

## Beton Panellerle Güçlendirme - Kuramsal Yaklaşım

Mehmet BARAN\*  
Erdem CANBAY\*\*  
Tuğrul TANKUT\*\*\*

### ÖZ

Yapılarda bulunan boşluklu tuğla duvarların yüksek dayanımlı önüretimli beton paneller kullanılarak güçlendirilmesi ilkesine dayanan ekonomik, yapısal olarak etkili ve uygulaması kolay bir depreme karşı güçlendirme yöntemi geliştirilmiştir. Bu teknik, yapının boşaltılmasını gerektirmemekte ve konut kullanıcılarına fazla rahatsızlık vermeden uygulanabilmektedir. Bu amaçla, toplam onsekiz adet boşluklu tuğla dolgu duvarlı çerçeve, deprem yükünü benzeştirecek tersinir tekrarları yatay yükler altında test edilmiştir. Deney elemanları altı değişik önüretimli beton panel kullanılarak güçlendirilmiştir. Bu çalışmada, yüksek dayanımlı önüretimli beton paneller kullanılarak güçlendirilen boşluklu tuğla dolgu duvarları hem eşdeğer çapraz çubuk elemanları ile hem de eşdeğer kalınlığa sahip duvarlar ile modellenmiştir. Deney sonuçları, sözü edilen iki yaklaşımın kuramsal sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Boşluklu tuğla duvar, yüksek dayanımlı önüretimli beton panel, depreme karşı güçlendirme, boşluklu tuğla dolgu duvarlı çerçeve, tersinir tekrarları yatay yükleme, eşdeğer çubuk elemanı, perde duvar.

### ABSTRACT

#### Seismic Strengthening with Precast Concrete Panels - Theoretical Approach

An economical, structurally effective and practically applicable seismic retrofitting technique has been developed on the basis of the principle of strengthening the existing hollow brick infill walls by using high strength precast concrete panels. The technique would not require evacuation of the building and would be applicable without causing much disturbance to the occupant. For this purpose, a total of eighteen reinforced concrete frames with hollow brick infill walls were tested under reversed cyclic lateral loading simulating earthquake. The specimens were strengthened by using six different types of precast concrete panels. In the present study, hollow brick infill walls strengthened by using high strength precast concrete panels were modeled once by means of equivalent diagonal

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 03.04.2009 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2010 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* Kırıkkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale - mbaran@kku.edu.tr

\*\* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - ecanbay@metu.edu.tr

\*\*\* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - ttankut@metu.edu.tr

struts and once as monolithic walls having an equivalent thickness. The experimental results were compared with the analytical results of the two approaches mentioned.

**Keywords:** Hollow brick infill wall, high strength precast concrete panel, seismic retrofitting, reinforced concrete frame with hollow brick infill walls, reversed cyclic lateral loading, equivalent diagonal strut, monolithic wall.

## 1. GİRİŞ

Türkiye'deki birçok betonarme bina depreme karşı yeterli dayanıma sahip değildir. Bu yüzden, çok sayıda bina deprem güvenliği açısından güçlendirilmeyi beklemektedir. Yerinde dökme betonarme perde duvarlar sistem davranışının iyileştirilmesinde çokça kullanılan güvenilir bir yöntemdir. Bu yöntem binaya oldukça yüksek dayanım ve yanal rijitlik sağlamaktadır. Türkiye'deki birçok bina özellikle büyük depremlerden sonra bu uygulamayla onarılmış ve güçlendirilmiştir. Ancak bu yöntemin önemli bir kısıtlaması bulunmaktadır. Betonarme perde duvar uygulamasının ağır ve uzun bir süreç olması binanın boşaltılmasını gerektirmektedir. Bu yüzden, uygulanması ekonomik, yapısal olarak etkili ve pratik (kolay) bir güçlendirme yöntemi geliştirmek gerekmiştir, öyle ki, bu güçlendirme yöntemi konutta yaşayanlara neredeyse basit bir boya-badana işleminden daha fazla rahatsızlık vermesin. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla, boşluklu tuğla duvarlı betonarme çerçevesiz yapılara uygun, binanın boşaltılmasını gerektirmeyen pratik bir yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışmada önerilen tekniğin prensibi yapıda bulunan boşluklu tuğla dolgu duvarların, üzerine yüksek dayanımlı önüretimli beton panellerin yapıştırılarak, güçlendirilmesi esasına dayanır; öyle ki bu duvarlar yanal rijitliği artıran yerinde dökme betonarme dolgular gibi davranabilsinler. Tek bir parça panel, kapıların arasından geçirmesi ve elde taşınması zor olduğundan uygun olmamaktadır. Bu yüzden panel, bir araya geldiklerinde birbirlerini tamamlayan uygun sayıda ve ağırlıkta parçalardan oluşmalıdır.

ODTÜ Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar [1,2,3,4], önerilen güçlendirme yönteminin, varolan yapıların güçlendirilmesinde başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir. Bu teknikte güçlendirilmiş dolgu duvarların, yapısal çözümlenmede nasıl modelleneceği önemli bir konudur. Bu çalışmada iki çeşit yöntem kullanılmıştır. İlk yöntemde panellerle güçlendirilmiş dolgu duvarları, çerçeve içine köşegen boyunca yerleştirilmiş, iki uçtan mafsallı birer basınç çubuğu gibi modellenmiştir. İkinci yöntemde ise güçlendirilmiş dolgu duvarlar, belli bir eşdeğer kalınlığa sahip monolitik perdeler gibi (eşdeğer kolon yöntemi) modellenmiştir.

Dolgu duvarlarla ilgili kuramsal ve deneysel çalışmalar yaklaşık elli senedir sürdürülmektedir. Dolgu duvarlı çerçevelerin taşıma kapasitelerinin belirlenmesi karmaşık bir problemdir. Dolgu duvarlarla ilgili ilk çalışma ellili yıllarda Polyakov [5] tarafından gerçekleştirilmiştir. Altmışlı yıllarda Smith [6,7,8,9] ve Carter[10], yetmişli yıllarda Mainstone ve Weeks [11], Mainstone [12], Klingner ve Bertero [13], doksanlı yıllarda Paulay and Prestley [14], Angel [15] ve Al-Chaar [16] dolgu duvarlarla ilgili kuramsal ve deneysel çalışmalar yapıp dolgu çerçeve davranışının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuşlardır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Deney Çerçeveleri

Bu çalışmanın deneysel kısmında kullanılan deney çerçeveleri [1,2,3], boşluklu tuğla duvarları olan 1/3 ölçekli, tek açıklıklı, bir veya iki katlı betonarme çerçevelerdir. Türkiye'deki yapılarda sıkça karşılaşılan eksiklikler bu çerçevelere bilinçli olarak yansıtılmışlardır. Bu eksiklikler arasında düşük beton dayanımı, düz demir kullanımı, katlar arası boyuna donatı eklerinde yetersiz bindirme boyu, yetersiz sargı donatısı ve kirişlerin kolonlardan daha güçlü olması durumu bulunmaktadır. Bu çerçevelerin katları boşluklu tuğla dolgu malzemesi ile örülmüş ve her iki yüzden sıvanmışlardır. İşçilik kalitesinin deney çerçevelerinin davranışı üzerindeki olası olumlu etkisi düşünülerek dolgu duvarları sıradan bir işçilikle sıvanmıştır.

### 2.2. Önüretimli Beton Paneller

Bu çalışmanın amacı dâhilinde altı değişik panel türü geliştirilmiş ve boşluklu tuğla dolgu duvarları güçlendirme yöntemi olarak test edilmiştir. Bu çalışmadaki paneller de çerçeveler gibi 1/3 ölçeklidir. Her bir panelin tasarımında en önemli kısıtlayıcı faktör panel ağırlığı olmuştur. Yüksek dayanımlı altı değişik tip beton panel, prototipte ağırlığı yaklaşık 80 kg olacak biçimde ve olağan çerçeve boyutları göz önünde bulundurularak, başlıca iki şekilde boyutlandırılmıştır. İlk iki tipte, zincirin en zayıf noktası olduğu düşünülen paneller arasında, hem kayma kamaları hem de kaynaklı bağlantılar kullanılmıştır. Paneller arasındaki epoksi harcı yeterli bir davranış sergilediğinden sonraki tiplerde kayma kamaları ve kaynaklı bağlantılar kullanılmamıştır.

Tüm elemanlarda gerçekteki uygulamayı yansıtması amacıyla, çerçeve elemanlarından daha dar olan boşluklu tuğlalar, çerçevenin dış yüzüyle bir-yüz olacak ve diğer yüzeyde bir dış oluşturacak biçimde yerleştirilerek her iki yüzden de sıvanmışlardır. İç paneller, iki katlı deney elemanlarının her iki katında da kolon ve kirişler tarafından çerçeve sarılacak şekilde ve sıvanmış tuğla dolgu duvarının iç yüzünün üstüne gelecek şekilde yerleştirilmişlerdir. Tablo 1'de bu tip panel uygulamasına "İçeriden" denilmiştir. Olası farklı davranışı görebilmek için bazı deney elemanlarında dış paneller çerçevenin dışına taşacak ve sıvanmış olan dış çerçeve yüzeyinin üstüne gelecek şekilde yerleştirilmişlerdir. Bu tip panellere Tablo 1'de "Dışarıdan" denilmiştir. Panel tipleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekilde Tip A, B, C ve D "İçeriden", Tip E ve F ise "Dışarıdan" uygulamasını göstermektedir. Tablo 1'de son kolon bir çerçeve boşluğunda kaç elemana (kolon ve kiriş) ankraj uygulandığını göstermektedir.

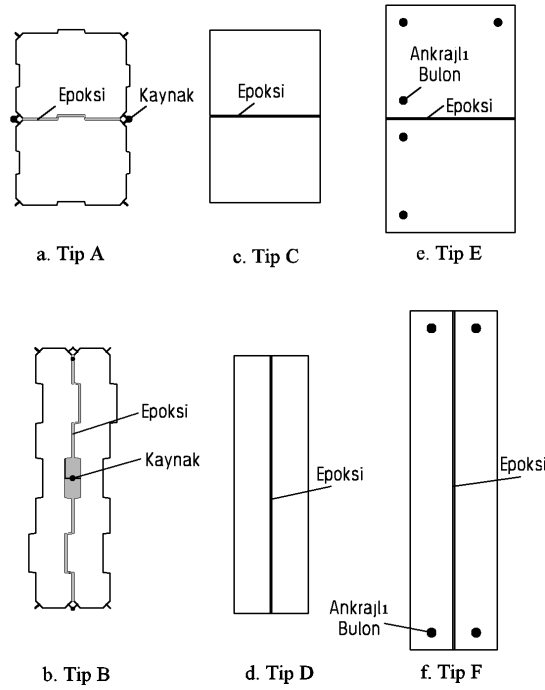
### 2.3. Malzeme

Türkiye'deki gerçek uygulamayı yansıtması açısından deney çerçevelerinde düşük dayanımlı beton, panel kalınlığını minimize edebilmek için de panellerde yüksek dayanımlı beton kullanılmıştır. Şekil 2'de gösterilen tuğla dolgu duvarlar, sıradan çimento-kireç karışımı ile sıvanmışlardır. Deney çerçevelerinde düz donatı kullanılmıştır.

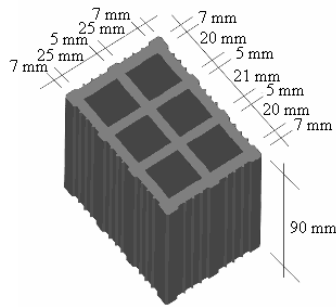
SİKADUR 31 epoksi harcı paneller arasında ve panel-çerçeve birleşimlerinde kullanılmıştır.

#### 2.4. Deney Düzenegi

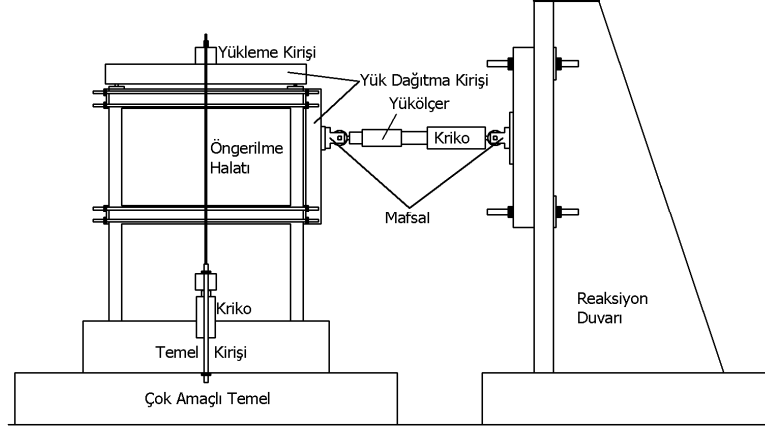
Deney elemanının rijit temel kirişi çok amaçlı temel bloğuna, bu blok da laboratuvar döşemesine öngerilme ile bağlanmıştır. Kolon aksel yük taşıma kapasitelerinin %10 veya %20'sine karşılık gelen 60 kN veya 120 kN aksel yük, iki hidrolik kriko ile gerdirilen öngerilme halatlarıyla kolonlara uygulanmış, seviyesi deney boyunca manuel olarak sabit tutulmuştur. Deprem etkisini benzeştiren tersinir yatay yük ise, güçlü duvara yaslanan bir yükleme kolonu aracılığıyla tek katlı deneylerde birinci kat seviyesinde, iki katlılarda birinci ve ikinci kat düzeylerinde 1/2 oranında uygulanmıştır. Yük uygulama düzenegi Şekil 3'de gösterilmiştir. Deney sonuçları Tablo 2'de özetlenmiştir.



Şekil 1- Panel Tipleri



Şekil 2 - Deneylerde Kullanılan Boşluklu Tuğla Dolgu



Şekil 3 - Yükleme Düzeni

### 3. KURAMSAL ÇALIŞMALAR

#### 3.1. Panellerle Güçlendirilmiş Boşluklu Tuğla Dolgu Duvarların Basınç Çubuğu gibi Modellenmesi

Dolgu duvarlarla ilgili ilk çalışma ellili yıllarda Polyakov [5] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar esnasında dolgunun merkezinde diyagonal çatlaklar, modelin karşılıklı çapraz yüklenmemiş köşelerinde çerçeveyle dolgu arasında boşluklar ve yüklenmiş iki çapraz köşede de tam bir temas gözlemlenmiştir. Altmışlı yıllarda Smith [6,7,8,9] ve Carter[10] boşluklu tuğla dolgu duvarları basınç çubuğu gibi modellemişlerdir. Bu kuramsal çalışmalardan elde edilen sonuçlar, daha sonra yapılan Mainstone [12] ve Al-Chaar [16]'ın deneysel sonuçları ile benzerlik göstermiştir.

Ortadoğu Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilen çalışmalarda, Altın [17, 18] ve Sonuvar [19] betonarme perde duvarları birer basınç çubuğu gibi modellemişlerdir. Panellerle yapılan güçlendirmenin modellenmesi ne boşluklu tuğla dolgunun ne de betonarme perde duvarın modellenmesine benzer. Sıva yapılmış boşluklu tuğla duvarın panelle beraber modellenmesi ise çok daha karmaşıktır.

Deneysel sonuçları kuramsal olarak doğrulayabilmek için bilgisayarda İtme (Push-Over) analizi yapılmıştır. İtme analizi, yapıların yanal yükler altındaki performansını değerlendiren bir çeşit doğrusal olmayan statik analiz yöntemidir. Bu analizde, önce bir yük şablonu seçilmekte ve bu yükler yapıya küçük artışlarla verilmektedir. Yöntem basitçe Şekil 4'de gösterilmiştir. Deney elemanlarının itme analizleri için elastik ötesi düzlem çerçeve programı DRAIN-2Dx [20] kullanılmıştır. Bu programla analizler ister yük kontrollü ister ötelenme kontrollü yapılabilmektedir.

##### 3.1.1. Eşdeğer Basınç Çubuğu Modellemesi

Panellerle güçlendirilmiş sıvalı boşluklu tuğla dolgu iki ayrı basınç çubuğu olarak modellenecektir. Çerçeve içine köşegen boyunca yerleştirilerek iki uçtan mafsallı olarak

*Beton Panellerle Güçlendirme - Kuramsal Yaklaşım*

modellenecek çubuklardan birincisi sıvanmış boşluklu tuğla dolguyu modellerken ikincisi parça panellerin birleştirilmesiyle oluşan bütün paneli modelleyecektir. Her iki modellemeye de, dolgu duvarının çerçeveye bağlı olmadığı varsayılmıştır. Yük çerçeveye uygulandığında dolgu duvar, kiriş veya kolonun belli bir uzunluğu boyunca ayrılmakta ve çerçeve-dolgu duvar arasındaki temas diğer iki karşı köşede devam etmektedir. Bu aşamada, temasın devam ettiği bir köşeden diğerine çizilen bir çizgi basıncın yönünü göstermektedir. Dolgu bu çizgi doğrultusunda basıncı aktarmaktadır. Bu sayede dolgunun, eşdeğeri olan sanal bir basınç çubuğuyla modellenebileceği Şekil 5’de gösterilmektedir. Dolguyu temsil eden bu sanal basınç çubuğunun mekanik ve geometrik özelliklerinin belirlenmesi için FEMA [21] tarafından Denklem 1 ve Denklem 2 önerilmiştir;

*Tablo 1 - Deney elemanlarının özellikleri*

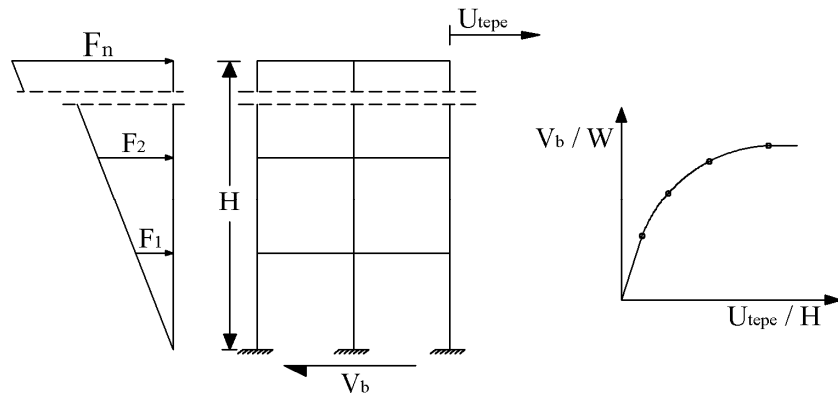
Kat Adeti	Deney Elemanı	Kolon Donatısı	N/N <sub>0</sub>	Bindirme Boyu	Panel Yüzü	Panel Tipi	Ankrajlı Eleman Kenar
İki Katlı	CR	Sürekli	0.19	-	---	---	---
	LR	Bindirmeli	0.30	20 $\phi$ <sup>(1)</sup>	---	---	---
	CIA	Sürekli	0.17	-	İçeriden	A	4
	CIB	Sürekli	0.21	-	İçeriden	B	4
	CIC1	Sürekli	0.19	-	İçeriden	C	1
	CID1	Sürekli	0.19	-	İçeriden	D	1
	CIC3	Sürekli	0.18	-	İçeriden	C	3
	CIC4	Sürekli	0.17	-	İçeriden	C	4
	CEE4	Sürekli	0.18	-	Dışarıdan	E	4
	CEF4	Sürekli	0.21	-	Dışarıdan	F	4
	CEE1	Sürekli	0.15	-	Dışarıdan	E	1
	CEER	Sürekli	0.20	-	Dışarıdan	E	4 (seyrek)
	LIC1	Bindirmeli	0.17	20 $\phi$ <sup>(1)</sup>	İçeriden	C	1
LID1	Bindirmeli	0.22	20 $\phi$ <sup>(1)</sup>	İçeriden	C	1	
Tek Katlı	1CR	Sürekli	0.25	-	---	-	-
	1LR	Bindirmeli	0.13	20 $\phi$ <sup>(2)</sup>	---	-	-
	1CIA	Sürekli	0.25	-	İçeriden	A	4
	1CIB	Sürekli	0.25	-	İçeriden	B	4
	1CIC4	Sürekli	0.25	-	İçeriden	C	4
	1CID4	Sürekli	0.25	-	İçeriden	D	4
	1LIC4	Bindirmeli	0.13	20 $\phi$ <sup>(2)</sup>	İçeriden	C	4
	1LID4	Bindirmeli	0.13	20 $\phi$ <sup>(2)</sup>	İçeriden	D	4

<sup>(1)</sup> 20 $\phi$  = 160 mm (her iki katta boyuna donatıda bindirme boyu)

<sup>(2)</sup> 20 $\phi$  = 160 mm (boyuna donatıda bindirme boyu)

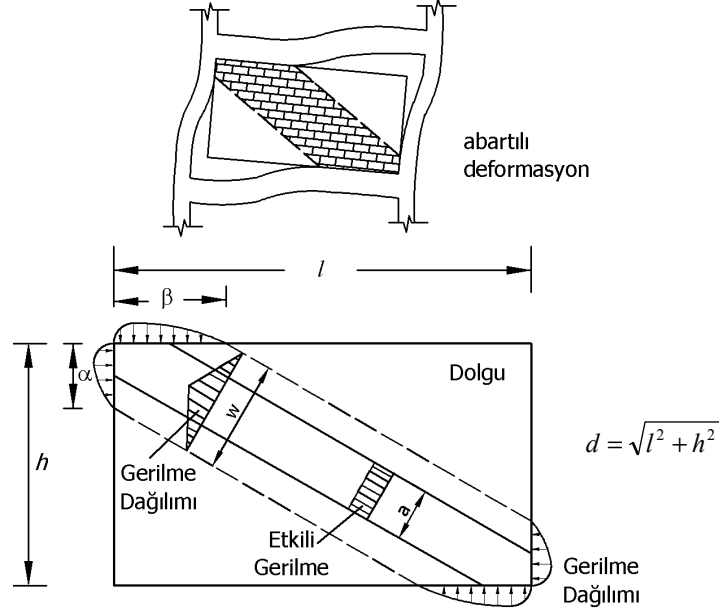
Tablo 2 - Deney sonuçları

Kat Adeti	Deneş Elemanı	Kapasite (kN)	Hasar Mekanizması Davranış Notları
İki Katlı	CR	78.8	Tipik dolgulu çerçeve davranışı
	LR	74.2	Tipik dolgulu çerçeve davranışı
	CIA	192.5	Konsol davranışı, hasarsız panel
	CIB	201.3	Konsol davranışı, hasarsız panel
	CIC1	195.7	Panelde ve çerçeve de hasar
	CID1	192.7	Panelde ve çerçeve de hasar
	CIC3	210.6	Panelde ve çerçeve de hasar
	CIC4	218.5	Konsol davranışı, hasarsız panel
	CEE4	206.6	Panelde yayılı çatlama, az hasar
	CEF4	204.3	Panelde yayılı çatlama, az hasar
	CEE1	177.0	Ayrılma; yetersiz davranış
	CEER	185.4	Panelde yayılı çatlama, az hasar
	LIC1	174.0	Panelde ve çerçeve de hasar
	LID1	172.4	Panelde ve çerçeve de hasar
Tek Katlı	1CR	86.6	Tipik dolgulu çerçeve davranışı
	1LR	65.5	Tipik dolgulu çerçeve davranışı
	1CIA	209.9	Panelde ve çerçeve de hasar
	1CIB	197.0	Panelde ve çerçeve de hasar
	1CIC4	213.5	Panelde ve çerçeve de hasar
	1CID4	254.7	Panelde ve çerçeve de hasar
	1LIC4	148.9	Panelde ve çerçeve de ağır hasar
	1LID4	199.6	Panelde ve çerçeve de ağır hasar



Şekil 4 - İtme analizi

Beton Panellerle Güçlendirme - Kuramsal Yaklaşım



Şekil 5 - Yatay Yük Etkisi Altında Dolgu Duvarda Oluşan Basınç Bölgesi ve Dolgu Duvarları Temsil Eden Eşdeğer Sanal Çapraz Çubuk

$$a_{dolgu} = 0.175(\lambda \cdot h_{kol})^{-0.4} d \quad (1)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_{dolgu} b_w \sin(2\beta_s)}{4E I h}} \quad (2)$$

Denklemlerde,  $a_{dolgu}$  eşdeğer basınç çubuğunun efektif genişliğini,  $h_{kol}$  kolonun giriş merkezleri arasındaki yüksekliğini,  $d$  dolgu duvarının köşegen uzunluğunu,  $E_{dolgu}$  dolgunun elastisite modülünü,  $b_w$  eşdeğer basınç çubuğunun kalınlığını,  $\beta_s$  tanjantı dolgunun yüksekliğinin uzunluğuna oranı olan açığı,  $E$  kolonun elastisite modülünü,  $I$  kolonun atalet momentini,  $h$  dolgunun yüksekliğini göstermektedir. Eşdeğer çubuk kalınlığı modellediği dolgu duvarının kalınlığı ile aynı olmalıdır. Betonarme dış çerçevenin elastisite modülü Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır [22].

$$E_c = 4750\sqrt{f_c} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$



Sıvanmış boşluklu tuğla dolgu duvarlar çekme kuvveti taşımayan elastik-kırılgan çubuklar şeklinde programa tanımlanmışlardır. Bu yüzden, sıvanmış boşluklu tuğla duvarı modelleyen bu çubukların eşdeğer aksenal rijitlikleri ve dayanımlarının hesaplanmaları gerekmektedir. Dolgu malzemesi olarak bütün deney elemanlarında 1/3 ölçekli özel olarak üretilmiş boşluklu tuğla kullanılmıştır. Kullanılan tuğlalar Şekil 2’de gösterilmektedir. Ortadoğu Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında hazırlanan 700 mm × 700 mm boyutlarındaki aynı özelliklerde sıvanmış boşluklu tuğla dolgu duvarlar, deney elemanlarının boşluklu tuğla dolgularına benzer şekilde, köşegenlerinden biri doğrultusunda uygulanmış basınç altında test edilmişler [23] ve ortalama basınç dayanımı,  $f_{c,dolgu}$  5.0 MPa, ortalama elastisite modülü,  $E_{dolgu}$  7,500 MPa olarak bulunmuştur. Deney elemanlarının dolgu duvarlarının geometrisi basık dikdörtgendir (1300 mm × 750 mm). Basıklık oranı arttırıldığında köşegen uzunluğu ile birlikte çekme alanı da büyüyeceğinden yükün artması da beklenilir. Marjani [24] tarafından gerçekleştirilmiş farklı basıklık oranlı panel deneylerinde bu davranış görülmüştür. Ancak dayanım farkı, her iki boyut için %10 sınırı içinde kaldığından basitlik açısından kare panel deneyleri yeterli görülmüştür. Panel deneyleri sonucu bulunan elastisite modülü değerinin çok yüksek olması boşluklu tuğla dolgunun 1/3 ölçekli olmasından kaynaklanmaktadır. Tuğlaların dış boyutları ölçekli olarak küçültülse de et kalınlıklarını aynı oranda küçültmek mümkün olmamıştır. Değişik zamanlarda yapılan çalışmalarda, bu kabullerle ilgili değişik değerler verilmektedir. Örnek olarak, İstanbul Teknik Üniversitesinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda  $f_{c,dolgu}=2.0$  MPa,  $E_{dolgu}=6,000$  MPa, Selçuk Üniversitesinde Yapı ve Deprem Laboratuvarlarında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda  $f_{c,dolgu}=1.85$  MPa,  $E_{dolgu}=5,750$  MPa, Paulay ve Prestley [14]’in çalışmalarında  $f_{c,dolgu}=3.0$  MPa,  $E_{dolgu}=8,250$  MPa olarak kabul edilmişlerdir [25].

Deneylerden elde edilen değerler kullanılarak, modellemedeki basınç çubuğunun dayanımı Denklem 4 kullanılarak hesaplanabilir:

$$F_{c,dolgu} = f_{c,dolgu} a_{dolgu} b_w \quad (4)$$

Eşdeğer çubuğun kalınlığı ve elastisite modülü, modellediği dolgu duvarının değerleri ile aynı olmalıdır. Eşdeğer basınç çubuğunun rijitlik değeri FEMA [26] kullanılarak bulunabilir:

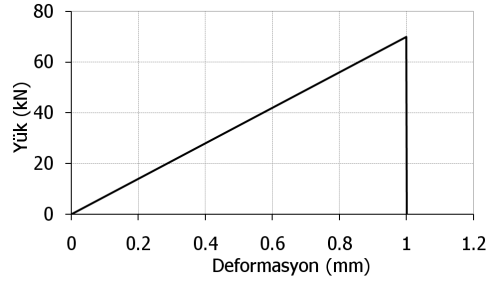
$$k_{dolgu} = \frac{b_w a_{dolgu} E_{dolgu}}{d} \quad (5)$$

Denklem 4 ve 5 kullanılarak dolgu duvarı modelleyen basınç çubuğunun dayanımı yaklaşık 70 kN, rijitliği de 70kN/mm olarak hesaplanmış ve bilgisayar programı için gerekli yük-deformasyon eğrisi Şekil 6’daki gibi hazırlanmıştır.

Birinci eşdeğer basınç çubuğun modellenmesi yukarıda gösterilmiştir. İkinci basınç çubuğu, parça panellerin birleştirilmesiyle oluşturulan tüm paneli modelleyecektir. Küçük parça panellerin birleştirilmesiyle oluşturulan panel homojen ve izotropik malzeme olarak kabul edilebileceğinden panel modellemesinin geometrik özelliklerinin belirlenmesi Smith ve Carter [6-10] tarafından önerilen bir yöntem kullanılarak yapılacaktır. Smith ve Carter’a göre dolgu duvarın rijitliğinin kolonun rijitliğine oranı boyutsuz bir parametre olan  $\lambda h$  ile

### Beton Panellerle Güçlendirme - Kuramsal Yaklaşım

tanımlanabilir. Denklem 2 kullanılarak  $\lambda$  bulunabilir. Kolon ve dolgunun temas yüzeyinin uzunluğu ise, “Tekil yüke maruz kalan elastik zemindeki serbest kiriş” analogjisi kullanılarak, Denklem 6 ile ifade edilebilir;



Şekil 6 - Sivanmış boşluklu tuğla dolgu duvarı modelleyen basınç çubuğunun basitleştirilmiş yük-deformasyon eğrisi

$$\frac{\alpha}{h} = \frac{\pi}{2\lambda h} \quad (\text{burada } \alpha \leq h/2) \quad (6)$$

burada  $h$  kolonun, iki kirişin merkezleri arasındaki yüksekliğidir. Smith ve Carter dolgunun dönmediğini ve kolon ile dolgunun temas yüzeyi boyunca üçgen şeklinde bir gerilme dağılımı olduğunu, dolgunun çerçeveye bağlanmamış olduğunu, ayrıca  $\beta$ 'nin dolgunun uzunluğunun yarısına eşit olduğunu varsayımlardır.

Dolgunun kenarlarına etki eden gerilme dağılımları varsayımından dolgunun rijitliğinin teorik değerleri hesaplanabilir. Farklı basıklık oranları,  $l/h$ , ve farklı temas oranları,  $a/h$ , için teorik olarak hesaplanmış  $w_{panel}/d$  oranları Tablo 3'te verilmektedir [6]. Burada  $d$  dolgunun köşegen uzunluğu ve  $w_{panel}$  ise basınç çubuğunun genişliğidir. Tablo 3'deki değerler homojen ve izotropik malzeme için hazırlanmıştır. Panellerin elastisite modülleri Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 3 - “ $w_{panel}/d$ ” oranının teorik değerleri

Temas Oranları		Panel basıklık oranı ( $l/h$ )			
$\alpha/h$	$\beta/l$	1:1	1.5:1	2.0:1	2.5:1
1/8	1/2	0.24	0.22	0.18	0.16
1/4	1/2	0.30	0.27	0.23	0.18
3/8	1/2	0.35	0.32	0.26	0.22
1/2	1/2	0.38	0.38	0.30	0.25

Kullanılan program, akma/kırılma yüzeyi olarak çerçeve elemanları için aksel yük-moment etkileşim eğrisini veya aksel yükten bağımsız akma kriteri olarak moment

kapasite değerini kabul etmektedir. Bu çalışmada programa kolonların etkileşim eğrileri, kirişlerin de moment kapasite değerleri (elasto-plastik olarak) girilmiştir. Kolon boyuna donatılarında bindirme bulunan tüm elemanlarda, boyuna donatılar akma dayanımlarına sınırlanmadan dolayı ulaşamamaktadırlar. Yetersiz bindirme boyu ( $20\phi$ ) olan bu elemanların kolon boyuna donatı akma dayanımları Denklem 10 kullanılarak hesaplanmıştır [27]:

$$f'_y \cong f_y \sqrt{\frac{20\phi}{40\phi}} = 0.7071 f_y \quad (7)$$

Önüretimli beton panelleri modelleyen eşdeğer basınç çubuğunun yük taşıma kapasitesi Denklem 8 kullanılarak hesaplanabilir,

$$F_{c,panel} = \gamma \cdot f_{c,panel} \cdot b_w \cdot w_{panel} \quad (8)$$

Burada,  $F_{c,panel}$  eşdeğer basınç çubuğunun aksenal yük taşıma kapasitesini,  $\gamma$  panelin beton dayanımına bağlı bir katsayıyı,  $f_{c,panel}$  önüretimli beton panellerin basınç dayanımı,  $b_w$ , eşdeğer basınç çubuğunun kalınlığı (20mm),  $w_{panel}$ , eşdeğer basınç çubuğunun genişliğidir. Eşdeğer basınç çubuğunun genişliği Smith [6] tarafından önerilen ve Tablo 3'de verilen  $w_{panel}/d$  değerlerinden hesaplanacaktır.

Deney elemanlarının doğrusal olmayan itme analizleri (ötelenme kontrollü) değişik  $\gamma$  değerleri için gerçekleştirilmiştir. Tüm deney elemanları için kuramsal zarf eğrisinin deneysel zarf eğrisi ile en iyi biçimde uyduğu  $\gamma$  değerlerinin ortalaması 0.45, standart sapması 0.087 olarak hesaplanmıştır. Ortadoğu Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında aynı deney düzeneği kullanılarak yapılmış, tuğla dolgulu betonarme çerçevelerin hasır donatı uygulanarak güçlendirilmesinin incelendiği çalışmada [28], hasır donatıyı örten panelin beton mukavemeti %60 artırıldığı zaman, deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin %23 arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 7 her deneyi en iyi modelleyen  $\gamma$  değerinin panel basınç dayanımına ( $f_{c,panel}$ ) göre değişimini göstermektedir. Bu noktalardan yaklaşık olarak Denklem (9) fonksiyonu uygun olarak geçirilebilir.

$$\gamma = 7(f_{c,panel})^{-0.75} \quad (9)$$

Buradan panel basınç çubuğunun taşıma kuvveti Denklem 10 ile hesaplanabilir,

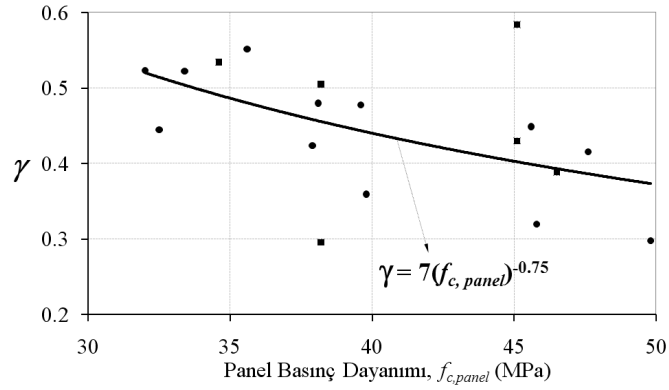
$$F_{c,panel} = 7 \cdot (f_{c,panel})^{0.25} \cdot b_w \cdot w \quad (10)$$

Özetle, deney elemanlarının kuramsal modellenmesinde iki eşdeğer basınç çubuğu kullanıldığından Denklem 11 yazılabilir,

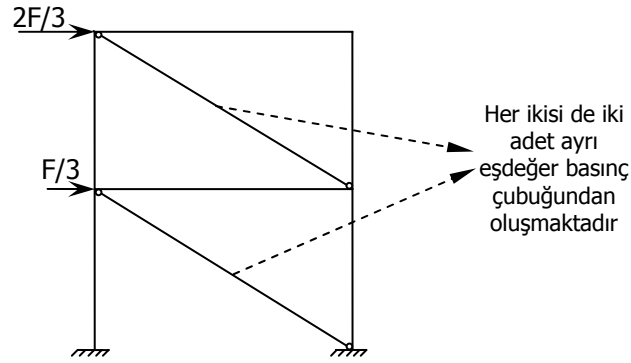
$$F_{\text{çubuk}} = F_{c,dolgu} + F_{c,panel} \quad (11)$$

### 3.1.2. Eşdeğer Basınç Çubukları ile Modellenen Deneysel Elemanların İtme Analizleri

Yukarıdaki adımları takip ederek deney elemanları için Şekil 8'deki gibi bir kuramsal model hazırlanmıştır. Panellerle güçlendirilmiş boşluklu tuğla dolgu duvarlar iki adet ayrı basınç çubuğu ile modellenmiştir. Çubuklardan birisi sıvanmış boşluklu tuğla dolgu duvarın modellenmesi için, diğeri de parça panellerin oluşturduğu tüm panelin modellenmesi için kullanılmıştır.



Şekil 7 - Panel basınç dayanımı -  $\gamma$  değerleri

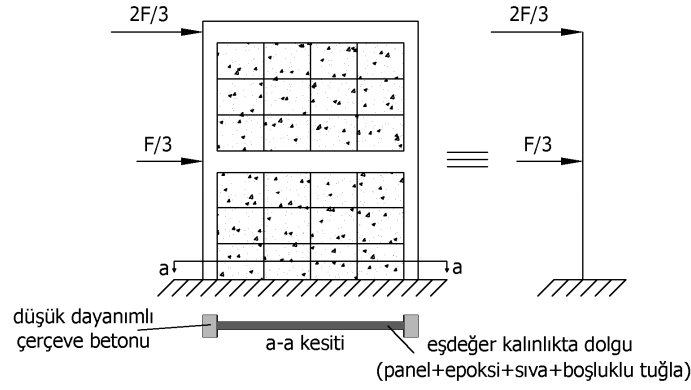


Şekil 8 - Güçlendirilmiş deneysel elemanlarının kuramsal modellenmesi

Eşdeğer basınç çubuğu modellemesiyle elde edilen eğriler Şekil 11'de verilmektedir. Bu şekil üzerinde bir sonraki bölümde anlatılan eşdeğer kolon yönteminin de sonuçları verilmektedir.

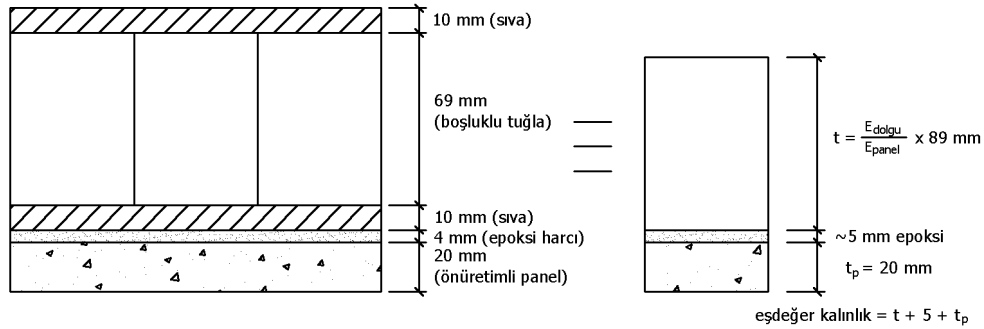
### 3.2. Eşdeğer Kolon Yöntemi

Eşdeğer kolon yöntemi eşdeğer basınç çubuğu yöntemine alternatif ikinci bir yöntemdir. Bu yöntemde güçlendirilmiş dolgu duvar monolitik perde duvar olarak modellenmiştir. Bu tip yapısal elemanların eşdeğer kolon yöntemi ile modellenmesi tasarımcılar arasında fazlaca tercih edilen bir yöntem olduğundan, bu iki yöntemin sonuçlarını karşılaştırmak çok yararlı olacaktır. Eşdeğer kolon yöntemi Şekil 9’da basitçe tanımlanmıştır. Modelde, güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçeve tek bir kolon gibi tanımlanmıştır. Kolonun etkileşim eğrisini oluşturmak üzere güçlendirilmiş dolgu duvar için eşdeğer bir kalınlık tanımlanması gerekmiştir. Bu eşdeğer kalınlığın hesabında güçlendirilmiş duvarın her bir katmanının elastisite modülü kullanılmıştır. Analizlerde panellerin hasır çelik donatıları da hesaba katılmıştır.



Şekil 9 - Güçlendirilmiş deney elemanlarının eşdeğer kolon yöntemi ile modellenmesi

Panellerle güçlendirilmiş dolgu duvarının eşdeğer kalınlığının hesaplanması Şekil 10’da basitçe gösterilmiştir. Hesaplamalarda sıvanmış boşluklu tuğla dolgu duvarının elastisite modülü 7,500 MPa olarak alınmış, çerçeve ve panel betonlarının değerleri ise Denklem 3’e göre hesaplanmıştır. Eşdeğer kolonların aksel yük-moment etkileşim eğrilerinin hesaplanmasında kullanılan veriler Tablo 4’de verilmiştir.



Şekil 10 - Eşdeğer kalınlık hesabı

### Beton Panellerle Güçlendirme - Kuramsal Yaklaşım

Burada hatırlatılması gereken nokta, deneylerden elde edilen sonuçlara göre, dış panellerin de (Tip E, Tip F) bulonlarla iyi bağlandıkları zaman iç paneller (Tip A, Tip B, Tip C, Tip D) kadar etkili çalışmıştır. Sadece, bulonlarla bağlanmamış olduğu için deney elemanı CEE1'in kalınlığı, eşdeğer kolon yöntemi analizlerinde, gerçek kalınlığının yarısı olan 10 mm olarak kabul edilmiştir. Çünkü bu elemanda panellerin çerçeveye bağlanmasında  $\phi 8$  bulon kullanılmamış, paneller sıvanmış dolgu duvara sadece epoksi harcı ile yapıştırılmışlardır. İç panellerin kullanıldığı ve dış panellerin çerçeveye bulonlarla bağlandığı durumlarda panelin gerçek kalınlığı olan 20 mm hesaba katılmıştır.

Tablo 4 - Eşdeğer kalınlık hesabında kullanılacak veriler

Deney Elemanı	$f_c$	$f_{c,panel}$	$E_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa) (azaltılmış)	$E_{panel}$ (MPa)	$E_{dolgu}$ (MPa)	Eşdeğer kalınlık (mm)
CIA	18.2	32.5	20,000	14,000	27,000	7,500	50
CIB	13.0	38.1	17,000	12,000	29,300	7,500	50
CIC1	15.6	33.4	18,750	13,000	27,500	7,500	50
CID1	16.2	32.0	19,000	13,500	27,000	7,500	52
CIC3	17.3	47.6	20,000	14,000	32,800	7,500	48
CIC4	19.4	45.6	21,000	14,500	32,000	7,500	48
CEE4	18.1	39.6	20,000	14,000	29,900	7,500	50
CEF4	14.3	35.6	18,000	12,500	28,500	7,500	50
CEE1	22.2	45.8	22,500	15,500	32,150	7,500	35
CEER	15.1	37.9	18,500	13,000	29,250	7,500	49
LIC1	19.3	39.8	21,000	14,500	30,000	7,500	50
LID1	13.5	49.8	17,400	12,000	33,500	7,500	48
1CIA	18.7	34.6	20,500	14,500	28,000	7,500	45
1CIB	12.2	46.5	16,500	11,500	32,500	7,500	45
1CIC4	14.2	38.2	18,000	12,500	29,500	7,500	45
1CID4	11.1	45.1	16,000	11,000	32,000	7,500	45
1LIC4	15.7	38.2	19,000	13,500	29,500	7,500	45
1LID4	10.1	45.1	15,000	10,500	32,000	7,500	45

Elemanların elastisite modülleri, ilk yükleme turlarındaki çatlakların etkisini hesaba katmak amacıyla, %30 oranında azaltılmışlardır. Ayrıca, deney elemanlarından kolon boyuna donatılarında bindirme bulunan elemanların kolon boyuna donatılarının akma gerilmeleri, Denklem 7'den hesaplanmışlardır. Eşdeğer basınç çubuğu ve eşdeğer kolon yöntemleri ile bulunan yük-deformasyon eğrileri ile deney elemanlarının zarf eğrileri iki katlı ve tek katlı deney elemanları için sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12'de karşılaştırılmışlardır.

Şekil 11 ve Şekil 12'de verilen eğrilere göre, eşdeğer basınç çubuğu yöntemi ile deney elemanlarının yatay yük kapasiteleri ve başlangıç rijitlikleri ön tasarım için tatmin edici bir şekilde düşük hata payıyla hesaplanabilmektedir. İki katlı deney elemanlarında eşdeğer

basınç çubuğuyla yapılan modellemelerde deney sonucunun en fazla %16.2 üstünde ve %7.2 altında kalmıştır. Bu farklar eşdeğer kolon modellemesinde en fazla %1.9 üstünde ve %12.4 altında kalmaktadır. Tek katlı deney elemanları için bu karşılaştırma yapıldığında eşdeğer basınç çubuğu modellemesi deney sonuçlarının en fazla %29.3 üstünde ve %22.3 altında kalmaktadır. Bu farklar eşdeğer kolon modellemesinde en fazla %24.1 üstünde ve %7.0 altında kalmaktadır. Tek katlı eleman deneylerinin sonuçları, güçlendirmede Tip D panellerin Tip C panellerden daha etkili çalıştığını göstermektedir. Tip D panellerde çerçeve elemanlarına uygulanan ankrajlar daha fazladır ve bu sebeple çerçeve ile güçlendirilmiş dolgu duvar arasında çok daha iyi bir yük transferi sağlanabilmektedir. Eşdeğer kolon yöntemi, elemanların yatay yük taşıma kapasitelerini tahmin etmede en az eşdeğer basınç çubuğu yöntemi kadar başarılı olduğu halde yöntem deney elemanlarının başlangıç rijitliklerini, elastisite modülü azaltıldığı halde, olduğundan fazla hesaplamıştır. Buna ek olarak yöntem eğrilerin tepe noktasından sonraki düşüş kısmını beklediği üzere yeterli biçimde hesaplayamamıştır. Bu yöntemde kolonlar, önüretimli beton paneller kullanılarak güçlendirilmiş boşluklu tuğla dolgu duvarlarla birlikte, tek boyutlu elemanlar (konsol kolon) olarak modellenmekte, dolgu duvarlara bağlı kirişler hesaba katılmamaktadır.

#### **4. SONUÇ**

Bu çalışma yüksek dayanımlı önüretimli panellerle güçlendirilmiş boşluklu tuğla duvarların bilgisayarda nasıl modellenebileceği araştırmaktadır. Burada amaç mühendislik kullanılabileceği basit bir model geliştirmektir. Genelde elastik analiz yöntemleri kullanıldığından, burada tüm davranışı modellemekten amaçlanmamış, ancak dayanımın doğru bir yaklaşıklıkla hesaplanması amaçlanmıştır.

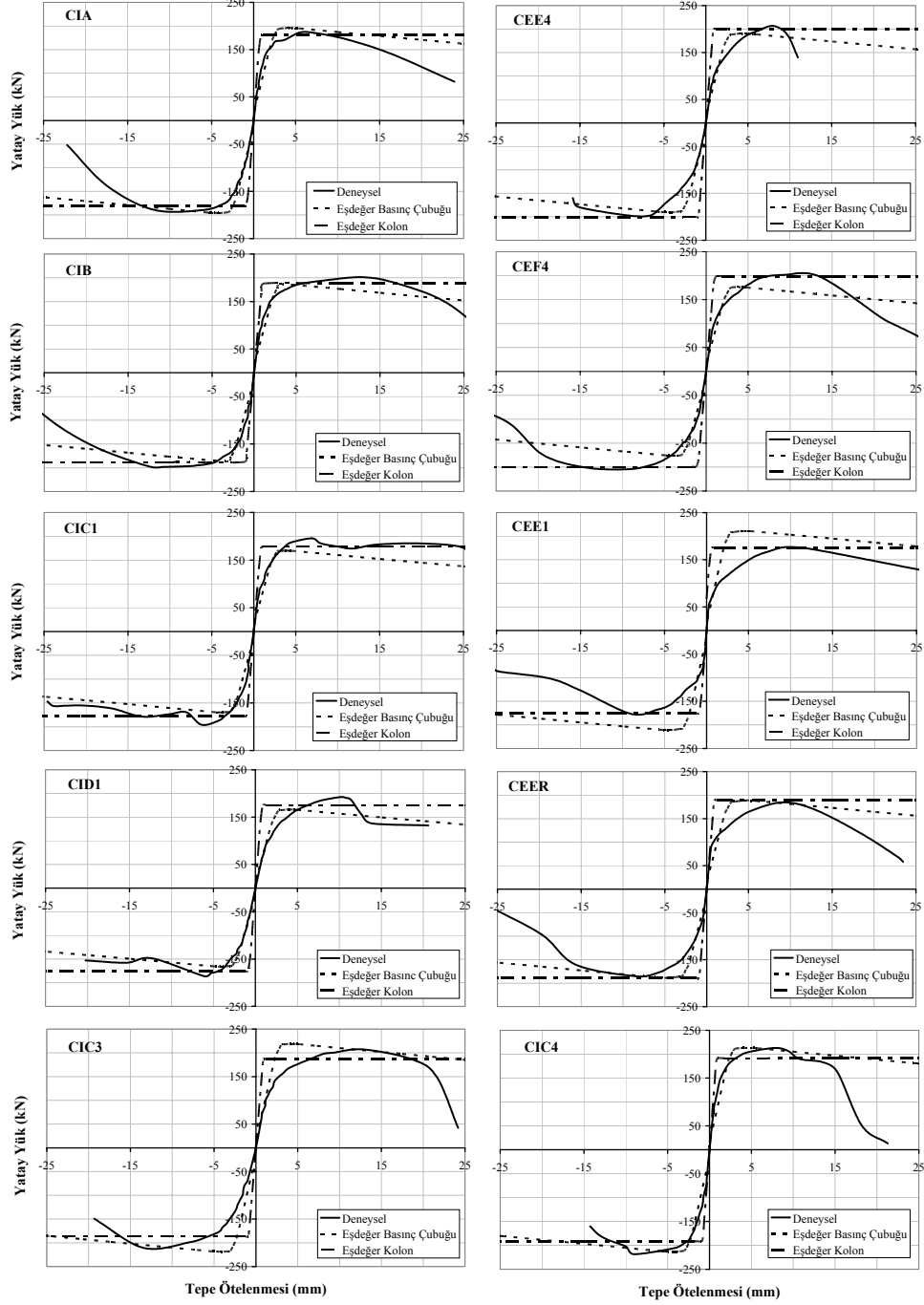
Modellemede iki yaklaşım kullanılmıştır. Birinci yaklaşımda güçlendirilmiş duvarlar üst üste konulmuş iki çapraz basınç çubuğu ile modellenmiştir. Birinci çubuk mevcut sıvalı, boşluklu tuğla duvarı modellerken ikinci çubuk önüretimli, yüksek dayanımlı panel duvarı modellemektedir. İkinci yaklaşımda güçlendirilmiş duvar kenarlarındaki kolonlarla beraber tek bir kolon gibi modellenmiştir. Burada panelli tuğla duvar eşdeğer kalınlığa sahip bir duvara dönüştürülmüştür.

Her iki yöntemle de, deneylerde kullanılan bağlantı şekilleri ve panel dayanım sınırları içinde, itme analizlerinden kabul edilebilir sonuçlar alınmıştır. Yapılan analizlerden aşağıdaki sonuçlara ulaşılabılır;

- Her iki yöntemle de tasarım için gerekli olan çerçevenin yanal yük taşıma kapasitesi yeterli bir yaklaşıklıkla hesaplanabilmektedir.
- Her iki yöntemle de maksimum yatay yük sonrası davranış doğru şekilde yakalanamamaktadır.
- Yöntemlerin her ikisi de güçlendirme tasarımlarında, mevcut yapıların elastik çerçeve modellemelerine kolaylıkla adapte edilebilir. Böylelikle zamandan ve emekten tasarruf sağlanabilir.

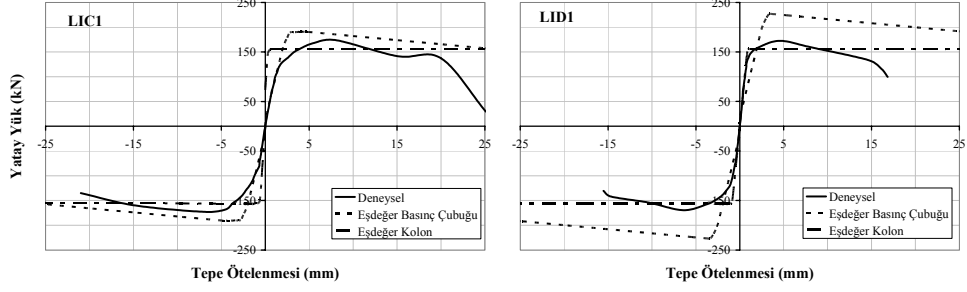
Gözlemler mevcut çalışmadaki verilerle sınırlıdır. Bu yüzden her iki yöntemin de geliştirilmesi dikkatlice yapılmalıdır.

## Beton Panellerle Güçlendirme - Kuramsal Yaklaşım

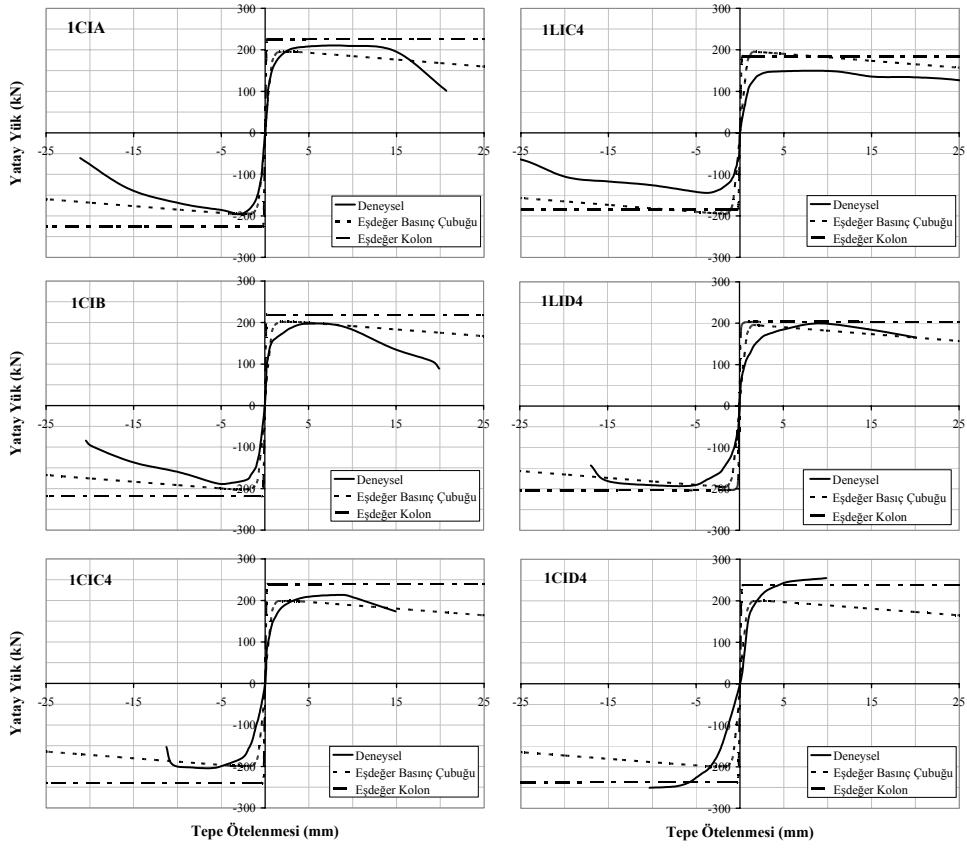


Şekil 11 - Eşdeğer basınç çubuğu ve kolon yöntemi ile elemanların itme analizleri (2 katlı)





Şekil 11 - Eşdeğer basınç çubuğu ve kolon yöntemi ile elemanların itme analizleri (2 Katlı)  
Devam



Şekil 12 - Eşdeğer basınç çubuğu ve kolon yöntemi ile elemanların itme analizleri (1 Katlı)

## Beton Panellerle Güçlendirme - Kuramsal Yaklaşım

### Semboller

$a_{dolgu}$	: Dolguyu modelleyen eşdeğer basınç çubuğunun etkili genişliği
$b_w$	: Dolgunun kalınlığı
$d$	: Dolgunun köşegen uzunluğu
$E$	: Kolonun elastisite modülü
$E_c$	: Çerçeve betonunun elastisite modülü
$E_{panel}$	: Önüretimli beton panellerin elastisite modülü
$E_{dolgu}$	: Dolgunun elastisite modülü
$f_c$	: Çerçeve betonunun basınç dayanımı
$f_{c,panel}$	: Önüretimli beton panellerin basınç dayanımı
$f_{c,dolgu}$	: Dolgunun (Sıvanmış boşluklu tuğla) basınç dayanımı
$f_y$	: Kolon boyuna donatısının çekme dayanımı
$f'_y$	: Kolon boyuna donatısının azaltılmış çekme dayanımı
$F_{çubuk}$	: Panellerle güçlendirilmiş dolguyu modelleyen eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük taşıma kapasitesi
$F_{c,dolgu}$	: Dolguyu modelleyen eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük taşıma kapasitesi
$F_{c,panel}$	: Dolguya yapıştırılmış önüretimli beton panelleri modelleyen eşdeğer basınç çubuğunun eksenel yük taşıma kapasitesi
$h$	: Dolgu yüksekliği
$h_{kol}$	: Kolonun giriş merkezleri arasındaki yüksekliği
$k_{dolgu}$	: Dolguyu modelleyen eşdeğer basınç çubuğunun rijitlik değeri
$I$	: Kolonun atalet momenti
$l$	: Dolgunun uzunluğu
$N$	: Sabit kolon eksenel yükü
$N_0$	: Kolon eksenel yük taşıma kapasitesi
$t$	: Panellerle güçlendirilmiş dolgunun eşdeğer kalınlığı (Eşdeğer kolon yöntemi)
$t_p$	: Panel kalınlığı
$w_{panel}$	: Dolguya yapıştırılmış önüretimli beton panelleri modelleyen eşdeğer basınç çubuğunun genişliği
$\alpha$	: Kolon ile dolgu arasındaki temas oranı
$\beta$	: Giriş ile dolgu arasındaki temas oranı
$\beta_s$	: Tanjantı dolgunun yüksekliğinin uzunluğuna oranı olan açı
$\phi$	: Kolon boyuna donatısının çapı
$\lambda$	: Dolgu duvarlı çerçevenin özelliği
$\gamma$	: Katsayı

### **Teşekkür**

Yürütücüsü olduğu İÇTAG I 575 no'lu TÜBİTAK Projesinin ve Koordinatörü olduğu SFP 977231 no'lu NATO Projesinin finansal katkılarından ve bu çalışmanın özellikle deneysel kısmındaki çok değerli yönlendirici fikirlerinden dolayı Sn. Prof. Dr. Güney ÖZCEBE'ye, tek katlı çerçevelerin deneylerini gerçekleştiren Sn. Yük. Müh. Melih SÜSOY'a sonsuz teşekkürü borç biliriz.

### **Kaynaklar**

- [1] Baran, M., "Precast Concrete Panel Reinforced Infill Walls for Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Framed Structures", A Doctor of Philosophy Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 2005.
- [2] Duvarcı, M., "Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Frames with Precast Concrete Panels", A Master of Science Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 2003.
- [3] Susoy, M., "Seismic Strengthening of Masonry Infilled R/C Frames with Precast Concrete Panel Infills", A Master of Science Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 2004.
- [4] Tankut, T., Ersoy, U., Özcebe, G., Baran, M., Okuyucu, D., "In Service Seismic Strengthening of RC Framed Structures", Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings, International Closing Workshop, NATO Project Sfp 977231, May 30-June 1, 2005, Istanbul, Turkey.
- [5] Polyakov, S. V., "Masonry in Framed Buildings; An Investigation into the Strength and Stiffness of Masonry Infilling" (English Translation), Moscow, 1957.
- [6] Smith, B. S., "Model Test Results of Vertical and Horizontal Loading of Infilled Specimens", ACI Journal, August 1968, pp. 618-624.
- [7] Smith, B., S., "Lateral Stiffness of Infilled Frames", ASCE Journal of Structural Division, Vol. 88, ST. 6, December 1962, pp.183-199.
- [8] Smith, B., S., "Behaviour of Square Infilled Frames", ASCE Journal of Structural Division, Vol. 92, ST. 1, February 1966.
- [9] Smith, B., S., "Methods for Predicting the Lateral Stiffness and Strength of Multi-Storey Infilled Frames", Building Science, Vol. 2, 1967, pp. 247-257.
- [10] Smith, B., S., Carter, C., "A Method of Analysis for Infilled Frames", Proc. ICE, Vol. 44, September 1969, pp. 31-48.
- [11] Mainstone, R. J., Weeks, G. A., "The influence of bounding frame on the racking stiffness and strength of brick walls," 2<sup>nd</sup> International BrickMasonry Conference, Watford, England, 12-15 April 1970, 165-171.
- [12] Mainstone, R. J., "Supplementary Note on the Stiffness and Strengths of Infilled Frames" Current Paper 13/74, Building Research Station, UK, February 1974.
- [13] Klingner, R. E., Bertero, V., "Earthquake Resistance of Infilled Frames", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 104, June 1978.

*Beton Panellerle Güçlendirme - Kuramsal Yaklaşım*

- [14] Paulay, T., Priestley, MJN., “Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings”, New York, John Wiley, 1992.
- [15] Angel, R., Abrams, D.P., Shapiro, D., Uzarski, J., and Webster, M., “Behavior of Reinforced Concrete Frames with Masonry Infills,” Structural Research Series No.589, University of Illinois at Urbana-Champaign, UILU ENG 94-2005, March 1994, 183 pp.
- [16] Ghassan Al-Chaar, Evaluating Strength and Stiffness of Unreinforced Masonry Infill Structures, Construction Engineering Research Laboratory, January 2002.
- [17] Altın, S., “Strengthening of Reinforced Concrete Frames with Reinforced Concrete Infills”, A Doctor of Philosophy Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 1990.
- [18] Altın S., Ersoy, U., and Tankut T., “Hysteretic Response of Reinforced Concrete Infilled Frames”, ASCE Journal of Structural Engineering, V. 118, No. 8, 1992, pp. 2133 – 2150.
- [19] Sonuvar, M. O., “Hysteretic Response of Reinforced Concrete Frames Repaired By Means of Reinforced Concrete Infills”, A Doctor of Philosophy Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 2001.
- [20] Allahabadi, R., “DRAIN-2Dx - Seismic Response and Damage Assessment for 2D Structures, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, California, 1981.
- [21] Federal Emergency Management Agency (FEMA), Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings, FEMA 306, 1998.
- [22] ACI, American Concrete Institute, Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318 R-95), Michigan, October 1995.
- [23] Akın, E., Ph. D. Thesis in Progress, Middle East Technical University, Ankara.
- [24] Marjani, F., “Behavior of Brick Infilled Reinforced Concrete Frames Under Reversed Cyclic Loading”, A Doctor of Philosophy Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 1997.
- [25] Kaltakçı, M. Y., Arslan, M.H., “Taşıyıcı Olmayan Tuğla Dolgu Duvarların Yapı Davranış Katsayısına Olan Etkisinin İncelenmesi”, Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005, 23-25 Mart 2005.
- [26] Federal Emergency Management Agency (FEMA), NEHRP GUIDELINES FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS, FEMA 356, November 2000.
- [27] Canbay, E., Frosch, R. J., “Bond Strength of Lap-Spliced Bars”, ACI Structural Journal, Vol.102, No. 4, July-August 2005, pp. 605-614.
- [28] Acun B., Sucuoğlu, H., “Tuğla Dolgu Duvarlı Çerçevelerin Hasır Donatı ile Güçlendirilmesi”, Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005, 23-25 Mart.