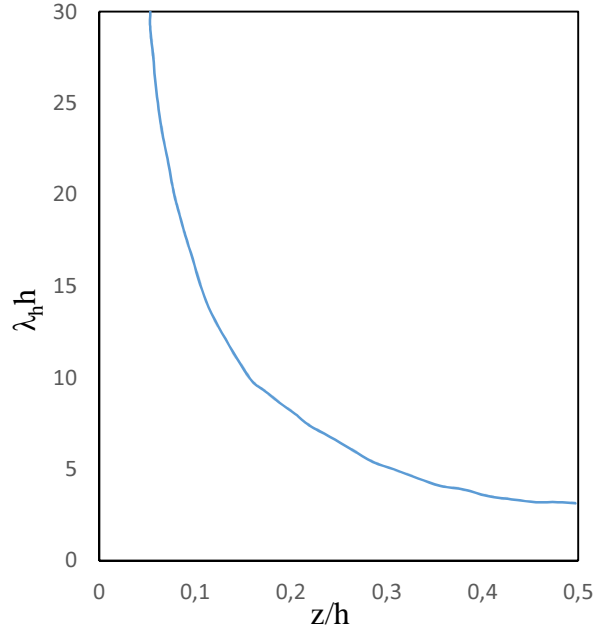
Yukarıda bahsedilen, dolgu duvarlı çerçevelerin davranışını daha gerçekçi bir şekilde idealleştirmek için yapılan farklı modeller, eşdeğer çubuk modeline göre daha karmaşık olmalarına rağmen sistemin davranışını, özellikle dolgu duvar ve çerçeve arasındaki davranışını daha iyi yansıtmaktadır.

### 2.2.1.2. Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Temas Mesafesi

Dolgu duvar ile onu saran çerçeve arasındaki ayrılmadan sonra belirli bir yüzeyde temasın devam ettiği araştırmacılar tarafından ispatlanmıştır. Smith (1962, 1966, 1967) çalışmalarında temas mesafesi ile ilgili yanal rijitliğe bağlı denklem (2.12)'yi önermiştir.

$$\frac{z}{h} = \frac{\pi}{2\lambda_h h} \quad (2.12)$$

Bu denkleme göre dolgu duvarın çerçeveye göre yanal rijitlik katsayısı ( $\lambda_h$ ) arttıkça, temas mesafesinin azalacağı görülmektedir (Şekil 2.12).



**Şekil 2.12.** Yanal rijitlik katsayısına ( $\lambda_h$ ) bağlı temas mesafesinin ( $z$ ) değişimi  
(Smith 1967)

Saneinejad ve Hobbs (1995), yaptıkları çalışmada temas mesafesini kesin bir sonuçla elde etmenin karmaşık olacağını, belki deneme yanılma gibi bir metodu içerebileceğini belirtmiş ve basitleştirilmiş bir denklem olan Denklem (2.13) ve (2.14)'ü önermişlerdir.

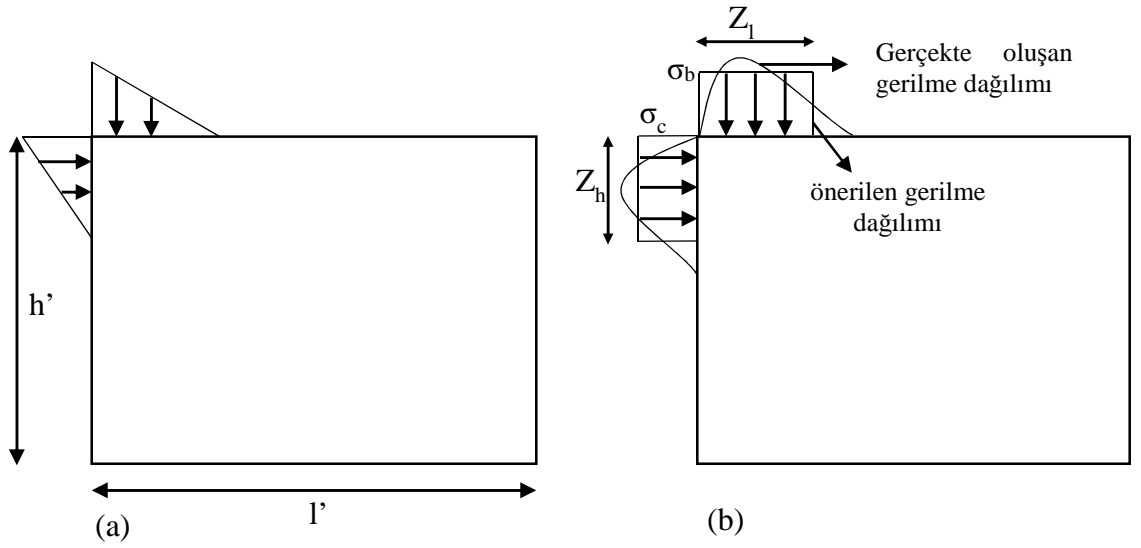
$$Z_h h = \sqrt{\frac{2M_{pj} + 2\beta_0 M_{pc}}{\sigma_{b0} t}} \leq 0.4h \quad (2.13)$$

$$Z_l l = \sqrt{\frac{2M_{pj} + 2\beta_0 M_{pb}}{\sigma_{b0} t}} \leq 0.4l \quad (2.14)$$

Burada  $Z_h$  ve  $Z_l$  sırasıyla dolgu duvarın kolon ve kiriş ile temas mesafesini göstermektedir.  $M_{pj}$ ; düğüm noktası plastik dayanım momenti,  $\beta_0=0,2$ ; üst sınır azaltma faktörü,  $M_{pc}$  ve  $M_{pb}$  sırasıyla kolon ve kiriş plastik dayanım momentleridir.  $\sigma_{co}$  ve  $\sigma_{bo}$  sırasıyla kolon ve kirişte temas mesafesinde oluşan üniform normal gerilmeleri,  $l$ ,  $h$  ve  $t$ , sırasıyla dolgu duvarın uzunluğunu, yüksekliğini ve kalınlığını temsil etmektedir.

Saneinejad ve Hoobs (1995), temas uzunluğu fazla olan bir çerçevenin dayanımının artacağını, çünkü çapraz çubukta meydana gelen gerilmelerin veya yükün daha geniş bir alana yayılacağını belirtmiştir.

Dolgu duvarın kolon ve kiriş ile olan etkileşimi araştırmacılar tarafından farklı şekillerde kabul edilmiştir. Smith (1967) bu etkileşimi üçgen olarak kabul ederek analitik bir model oluşturmuşken (Şekil 2.13a), Saneinejad ve Hobbs (1995) ise plastik teoriyi kullanarak yaptığı araştırmada bu etkileşimi dikdörtgen kabul etmiş ve farklı bir yöntem önermiştir (Şekil 2.13b).



Şekil 2.13. Duvar çerçeve etkileşimi (a) Smith 1967 (b) Saneinejad ve Hoobs 1995

### 2.2.1.3. Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Yanal Dayanım

Bu konudaki ilk çalışmalar Smith (1966, 1967) tarafından çelik çerçevesiz dolgu duvarlar üzerinde yapılmıştır. Smith (1966) duvarda basınç kırılmasını meydana getirebilmek için gereken diyagonal kuvvet,  $R_c$ 'yi; duvarın basınç dayanımına ( $f'_m$ ), dolgu duvar kalınlığına ( $t$ ) ve temas mesafesine ( $z$ ) bağlı olarak Denklem (2.15)'i geliştirmiştir.

$$R_c = ztf'_m \sec \theta \quad (2.15)$$

Bu denklem, ilk önerildiğinde, kare dolgu duvarlı çerçeveler için geliştirilmiş ve duvar panel arasındaki etkileşim lineer gerilme dağılımı kabul edilerek elde edilmiştir. Smith (1967) daha sonra dikdörtgen dolgu duvarlı çerçeveleri dikkate alarak denklem (2.11)' in doğruluğunu teyit etmiştir. Ayrıca, eğilme durumunda çerçevenin yanal rijitliğe katkısı ihmal edilirse, Denklem (2.16) elde edilmektedir.

$$V_c = R_c \cos \theta \quad (2.16)$$

Burada  $V_c$ ; kırılmanın olduğu andaki kesme kuvvetidir. Denklem (2.15) ve (2.16) yardımıyla  $V_c$ , z temas mesafesi, t dolgu duvar kalınlığı ve  $f'_m$  duvarın basınç dayanımı olmak üzere Denklem (2.17)'ten hesaplanabilir.

$$V_c = ztf'_m \quad (2.17)$$

Saneinejad ve Hoobs (1995) ise diyagonal çatlağın olduğu andaki kesme kuvvetini ( $V_t$ ) hesaplamak için Denklem (2.18)'i önermiştir. Burada h' dolgu duvarın yüksekliğini,  $\theta$  ise duvarın yatayla yaptığı açığı belirtmektedir.

$$V_t = 2\sqrt{2}h'tf'_{tm} \cos^2 \theta = \sqrt{2}A_m f'_{tm} \sin 2\theta \quad (2.18)$$

Paulay ve Priestley (1992), kayma kırılmasını başlatan kesme kuvvetini ( $V_s$ ) elde etmek için Denklem (2.19)'u önermiştir.

$$V_s = \tau_0 A_m + \mu R \sin \theta \quad (2.19)$$

Burada  $A_m$  dolgu duvarın yataydaki alanını,  $\mu$  sürtünme katsayısını ve  $\tau_0$  başlangıç kayma dayanımını göstermektedir.

## **2.3.Mikro Modeller**

Daha önce de ifade edildiği gibi mikro-modeller dolgu duvarlı çerçevelerde meydana gelebilecek bütün göçme durumlarını dikkate alarak yapı elemanlarının davranışını detaylı bir şekilde incelemek amacıyla gerçekleştirilen yaklaşımlardır. Bu bölümde kullanılan modeller sayısal yöntemler ile gerçekleştirilmektedir. Davranışı birçok parametreye bağlı olarak değişen dolgu duvarlı çerçeveler, yaygın olarak sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla modellenip irdelenmiştir. Bu yöntem, dolgu duvarlı çerçevelerde meydana gelen doğrusal olmayan davranışı temsil edebildiği için son yıllarda araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilen bir araç haline gelmiştir. Burada önemli olan, modelin gerçeğe yakın davranışı sergileyebilmesi için, plastik davranışın en iyi şekilde temsil edilmesidir. Sonlu elemanlar yöntemi bu davranışı modellemede büyük avantaj sağlamaktadır. Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin mikro modellenmesi ile ilgili bugüne kadar yapılan önemli çalışmalar Asteris ve ark (2013) tarafından derlenmiştir.

Dolgu duvarlı çerçevelerde meydana gelen davranışın temsil edilebilmesi için bilgisayar modelinde en az üç farklı eleman tanımlanması gerekir. Bunlar; dolgu duvar, çerçeve ve dolgu duvar ile çerçeve arasındaki etkileşim arayüzeyidir.

### **2.3.1. Çerçevenin Modellenmesi**

Doğrusal olmayan sonlu eleman analizinde betonarme davranışı; birçok farklı eleman kullanılarak modellenebilir. Çerçeveler kiriş (beam) elemanlar olarak modellenebilmelerine karşın, bu tür bir modelde beton ve çelik davranışları ayrı ayrı temsil edilmezler. Ancak söz konusu teknik yardımı ile bir bütün olarak yapının (kolon ve kiriş) davranışı temsil edilmektedir. Böyle bir yöntemin kullanılmasının en büyük avantajı daha karmaşık yapıların incelenmesine olanak sağlamasıdır. Böylece daha büyük yapılar daha kısa bir sürede analiz edilebilmektedir. Betonarme elemanların davranışını daha detaylı bir şekilde temsil edebilmek için söz konusu elemanlar üç boyutlu elemanlar kullanılarak modellenmektedir. Bu elemanların kullanılması; analiz süresinin oldukça artmasına ve daha küçük yapıların veya yapının küçültülmüş halinin daha uzun bir sürede

analiz edilmesine neden olmaktadır. Ancak kapsamlı bir modelin, eğer model uygun bir şekilde yapılmışsa, davranış karmaşıklığının artmasına rağmen daha gerçekçi sonuçlar verdiği belirtilebilir (Crisafulli 1997).

Betonun malzeme davranışını tanımlayan analitik yaklaşımlar, çoğunlukla betonun deneylerden elde edilen test sonuçlarına dayalıdır. Yukarıda bahsedilen test sonuçlarına bağlı olarak, betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi malzeme davranışının çok eksenli gerilme durumu ve göçme kriterine bağlı olarak elde edilir. Bu konuda yapılan birçok araştırma mevcuttur (Popovics 1973, Hu ve William 1989, Mier ve ark. 1997, Wang ve Hsu 2001, Kmiecik ve Kaminski 2011). Ancak bu verilerin, betonun heterojen yapısı ve aynı zamanda testlerde kullanılan parametrelerin (karışım oranları, kür şartları, numunenin şekli ve boyutları vb.) değişken olması dolayısıyla farklılık gösterebileceği de bilinmelidir.

Betonun davranışını tanımlayan malzeme modelleri iki kategoride sınıflandırılabilir: bunlar eğilim analizlerinden elde edilen modeller (ampirik denklemler) ve sürekli ortamlar mekaniği teorilerine bağlı olarak elde edilen modellerdir. Ancak sürekli ortamlar mekaniği teorileri (doğrusal olmayan elastisite, plastisite, viskoplastisite, hasar mekaniği) modellerinin kalibrasyonu deneysel sonuçlara bağlıdır.

Donatı çubuğunun davranışını modellemek betonunkini modellemekten daha kolaydır. Çeliğin basınç ve çekme altındaki davranışı, akma gerilmesine kadar doğrusal olarak kabul edildiğinden sürekli malzeme olarak kabul edilmektedir. Akmadan sonra malzeme davranışı elastoplastik olmakta ve basit bir pekleşme kuralı kullanılarak tanımlanabilmektedir. Çelik nihai dayanımına ulaştığında ise artık herhangi bir yük taşıyamamaktadır.

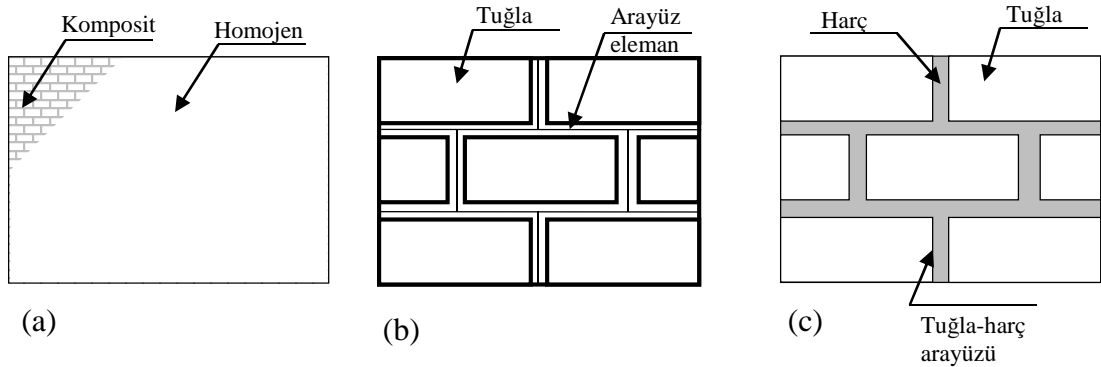
### **2.3.2. Dolgu Duvar Panelinin Modellenmesi**

Dolgu duvarların düzlem içi davranışı üzerine uzun yıllardır birçok deneysel (Santa-Maria ve ark 2004) ve analitik (Ali ve Page 1987, Tzamtzis ve Asteris 2004, Milani ve Lourenço 2006) çalışma yapılmıştır. Yükleme durumuna bağlı olarak göçme ya derzlerde

(diyagonal çekme veya kayma kırılması) ya da derz ve tuğlada aynı anda (diyagonal basınç kırılması) meydana gelmektedir.

Dolgu duvarlar, tuğla boyutu, yatay ve düşey harcın genişliği, tuğla ve harcın malzeme özellikleri, işçilik gibi birçok parametreden etkilendiği için modellenmesi oldukça zor bir malzemedir. Dolgu duvarlar sonlu elemanlar analizinde farklı elemanlarla modellenebilirler. Lourenço (2002) yığma yapıların üç farklı şekilde modellenebileceğini belirtmiştir. Bu yöntemler:

- 1. Tek fazlı modelleme (Makro modelleme):** tuğla, harç ve tuğla-harç etkileşimi homojen, izotropik veya anizotropik bir malzeme gibi dikkate alınır (Şekil 2.14a). Bu modelleme yöntemi büyük yapıları modellemek için tercih edilirken, bütün göçme türlerini yansıtmadığından, küçük panellerin kapsamlı gerilme analizleri için uygun değildir.
- 2. İki fazlı modelleme (Basitleştirilmiş mikro modelleme):** tuğla sürekli elemanlar ile modellenirken, harç ve tuğla-harç etkileşimi ise süreksiz elemanlar kullanılarak modellenir (Şekil 2.14b).
- 3. Üç fazlı modelleme (Mikro modelleme):** tuğla ve harç sürekli elemanlarla temsil edilirken tuğla-harç etkileşimi süreksiz elemanlar olarak temsil edilirler (Şekil 2.14c). Bu yöntem daha kesin sonuçlar vermesine karşın analizler daha uzun sürmektedir.



**Şekil 2.14.** Yığma yapı modelleme yöntemleri (a) makro modelleme, (b) basitleştirilmiş mikro modelleme ve (c) mikro modelleme (Lourenço 2002)



Tek fazlı modellemede tuğla ve harç arasında bir ayırım yapmaz ve yığma homojen, anizotropik sürekli bir eleman olarak kabul edilir. İki fazlı modellemede ise her bağlantı harç ve tuğla-harç etkileşimini ortalama bir ara yüz olarak dikkate alınmaktadır. Ancak duvar geometrisinin değişmemesi için tuğla genişletilmiştir. Bu yöntemde harcın Poisson etkileri dikkate alınmadığı için kesinlik azalmaktadır. Üç fazlı yaklaşımda ise elastisite modülü, Poisson oranı ve elastik olmayan özellikleri hem harç hem tuğla için dikkate alınmaktadır. Burada belirtilen yöntemlerden biri diğerine doğrudan tercih edilemez çünkü uygulama alanları birbirinden farklıdır (Lourenço 2002).

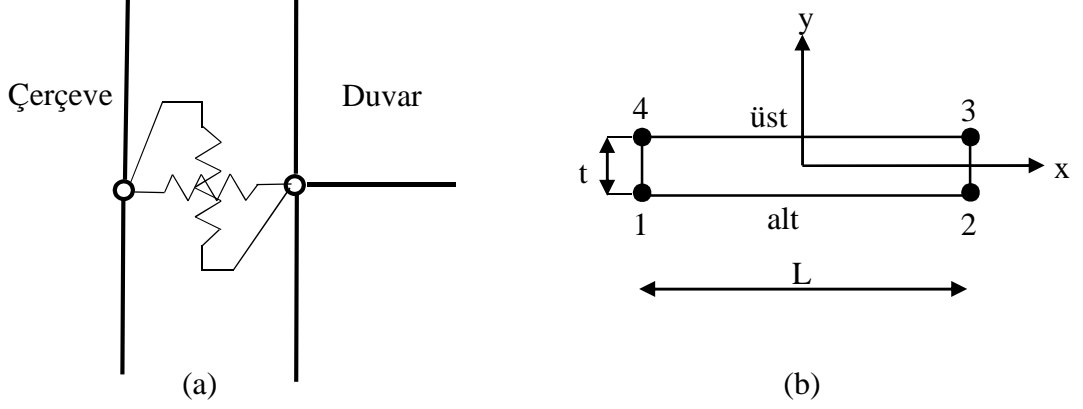
Dolgu duvarlar homojen malzeme olarak dikkate alındıklarında, harç derzlerinin ve tuğlanın etkileri ortalama bir yaklaşım olarak kabul edilmiş olur. Burada malzeme modeli de gerilme-şekil değiştirme ve göçme durumlarını idealize edebilmelidir. Bu tür malzeme modelleri sonlu elmanlar analizi yapmak için kullanılan paket programlarda mevcuttur. Diğer bir yaklaşım ise dolgu duvarın iki malzeme olarak modellenmesidir. Bu modellemede ise hem tuğla hem de harç derzleri sürekli elemanlar olarak modellenirler. Dolgu duvarlar modellenirken, ister homojen yaklaşım ister iki malzeme olarak tanımlansın, analizlerde göz ardı edilmemesi gereken özellik ise çatlakların dikkate alınmasıdır. Çünkü davranış, çatlak oluşuktan sonra çatlak olmayan durumdan farklıdır.

### **2.3.3. Duvar Çerçeve Etkileşiminin Modellenmesi**

Dolgu duvar ile çerçeve arasındaki etkileşim yüzeyi sonlu elemanlar modelinde yay elemanlar (Moss ve Carr 1971) (Şekil 2.15a) veya ara yüz elemanları (Mohebkah ve ark. 2008, Stavridis ve Shing 2010,) (Şekil 2.15b) olarak modellenebilmektedir. Dolgu duvar ve çerçeve arasındaki etkileşimi iyi bir şekilde temsil eden bir eleman kullanmak, gerçekçi bir sonuç elde etmek için önemlidir. Bu elemanların en önemli fonksiyonu, dolgu duvar ile çerçeve arasındaki etkileşimi, ayrılma ve kaymanın meydana geldiği yüzey boyunca, temsil edebilmesidir.

Bağlantı (Tie link) elemanı olarak da isimlendirilen yay elemanlar iki komşu düğüm noktasını belirtilen durumlara göre bir araya getirir veya serbest bırakır. Elemanın her düğüm noktasının iki dönel serbestlik derecesi vardır. Bu tür elemanlar basınç ve bağ

kuvvetlerini aktarabilir ancak çekme kuvvetlerine karşı koyamazlar. Normal ve kayma rijitlikleri büyük değerlerde iken bağlantı (link) elemanları aktiftir. Diğer türlü, bağlantı elemanları serbest bırakılır ve değer sıfır alınır.



**Şekil 2.15.** Çerçeve-duvar arayüz elemanları: (a) yay eleman, (b) arayüz eleman

Çerçeve ve duvar arasında etkileşimi tanımlayan daha gerçekçi bir yaklaşım ise arayüz elemanların kullanılmasıdır. Bu modelde her eleman için, iki komşu yüzeyi temsil etmek için en az dört düğüm noktası gerekmektedir (Şekil 2.15). Serbestlik dereceleri yüzeyler arasında meydana gelen normal ( $f_n$ ) ve kayma ( $\tau$ ) gerilmeleri ile ilişkilidir.

Dolgu duvarlı betonarme çerçeveleri içeren yapısal bir sistemin davranışını gerçeğe yakın bir şekilde modelleyebilmek deneysel çalışmaya bağlıdır. Nümerik ve analitik modellerin geçerliliği mevcut olan deneysel verilere bağlı olduğundan, mevcut yazılımların akma tahminlerinin geçerliliği şüpheli olmaktadır. Yukarıda bahsedilen farklı dolgu duvarlı betonarme çerçeve modellerinin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.1’de verilmiştir (Asteris ve ark. 2013).

Dolgu duvarlı betonarme çerçeveleri test etmenin zorlukları, kısıtlamalar ve yüksek maliyetleri nedeniyle araştırmacılar genellikle doğrusal olmayan sonlu eleman analizine başvurmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, dolgu duvarların betonarme çerçevelerin davranışı üzerindeki etkilerini anlamak için kapsamlı bir araç olarak birçok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır. Bu yöntem, aynı zamanda, araştırmaların daha karmaşık yapılarda da analizlerin gerçekleştirilebilmesine olanak sağlamaktadır. Nitekim deneysel

çalışmalar daha çok yapısal elemanlar üzerinde yapılmaktadır ( tek/iki açıklıklı ve yükseklik/boy oranının 0,75-1,25 arasında olduğu yapısal elemanlar). Genel olarak bu çalışmalarda, betonarme bir yapının davranışının kesin bir şekilde temsil edildiği söylenen bir sonlu elemanlar analizinin yapının tepkisini %20 hata oranında tahmin edebilmesi gerektiği kabul edilmektedir (Asteris ve ark.2013).

**Çizelge 2.1.** Dolgu duvarlı betonarme çerçeveler için modellerin avantaj ve dezavantajları (Asteris ve ark. 2013)

Bileşen	Model	Avantaj	Dezavantaj
Çerçeve	Kiriş (Beam) eleman (Makro eleman)	Düşük işlem süresi	Temel bağlantılar beton ve çeliğin davranışını ayrı ayrı tanımlamıyor ve yerel etkileri yansıtmıyor
	3 boyutlu tuğla (3B brick eleman) (Mikro eleman)	Genel davranışı ve yerel etkiler yansıtır	Temel bağlantılar beton ve çeliğin davranışını ayrı ayrı tanımlıyor Yüksek işlem süresi
Dolgu duvar	Tek eleman	Düşük işlem süresi Pratik uygulamalarda kullanışlı	Bütün göçme türlerini yansıtmayabilir. Düşük doğruluk
	İki eleman	Orta işlem süresi Bütün göçme türlerini yansıtır Araştırma uygulamalarında kullanışlı Yüksek doğruluk	
	Üç Eleman	Bütün göçme türlerini yansıtır Araştırma uygulamalarında kullanışlı Yüksek Doğruluk	Daha fazla sayısal girdi gerekiyor Yüksek işlem süresi
Ara yüz	İki düğüm (4SDS) yay eleman		Düşük Doğruluk Tahmin edemez İki izole parçada dinamik kontak Düğüm genleşmesini içermiyor
	Dört düğüm (8SDS) ara yüz elemanı	Yüksek doğruluk	

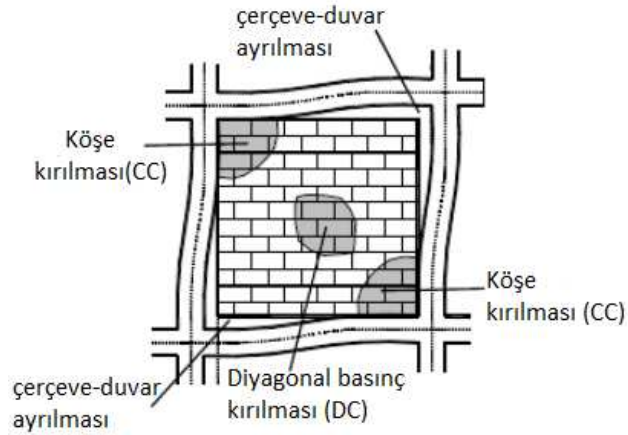
#### 2.4. Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Oluşan Göçme Türleri

Dolgu duvarlı çerçevelerde meydana gelecek olan göçme türünü tahmin etmek, çerçevenin ve duvarın yanal rijitliği, bunların bileşenleri ve boyutları gibi birçok parametreye bağlı olduğundan, oldukça zordur. Sistemin göçmesi genellikle çerçevede veya duvarda meydana gelen bir veya iki basit göçme türünü içerir.

Dolgu duvarlı çerçevelerde ortalama yük düzeylerinde duvar çerçeveden ayrılır ve diyagonal çubuk gibi davranır (Şekil 2.2). Yük arttığında duvarda veya çerçevede göçme meydana gelir. Çerçevede meydana gelen hasar veya göçme yük uygulanan taraftaki kolondaki çekmeden ya da kolon veya kirişte oluşan kesmeden kaynaklanmaktadır. Ancak, eğer çerçevenin dayanımı oluşabilecek hasarları engelleyebilecek kadar yeterli ise, artan yük duvarda hasara sebebiyet vermektedir. Genelde sistemin bir köşesinden uygulanan yük yüklenen kolon ve yükleme yapılan köşeden diğer çapraz köşeye oluşan diyagonal tarafından karşılanmaktadır. Duvarda oluşan gerilme durumu diyagonal çubuk boyunca basınç gerilmelerinin, ona dik doğrultuda ise çekme gerilmelerinin artmasına sebep olmaktadır.

Son elli yıllık deneysel ve analitik çalışmalara dayalı olarak dolgu duvarlı betonarme çerçeveli yapılarda oluşabilecek göçme türleri özetle beş farklı şekilde sınıflandırılabilir (El-Dakhkhni ve ark.2003 ve Asteris ve ark. 2011A). Bunlar;

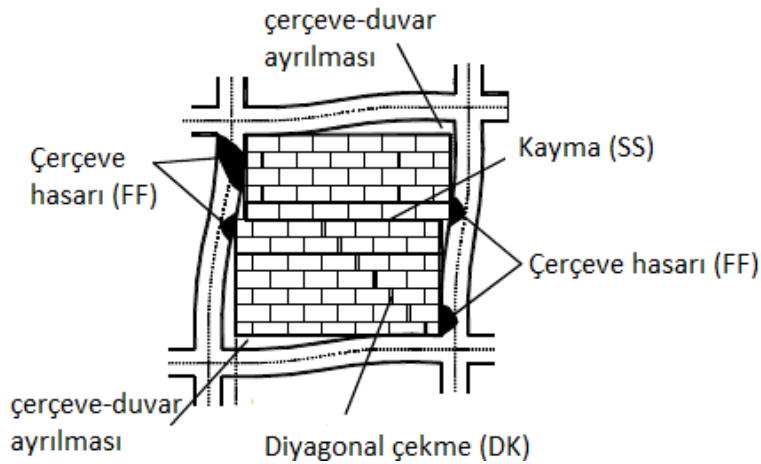
- 1. Köşe kırılması (CC):** Duvarın yüklenen köşelerinin en az birinde meydana gelen ezilme olarak tanımlanır (Şekil 2.16). Bu kırılma türü; zayıf dolgu duvarı ve güçlü çerçeve elemanlarına sahip çerçevelerde meydana gelmektedir.
- 2. Diyagonal basınç kırılması (DC):** Duvarın orta kısmında meydana gelen ezilme olarak ifade edilmektedir (Şekil 2.16). Bu türden göçmelerde narin dolgu duvar etkisi önemli rol oynamaktadır. Bu türde duvar düzlem dışı bir şekilde devrilebilir.



Şekil 2.16. CC ve DC kırılma türleri (Asteris ve ark. 2011A)

3. **Kayma kırılması (SS):** Dolgu duvarın yatay derzleri boyunca kaymadan dolayı meydana gelen göçme türüdür (Şekil 2.17). Bu tür ise güçlü çerçeve ve zayıf derz dayanımına sahip yapılarda meydana gelmektedir.
4. **Diyagonal çekme kırılması(DK):** Dolgu duvarın basınca maruz kalan diyagonal kısmında meydana gelen çatlamlar olarak tanımlanmaktadır ve genelde kayma kırılması ile aynı anda oluşmaktadır (Şekil 2.17). Bu tür göçmeler zayıf çerçeve ve güçlü duvardan oluşan sistemlerde meydana gelir.
5. **Çerçeve göçmesi (FF):** Kolonlarda veya kolon-kiriş birleşim bölgelerinde plastik mafsalların oluşması durumudur (Şekil 2.17). Bu tür göçmeler daha çok birleşim bölgeleri zayıf, birleşim elamanları ve dolgu duvarı güçlü olan çerçevelerde meydana gelmektedir.

Araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalarda ve depremlerde yapılarda meydana gelen hasar incelendiğinde en yaygın olarak görülen göçme türü köşe kırılmasıdır (CC). Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli husus ise yukarıda belirtilen göçme türlerinin boşluksuz dolgu duvarlı betonarme çerçeveler için ifade edilmesidir. Duvarda boşluk olması durumunda, diğer bir ifadeyle boşluklu dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde ve çelik çerçevelerde yapının davranışı önemli ölçüde değişmektedir.

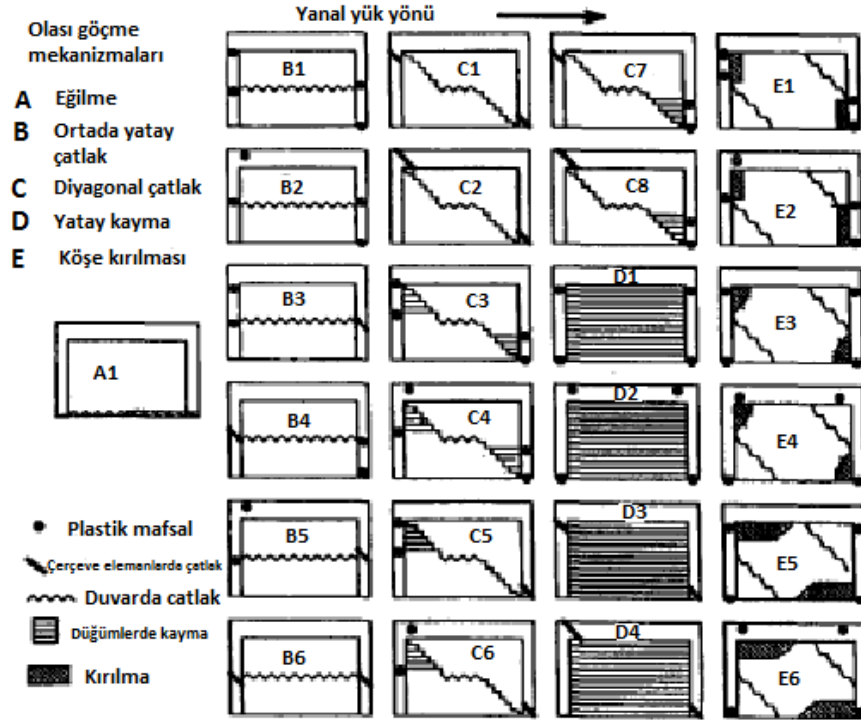


**Şekil 2.17.** SS, FF ve DK kırılma türleri (Asteris ve ark. 2011A)

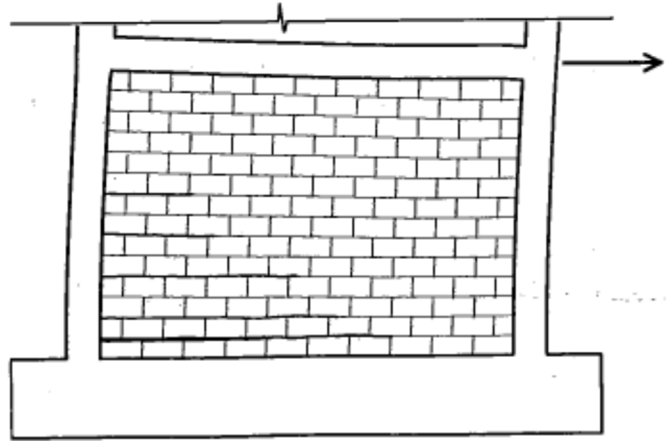
Duvarın boşluklu olması durumunda boşluksuz durumda meydana gelen diyagonal basınç çubuğunun şekillenmediği, onun yerine boşluğun her iki tarafında iki tane basınç çubuğunun oluştuğu yapılan analitik ve deneysel araştırmalar sonucunda ifade edilmiştir (Asteris 2003, 2011, Mosalam ve ark 1996, 1997). Duvarda diyagonal çubuğun oluştuğu kısımda boşluğun olması yaygın olarak görülen diyagonal kırılma (DC) ve diyagonal çatlama (DK) göçme türlerinin oluşmasına engel teşkil etmektedir (Asteris 2011). Çelik çerçeve kullanılması durumunda ise beşinci göçme türü olan çerçeve göçmesi (FF) çok nadiren meydana gelmektedir (El-Dakhkhni ve ark. 2003).

Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde meydana gelebilecek göçme türleri ile ilgili daha kapsamlı deneysel bir çalışma Mehrabi ve ark. (1994) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada göçme türleri çerçevenin duvara göre rijitliğine ve dayanıma bağlı olarak beş farklı kategoriye ayrılmıştır. Ancak bu çalışmada, diğer çalışmalardan farklı olarak her bir göçme türünde oluşabilecek farklı göçme mekanizmaları Şekil 2.18’de gösterilmiştir. Bu çalışmada da tek açıklıklı ve iki açıklıklı boşluksuz dolgu duvarlı betonarme çerçeveler incelenmiştir. Boşluklu çerçevelerde davranış tamamen değiştiği için bahsedilen göçme türleri bu tür çerçeveler için geçerli değildir.

Yukarıda bahsedilen göçme türleri dışında çok nadir rastlanan ancak gözlemlenebilecek olan göçme türleri de mevcuttur. Örneğin sistemin eğilmesinden dolayı duvarda meydana gelebilecek eğilme çatlakları Şekil 2.19’de gösterilmiştir (Crisafulli 1997).



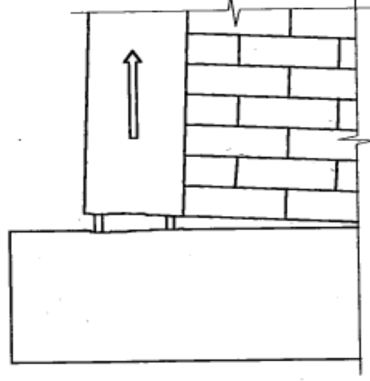
Şekil 2.18. Dolgu duvarlı çerçevelerde göçme türleri (Mehrabi ve ark. 1994)



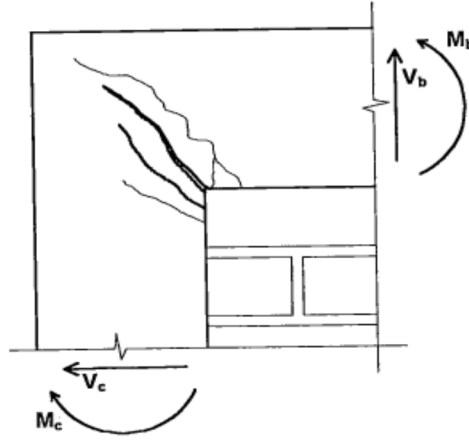
Şekil 2.19. Duvarda meydana gelen eğilme çatlakları (Crisafulli 1997)

Farklı göçme türlerine ikinci bir örnek olarak, kolonda mevcut olan boyuna donatının sıyrılmasından dolayı meydana gelen göçme gösterilebilir (Şekil 2.20). Bu tür göçme türünün önüne geçebilmek için boyuna donatı bindirme boyunun yeterli olması gerekmektedir. Bir diğer örnek olarak kolon-kiriş birleşim bölgelerinde meydana gelen

hasarlar verilebilir (Şekil 2.21). Bunun sebebi ise duvarın yüklenen köşelerinde normal ve kayma gerilmelerinin fazla olmasıdır (Crisafulli 1997).



Şekil 2.20. Donatı sıyrılması hasarı (Crisafulli 1997)



Şekil 2.21. Kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarı (Crisafulli 1997)

## 2.5. Dolgu Duvarların Yapı Davranışı Üzerinde Etkileri

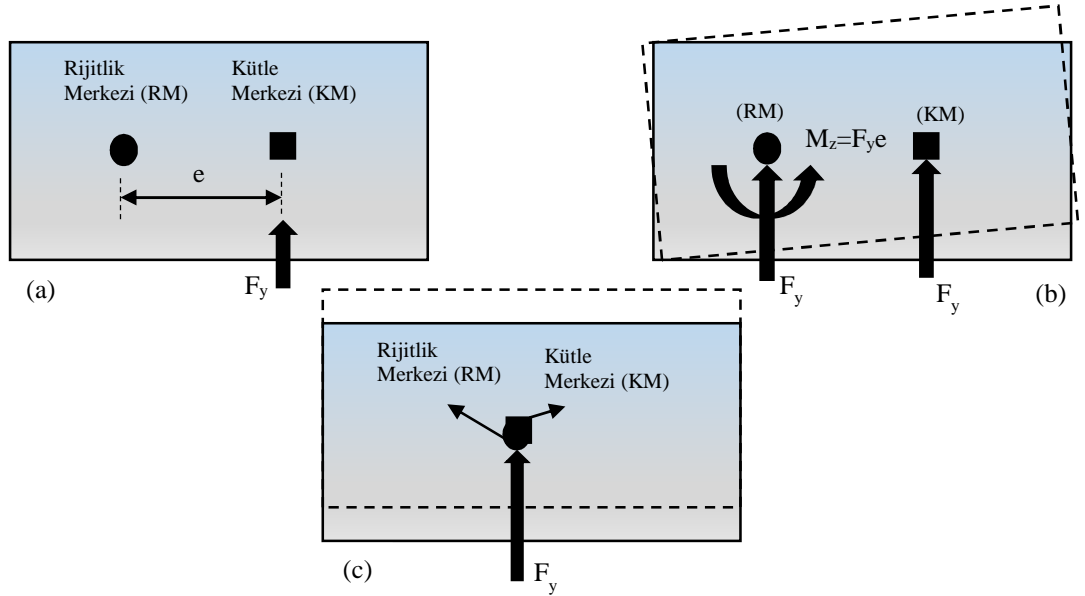
Dolgu duvarlar her ne kadar hesaplarda yapısal eleman olarak düşünülmesede, tersinir tekrarlı yükler altında yapının rijitlik, yatay yük taşıma ve enerji tüketme kapasitesini arttırdığı yapılan deneysel çalışmalarda gözlenmiştir (Mosalam ve ark. 1997, Pujol ve Fick 2010). Sistem rijitliğini arttıran dolgu duvar, sistemin periyodunu azaltarak yapının davranışını değiştirmektedir. Yük artmaya başlayınca dolgu duvarda çatlaklar meydana gelmekte, duvarın yapının rijitliğine olan etkileri azalmakta ve yapıyı tamamen çerçeve sistem ayakta tutmaya çalışmaktadır. Bunlara ek olarak, yapıda kullanılan duvarlarda



pencere ve kapı boşluklarının olması, duvarların planda düzensiz yapılması gibi etkiler yapılarda çok ciddi hasarlar oluşmasına da sebep olmaktadır. Bu etkiler burulma, yumuşak kat, zayıf kat ve kısa kolon etkisi olarak dört ana başlıkta toplanabilir. Aşağıda bu başlıklar ayrıntılı bir şekilde irdelenmektedir:

### 2.5.1. Burulma Etkisi

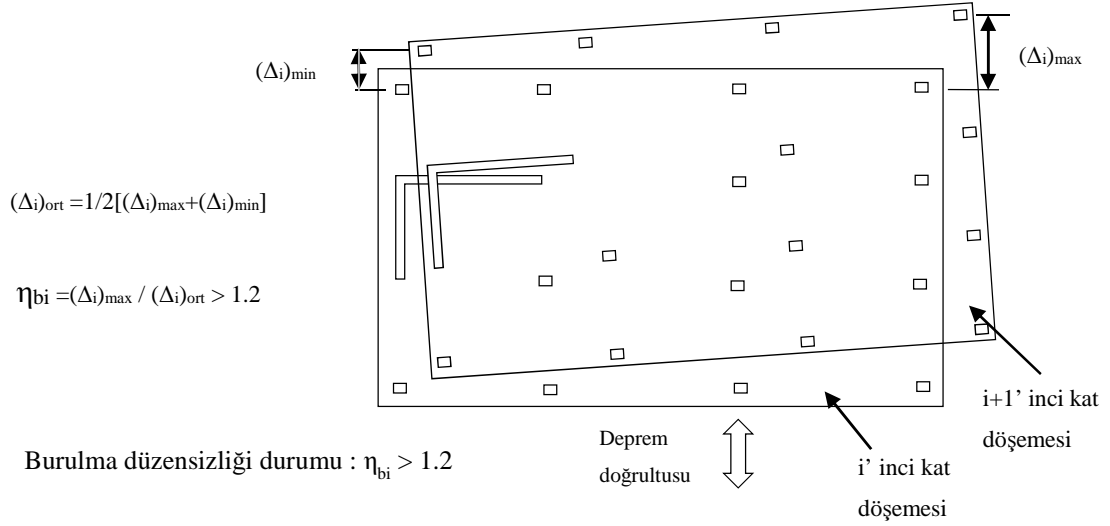
Yatay yüklere maruz kalan bir yapıda, burulmanın meydana gelmemesi için rijitlik merkezi (RM) ve kütle merkezinin (KM) çakışması gerekmektedir (Doğangün 2014). Simetrik çerçeveye sahip bir sistemde simetrik yerleştirilmeyen duvarlar yapının rijitlik merkezinin yerinin değişmesine neden olurlar (Şekil 2.22a). Böyle bir durumda yapının kütle merkezi ve rijitlik merkezi arasında meydana gelebilecek mesafe yapıda burulma momenti oluşmasına sebebiyet verir (Şekil 2.22b). Eğer kütle merkezi ve rijitlik merkezi çakışsaydı, yapıda eşit bir ötelenme meydana gelecek ve burulma momenti oluşmayacaktı (Şekil 2.22c).



**Şekil 2.22.** (a) Deprem yüklerinin kütle merkezine etkimesi (b) Rijitlik merkezi etrafında dönmesi ve (c) İki merkezin çakışması durumu (Doğangün 2014)

Türk Deprem Yönetmeliğinde (DBYBHY 2007) tanımlanan yatay düzensizliklerin başında burulma düzensizliği gelmektedir. Deprem yönetmeliğine göre burulma düzensizliği, birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta

en büyük görelî kat ötelemesinin ( $\Delta_{i\max}$ ) o katta aynı doğrultudaki ortalama görelî ötelemeye ( $\Delta_{i\text{ort}}$ ) oranı olarak ifade edilmektedir (Şekil 2.23). Bu oran burulma düzensizliği katsayısı ( $\eta_{bi}$ ) olarak tanımlanmaktadır ve 1,2 değerinden büyük olduğu durumlarda burulma düzensizliğinin oluğuğu kabul edilmektedir.



**Şekil 2.23.** Döşemenin rijit diyafram olarak çalıştığı durumda burulma (DBYBHY 2007)

Deprem Yönetmeliğinde, binanın herhangi bir katında burulma düzensizliği olması halinde,  $1,2 < \eta_{bi} \leq 2,0$  olmak koşulu ile,  $\pm\%5$  ek dış merkezliğin, her iki deprem doğrultusu için  $D_i = (\eta_{bi}/1,2)^2$  katsayısı ile çarpılarak büyütülmesi istenmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar burulma düzensizliği katsayısının 2,0 değerini aşmasının pek mümkün olmadığını göstermiştir.

Söz konusu yönetmelik ve dünyada benzer muadilleri genellikle duvarların burulma davranışı üzerindeki etkilerini hesaba katmamasına karşın, yapı planında duvarların düzgün ve simetrik bir şekilde yerleştirilmemesi, burulma düzensizliğini ilk etapta önemli mertebelerde arttırabilmektedir. Her ne kadar yönetmeliklerde ek dış merkezlik veya uluslararası yönetmeliklerdeki tanımıyla kazasal dış merkezlik ile hesaba katılmayan bu ve bunun gibi sebepler ile doğabilecek ek dışmerkezlikler göz önüne alınmaya çalışılsa da, deprem durumunda planda uygun şekilde yerleştirilmeyen dolgu duvarların

dışmerkezlik değişimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceği değerlendirilebilir. Örneğin Livaoğlu (2001) yaptığı parametrik çalışmada, +%5 ek dışmerkezlik etkisindeki yapıda, esnek tarafta bulunan yapı elemanların iç kuvvet değerlerinde ≈%75 oranına varan artmalara neden olduklarını, buna rağmen rijit tarafta bulunan elemanların iç kuvvet değerlerinde ise azalmalara sebep olduklarını göstermiştir. Bu durum düşünüldüğünde yönetmelikte verilen ek veya kazasal dışmerkezlik ( $\pm\%5$ ) etkisinin simetrik ve simetrik olmayan yapılarda önemli mertebelerde yapı davranışını değiştirebileceği anlaşılmaktadır.

### 2.5.2. Yumuşak Kat Etkisi

Yapıların, genellikle zemin katında, ticari amaçlı cam vitrin veya otopark yapılması ve üst katların dolgu duvar ile örülmesi ülkemizde çok sık görülen bir uygulamadır. Bu durumda yapının dolgu duvarlı katlarında rijitlik duvarsız olan katlara göre artmakta, duvarsız katlar ise daha zayıf bir hale gelmektedir. Bu tür durumlarda yatay yüklere maruz kalan yapıda yumuşak kat olarak ifade edilen zemin katta ciddi hasarlar meydana gelmektedir.

Yumuşak kat durumu Türk Deprem Yönetmeliğinde komşu katlar arası rijitlik düzensizliği olarak ifade edilmektedir. Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir i'inci kattaki ortalama görelî (rölatif) kat ötelemesi oranının bir üst veya bir alt kattaki ortalama görelî kat ötelemesi oranına bölünmesi olarak tanımlanan Rijitlik Düzensizliği Katsayısının 2,0'dan fazla ( $\eta_{ki}=(\Delta_i/h_i)_{ort}/(\Delta_{i+1}/h_{i+1})_{ort}>2,0$  veya  $\eta_{ki}=(\Delta_i/h_i)_{ort}/(\Delta_{i-1}/h_{i-1})_{ort}> 2,0$ ) olduğu durumlarda düzensizliğin meydana geldiği kabul edilir.

Ülkemizde yakın zamanda meydana gelen 2011 Van depreminde birçok binada yumuşak kat düzensizliğinden dolayı ciddi hasarlar meydana gelmiştir (Şekil 2.24). ODTÜ Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi tarafından bu depremle ilgili yapılan raporun sonuç kısmında, ortaya çıkan en önemli bulgulardan biri tuğla dolgu duvarların yapı sistemlerinin davranışı üzerinde oynayabildiği belirleyici rolüdür ifadeleri yer almaktadır.

Raporda tuğla duvarın yapıya ciddi rijitlik kazandırdığı ve düzlem içinde kaldıkları müddetçe yapının kat ötelemelerini sınırlayabildikleri vurgulanmıştır (Anonim 2011).



Şekil 2.24. Yumuşak kat düzensizliğinden dolayı yıkılan binalar (Anonim 2011)

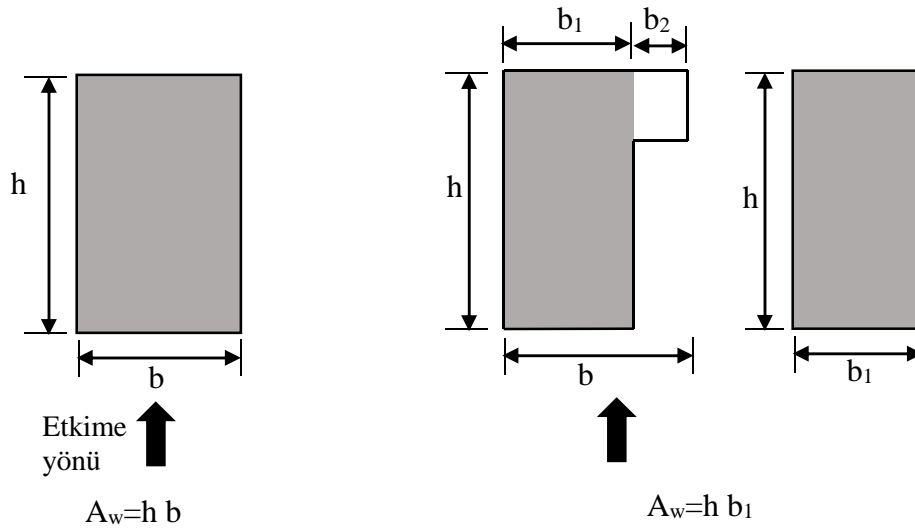
### 2.5.3. Zayıf Kat Etkisi

Depreme dayanıklı yapı tasarımında düşey taşıyıcı elemanların enkesit boyutlarında ani küçülmelerin olması nedeniyle etkili kesme alanı azalır ve bu kat zayıf kat olarak ifade edilir. Türk Deprem Yönetmeliğinde zayıf kat, betonarme binalarda, birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi birinde, herhangi bir kattaki etkili kesme alanının, bir üst kattaki etkili kesme alanına oranı olarak ifade edilmekte ve Dayanım Düzensizliği Katsayısı ( $\eta_{ci}$ ) olarak adlandırılmaktadır. Dayanım Düzensizliği Katsayısı aşağıdaki bağıntılardan hesaplanmaktadır. Bu değer 0,80'den küçük olması durumu komşu katlar arası dayanım düzensizliği olarak tanımlanmaktadır.

$$\eta_{ci} = \frac{(\sum A_e)_i}{(\sum A_e)_{i+1}} < 0,80 \quad (2.20)$$

$$A_e = \sum A_w + \sum A_g + 0,15 \sum A_k \quad (2.21)$$

Bu denklemlerde;  $\Sigma A_e$  herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusunda etkili kesme alanını,  $\Sigma A_g$  herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusuna paralel doğrultuda perde olarak çalışan taşıyıcı sistem elemanlarının enkesit alanlarının toplamını,  $\Sigma A_k$  herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusuna paralel kagir dolgu duvar alanlarının (kapı ve pencere boşlukları hariç) toplamını,  $\Sigma A_w$  herhangi bir katta, kolon enkesiti etkin enkesit gövde alanlarını ifade etmektedir.  $A_w$  ise Şekil 2.25'te belirtildiği gibi hesaplanmaktadır.

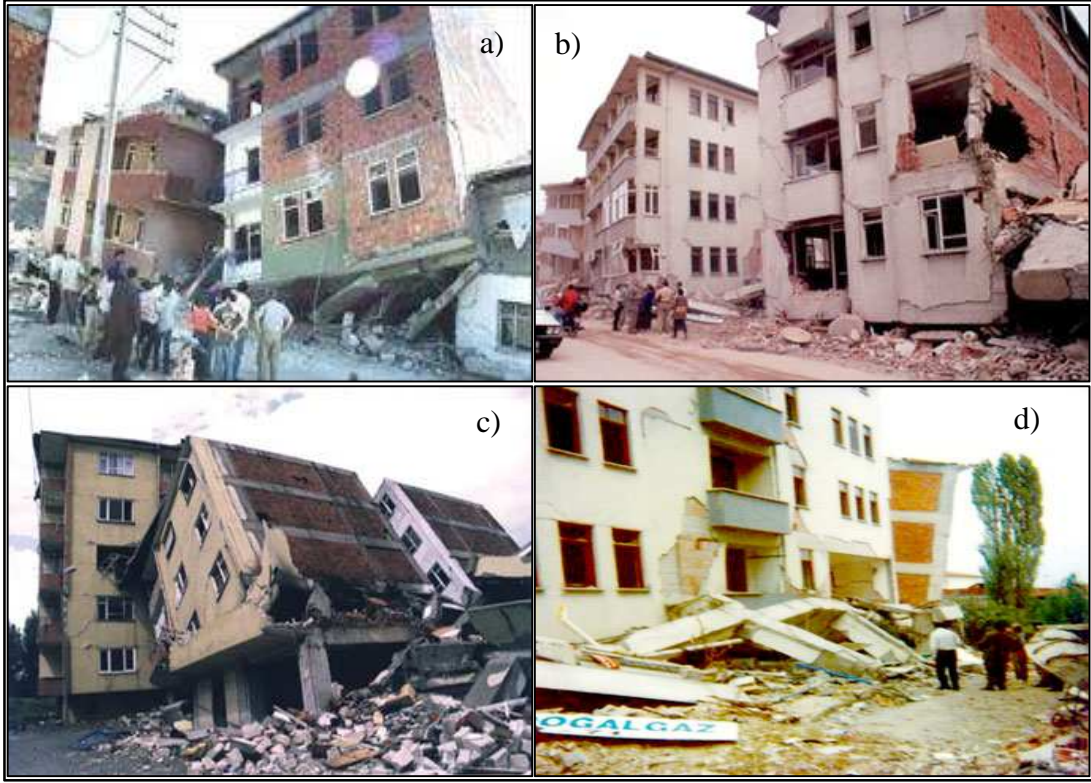


**Şekil 2.25.** Kolon veya Perde etkin gövde alanının belirlenmesi (Doğangün 2014)

Deprem Yönetmeliğinde zayıf kat durumunun bulunduğu binalarda, göz önüne alınan i'inci kattaki dolgu duvarı alanlarının toplamı bir üst kattakine göre fazla ise,  $\eta_{ci}$ 'nin hesabında dolgu duvarları göz önüne alınmayacak ve  $0.60 \leq (\eta_{ci})_{\min} < 0.80$  aralığında taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R),  $1.25(\eta_{ci})_{\min}$  değeri ile çarpılarak her iki deprem doğrultusunda da binanın tümüne uygulanacaktır. Ancak hiçbir zaman  $\eta_{ci} < 0.60$  olmayacaktır. Aksi durumda, zayıf katın dayanımı ve rijitliği artırılarak deprem hesabı tekrarlanacaktır denilmektedir.

Komşu katlar arası rijitlik düzensizliği ve/veya dayanım düzensizliği (zayıf kat) durumunun olduğu binalarda meydana gelebilecek hasarlar Şekil 2.26'da gösterilmiştir. Genellikle zemin katları asma katlı dükkân olan yapılarda zemin katların kat

yüksekliğinin fazla olması ve dükkân içerisinde kolon ile perde istenmemesi neticesinde yapının yeterli rijitliğe sahip olmaması yumuşak kat, yeterli düşey taşıyıcı ve duvar enkesit alanına sahip olmaması zayıf kat oluşmasına sebebiyet vermekte ve önemli miktarda yıkımlar meydana gelmektedir (Şekil 2.26a, b ve d). Zayıf kat oluşumu sadece zemin katta değil zemin kat dışında diğer katlarda da oluşabilmektedir (Şekil 2.26c).

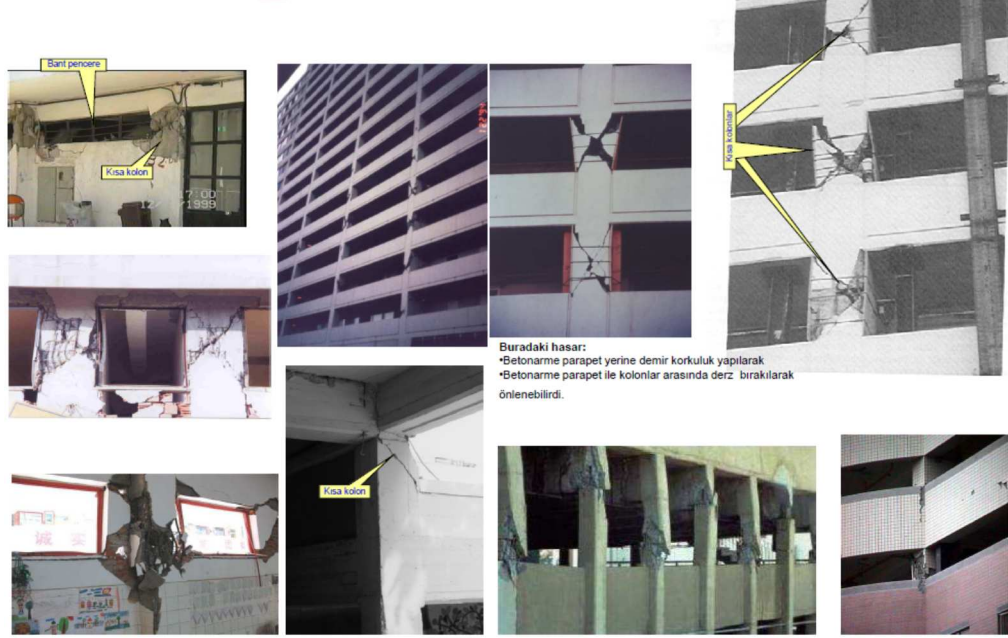


Şekil 2.26. Zayıf kat olan binalarda oluşan hasarlar

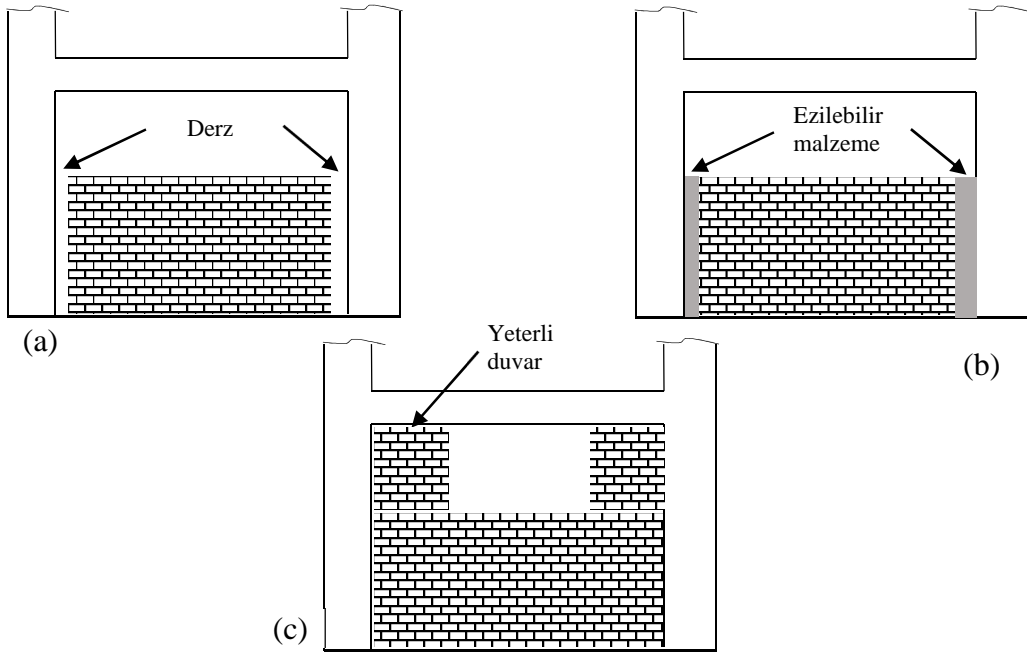
#### 2.5.4. Kısa Kolon Etkisi

Yapılarda kısa kolon oluşmasının birçok farklı sebebi bulunabilir. Ancak bunların en önemlilerinden biri dolgu duvarda farklı amaçlarla pencere boşlukları bırakılmasıdır. Bu durumda kolon belirli bir mesafeye kadar duvar ile desteklenmekte ancak bırakılan pencere boşluğundan dolayı kolonun serbest boyu azalmakta ve rijitliği artmaktadır. Deprem yükleri elemanlara rijitlikleri oranında dağıldığından rijitliği artan kolona daha büyük bir kesme kuvveti etkiyecektir. Tasarım aşamasında kolon için hesaplanan kesme kuvveti kısa kolona gelen kesme kuvvetinden daha küçük olacağından kolonda ciddi

hasarlar meydana gelecektir (Şekil 2.27). Kısa kolon oluşumunu önlemek için farklı önlemler alınabilir (Şekil 2.28).



Şekil 2.27. Kısa kolon hasarları (Topçu 2014)



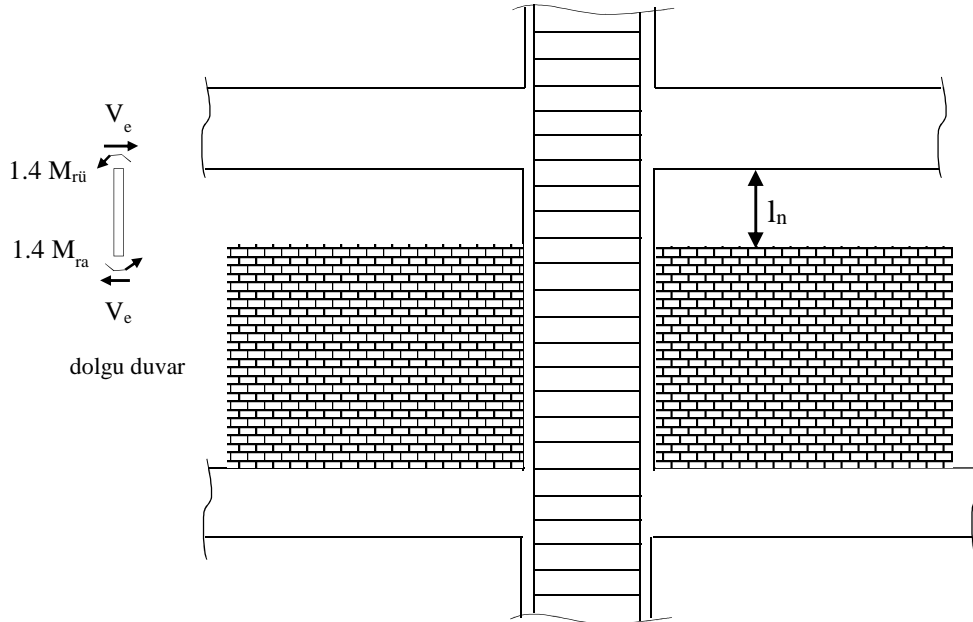
Şekil 2.28. Kısa kolon oluşumunu engellemek için alınabilecek önlemler (Doğangün 2014)

Türk deprem yönetmeliğinde kısa kolon oluşumunun engellenemediği durumlarda, enine donatı hesabına esas alınacak kesme kuvveti için,

$$V_e = \frac{M_a + M_{\bar{u}}}{l_n} \leq \begin{cases} V_r \\ 0,22A_w f_{cd} \end{cases} \quad (2.23)$$

bağıntısı verilmektedir. Bu denklemde  $M_a$  ve  $M_{\bar{u}}$  kolon alt ve üst uçlarındaki kapasite momentleridir ve taşıma gücü momentlerinin 1,4 katı alınarak elde edilir ( $M_a=1,4 M_{ra}$  ve  $M_{\bar{u}}=1,4 M_{r\bar{u}}$ ).  $l_n$  kısa kolonun serbest boyunu,  $V_r$  kolon kesitinin kesme dayanımını,  $A_w$  kolon enkesit etkin gövde alanını ve  $f_{cd}$  ise betonun hesap basınç dayanımını göstermektedir.

Deprem Yönetmeliğinde kısa kolonlarla ilgili geçen diğer bir koşul ise kısa kolon boyunca, kolonların sarılma bölgeleri için tanımlanan minimum enine donatı ve yerleştirme koşullarının uygulanmasıdır. Ayrıca, dolgu duvarların arasında kalarak kısa kolona dönüşen kolonlarda, enine donatıların kat yüksekliği boyunca devam etmesi öngörülmektedir (Şekil 2.29).



**Şekil 2.29.** Kısa kolonların oluşumu (DBYBHY 2007)



### 3.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Dolgu duvarlı betonarme yapılar, hem dünya genelinde hem ülkemizde yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolgu duvarlar genelde binanın kalıcı ağırlığında hesaba katılırlar. Ancak dayanım, rijitlik gibi temel özelliklere katkısı göz ardı edilmektedir. Yapılan deneysel ve analitik çalışmalar aslında dolgu duvarların yapının dayanım, rijitlik ve enerji yutma kapasitesi gibi binanın davranışını etkileyen parametrelere genelde olumlu yönde katkılar yaptığını göstermiştir. Buna ek olarak dolgu duvarda çatlaklar oluşmaya başladıktan sonra bu parametrelerde ciddi bir azalım meydana geldiği ve bu yüzden yapıda ciddi hasarların veya göçmelerin meydana geldiği bilinmektedir. Bu özelliklerin iyileştirilmesi için yapıya çeşitli güçlendirme teknikleri uygulanmaya başlanmıştır. Yapılan bu çalışmalarını daha düzenli bir şekilde özetlemek için iki başlık altında toplamak mümkündür.

#### 3.1.Dolgu duvarlı çerçeveler ile ilgili yapılan çalışmalar

Smith (1967) birbirinden farklı boyutlarda kolon ve kirişlerden oluşan çalışmasını dört dizi şeklinde test etmiştir ve deneyinde 18 adet iki katlı dolgu duvarlı çerçeveyi yatay yüklemeye maruz bırakarak yanal rijitlik ve dayanımlarını elde etmeye çalışmıştır. Sonuçta kompozit bir davranışa sahip olan dolgu duvarlı çerçevelerin yanal rijitliğinin ve dayanımının dolgu duvarın ve çerçevenin sadece mekanik özelliklerine değil aynı zamanda rölatif rijitliklerine de bağlı olduğunu belirtmiştir. Dikdörtgen dolgu duvarlı çerçevelerin yanal rijitliğini elde etmek için eşdeğer basınç çubuğu modeli kullanılarak analiz edilebileceğini belirtmiş ve çubuk etkili genişliğinin kolon ve dolgu duvarın rölatif rijitliğine, dolgunun uzunluk/yükseklik ( $l'/h'$ ) oranına ve yapının yüksekliğine bağlı olduğunu ve aynı zamanda kirişten de bağımsız olduğu sonucuna varmıştır.

Liau ve Kwan (1984), üç farklı eleman kullanarak monotonik yükleme altındaki dolgu duvarlı çerçevelerin davranışını araştırmışlardır. Çerçeve ile dolgu duvar arasındaki etkileşimi temsil etmek için hem kaymaya hem de ayrışmaya duyarlı çubuk elemanlar kullanılmıştır. Dolgu duvar, üçgen düzlemsel gerilme elemanı olarak tanımlanmış ve malzeme çekmede iken lineer elastik gevrek malzeme olarak idealleştirilmiştir.

Çatlamadan önce izotropik olarak kabul edilen malzeme, çatlak oluştuktan sonra ise anizotropik kabul edilmiştir. Basınç durumunda ise malzemenin lineer olmayan şekilde davrandığı varsayılmıştır. Dört katlı ve tek açıklıklı birçok model; test edilmiş ve elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara yakın olduğu görülmüştür.

Zarnic ve Tomazevic (1984) dolgu duvarsız, dolgu duvarlı, güçlendirilmiş dolgu duvarlı ve güçlendirilmiş dolgu duvarlı ankastre çerçeveleri sabit düşey yük altında yanal tekrarlı yüklere maruz bırakarak farklı dolgu duvarlı yapıların davranışını incelemişlerdir. Güçlendirilmiş dolgu duvarlı rijit çerçevelerin yatay yüklere maruz kaldıklarında ilk başta dolgu duvarda çatlak oluşana kadar tek bir yapı sistemi olarak çalıştıklarını belirtmişlerdir. Duvarda çatlak oluştuktan sonra dolgu duvarın yatay dayanıma katkısının azalmadığını ancak gelen yatay yükün önemli bir kısmını kolonlar kesme kırılmasından göçene kadar devraldıklarını belirtmişlerdir.

Liau ve Kwan (1985) bitişik, yarı bitişik ve bitişik olmayan dolgu duvarlı çerçevelerin statik ve tersinir yükler altındaki davranışını çalışmışlardır. İlk önce dolgu duvarın statik yükler altında yük-deplasman davranışı, gerilme dağılımları ve göçme türlerini incelemişlerdir. Daha sonra ise tersinir yükler altında histerik özelliklerini, enerji sönüm kapasitelerini ve azalım özelliklerini değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak bitişik dolgu çerçevelerin diğer iki çeşit çerçeveye oranla yapısal olarak daha üstün olduğunu belirtmişlerdir. Bu tür yapıların bir yandan daha rijit ve daha dayanıklı olduğunu diğer taraftan ise daha düşük bir azalım oranına sahip olmasından dolayı daha sünek ve daha güvenilir olduğunu belirtmişlerdir.

Zarnic ve Tomazevic (1988) yaptıkları deneysel çalışmada birbirinden farklı özelliklerde 28 adet dolgu duvarlı çerçeve kullanarak yatay tersinir yükler altındaki davranışlarını test etmişlerdir. Daha sonra bunların 9 tanesi iki farklı güçlendirme tekniği kullanılarak yeniden teste tabi tutulmuştur. Sonuçta dolgu duvarlı çerçevelerin yanal dayanım ve rijitliklerinin dolgu duvarsız çerçeveye göre önemli derecede büyük olduğunu ve çoğu durumda dolgu duvarlı sistemin yanal dayanımının dolgu duvarsız olana oranla % 25 daha büyük olduğunu belirtmişlerdir.

Gülkan ve Wasti (1993) yaptıkları çalışmada tek katlı ve tek açıklıklı çerçevenin davranışını artan yanal yük altında incelemiştirlerdir. Çerçeve elastik, elastik kolon-kiriş ve dolgu ise lineer olmayan iki boyutlu izoparametrik elemanlar ile modellenmiştir. Dolgu malzemesinin ise Mohr-Coulomb kırılma hipotezine göre davrandığı kabul edilmiştir. Sonuç olarak dolgu duvarın sistemin rijitliğini arttırdığını ancak tasarımda kısa kolon etkisinin yaratılmamasını ve dolgu duvarın kısmi olmasından kaçınılmasını önermiştir. Diğer taraftan, dolgu duvarlı sistemde, kolonda meydana gelen kesme kuvvetinin boş çerçeveye oranla 4-5 kat arttığını belirtmiştir. Ayrıca hesaplarda dolgu duvarın etkisinin ihmal edilmesinin kesit boyutlandırmasında ve periyot hesabında hatalara sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

Saneinejad ve Hoobs (1995) beton ve tuğla dolgu duvarlı çelik çerçevelerin tasarım ve analizi için eşdeğer çapraz çubuk yaklaşımına dayanarak yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem dolgu duvarlı çerçevelerin elasto-plastik davranışını dikkate alarak dayanım, rijitlik, çatlama yükü gibi birçok parametreyi belirlemeye çalışmaktadır.

Mehrabi ve ark. (1996) tek katlı, tek açıklıklı ve 1/2 ölçekli on iki adet dolgu duvarlı çerçeveyi test etmişlerdir. Bu çalışmada boy-en oranı (h/l), düşey yük dağılımı, yanal yükleme geçmişi ve dolgu duvarın onu saran çerçeveye göre dayanım parametreleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar uygun bir şekilde tasarlanan dolgu duvarın betonarme çerçevenin performansını arttırdığını göstermiştir. Ayrıca dayanım ve enerji azalım kapasitesi göz önüne alındığında güçlü çerçeve güçlü dolgunun zayıf çerçeve zayıf dolguya göre daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür. Zayıf çerçeve güçlü dolgulu numunelerde ise kolonlarda kesme kırılmaları gözlenmiş ve bu dezavantajlı durumun yapının stabilitesini olumsuz yönde etkilediği vurgulanmıştır.

Asteris (1996) yatay yüke maruz dolgu duvarlı çerçeveleri sonlu elemanlar yardımıyla yeni bir yaklaşımla (temas noktaları yöntemi) modellemiş ve dolgu duvarın onu saran çerçeve üzerindeki etkilerini incelemiştir. Adım adım işleyen bu model şu şekilde özetlenebilir. İlk başta dolgu duvarın çerçeveye sadece her iki diyagonal uçlarından bağlı olduğu kabul edilerek analiz yapılır. Yatay yük uygulandığında dolgu duvar ve çerçeve birbirinden ayrılmış ve sadece köşelerde birbirine bağlı kaldığı gözlenmiştir. Daha sonra

bu işlem denge durumuna ulaşıncaya kadar tekrar edilir. Bu yöntemle yatay yüklerin, dolgu duvarın elastik özelliklerinin, geometrisinin ve çok katlı çok açıklıklı çerçeve sistemlerinin etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak bu yöntemin lineer olmayan davranışı temsil edebildiğini, önceki deneysel çalışmalar ile örtüştüğünü ve dolgu duvarın elastisite modülünün yük-deplasman üzerinde etkili olduğunu açıklamıştır. Bunun yanında dolgu duvar geometrisinin (h/l) yapının yük-deplasman özelliklerini etkilediğini de belirtmiştir.

Mosalam ve ark. (1996) yaptıkları deneysel çalışmada dolgu duvarların geometrisinin sistem üzerindeki etkisini yarı statik ve pseudo-dinamik yüklemeleri kullanarak araştırmışlardır. Daha sonra bu çalışmalarını sonlu elemanlar yardımıyla modelleyip birbiriyle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak sonlu eleman modelinin dolgu duvardaki boşluğu temsil edebileceğini ve çatlakların önce duvarın ortasında meydana geldiğini daha sonra ise diyagonalin köşelerine doğru ilerlediğini gözlemlemişlerdir.

Mehrabi ve Shing (1997) dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin yatay yükler altındaki davranışını sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla analiz etmişlerdir. Bu çalışmalarında harç birleşim bölgelerinin ara yüz davranışını modellemek için yeni bir model geliştirmişlerdir. Daha önce deneysel çalışmaları yapılmış bir adet dolgu duvarsız dört adet dolgu duvarlı betonarme çerçevenin analiz edildiği çalışmada elde edilen sonuçlar yapılan modelin dolgu duvarlı çerçevelerde görülen göçme ve çatlama mekanizmalarını belirleyebildiğini göstermiştir. Buna ek olarak aderansın boş çerçeve davranışı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu ancak dolgu duvarlı çerçevenin davranışında etkisinin olmadığını belirtilmişlerdir.

Crisafulli (1997) yaptığı kapsamlı doktora çalışmasında dolgu duvarlı çerçevelerin davranışını anlamak için kullanılan tek diyagonal basınç çubuğunun davranışı tam olarak temsil edemediğini bunun yerine davranışı daha iyi temsil eden çoklu çubuk modellemelerinin veya sonlu eleman modelinin kullanılmasını tavsiye etmiştir. Tek katlı, tek açıklıklı, 3/4 ölçekli dolgu duvarlı iki adet çerçeve sisteminin yarı statik yükler altında test edildiği çalışmasında yükleme sisteminin test sonuçlarını belirgin bir şekilde etkilediğini göstermiştir. Buna ilaveten tek açıklıklı, tek katlı ve çok açıklıklı, çok katlı dolgu

duvarlı çerçeveler, sistemin davranışını daha iyi anlamak için sonlu elemanlar programı yardımıyla modellenmiştir. Bu modellerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Dolgu duvarlı çerçeveler kompozit yapılardır ve davranışları karmaşıktır. Dolgu duvarlar yer değiştirmeyi azaltmak için yapıya rijitlik sağlarken, onu çevreleyen çerçeveler ise sünekliği artırır.
- Dolgu duvarlı çerçeve sistemler yanal yükleme altında lineer olmayan bir davranış sergilerler.
- Dolgu duvarlı çerçeveler malzeme sönümü, dolgu duvarın ve çerçevenin elastik olmayan davranışı ve dolgu duvar-çerçeve arasında meydana gelen sürtünmeden dolayı büyük bir enerji tüketme kapasitesine sahiptir.
- Kesme çatlakları, hem harç kısmında hem tuğlalar arasında, en yaygın olan çatlak türüdür. Bunun yanında basınç kırılması ve eğilme kırılması da görülebilir.
- Dolgu duvarlı çerçevelerin davranışını etkileyen birçok parametre vardır. Ancak deneysel sonuçlar davranışı etkileyen en önemli parametrelerin panelin çerçeveye olan rölatif rijitliği, dolgu duvarın dayanımı ve çerçevenin eğilme, kesme ve eksenel basınç kapasitesi olduğunu göstermiştir.

Mosalam ve ark. (1997) çalışmalarında 1/4 ölçekli, yarı rijit olarak birbirine bağlı çelik çerçeve ve güçlendirilmemiş beton duvar kullanarak bitişik olmayan bir dolgulu çerçeve sistemi üzerinde çeşitli deneyler yapmışlardır. Bu deneylerde açıklık sayısının, duvardaki pencere ve kapı açıklıklarının beton bloklar ve harcın rölatif dayanımının davranışa olan etkisi incelenmiştir. Üç farklı yer değiştirme modeli uygulanan çalışmada her üç durumun etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Sonuç olarak beton blokların dayanımı düşük ise diyagonal köşelerin ezilmesine, dayanımı büyük ise harcın diyagonal boyunca çatlamasına sebep olduğu görülmüştür. Duvarda boşluk olması yatay yükler altında duvar rijitliğini % 40 oranında azaltmıştır. Ayrıca iki açıklıklı numunenin başlangıç rijitliği duvar çatladıktan sonra yarı yarıya azalmıştır.

Ghosh ve Amde (2002) çelik çerçeveli dolgu duvarlı çerçeveler üzerinde yapılan deneysel çalışmaları sonlu elemanlar yardımıyla modelleyip sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında tuğlalar ve dolgu duvar ile çerçeve arasında bulunan harç malzemeyi ara yüz eleman olarak modellemişlerdir. Bu ara yüz elemanı önceki deneysel çalışmalara

bağlı olarak elde edilmiştir. Daha sonra tuğla ve harç malzemelerini ayrı modellemeyi ihmal edip dolgu duvarı homojen bir malzeme olarak modellemiştir. Sonlu elemanlar modelinden elde edilen sonuçlar analitik modelin dolgu duvarlı çerçevelerin yük taşıma kapasitesini tahmin etmekle kalmayıp aynı zamanda göçme türü, süneklik ve çatlama hakkında detaylı bilgiler de sağladığını göstermiştir. Buna ek olarak, köşe kırılması ve diyagonal çatlamanın en genel iki göçme türü olduğu ifade edilmiştir.

El-Dakhkhni ve ark. (2003) beton dolgu duvarlı çelik çerçeveler için yeni bir analitik model önermişlerdir. Dolgu duvarın davranışını temsil etmesi için üç eşdeğer çubuğun kullanıldığı modelde, dolgu duvarlı çerçevelerin rijitlik ve yanal yük kapasitesi belirlenmektedir. Daha önce yapılan deneysel çalışmaların modellenerek test edildiği ve sonuçların karşılaştırıldığı çalışmada, önerilen modelin göçmedeki yanal rijitliği ve yük taşıma kapasitesini önemli bir oranda belirleyebildiği görülmüştür. Bu çalışmada önerilen modelin sonlu elemanlar programı ile kolay bir şekilde modellenilebildiği belirtilmiştir.

Asteris (2003) dolgu duvarlı çerçevelerin yanal yükler altındaki davranışını anlamak için yeni bir sonlu elemanlar modeli önermiştir. Asteris bu çalışmasında dolgu duvardaki boşluk oranının ve bu boşluğun yerinin rijitlik ve dayanıma olan etkisini tek açıklıklı ve tek katlı çerçeve olarak modelleyip incelemiştir. Daha sonra bu çalışmasını çok katlı yapılarda da uygulamıştır. Sonuçlar dolgu duvarın varlığının ve sürekliliğinin kesme kuvveti dağılımını önemli derecede etkilediğini göstermiştir. Duvardaki boşluk oranı artarken dolgu duvarlı çerçevenin yanal rijitliği azalmıştır. Dolgu duvarın varlığı çerçevedeki kolonlarda meydana gelen kesme kuvvetlerini azaltmıştır. Ancak giriş katı yumuşak kat olan çok katlı yapılarda kolonlarda oluşan kesme kuvvetinin sadece çerçeveden oluşan sistemdeki kolonlarda oluşan kesme kuvvetinden daha büyük olduğu görülmüştür. Çok katlı yapılarda dolgu duvarların çerçevenin yanal dayanım ve rijitliğine önemli bir katkı sağladığını ve bütün katlarda duvar kullanılması halinde yanal ötelenmenin %77 oranında azalacağını belirtmiştir.

Tetik (2007) tez çalışmasında dolgu duvarların betonarme yapıların davranışı ve periyodu üzerinde nasıl bir etki yarattığını irdelenmiştir. Mevcut yapıların bilgisayar programı SAP2000 yardımıyla modellendiği çalışmada dolgu duvarlar iki ucu mafsallı çapraz

çubuklar olarak idealize edilmiştir. Sonuç olarak, dolgu duvarların yapının rijitliğini önemli ölçüde arttırdığı ve yapı periyodunda önemli azalmalara sebep olduğu görülmüştür. Duvarda boşluk olmaması halinde, yapı periyodunda %60'a varan azalmalar görülmüştür.

Al-Chaar ve ark (2008) daha önce deneysel çalışması yapılmış zayıf ve yüksek dayanımlı iki farklı dolgu duvarlı betonarme çerçeveyi DIANA sonlu eleman programı yardımıyla modellemişlerdir. Sürekli ve ara yüz modelleri olmak üzere iki farklı yaklaşımın dikkate alındığı çalışmada elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Zayıf dayanımlı dolgu duvarda göçme kesme kırılması ve dolgu duvardaki derzlerdeki kayma şeklinde meydana gelirken, sağlam dayanımlı duvarda ise duvarda diyagonal çatlak ve kolonda kesme kırılması şeklinde oluşmuştur. Sonuç olarak, her iki modelde de dolgu duvarlı betonarme çerçeveler için kullanılan yöntemlerin deneysel testlerden elde edilen sonuçlarla uyduğu ve bu yöntemlerin sonlu elemanlar programları yardımıyla kullanılmasının uygun olduğu belirtilmiştir.

Mohebkah ve ark (2008) daha önce deneysel çalışması yapılmış olan dört dolgu duvarlı çelik çerçeve üzerinde ayırık elemanlar yöntemini kullanarak analitik bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapı açıklığının duvardaki konumunun çerçeve yanal rijitlik, süneklik ve göçme yükü üzerinde etkilerini araştırmak üzere yapılmıştır. Sonuç olarak, yapılan çalışmanın dolgu duvarlı çelik çerçevenin davranışını ve göçme mekanizmasını modelleyebildiğini belirtilmiştir.

Köse (2009) dolgu duvarlı betonarme binaların periyodunu etkileyen faktörler üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada bina yüksekliği, açıklık sayısı, perde duvar alanının kat alanına oranı, dolgu duvar oranı ve çerçeve türü olmak üzere beş farklı parametre dikkate alınmıştır. Sonuç olarak binanın periyodunu etkileyen en önemli parametreler sırasıyla bina yüksekliği, perde duvar oranı ve dolgu duvar oranı olarak ifade edilmiştir. Bunun yanında, çerçeve türü ve açıklık sayısı parametreleri ise daha az etkili olduklarından periyod hesabında göz ardı edilmiştir.

Pujol ve Fick (2010) yaptıkları deneysel çalışmada üç katlı betonarme bir yapıyı duvarsız ve duvarlı halde olmak üzere iki aşamalı olarak test etmişlerdir. Duvarların bulunmadığı, sadece çerçevenin bulunduğu ilk aşamada yapının döşeme kolon birleşim bölgelerinde kesme kırılmaları meydana gelmiştir. İkinci aşamada ise duvarlar inşa edilen yapı tersinir yükler altında test edilmiştir. Sonuç olarak dolgu duvarların yapının temel kesme dayanımını %100 ve yanal rijitliğini ise %500 oranında arttırdığını belirtmişlerdir.

Yuen ve Kuang (2012) yaptıkları analitik çalışmada dolgu duvarlı betonarme çerçeveleri tek eksenli ve iki eksenli deprem hareketine maruz bırakarak davranışı incelemişlerdir. Boş çerçeve, dolgu duvarlı çerçeve ve 2/3'ü dolgu duvarlı çerçeve olmak üzere üç farklı çerçeve sistemini sonlu elemanlar programı yardımıyla test etmişlerdir. Sonuç olarak, tek eksenli basınç altındaki dolgu duvarın sistemin stabilitesini ve enerji tüketme kapasitesini arttırdığını belirtmişlerdir. İki eksenli durumda ise dolgu duvarın düzlem dışı göçmesi ile stabilitesinin bozulduğu ifade edilmiştir. Buna ek olarak, dolgu duvarın sistemin doğal titreşim periyodunu yaklaşık olarak %55-60 oranında azalttığını gözlemlemişlerdir.

Resta ve ark. (2013) lineer olmayan sonlu eleman analizi kullanarak yığma kuleleri katı ve temas türüne göre (ayrık, şerit ve sürekli) kabuk elemanlar olmak üzere dört farklı şekilde modelleyerek analiz etmişlerdir. Malzeme modeli olarak genelde beton ve diğer gevrek malzemeler için kullanılan “damage plasticity constitutive” malzeme modelini yığma yapılara adapte etmişlerdir. Daha etkili bir modelleme yöntemi belirleyebilmek için analiz süresi ve maliyet dikkate alınarak bu dört modelden elde edilen analizler üzerinde sonuçlar irdelenmiştir. Katı üç boyutlu modelin, literatürde mevcut olan deneysel ve sayısal verilere dayanarak, diğer modellere oranla daha gerçekçi sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır. Sonuçlar, kabuk sonlu eleman modellerin, yerel etkiler dikkate alındığında, katı elemandan daha az güvenilir olduğunu göstermiştir. Buna ek olarak, damage plasticity constitutive malzeme modelinin yığma yapıların statik ve dinamik davranışı için kullanılabileceği belirtilmiştir.



### 3.2. Güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçeveler ile ilgili yapılan çalışmalar

Canbay (2001) çalışmasında, betonarme dolgulu çerçevelerin davranış ve dayanımlarını hem deneysel hem analitik araştırmalar yaparak incelemiştir. Deneysel araştırmasında, ülkemizdeki binalarda sık rastlanan kusurların olmasına özen göstererek, iki katlı, üç açıklıklı, 1/3 ölçekli bir betonarme çerçeve üretilip tersinir tekrarlanır yükler altında hasar görünceye kadar yüklemiştir. Daha sonra bu çerçevenin orta gözü betonarme bir duvar ile güçlendirilmiş ve deney elemanını aynı tür yükler ile test etmiştir. Analitik kısımda ise çerçeveyi limit analizi kullanarak çözümlenmiş ve paket programlarla modellemiştir. Sonuç olarak, betonarme duvar ile güçlendirilmiş çerçevenin rijitliğinin boş çerçeveye oranla 15 kat, yatay yük taşıma kapasitesinin ise yaklaşık 4 kat arttığını gözlemlemiştir.

Santa-Maria ve ark. (2004) iki farklı polimer çeşidi kullanarak 24 adet dolgu duvar çapraz doğrultuda basınca maruz bırakılmıştır. CFRP şeritler yatay ve çapraz olarak iki farklı şekilde uygulanmıştır. Sonuçlar güçlendirmenin çatlak genişliğini azalttığını ve duvarın kesme dayanımını arttırdığını göstermiştir. Buna ilaveten çapraz olarak bağlanan CFRP şeritlerin yatay bağlanan şeritlere göre dayanım ve rijitliği daha fazla arttırdığı belirtilmiştir.

Saatçioğlu ve ark. (2005), her ikisi de 1/2 ölçekli olmak üzere dolgu duvarlı ve her iki yüzü CFRP şeritlerle güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeveyi tersinir tekrarlı yükler altında test etmişlerdir. Sonuç olarak, dolgu duvarlı çerçevenin hem duvarlarında hem de betonarme elemanlarında çatlakların oluştuğunu gözlemlemiştir. CFRP şerit kullanımının yapının elastik kapasitesini arttırdığını, çatlakları kontrol ettiğini ve yapının yanal yük kapasitesini arttırdığını ifade etmişlerdir. Buna ek olarak, güçlendirmenin yapının dayanımını arttırdığını ancak sünekliğe bir katkısının olmadığını belirtmişlerdir. Buna gerekçe olarak, CFRP şeritler koştuktan sonra duvar dayanımının güçlendirilmemiş duvarla aynı dayanıma düştüğünü göstermişlerdir.

Erdem ve ark. (2006) çalışmalarında iki farklı güçlendirme tekniği kullanarak deneyler yapmışlardır. Üç açıklıklı, iki katlı ve 1/3 ölçekli betonarme çerçeve sistemi biri betonarme dolgu duvar kullanılarak diğeri ise CFRP şeritler yardımıyla güçlendirilmiş ve

tersinir tekrarlanır yarı statik yükler altında test edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çerçeveler tasarlanırken Türkiye’de mevcut yapılarda yaygın olan kusurların olmasına özen gösterilmiştir. Deneysel sonucuna göre her iki güçlendirme tekniği de rijitlik ve dayanımı önemli oranda arttırmıştır. Betonarme dolgu duvar ile güçlendirilen çerçevenin başlangıç rijitliği diğerine göre daha yüksek çıkmıştır. Her iki testin dayanımları aynı çıkmasına rağmen dayanım azalması CFRP şeritlerle güçlendirilen numunede daha belirgin bir şekilde gerçekleşmiştir. Ayrıca CFRP şeritlerin binada kolay uygulanabilir olmasının büyük bir avantaj olduğu belirtilmiştir.

Almusallam ve Al-Salloum (2007) güçlendirilmemiş (kontrol), GFRP ve epoxy ile onarılmış ve GFRP ile güçlendirilmiş olmak üzere üç farklı dolgu duvar (1/1 ölçekli) ve çerçevenin (1/2 ölçekli) davranışını deneysel olarak incelemiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında güçlendirilmiş olan numunenin diğerlerine oranla daha sünek olduğu bunun sebebinin ise GFRP malzemesinin sünek davranışından dolayı olduğu belirtilmiştir. Onarılmış numunenin yük taşıma kapasitesi kontrol numunesine oranla %6, güçlendirilmiş olanın ise %11 artmıştır. Deplasmanlar dikkate alındığında ise kontrol numunesine oranla onarılmış numune 1,5 kat, güçlendirilmiş numune ise 2 kat artmıştır.

Anıl ve Altın (2007) boşluklu ve farklı boy/en oranına sahip güçlendirilmiş dolgu duvarları betonarme çerçeve içerisine yerleştirilerek tersinir tekrarlanır yükler altında test etmişlerdir. Test elemanları 1/3 ölçekli, tek katlı ve tek açıklıklı dolgu duvarlı betonarme çerçeve olarak tasarlanmış olup uygulamada sıkça görülen zayıf kolon-güçlü kiriş bağlantısı dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, dolgu duvardaki boşluğun konumunun elemanın dayanım ve rijitliğini etkilediği, pencere boşluğunun elemanın rijitliğini, dayanımı ve enerji tüketme kapasitesini azalttığı, boy/en oranının elemanın kat sapma oranını etkilediği ve dolgu duvarlı elemanın boş çerçeveye oranla daha fazla enerji tükettiği belirtilmiştir.

Altın ve ark. (2007) deneysel çalışmalarında 1/3 ölçekli, tek açıklıklı ve tek katlı ürettikleri on adet çapraz CFRP şeritlerle güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçeveyi tekrarlı yatay yüklere maruz bırakmışlardır. Bu çalışmalarında CFRP şeritlerin genişliğinin ve yerleşiminin numunenin davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Test sonuçları

CFRP şeritlerin yanal rijitlik ve dayanımı önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Tek yüzeye uygulanan CFRP şeritlerle kıyaslayınca, her iki yüzeye uygulanan CFRP şeritler yanal dayanımı 2,18 ile 2,61 katı kadar arttırdığı gözlenmiştir. Yanal rijitlikte ise 4,00 ile 6,00 arasında bir artış gözlenmiştir. Bunun yanında CFRP şerit genişliği  $0,13d_w$  'dan  $0,20d_w$  'ya arttırılınca her iki yüzeye CFRP kullanılan numunelerde rijitlik % 50 artarken, tek yüzeye uygulananda ise % 31 ile % 36 arasında artış meydana gelmiştir. Ayrıca şerit genişliğinin şekil değiştirme üzerinde etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

Akın ve ark. (2011) 1/3 ölçekli, tek açıklıklı ve iki katlı 4 adet boy-en (h/w) oranı 0,40 ve 4 adet boy-en oranı 1,54 ve 1,15 olan betonarme çerçeveyi test etmiş ve yanal rijitlik, dayanım ve enerji tüketme kapasitesini incelemişlerdir. Deney sonuçları bu yöntemle yapılan güçlendirmenin çerçevenin yanal yük kapasitesini arttırdığını göstermiştir. Güçlendirilmiş çerçevelerde, kolonlarda sürekli donatıların kullanılması çerçevenin hem dayanımını hem de rijitliğini arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca CFRP şeritlerin, boy-en (h/w) oranına bakılmaksızın, çerçevenin enerji tüketme kapasitesini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Özsayın ve ark. (2011) 1/3 ölçekte yaptıkları deneylerde, 18 tanesi CFRP ile güçlendirilmiş olmak üzere toplam 36 adet delikli tuğla duvarı iki eksenli basınç veya diyagonal çekmeye maruz bırakarak duvar boyutları, tuğla boyutları, harç türü ve CFRP şeritlerin uygulanma şekli parametreleri üzerinde irdelemeler yapmışlardır. Daha sonra buradan elde ettikleri sonuçları analitik yöntemlerle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak yüklemenin tuğla deliklerine paralel olduğu durumlarda basınç dayanımının arttığını, deliklerin yüklemeye dik olduğu durumlarda ise şekil değiştirme özelliğinin arttığını belirtmişlerdir. Kayma dayanımındaki iyileşme, kullanılan her iki tür CFRP düzeninde de birbirine yakın çıkmıştır. Harç kalitesinin duvarın basınç ve kayma dayanımında etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Bunlara ilaveten güçlendirilen duvarın kayma dayanımının makul bir kesinlikte bulunabileceğini belirtilmiştir.

#### 4. ÇALIŞMANIN AMACI ve KAPSAMI

Dolgu duvarlardan oluşan yapı sistemleri ile ilgili yapılan araştırmalar elli yılı aşkın bir süredir devam etmektedir. Bu çalışmalar özellikle dolgu duvarları oluşturan malzemelerin birbirinden farklı mekanik özelliklerinin olması nedeniyle karmaşık hale gelen davranışı anlamak üzerine yoğunlaşmıştır. Diğer taraftan hesap kolaylığı açısından gerek tasarıma esas hesaplarda, gerekse performans tahminlerinde göz ardı edilen dolgu duvar parametresinin yapı davranışı üzerindeki etkisinin hesaba katılması ile ilgili olarak çalışmalar devam etmektedir. Yapılan çalışmalar çerçeveli sistemlerde kullanılan dolgu duvarların yerine eşdeğer basınç çubukları yerleştirilerek idealize edilebileceğini göstermiş, bu konuda yapılan birçok araştırma bu yöntemin doğruluğunu ortaya koymaya çalışmıştır. Ancak araştırmalar, yatay yüklere maruz kalan yapıda dolgu duvarların çerçeve ile birlikte çalıştığını, fakat yatay yük taşıma kapasitesine ulaşan duvarın gevrek bir şekilde kırıldığını ve yükün tamamının çerçeveler tarafında taşınmaya başladığını göstermiştir. Dolgu duvarlı çerçevelerin yanal rijitlik ve dayanımını iyileştirmek için birçok analitik model (Smith 1966, Fiorato ve ark. 1970, Liauw ve Kwan 1985, Saneinejad ve Hoobs 1996) önerilmiştir. Ancak bu analitik modeller kırılma türlerini tam olarak yansıtamamıştır. Kırılma türlerinin daha detaylı bir şekilde anlaşılması için araştırmacılar dolgu duvarlı çerçevelerin davranışını bilgisayar yardımıyla modelleme yoluna gitmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı, tuğla ve gazbeton dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin davranışını analitik ve sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak irdelemektir. Daha önce deneysel çalışması yapılmış tek katlı ve tek açıklıklı 1/1 ölçekli betonarme çerçeve sistemi, bilgisayar programı yardımıyla modellenmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve dolgu duvarın çerçeve davranışına olan etkileri incelenmiştir.

Buna ek olarak, literatürde mevcut olan farklı eşdeğer basınç çubuğu modelleri sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla bilgisayar ortamında modellenmiş ve analiz sonuçları deneylerde elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

## 5. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında gaz beton ve tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçeveler sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek statik itme analizi yapılmıştır. Bunlara ek olarak, literatürde mevcut olan, dolgu duvarların davranışını idealize etmek için önerilen farklı eşdeğer basınç çubuğu modellerinin etkinliği yine sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar aşağıda ayrıntılarıyla açıklanmaktadır.

### 5.1. Malzeme Modelleri

#### 5.1.1. Beton ve Donatı Modeli

Betonun basınç ve çekme altındaki davranışı birçok parametreden etkilendiğinden gerilme-şekil değiştirme ilişkisini yaklaşık yöntemlerle veren modeller birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiştir. Bu modellerin en yaygın olanları daha önce Bölüm 2.3.1’de belirtilmişti. Bu çalışmada, KTÜ Yapı ve Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilen gaz beton dolgu duvarlı betonarme çerçevenin analizi ve Arslan (2013) tez çalışmasından alınan tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçevenin analizi için literatürde sıkça kullanılan Popovics (1973), Saenz (1964) ve Thompson ve Park tarafından önerilen beton malzeme modelleri kullanılmıştır. Bu malzeme modelleri aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

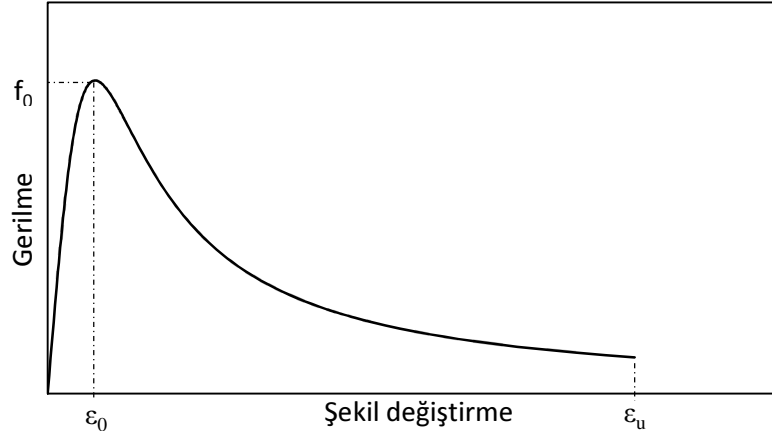
Popovics (1973) tarafından önerilen betonun gerilme şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki bağıntılarla ifade edilmiştir. Bu denklemdaki ikinci kısım davranışın elastik kısımdan ne kadar bir sapma oranı ile saptığını ifade etmektedir. Bu modele göre betonun gerilme şekil değiştirme ilişkisi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

$$f = f_0 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \frac{n}{n - 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^n} \quad (5.1)$$

$$\epsilon_0 = k \cdot 10^{-4} \sqrt[4]{f_0} \quad (5.2)$$

$$n(\text{concrete}) = 0,4 \cdot 10^{-3} f_0 + 1,0 \quad (5.3)$$

$$E = \frac{10^4}{k} \frac{f_0 + 2500}{\sqrt[4]{f_0}} \text{ (Psi)} \quad (5.4)$$



**Şekil 5.1.** Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Popovics 1973)

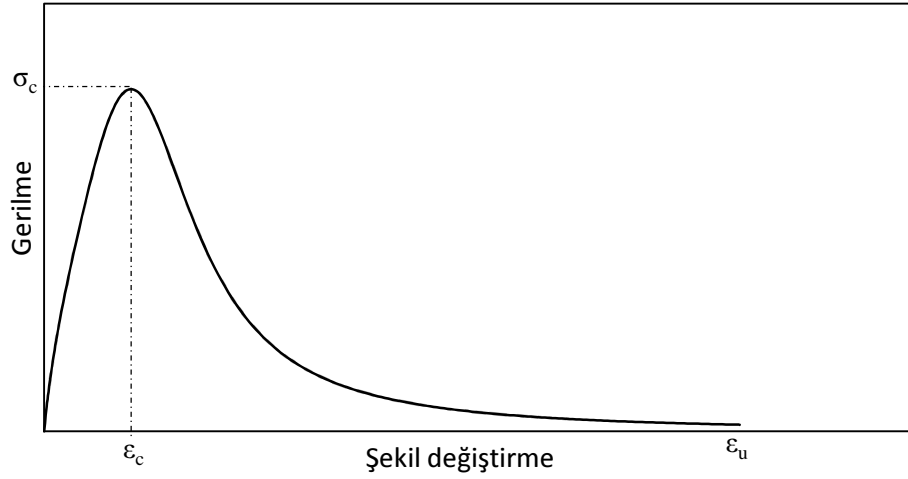
Bu eşitliklerde  $f_0$  beton maksimum basınç dayanımı (Psi) ve  $\varepsilon_0$  ona karşılık gelen şekil değiştirme değeri,  $n$  ise beton basınç dayanımının yaklaşık fonksiyonunu göstermektedir. Bu denklemlerde kullanılan  $k$  değeri agrega türünün fonksiyonu olmak üzere yaklaşık olarak  $2-2,7 \text{ in}^{1/2}/\text{lb}^{1/4}$  alınmaktadır.

Saenz (1964) tarafından önerilen tek eksenli gerilme şekil değiştirme ilişkisi ise aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + (R + R_E - 2)\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right) - (2R - 1)\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2 + R\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^3} \quad (5.5)$$

$$R = \frac{R_E(R_\sigma - 1)}{(R_\varepsilon - 1)^2} - \frac{1}{R_\varepsilon} \quad (5.6)$$

Bu denklemlerde  $R_E = \frac{E_c}{E_0}$  ve  $R_\sigma = \frac{f'_c}{\varepsilon_0}$  olmak üzere  $\varepsilon_0=0,0025$ ,  $R_\varepsilon=4$  ve  $R_\sigma=4$  olarak alınması önerilmektedir. Bu modele göre betonun gerilme şekil değiştirme ilişkisi Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.2.** Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Saenz 1964)

Bu çalışmada yapılan beton malzeme modellerine ek olarak sonlu eleman analizlerinde literatürde yaygın bir kabul gören Thompson ve Park modeli de kullanılmıştır. Thompson ve Park modeli, boşalma-yükleme yollarının tanımlanmasına yöneliktir ve  $\sigma$ - $\epsilon$  zarf eğrisi olarak geliştirilmiş Kent ve Park modelini kullanmaktadır (Şekil 5.3). Şekilden görüleceği gibi  $\epsilon_c < \epsilon_{c0}$  olduğu durumlarda ( $\epsilon_{c0}=0,002$ ) yükün boşalma eğrisi  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisinin orijindeki teğetine paralel olmaktadır. Eleman tekrar yüklendiğinde de,  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi aynı yolu izlemektedir.  $\epsilon_c > \epsilon_{c0}$  olduğu durumlarda ise, yükün boşalma eğrisi iki doğru ile gösterilmektedir. Boşalma sırasındaki gerilmenin ilk bölümünün eğimi sonsuz, bu gerilmeden sıfır gerilmeye kadar olan bölümün eğimi ise,  $0,5E_c F_{ci}$  olarak tanımlanmaktadır.  $E_c$  ve  $F_{ci}$  aşağıdaki bağıntılardan hesaplanmaktadır.

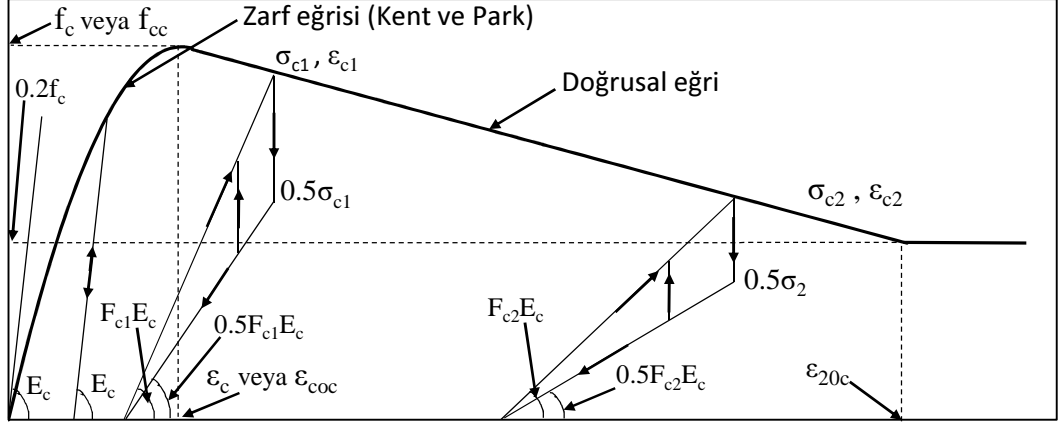
$$E_c = 12680 + 460 \cdot f_c \text{ (MPa)} \quad (5.7)$$

$$F_{ci} = 0,8 - \frac{0,7(\epsilon_{ci} - 0,002)}{\epsilon_{20c} - 0,002} \quad (5.8)$$

$$\epsilon_{20c} = 1,6(\epsilon_{50u} + \epsilon_{50h}) - 0,6 \cdot \epsilon_{coc} \quad (5.9)$$

Geliştirilmiş Kent ve Park modelindeki gerilme-şekil değiştirme eğrilerini tanımlayan bağıntılar Denklem 5.9-Denklem 5.19'da verilmiştir (Ersoy ve Özcebe, 2001). Eğrinin parabolik bölümü sargısız beton için denklem (5.10)'da, sargılı beton için ise Denklem (5.11)'de verilmiştir. Gerilmenin azaldığı bölümde (doğrusal eğri), sargısız betonun

davranışı Denklem (5.13) ile, sargılı betonun davranışı ise Denklem (5.17) ile verilmektedir.



**Şekil 5.3.** Thompson ve Park Modeli

Parabolik eğri;

$$\sigma_c = f_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (\text{Sargısız Beton}) \quad (5.10)$$

$$\sigma_c = f_{cc} \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{coc}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{coc}} \right)^2 \right] \quad (\text{Sargılı Beton}) \quad (5.11)$$

$$\varepsilon_{coc} = K\varepsilon_{co} \quad (5.12)$$

Doğrusal Eğri (Gerilmenin azaldığı bölüm);

Sargısız beton;

$$\sigma_c = f_c [1 - Z_u (\varepsilon_c - \varepsilon_{co})] \quad (5.13)$$

$$Z_u = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} - \varepsilon_{co}} \quad (5.14)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.285f_c}{142f_c - 1000} \geq \varepsilon_{co} \quad (5.15)$$

Sargılı beton;

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{ywk}}{f_c}$$

(5.16)



$$\sigma_c = f_{cc} [1 - Z_c (\epsilon_c - \epsilon_{coc})] \geq 0.2 f_{cc} \quad (5.17)$$

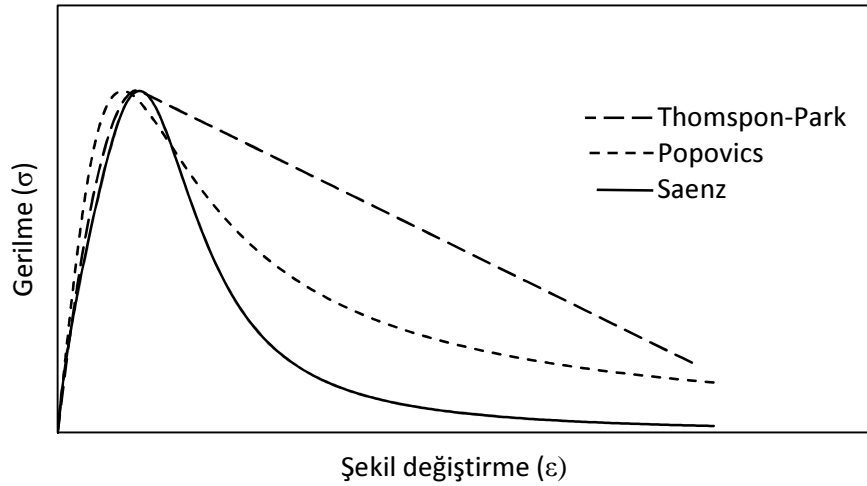
$$Z_c = \frac{0.5}{\epsilon_{50u} + \epsilon_{50h} - \epsilon_{coc}} \quad (5.18)$$

$$\epsilon_{50h} = 0.75 \rho_s \left( \frac{b_k}{s} \right)^{0.5} \quad (5.19)$$

$$\rho_s = \frac{A_o l_s}{s b_k h_k} \quad (5.20)$$

Bu ifadelerde;  $f_c$  sargısız betonun basınç dayanımını ( $f_c=f_{ck}$ ),  $f_{cc}$  sargılı beton dayanımını ( $f_{cc}=f_{cl}=Kf_c$ ),  $\epsilon_{coc}$ : Sargılı betonda maksimum gerilme altındaki birim şekil değiştirmeyi,  $\epsilon_{co}$  sargısız betonda maksimum gerilme altındaki birim şekil değiştirmeyi göstermektedir. Diğer parametrelere ilişkin tanımlar semboller dizininde verilmektedir.

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan Popovics, Saenz ve Thompspon-Park malzeme modelleri aynı gerilme-şekil değiştirme grafiği üzerinde Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Bu şekilde Thompson-Park ve Saenz modellerinin başlangıç elastisite modüllerinin birbirine yakın olduğu ancak Popovics modelinin daha yüksek olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.4.** Kullanılan beton malzeme modellerinin karşılaştırılması

Bu çalışmanın amacı dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin genel davranışını sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmek olduğundan beton ve donatı tek bir malzeme kabul edilerek, Katı (solid) olarak tanımlanmıştır. Ayrıca katı (solid) olarak tanımlamanın

analiz süresini kısalttığı ve daha karmaşık yapıları çözmek için kullanıldığı daha önce belirtilmişti. Bu yolla yukarıda tanımlanan malzeme modellerinin kullanımının etkinliği denetlenmiş olacaktır. Malzeme modellerinin birbirine göre avantajları ve dezavantajları için Çizelge 2.1 incelenebilir.

### 5.1.2. Dolgu Duvar Modeli

Daha önce Bölüm 3.2.2’de dolgu duvarların farklı şekillerde modellenebileceği ifade edilmişti. Dolgu duvarlar düşük maliyetli, iyi derecede ses ve ısı yalıtımı, kolay bulunabilirlik gibi nedenlerden dolayı dünyanın birçok yerinde yapılarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Dolgu duvarlı yapıların matematiksel modellenmesi duvarın ve onu oluşturan elemanların (tuğla ve harç) malzeme özelliklerinin bilinmesini gerektirmektedir. Ancak bu malzemelerin mekanik özellikleri test sonuçlarının kontrollü bir şekilde yapılamaması ve malzeme özelliklerinin coğrafi bölgelere göre farklılık göstermesi gibi sebeplerden dolayı elde edilememektedir. Dolgu duvarların gerilme şekil değiştirme ilişkisi farklı araştırmacılar (Lourenço ve ark 1995, Ewing ve Kowalsky 2004, Kaushik ve ark. 2007, Tao ve ark. 2012) tarafından sonlu elemanlar yöntemi analizlerinde kullanılmıştır.

Bu çalışmada dolgu duvar homojen bir malzeme olarak varsayılmıştır. Diğer bir deyişle, duvarın tuğla ve harç malzemelerinden dolayı olan etkileri göz ardı edilerek duvarın tek bir malzemedan oluştuğu kabul edilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizlerinde dolgu duvar malzeme modeli olarak farklı araştırmacılar (Tao ve ark. 2012, Resta ve ark. 2013) tarafından kullanılan Concrete Damage Plasticity malzeme modeli kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar analizlerinde duvarın gerilme-şekil değiştirme davranışı için daha önce Tao ve ark. (2012) tarafından yığma köprülerde kullanılan malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modeli aşağıda kısaca özetlenmiştir. Duvarın tek eksenli basınç dayanımı Denklem 5.21’ de verilmiştir.

$$\sigma_c = \frac{E_0 \epsilon_c}{1 + \left( \frac{E_0 \epsilon_p}{\sigma_p} - 2 \right) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_p} \right) + \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_p} \right)^2} \quad (5.21)$$

Bu denklemde  $\sigma_c$  ve  $\varepsilon_c$  sırasıyla basınç gerilmesi ve birim şekil değiştirmesi,  $\sigma_p$  ve  $\varepsilon_p$  maksimum gerilme ve ona karşılık gelen şekil değiştirme,  $E_0$  ise duvarın elastisite modülüdür. Duvarın çekme davranışı çok gevrek olduğundan çekme altındaki doğrusal olmayan davranışını tam olarak test etmek oldukça güçtür. Literatürde yaygın olarak kabul gördüğü şekliyle bu değer söz konusu analizlerde duvarın basınç dayanımının yaklaşık %10'u olarak dikkate alınmıştır.

### 5.1.3. Çerçeve-Duvar Etkileşim Modeli

Bu tez çalışmasında kullanılan yüzey esaslı kohezyonlu (cohesive) davranış modeli yüzey etkileşim özelliği olarak tanımlanmakta ve ara yüzde meydana gelen çekme ayrılma davranışını modellemek için kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar programında kullanılan çekme ayrılma kıstası lineer elastik davranışı dikkate almaktadır ve davranış Denklem 5.22 ile ifade edilmektedir (Abaqus 2013).

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{sn} & K_{tn} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{nt} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K\delta \quad (5.22)$$

Bu denklemde  $t$  nominal çekme gerilme vektörüdür ve  $t_n$  normal yöndeki,  $t_s$  ve  $t_t$  ise diğer iki kayma yönündeki davranışını temsil etmek üzere üç bileşeni içermektedir ve bu değerlere karşılık gelen sınır ayrılmalar ise sırasıyla  $\delta_n$ ,  $\delta_s$  ve  $\delta_t$  olarak ifade edilmektedir.

Buna ek olarak, duvar ile çerçeve arasındaki davranışı yansıtabilmek için iki farklı arayüz elemanı daha kullanılmıştır. Bunlardan ilki tie link arayüz elemanıdır. Bu elemanda dolgu duvarlı çerçevenin genel olarak davranışı yansıttığı ancak duvarda meydana gelen gerilme dağılımını değiştirdiği gerekçesiyle vazgeçilmiştir. Kullanılan ikinci seğenek ise duvar ile çerçeve arasında normal yönde sert kontak (hard contact) ve kayma yönlerinde ise yüzeyel davranış (tangential behavior) tanımlanmış ve davranış incelenmiştir. Ancak bu modellerin davranışı tam olarak yansıtmadığı gerekçesiyle kullanılmamıştır.

#### 5.1.4. Modelin Kalibrasyonu

Malzeme özelliklerini açıklayan parametrelerin doğru bir şekilde tanımlanması Concrete Damage Plasticity malzeme modelinin dolgu duvarlar için de kullanılabilmesi için oldukça önem arz etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalar dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin davranışını irdelemek ve yapılan analiz sonuçlarını doğrulamak için kullanılmıştır. Deneysel çalışmada tek açıklıklı tek katlı delikli tuğla ve gazbeton dolgu duvarlı betonarme çerçeveler ile ilgili kapsamlı test sonuçları bu çalışmalardan elde edilen analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tuğla duvarlı betonarme çerçevenin yatay yükler altındaki deneysel sonuçları Arslan 2013 doktora tez çalışmasından alınmıştır. Tuğla duvar malzeme modeli parametreleri için kullanılan değerler de yine bu tez çalışmasından elde edilmiştir. Yapılan testlerde çerçeve üzerinde aksel yük mevcut değildir.

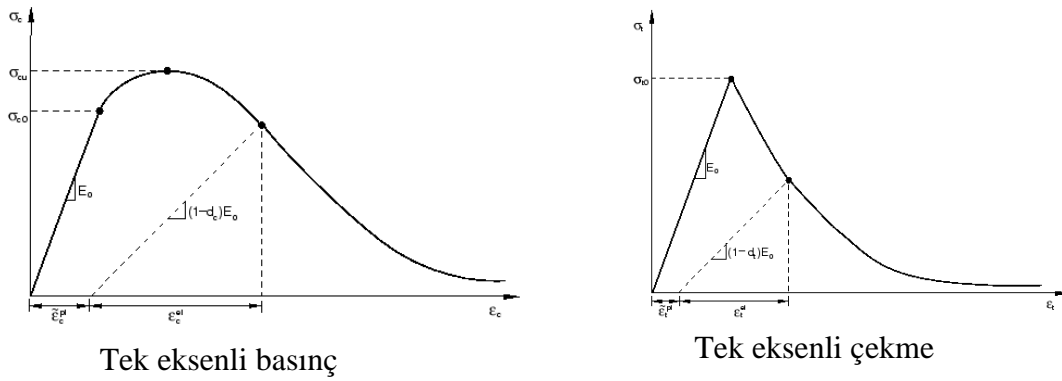
Daha önce de ifade edildiği üzere tezin amacı dolgu duvarın çerçeve üzerindeki davranışını incelemek olduğundan duvar için en uygun model olarak sonlu elemanlar programlarında mevcut olan Concrete Damage Plasticity malzeme modeli ve duvar ile çerçeve arasındaki etkileşim için ise birçok araştırmacı tarafından kullanılan boyutsuz kohezyonlu arayüz elemanı kullanılmıştır. Çerçevenin modellenmesinde ise solid elemanlar kullanılmıştır.

Simülasyonlar ABAQUS sonlu elemanlar paket programı ile modellenip analiz edilmiştir. Bu modelde dolgu duvar için kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Burada kullanılan parametreler sırasıyla dilatasyon veya genişleme açısı  $\psi$ , dışmerkezlik (eksantrisite)  $\varepsilon$ , iki yöndeki basınç akma dayanımının tek yöndeki akma dayanımına oranı  $f_{b0}/f_{c0}$ , katsayı  $k$  ve viskosite parametresi  $\chi$  olarak ifade edilebilir. İlk iki parametre potansiyel akımın şeklini tanımlamak için kullanılırken,  $f_{b0}/f_{c0}$  ve  $k$  akma fonksiyonunun şeklini tanımlamaktadır. Viskosite parametresi  $\chi$  ise malzemelerin viscoplastik düzenlemesinde kullanılmaktadır. Bu parametre yumuşama veya rijitlik azalması görülen malzemelerde meydana gelen yakınsama zorluklarının üstesinden gelmek için kullanılmaktadır. Bu değer zaman artışına oranla küçük bir değer kabul

edilerek kullanılması modelin yumuşama bölgesinde, sonuçları etkilemeden, yakınsama oranını arttırmaktadır (Abaqus 2013). Dilatasyon açısı malzeme davranışını ciddi bir şekilde etkilemektedir. Dolgu duvarlar için yapılan analizler dilatasyon açısının 30°-37° arasında olduğu durumlarda malzemenin sünek davranış sergilediği ancak 0°-1° civarında olduğunda ise gevrek davranışın meydana geldiği gözlenmiştir (Resta ve ark. 2013). Yakınsama sorunlarını çözmek için farklı viskozite değerleri ile analizler yapılmış olup deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar viskozite değerinin yaklaşık 0,004 değerinde olduğu durumda elde edilmiştir. Dışmerkezlik parametresi betonda kullanıldığı gibi dolgu duvar için de 1 olarak kabul edilmiştir.  $f_{b0}/f_{c0}$  ve  $k$  parametreleri ise programda varsayılan değerler olarak dikkate alınmıştır. Analizlerde kullanılan dolgu duvarın eşdeğer basınç dayanımı gazbeton duvar için 1 MPa, delikli tuğla duvar için yaklaşık 4,1 MPa olarak dikkate alınmıştır. Kullanılan malzeme modelinde çekme ve basınç için gerilme şekil değiştirme ilişkileri Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

**Çizelge 5.1.** Duvar için Concrete Damage Plasticity malzeme modeli parametreleri

Dilatasyon açısı	Dışmerkezlik	$f_{b0}/f_{c0}$	$k$	Viscosity Parametresi
1	1	1.16	0.6667	0.004



**Şekil 5.5.** CDP modelinde kullanılan gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

Betonarme çerçevede bulunan beton ve donatı ayrı ayrı modellenmemiş olup ABAQUS sonlu elemanlar programında mevcut olan plastisite modeli kullanılmıştır. Gazbeton ve

tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçeve için kullanılan beton malzeme özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

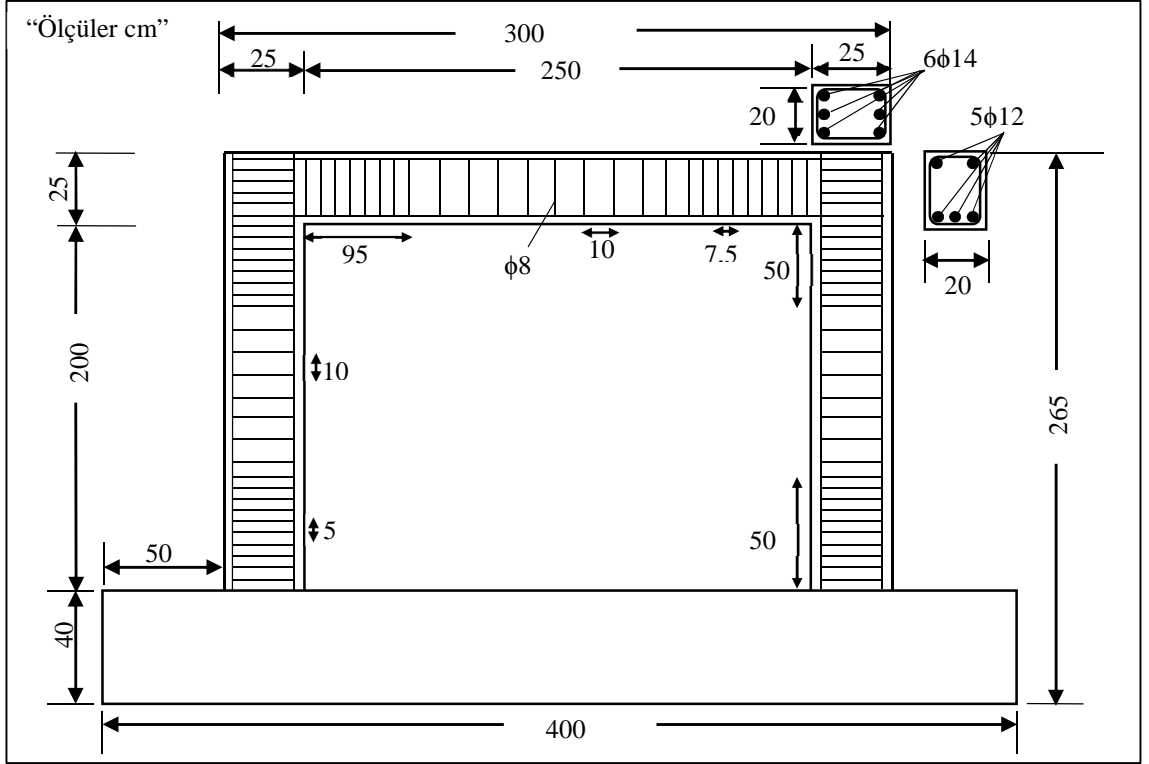
**Çizelge 5.2.** Betonarme çerçeve için kullanılan malzeme özellikleri

	$E_c$ (MPa)	Poisson oranı	$f_c$ (MPa)	Birim ağırlık ( $kg/m^3$ )
Gazbeton çerçeve	20000	0.2	20	2400
Tuğla çerçeve	23000	0.2	25	2400

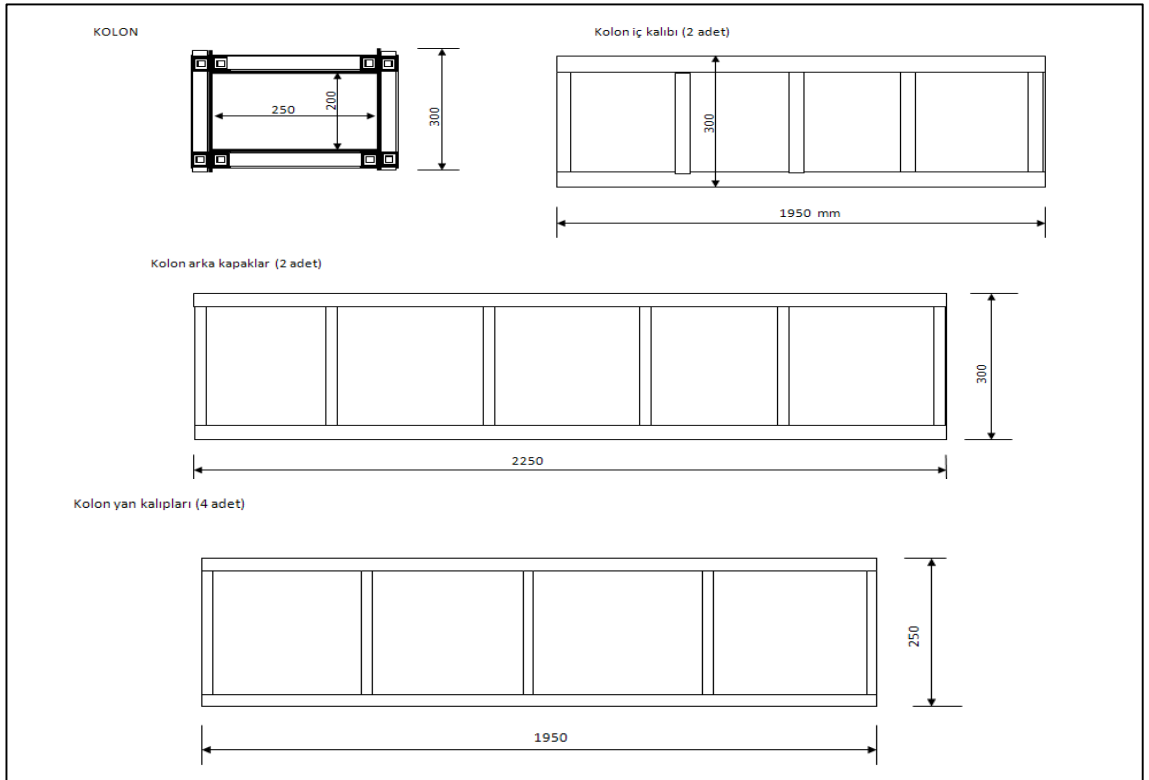
Duvar ve çerçeve arasında meydana gelen etkileşim ise kalınlığı olmayan yüzey esaslı kohezyonlu davranış kabul edilmiştir. Bu etkileşim türü ara yüzlerdeki ayrılmayı çekme ayrılma kıstasına göre modellemek için kullanılmaktadır. Programda mevcut olan çekme ayrılma modeli başlangıçta hasarın başladığı yere kadar lineer elastik davranış kabul edilmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinde hem çerçeve hem de dolgu duvar katı (solid) elemanlar olarak tanımlanmıştır. Deneysel ve analitik sonuçlardan elde edilen yük-deplasman ilişkileri, analizlerde kullanılan modelin deneysel verilerle örtüştüğünü göstermiştir.

## 5.2. Çerçeve Sistemi

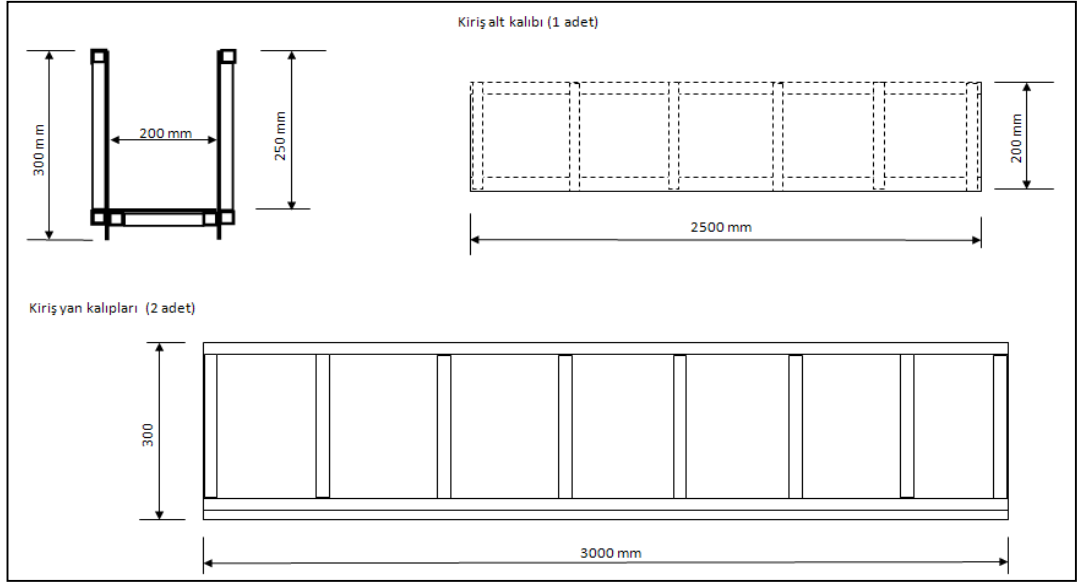
Bu çalışmada esas alınan deneysel çalışmalar daha önce Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarında Doğangün A ve Livaoğlu R (2010) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan çerçeve boyutları ve donatılara ait detaylar Şekil 5.6’da görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere kolonlar uzun boyutu düzlemi doğrultusunda olacak şekilde 0,2 m x 0,25 m enkesit alanına, kiriş ise 0,25 m yüksekliğe ve 0,20 m genişliğe sahiptir. Kolon ve kirişe ait kalıp detayları sırasıyla Şekil 5.7 ve 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Deney çerçevelerinin boyut ve donatı detayları

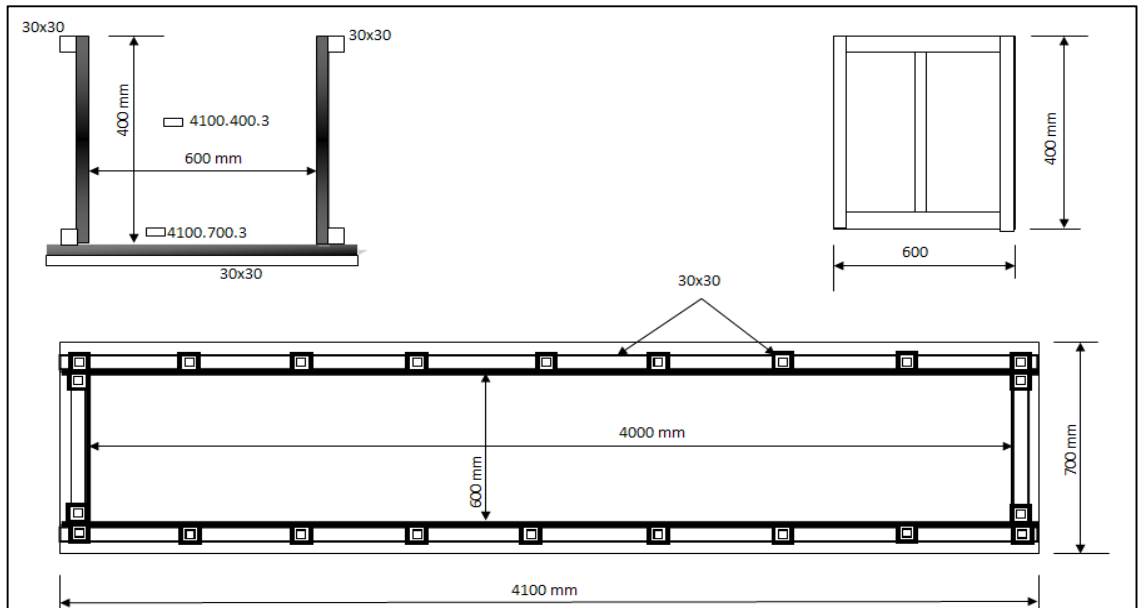


Şekil 5.7. Çerçeve kolonlarında kullanılan çelik kalıbın detayları



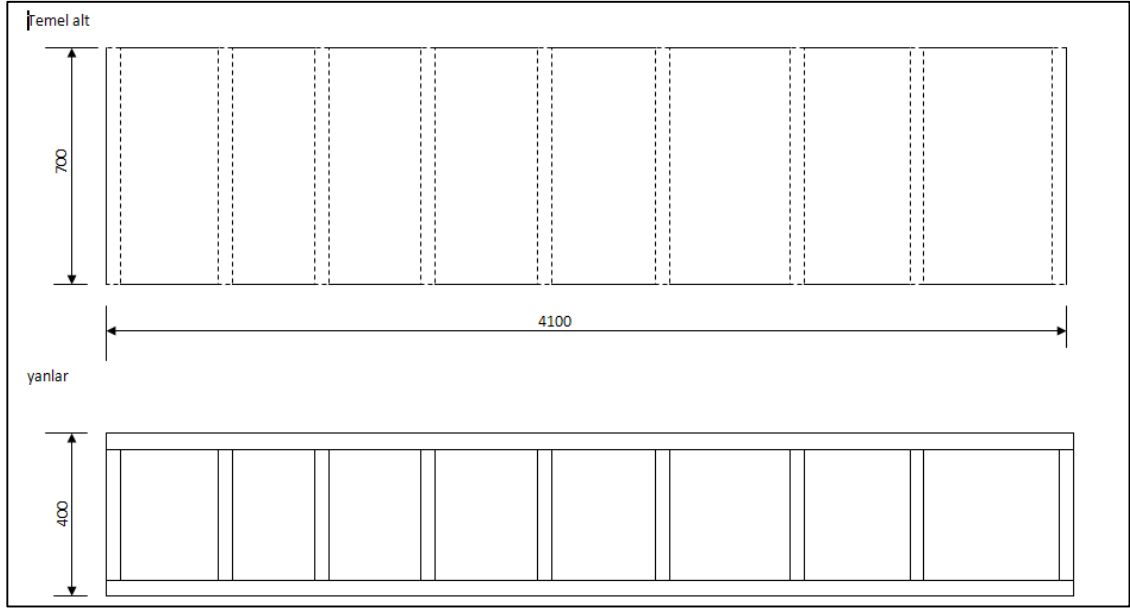
**Şekil 5.8.** Çerçeve kirişinde kullanılan çelik kalıbın detayları

Deneylede uygulamada kullanılan boyutlara yakın olması bağlamında 2,5m uzunluğunda ve 2,0m yüksekliğinde dolgu duvar dikkate alınmıştır. Bu dolgu duvar üzerinde deney yapmaya imkân verecek şekilde 4,00m uzunluğunda, 0,60m genişliğinde ve 0,40m yüksekliğinde temel tasarlanmıştır. Deneylede kullanılan temelin kalıp boyut ve detayları Şekil 5.9 ve 5.10’da görülmektedir.



**Şekil 5.9.** Çerçeve temelinde kullanılan çelik kalıbın detayları-1



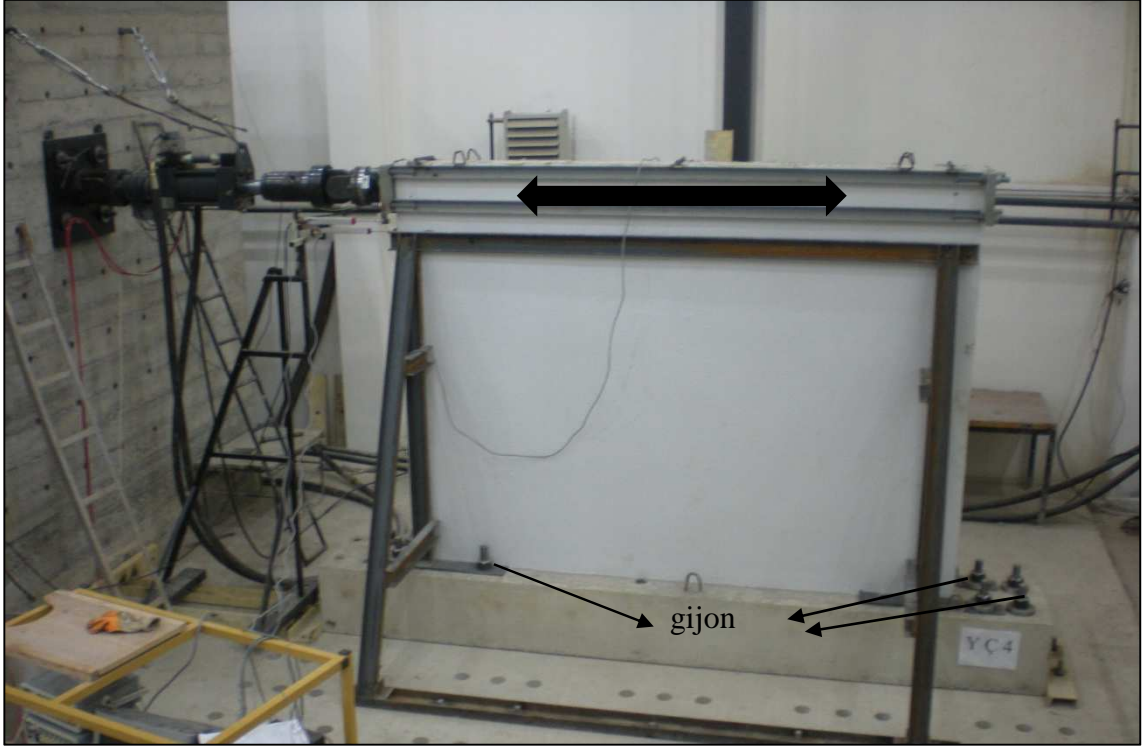


**Şekil 5.10.**Çerçeve temelinde kullanılan çelik kalıbın detayları-2

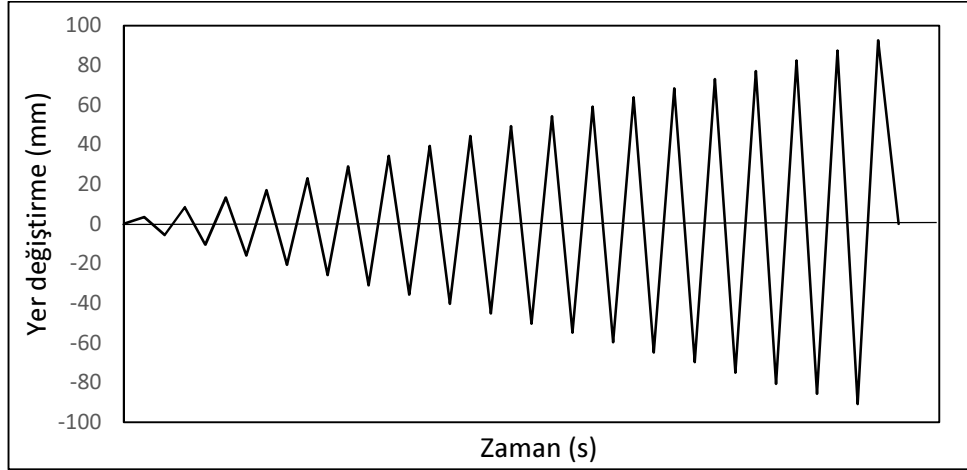
### 5.3. Deney Düzenegi

Deneye tabi tutulan çerçevelerin tersinir tekrarlanır yükler altında düzlem içi davranışları incelenmiştir. Deneyde kullanılan düzenek Şekil 5.11’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi yüklemelerde kullanılan aktivatör rijit duvara mesnetlenmiştir. Çevrimsel yatay yükler altında deneye tabi tutulan çerçevelerin rijit döşemeye montajları gijonlarla yapılmıştır.

Deney düzenegindeki yükleme sistemi (aktivatör); hidrolik güç ünitesi, basınca dayanıklı hortumları, itme ve çekme genlikleri maksimum toplam 200 mm olan tersinir yükleme yapabilen bir pistondan oluşmaktadır. Piston her iki ucundan mafsallıdır. Bu mafsallar çerçevenin düşey hareketi sırasında yüklemenin değişmemesini sağlamaktadır. Deney çerçevelerinin yüklenmesi, yer değiştirme denetimli olarak yapılmıştır. Deneylerde kullanılan yer değiştirme genlikleri Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.11. Düzlem içi yüklenen çerçevelerin deney anından bir görünüm



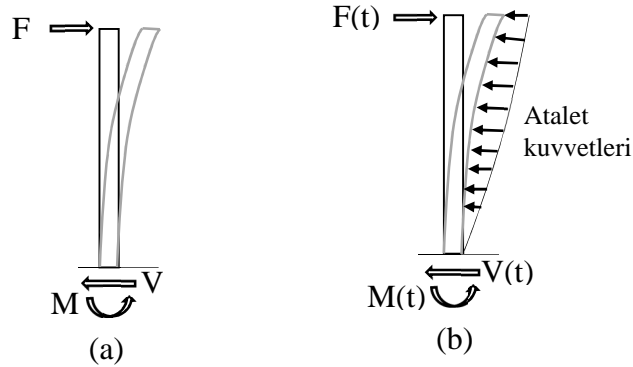
Şekil 5.12. Deneylerde kullanılan yer değiştirme genlikleri

### 5.3.1. Eşdeğer Dinamik Yükleme

Gerçek hayatta bir yapıya uygulanan yükler tamamen statik değildir. Çünkü bütün yükler yapıya belirli bir sırayla uygulandıklarından dolayı, yükün zamanla değişimini doğal

olarak içermektedir. Ancak, yükün dinamik olup olmaması tamamen yükün frekansı ile sistemin hakim frekansları arasındaki ilişkiye bağlıdır. Bu nedenle yapıya etkiyen bir yükün dinamik etkisinin derecesini belirleyen en önemli parametre olarak yapının doğal titreşim periyodu ( $T$ ) gösterilebilir. Eğer yükün uygulanma zamanı yapının doğal periyoduyla karşılaştırılınca büyükse ( $T_{yük} \gg T$ ), o zaman dinamik etkiler ihmal edilecek düzeyde oluşacağından yük statik kabul edilebilecektir. Diğer yandan, eğer yükün uygulanma zamanı yapının doğal periyoduna çok yakınsa, yapı dinamik etkilere maruz kalacak dolayısıyla hız ve ivme bağımlı etkiler ortaya çıkacaktır (Tedesco ve ark. 1999).

Dinamik yükler statik yüklerden iki temel hususta farklılık gösterirler. İlk ve en belirgin farklılık uygulanan yükün ve tepkinin (yer değiştirme, gerilme vb.) zamanla değişmesidir. Diğer bir deyişle her ikisi de dinamik bir analizde zamanın bir fonksiyonudur. Ancak dinamik yükleri statik yüklerden ayıran en önemli farklılık yük dinamik uygulandığında meydana gelen atalet kuvvetleridir. Buna örnek olarak konsol bir yapı gösterilebilir (Şekil 5.13). Eğer yapıya uygulanan  $F$  kuvveti statik ise sonuç olarak kesme kuvveti  $V$ , eğilme momenti  $M$  ve buna bağlı olarak yapıda yer değiştirme ve gerilmeler statik yapısal analiz ilkelerine bağlı olarak elde edilecektir (Şekil 5.13a). Ancak eğer uygulanan  $F(t)$  kuvveti zamanla değişiyorsa yapı hareketlenir, titreşime geçer ve belirli bir ivmeye maruz kalır. Daha sonra bu ivmeye karşı koyan kütleyle bağlı olarak atalet kuvvetleri meydana gelir (Şekil 5.13b). Yapıda atalet kuvvetinin, kesme kuvvetine  $V(t)$ , eğilme momentine  $M(t)$  ve buna bağlı olarak yer değiştirme ve gerilmelere olan önemli katkısı dinamik analizin etkinliğini gösterir.



**Şekil 5.13.**Konsol yapı (a) Statik yük (b) Dinamik Yük

Deplasman tepkisi  $u(t)$  yapının dinamik analizinden elde edildiğinde, yapısal tasarım için gerekli olan eleman kuvvetleri (eğilme momenti, kesme ve aksel kuvvet) ve gerilmeler yapının statik analizi ile her zaman adımında belirlenebilir (Chopra 2007). Bu statik analiz çözümü iki türlü yapılabilir;

1. Her zaman anında, yanal yer değiştirme  $u$  bilindiğinden, eleman kuvvetleri eleman rijitliğinden, gerilmeler ise eleman kuvvetlerinden belirlenebilir.
2. Her zaman anında,  $u$  yer değiştirmesini oluşturacak eşdeğer statik kuvvet ( $f_s$ ), statik harici yük (yavaş bir şekilde uygulanır) dinamik analizler yardımıyla belirlenebilir. Böylece,

$$f_s(t) = ku(t) \quad (5.23)$$

bağıntısı elde edilir. Burada  $k$  yapının yanal rijitliğini ifade etmektedir.

Dinamik yüklere maruz sistemlerin analizinde iç kuvvetlerin ivmelenme nedeniyle oluşan eylemsizlik kuvvetleri sebebiyle ortaya çıkıyor olması, yapı dinamiği problemlerinin en önemli parametresidir. Bu durumda yükün dinamik karakteri her durumda dikkate alınmalı ve eşitlikler bu yolla yazılarak çözüm elde edilmelidir. Diğer taraftan yükün hızının oldukça düşük olduğu durumlarda veyahut diğer bir tanımlama ile yükün frekansının sistemin doğal titreşim frekansına oranının çok düşük ( $1/10$ ) veyahut çok yüksek ( $\times 10$ ) olması durumunda hız ve ivme nedeniyle doğan iç kuvvetlerin yer değiştirme nedeniyle doğan iç kuvvetlere oranı oldukça düşük olmaktadır. Bu durumda yükün dinamik karakteri göz önüne alınmaksızın çözümlene doğrudan statik mantık üzerinden elde edilebilir. Bu nedenle bu çalışmada deneysel olarak uygulanan yükün hızı yukarıda ifade edilen sınırların ötesinde tutularak eşdeğer statik bir yükleme gerçekleştirilmiş çözümlenmeler de bu sayede statik olarak gerçekleştirilmiştir.

### 5.3.2. Modal Analiz

Deneysel modal analiz, 1970'li yılların başında dijital FFT (Fast Fourier Transform) spektrum analizörü kullanımı ile birlikte bugüne kadar düzenli bir şekilde gelişme göstermiştir. Bugün ise, bu amaçla geliştirilen makina ve sistemler kullanılmaktadır. Deneysel modal analiz yöntemi, incelemeye konu sistemde titreşim etkisi yaratılarak FFT analizörü yardımı ile FRF (Frequency Response Function) değerlerinin ölçümü temeline

dayanmaktadır. Titreşim ölçümü ve titreşim testi, modal test, modal analiz ve deneysel modal analiz gibi yöntemlerle yapılmaktadır (Doğruer 2006). Deneysel modal analiz çalışmasında, amaç sistemde bir zorlanma meydana getirmek olduğundan, ivmeölçer, titreşim analizörüne ek olarak çekiç ve benzeri titreşim meydana getiren aynı zamanda da zorlanma şiddetini kaydedebilen temel ölçüm elemanları kullanılır.

Yapılar üzerinde titreşimlerden oluşan tepkilerin ölçülmesi ve ölçüm verilerinden yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan yöntemler deneysel modal analiz yöntemleri olarak bilinmektedir. Bu yöntemlerde yapılar ya bilinen bir kuvvetle titreştirilmekte ya da çevresel titreşimler dikkate alınarak ölçümler yapılabilmektedir. Ölçümlerde kullanılan titreşim kuvvetinin bilinip bilinmemesine bağlı olarak, deneysel modal analiz ve operasyonel modal analiz olmak üzere iki yöntem mevcuttur.

Deneysel Modal Analiz Yöntemi'nin geçerli olabilmesi için bazı temel kabuller yapılmaktadır (Heylen ve ark. 2007). Bu kabuller birbirleriyle ilişkili olup kısaca şu şekilde sıralanabilir:

- Deneysel ölçümler sırasında, sıcaklık, nem vb. gibi bir etki altında yapının malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında herhangi bir değişim olmadığı kabul edilmektedir.
- Yapıda oluşan titreşimlerin küçük olduğu yani, yapının lineer davranış sergilediği kabul edilmektedir. Yapının rijitliğini değiştirebilecek çok büyük titreşimler altında yapılan ölçümlerin sonuçlarının geçerli olmayacağı kabul edilmektedir.
- Yapının bir bütün ve sürekli olduğu kabul edilmektedir. Diğer bir ifadeyle, yapının bir noktasında elde edilen davranışın bütün yapıyı temsil ettiği kabul edilmektedir. Dolayısıyla süreksizlik arz eden elemanların kendi lokal titreşim modlarının olmadığı kabul edilmektedir. Bu kabulün örneğin; süreksiz bir taşıyıcı sisteme sahip yığma yapı örneğinde uygun şekilde değerlendirilmesi gerekliliği açıktır. Barajlar gibi büyük yapılar içinde, özellikle Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ne göre yapılan Deneysel Modal Analizinde, bu kabulün sağlanması oldukça zordur (Sevim 2010).

Deneysel modal analizde ölçülebilen ve tespit edilebilen dinamik karakteristikler ile matematiksel model oluşturularak davranışı gerçekçi bir şekilde temsil edebilecek sayısal modeller oluşturulabilir. Buradan hareketle gerçekleştirilecek çözümlerle yapının performansı ve diğer hususlar üzerinde rahatlıkla sonuca varılabilir (Baştürk 2013)

Bu çalışmada yapının dinamik özelliklerinin belirlenebilmesi için deneysel modal analiz yöntemi özel bir sarsıcı yardımıyla yapılan ölçümler vasıtasıyla kullanılmıştır. Bu yöntemde yapının doğal frekansı, mod şekilleri ve sönüm oranı gibi dinamik parametreler belirlenebilmektedir. Yapılan modal analiz deneylerinden örnekler Şekil 5.14’te görülmektedir.

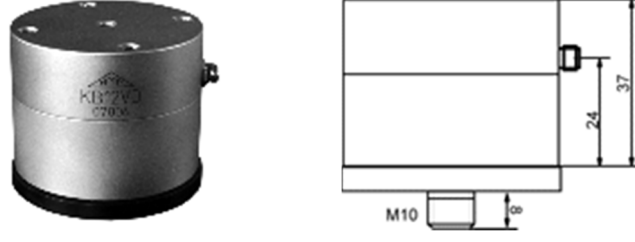
Çalışma kapsamında, yapıda çevresel etkiler nedeniyle meydana gelen titreşimlerin tespit edilebilmesi için hassas ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerler belirli hassasiyet ve frekans aralıkları için tasarlandıklarından çalışmada kullanılacak ivmeölçerin seçimi oldukça önemlidir. Bu tez kapsamında Çizelge 5.3’te teknik özellikleri belirtilen ivme ölçerler kullanılmıştır (Şekil 5.15). Kullanılan ivmeölçerler, yapıda matkapla açılan deliklere çelik dübelleri vasıtasıyla sabitlenmişlerdir.



**Şekil 5.14.**Operasyonel modal analiz yapılırken farklı görünüm

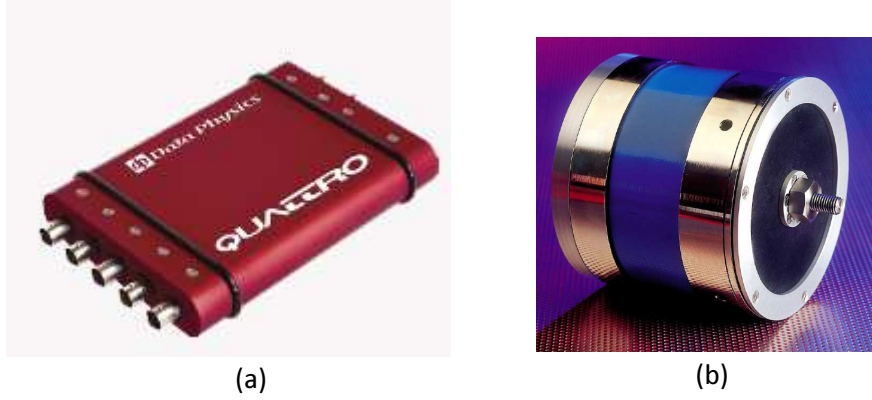
**Çizelge 5.3.** KB12VD Piezoelektrik ivmeölçer teknik özellikleri

İvme Ölçer:		KB12VD - Piezoelektrik ivmeölçer	
Hassasiyet	10000 mV/g $\pm$ 5 %	Çalışma Sıcaklığı	-20 - 80 °C
Lineer Frekans Aralığı	0.08 - 260 Hz	Boyutlar	R=50mm H=37mm
Ölçüm Aralığı	-0.6 - 0.6 g	Toplam Kütle	150 gr



Şekil 5.15.KB12VD Piezoelektrik ivmeölçer

Çalışma kapsamında QUATTRO dört kanallı veri toplama ünitesi kullanılmıştır (Şekil 5.16a). İvmeölçerlerden ve sarsıcıdan (Şekil 5.16b) gelen sinyaller bu üniteye aktarılıp daha sonra uygun yazılım yardımıyla kullanılabilir hale getirilmektedir. Veri toplama ünitesinden aktarılan sinyaller Dataphysics tarafından hazırlanan SignalCalc 240 yazılımıyla işlenerek kullanılabilir hale getirilmiştir.



Şekil 5.16.(a)Quattro dört kanallı veri toplama ünitesi (b) 30-250 N arasında yük uygulayabilen sarsıcı

#### 5.4. Oluşturulan Modeller ve Bunların Uygulanması

Dolgu duvarların yapının üzerindeki davranışını belirleyebilmek için son elli yıllık süre zarfında birçok araştırma yapılmış ve farklı araştırmacılar tarafından değişik analitik modeller önerilmiştir. Bu çalışmada, tersinir tekrarlanır yükler altında deneysel testleri

yapılan tuğla ve gazbeton duvarlı betonarme çerçeveler Bölüm 2.2.1’de bahsedilen analitik modeller kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek analiz edilmişlerdir. Böylece farklı eşdeğer basınç çubuğu modellerinin duvarın davranışını ne derece temsil ettiği analitik olarak tespit edilip karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak duvarın çerçeve üzerindeki davranışı sayısal olarak irdelenmiştir. Bu modellerde ise duvar ve çerçeve solid olarak modellenmiştir. Daha sonra kullanılan sayısal ve analitik yöntemlerin dolgu duvarlı çerçeve davranışına nasıl bir etki yaptığı araştırılmıştır.

Farklı araştırmacılar tarafından önerilen analitik modeller sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş ve modelleme sonucunda elde edilen veriler deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Duvarı idealleştirmek için tek, iki ve üç çubuklu modeller kullanılmış ve bu modellerin etkinliği sonlu elemanlar modellerinden ve testlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

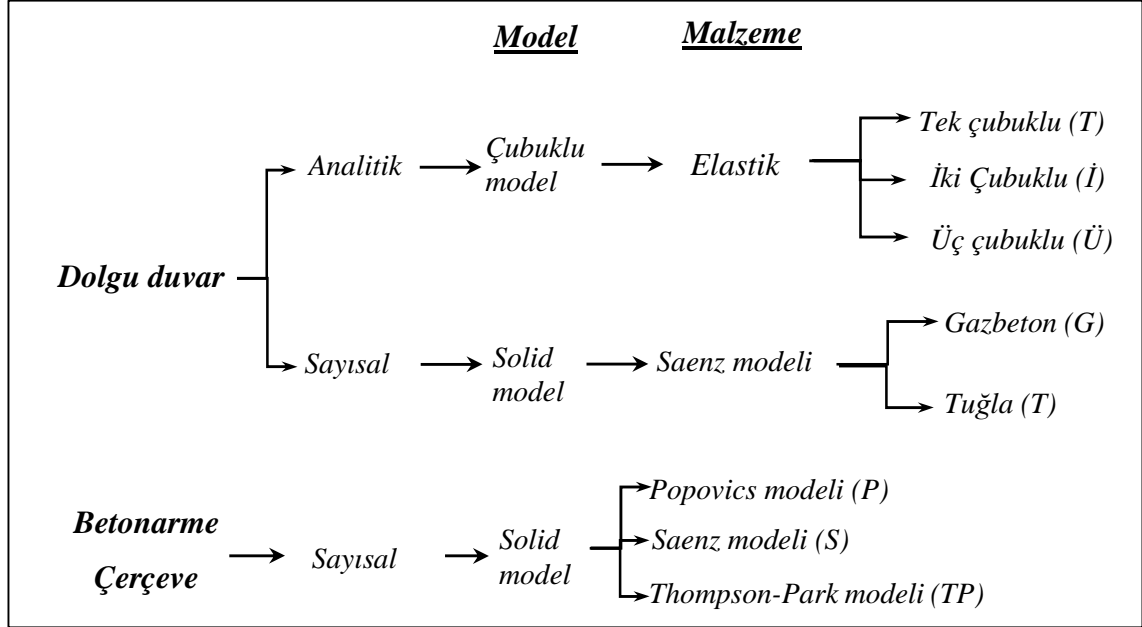
Dolgu duvarların modellenmesinde ABAQUS sonlu elemanlar programı içerisinde mevcut olan ve gevrek malzemelerin davranışını temsil etmek için önerilen Concrete Damage Plasticity modeli kullanılmıştır. Bu model gevrek malzemenin elastik olmayan davranışını yansıtmak için izotropik hasar elastisitesini, izotropik çekme ve basınç plastisitesiyle birleştirerek kullanır. Ayrıca bu model monotonik, tersinir veya dinamik yüklemelere maruz kalan malzemede uygulanmak için tasarlanmıştır. Duvarın basınç ve çekme altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışı için Tao ve ark. (2012) tarafından önerilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kullanılmıştır.

Betonun modellenmesinde ise üç farklı gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla Saenz (1964), Popovics (1973) ve Thompson ve Park tarafından önerilen malzeme modelleridir. Bu malzeme modellerinin çerçevenin davranışını ne derece temsil ettiği incelenmiş ve kendi içerisinde karşılaştırılmıştır. Bu modellerin betonun davranışını ne derece temsil ettiği elde edilen sonuçlar yardımıyla ayrıntılı bir şekilde Bölüm 6’da açıklanmıştır. Yapılan modellerde çerçeve ve dolgu duvar için kullanılan malzeme modelleri Çizelge 5.4’te görülmektedir. Çizelgede parantez içerisindeki ifadeler yapılan modelleri isimlendirmek için kullanılmıştır. Yapılan modellerle ilgili daha detaylı açıklama Şekil 5.16’da verilmiştir. Beton için kullanılan malzeme modellerinden elde



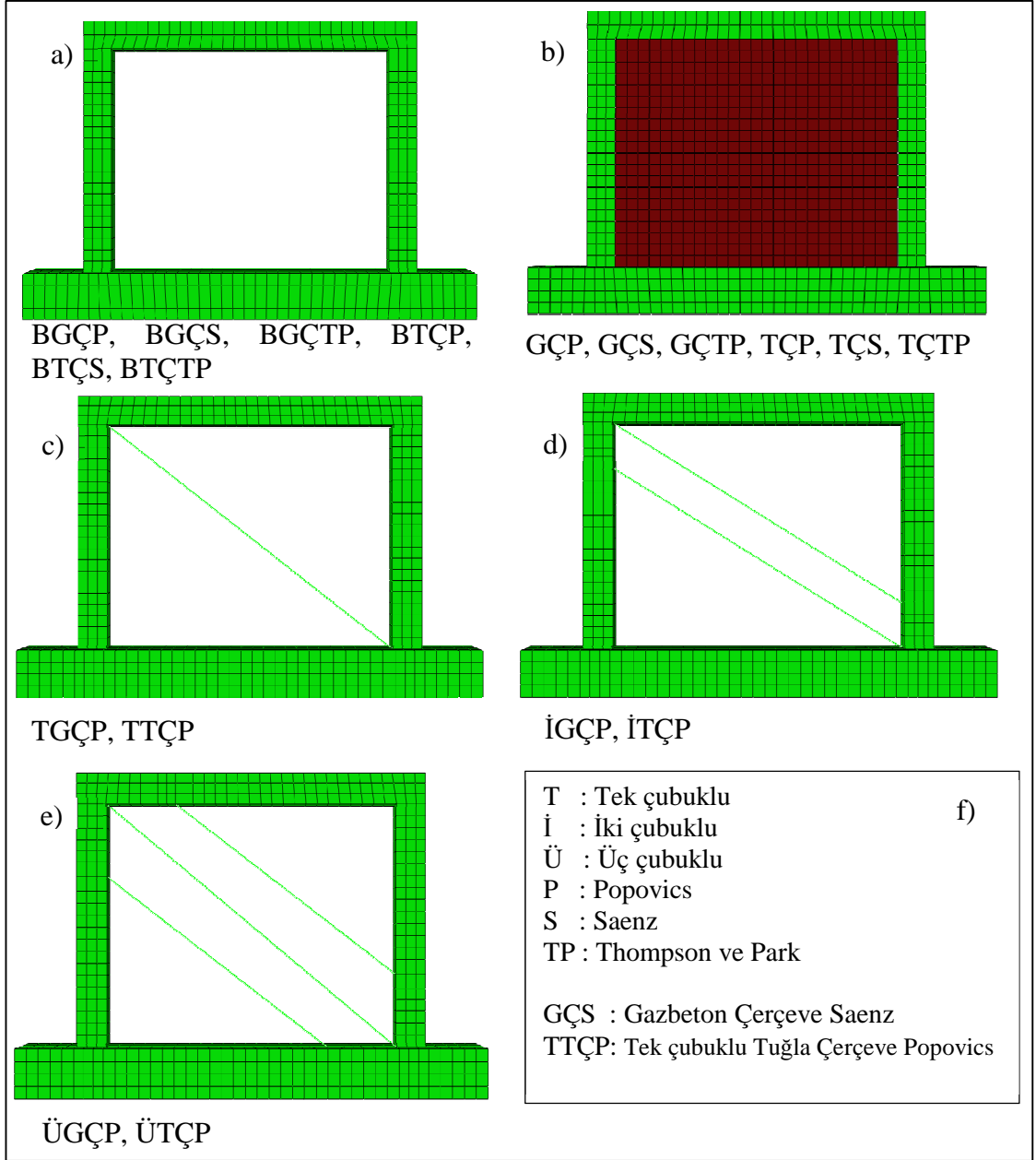
edilen sonuçlar karşılaştırıldıktan sonra çubuklu modeller için bu malzeme modellerinden en ideal olanı kullanılmıştır.

**Çizelge 5.4.** Modellenen dolgu duvar ve çerçeve modelleri



Analizlerde kullanılan sayısal ve analitik modeller Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Şekilde boş çerçeve (BÇ), gazbeton çerçeve (GÇ), tuğla çerçeve (TÇ) şeklinde kodlanmıştır. Sayısal modeller kodlanırken yazılan ilk harf dolgu duvarda kullanılan malzemeyi, ikinci harf çerçeveyi üçüncü harf ise beton malzeme modelini temsil etmektedir. Analitik modellerde ise ilk harf analitik modelde kullanılan çubuk sayısını, ikinci harf duvar türünü, üçüncü harf çerçeveyi ve dördüncü harf kullanılan beton modelini ifade etmektedir. Bununla ilgili yapılan kısaltmalar ve örnek yazım Şekil 5.16f'de gösterilmiştir.

Betonarme çerçevenin alt tabanı ankastre olarak modellenmiştir. Yatay yük üst kirişe dağılmış bir şekilde ve deplasman olarak verilmiştir. Statik lineer olmayan analizler Newton metodu kullanılarak yapılmıştır. Newton metodunun kullanılmasının en önemli nedeni ise sergilediği yakınsama oranının alternatif metotlara göre (geliştirilmiş Newton veya quasi-newton) daha iyi olmasıdır.



Şekil 5.17.Yapılan modeller ve üç boyutlu görünüşleri

## **6. BULGULAR ve İRDELEMELER**

Bu tez çalışması kapsamında gaz beton ve tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçeveler modellenerek statik itme analizine tabi tutulmuşlardır. Bunlara ek olarak dolgu duvarların idealleştirilmesi için önerilen farklı eşdeğer basınç çubuğu yaklaşımlarından tek, iki ve üç çubuklu modeller analiz edilmiş ve bu modeller daha önce deneysel çalışması yapılan dolgu duvarlı çerçevelerin sonuçları ile kalibre edilmiştir. Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin modellenmesi için ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Aşağıda bu çalışma kapsamında yapılan sayısal ve analitik modeller ve bu modellerden elde edilen sonuçlar ayrıntılı ve karşılaştırmalı bir şekilde açıklanmaktadır.

Bu bölümde öncelikle sonlu elemanlar modellerinde duvarda oluşan gerilme yığılmaları ve çerçevede meydana gelen plastik mafsallar deneylerin sonunda oluşan göçme biçimleriyle karşılaştırılmaktadır. Daha sonra dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin sayısal ve analitik analizlerinden elde edilen sonuçları ve sistemin genel davranışı deneysel verilerle karşılaştırılmaktadır. Analizlerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmakta, daha sonra bu diyagramlar normalleştirilerek gazbeton ve tuğla duvarın etkinliği kendi aralarında deneysel sonuçlarla kıyaslanmaktadır.

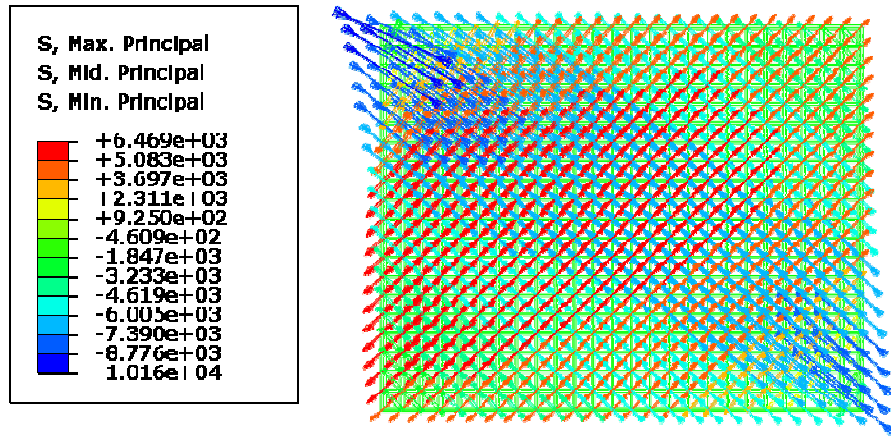
Dolgu duvarlı çerçevelerin davranışı eşdeğer dinamik yükleme ve modal analiz sonuçları kullanılarak irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Bunlara ek olarak, dolgu duvarların, çerçevenin rijitliği ve dayanımı üzerinde nasıl bir etki meydana getirdiği ayrıntılı bir şekilde irdelenmektedir.

### **6.1. Sayısal Modellerin Etkinliğinin İrdelenmesi**

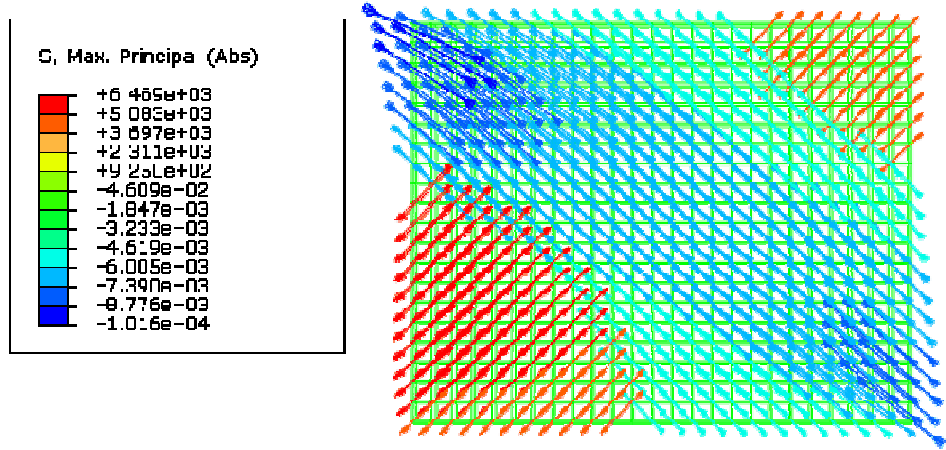
Çalışma kapsamında iki farklı (gazbeton ve tuğla) dolgu duvara sahip betonarme çerçeve modellenmiş olup, elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle modeli yapılan boş çerçeve ve dolgu duvarlı çerçeve modelleri daha önce Şekil 5.17’de gösterilmiştir.

### 6.1.1.Eşdeğer Dinamik Yükleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

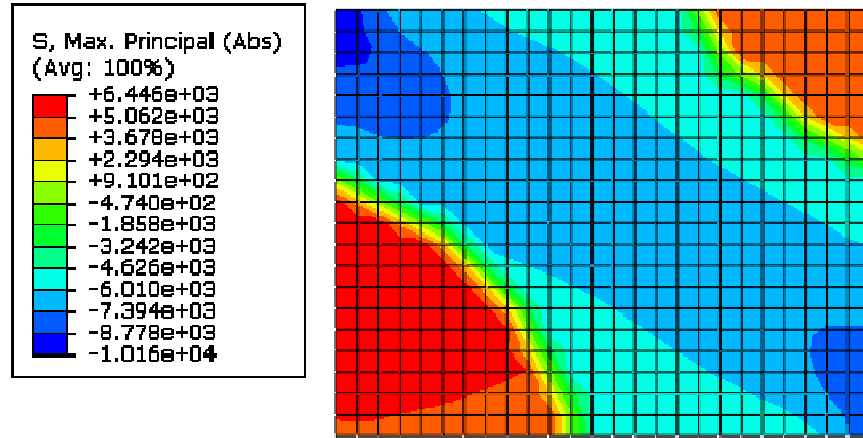
Sonlu eleman analizleri gerilme yığılmasının köşelerde meydana geldiğini göstermiştir. Analizler sonucunda çerçeve-duvar arasında ayrılma oluşmadan önce gazbeton dolgu duvarda meydana gelen asal gerilmeler Şekil 6.1’de görülmektedir. Bu şekilde vektörlerin uzunluğu gerilmenin büyüklüğünü, yönü ise gerilmenin basınç veya çekme olduğunu göstermektedir. Şekil dikkatle incelendiğinde mavi okların yüklemenden dolayı duvarda meydana geldiği kabul edilen eşdeğer sanal basınç çubuğunun oluşumunu gösterdiği görülmektedir. Bu şekilde sadece maksimum asal gerilmeler gösterilirse, basınç çubuğu daha açık şekilde görülecektir (Şekil 6.2 ve 6.3). Yatay yük arttıkça duvar ile çerçeve arasında aşırı ötelenmeden dolayı ayrılma meydana gelmektedir. Duvar, diyagonal olarak yüklenen köşeler hariç, diğer köşelerde çerçeveden ayrılır. Ayrılmadan sonra duvar ile çerçeve arasında sadece iki köşede gerilme yığılması oluşur. Duvar çoğunlukla basınç gerilmelerine maruz kalır. Bu adımda basınç gerilemelerine dik oluşan asal gerilemeler diyagonalin köşelerinde basınç, merkeze doğru ise çekmedir. Böylece, yüklenen duvar panelinin köşeleri iki eksenli basınca maruz kalırken, duvarın merkezinde ise çekme-basınç gerilme durumu meydana gelmektedir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Ayrılmadan önce gazbeton duvarda meydana gelen gerilme dağılımı

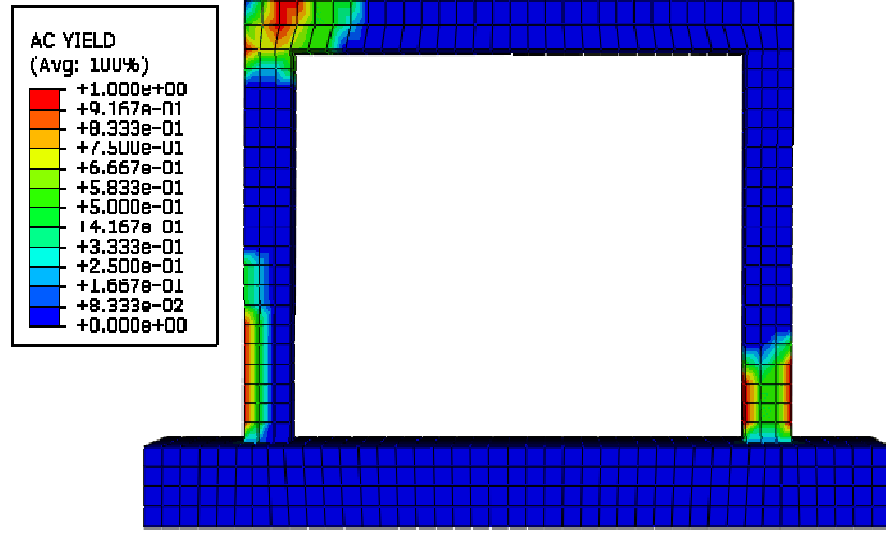


**Şekil 6.2.** Gazbeton duvarda meydana gelen maksimum asal gerilmeler 1

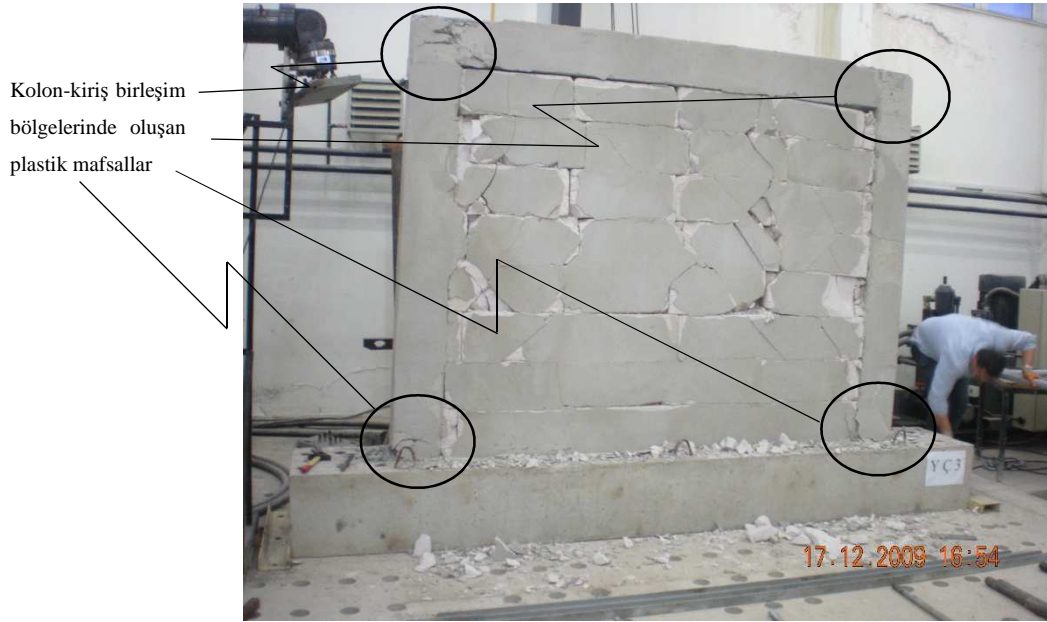


**Şekil 6.3.** Gazbeton duvarda meydana gelen maksimum asal gerilmeler 2

Dolgu duvarlı çerçevelerde meydana gelecek olan göçme türleri bölüm 2.4'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Çerçevelerde göçme genellikle kolonlarda veya kolon-kiriş birleşim bölgelerinde plastik mafsalların oluşması şeklinde meydana gelmektedir (Şekil 2.17). Bu tür göçmeler daha çok birleşim bölgeleri zayıf, birleşim elamanları ve dolgu duvarı güçlü olan çerçevelerde meydana gelmektedir. Bu tez kapsamında yapılan analizlerde çerçevelerde meydana gelen plastik mafsallar Şekil 6.4'te görülmektedir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ise Şekil 6.5'te verilmiştir. Şekiller incelendiğinde analizler sonunda meydana gelen plastik mafsallar ve deneyler sonucunda oluşan mafsalların yaklaşık olarak aynı bölgelerde meydana geldiği görülmektedir.



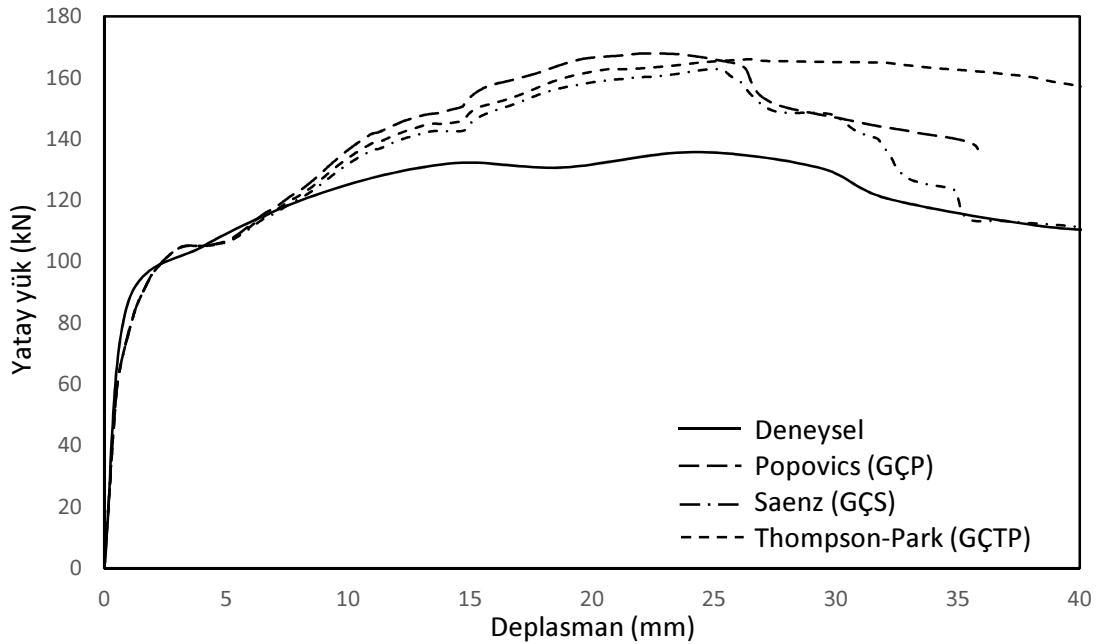
**Şekil 6.4.** Gazbeton duvarlı çerçevede meydana gelen plastik mafsallar



**Şekil 6.5.** Gazbeton çerçeve deney sonucundan bir görünüm

Gazbeton dolgu duvarlı betonarme çerçeve için yapılan karşılaştırma Şekil 6.6'da görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere yapılan sonlu elemanlar modeli deney sonuçlarıyla örtüşmektedir. Sonlu elemanlar modelinin özellikle başlangıç rijitliğini her

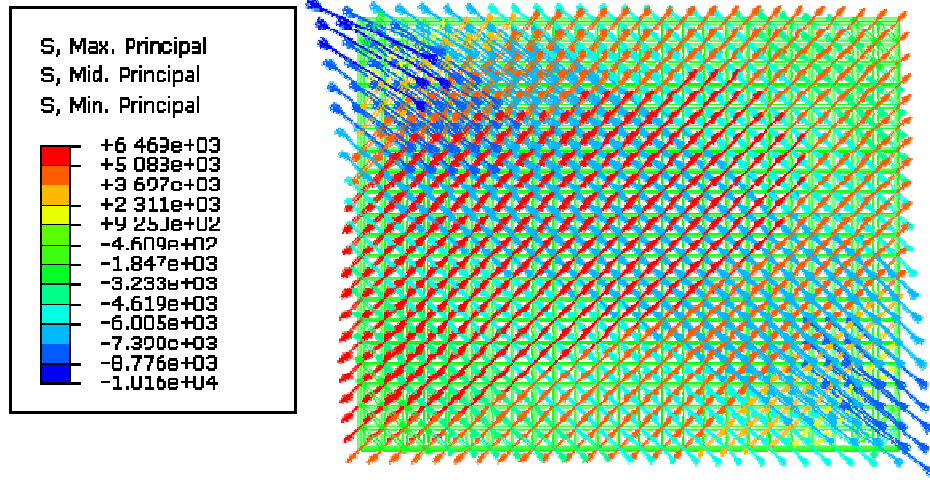
üç malzeme modelinde iyi derecede yansıtılabildiği görülmektedir. Buna ek olarak, deney sonuçlarından elde edilen maksimum yatay yük taşıma kapasitesi yaklaşık 135 kN iken yapılan analizlerden ise 165 kN civarında elde edilmiştir. Buradan da anlaşıldığı üzere yapılan sayısal model deneysel verileri bir hata oranı ile (~%20-24) teyit etmektedir. Malzeme açısından inceleme yapıldığında yatay yük taşıma kapasitesine kadar, her üç modelin birbirinde çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak sistem yatay yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra Popovics ve Saenz modelleri birbirine yakın sonuçlar verirken Thompson-Park modeli farklılık göstermektedir. Bunun sebebi ise bu modelin gerilme-şekil değiştirme eğrisinde maksimum gerilmeden sonraki kısmının daha tok olmasından kaynaklanmaktadır. Popovics modelinden elde edilen maksimum yatay yükün diğer iki modelden bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise gerilme-şekil değiştirme eğrisinde Popovics modelinin başlangıç elastisite modülünün diğer iki modele oranla daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 5.4).



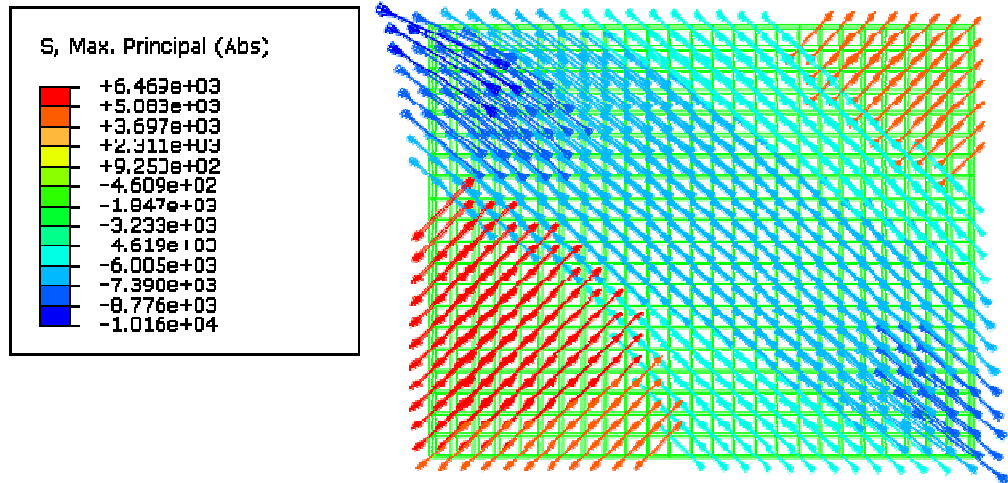
**Şekil 6.6.** Gazbeton duvarlı çerçeve deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Analizler sonucunda çerçeve-duvar arasında ayrılma oluşmadan önce tuğla dolgu duvarda meydana gelen asal gerilmeler Şekil 6.7'de görülmektedir. Şekil dikkatle incelendiğinde mavi okların yüklemeye dolaylı duvarda meydana geldiği kabul edilen eşdeğer sanal basınç çubuğunun oluşumunu gösterdiği görülmektedir. Bu şekilde sadece

maksimum asal gerilmeler gösterilirse eşdeğer basınç çubuğu daha açık şekilde görülecektir (Şekil 6.8 ve 6.9).

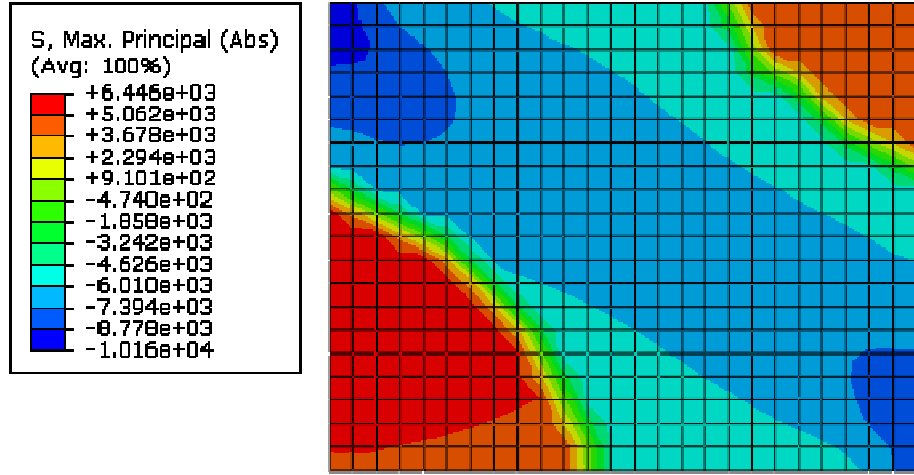


Şekil 6.7. Ayrılmadan önce tuğla duvarda meydana gelen gerilme dağılımı



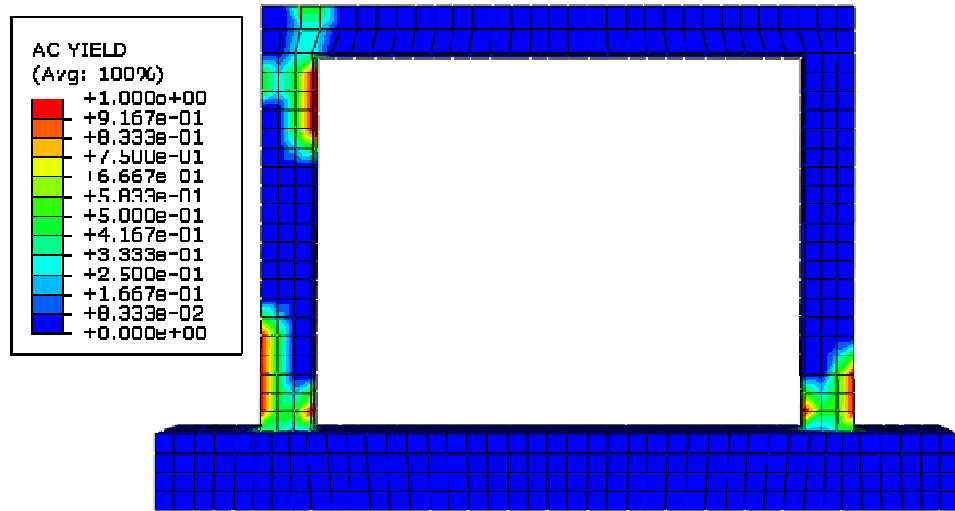
Şekil 6.8. Tuğla duvarda meydana gelen maksimum asal gerilmeler 1



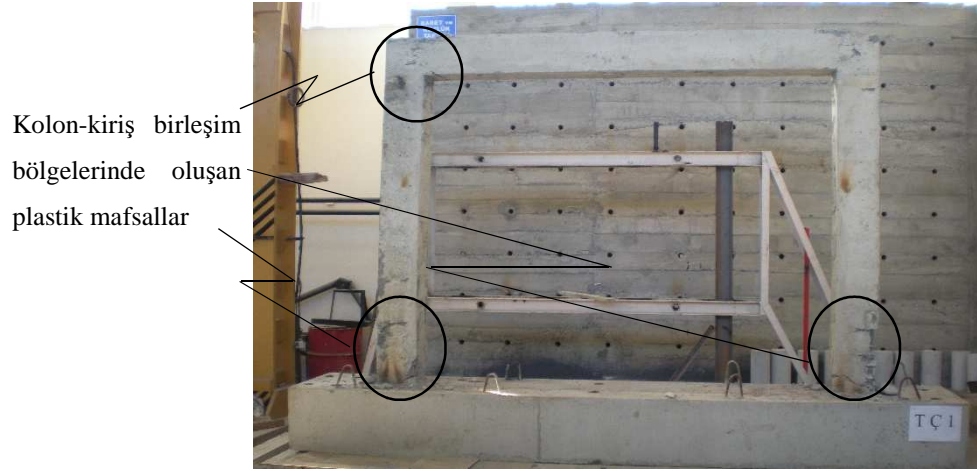


**Şekil 6.9.** Tuğla duvarda meydana gelen maksimum asal gerilmeler 2

Çerçevelerde göçme genellikle kolonlarda veya kolon-kiriş birleşim bölgelerinde plastik mafsalların oluşması şeklinde meydana gelmektedir (bkz. Şekil 2.17). Bu tür göçmeler daha çok birleşim bölgeleri zayıf, birleşim elamanları ve dolgu duvarı güçlü olan çerçevelerde meydana gelmektedir. Bu tez kapsamında yapılan analizlerde çerçevelerde meydana gelen plastik mafsallar Şekil 6.10'da görülmektedir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ise Şekil 6.11'de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde analizler sonunda meydana gelen plastik mafsallar ve deneyler sonucunda oluşan mafsalların yaklaşık olarak aynı bölgelerde meydana geldiği görülmektedir. Burada tuğla duvarlı betonarme çerçevede duvar düşerek çerçeveden ayrıldığı için Şekil 6.11'de görülmemektedir.

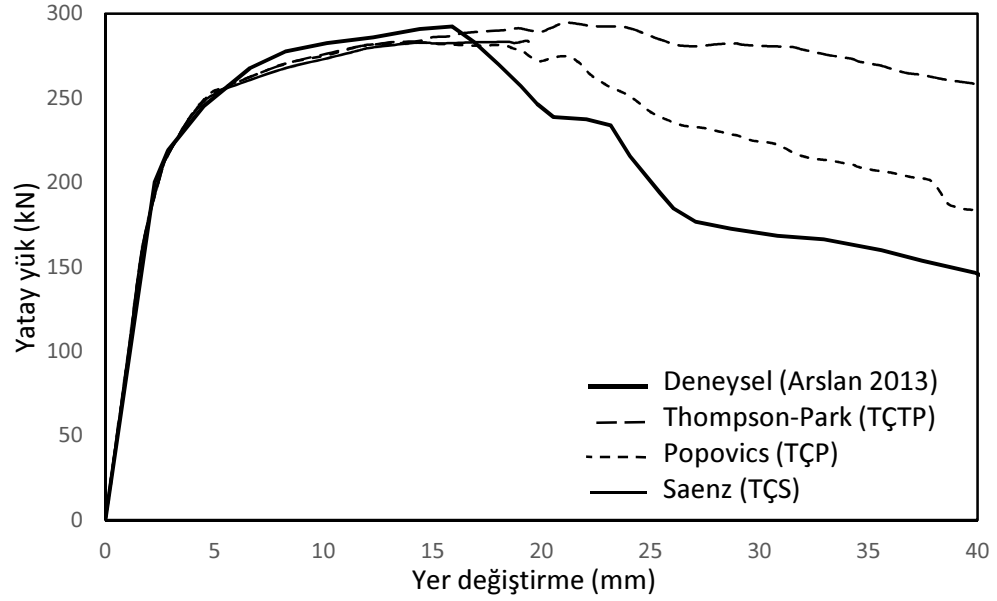


**Şekil 6.10.** Tuğla duvarlı çerçevede meydana gelen plastik mafsallar



**Şekil 6.11.** Tuğla çerçeve deney sonucundan bir görünüm

Tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçeve için yapılan deneysel ve sayısal modellerin karşılaştırması Şekil 6.12’de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere yapılan sonlu elemanlar modeli deney sonuçlarıyla büyük oranda örtüşmektedir. Sonlu elemanlar modellerinin her üç beton modeli için de başlangıç rijitliğini büyük ölçüde yansıtabildiği görülmektedir. Buna ek olarak deneysel sonuçlarından elde edilen maksimum yatay yük yaklaşık 289 kN iken sayısal modellerden 285 kN olarak elde edilmiştir. Buradan da anlaşıldığı üzere yapılan analiz ve oluşturulan sayısal model deneysel verileri belirli bir hata oranı ile (~% 1-3) teyit etmektedir. Malzeme modelleri açısından karşılaştırma yapıldığında yatay yük taşıma kapasitesine kadar her üç modelin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak yatay yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra Popovics modeli ve Thompson-Park modeli hem birbirlerinden hem de deneysel sonuçlardan farklılık göstermektedir. Bunun sebebi ise bu modellerin gerilme-şekil değiştirme eğrisinde maksimum gerilmeden sonraki kısmının birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 5.4). Saenz modeli ise yaklaşık 20 mm yatay yer değiştirmeden sonra sonlanmıştır. Bunun sebebi ise gerilme-şekil değiştirme eğrisinde bu modelin yumuşama kısmında ani bir gerilme kaybının olması gösterilebilir.



**Şekil 6.12.** Tuğla duvarlı çerçeve deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Yapılan bu sayısal çalışmalara ek olarak hem betonarme çerçeve hem de dolgu duvar elastik olarak analiz edilip elde edilen sonuçlar aşağıda deprem yönetmeliğine göre deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmaktadır.

Türk Deprem Yönetmeliği Bölüm 2.10’da görelî kat ötelemeleri için belirli sınırlamalar getirilmektedir. Buna göre azaltılmış görelî kat ötelemesi,  $\Delta_i$ , etkin görelî kat ötelemesi,  $\delta_i$ , aşağıdaki denklemlerden elde edilmektedir. Bu denklemde  $d_i$  ve  $d_{i-1}$  her bir deprem doğrultusu için binanın  $i$ ’inci ve  $(i-1)$ ’inci katlarında herhangi bir kolon veya perde uçlarında azaltılmış deprem yüklerine göre hesaplanan yatay yer değiştirmeleri göstermektedir.

$$\Delta_i = d_i - d_{i-1} \quad (6.1)$$

$$\delta_i = R\Delta_i \quad (6.2)$$

Denklem (6.2)’de geçen  $R$ , taşıyıcı sistem davranış katsayısını belirtmektedir. Hesaplanan  $\delta_i$  etkin görelî kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri  $(\delta_i)_{\max}$  aşağıdaki bağıntıdan elde edilir.  $h_i$  binanın  $i$ ’inci katının kat yüksekliğini göstermektedir.

$$\frac{(\delta_i)_{\max}}{h_i} \leq 0,02 \quad (6.3)$$

Dolgu duvarlı betonarme çerçeve tek katlı, tek açıklıklı ve 1/1 ölçekli olduğundan kat yüksekliği,  $h_i = 2,25$  m olarak dikkate alınmıştır. Denklem (6.1), (6.2) ve (6.3) birleştirildiğinde aşağıdaki bağıntı elde edilecektir. Böylece azaltılmış görelî kat ötelemesi,  $\Delta_i$ , taşıyıcı sistem katsayısına ve o kattaki kat yüksekliğine bağılı olarak elde edilecektir.

$$\Delta_i \leq \frac{0,02h_i}{R} \quad (6.4)$$

Yukarıda deprem yönetmeliğinin görelî kat ötelemeleri için verdiği sınırlamalar incelendiğinde yapının olabildiğince sünek davranışa itildiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada yapılan çubuklu betonarme çerçeve sistemler bu yöntemle aşağıda ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Gazbeton ve tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçeve elastik modellerde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

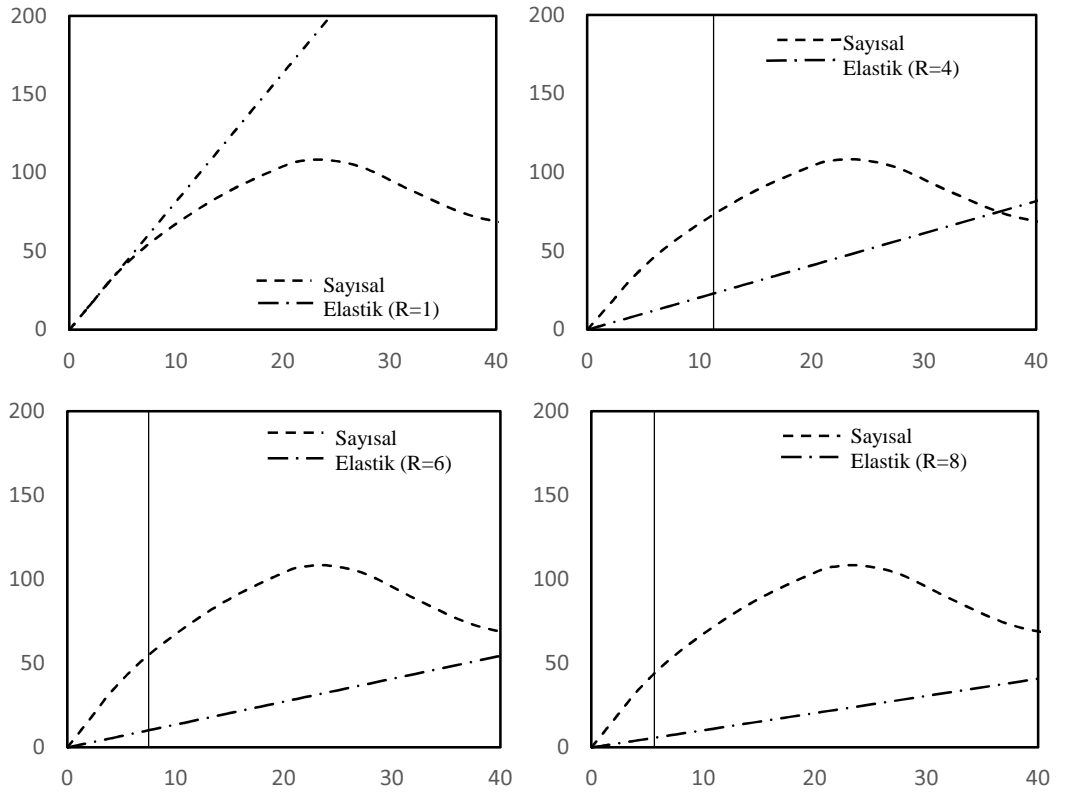
**Çizelge 6.1.** Elastik analizler için kullanılan malzeme özellikleri

	$E_m$ (MPa)	$E_c$ (MPa)
Gazbeton çerçeve	800	20000
Tuğla çerçeve	1000	23000

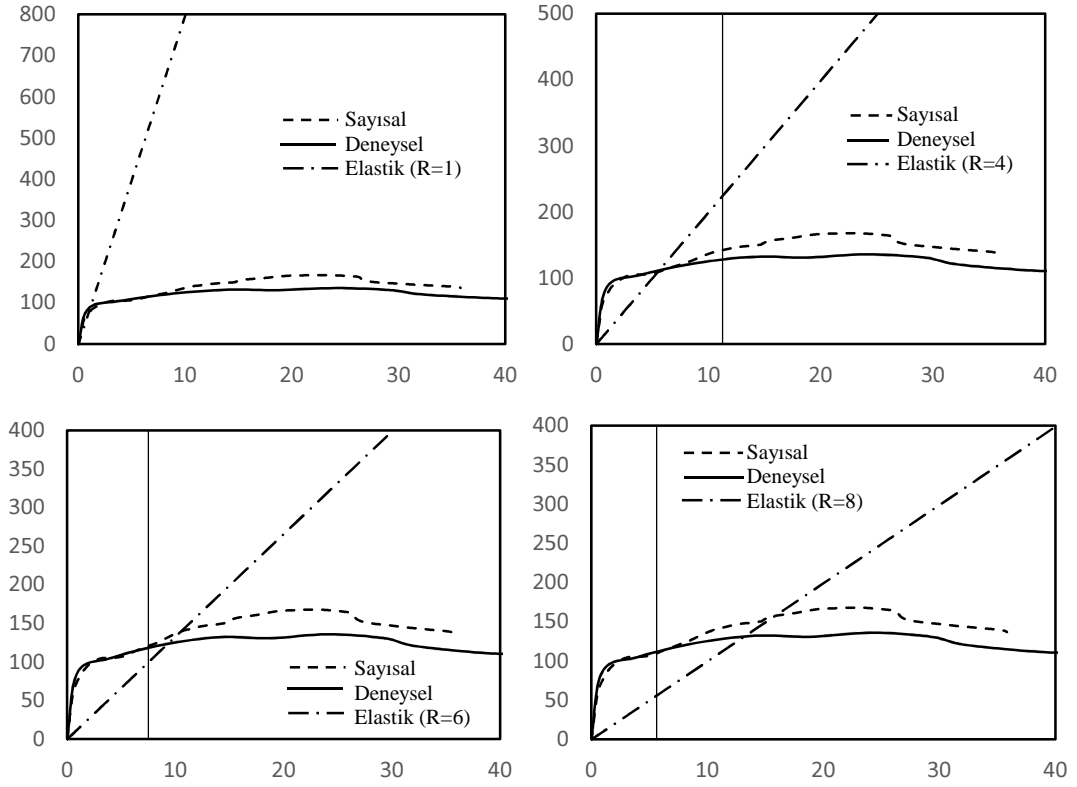
Gazbeton ve tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçeve sistemler elastik olarak modellenmiştir. Yatay yük (kN)-deplasman (mm) ilişkileri sırasıyla gazbeton çerçeve için Şekil 6.13 ve 6.14, tuğla çerçeve için Şekil 6.15 ve 6.16’da verilmektedir. Her bir şekilde Denklem (6.4)’te verilen eşitlikte Taşıyıcı Sistem Katsayısı  $R$  sırasıyla 1, 4, 6 ve 8 alınarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Burada her şekilde bulunan düşey çizgiler Denklem (6.4)’ten elde edilen sırasıyla  $R = 1, 4, 6$  ve 8 değerlerine karşılık gelen azaltılmış görelî kat ötelemesi,  $\Delta_i$  sınır değerlerini göstermektedir.

Gazbeton duvarlı betonarme çerçevede kullanılan boş çerçevenin elastik analiz sonuçları Şekil 6.13’te görülmektedir. Boş çerçevenin yer değiştirmeye karşı fazla bir rijitlik

gösteremediği görülmektedir. Boş çerçeveye eklenen gazbeton dolgu duvarın çerçeveye yaptığı etki Şekil 6.14'te verilmektedir. Şekillerde yatay eksen yer değiştirme, düşey eksen ise yatay yükü ifade etmektedir. Şekiller incelendiğinde deneysel ve sayısal sonuçlardan sistemin süneklik düzeyinin yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Taşıyıcı Sistem Katsayısı  $R=1$  için çizilen şekilde yatay yük oldukça yüksek değerlere çıkmaktadır. Nitekim deprem yönetmeliğinde bu durum geçerli olmamaktadır çünkü bu katsayı yönetmelikte 3 ve 8 arasında değişmektedir. Her dört şekil incelendiğinde  $R=6$  için çizilen şekilde deneysel sonuçlar, sayısal ve elastik sonuçlara çok yakın çıkmakta sonuç olarak sistemin süneklik düzeyinin yüksek olduğu görülmektedir. Deneysel ve analiz sonuçlarına bakıldığında göçmenin ani olmadığı ve sistemin yüksek süneklik düzeyine sahip olduğu görülmektedir.

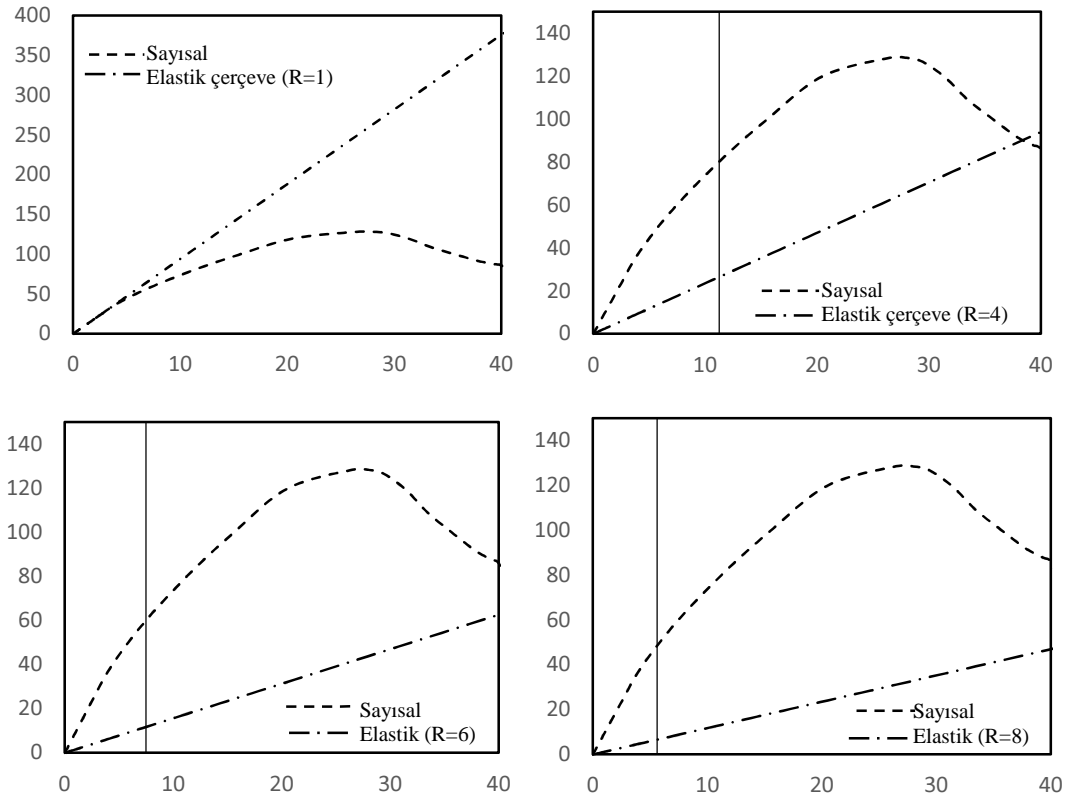


**Şekil 6.13.** Gazbeton çerçevede kullanılan boş çerçeve için elastik sonuçlar

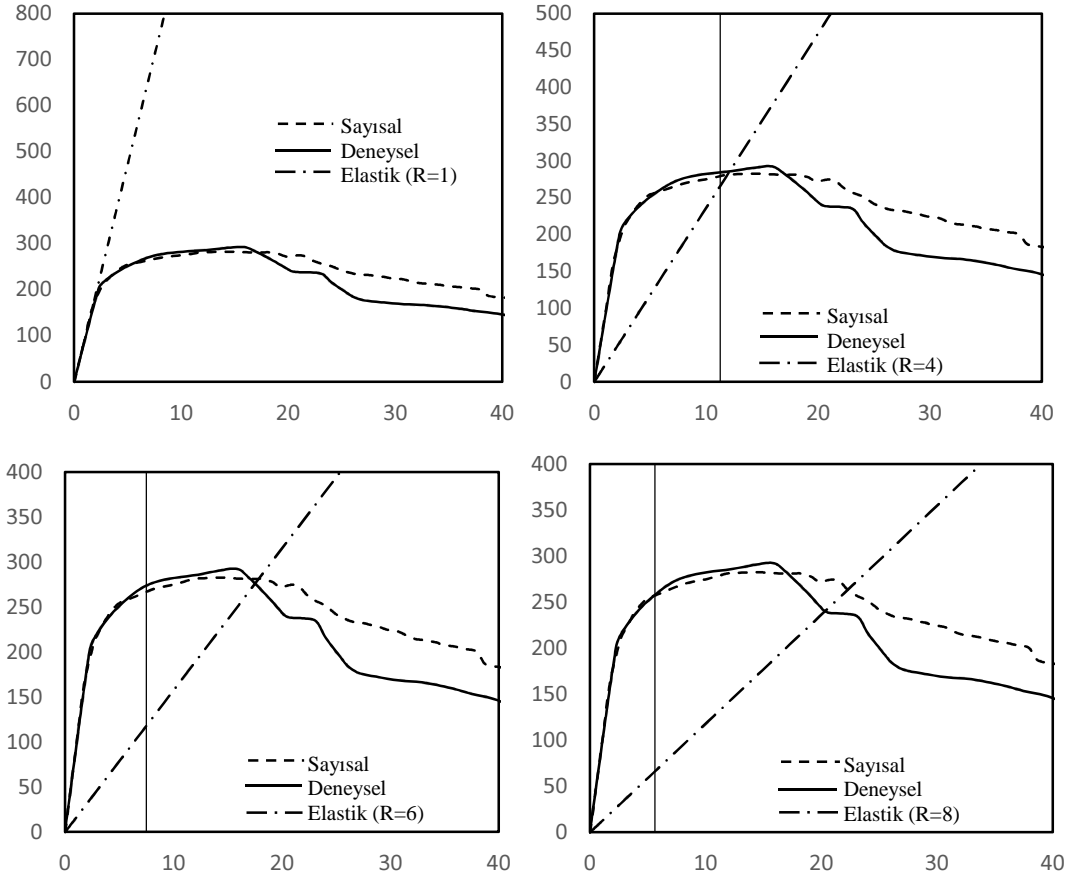


**Şekil 6.14.** Gazbeton duvarlı çerçeve için elastik sonuçların karşılaştırılması

Tuğla duvarlı betonarme çerçevede kullanılan boş çerçevenin elastik analiz sonuçları Şekil 6.15'te görülmektedir. Boş çerçevenin yer değiştirmeye karşı fazla bir rijitlik gösteremediği görülmektedir. Boş çerçeveye eklenen gazbeton dolgu duvarın çerçeveye yaptığı etki Şekil 6.16'da verilmektedir. Şekillerde yatay eksen yer değiştirme, düşey eksen ise yatay yükü ifade etmektedir. Şekiller incelendiğinde deneysel ve sayısal sonuçlardan sistemin süneklik düzeyinin normal olduğu anlaşılmaktadır. Taşıyıcı Sistem Katsayısı  $R=1$  için çizilen şekilde yatay yük oldukça yüksek değerlere çıkmaktadır. Nitekim deprem yönetmeliğinde bu durum geçerli olmamaktadır çünkü bu katsayı yönetmelikte 3 ve 8 arasında değişmektedir. Her dört şekil incelendiğinde  $R=4$  için çizilen şekilde elastik sonuçlar, deneysel ve sayısal sonuçlara çok yakın çıkmakta sonuç olarak sistemin süneklik düzeyinin normal olduğu görülmektedir.



**Şekil 6.15.** Tuğla çerçeve de kullanılan boş çerçeve için elastik sonuçlar



**Şekil 6.16.** Tuğla duvarlı çerçeve için elastik sonuçların karşılaştırılması

### 6.1.2. Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması

İnceleme konusu çerçeveler bu çalışma kapsamında farklı durumlarda modal testlere tabi tutulmuştur. İmalat aşamalarına bağlı olarak iki farklı çerçeve sistemi (Gaz beton dolgulu ve geleneksel tuğla dolgulu) dolgusuz, sıvasız ve sıvalı olmak üzere üç fazda teste tabi tutularak çok küçük zorlanmalar etkisinde ve çevresel etkiler altında dinamik karakteristikleri tespit edilmiştir. Bu aşamaların her birini gösterir görüntüler Şekil 6.17 ve 6.18’de verilmektedir.





**Şekil 6.17.** İmalatın farklı aşamaları için yapılan zorlanmış testlerden görünüm 1



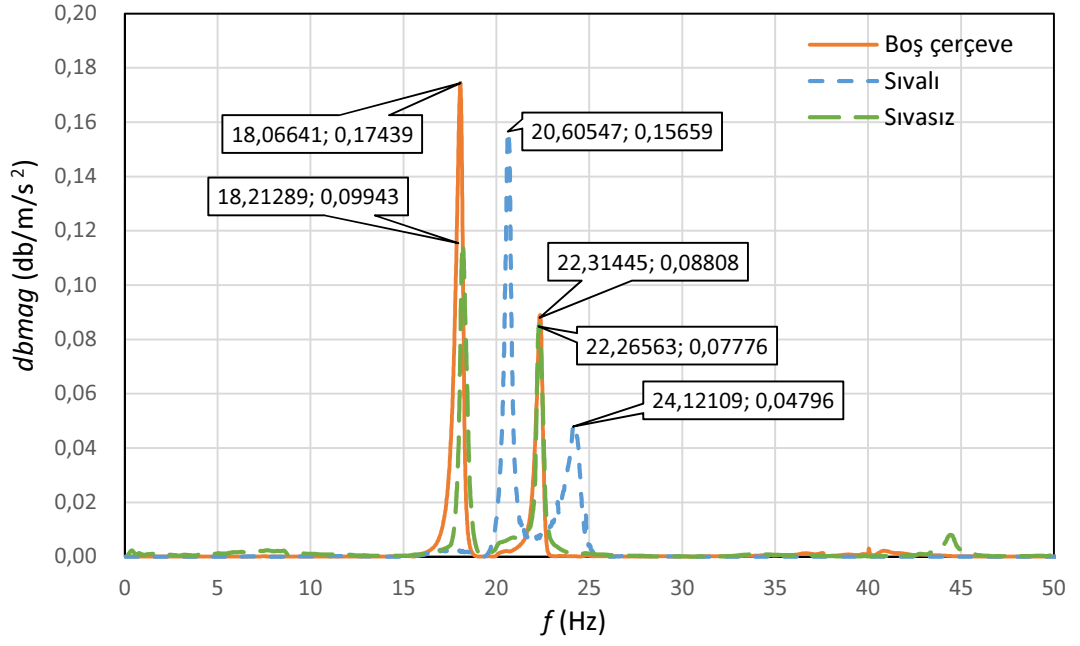
**Şekil 6.18.** İmalatın farklı aşamaları için yapılan zorlanmış testlerden görünüm 2

İncelemeler gerek sarsıcı etkisinde gerekse de çevresel etkiler altında 0-50 Hz, 0-100 Hz ve 0-200 Hz aralıkları için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Birçok farklı zorlanma tipleri kullanılarak verilerde meydana gelebilecek gürültü etkilerinin gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada bu zorlanma türlerinde İmpuls ve Burst Random türü zorlanmalardan elde edilen veriler işlenerek yorumlanmaktadır. 0-50 Hz aralığı için Butterworth Band-Stop filitreleme tekniği kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

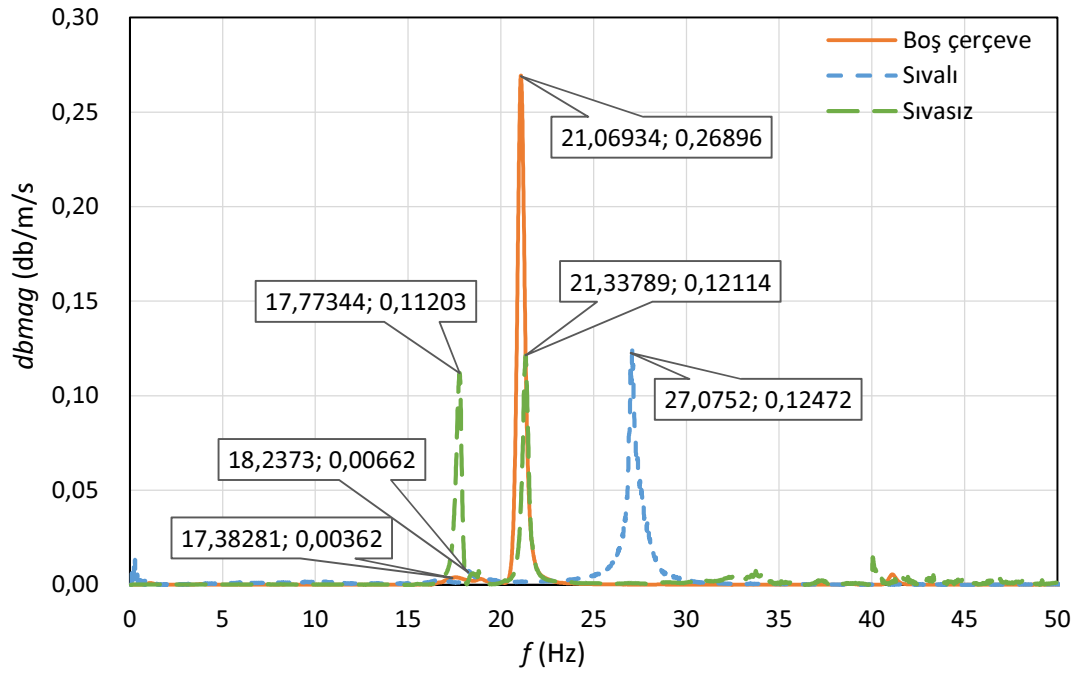
Gazbeton dolgu duvarlı betonarme çerçeve ile ilgili yapılan modal analiz sonuçları Şekil 6.19'da görülmektedir. Testler yapılırken duvarın çerçevenin dinamik karakteristiklerine etkisini belirleyebilmek açısından öncelikle boş çerçevenin analizleri yapılmıştır. Daha sonra dolgu duvarlı çerçeve sıvasız ve sıvalı halde test edilmiştir. Modal analiz testlerinden elde edilen sonuçlar aşağıda ayrıntılarıyla açıklanmaktadır.

Gazbeton dolgu duvarlı betonarme çerçeve için yapılan modal analizler sonucunda ilk ölçümlerde boş çerçevenin frekansı 18,06 Hz, sıvasız dolgu duvarlı çerçevenin 18,21 Hz ve sıvalı dolgu duvarlı çerçevenin ise 20,61 Hz olarak elde edilmiştir (Şekil 6.19). İkinci ölçümlerde ise boş çerçevenin frekansı 22,31 Hz, sıvasız dolgu duvarlı çerçevenin 22,26 Hz ve sıvalı dolgu duvarlı çerçevenin ise 24,12 Hz olarak elde edilmiştir. Dikkat edilirse her iki ölçümde de boş çerçeve ve sıvasız dolgu duvarlı çerçeve frekansları üst üste gelirken sıvalı dolgu duvarlı çerçevenin frekansı diğer ikisinden bir miktar daha fazla çıkmaktadır. Boş çerçeve ve sıvasız dolgu duvarlı çerçevenin birbirine yakın çıkmasının sebebi duvarın düşük yük düzeylerinde çalışmamasından kaynaklanmaktadır. Bunun sonucunda dinamik karakteristikler birbirine çok yakın çıkmaktadır. Sıvalı durumda ise sıvanın düşük yük düzeylerinde dahi duvarın çalışmasını sağladığı ve dolayısıyla sistemin dinamik karakteristiklerinin değişmesine sebep olduğu anlaşılmaktadır.

Gazbeton dolgu duvarlı betonarme çerçeve için yapılan modal analizler sonucunda elde edilen ölçümler Şekil 6.20'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde gazbeton dolgu duvarda olduğu gibi boş çerçeve ve dolgu duvarlı sıvasız çerçevenin frekansları aynı iken sıvalı halde frekans bir miktar artmaktadır. Sonuç olarak sıvanın duvarın çalışmasını sağladığı ve sistemin dinamik karakteristiklerini değiştirdiği anlaşılmaktadır. Bu durumda sistemin yer değiştirmeye vereceği tepkilerin de değişeceği bilinmelidir.



Şekil 6.19. Gazbeton duvarlı çerçeve modal analiz sonuçları



Şekil 6.20. Tuğla duvarlı çerçeve modal analiz sonuçları

## 6.2. Analitik modellerinin etkinliğinin irdelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde doğruluğu birçok araştırmacı tarafından irdelenen eşdeğer diyagonal basınç çubuk modelleri ele alınacaktır. Farklı diyagonal çubuk modelleri seçilerek bu modellerin dolgu duvarı idealize etmek için etkinlikleri incelenmektedir. Seçilen bir, iki ve üç çubuklu modeller ve bu modellerin üç boyutlu görünümü Şekil 5.17'de görülmektedir.

### 6.2.1.Eşdeğer Dinamik Yükleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

Türk Deprem Yönetmeliği Bölüm 2.10'da görelî kat ötelemeleri için belirli sınırlamalar getirilmektedir. Buna göre azaltılmış görelî kat ötelemesi,  $\Delta_i$ , etkin görelî kat ötelemesi,  $\delta_i$ , aşağıdaki denklemlerden elde edilmektedir. Bu denklemde  $d_i$  ve  $d_{i-1}$  her bir deprem doğrultusu için binanın  $i$ 'inci ve  $(i-1)$ 'inci katlarında herhangi bir kolon veya perde uçlarında azaltılmış deprem yüklerine göre hesaplanan yatay yer değiştirmeleri göstermektedir.

$$\Delta_i = d_i - d_{i-1} \quad (6.1)$$

$$\delta_i = R\Delta_i \quad (6.2)$$

Denklem (6.2)'de geçen  $R$ , taşıyıcı sistem davranış katsayısını belirtmektedir. Hesaplanan  $\delta_i$  etkin görelî kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri  $(\delta_i)_{\max}$  aşağıdaki bağıntıdan elde edilir.  $h_i$  binanın  $i$ 'inci katının kat yüksekliğini göstermektedir.

$$\frac{(\delta_i)_{\max}}{h_i} \leq 0,02 \quad (6.3)$$

Dolgu duvarlı betonarme çerçeve tek katlı, tek açıklıklı ve 1/1 ölçekli olduğundan kat yüksekliği,  $h_i = 2,25$  m olarak dikkate alınmıştır. Denklem (6.1), (6.2) ve (6.3) birleştirildiğinde aşağıdaki bağıntı elde edilecektir. Böylece azaltılmış görelî kat ötelemesi,  $\Delta_i$ , taşıyıcı sistem katsayısına ve o kattaki kat yüksekliğine bağılı olarak elde edilecektir.

$$\Delta_i \leq \frac{0,02h_i}{R} \quad (6.4)$$

Yukarıda deprem yönetmeliğinin görelî kat ötelemeleri için verdiği sınırlamalar incelendiğinde yapının olabildiğince sünek davranışa itildiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada yapılan çubuklu betonarme çerçeve sistemler bu yöntemle aşağıda ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Oluşturulan bir, iki ve üç çubuklu gazbeton dolgu duvarlı betonarme çerçeve modellerde eşdeğer çubuk için kullanılan malzeme özellikleri, etkili çubuk genişliği gibi parametreler gazbeton ve tuğla duvar için Çizelge 6.2’de verilmiştir. Modellenen eşdeğer çubuklar elastik kabul edilmiştir. Eşdeğer çubuk etkili genişliği için hem kolay uygulanması hem de ortalama bir değer olmasından dolayı denklem (2.9) kullanılmıştır. Eşdeğer çubuklar beam eleman olarak modellenmiş olup kalınlıkları duvar kalınlığına eşit kabul edilmiştir. Eşdeğer çubuk ve çerçeve arasında ABAQUS içerisinde mevcut olan MPC-beam sınır koşulu kullanılmıştır. Duvar ve çerçeve arasındaki temas mesafesi,  $Z_h$ , Denklem (2.2) ve (2.5)’ten elde edilmiştir.

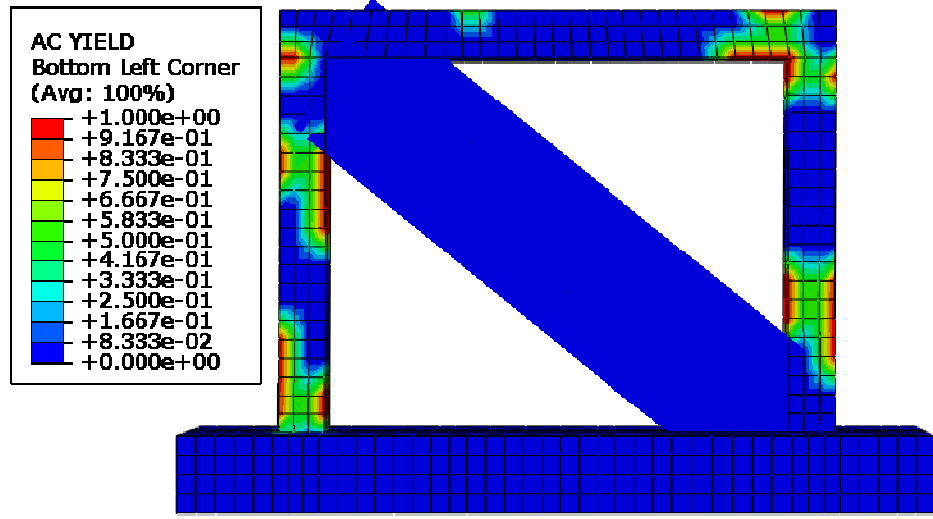
**Çizelge 6.2.** Çubuklar için kullanılan malzeme ve geometrik özellikler

	$E_m$ (MPa)	t (m)	w (m)	$Z_h$ (m)
Gazbeton çerçeve	800	0,2	$d_m/4=0,8$	1,2
Tuğla çerçeve	1000	0,2	$d_m/4=0,8$	1,2

Gazbeton ve tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçeve sistemler bir, iki ve üç çubuklu olarak modellenmiştir. Dolgu duvarlar bir, iki ve üç çubuklu olarak modellenip sonuçlar sırasıyla gazbeton için yatay yük (kN)-deplasman (mm) ilişkileri Şekil 6.22, 6.26 ve 6.30, tuğla için Şekil 6.24, 6.28 ve 6.32 verilmiştir. Her bir şekilde Denklem (6.4)’te verilen eşitlikte Taşıyıcı Sistem Katsayısı R sırasıyla 1, 4, 6 ve 8 alınarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Burada her şekilde bulunan düşey çizgiler Denklem (6.4)’ten elde edilen sırasıyla  $R= 1, 4, 6$  ve  $8$  değerlerine karşılık gelen azaltılmış görelî kat ötelemesi,  $\Delta_i$  sınır değerlerini göstermektedir.

Gazbeton dolgu duvarı idealleştirerek oluşturulan tek çubuklu analitik modelde eşdeğer çubuklar elastik kabul edilerek modellenmiştir. Çerçeve meydana gelen hasarlar Şekil 6.21’de görülmektedir. Deney sonuçlarından ve sayısal analizlerden elde edilen hasar ise

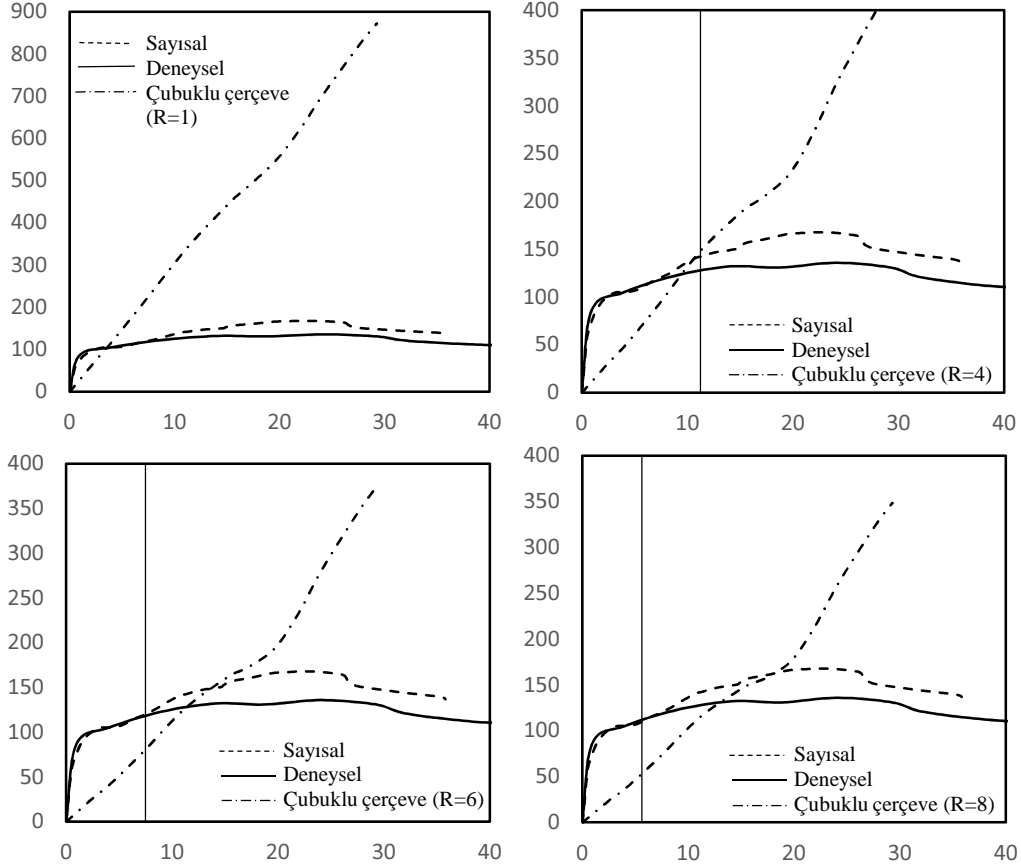
sırasıyla Şekil 6.4 ve 6.5'te gösterilmişti. Burada şekiller yorum kolaylığı açısından eşdeğer çubuk genişlikleri görünecek şekilde verilmektedir. Şekil incelendiği test sonuçlarında çerçevede meydana gelen mafsallar tek çubuklu modelde yaklaşık olarak meydana gelmiştir. Ancak tek çubuklu modelde kolon ortasında oluşan mafsalların çubuk genişliğine bağlı olarak oluştuğu anlaşılmaktadır. Deneysel çalışmada ve sayısal analizlerde duvar bir bütün olarak kolonun ötelenmesini engellediği için kolon orta kısmında mafsallaşma ancak duvar göçmeye yakın iken veya göçtükten sonra oluşabilmektedir.



**Şekil 6.21.** Tek çubuklu gazbeton çerçeve (TGÇP) analitik model sonuçları

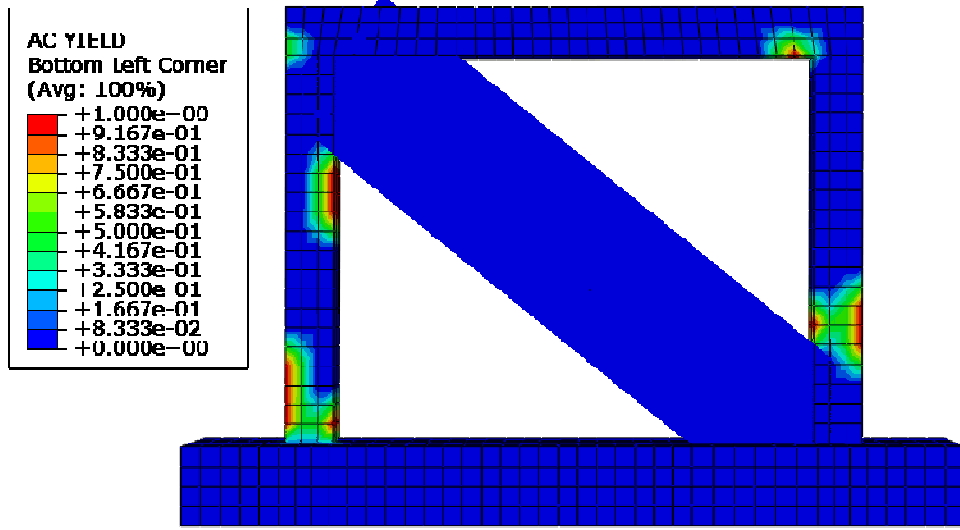
Gazbeton dolgu duvarı idealleştirmek için tek çubuklu modelden (TGÇP) elde edilen sonuçlar Şekil 6.22'de gösterilmiştir. Şekillerde yatay eksen yer değiştirme, dikey eksen ise yatay yükü ifade etmektedir. Şekiller incelendiğinde deneysel ve analitik sonuçlardan sistemin süneklik düzeyinin normal olduğu anlaşılmaktadır. Taşıyıcı Sistem Katsayısı  $R=1$  için çizilen şekilde yatay yük oldukça yüksek değerlere çıkmaktadır. Nitekim deprem yönetmeliğinde bu durum geçerli olmamakta, çünkü bu katsayı yönetmelikte 4 ve 8 arasında değişmektedir. Her dört şekil incelendiğinde  $R=4$  için çizilen şekilde deneysel sonuçlar sayısal ve analitik sonuçlara çok yakın çıkmakta sonuç olarak sistemin süneklik düzeyinin normal olduğu görülmektedir. Deneysel ve analiz sonuçlarına bakıldığında göçmenin ani olmadığı görülmektedir. Böylece duvarı idealleştirmek için kullanılan tek çubuklu modelin sistemin genel davranışını yansıttığı söylenebilir. Ancak

duvar ile çerçeve arasında meydana gelen etkileşimi, duvarda meydana gelen göçmelerin (köşe kırılması, diyagonal çatlak) belirlenemediği ifade edilmelidir.



**Şekil 6.22.** Tek çubuklu gazbeton çerçeve (TGÇP) modellerin karşılaştırılması

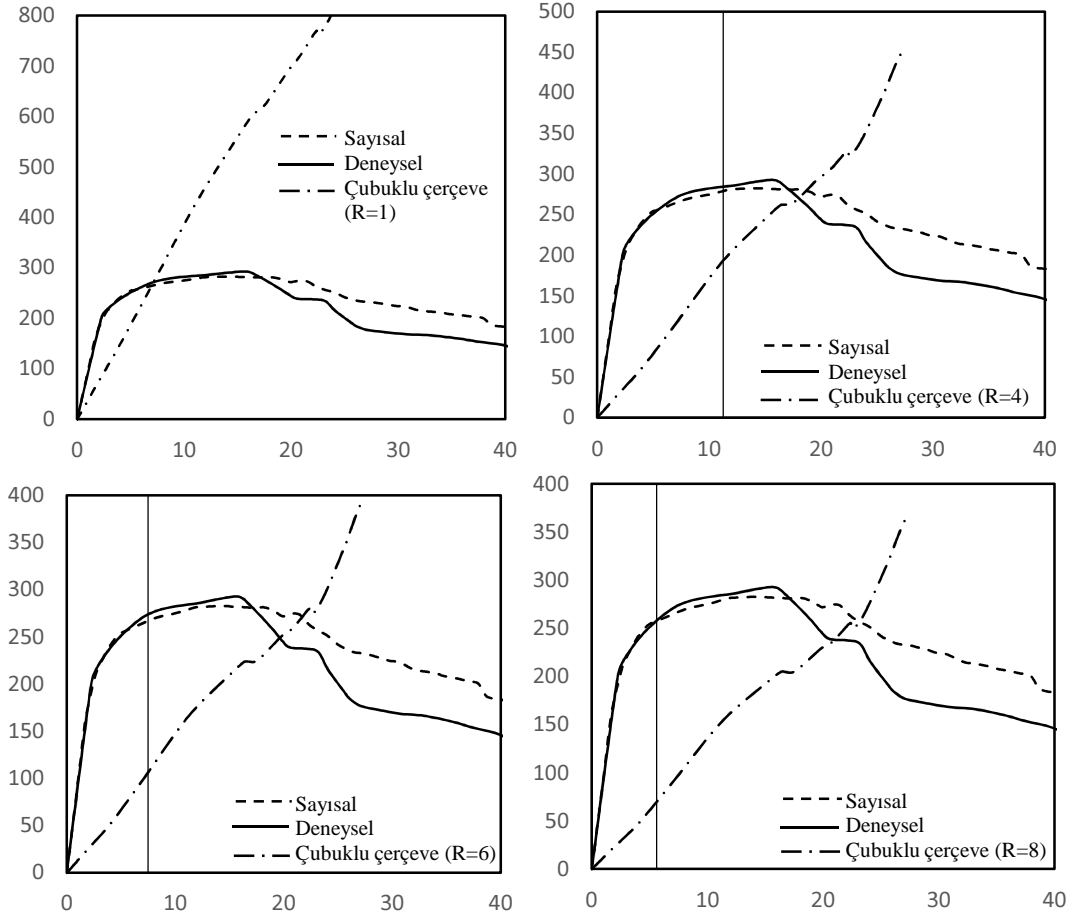
Tuğla dolgu duvarı idealleştirerek oluşturulan tek çubuklu analitik modelde çubuklar elastik kabul edilerek modellenmiştir. Çerçeve meydana gelen hasarlar Şekil 6.23'te görülmektedir. Deney sonuçlarından ve sayısal analizlerden elde edilen hasarlar ise sırasıyla Şekil 6.10 ve 6.11'de gösterilmişti. Burada şekiller yorum kolaylığı açısından çubuk genişlikleri görünecek şekilde verilmektedir. Şekil incelendiği test sonuçlarında çerçevede meydana gelen mafsallar tek çubuklu modelde yaklaşık olarak meydana gelmiştir. Ancak tek çubuklu modelde kolon ortasında oluşan mafsalların çubuk genişliğine bağlı olarak oluştuğu anlaşılmaktadır. Deneysel çalışmada ve sayısal analizlerde duvar bir bütün olarak kolonun ötelenmesini engellediği için kolon orta kısmında mafsallaşma ancak duvar göçmeye yakın iken veya göçtüktan sonra oluşabilmektedir.



**Şekil 6.23.** Tek çubuklu tuğla çerçeve (TTÇP) analitik model sonuçları

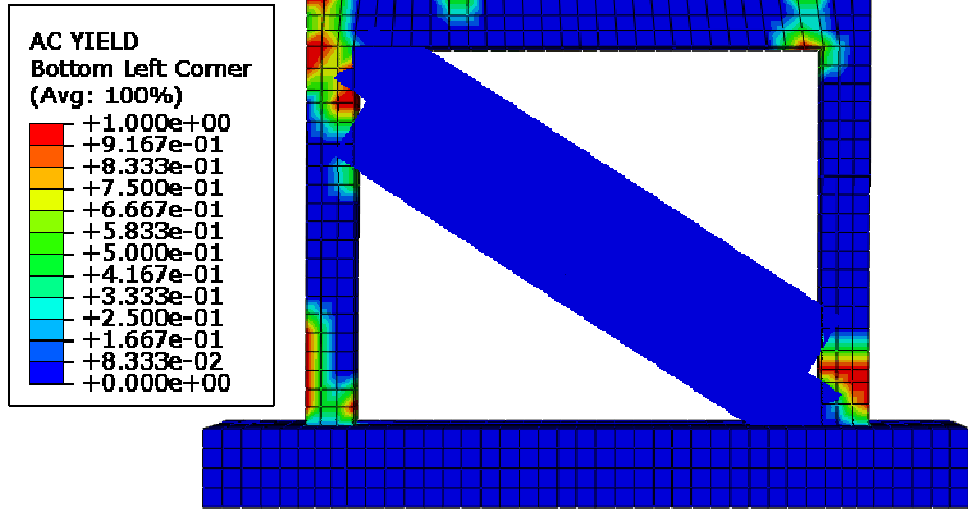
Tuğla dolgu duvarı idealleştirmek için tek çubuklu modelden elde edilen sonuçlar Şekil 6.24'te gösterilmiştir. Şekildeki deneysel ve sayısal sonuçlar incelendiğinde sistemin süneklik düzeyinin normal olduğu görülmektedir. Bu durum R=4 için çizilen şekil incelendiğinde görülmektedir. Şekil dikkatle incelendiğinde R=4 için çizilen grafikte yatay yük deneysel ve analiz sonuçlarından elde edilen değerden oldukça aşağıda kalmıştır. Türk Deprem Yönetmeliğinde yerinde dökme betonarme binalar için Taşıyıcı Sistem Katsayısı R, 4-8 arasında değişmektedir. Söz konusu tek çubuklu analitik modelde R=3 deneysel ve analitik sonuçlar birbirine yaklaşmaktadır. Bu durum dikkate alınarak sistemin süneklik düzeyinin düşük olduğu ifade edilebilir. Sistemin sünek olup olmadığı sadece deneysel sonuçlarla yorumlanarak da ifade edilebilir. Bunun için yataya yükün yer değiştirme artarken nasıl değiştiğinin irdelenmesi gerekmektedir. Sistemde oluşan yatay yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra ani bir şekilde azalmaktadır. Sünek sistemlerde bu azalış daha yapının süneklik düzeyine göre artıp azalmaktadır.





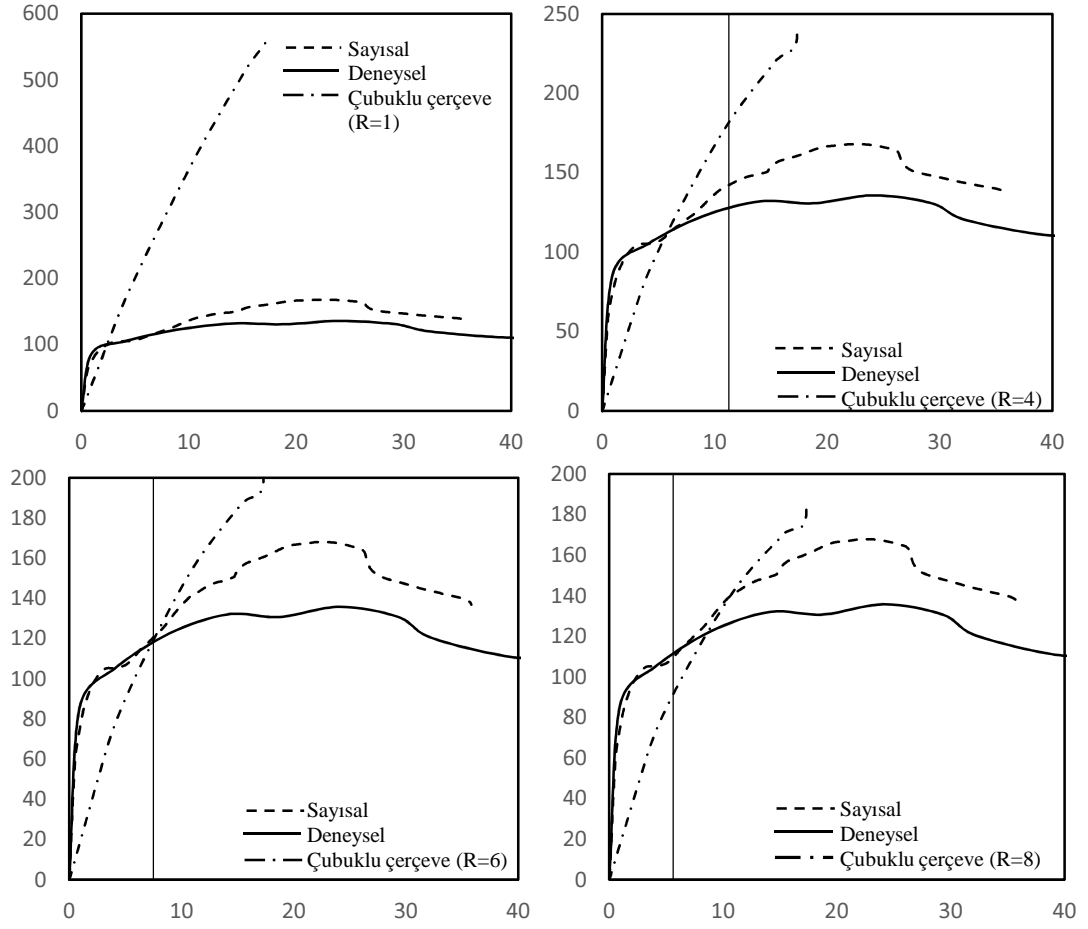
**Şekil 6.24.** Tek çubuklu tuğla çerçeve (TTÇP) modellerin karşılaştırılması

Gazbeton dolgu duvarı idealleştirilerek oluşturulan iki çubuklu analitik modelde çubuklar elastik kabul edilmiştir. Çerçeve meydana gelen hasarlar Şekil 6.25'te görülmektedir. Deneysel sonuçlarından ve sayısal analizlerden elde edilen hasarlar ise sırasıyla Şekil 6.4 ve 6.5'te gösterilmiştir. Burada şekiller yorum kolaylığı açısından çubuk genişlikleri görünecek şekilde verilmektedir. Test sonuçlarında çerçevede meydana gelen mafsallar iki çubuklu modelde yaklaşık olarak meydana gelmiştir. Ancak iki çubuklu modelde kolon ortasında mafsalların oluştuğu, oluşan bu mafsalların çubuk genişliğine ve çubukların konumuna bağlı olarak meydana geldiği anlaşılmaktadır. Deneysel çalışmada ve sayısal analizlerde duvar bir bütün olarak kolonun ötelenmesini engellediği için kolon orta kısmında mafsallaşma ancak duvar göçmeye yakın iken veya göçtüktan sonra oluşabilmektedir.



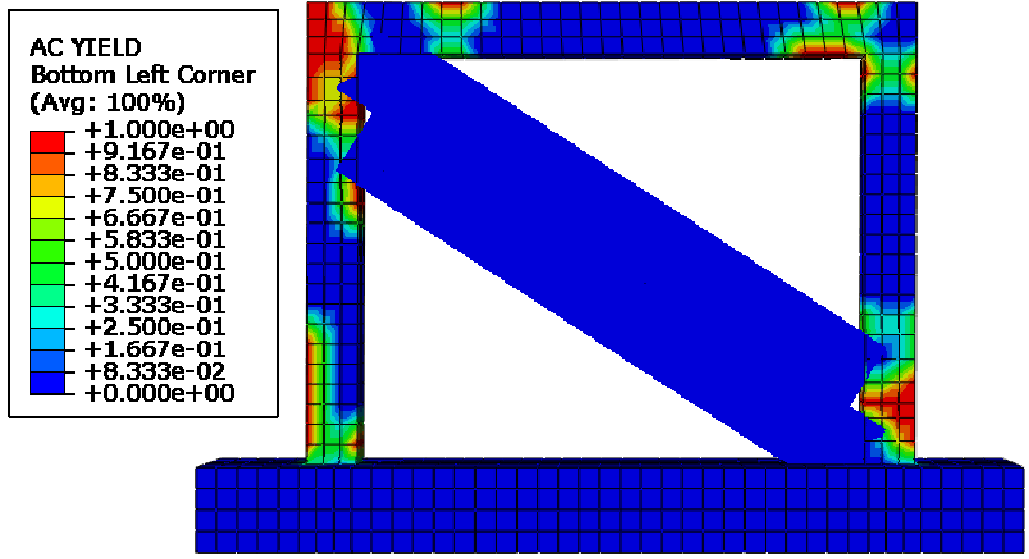
**Şekil 6.25.** İki çubuklu gazbeton çerçeve (İGÇP) analitik model sonuçları

Gazbeton dolgu duvarı idealleştirmek için iki çubuklu modelden elde edilen sonuçlar Şekil 6.26'da gösterilmiştir. Her bir şekilde Denklem (6.4)'te verilen denklemde taşıyıcı sistem katsayısı R sırasıyla 1, 4, 6 ve 8 alınarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekillerde yatay eksen yer değiştirme, dikey eksen ise yatay yükü ifade etmektedir. Şekil incelendiğinde deneysel ve analitik sonuçlardan sistemin süneklik düzeyinin yüksek olduğu anlaşılmaktadır. İki çubuklu modelden elde edilen başlangıç rijitliğinin sistemin deneysel ve sayısal sonuçlardan elde edilen başlangıç rijitliğine yakın olduğu görülmektedir. Analitik model analizleri sonucunda elde edilen başlangıç rijitliğinin kullanılan çubuk sayısına, konumuna ve genişliğine bağlı olarak değiştiği bilinmelidir. Taşıyıcı Sistem Katsayısı R=1 için çizilen şekilde yatay yük oldukça yüksek değerlere çıkmaktadır. R=6 için çizilen şekilde yatay yük deneysel ve analiz sonuçlarından elde edilen değerle neredeyse aynı çıkmıştır. Bu durumda duvarı idealleştirmek için yapılan iki çubuklu modelin sistemin genel davranışını yansıtabildiği söylenebilir. Böylece duvarı idealleştirmek için kullanılan iki çubuklu modelin sistemin genel davranışını yansıttığı söylenebilir. Ancak duvar ile çerçeve arasında meydana gelen etkileşimi, duvarda meydana gelen göçmelerin (köşe kırılması, diyagonal çatlak) belirlenemediği ifade edilmelidir.



**Şekil 6.26.** İki çubuklu gazbeton (İGÇP) çerçeve analitik modelin karşılaştırılması

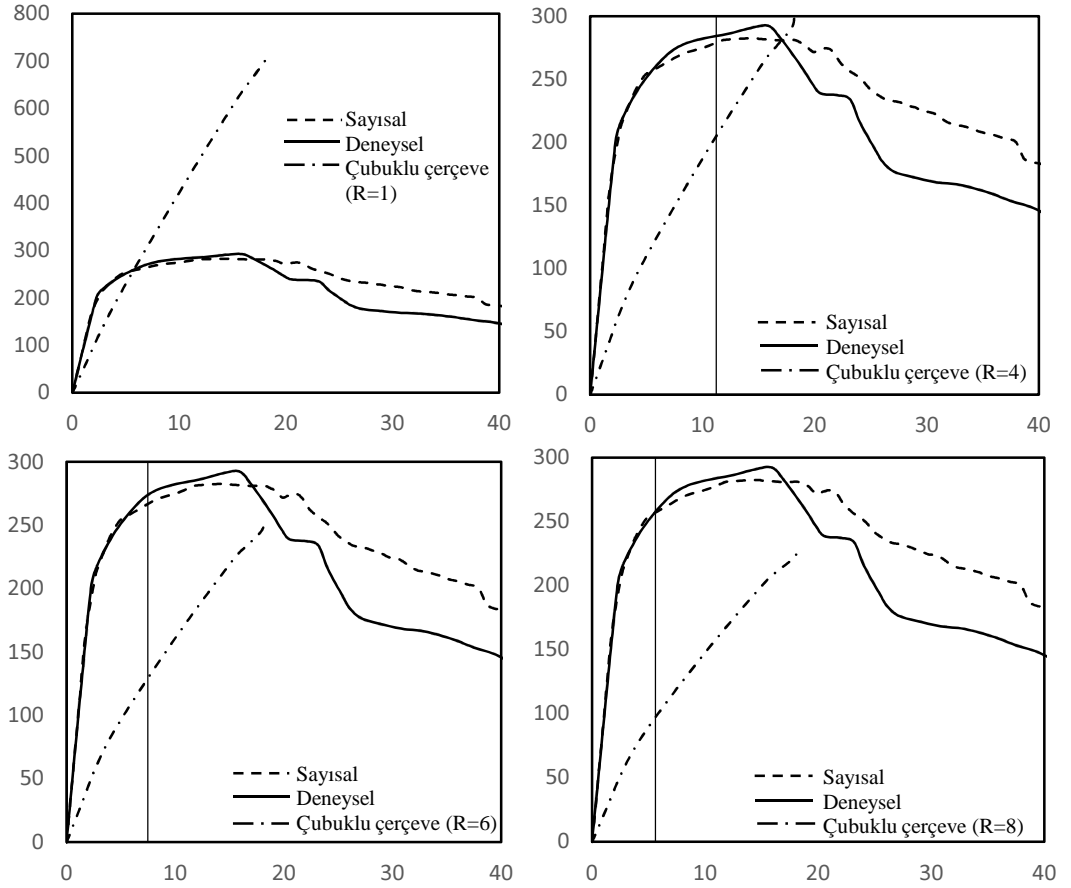
Tuğla dolgu duvarı idealleştirilerek oluşturulan iki çubuklu analitik modelde çubuklar elastik kabul edilmiştir. Çerçeve meydana gelen hasarlar Şekil 6.27’de görülmektedir. Deneysel sonuçlarından ve sayısal analizlerden elde edilen hasarlar ise sırasıyla Şekil 6.10 ve 6.11’de gösterilmiştir. Burada yorum kolaylığı açısından çubuk genişlikleri görünecek şekilde verilmektedir. İki çubuklu modelde kolon ortasında plastik mafsalların oluştuğu, oluşan bu mafsalların çubuk genişliğine ve çubukların konumuna bağlı olarak meydana geldiği anlaşılmaktadır. Deneysel çalışmada ve sayısal analizlerde duvar bir bütün olarak kolonun ötelenmesini engellediği için, kolon orta kısmında mafsallaşma ancak duvar göçmeye yakın iken veya göçtüktan sonra oluşabilmektedir. Bütün bunlar dikkate alındığında İki çubuklu modelin çerçevede meydana gelen göçme türünü, yaklaşık olarak yansıtılabildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 6.27. İki çubuklu tuğla çerçeve (İTÇP) analitik model sonuçları

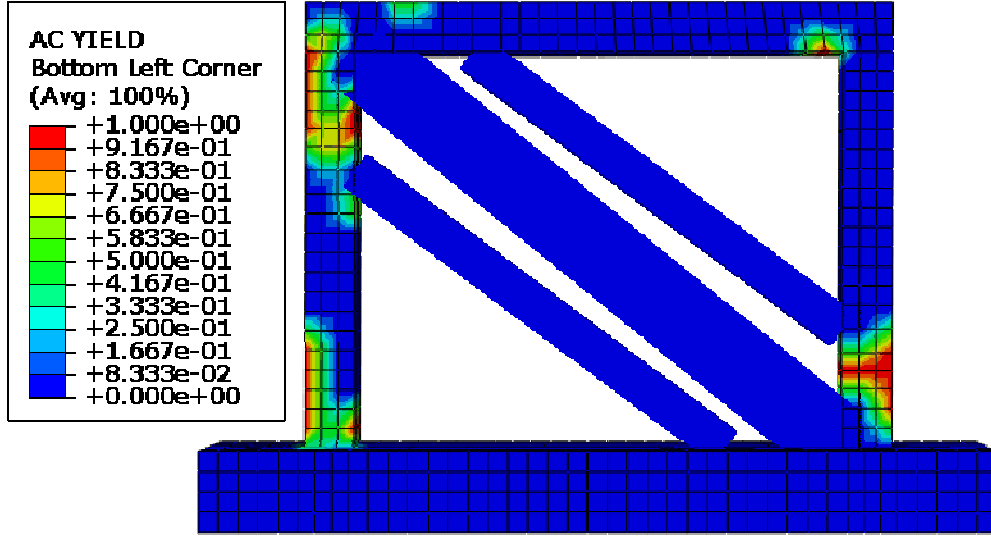
Tuğla dolgu duvarı idealleştirmek için iki çubuklu modelden elde edilen sonuçlar Şekil 6.28'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde deneysel ve sayısal sonuçlardan sistemin süneklik düzeyinin düşük olmadığı görülmektedir. Bu durum R=4 için çizilen şekil incelendiğinde görülmektedir. R=4 için çizilen şekilde yatay yük deneysel ve sayısal sonuçlardan elde edilen değerden aşağıda çıkmıştır.

Aynı şekilde R=8 için çizilen şekilde ise yatay yük deneysel ve analiz sonuçlarının oldukça altında kalmıştır. Bu sonuçlara göre tuğla duvarı idealleştirmek için yapılan iki çubuklu modelin sistemin davranışını genel itibariyle yansıtabildiği görülmektedir. Ancak duvar ile çerçeve arasında meydana gelen etkileşimi, duvarda meydana gelen göçmelerin (köşe kırılması, diyagonal çatlak) belirlenemediği ifade edilmelidir.



**Şekil 6.28.** İki çubuklu tuğla çerçeve (İTÇP) analitik modellerin karşılaştırılması

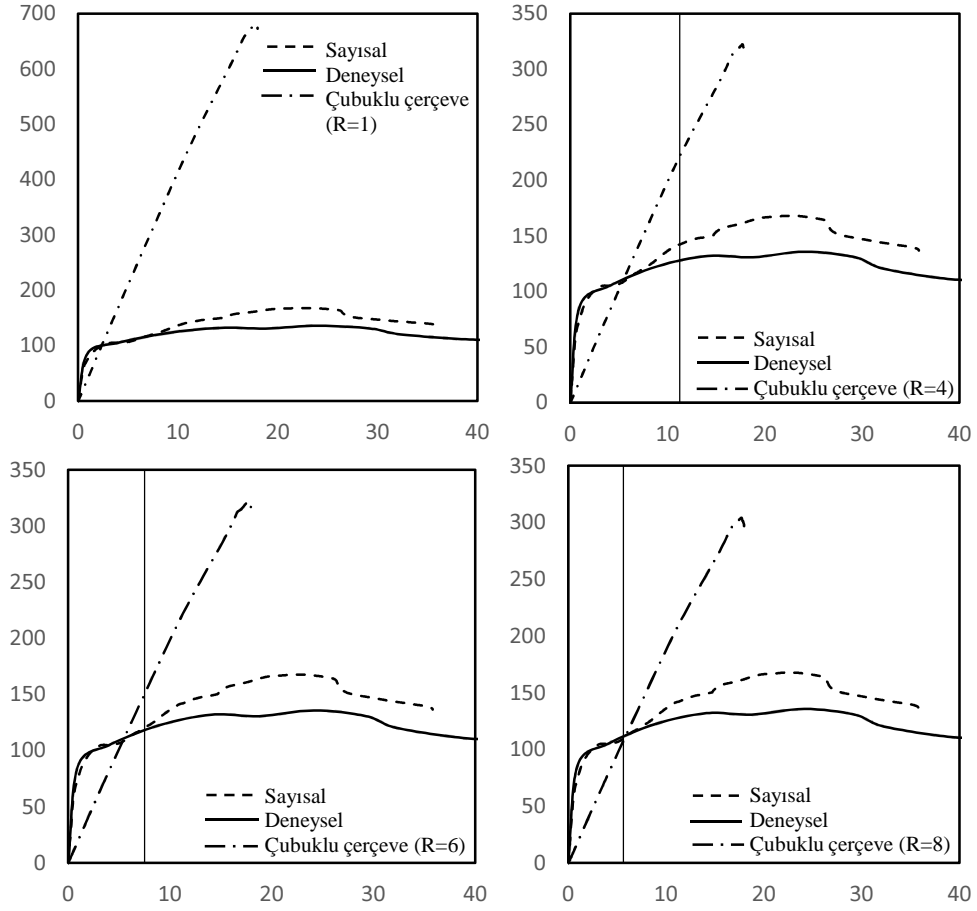
Gazbeton dolgu duvarı idealleştirerek oluşturulan üç çubuklu analitik modelde çubuklar elastik kabul edilmiştir. Çerçeve de meydana gelen hasarlar Şekil 6.29’da görülmektedir. Deneysel sonuçlarından ve sayısal analizlerden elde edilen hasarlar ise sırasıyla Şekil 6.4 ve 6.5’te gösterilmiştir. Burada şekiller yorum kolaylığı açısından çubuk genişlikleri görünecek şekilde verilmektedir. Üç çubuklu analitik modelde de kolon ortasında mafsalların oluştuğu, oluşan bu mafsalların çubuk genişliğine ve çubukların konumuna bağlı olarak meydana geldiği anlaşılmaktadır. Deneysel çalışmada ve sayısal analizlerde duvar bir bütün olarak kolonun ötelenmesini engellediği için kolon orta kısmında mafsallaşma ancak duvar göçmeye yakın iken veya göçtüktan sonra oluşabilmektedir. Burada üç çubuklu model sonuçlarının diğer çubuklu modellere oranla test sonuçlarına yakın olduğunu ifade etmekte fayda vardır.



**Şekil 6.29.** Üç çubuklu gazbeton çerçeve (ÜÇÇP) analitik model sonuçları

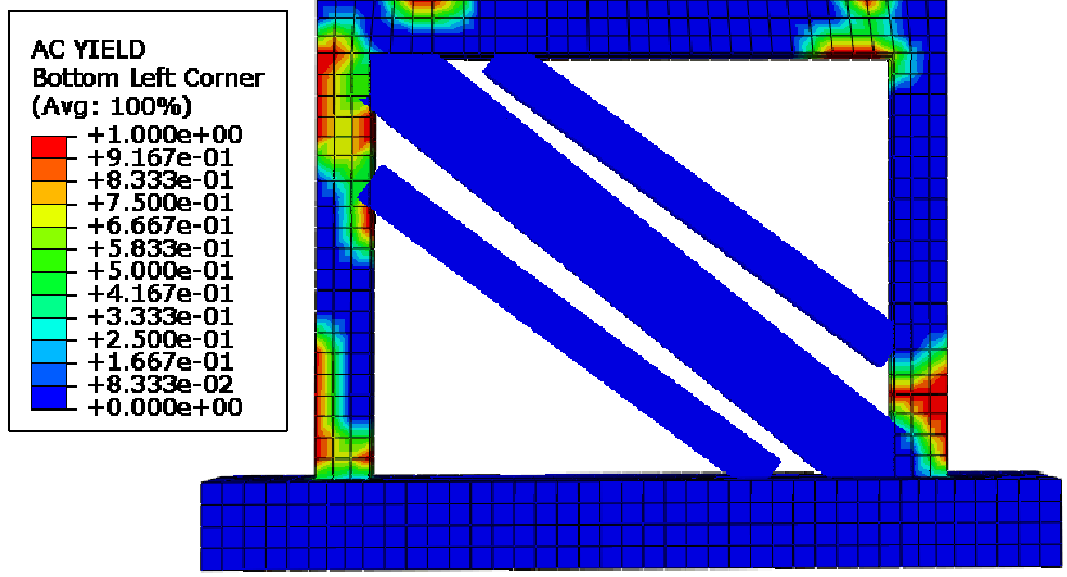
Gazbeton dolgu duvarı idealleştirmek için üç çubuklu modelden elde edilen sonuçlar Şekil 6.30'da gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde deneysel ve sayısal sonuçlardan sistemin süneklik düzeyinin yüksek olduğu anlaşılmaktadır.  $R=8$  için çizilen şekilde deneysel, sayısal ve analitik sonuçların üst üste geldiği görülmektedir. Bu durumda sistemin süneklik düzeyinin yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Üç çubuklu modelden elde edilen başlangıç rijitliği sistemin deneysel sonuçlardan elde edilen başlangıç rijitliğine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Böylece duvarı idealleştirmek için kullanılan üç çubuklu modelin sistemin genel davranışını yansıttığı söylenebilir. Ancak daha önce de ifade edildiği gibi çubuklu modeller duvar ile çerçeve arasında meydana gelen etkileşimi, duvarda meydana gelen göçmeleri (köşe kırılması, diyagonal çatlak) belirleyemediği bilinmelidir.

Burada dikkat edilecek bir diğer husus ise gazbeton duvarı idealleştirmek için önerilen eşdeğer basınç çubuğu sayısı arttıkça sistemin davranışına daha yakın sonuçlar verdiği ancak modeli oluşturmanın daha karmaşık olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, birden fazla çubuk kullanıldığı durumlar temas mesafesinin diğer bir ifadeyle çubukların konumunun sistemin genel davranışını etkilediği bilinmelidir. Nitekim Denklem (2.12) incelendiğinde Yanal rijitlik katsayısı ( $\lambda_h$ ) arttıkça temas mesafesinin ( $z$ ) azaldığı görülecektir. Diğer bir ifadeyle  $h_z$  arttıkça dolgu duvarlı çerçevenin rijitliği azalmaktadır.



**Şekil 6.30.** Üç çubuklu gazbeton çerçeve (ÜÇÇP) analitik modelin karşılaştırılması

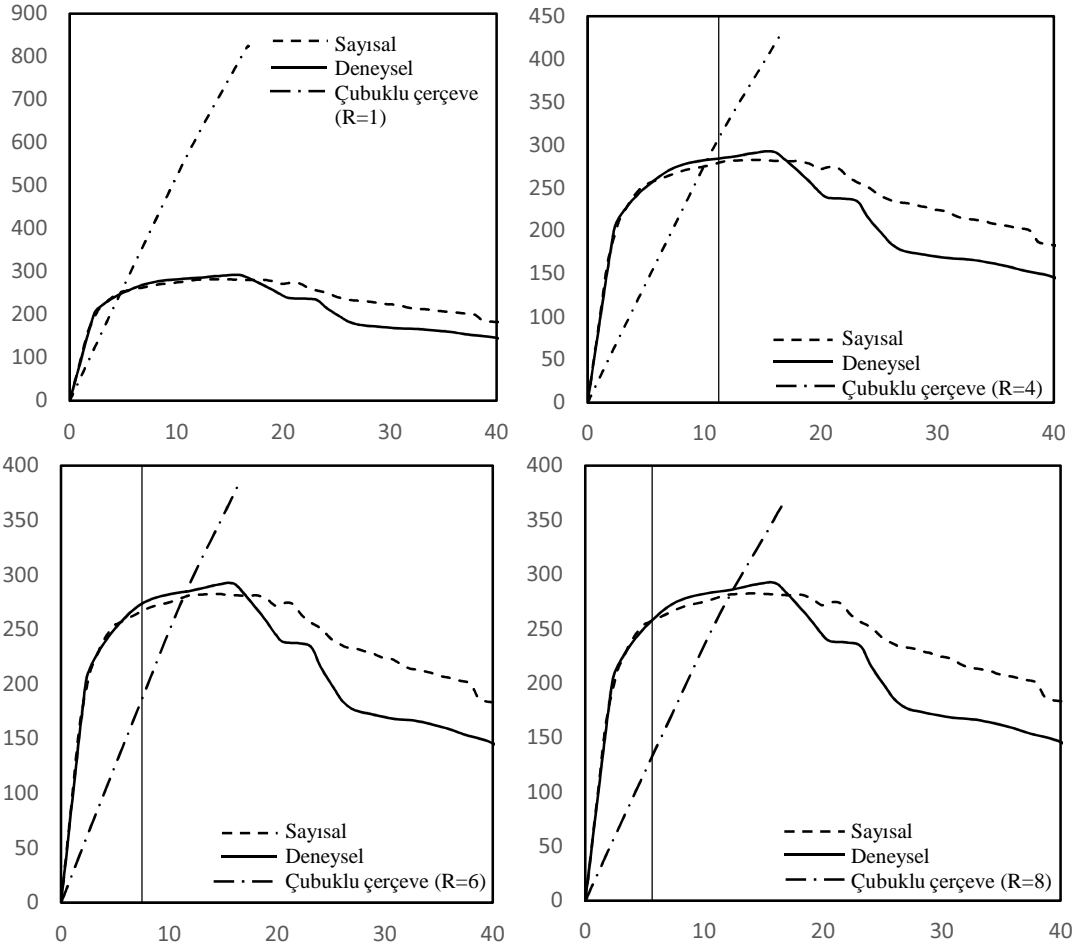
Tuğla dolgu duvarı idealleştirerek oluşturulan üç çubuklu analitik modelde çubuklar elastik kabul edilmiştir. Çerçeve meydana gelen hasarlar Şekil 6.31’de görülmektedir. Deney sonuçlarından ve sayısal analizlerden elde edilen hasarlar ise sırasıyla Şekil 6.10 ve 6.11’de gösterilmişti. Burada yorum kolaylığı açısından çubuk genişlikleri görünecek şekilde verilmektedir. Üç çubuklu modelde kolon ortasında plastik mafsalların oluştuğu, oluşan bu mafsalların çubuk genişliğine ve çubukların konumuna bağlı olarak meydana geldiği anlaşılmaktadır. Deneysel çalışmada ve sayısal analizlerde duvar bir bütün olarak kolonun ötelenmesini engellediği için kolon orta kısmında mafsallaşma ancak duvar göçmeye yakın iken veya göçtüktan sonra oluşabilmektedir. Bütün bunlar dikkate alındığında üç çubuklu modelin çerçeve meydana gelen göçme türünü yaklaşık olarak yansıtabildiği anlaşılmaktadır.



**Şekil 6.31.** Üç çubuklu tuğla çerçeve (ÜTÇP) analitik model sonuçları

Tuğla dolgu duvarı idealleştirmek için üç çubuklu modelden elde edilen sonuçlar Şekil 6.32’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde deneysel ve sayısal sonuçlardan sistemin süneklik düzeyinin normal olduğu görülmektedir. Analitik modelden elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise sistemin süneklik düzeyinin normal olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum  $R=4$  için çizilen şekil incelendiğinde görülmektedir.  $R=4$  için çizilen şekilde deneysel, sayısal ve analitik sonuçlardan elde edilen yatay yük değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Söz konusu üç çubuklu analitik modelde  $R=4$  için deneysel ve analitik sonuçlar birbirine yaklaşmaktadır. Bu durum dikkate alınarak sistemin süneklik düzeyinin normal olduğu ifade edilebilir. Aynı şekilde  $R=8$  için çizilen şekilde ise yatay yük deneysel ve sayısal sonuçların aşağısında kalmıştır. Bu sonuçlara göre tuğla duvarı idealleştirmek için yapılan üç çubuklu modelin sistemin davranışını genel itibariyle yansıtabildiği görülmektedir.





**Şekil 6.32.** Üç çubuklu tuğla çerçeve (ÜTÇP) analitik modelin karşılaştırılması

Gazbeton ve tuğla dolgu duvarları idealleştirmek için kullanılan tek, iki ve üç çubuklu modellerden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.3'te özetlenmiştir. Deprem yönetmeliğinde Taşıyıcı Katsayısı R, yapıların süneklik düzeyini belirlemek için kullanılmaktadır. Çizelgede Süneklik Düzeyi Düşük SDD, Süneklik Düzeyi Normal SDN ve Süneklik Düzeyi Yüksek SDY olarak ifade edilmektedir. Gazbeton dolgu duvarlı çerçevenin tuğla duvarlı çerçeveye göre daha sünek olduğu deney sonuçlarından anlaşılmaktadır. Çubuklu modeller karşılaştırılınca her üç modelde de gazbeton duvarlı çerçeveler tuğla duvarlı olana göre daha sünek çıkmıştır. Burada gazbeton duvarlı çerçevenin süneklik düzeyinin yüksek olduğu ifade edilebilir. Tuğla duvarlı çerçevenin süneklik düzeyi tek çubuklu ve iki çubuklu modellerde düşük ( $R=3$ ), üç çubuklu modelde ise normaldir ( $R=4$ ). Sonuç olarak tuğla duvarlı çerçevenin süneklik düzeyinin normal olduğu ifade edilebilir. Çubuklu modellerden elde edilen bu sonuçların deneysel sonuçlarla örtüştüğü anlaşılmaktadır.

**Çizelge 6.3.** Çubuklu modellerden elde edilen sonuçlar

	Tek çubuklu	İki çubuklu	Üç çubuklu
Gazbeton duvarlı çerçeve	SDN (R=4)	SDY (R=6)	SDY (R=8)
Tuğla duvarlı çerçeve	SDD (R=3)	SDD (R=3)	SDN (R=4)

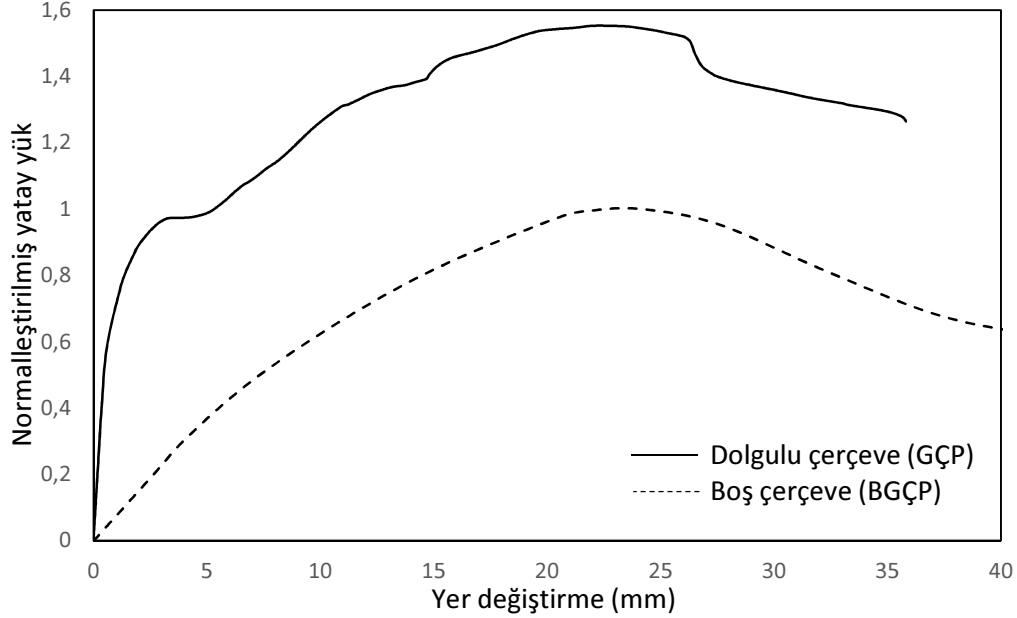
### 6.3. Dolgu Duvarın Rijitlik ve Dayanım Üzerindeki Etkisi

Bu tez kapsamında dolgu duvarların yapı üzerinde olumlu veya olumsuz etkileri olabileceği daha önce ilgili bölümlerde irdelenmişti. Bu kısımda tek açıklıklı, tek katlı 1/3 ölçekli betonarme çerçeveye eklenen dolgu duvarın çerçevenin rijitlik ve dayanımına olan katkısı hem gazbeton hem de tuğla duvarlı betonarme çerçeveler için irdelenmektedir.

Bu amaçla boş çerçeve ve dolgu duvarlı çerçeveler sayısal olarak sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla modellenip analiz edilmiştir. Daha önce de ifade edildiği gibi tez kapsamında üç farklı beton modeli kendi aralarında karşılaştırılmış ve bu modellerin birbirine yakın sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Bu bölümde yapılan analizlerde Popovics beton malzeme modeli kullanılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen veriler boş çerçeveye göre normalleştirilerek duvarın çerçevenin rijitlik ve dayanım üzerindeki etkileri irdelenmektedir.

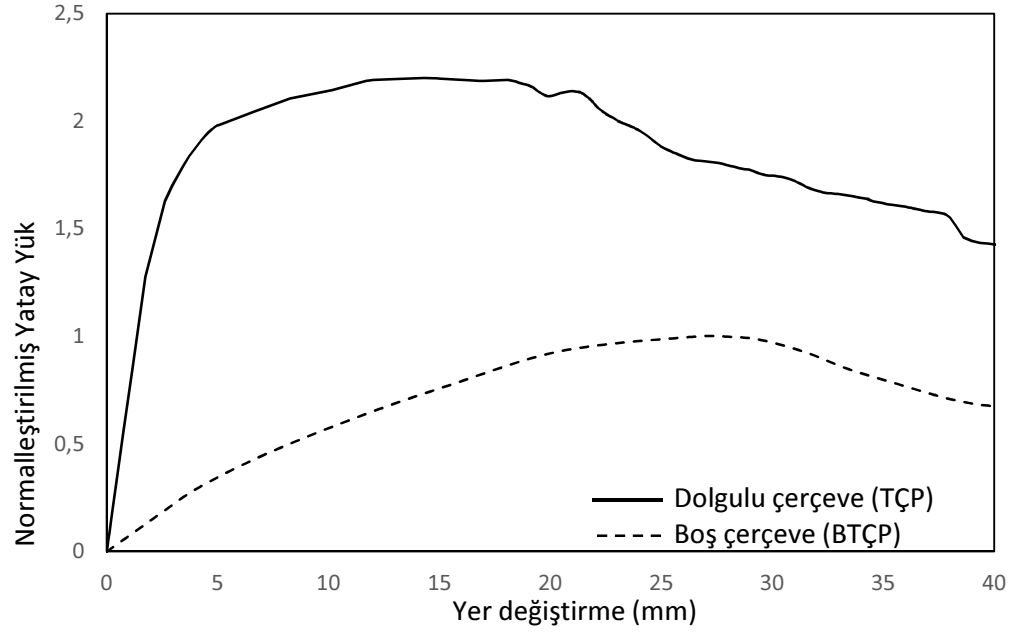
Gazbeton dolgu duvarlı betonarme çerçeve analizlerinden elde edilen ve boş çerçeve analizlerine göre normalleştirilen sonuçlar Şekil 6.33'te görülmektedir. Şekil dikkatle incelendiğinde gazbeton dolgu duvarın, boş çerçevenin dayanımına olan katkısı yaklaşık %50 civarında olduğu görülmektedir. Duvarın rijitliğe olan katkısı incelendiğinde boş çerçevenin düşük yük oranlarında aşırı yer değiştirme yaptığı, diğer bir ifadeyle yatay ötelenmeye karşı yeterince rijitlik gösteremediği anlaşılmaktadır. Ancak dolgu duvarlı çerçevenin, tam aksine, duvarın da katkısıyla rijitliğe ciddi oranlarda olumlu etkisi görülmektedir. Şekil dikkatle incelendiğinde yatay yük boş çerçeveye nazaran yüksek oranlara çıkmasına rağmen yatay yer değiştirmeye karşı ciddi bir rijitlik sergilediği ifade

edilebilir. Buradan çıkaracak sonuç ise boş çerçeve her ne kadar belli bir rijitliğe sahip olsa da gazbeton duvarın rijitliğe ve dayanıma olan katkısı önemlidir.



**Şekil 6.33.** Gazbeton çerçeve ve boş çerçeve analizlerinin karşılaştırılması

Tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçeve analizlerinden elde edilen ve boş çerçeve analizlerine göre normalleştirilen sonuçlar Şekil 6.34'te görülmektedir. Şekil dikkatle incelendiğinde tuğla dolgu duvarın boş çerçevenin dayanımına olan katkısı yaklaşık %100 oranında olduğu görülmektedir. Duvarın rijitliğe olan katkısı incelendiğinde boş çerçevenin düşük yük oranlarında aşırı yer değiştirme yaptığı, diğer bir ifadeyle yatay ötelenmeye karşı yeterince rijitlik gösteremediği anlaşılmaktadır. Ancak dolgu duvarlı çerçevenin, tam aksine, duvarın da katkısıyla rijitliğe ciddi oranlarda olumlu etkisi görülmektedir. Şekil dikkatle incelendiğinde yatay yük dolgulu çerçevede boş çerçeveye nazaran yüksek oranlara çıkmasına rağmen yatay yer değiştirmeye karşı ciddi bir rijitlik sergilediği ifade edilebilir. Buradan çıkarılacak sonuç ise boş çerçeve her ne kadar belli bir rijitliğe sahip olsa da tuğla duvarın rijitliğe ve dayanıma olan katkısı önemli oranlara çıkmaktadır.



**şekil 6.34.** Tuğla çeręeve ve boş çeręeven analizlerinin karşılaştırılması

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, gazbeton ve tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçeveler sonlu elemanlar yöntemi ile modellenip, lineer olmayan statik itme analizleri yapılmıştır. Bunlara ilave olarak literatürde duvar davranışını idealize etmek için önerilen farklı eşdeğer basınç çubuğu modelleri kullanılarak, bilgisayar ortamında modellenip analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bütün bunlar dikkate alındığında, bu çalışma sonucunda varılan sonuçlardan başlıcaları aşağıda maddeler halinde açıklanmaktadır:

- Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin çok karmaşık bir davranışa sahip olduğu ve harç, tuğla ve çerçevenin mekanik özelliklerinin ve boyutlarının davranışı değiştirebilecek düzeyde etkilerinin olduğu belirtilebilir. Sonuç olarak tez kapsamında belirtilen duvar göçme türlerinin, sadece katı (solid ) modeller kullanılarak temsil edilemeyeceği ifade edilebilir.
- Sonlu elemanlar yönteminin dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin davranışını anlamada ve yorumlamada çok önemli bir araç olduğu görülmüştür. Deneysel çalışmaların yapılmış olması, sonlu elemanlar modelinin kalibrasyonunda kolaylık sağlamıştır.
- Gazbeton dolgu duvarlı betonarme çerçevenin sayısal yöntemlerle modellenmesinden elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, büyük oranda örtüşmüştür. Ancak sayısal modelin, maksimum yatay yükü belirli bir hata payı ile belirlediği görülmüştür.
- Tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçevenin sayısal yöntemlerle modellenmesinden elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla büyük oranda örtüşmüş, rijitlik ve maksimum yatay yükün test sonuçlarına çok yakın olduğu görülmüştür.
- Betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin, dolgu duvarlı betonarme çerçeve davranışını değiştirebildiği görülmüştür. Buna ek olarak, analizlerde kullanılan Popovics, Saenz ve Thompson ve Park beton malzeme modelleri birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir.

- Dolgu duvar, yatay yükler etkisindeki çerçevenin dayanımına; gazbeton olması durumunda yaklaşık %50, tuğla duvar olması durumunda ise yaklaşık %100 oranında katkı sağlayıp dayanımı arttırmıştır.
- Dolgu duvar-çerçeve arasında kullanılan boyutsuz kohezyonlu davranış modeli duvar ile çerçeve arasındaki teması ve dolgu duvarlı çerçeve davranışını gerçekçi bir şekilde temsil etmiştir. Ancak bağlantı (tie link) ve sert kontak modellerinde, bu davranışın tam olarak temsil edilemediği görülmüştür.
- Analizlerde yükleme başladıktan hemen sonra duvarın orta bölgesinde çekme gerilmelerinden dolayı akma meydana geldiği ve dolgu duvarda plastikleşmenin başladığı gözlenmiştir. Boş çerçevede ise plastikleşmenin beklendiği gibi kolon giriş birleşim bölgelerinde ve bu bölgelere yakın yerlerde başladığı görülmüştür.
- Dolgu duvarın davranışını idealleştirmek için kullanılan tek eşdeğer çubuk modelinin duvarın davranışını genel olarak yansıttığı ancak çerçevede meydana gelen göçme türlerini tam olarak belirleyemediği görülmüştür.
- Dolgu duvarın davranışını idealleştirmek için kullanılan iki eşdeğer çubuk modelinin duvarın davranışını genel olarak yansıttığı ancak çerçevede oluşan göçme türlerini tek çubuklu modele göre daha iyi yansıtırsa da tam olarak belirleyemediği görülmüştür.
- Dolgu duvarın davranışını idealleştirmek için kullanılan üç eşdeğer çubuk modelinin duvarın davranışını tek ve iki çubuklu modellere göre daha iyi yansıttığı çerçevede meydana gelen göçme türlerini daha gerçekçi olarak yansıttığı görülmüştür. Dolgu duvarın davranışını idealleştirmek için kullanılan tek, iki ve üç çubuklu modellerden üç çubuklu modelin dolgu duvarlı çerçevenin başlangıç rijitliğine en yakın sonuçları verdiği anlaşılmıştır.
- Çalışma kapsamında kullanılan tuğla ve gaz beton dolgu duvarlar, çerçevenin başlangıç rijitliği, dayanımı ve sünekliği üzerinde olumlu etki yapmışlardır. Tuğla dolgu duvar çerçevenin başlangıç rijitliği ve dayanımı üzerinde daha belirgin bir şekilde etkili olurken, gazbeton dolgu duvar ise çerçevenin sünekliği üzerinde çok belirgin bir katkı sağlamıştır.

## KAYNAKLAR

**Abaqus 2013.** ABAQUS Documentation, Dassault Systèmes, Providence, RI, USA.

**Akın, E., Canbay, E., Binici, B. ve Özcebe, G. 2011.** Testing and analysis of infilled reinforced concrete frames strengthened with CFRP reinforcement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(19), 1605-1620.

**Al-Chaar, G., Mehrabi, A. B., and Manzouri, T. 2008.** Finite element interface modeling and experimental verification of masonry-infilled R/C frames. *Masonry Society Journal*, 26(1), 47–65.

**Ali, S.S. ve Page, A.W. 1987.** Finite element model for masonry subjected to concentrated loads. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 114(8), 1761-1784.

**Almusallam, T. ve Al-Salloum, Y. 2007.** Behavior of FRP strengthened infill walls under in-plane seismic loading. *American Society of Civil Engineers Journals*, 11(3), 308-316.

**Altın, S., Anıl, O., Kara, M.E. ve Kaya, M. 2008** .An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips. *Composites Part B: Engineering*, 39:680–693.

**Anıl, Ö. ve Altın, S. 2007.** An experimental study on reinforced concrete partially infilled frames. *Engineering Structures*, 29(3), 449-460.

**Anonim, 2011.** 23 Ekim 2011 mw 7,2 Van depremi sismik ve yapısal hasara ilişkin Saha gözlemleri. *Teknik Rapor, Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, ODTÜ, Ankara.*

**Anonim, 2014.** [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleListURL&\\_method=list&\\_ArticleListID=715434249&\\_sort=r&\\_st=13&\\_view=c&\\_md5=9b1e7f048c92f074494dd7fd25a0f25b&\\_se archetype=a](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=715434249&_sort=r&_st=13&_view=c&_md5=9b1e7f048c92f074494dd7fd25a0f25b&_se archetype=a) (18.01.2015)

**Arslan, M.E. 2013.** Deprem kumaşıyla güçlendirilen çevrimsel yük etkisindeki dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin davranışlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi. *Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.*

**Asok K. Ghosh ve Amde M. Amde 2002.** Finite Element Analysis of Infilled Frames. *Journal of Structural Engineering*, 128(7), 881–889.

**Asteris, P.G. 1996.** A method for the modelling of infilled frames (Method of contact points). *11th World Conference on Earthquake Engineering*, 1996, Mexico.

**Asteris, P.G. 2003.** Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 129(8), 1071-1079.

**Asteris, P.G., Kakaletsis, D.J., Chrysostomou, C.Z. ve Smyrou, E.E. 2011A.** Failure modes of infilled frames. *Electronic journal of Structural Engineering*, 11(1), 11-20.

**Asteris, P.G., Antoniou, S.T., Sophianopoulos, D.S. ve Chrysostomou, C.Z. 2011B.** Mathematical macromodelling of infilled frames: State of the art. *Journal of structural Engineering*, 137(12), 1508-1517.

**Asteris, P.G., Cotsovos, D.M., Chrysostomou, C.Z., Mohebkhah, A. ve Al-Chaar, G.K. 2013.** Mathematical micromodelling of infilled frames: State of the art. *Engineering Structures*, 56, 1905-1921.

**Baştürk, H. 2013.** Bursa tarihi yığma minarelerinin dinamik davranışlarının modal analiz yöntemi ile incelenmesi. Yüksek Lisans tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

**Bayülke, N. 2003.** Betonarme yapının dolgu duvarı. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, sayı:426, 85-98.

**Canbay, E. 2001.** Contribution of R/C Infills to the Seismic Behavior of Structural System. A Doctor of Philosophy Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara.

**Crisafulli, F.J. 1997.** Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills. PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand.

**Crisafulli, F. J. ve Carr, A. J. 2007.** Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures. *Bull NZ Soc. Earthquake Engineering*, 40(2), 69-77.

**Chopra, A.K. 2007.** Dynamics of structures theory and applications to earthquake engineering. Prentice Hall, 876 p.

**Chrysostomou, C. Z., Gergely, P., ve Abel, J. F. 1992.** Non-linear seismic response of infilled steel frames. *Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering*, 1992, Madrid, Spain.

**Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY). 2007.**

**Doğangün, A. 2014.** Betonarme yapıların hesap ve tasarımı. Birsen Yayınevi, 714 s.

**Doğangün, A. ve Livaoğlu, R. 2010.** Cam lifli takviyeli betonarme çerçevelerintekrarlı yükler altındaki davranışlarının incelenmesi. Deneysel çalışma raporu, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

**Doğruer, Y., O. 2006.** Eğri eksenli düzlemsel çubukların düzlem dışı static ve dinamik problemlerinin analitik çözümü. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

**El-Dakhkhni, W.W, Elgaaly, M. ve Hamid, A.A. 2003.** Three strut model for concrete masonry-infilled steel frames. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 129(2), 177-185.



- Erdem, I., Akyüz, U., Ersoy, U. ve Özcebe, G. 2006.** An experimental study on two different strengthening techniques for RC frames. *Engineering Structure*, 28:1843–1851.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G. 2001.** Betonarme. Evrim Yayınevi, Ankara.
- Ewing, B., D. ve Kowalsky, M., J. 2004.** Compressive behavior of unconfined and confined clay brick masonry. *Journal of Structural Engineering*, 130(4), 650-661.
- FEMA-178, 1989.** A handbook for seismic evaluation of existing buildings (Preliminary). *Earthquake Hazards Reduction Series 47, FEMA-178*, June 1989.
- Fiorato, A.E., Sözen, M.A. ve Gamble, W.L. 1970.** An investigation of the interaction of reinforced concrete frames with masonry filler walls. Report No. UILU-ENG 70-100, Dept. of Civ. Eng., University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Gülkan, P. ve Wasti, S.T. 1993.** Çerçeve-dolgu etkileşmesi: lineer olmayan bir irdeleme. *Türkiye İnşaat Mühendisliği XII, Teknik Kongre Bildiriler Kitabı*, Sayfa:39-52, Ankara.
- Heylen, W., Lammens, S., Sas, P. 2007.** Modal Analysis Theory and Testing. Leuven Katholieke University, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium, 340s. II. Uluslararası Türk-İslam Bilim ve Teknoloji Tarihi Kongresi, İ.T.Ü. 28 Nisan-2 Mayıs 1986, İstanbul, pp. 3-14.
- Holmes, M. 1961.** Steel Frames with Brickwork and Concrete Infilling. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1961, London, Part 2, 19, 473-478.
- Hu, H. ve Schnobrich, W. 1989.** Constitutive modeling of concrete by using non associated plasticity. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1(4), 199-216.
- Kadir, M.R.A. 1974.** The structural behaviour of masonry infill panels in framed structures, PhD thesis, University of Edinburgh.
- Kaushik, B.H., Durgest, C.R. ve Sudhir, K.J. 2007.** Stress-Strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9), 728-739.
- Kmiecik, P. ve Kaminski, M. 2011.** Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(3), 623-636.
- Köse, M. M. 2009.** Parameters affecting the fundamental period of RC buildings with infill walls. *Engineering Structures*, 31(1), 93-102.
- Liauw T.C. ve Kwan K.H. 1984.** Nonlinear behaviour of non-integral infilled frames. *Computers and Structures*, 18(3), 551-560.
- Liauw, T.C. ve Kwan, K.H. 1985.** Static and Cyclic behaviour of multistory infilled frames with different interface conditions. *J. of Sound and Vibration*, 99(2), 275-283.

**Livaoğlu R., 2001.** Yapıların Deprem Hesabında Burulma Düzensizliğinin ve Hesap Yöntemlerinin Etkinliğinin İncelenmesi. KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

**Lourenço, P.B. 2002.** Computations on historic masonry structures. Prog. Struct. Engng. Mater. 4(3), 301-319.

**Lourenço, P. B., Rots, J.G. ve Blaauwendraad, J. 1995.** Two Approaches for the Analysis of Masonry Structures: Micro and Macro-Modeling. HERON, 40(4), 313-340.

**Mainstone, R.J. 1971.** On the stiffnesses and strengths of infilled frames. Proceedings of Institution of Civil Engineers, 1971, Supplement (IV), 57-90.

**Mehrabi, A.B. ve Shing, P.B. 1997.** Finite element modelling of masonry infilled reinforced concrete frames. ASCE Journal of Structural Engineering, 123(5), 604-613.

**Mehrabi, A. B., Shing, P. B., Schuller, M., ve Noland, J. 1994.** Performance of masonry-infilled RC frames under in plane lateral loads. Report CD/SR-94/6 Structural Engineering and Structural Mech. Res. Ser., Dept. of Civil, Environmental and Arch. Engineering., Univ. of Colorado at Boulder, Colorado.

**Mehrabi, A. B., Shing, P. B., Schuller, M., ve Noland, J. 1996.** Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. Journal of Structural Engineering, 122(3), 228–237.

**Milani, G., Lourenço, P.B. ve Tralli, A. 2006.** Homogenized limit analysis of masonry walls, Part I: Failure surfaces. Computers and Structures, 84(3), 166-180.

**Mohebkhah, A., Tasnimi, A.A., ve Moghadam, H.A. 2008.** Nonlinear analysis of masonry-infilled steel frames with openings using discrete element method. Journal of Construction Steel Research, 64(12), 1463-1472.

**Mosalam, K.M., White, R.N., ve Gergely, P. 1997.** Static response of infilled frames using quasi-static experimentation. Journal of Structural Engineering, ASCE 123, 11, 1462-1469.

**Moss, P. J. ve Carr, A. J. 1971.** Aspects of the analysis of frame-panel interaction. Bulletin of the New Zealand National Society of Earthquake Engineering, 4(1), 126-144.

**Paulay, T. ve Priesley, M.J.N. 1992.** Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. John Wiley, New York, USA, 744 pp.

**Polyakov, S. V. 1960.** On the interaction between masonry filler walls and enclosing frame when loading in the plane of the wall. Translation in earthquake engineering, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), San Francisco.

**Popovics, S. 1973.** A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. Cement and Concrete Research, 3(5), 583-599.

**Pujol, S. ve Fick, D. 2010.** The test of a full-scale three-story RC structure with masonry infill walls. *Engineering Structures*, 32(10), 3112-3121.

**Resta, M., Fiore, A. ve Monaco, P. 2013.** Non-linear finite element analysis of masonry towers by adopting the damage plasticity constitutive model. *Advances in Structural Engineering*, 16(5), 791-803.

**Saatçioğlu, M., Serrato, F. ve Foo, S. 2005.** Seismic performance of masonry infill walls retrofitted with CFRP sheets. 7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures, 2005, USA.

**Saenz, LP 1964.** Discussion of Equation for the stress-strain curve of concrete” by Desayi P, Krishnan S. *ACI Journal*; 61:1229–1235.

**Saneinejad, A. ve Hoobs, B. 1995.** Inelastic design of infilled frames. *Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Journal of Structural Engineering*, 1995, 121(4).

**Santa-Maria H, Duarte G. ve Garib A. 2004.** Experimental investigation of masonry panels externally strengthened with CFRP laminates and fabric subjected to in plane shear load. 13th World conference on earthquake engineering Vancouver; Canada, BC.

**Sevim, B. 2010.** Kemer barajların dinamik davranışlarının sonlu eleman ve deneysel modal analiz yöntemleriyle belirlenmesi. Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

**Smith, B. S. 1962.** Lateral stiffness of infilled frames. *Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Journal of Structural Division*, 1962, 88(6).

**Smith, B. S. 1966.** Behavior of square infilled frames. *Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Journal of Structural Division*, 1966, 92(1).

**Smith, B. S. 1967.** Methods for predicting the lateral stiffness and strength of Multi-storey infilled frames. *Building Science*, 2,247-257.

**Stavridis, A. ve Shing, P.B. 2010.** Finite-element modeling of nonlinear behavior of masonry-infilled RC frames. *Journal of structural Engineering*, 136(3), 285-296.

**Syrmakezis, C. A., ve Vratsanou, V. Y. 1986.** Influence of infill walls to R.C. frames response. *Proceedings of 8th European Conference on Earthquake Engineering*, 1986, Lisbon, Portugal.

**Tao, Y., Chen, J.F., Stratford, T.J., ve Ooi, J.Y. 2012.** Numerical modelling of a large scale masonry arch bridge paper presented at structural faults and repair, Edinburgh, United Kingdom.

**Tedesco, J., W., Mcdougal, W.G. ve Ross, C.A. 1999.** *Structural Dynamics Theory and Applications*. Addison-Wesley, 816p.

**Tetik, D. 2007.** Dolgu duvarların betonarme yapıların serbest titreşimine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

**Thiruvengadam, V. 1985.** On the natural frequencies of infilled frames. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 13, 401-419.

**Topçu, A. 2014.** Taşıyıcı sistem düzensizlikleri, doğrular, yanlışlar, hasarlar. [http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/index\\_dosyalar/Dersler/Betonarme2/Sunular/Betonarme\\_2\\_3.pdf](http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/index_dosyalar/Dersler/Betonarme2/Sunular/Betonarme_2_3.pdf). (06.11.2014).

**Tzamtzis, A.D. ve Asteris, P.G.2004.** FE Analysis of complex discontinuous and jointed structural systems (Part 2: Application of the method-Development of a 3D model for the analysis of unreinforced masonry walls). Electronic Journal of Structural Engineering, 2004(1), 93-107.

**Van Mier, J. G. M., Shah, S. P., Arnaud, M., Balayssac, J. P., Bascoul, A., Choi, S., Dasenbrock, D., Ferrara, G., French, C., Gobbi, M. E., Karihaloo, B. L., König, G., Kotsovos, M. D., Labuz, J., Lange-Kornbak, D., Markeset, G., Pavlovic, M. N., Simsch, G., Thienel, K-C., Turatsinze, A., Ulmer, M., Van Geel, H. J. G. M., Van Vliet, M. R. A., Zissopoulos, D. 1997.** Strain-softening of concrete in uniaxial compression. Materials and Structures, 30(4), 195-209.

**Yuen, Y.P. ve Kuang, J.S. 2012.** Nonlinear response and failure mechanism of infilled RC frame structures under biaxial seismic excitation. 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012, Lisboa, Portugal.

**Wang, T. ve Hsu, T.C. 2001.** Nonlinear finite element analysis of concrete structures using new constitutive models. Computers and Structures, 79(32), 2781-2791.

**Zarnic, R. ve Tomazevic, M. 1984.** The behaviour of masonry infilled reinforced concrete frames subjected to cyclic lateral loading. Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering, 1984, San Francisco, USA.

**Zarnic, R. ve Tomazevic, M. 1988.** An experimentally obtained method for evaluation of the behavior of masonry infilled RC frames. Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering, 1988, Tokyo, Japan.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU  
Doğum Yeri ve Tarihi : Mardin, 1987  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu  
Lisans : Gazi Üniversitesi, 2011

Çalıştığı Kurum/Kurumlar  
Uludağ Üniversitesi : Araştırma Görevlisi, 2012

İletişim : [omerta@uludag.edu.tr](mailto:omerta@uludag.edu.tr)

### Yayınlar

#### Uluslararası Kongre ve Konferanslarda Sunulan Bildiriler

- 1. Livaoglu R, Doğangün A, Durmuş A, Özen S, Timurağaoğlu MÖ. 2013.** Hydrodynamic pressure variation on 100m<sup>3</sup>-container of elevated tank due to soil structure interaction. International Conference on Earthquake Engineering, 29 to 31 May 2013 – Skopje, ID=306.
- 2. Livaoglu R, Çakır T, Doğangün A, Durmuş A, Özen S, Timurağaoğlu MÖ. 2013.** structural Response of elevated tanks during the 1999 Turkey earthquakes. International Conference on Earthquake Engineering, 29 to 31 May 2013 – Skopje, ID=247.
- 3. Doğangün A, Timurağaoğlu MÖ, Livaoglu R, Özen S. 2013.** Performance of industrial structures in Turkey earthquakes. International Conference on Earthquake Engineering - 29 to 31 May 2013, Skopje, ID= 246.