



Investigation of infill wall modelling techniques on a substandard reinforced concrete frame

İsmail Durğut*^{ID}, Onur Tunaboyu^{ID}, Özgür Avşar^{ID}

Department of Civil Engineering, Eskişehir Technical University, Eskişehir, 26555, Turkey

Highlights:

- Behavior of reinforced concrete frame
- Infill wall modelling techniques
- Nonlinear force displacement relationship of infill wall

Keywords:

- Infill wall modelling
- Pushover analysis
- Substandard
- Reinforced concrete
- Shear damage

Article Info:

Research Article
Received: 16.01.2020
Accepted: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.673866

Correspondence:

Author: İsmail Durğut
e-mail:
ismail.durgut@suyapi.com.tr
phone: +90 536 969 7871

Graphical/Tabular Abstract

An analytical study was conducted for investigating the effectiveness of infill wall modelling techniques to estimate the realistic behavior of infilled RC frames.

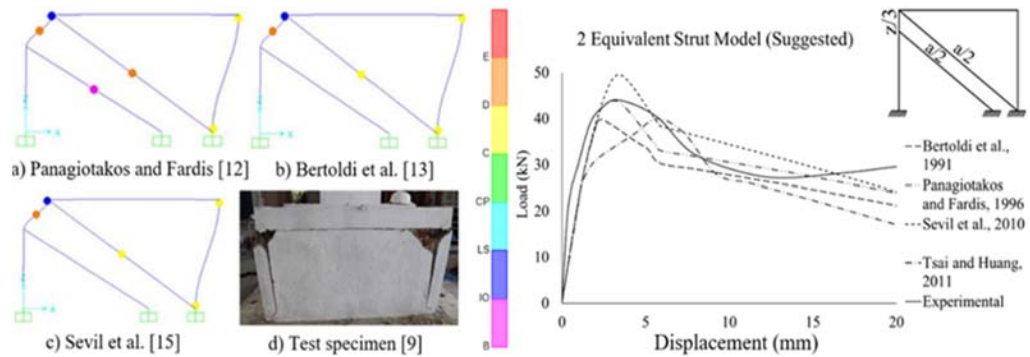


Figure A. Analysis results of a RC frame with infill wall modelled with the proposed two equivalent strut models and 4 different constitutive models

Purpose: The aim of this study is to identify an effective infill wall modelling technique, which can best represent the actual behavior of a substandard reinforced concrete frame with infill walls constructed with high strength mortar, plaster and bricks commonly encountered in the existing building stock.

Theory and Methods:

Experimental response of a substandard reinforced concrete frame with infill walls were used to investigate the effect of infill wall modelling techniques by comparing with the analytically obtained response of the tested frame. The comparisons were made in terms of hysteretic response obtained under reversed cyclic lateral load and structural damages observed at the boundary columns. Four different force-displacement relations and six different geometric modelling techniques, one of which is proposed in this study, are used for the analytical modelling of infill walls.

Results:

The experimentally obtained hysteretic curve is more consistent with the analytically obtained capacity curve both by the proposed two strut model and the existing three parallel strut model. Apart from these two models, the results of the pushover analysis obtained by other geometric modeling methods differ significantly from the experimental results obtained for the test specimen. In addition to the geometric modelling of the infill wall, it is seen that the force-displacement relation employed for the infill wall can result in significant differences in the analytical behavior of the RC frame.

Conclusion:

Boundary columns of the infilled RC frames without any openings can be exposed to shear damage, which is similar to the behaviour of short column failure. Therefore, it is highly crucial to consider the effect of infill walls in the analytical model properly to reproduce the seismic behavior of substandard RC frames with infills realistically. It has been found out that the proposed two parallel strut model in this study and three parallel strut model in the literature are more effective modelling techniques in this respect. Moreover, the force-displacement relation employed for the infill wall plays a critical role in achieving the actual behaviour of the infilled RC frame.



Dolgu duvar modelleme tekniklerinin standart-altı betonarme bir çerçeve üzerinde irdelenmesi

İsmail Durğut*^{ID}, Onur Tunaboyu^{ID}, Özgür Avcı^{ID}

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26555, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Betonarme çerçevenin davranışı
- Dolgu duvar modelleme teknikleri
- Dolgu duvarın doğrusal olmayan kuvvet deplasman ilişkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.01.2020

Kabul: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.673866

Anahtar Kelimeler:

Dolgu duvar modelleme,
itme analizi,
standart-altı,
betonarme,
kesme hasarı

ÖZET

Dolgu duvarlar genellikle kirişlerin üzerindeki yayılı yük olarak betonarme hesaplara dahil edilmektedir. Ancak, dolgu duvarların betonarme çerçevelerin davranışına etkilerinin olduğu birçok araştırmacı tarafından vurgulanmıştır. İyi dayanımlı boşluksuz dolgu duvarlar deprem sırasında kenar kolonlarda gevrek kesme hasarları oluşturabilmektedir ve bu hasar betonarme yapının tamamen göçmesine dahi sebep olabilmektedir. Dolayısıyla, gerçekçi yapı davranışının elde edilebilmesi için dolgu duvarların analitik modele dahil edilmesi büyük önem arz etmektedir. Dolgu duvar modelleme yöntemi ile çerçeve kenar kolonlarda neden olacağı iç kuvvetlerin gerçeğe yakın bir şekilde hesaplanabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada laboratuvar ortamında test edilmiş dolgu duvarlı standart-altı betonarme bir çerçevenin tersinir tekrarlı yükler altında elde edilen kapasite eğrisi ve çerçeve kolonlarında oluşan yapısal hasarları literatürde kullanılan dolgu duvar modelleme yöntemleriyle analitik olarak elde edilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda dört farklı dolgu duvar kuvvet-deplasman ilişkisi ile altı farklı geometrik modelleme tekniği kullanılmıştır. Test edilen dolgu duvarlı betonarme çerçevenin davranışına en yakın sonucu veren dolgu duvar modelleme yöntemi belirlenmiştir. Ayrıca, yeni bir dolgu duvar modelleme tekniği olarak paralel iki basınç çubuklu dolgu duvar modeli önerilmiştir.

Investigation of infill wall modelling techniques on a substandard reinforced concrete frame

H I G H L I G H T S

- Behavior of reinforced concrete frame
- Infill wall modelling techniques
- Nonlinear force displacement relationship of infill wall

Article Info

Research Article

Received: 16.01.2020

Accepted: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.673866

Keywords:

Infill wall modelling,
pushover analysis,
substandard,
reinforced concrete,
shear damage

ABSTRACT

Infill walls are mostly considered as distributed load only on the beams in the design and assessment of RC buildings. However, it has been emphasized by many researchers that the infill walls have a considerable impact on the seismic behavior of reinforced concrete frames. The infill walls can cause brittle shear damages at the ends of the boundary columns during the earthquake. The column shear damage can even lead to total collapse of reinforced concrete buildings. Therefore, considering the infill walls in analytical models is essential for achieving realistic structural design and assessment. Hence the infill wall modeling method should satisfactorily reproduce the internal forces that are developed in the frame columns. In this study, the experimental results of an infilled RC frame were used to investigate the effectiveness of infill wall modeling techniques by comparing with the analytically obtained cyclic response of the tested frame. Analytical modelling of infill walls was made by considering four different force-displacement relations and six different geometric modelling techniques. The most appropriate modelling technique is sought through the investigated ones that has the closest results with the cyclic response of the tested frame. Moreover, a parallel two-strut model was proposed as an original infill wall modelling technique.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ismail.durgut@suyapi.com.tr, onurtunaboyu@eskisehir.edu.tr, ozguravcar@eskisehir.edu.tr /

Tel: +90 536 969 7871

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dolgu duvarlar, taşıyıcı sistemde genellikle çerçeve düzlemi içerisinde kirişler üzerinde bulunmaktadır ve taşıyıcı sisteme olan etkisi betonarme hesaplarda genellikle kirişlerin üzerinde olan yayılı yük olarak dikkate alınmaktadır. Dolgu duvarların dayanım ve rijitliğe katkıları ile yapısal davranış etkileri genellikle hesaba katılmamaktadır. Gerek ve Soyluk [1] ile Çiftçi vd. [2]. Ancak, bugüne kadar birçok araştırmacı gerek analitik gerekse deneysel olarak yaptıkları çalışmalarla dolgu duvarların taşıyıcı sisteme olumlu ve olumsuz etkilerinin olduğunu vurgulamışlardır. Tunaboyu ve Avşar [3]. Özellikle, dolgu duvarlar kendisini sınırlayan çerçeve elemanları ile etkileşim içinde oldukları için çerçeve elemanlarının davranışına etkilerinin olması kaçınılmazdır. Deprem yer hareketi nedeniyle dolgu duvarlarda meydana gelen ezilme, çatlama ve yatay derz kayması gibi hasarlar, duvarların betonarme çerçeve ile etkileşimde olduklarını ve deprem etkilerine karşı yapının dayanım ve rijitliğine katkı sağladıkları anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, gerçekçi betonarme davranışının elde edilebilmesi için dolgu duvarların sayısal modellere dahil edilmesi gerekmektedir.

Analitik çalışmalarda dolgu duvarları modelleyebilmek için eşdeğer basınç çubuklu modelleme yöntemi ve sonlu elemanlar metodu araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodunun uygulanabilirliğinin zor olması, eşdeğer basınç çubuklu modellerin daha çok kullanılmasına yol açmıştır. Dolgu duvarlar yatay yük etkisinde çerçevenin duvara temas ettiği köşelerde aksel basınç altında çalışan eşdeğer diyagonal basınç çubukları ile idealize edilmektedir. Dolgu duvarlar tekli eşdeğer basınç çubuğuyla modellenebileceği gibi ikili, üçlü ve beşli (çoklu) eşdeğer basınç çubuklarıyla da modellenmektedir. Dolgu duvarları tekli eşdeğer basınç çubuğuyla modellemek oldukça basit bir yöntem olmasına rağmen, çerçeve elemanlarında oluşan iç kuvvetleri (eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri) yansıtmakta çoklu eşdeğer basınç çubuklu modellere göre yetersiz kalmaktadır. Dolgu duvarları tekli veya çoklu eşdeğer basınç çubuklarıyla modellemenin yanı sıra, doğrusal elastik olmayan gerçekçi kuvvet-deplasman ilişkisinin belirlenmesi de büyük önem arz etmektedir.

Bugüne kadar birçok araştırmacı dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin gerçeğe en yakın modelleme yönteminin elde edilebilmesi için deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlardır. Crisafulli ve Carr [4] tekli, ikili ve üçlü eşdeğer basınç çubuğu modellerini kullanarak yaptıkları çalışmada, dolgu duvarı tekli eşdeğer basınç çubuğu ile modellemenin basit bir modelleme tekniği olmasına rağmen dolgu duvarlı çerçevenin rijitliğinin ve elemanlarda oluşan aksel yükün yeterli düzeyde tahmin edilebildiğini ama çerçeve elemanlarında oluşan eğilme momenti ve kesme kuvvetinin üçlü çubuk modeli ile daha doğru değerlerin bulunduğunu vurgulamışlardır. Kaushik vd. [5] tek katlı ve tek açıklıklı dolgu duvarlı 6 farklı analitik model ile (dolgu duvarsız betonarme çerçeve, tam ve kısmi dolu olan sonlu eleman modelleri ile oluşturulan dolgu duvarlı betonarme

çerçeveler, tekli ve üçlü diyagonal basınç çubuğu ile oluşturulan dolgu duvarlı betonarme çerçeveler) yapılan doğrusal analizlerin sonuçlarını kıyaslamışlardır. Üçlü basınç çubuklu modelin çerçeve elemanlarında oluşturduğu kuvvetler düşünüldüğünde, sonlu eleman modelleri ile oluşturulan dolgu duvarlı çerçeveye yakın sonuçlar verdiği ve uygulamasının daha kolay olduğu için dolgu duvarlı modeli tasarlamada daha iyi bir seçenek olduğu belirtilmiştir. Ghosh ve Kumar [6] 8 farklı geometri ile 7 farklı eşdeğer basınç çubuğunun doğrusal elastik olmayan kuvvet-deplasman ilişkisinin kombinasyonlarından oluşan toplam 56 adet dolgu duvarlı analitik model ile çalışma yapmışlardır. Çalışmada 35 adet tek katlı ve tek açıklıklı deneysel numunenin kuvvet deplasman ilişkisini analitik olarak elde etmeye çalışmışlardır. Oluşturulan 3 eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerin dolgu duvarlı betonarme çerçevenin kuvvet-deplasman eğrisinin elde edilmesinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Timurağaoğlu vd. [7] tek katlı ve tek açıklıklı gaz beton dolgu duvarlı betonarme çerçeve modelini hem analitik hem de deneysel olarak yatay yük etkisinde incelemişlerdir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak tekli, ikili ve üçlü eşdeğer basınç çubuklu dolgu duvar çerçeve modelleri analiz edilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çoklu eşdeğer basınç çubuğu modellerinin çerçevenin genel davranışını tekli çubuk modeline göre daha iyi yansıttığını vurgulamışlardır. Üçlü basınç çubuğu modelinin dolgu duvar ve çerçeve arasındaki yük geçişini sağladığı, tekli basınç çubuğu modeli ile çerçevede oluşan iç kuvvetlerin doğru bir şekilde hesaplanmadığı ve dolgu duvar ile çerçeve arasındaki dayanım farkının çok düşük olduğu durumda kullanılabileceği belirtilmiştir. Trapani vd. [8] dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin modellenmesi hakkında yaptıkları geniş literatür taramasında sonlu elemanlar mikro modelleme yönteminin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiğini ama uygulamasının çok zahmetli olduğunu belirtmişlerdir. Tekli eşdeğer basınç çubuklu makro modelleme yönteminin daha kolay olduğunu ama yanıl yük etkisinde dolgu duvarlı çerçeve elemanlarda oluşan gerilmelerin gerçeği tam yansıtmadığını belirtmişlerdir. Çoklu eşdeğer basınç çubuklu modellerle kolon ve kiriş elemanlarında oluşan kesme kuvvetlerinin bulunabileceğini belirtmişlerdir. Hasar yapıcı depremlerin ardından, iyi dayanımlı boşluksuz dolgu duvarın çerçeve kolonlarının üst bölgelerinde ezilerek dökülmesi ile kolonların uçlarında boşluk oluşturduğu ve kısa kolon hasarına benzer kesme hasarlarına yol açtığı görülmüştür. Tunaboyu [9] çalışmasında, kısa kolon oluşması beklenmeyen boşluksuz dolgu duvarlı betonarme çerçeve kolonlarında kısa kolon oluşumuna neden olan etmenleri deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmada, farklı malzeme ve geometrik özellikler ile oluşturulan 14 numune kullanmıştır. Çerçevelere tekrarlı tersinir yatay deplasman çevrimleri uygulamıştır ve hedef deplasmanındaki hasar tiplerini incelemiştir. Boy/en oranı 0,58 olan iyi ve orta dayanımlı harç ve sıva ile üretilen dolgu duvarlı kısa numunelerde kısa kolon hasarı oluşumuna benzer bir davranış gözlemlenmiş ve kısa kolon hasarı davranışının meydana gelmesinde harç ve

sıva dayanımının etkin bir rol üstlendiğini vurgulamıştır. Sattar vd. [10] Los Angeles ve California’da 1920’li yıllardaki sünek olmayan dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız 13 farklı mimari tasarıma sahip yapıların göçme performanslarını değerlendirmişlerdir. Dolgu duvarlı yapının yıkılma olasılığının dolgu duvarların kolonlarda oluşturduğu gevrek kesme kırılmasından dolayı, dolgu duvarsız yapıdan fazla olduğunu belirtmişlerdir. İyi dayanımlı dolgu duvarın yapının dayanım ve rijitliğini artırmasına rağmen, kolonlarda gevrek kesme kırılmasına neden olduğu belirtilmiştir. Zayıf dayanımlı dolgu duvarlı yapının performansının, dolgu duvarın daha az miktarda deprem kuvvetini komşu kolonlara aktarması nedeniyle kolonlarda oluşan kesme kırılmasını geciktirdiği için iyi dayanımlı dolgu duvarlı yapının performansından daha iyi olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, Mehrabi vd. [11] düşük dayanımlı betonarme çerçevelerde dolgu duvarların güçlü olması durumunda çerçeve elemanlarında gevrek kesme hasarlarının oluştuğunu belirtmişlerdir. Depremlerden sonra boşluksuz dolgu duvarların çerçeve kolonlarında oluşturduğu gevrek kesme hasarları betonarme yapıların tamamen göçmesine neden olabilmektedir. Dolayısıyla, dolgu duvarları betonarme hesaplara dahil etmenin kaçınılmaz bir gereklilik olduğu görülmektedir. Ancak, bu durumda çerçeve kolonlarında oluşan iç kuvvetleri belirleyebilmek için analitik modellerde dolgu duvarları modelleme yöntemi büyük önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, Tunaboyu [9] tarafından deneysel çalışmada kullanılan tek katlı ve tek açıklıklı iyi dayanımlı harç ve sıva ile üretilen güçlü dolgu duvarlı betonarme çerçevenin analitik modeli oluşturulmuştur. Dolgu duvarları modellemek için 6 farklı geometriyle oluşturulan (literatürde kullanılan tekli, ikili, üçlü, ikili çapraz ve beşli eşdeğer basınç çubuklu dolgu duvar modelleme yöntemleri ile bu çalışmada önerilen iki eşdeğer basınç çubuklu model) eşdeğer basınç çubuklu analitik modeller ile eşdeğer basınç çubukların doğrusal olmayan 4 farklı kuvvet-deplasman ilişkileri kullanılmıştır. Çevrimsel deney sonucu elde edilen dolgu duvarlı betonarme çerçeve davranışına en yakın sonucu veren dolgu duvar modelleme yönteminin belirlenmesi için itme analizi yapılacak 24 adet analitik model oluşturulmuştur. Deney numunesinin tersinir tekrarlanır yükler altında elde edilen kuvvet-deplasman eğrisine en yakın kapasite eğrisi ve çerçeve elemanlarında oluşan yapısal hasarları tespit edebilen dolgu duvarlı analitik modeller elde edilmeye çalışılmıştır. Buna göre, mevcut yapı stokunda yaygın bir şekilde karşılaşılan iyi dayanımlı harç, sıva ve tuğla ile üretilmiş boşluksuz dolgu duvarlı standart-altı betonarme bir çerçevenin davranışını en iyi seviyede temsil edebilecek dolgu duvar modelleme tekniği belirlenecektir.

2. ANALİTİK ÇALIŞMA (ANALYTICAL WORK)

Tunaboyu [9] kısa kolon oluşması beklenmeyen boşluksuz dolgu duvarlı betonarme çerçeve kolonlarında oluşan kesme kırılmalarının nedenlerini deneysel ve analitik olarak araştırmıştır. Boşluksuz dolgu duvarlı çerçevelerde oluşan kesme kırılmalarının kolonun üst bölgesinde bulunan dolgu

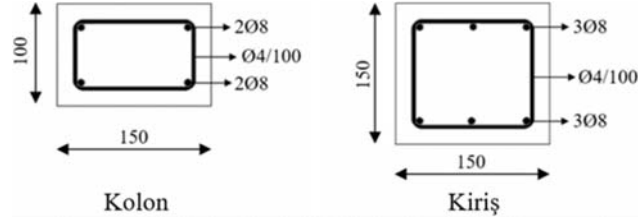
duvarın ezilerek boşluk oluşturmasından kaynaklandığını belirtmiştir. Boşluksuz dolgu duvarın ezilerek kesme hasarına sebep olduğunu düşündüğü etmenleri deneysel olarak tek katlı, tek açıklıklı boşluksuz dolgu duvarlı 9 kısa numune ve 5 uzun numune olmak üzere 14 betonarme çerçeve üzerinde incelemiştir. Bu çalışmada, Tunaboyu [9]’da kullanılan boşluk oranı %42 olan tuğlalardan üretilen ve B sınıfı iyi dayanımlı harç ve sıva ile imal edilen dolgu duvar dayanımı en yüksek betonarme çerçeve numunesinden yararlanılmıştır. Literatürde kullanılan tekli, ikili, üçlü, ikili çapraz ve beşli eşdeğer basınç çubuklu dolgu duvar modelleme yöntemleri ile bu çalışmada önerilen ikili eşdeğer basınç çubuklu dolgu duvar modeli kullanılmıştır. Tunaboyu [9] tarafından test edilen numunenin kuvvet-deplasman eğrisi ile çerçeve elemanlarında oluşan yapısal hasarları analitik olarak elde edilmeye çalışılmıştır. Analitik çalışmada, Panagiotakos ve Fardis [12], Bertoldi vd. [13], Tsai ve Huang [14] ve Sevil vd. [15] tarafından kullanılan eşdeğer basınç çubuğunun 4 farklı doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkileri ile 6 farklı geometriden oluşan tekli ve çoklu eşdeğer basınç çubuğu modellerinin kombinasyonlarından 24 modelleme yöntemi oluşturulmuştur.

2.1. Analitik Çalışmada Kullanılan Test Numunesinin Geometrik ve Malzeme Özellikleri (Geometric and Material Properties of the Test Specimen Used in Analytical Study)

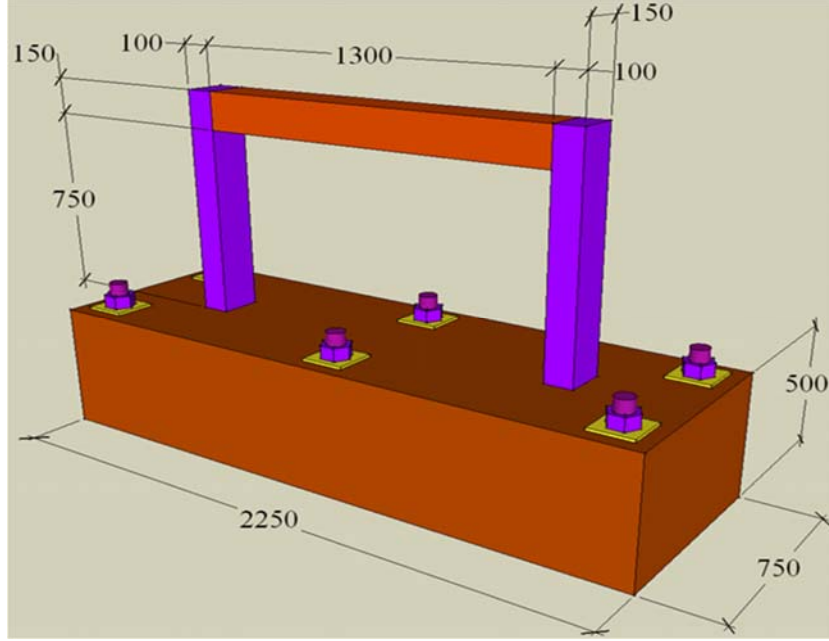
Analitik çalışmada kullanılan numunenin kesit boyutları ile kiriş ve kolonlardaki donatı düzenlemesi Şekil 1 ve Şekil 2’de verilmiştir. 1/3 ölçekli numunenin net kolon yüksekliği 750 mm, net kiriş açıklığı 1300 mm’dir. Kolonların boyutu 100 x 150 mm, kirişin boyutu ise 150 x 150 mm’dir. Kolon ve kirişlerde boyuna donatı olarak 8 mm çapında, etriye donatısı olarak ise 4 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Etriyelerin aralığı kolonlarda ve kirişlerde 100 mm ve uçları 90 derece kancalıdır. Kolon ve kirişlerde, etriye olarak kullanılan 4 mm çapındaki donatının akma dayanımı 600 MPa ve boyuna donatı olarak kullanılan 8 mm çapındaki donatının akma dayanımı ise 310 MPa’dır.

Test numunesinin ortalama beton basınç dayanımı 11 MPa’dır ve elastisite modülü ise ACI-318M [16]’te önerilen E_s 1 ile 16580 MPa olarak hesaplanmıştır. Duran vd. [17] çalışmalarında da vurgulandığı üzere mevcut bina stokundaki ortalama beton basınç dayanımı yönetmelik minimum değerlerinden çok düşük olduğu için bu çalışmada da düşük beton dayanımına sahip bir test numunesi seçilmiştir. Dayanım açısından iyi olan %42 boşluk oranına sahip tuğlanın aksenal basınç dayanımı 17,2 MPa’dır. Dolgu duvarlarda, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik [18] kapsamında B grubu iyi dayanımlı harç ve sıva karışımı kullanılmıştır. Harç ve sıva basınç dayanımı 4,8 MPa olarak belirtilmiştir. Test numunesinin çevrimsel testlerinde çelik plakalar ile uygulanan sabit düşey yük, her bir kolona gelen aksenal yük olarak analitik modelde tanımlanmıştır.

$$E_{fr} = 5000\sqrt{f_c} \quad (1)$$



Şekil 1. Numunenin kolon ve kiriş boyutları, mm [9] (Column and beam dimensions of the specimen)



Şekil 2. Test numunesinin boyutları, mm [9] (Dimensions of the test specimen)

2.2. Dolgu Duvarın Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi (Determination of Mechanical Properties of the Infill Wall)

Dolgu duvarlar genellikle basınca dayanıklı ama çekme ve kesmede zayıftır. Dolgu duvarı oluşturan harcın, tuğla bloklarına göre dayanımının az olması ve tuğla birimleri ile harcın aderansının yeterli olmamasından dolayı, duvara yatay yük uygulandığında ilk olarak çatlaklar harçta oluşmakta ve tuğla blokları ile harç arasında ayrılmalar oluşmaktadır. Dolayısıyla, dolgu duvarı oluşturan harç ve tuğla birimleri, duvarın basınç, çekme ve kesme dayanımı ile elastisite modülü gibi mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bunlara ek olarak dolgu duvarın basınç dayanımı, duvarın sıvalı olması veya olmaması durumlarına göre de değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada betonarme çerçeve modelinde kullanılan iyi dayanımlı (B grubu) harç ve sıva karışımı ile % 42 boşluk oranına sahip tuğla bloklarının basınç dayanımları kullanılarak, analitik modellerde kullanılmak üzere dolgu duvarın mekanik özellikleri belirlenmiştir.

2.2.1. Dolgu duvarın basınç dayanımının belirlenmesi (Determination of compressive strength of the infill wall)

Dolgu duvarın basınç dayanımı (f'_m), dolgu duvar için en önemli parametrelerden biridir. Tuğla birimlerinin (f_b) ve

harcın (f_j) basınç dayanımları tasarım yönetmeliklerinden alınabilir veya basınç testlerinden elde edilebilir. Ancak, dolgu duvarın basınç dayanımı için her zaman basınç testi yapmak mümkün olmamaktadır. Kaushik vd. [19] çalışmalarında, 4 farklı fırından elde edilen toplam 40 tane tuğla numunesi ile zayıf, orta ve iyi dayanımlı toplam 27 harç numunesinin birleştirilmesi sonucu oluşan (4 tuğla ve 3 harç türü) toplam 84 adet numuneyle dolgu duvarın basınç dayanımları ve elastisite modülü arasındaki ilişkiyi göstermişlerdir. Deneysel çalışmalarından elde ettikleri basınç dayanımlarını kullanarak yaptıkları regresyon analizleri sonucunda Eş. 2'de verilen bağıntıyı elde etmişlerdir. Bu çalışmada tuğla duvarın basınç dayanımı için Eş. 2'de verilen bağıntı kullanılmıştır. Betonarme çerçeve modelinde kullanılan %42 boşluk oranına sahip tuğla biriminin basınç dayanımı 17 MPa ve iyi dayanımlı (B grubu) harcın basınç dayanımı ise 4,8 MPa olarak Tunaboyu [9]'a ait deneysel çalışmadan alınmış ve tuğla duvarın basınç dayanımı 4,17 MPa bulunmuştur.

$$f'_m = 0,63 \cdot f_b^{0,49} \cdot f_j^{0,32} \quad (2)$$

Akansel [20] ve Baran [21] çalışmalarında sıvanın basınç dayanımının dolgu duvarın basınç dayanımını hesaplarken

modele dahil edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Tuğla duvarlı numune sıvalı olduğu için, dolgu duvarın basınç dayanımı Ezzatfar vd. [22] çalışmasındaki Eş. 3 ile belirlenmiştir. Tuğla duvarın kalınlığı 6 cm ve sıvanın kalınlığı ise duvarın her iki yüzünde ikişer cm olarak alınmıştır. Tuğla duvarın basınç dayanımı 4,17 MPa ve sıva basınç dayanımı 4,8 MPa olmak üzere sıvalı dolgu duvarın basınç dayanımı 4,42 MPa olarak hesaplanmıştır.

$$(f_m)_{\text{tuğla+sıva}} = \frac{f_m \cdot t_w + f_p \cdot t_p}{t_w + t_p} \quad (3)$$

2.2.2. Dolgu duvarın elastisite modülünün belirlenmesi (Determination of elasticity modulus of the infill wall)

Dolgu duvarın elastisite modülü için birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada dolgu duvarın elastisite modülü (E_m), FEMA 356 [23]'da verilen Eş. 4'e göre 2431 MPa olarak hesaplanmıştır.

$$E_{\text{inf}} = 550 \times f_m \quad (4)$$

2.2.3. Dolgu duvarın kesme dayanımının belirlenmesi (Determination of shear strength of the infill wall)

Begimgil [24] tuğla duvarlı modellerin kesme dayanımını belirleyebilmek için delikli tuğla ile beraber farklı harç karışımına sahip tuğla duvarların diyagonal basınç testini yapmıştır. Yapılarda kullanılan normal harç türü ile yapılan tuğla duvarların kesme dayanımı (τ) için Eş. 5 belirlenmiştir. Bu denklemde, 0,265 MPa basit kayma aderans gerilmesi ve 0,735 katsayısı ise tuğla ile harç arasındaki sürtünme katsayısıdır. Kakaletsis ve Karayannis [25] ise dolgu duvarın farklı yükseklik ve uzunluk oranına göre kesme dayanımı ile normal gerilmesi arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için çalışma yapmışlardır ve kayma aderans gerilmesi değeri zayıf dolgular için 0,267 MPa ve güçlü dolgular için 0,17 MPa olarak belirlemişlerdir.

$$\tau = 0,265 + 0,735\sigma \quad (5)$$

Bu çalışmada, dolgu duvarlı betonarme çerçevenin kesme dayanımının τ (f_{tp}) belirlenmesi için Eş. 5'te verilen bağıntı kullanılmıştır. Ancak, çalışmada kullanılan numune güçlü

dolgu duvar sınıfına girdiği için kesme aderans gerilmesi 0,17 MPa olarak alınmıştır. Düşey yük altındaki normal gerilmesi (σ) için ise, numunenin üzerinde herhangi bir yük olmadığı için kirişin kendi ağırlığının oluşturduğu aksel kuvvet değeri (0,731 kN) kullanılmıştır. Buradan, betonarme çerçeve numunesinin kesme dayanımı (f_{tp}) 0,175 MPa olarak belirlenmiştir.

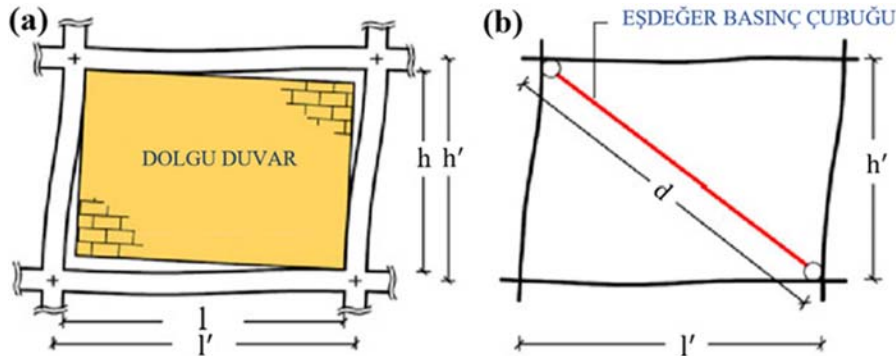
2.3. Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevenin Analitik Modelinin Oluşturulması

(Analytical Modeling of Reinforced Concrete Frame with Infill Wall)

Dolgu duvarların modellenmesinde genel olarak mikro ve makro modelleme yöntemleri kullanılmaktadır. Mikro modelleme yöntemi temel olarak sonlu elemanlar metoduna dayanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile dolgu duvarların modellenmesi gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesine rağmen modellenmenin karmaşık olması, analizin çok zaman alması ve yakınsama problemleri bu yöntemin kullanımını sınırlandırmaktadır. Mikro modelleme yöntemiyle dolgu duvar çerçeve etkileşiminin, çatlakların çerçeve ve dolgu duvardaki ilerleyişinin ve dolgu duvarlı çerçevenin yatay yük altındaki davranışının (yatay derz kayması vb.) daha iyi temsil edildiği Trapani vd. [8] tarafından belirtilmiştir. Dolgu duvarların diğer bir modellenme yöntemi ise makro modelleme yöntemidir. Makro modelleme yöntemi tekli veya çoklu eşdeğer diyagonal basınç çubuğu yöntemleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Makro modelleme yöntemi sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırıldığında daha az hassaslıkta gerçeğe yakın davranışlar elde edilmesine rağmen uygulanabilirliğinin basitliği sayesinde tercih edilen bir yöntemdir. Bu çalışmada dolgu duvarların modellenmesi için tekli ve çoklu eşdeğer basınç çubuklu modeller kullanılmıştır.

2.3.1. Tekli eşdeğer diyagonal basınç çubuğu modeli (Single equivalent diagonal strut model)

Tekli eşdeğer basınç çubuğu modelinde yatay yük etkisinde dolgu duvar ile çerçeve arasında çekme dayanımı olmadığı için Şekil 3'te gösterilen çekmedeki köşelerde temas kaybolmaya başlar. Yatay yük arttıkça çerçevenin dolgu duvara temas ettiği diğer köşelerde temas sınırlı kalır ve bu bölge eşdeğer basınç çubuğu modeli olarak belirlenir. Yatay



Şekil 3. Yatay yük etkisindeki dolgu duvarlı çerçeve ve basınca maruz kalan bölgenin tek çapraz çubukla idealize edilmesi [8] (Frame with infill wall at lateral load effect and idealization of compression-exposed area with single diagonal strut)

yükün zorladığı köşeleri eşdeğer diyagonal basınç çubuğu ile modelleyerek dolgu duvarın aksel basınç direnci idealize edilir. Eşdeğer diyagonal basınç çubuğunun malzeme özellikleri ve kalınlığı dolgu duvar ile aynı alınır. Analitik modellerde dolgu duvarlar yerine kullanılacak eşdeğer basınç çubuğu genişliği, hem dolgu duvarın çevresindeki çerçeve elemanlarına hem de dolgu duvarın mekanik ve geometrik özelliklerine bağlıdır. Eşdeğer basınç çubuğunun genişliği için FEMA 356 [23]'da önerilen Eş. 6 ve Eş. 7'de yer alan denklemler kullanılmıştır.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_{inf} \cdot t_{inf} \cdot \sin 2\theta}{4 \cdot E_{fr} \cdot I_{col} \cdot h_{inf}}} \quad (6)$$

$$a = 0,175 (\lambda \cdot h_{col})^{-0,4} \cdot r_{inf} \quad (7)$$

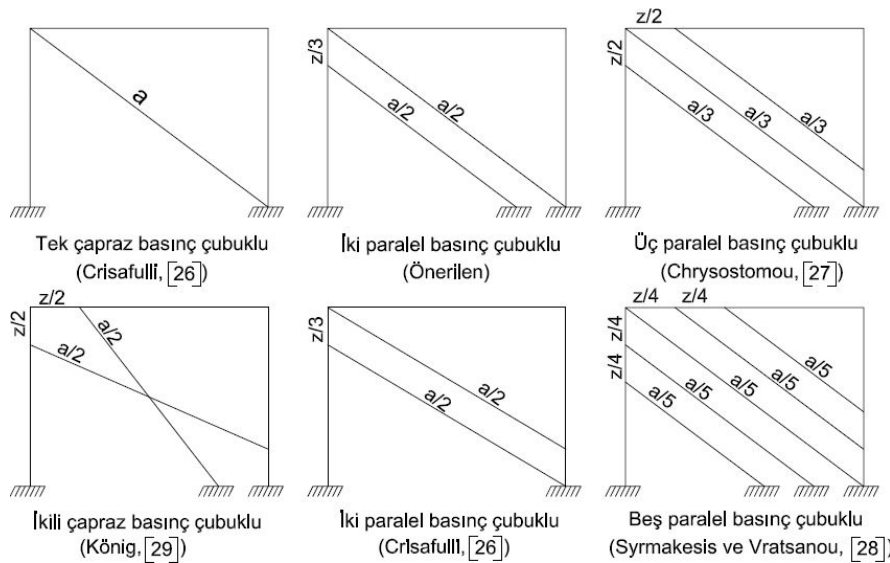
2.3.2. Çoklu eşdeğer basınç çubuğu modelleri (Multiple equivalent strut models)

Dolgu duvarların modellenmesinde kullanılan diğer bir makro modelleme yönteminde ise çoklu eşdeğer basınç çubukları kullanılmaktadır. Dolgu duvarlı çerçeveye çevrimsel veya dinamik yük etkisinde tekli eşdeğer diyagonal basınç çubuğu kullanılması durumunda çerçeve elemanlarında oluşan eğilme momenti ve kesme kuvveti gerçeği yansıtmamakta ve hasar tipleri ile hasar bölgeleri gerçek davranıştan önemli seviyede farklılaşabilmektedir. Dolayısıyla birçok araştırmacı, dolgu duvarlarla etkileşimde olan çerçeve elemanlarda oluşan iç kuvvetleri doğru tahmin edebilmek için farklı geometrilerle tanımlanmış çoklu eşdeğer basınç çubuklu modelleri kullanmışlardır. Crisafulli [26] yaptığı araştırmada dolgu duvarlı çerçeveyi tekli, ikili ve üçlü eşdeğer diyagonal basınç çubuklu 3 farklı geometriyle modelleyerek oluşturmuştur. Chrysostomou [27] her iki yönde üçlü eşdeğer diyagonal basınç çubuğu olmak üzere altılı basınç çubuklu modeli önermiştir. Syrmakesis ve Vratsanou [28] her iki yönde beşli paralel

basınç çubuklu modeli dolgu duvarları modellemek için kullanmıştır. König [29] tarafından ikili çapraz basınç çubuklu model kullanılmıştır. Bu çalışmada, Tunaboyu [9] tarafından deneysel çalışmada kullanılan tek katlı ve tek açıklıklı iyi dayanımlı harç ve sıva ile üretilen güçlü dolgu duvarlı betonarme çerçevenin tekli, ikili, üçlü, ikili çapraz ve beşli eşdeğer basınç çubuklu analitik modelleri ile bu çalışmada öneri olarak sunulan iki eşdeğer basınç çubuklu analitik modeli oluşturulmuştur (Şekil 4).

Çoklu eşdeğer basınç çubuklu dolgu duvar modelleme yöntemlerinde kenar basınç çubukların çerçeve elemanlarına bağlanacakları düğüm noktaları, Stafford Smith ve Carter [30] tarafından Eş. 8'de tanımlanan dolgu duvar çerçeve temas uzunluğu değerine göre belirlenmiştir. Crisafulli [26] kenar basınç çubuklarını çerçeve elemanları üzerine ikili eşdeğer basınç çubuklu analitik model için dolgu duvar çerçeve temas uzunluğu değerinin üçte birine eşit olarak konumlandırmıştır. Bu çalışma kapsamında önerilen paralel iki eşdeğer basınç çubuklu modelde de Crisafulli [26]'de olduğu gibi eşdeğer basınç çubuğunun kolona bağlandığı nokta, kolon-kiriş düğüm noktasının z/3 mesafe ötesidir. Chrysostomou [27], Akansel [20] ve Öztürkoğlu [31] çalışmalarında üçlü eşdeğer basınç çubuklu modelin kenar basınç çubuklarının çerçeve elemanları üzerinde konumlandırılmasında dolgu duvar çerçeve temas uzunluğu değerinin yarısını kullanmışlardır. Bu çalışmada kenar basınç çubuklarının çerçeve elemanları üzerindeki düğüm noktalarının yerleri Şekil 4'te gösterilen dolgu duvar çerçeve temas uzunluğu değerlerine göre yapılmıştır. Çoklu eşdeğer çubuk modellerinin genişlikleri için ise, tekli eşdeğer basınç çubuğu için hesaplanan genişlik değeri çoklu eşdeğer basınç çubuğu modellerindeki çubuk sayısına bölünerek her bir basınç çubuğuna eşit olacak şekilde paylaştırılmıştır.

$$z = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_{fr} \cdot I_{col} \cdot h_{inf}}{E_{inf} \cdot t_{inf} \cdot \sin(2\theta)}} \quad (8)$$



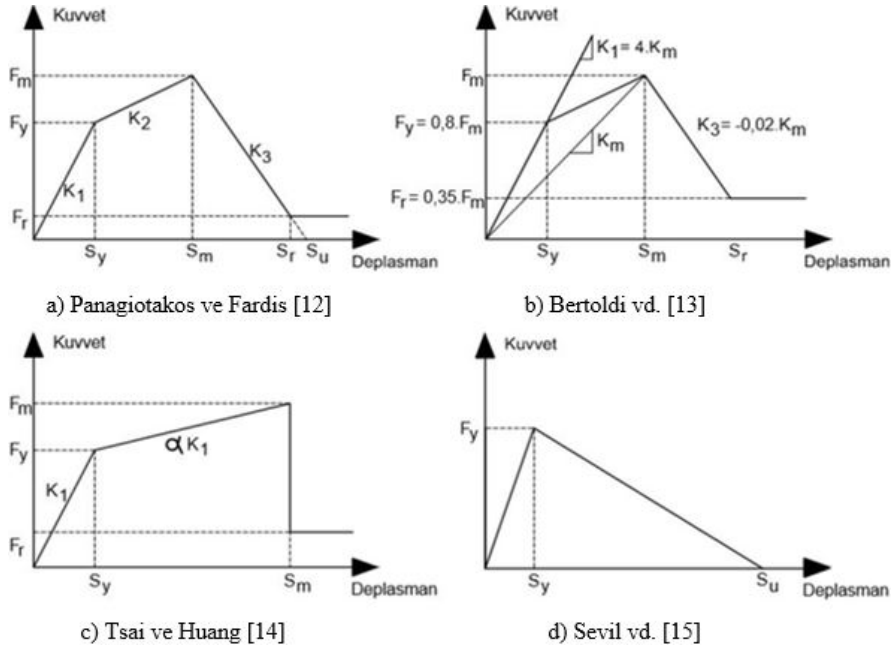
Şekil 4. Çalışmada kullanılan tekli ve çoklu eşdeğer basınç çubuklu betonarme çerçeve modelleri
(Single and multiple equivalent strut reinforced concrete frame models used in the study)

2.3.3. Dolgu duvarların doğrusal olmayan kuvvet deplasman ilişkisinin modellenmesi (Modeling of nonlinear force displacement relationship of infill walls)

Dolgu duvarların gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için diğer bir önemli parametre, dolgu duvarların doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkisinin belirlenmesidir. Dolgu duvarların doğrusal olmayan davranış modeli, oluşabilecek tüm göçme mekanizmalarını (diagonal çatlama, yatay derz kayması ve köşe ezilmesi) içermelidir. Dolgu duvarlar küçük yükler altında yapıya önemli seviyede rijitlik ve dayanım katkısı sağlarlar. Dolgu duvarlar üzerindeki yatay yük arttıkça hasar görmeye başlarlar, öncelikle ilk çatlağın oluştuğu anda akma dayanımına ulaşırlar. Daha sonra üzerine yük almaya devam ederek maksimum yük kapasitesine ulaşırlar ve bu noktadan sonra rijitliklerini önemli oranda kaybederek yatay yük taşıma kapasitelerini önemli oranda yitirirler. Bu çalışmada, dolgu duvarların doğrusal elastik olmayan kuvvet-deplasman ilişkisi için Şekil 5'te verilen 4 farklı doğrusal olmayan model kullanılmıştır.

Bu çalışmada, dolgu duvarın başlangıç (çatlamadan önceki) rijitliği K_1 , ilk çatlak oluştuğu andaki akma dayanımı F_y , akma dayanımına ulaştığı andaki yer değiştirmesi S_y , akma sonrası rijitliği K_2 , maksimum yükteki rijitliği K_m , maksimum yükü F_m , maksimum yüke karşılık gelen deplasman miktarı S_m , maksimum kapasiteye ulaştıktan sonraki azalma rijitliği K_3 , kalıcı yükü F_r , kalıcı yüküne karşılık gelen deplasman miktarı S_r ve sınır deplasmanı S_u ile ifade edilmektedir. α ise dolgu duvarın çatladıktan sonraki rijitliğinin başlangıçtaki rijitliğe oranı olmak üzere Tsai ve Huang [14] tarafından 0,2 olarak alınmıştır. Çalışmada kullanılan tek katlı, tek açıklıklı dolgu duvarlı betonarme çerçeve SAP2000 [32] programında

modellenmiştir. Deney çerçevesinin düzlem dışı hareketi test esnasında kayar mesnetle engellendiğinden, analitik modelde de çerçevenin sadece düzlem içi davranışı incelenmiştir. Elastik ötesi davranış eleman uçlarında ve ortalarında tanımlanan plastik mafsallar yardımıyla modellenmiştir. 6 farklı geometrik model ile oluşturulan analitik modele atanan mafsallar Şekil 6'da gösterilmiştir. Kolon uç bölgelerine P-M₃ (moment-eksenel kuvvet etkileşimli) plastik mafsali ile orta bölgesine V₂ kesme mafsali tanımlanmıştır. Buna karşın, kiriş uç bölgelerine ise yalnızca M₃ moment plastik mafsali ve orta bölgesine V₂ kesme mafsali tanımlanmıştır. Kolon ve kiriş uç bölgelerine tanımlanan P-M₃ ve M₃ plastik mafsallarının kuvvet – deformasyon ilişkisi kesit analizi yapılarak elde edilen moment-eğrilik ilişkisinden, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik [18]'de tanımlanan plastik mafsali boyu kullanılarak elde edilmiştir. Ancak, orta bölgeye tanımlanan kesme mafsali için ise kesitin kesme dayanımının doğrusal olarak azaldığı kabulü ile kesme dayanımı kapasitesinin %20'sine kadar lineer olarak azaltılmıştır. Kalıcı dayanım olarak en büyük dayanım değerinin %20'si, Tunaboyu ve Avşar [3] çalışmasında boşluklu dolgu duvarlı çerçevede kısa kolon hasarı oluşması durumunda gözlenen kalıcı dayanım değerinden elde edilmiştir. Kalıcı dayanım olarak, çerçevenin kapasitesinin %20'sinin benimsenmesi FEMA 356 [23]'de tanımlanan kalıcı dayanım değeri ile uyumludur. Dolgu duvarlar analitik modelde eşdeğer basınç çubukları olarak tanımlanmıştır. Eşdeğer basınç çubuklarının uç bölgelerine moment almayan mafsallar atanarak eşdeğer basınç çubuklarının sadece aksenal yük altında çalışması sağlanmıştır. Ayrıca bu çubukların sadece basınç altında çalışmalarını sağlamak için SAP2000 [32] programında eşdeğer çubuk elemanlara "compression only" ataması yapılmıştır. Orta bölgesine ise dolgu duvarın doğrusal elastik olmayan 4 farklı kuvvet

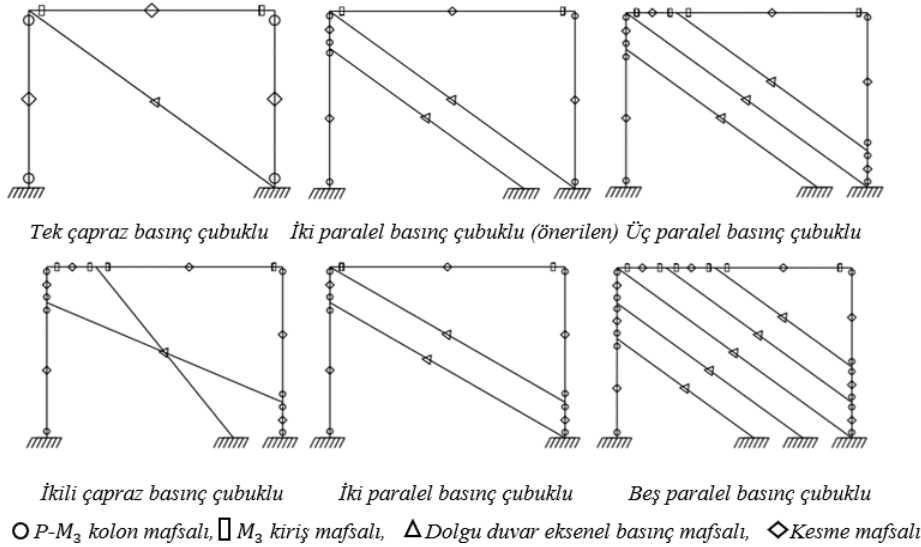


Şekil 5. Dolgu duvarların doğrusal olmayan kuvvet deplasman ilişkileri (Nonlinear force displacement relationship of infill walls)

deplasman ilişkisi tanımlanmıştır. Panagiotakos ve Fardis [12] ile Bertoldi vd. [13] ait plastik mafsallı modellerinde dolgu duvarın rijitliğinin azalması için Akansel [20] çalışmasında güçlü dolgu duvarlar için önerilen $K_3 = 0,005 \times K_1$ değeri kullanılmış ve dolgu duvarın kalıcı yükü ise $F_r=0$ olarak kabul edilmiştir. Analitik modelde dolgu duvarların yerine kullanılan 6 farklı geometri ile tanımlanan basınç çubuğu modeli ile 4 farklı plastik mafsallı modellerinin kombinasyonlarından toplam 24 analitik model SAP2000 [32] programında oluşturulmuştur. SAP2000 [32] programında oluşturulan her bir basınç çubuklu çerçeve modeli için ayrı ayrı artımsal itme analizi yapılarak eşdeğer basınç çubuklu çerçevelerin kuvvet-yer değiştirme kapasite eğrileri belirlenmiştir. Eşdeğer basınç çubuklu çerçeveler için elde edilen kuvvet-yer değiştirme kapasite eğrileri ile çerçeve elemanlarında oluşan eğilme ve kesme hasarları, Tunaboyu [9] çalışmasındaki deney numunesinin test sonrası tespit edilen yapısal hasarları ile karşılaştırılmıştır.

2.4. Deney ve İtme Analizi Sonucu Elde Edilen Kapasite Eğrilerinin Karşılaştırılması (Comparison of Capacity Curves Obtained by Experiment and Pushover Analysis)

Dolgu duvarlı çerçevenin deney sonucundaki doğrusal olmayan kuvvet deplasman ilişkisi, eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerle gerçekleştirilen itme analizleri sonucu elde edilen kapasite eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Deneyde, kullanılan numuneye %4 göreceli kat ötelemesi değerine kadar çevrimsel yük uygulanmış ve kısa kolon hasarı beklenmeyen tam dolu dolgu duvarlı çerçevede kesme hasarı gözlenmiştir. Özellikle kolon üst uç bölgesindeki dolgu duvar parçaları çevrimsel deplasmanların ilk adımlarında ezilerek devre dışı kalmıştır (Şekil 7). Bu bölgede boşalan dolgu duvar nedeniyle oluşan boşluk, kısa kolon oluşumuna neden olmuştur. Bu kısa kolonlar ise artan kesme talepleri karşısında yeterli dayanıma sahip olmadıklarından gevrek



Şekil 6. Kullanılan mafsalların çerçeve elemanları üzerindeki gösterimi (Plastic hinges defined on the frame members)



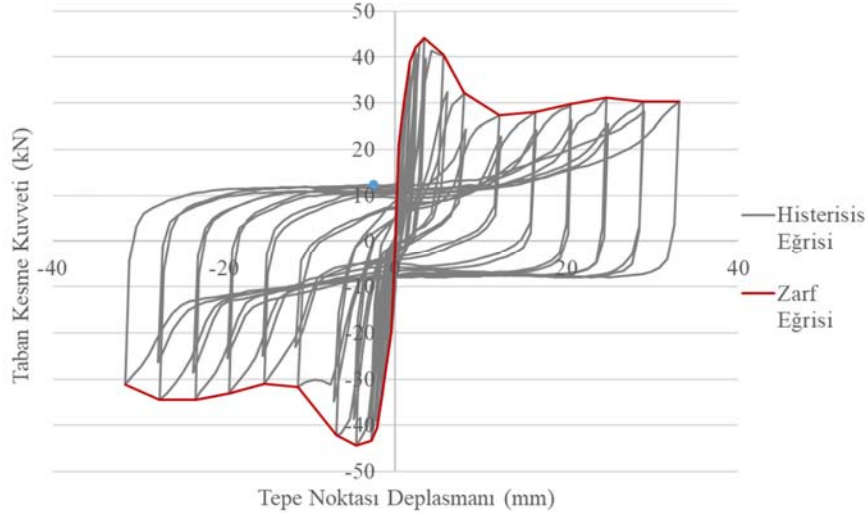
Şekil 7. Deney numunesinde oluşan hasar durumları [9] (Damages in the test specimen)

kesme hasarı meydana gelmiştir (Şekil 7). Deney numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Dolgu duvarlı betonarme çerçevenin, dolgu duvar modellenmesinde kullanılan 6 farklı geometrik modelleme ile 4 farklı doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkisi kullanılarak 24 adet analitik modeli oluşturulmuştur. İtme analizi sonucu elde edilen kapasite eğrileri, deney sonucu elde edilen Şekil 8'deki zarf eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, Şekil 9'da tek çaprazlı, Şekil 10'da bu çalışmada önerilen iki paralel çaprazlı, Şekil 11'de ikili çapraz, Şekil 12'de iki paralel çaprazlı, Şekil 13'te üç paralel çaprazlı ve Şekil 14'te beş paralel çaprazlı analitik modellerden elde edilen kapasite eğrileri verilmiştir.

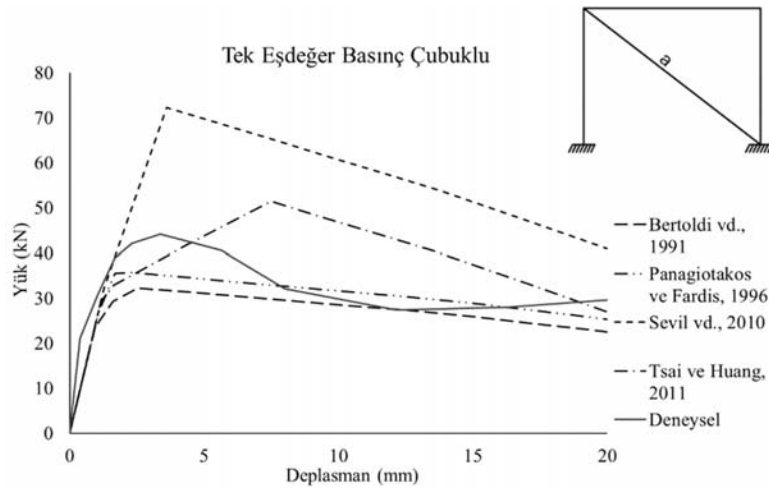
Bu şekillerde 4 farklı dolgu duvar kuvvet-deplasman modeli kullanılarak elde edilen kapasite eğrileri deney sonucu elde edilen zarf eğrisi ile kıyaslanmıştır. Deneysel elde edilen kapasite zarf eğrisi hem öneri olarak sunulan iki paralel çaprazlı (Şekil 10) hem de literatürde bulunan üç paralel

çaprazlı modeller (Şekil 13) ile elde edilen sonuçlarla daha çok uyumludur. Bu iki modelin dışında diğer geometrik modelleme yöntemleri ile elde edilen itme analizi sonuçları test numunesi için elde edilen deneysel sonuçtan önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu iki eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerden Panagiotakos ve Fardis [12] ve Bertoldi vd. [13]'a ait dolgu duvar kuvvet-deplasman ilişkisi ile tanımlanan plastik mafsalların kullanıldığı öneri olarak sunulan iki eşdeğer basınç çubuklu modellerde kapasite eğrileri deney sonucu elde edilen zarf eğrisine daha yakın elde edilmiştir. (Şekil 10).

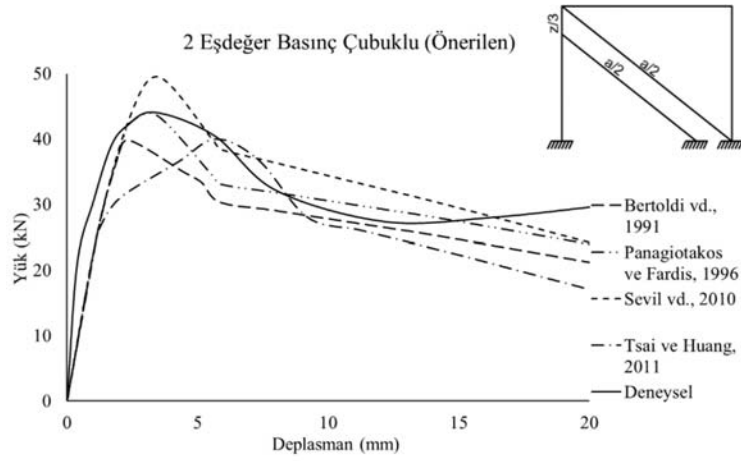
Dolgu duvarın geometrik modellemesinin dışında, seçilen dolgu duvar kuvvet-deplasman ilişkisinin de çerçevenin analitik olarak elde edilen davranışında önemli farklılıklara neden olduğu görülmektedir. İncelenen 4 farklı dolgu duvar kuvvet-deplasman ilişkisinin tanımlandığı önerilen 2 eşdeğer ve 3 eşdeğer basınç çubuklu model sonuçları deneysel elde edilen kapasite eğrisi ile kıyaslandığında Tsai



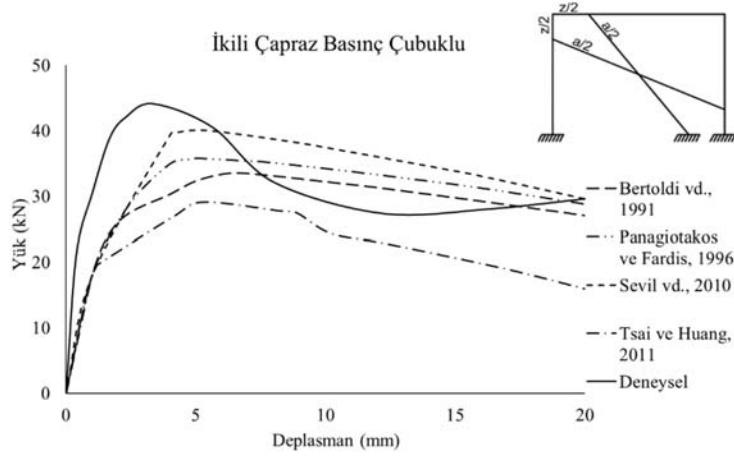
Şekil 8. Dolgu duvarlı deney numunesine ait histeresis yük-deplasman eğrisi ve zarf eğrisi [9]
(Hysteresis and envelope curves of the test specimen with infill wall)



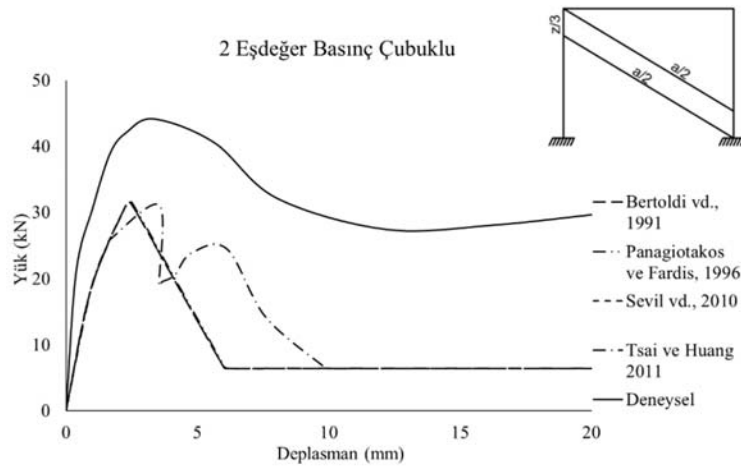
Şekil 9. Tek eşdeğer basınç çubuklu modellerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması (Crisafulli, [26])
(Comparison of pushover curves of single equivalent strut models)



Şekil 10. İki eşdeğer basınç çubuklu modellerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması (Önerilen)
(Comparison of pushover curves of two equivalent strut models, (Suggested))



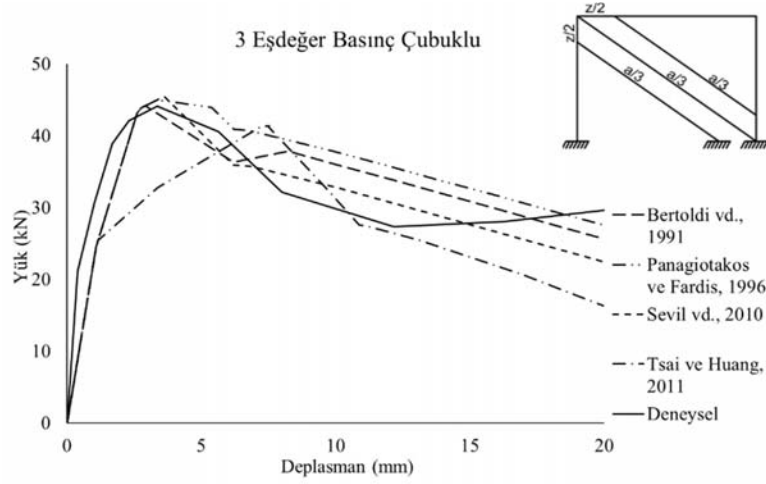
Şekil 11. İkili çapraz basınç çubuklu analitik modellerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması (König, [29])
(Comparison of pushover curves of double cross strut models)



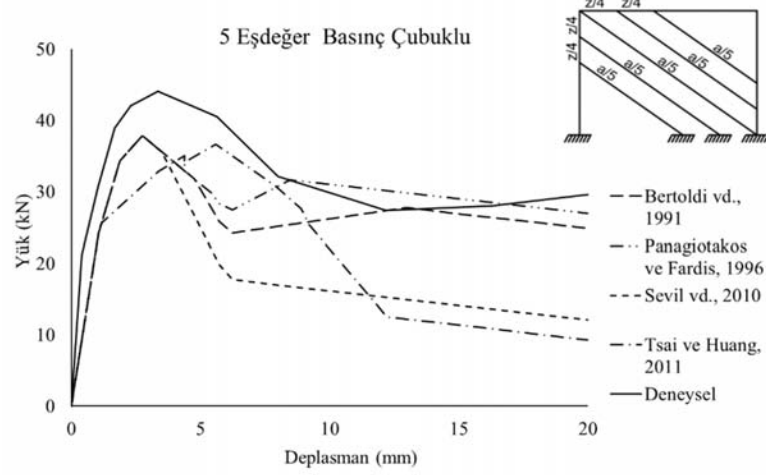
Şekil 12. İki eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması (Crisafulli, [26])

ve Huang [14]'ın gerçeğe daha uzak sonucu verdiği görüldüğünden bu modelin hasar dağılımları karşılaştırılmamıştır. Kapasite eğrilerinin karşılaştırılmalarına ilave olarak, analitik olarak elde edilen

yatay kuvvet kapasitesi ve enerji sönümlenme kapasitesini temsil eden kuvvet-deplasman eğrisi altında kalan alan hesaplanıp deneysel sonuçlara göre normalize edilerek Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 13. Üç eşdeğer basınç çubuklu modellerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması (Chrysostomou [27])
(Comparison of pushover curves of three equivalent strut models)



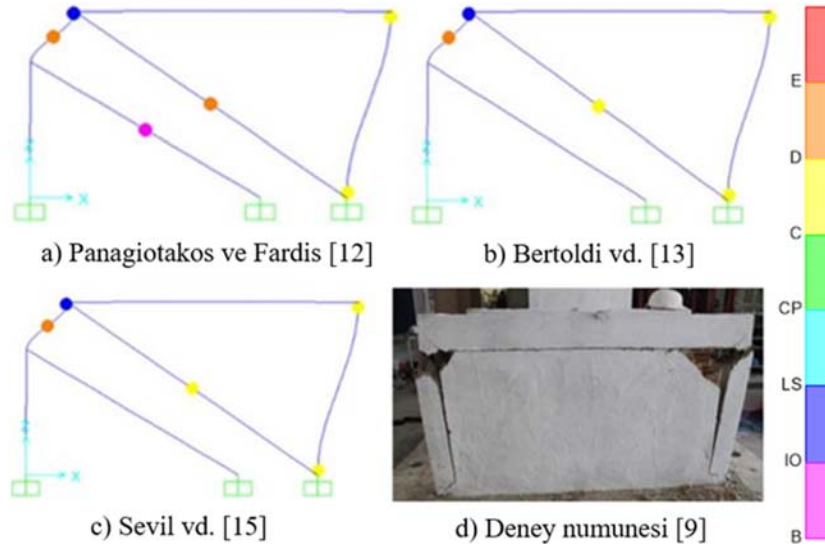
Şekil 14. Beş eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması (Syrmakezis ve Vratsanou, [28])
(Comparison of pushover curves of five equivalent strut models)

Tablo 1. Deney sonucuna göre normalize edilen yatay kuvvet kapasitesi ve enerji sönmüleme kapasitesi
(Normalised horizontal force capacity and energy dissipation capacity according to the experimental result)

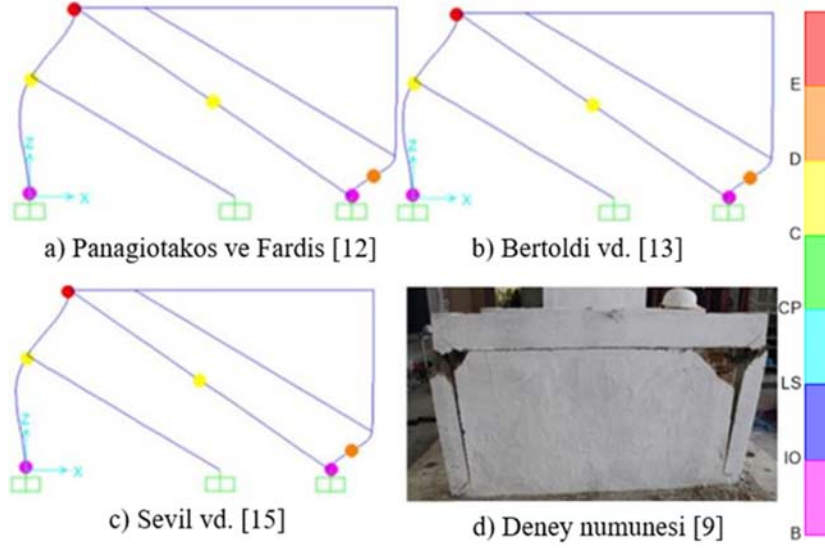
Dolgu duvarın doğrusal olmayan kuvvet deplasman ilişkisi	Önerilen 2 Eşdeğer Basınç Çubuklu		3 Eşdeğer Basınç Çubuklu	
	Normalize Dayanım	Normalize Enerji	Normalize Dayanım	Normalize Enerji
Panagiotakos ve Fardis [12]	0,99	0,94	1,02	1,09
Bertoldi vd. [13]	0,90	0,85	1,00	1,03
Tsai ve Huang [14]	0,91	0,84	0,93	0,86
Sevil vd. [15]	1,12	1,03	1,03	0,97

Ayrıca, kullanılan modelleme teknikleri ile elde edilen hasar dağılımları da önerilen ikili ve Chrysostomou [27] tarafından literatürde bulunan üçlü eşdeğer basınç çubuğu modelleri için sırayla Şekil 15 ve Şekil 16'da gösterilmiştir. Deneyde gözlemlenen yapısal hasar dağılımı, Panagiotakos ve Fardis [12], Bertoldi vd. [13] ve Sevil vd. [15]'in önerdiği kuvvet-deplasman ilişkileri ile oluşturulmuş

analitik modellerin itme analizleri sonuçlarından elde edilen hasar dağılımlarıyla karşılaştırılmıştır. Önerilen iki eşdeğer basınç çubuklu analitik modelde deney numunesinin kapasitesine ulaştıktan sonra dolgu duvarın hasar almasıyla beraber kolonlara gelen kesme kuvvetinden dolayı gevrek kesme kırılması gözlenmiştir (Şekil 15). Kolon üst ucu kesme hasarı her 3 kuvvet-deplasman ilişkisi ile tanımlanan



Şekil 15. Önerilen iki eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerin kesme ve plastik mafsals dağılımı
(Shear and plastic hinge distribution of the suggested two equivalent strut models)



Şekil 16. Üç eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerin kesme ve plastik mafsals dağılımı
(Shear and plastic hinge distribution of the three equivalent strut models)

analitik modellerin itme analiz sonuçlarında gözlenmiştir. Bu durum, deneysel gözlemlenen hasarla oldukça uyumludur. Deney esnasında kolon üst bölgelerinde gözlenen kesme hasarı 3 eşdeğer basınç çubuklu modeller ile elde edilen analitik sonuçlarda gözlenmemiştir (Şekil 16). Diğer taraftan, 3 eşdeğer basınç çubuklu modellerin itme analizleri sonuçlarında, kolon kesme hasarlarının deneyde gözlemlenmeyen sağ kolonun alt ucunda oluştuğu görülmektedir (Şekil 16). Dolgu duvarların dayanımı iyi olduğundan hiçbir analitik modelde dolgu duvar kapasitesine ulaşmamıştır.

3. SİMGELER (SYMBOLS)

a : Dolgu duvar-çerçeve temas uzunluğu (mm)
 E_{inf} : Dolgu duvarın elastisite modülü (N /mm²)

E_{fr} : Betonarme çerçevenin elastisite modülü (N/mm²)
 f_b : Tuğla birimlerinin basınç dayanımı (MPa)
 f_c : Çerçeve betonunun basınç dayanımı (MPa)
 f_j : Harç birimlerinin basınç dayanımı (MPa)
 f_m : Dolgu duvarın basınç dayanımı (MPa)
 f'_m : Tuğla duvarın basınç dayanımı (MPa)
 f_p : Sıvanın basınç dayanımı (MPa)
 h_{col} : Kolonun çerçeve eksenine kadar olan yüksekliği (mm)
 h_{inf} : Dolgu duvar yüksekliği (mm)
 I_{col} : Kolonun atalet momenti (mm⁴)
 r_{inf} : Dolgu duvarın diyagonal uzunluğu (mm)
 t_{inf} : Dolgu duvar ve eşdeğer çubuğun kalınlığı (mm)
 t_p : Sıvanın kalınlığı (mm)
 t_w : Tuğla duvarın kalınlığı (mm)

Z	: Basınç çubuklarının kenar çerçeve elemanı üzerindeki konumları (mm)
τ	: Dolgu duvarın kesme dayanımı (MPa)
σ	: Düşey yük altındaki normal gerilme (MPa)
λ	: Dolgu duvar ile çerçevenin görelî rijitliğini ifade eden katsayı
θ	: Eşdeğer basınç çubuğunun yatayla yaptığı açı

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada literatürde dolgu duvarları analitik olarak modellemek için kullanılan tekli, ikili, üçlü, ikili çapraz, beşli ve bu çalışmada önerilen iki eşdeğer basınç çubuklu modeller ile Tunaboyu [9] tarafından test edilen tam dolgu duvarlı betonarme deney çerçevesinin kuvvet-deplasman kapasite eğrisi ile yapısal hasarları elde edilmeye çalışılmıştır. Betonarme çerçevedeki dolgu duvar yerine kullanılan eşdeğer basınç çubukların doğrusal olmayan davranışının modellenebilmesi için Panagiotakos ve Fardis [12], Bertoldi vd. [13], Tsai ve Huang [14] ve Sevil vd. [15] taraflarından önerilen dört farklı kuvvet-deplasman ilişkisi tanımlanarak plastik mafsallı modelleri oluşturulmuştur. Deney numunesinin kesit boyutları, malzeme ve geometrik özellikleri temel alınarak 6 farklı geometri ile eşdeğer basınç çubuklu dolgu duvar modeli ile 4 farklı doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkisi kullanılarak oluşturulan 24 adet analitik modelin artımsal itme analiz sonuçları deneysel sonuçla karşılaştırılarak aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

İyi dayanımlı dolgu duvarlı betonarme çerçeve deney numunesinin sabit düşey yük ve tekrarlı tersinir yatay yük altında yapılan deney sonuçlarına göre, dolgu duvarın komşu kolona aktarmış olduğu ek kesme kuvveti kolon kesme kapasitesinin aşılmasına neden olduğu için kesme hasarı oluşmaktadır ve bu kesme hasarı öneri olarak sunulan ikili ve literatürde kullanılan üç eşdeğer basınç çubuklu analitik modeller ile gerçekleştirilen itme analizleri sonuçlarında da görülmüştür.

- Tek eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerde deney numunesinin kapasite eğrisine yakın bir davranış gözlenmemiştir. Betonarme çerçevenin kolon elemanlarının uçlarında eğilme plastik mafsalları oluşmasına rağmen, kesme mafsallı oluşmadığı için deney numunesinin gerçek davranışı elde edilememiştir.
- Çoklu eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerden Panagiotakos ve Fardis [12] ile Bertoldi vd. [13]'a ait plastik mafsalların kullanıldığı, bu çalışmada önerilen iki eşdeğer basınç çubuklu ve üç eşdeğer basınç çubuklu modellerin artımsal itme eğrilerinin kapasiteleri deney sonucuna en yakın çıkmıştır.
- Öneri olarak sunulan ikili ve literatürdeki üç eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerde tam dolu dolgu duvarlar sebebiyle kolonlarda görülen beklenmedik kesme hasarları kolonların gevrek bir şekilde hasar görmesine ve kapasite eğrisinin akma dayanımından sonra ani bir şekilde azalmasına sebep olmaktadır.
- Dört farklı plastik mafsallı model ile oluşturulan beş eşdeğer basınç çubuklu analitik modellerde, deney

numunesinde gözlenen kesme mafsalları gözlenmesine rağmen deney numunesinin akma dayanımına ulaşamamış ve elde edilen kapasite eğrileri deneysel elde edilen kapasite eğrisi arasında belirgin farklılıklar gözlenmiştir.

- İkili ve ikili çapraz eşdeğer basınç çubuklu analitik modeller ile elde edilen kapasite eğrilerinin akma öncesi rijitliği ve kapasite değerleri deneysel sonuçlarla uyumlu değildir.

Genellikle, dolgu duvarlar taşıyıcı sistemde yapısal eleman olarak hesaplara katılmazlar ve sadece düşey yük olarak ağırlıkları hesaplara katılır. Bu çalışmada da görüldüğü gibi kısa kolon oluşması beklenmeyen tam dolu dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde dayanımı iyi olan dolgu duvarlar çerçeve elemanları üzerinde kesme hasarları oluşturarak çerçeve elemanlarının gevrek bir şekilde kırılmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla, özellikle standart altı betonarme yapıların deprem davranışının gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi için dolgu duvarlarının doğru bir şekilde analitik modele dahil edilmesi gerekliliği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada öneri olarak sunulan ikili ya da literatürde tanımlı üçlü çapraz eşdeğer basınç çubuklu modellerin bu amaç için daha etkili bir modelleme yöntemi olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Gerek A. E., Soyluk A., Investigation of Earthquake Resistance at Primary School Buildings in Turkey, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 485-490, 2016.
2. Çiftçi Z., Kara F. İ., Fahjan Y. M., Investigation of the Fragility of a Damaged Mid-rise Reinforced Concrete Building, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (4), 1589-1602, 2018.
3. Tunaboyu O., Avşar Ö., Seismic Repair of Captive-Column Damage with CFRPs in Substandard RC Frames, Structural Engineering and Mechanics, 61 (1), 1-13, 2017.
4. Crisafulli F.J., Carr A.J., Proposed Macro Model for the Analysis of Infilled Frame Structures, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 40 (2), 67-77, 2007.
5. Kaushik H.B., Rai D.C., Jain S.K., A Rational Approach to Analytical Modeling of Masonry Infills in Reinforced Concrete Frame Buildings, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing-China, October 12-17, 2008.
6. Ghosh R., Kumar M., Evaluation of Macro Models for Masonry-Infilled Reinforced Concrete Frames, 13th North American Masonry Conference, Salt Lake City/Utah-USA, 1029-1041, June 16-19, 2019.
7. Timurağaoğlu M.Ö., Doğançün A., Livaoglu R., Comparison of Different Analytical Models of Infilled RC Frame, III International Conference on Engineering and Natural Science, Budapest-Hungary, May 3-7, 2017.

8. Trapani F.D., Macaluso G., Cavaleri L., Papia M., Masonry Infills and RC Frames Interaction: Literature Overview and State of the Art of Macromodeling Approach, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19 (9), 1059-1095, 2015.
9. Tunaboyu O., Kısa Kolon Oluşumuna Neden Olabilecek Boşluksuz Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçeve Davranışının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle İrdelenmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2017.
10. Sattar S., Eeri M., Liel A.B., Seismic Performance of Nonductile Reinforced Concrete Frames with Masonry Infill Walls-II: Collapse Assesment, *Earthquake Spectra*, 32 (2), 819-842, 2016.
11. Mehrabi A.B., Shing P.B., Schuller M.P., Noland J.L., Experimental Evaluation of Masonry Infilled RC Frames, *Journal of Structural Engineering*, 122 (3), 228-237, 1996.
12. Panagiotakos T. B., Fardis M. N., Seismic Response of Infilled RC Frames Structures, *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco-Mexico, Paper No. 225, June 23-28, 1996.
13. Bertoldi S.H., Decanini L., Gavarini C., Telai tamponati soggetti ad azioni sismiche, un modello semplificato: Confronto sperimentale e numerico (Infilled frames subjected to seismic actions, a simplified model: Experimental and numerical comparison), *Atti del 6 Convegno Nazionale ANIDIS (Proceedings of the 6th national conference on seismic engineering ANIDIS)*, Perugia-Italy, 815-824, 1993.
14. Tsai M., Huang T., Numerical Investigation on the Progressive Collapse Resistance of an RC Building with Brick Infills Under Column Loss, *World Academy of Science Engineering and Technology*, 5 (10), 483-490, 2011.
15. Sevil T., Baran M., Canbay E., Tuğla Dolgu Duvarların B/A Çerçevesi Yapıların Davranışına Etkilerinin İncelenmesi; Deneysel ve Kurumsal Çalışmalar, *International Journal of Engineering Research and Development*, 2 (2), 35-42, 2010.
16. American Concrete Institute 318M-11, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute (ACI), Detroit-USA, 2011.
17. Duran B., Tunaboyu O., Avşar Ö., Determination of Elasticity Modulus of Low Strength Concrete and Its Effect on the Risk Assessment Results by DSVB, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (1), 253-264, 2017.
18. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY), T. C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Ankara, 2007.
19. Kaushik H. B., Rai D. C., Jain S. K., Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry Under Uniaxial Compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (9), 728-739, 2007.
20. Akansel V.H., Yakut A., Gülkan P., Effects of Openings on Collapse Risk of Infilled Buildings, *4th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Anadolu University-Eskişehir-Turkey, October 11-13, 2017.
21. Baran M., Investigation of the Effects of Infill Walls on the Behavior of Reinforced Concrete Framed Structures, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (2), 275-284, 2012.
22. Ezzatfar P., Binici B., Kurc O., Canbay E., Sucuoglu H. and Ozcebe G., Application of Mesh Reinforced Mortar For Performance Enhancement of Hollow Clay Tile Infill Walls, *Seismic Evaluation and Rehabilitation of Structures*, Volume 26, Springer International Publishing, 171-186, 2014.
23. FEMA 356, *Prestandart and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington-USA, 2000.
24. Begimgil M., Tuğla Duvarların Kayma Dayanımının Güçlendirilmesi Üzerine Deneysel ve Analitik Bir Çalışma, *Türkiye İnşaat Mühendisliği 11. Teknik Kongresi*, 167-181, 1991.
25. Kakaletsis D. J., Karayannis C. G., Influence of Masonry Strength and Openings On Infilled R/C Frames Under Cycling Loading, *Journal of Earthquake Engineering*, 12 (2), 197-221, 2008.
26. Crisafulli F. J., *Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills*, PhD Thesis, University of Canterbury, Department of Civil Engineering, Christchurch, 1997.
27. Chrysostomou C.Z., *Effects of Degrading Infill Walls on the Nonlinear Seismic Response of Two-Dimensional Steel Frames*, PhD thesis, Cornell University, Ithaca (NY), 1991.
28. Syrmakziz C. A., Vratanou V. Y., Influence of Infill Walls to RC Frames Response, *Proc., 8th European Conference on Earthquake Engineering*, European Association for Earthquake Engineering (EAEE), Istanbul-Turkey, 47-53, 1986.
29. König G., *The State of the Art in Earthquake Engineering Research*, *Experimental and Numerical Methods in Earthquake Engineering*, J. Donea and P.M. Jones (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1-22, 1991.
30. Stafford Smith B. and Carter C., *A Method of Analysis for Infilled Frames*, Volume 44(1), *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 31-48, 1969.
31. Öztürkoğlu O., Uçar T., Yeşilce Y., Kısmi Boşluklu Dolgu Duvarların Betonarme Binaların Deprem Davranışına Etkisinin İncelenmesi, *Uluslararası Burdur Deprem ve Çevre Sempozyumu*, Burdur-Türkiye, 123-133, 7-9 Mayıs, 2015.
32. SAP2000 Plus 15.1.0 *Structural Analysis Program*, Computers and Structures Inc., University Ave., Berkeley, CA., 1995.

