



Basınç Çubuğu Bünye Bağıntısının Boşluklu Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevesinin Artımsal İtme Analizine Etkisi

Influence of Constitutive Law of Compressive Strut on Nonlinear Static Analysis of Infilled Reinforced Concrete Frames with Openings

Taner Uçar^{1*}, Onur Öztürkoğlu²

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir, Türkiye

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Öz

Yapıların doğrusal elastik analizinde, dolgu duvarların geometrik ve mekanik özellikleri yönetmeliklerde verilen bağıntılar esas alınarak belirlenen iki ucu mafsallı köşegen eşdeğer basınç çubuğu olarak analitik modele dahil edilmesi yaygın kabul gören bir yaklaşımdır. Aynı modelleme tekniğinin doğrusal elastik olmayan analizde kullanılması durumunda köşegen eşdeğer basınç çubuğunun bünye bağıntısına da ihtiyaç duyulmaktadır. Homojen ve izotrop olmayan yapısı ve uygulanmasındaki farklılıklara bağlı olarak dolgu duvarlar için tek ve kesin bir analitik modelden ve bünye bağıntısından söz etmek oldukça zordur. Bu çalışmada, literatürde eşdeğer basınç çubuğunun eksenel kuvvet-kısalma ilişkisine ait farklı yaklaşımların düzleminde farklı konum ve oranlarda boşluk bulunan dolgu duvarlı bir betonarme çerçevenin artımsal itme analizinden elde edilen çeşitli parametrelere etkisi incelenmiştir. Açılan boşluktan dolayı dolgu duvarda meydana gelen rijitlik kaybı, dolgu duvarın sonlu elemanlar ile modellendiği analizlerden elde edilen rijitlik azaltma faktörü yardımıyla dikkate alınmış ve bu etki köşegen eşdeğer basınç çubuğunun bünye bağıntısına yansıtılmıştır. Doğru parçaları ile idealleştirilen itme eğrisinin tipik noktalarına ait taban kesme kuvveti ve tepe yerdeğiştirme değerleri ile dolgu duvarın göçmesiyle dayanımda meydana gelen azalma farklı eksenel kuvvet-kısalma bağıntıları için belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Basınç çubuğuna ait farklı bünye bağıntıları kullanılarak hesaplanan doğrusal olmayan tepki parametreleri birbirine oldukça yakın bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Artımsal itme analizi, Basınç çubuğu bünye bağıntısı, Betonarme çerçeve, Boşluklu dolgu duvar, Rijitlik azaltma faktörü

Abstract

It is a common approach to incorporate infill walls in analytical model for linear elastic analysis of structures by means of compressive equivalent diagonal strut having assigned the geometric and mechanical characteristics based on relationships of building codes. Implementing the same modeling technique in nonlinear analysis requires the constitutive law of compressive equivalent diagonal strut. It is quite difficult to employ a certain yet simple analytical model and constitutive law for infill walls due to their nonhomogeneous and anisotropic behavior, and differences in their construction. In this study, the influence of axial force-displacement envelopes of compressive equivalent strut available in the literature on some characteristic parameters obtained from pushover analysis of infilled reinforced concrete frames having different positions and percentages of opening within the infill wall is investigated. The reduction in the stiffness of infill wall due to the presence of the opening is taken into account by means of stiffness reductions factors obtained from finite element analysis of partially infilled frames and the influence of the opening is originally introduced to constitutive law of the compressive equivalent diagonal strut. Characteristic base shear force and top displacement points of pushover curves idealized by multiple lines and the strength degradation due to gradual failure of infill are determined and compared considering different axial force-deformation envelopes. It is found that nonlinear response parameters obtained using different constitutive laws of compressive strut is quite reasonable.

Keywords: Nonlinear static analysis, Constitutive law of compression strut, Reinforced concrete frame, Masonry infill wall with openings, Stiffness reduction factor

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: taner.ucar@deu.edu.tr

Taner Uçar orcid.org/0000-0002-2887-045X

Onur Öztürkoğlu orcid.org/0000-0002-8346-5799

1. Giriş

Yeni yapıların deprem tasarımında ve mevcut yapıların değerlendirilmesinde karmaşık fizik bünyesindeki belirsizlikler nedeniyle dolgu duvarlar yapısal bir eleman olarak genellikle analitik modele dahil edilmemektedir. Bu şekilde dolgu duvarların çerçevenin dayanım ve rijitliğine katkısı ve çerçeve elemanları ile olan etkileşimi dikkate alınmamaktadır. Modellemede büyük bir basitlik sağlayan bu yaklaşımın olası etkileri düşey yükler etkisinde ortaya çıkmasa da, yatay yüklü dolgu duvarlı betonarme veya çelik çerçevelerin kompozit davranışı alışılacağı dolgunuz çerçeve davranışından oldukça farklıdır. Bununla birlikte, ülkemizde ve dünyada aktif deprem bölgelerinde konumlanmış farklı taşıyıcı sistemlere sahip yapılarda çeşitli tuğla türlerinden veya gaz betondan yapılmış dolgu duvarların kullanılması yaygın bir uygulamadır. Kendi düzlemi içinde önemli bir dayanım ve rijitliğe sahip bu dolgu duvarların deformasyon kapasitesi oldukça kısıtlıdır. Dolgu duvarlar dikkate alınmaksızın belli bir sünekliği sağlayacak şekilde tasarlanan yapılarda, deprem etkisi altında gevrek bir davranışın ve tasarımda öngörülmediği kadar sünek olmayan bir göçme mekanizması ortaya çıkabilmesi olasıdır. Kısaca, dolgu duvarların yapıların deprem davranışını ve performansını, hem depremin talebi hem de yapısal kapasite cinsinden değiştireceği aşikardır.

Dolgu duvarlar çerçeve düzlemini tamamen kapatabildiği gibi mimari nedenlere veya fonksiyonel gereksinimlere bağlı olarak kısmi boşluklara da sahip olabilir. Bu bağlamda kapı ve pencere boşlukları en çok karşılaşılan boşluk tipleridir. Dolgu duvar düzleminde farklı konum ve oranda açılan boşluklar, dolgu duvarlı yapıların deprem davranışını etkileyen en önemli parametrelerdir ve bu tip çerçeveler tamamen dolgu çerçevelerden farklı bir davranış sergilemektedir (FEMA 306 1998 Asteris 2003, Mondal ve Jain 2008, Kakaletsis ve Karayannis 2009, Asteris vd. 2011, Tasnimi ve Mohebkah 2011, Decanini vd. 2012, Mohammadi ve Nikfar 2013, Öztürkoğlu 2016). Malzemelerdeki çeşitliklere bağlı olarak homojen ve izotrop bir yapısı bulunmayan ve genel olarak doğrusal elastik davranmayan dolgu duvarların hesap modelinin oluşturulması birçok değişkeni içerdiğinden dolayı oldukça karmaşıktır. Tüm değişkenleri kapsayacak şekilde bir analitik model önerisinde çok sayıda faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı dolgu duvarlı çerçevelerin doğrusal olmayan modellenmesi en karmaşık mühendislik problemlerinden birisi olarak kabul edilmektedir (Mohebkah vd. 2008, Mohammadi ve Nikfar 2013). Bununla birlikte, dolgu duvar düzlemindeki boşlukların varlığı söz konusu modeli bir miktar daha karmaşık hale getirmektedir.

Tam dolgulu duvarların ve boşluklu dolgu duvarların çerçevelerin deprem davranışı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla çok sayıda deneysel (Mehrabi vd. 1996, Mosalam vd. 1997, Kaushik vd. 2007, Kakaletsis ve Karayannis 2008, 2009, Koutromanos vd. 2011, Valente 2012, Kuang ve Zhang 2014, Fenerci vd. 2016) ve analitik çalışmalar (Panagiotakos ve Fardis 1996, Dolsek ve Fajfar 2002, 2008, Kaushik vd. 2008, Mondal ve Jain 2008, Smyrou vd. 2011, Fiore vd. 2012, Yakut vd. 2013, Martinelli vd. 2015, Yuen ve Kuang 2015, Bolea 2016, Öztürkoğlu vd. 2016) yapılmaktadır. Bu çalışmaların sonucu olarak dolgu duvarların yapısal analizde dikkate alınmak üzere modellenmesi ile ilgili literatürde çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Bunlar arasında sonlu elemanlar modeli (Mohebkah vd. 2008, Wang vd. 2008, Dorji ve Thambiratnam 2009, Stavridis ve Shing 2011, Allouzi vd. 2014, Yuen ve Kuang 2015) ve eşdeğer basınç çubuğu yaklaşımı (Ricci vd. 2011, Tsai ve Huang 2011, Uva vd. 2012a, 2012b, Akpınar ve Binici 2013, Liu vd. 2014, Aksoy ve Avşar 2015, Thinley ve Hao 2015, Ercolino vd. 2016) yaygın olarak kullanılmaktadır. İki boyutlu sonlu elemanlar, uygun modelleme tekniklerinin kullanılması koşuluyla, dolgu duvarların yapısal davranışının daha hassas olarak belirlenmesine olanak sağlasa da gerçek yapıların doğrusal olmayan analizde dolgu duvarların modellenmesine yönelik pratik bir yaklaşım değildir (Smyrou vd. 2011, Uva vd. 2012b, Asteris vd. 2013). Bu durumda yatay yüklü çerçevelerde yük aktarımına bağlı olarak dolgu duvarların etkisini temsil eden köşegen eşdeğer basınç çubuğu modeli özellikle doğrusal olmayan analiz yapılması durumunda etkili bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır. Bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan bu modelleme tekniğine ulusal deprem yönetmeliğinde (DBYBHY, 2007) ve bazı uluslararası standartlarda (FEMA 273 1997, FEMA 306 1998, FEMA 356 2000) da rastlamak mümkündür.

Dolgu duvarın gerçek dayanım ve rijitliğine eşdeğerlik sağlayabilmek için köşegen eşdeğer basınç çubuğunun geometrik ve mekanik özelliklerinin doğru belirlenmesi önemlidir. Köşegen çubuğun kalınlığı genel olarak dolgu duvar kalınlığına eşit kabul edilmekte, eşdeğer kesit genişliği ve elastisite modülü ise farklı yaklaşımlarla hesaplanabilmektedir. Eşdeğer basınç çubuğu tekniğinin doğrusal elastik olmayan analizde kullanılması durumunda yukarıdaki özelliklere ek olarak köşegen eşdeğer basınç çubuğunun eksenel kuvvet-kısalma ilişkisini temsil eden bünye bağıntısına da ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde genellikle deneysel çalışmalardan elde edilen ve dolgu duvarın eksen kuvvet-basınç ilişkisini üç ya da dört doğru

parçası ile temsil eden bünye bağlantılarına rastlamak mümkündür (Bertoldi vd. 1993, Panagiotakos ve Fardis 1994, Hanoğlu 2002, Dolsek ve Fajfar 2008, Rodrigues vd. 2010, Tsai ve Huang 2011). Bu bağlantılarda, dolgu duvarların doğrusal elastik olmayan davranışını temsil eden bazı karakteristik dayanım ve deformasyon noktaları genel olarak farklı tanımlanmaktadır. Bununla birlikte kısıtlı bir deformasyon artışından sonra ani bir dayanım kaybının ortaya çıkması literatürdeki bağlantıların ortak özelliği olarak görülmektedir.

Dolgu duvar düzleminde açılan boşluklara bağlı olarak ortaya çıkan dayanım ve rijitlik kaybının köşegen eşdeğer basınç çubuğunun doğrusal olmayan davranışına yansıtılması gerekmektedir. Dolgu duvar düzleminde açılan boşluğun konumu ve oranı davranışı etkileyen ana parametreler olduğundan bunların da dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, genel olarak boşluksuz dolgu duvarlar için oluşturulan eksenel kuvvet-kısalma bağlantıları çalışma kapsamında geliştirilen ve dolgu duvar-çerçeve etkileşimini de dikkate alan rijitlik azaltma faktörleri kullanılarak modifiye edilmiştir. Boşluk oranı ve konumunun literatürde yaygın olarak kullanılan üç farklı eksenel kuvvet-kısalma ilişkisinin karakteristik noktalarına etkisi incelenmiş ve bu ilişkiler kullanılarak kısmi boşluklu dolgu duvarlı betonarme bir çerçevenin artımsal itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Köşegen eşdeğer basınç çubuğunun doğrusal olmayan modelinin etkisini ortaya çıkartabilmek ve buna bağlı değişimleri kolaylıkla izleyebilmek için artımsal itme analizleri özellikle tek katlı ve tek açıklıklı bir düzlem çerçeve kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üç farklı eksenel kuvvet-kısalma modeli, üç farklı boşluk konumu ve üç farklı boşluk oranı dikkate alınarak boşluklu dolgu duvarlı, dolgu duvarsız ve tam dolgulu çerçeveler için toplam 31 adet artımsal itme analizi yapılmıştır. Oluşturulan kapasite eğrileri dolgu duvarlı modeller için dört doğru parçası kullanılarak idealleştirilmiş ve bu eğriler üzerindeki tipik dayanım ve yerdeğiştirme değerleri farklı eksenel kuvvet-kısalma ilişkileri için birbiriyle kıyaslanmıştır.

2. Eşdeğer Basınç Çubuğunun Kuvvet-Yerdeğiştirme Bağlıları

Belirli bir yatay dayanım ve rijitliğe sahip dolgu duvarlar yatay deprem hareketine maruz dolgu duvarlı betonarme çerçeve türü yapıların doğrusal olmayan davranışını etkilemektedir. Bu etkinin incelenebilmesi için dayanım ve rijitlik özellikleri bakımından dolgu duvarı temsil ettiği kabul edilen iki ucu mafsallı köşegen eşdeğer basınç çubuğunun doğrusal

olmayan davranışı tanımlayan ilişkilere ihtiyaç vardır. Literatürde eşdeğer köşegen çubuğun aktardığı eksenel basınç kuvveti ile buna bağlı kısalmayı ilişkilendiren farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu çalışmada bunlar arasından üçü kullanılmıştır (Panagiotakos ve Fardis 1994, Dolsek ve Fajfar 2008, Tsai ve Huang 2011).

2.1 Kuvvet-Yerdeğiştirme İlişkisi (Panagiotakos ve Fardis 1994)

Panagiotakos ve Fardis (1994), geçerliliği deneysel olarak kanıtlanmış ve dört doğru parçası ile temsil edilen doğrusal olmayan bir model önermişlerdir (Şekil 1). Bu modelde, çatlamamış dolgu duvarın başlangıç rijitliği (K_1), Denklem (1) kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$K_1 = \frac{G_w \cdot L_{in} \cdot t_w}{H_{in}} \quad (1)$$

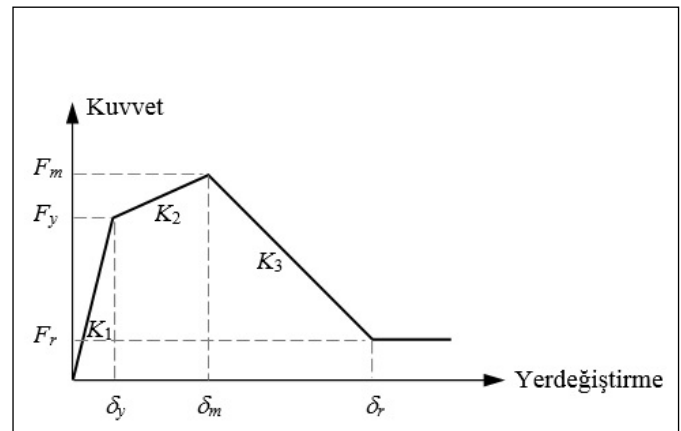
Bu denklemde G_w dolgu duvarın kayma modülü, L_{in} , H_{in} ve t_w ise sırasıyla dolgu duvarın uzunluğu, yüksekliği ve kalınlığıdır.

Dolgu duvarda çatlamaya neden olan kuvvet (F_y), dolgu duvarın köşegen basınç deneyinden elde edilen çatlama dayanımına (f_{tp}) bağlı olarak Denklem (2)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$F_y = f_{tp} \cdot t_w \cdot L_{in} \quad (2)$$

Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisindeki ikinci kol yatay yerdeğiştirme sonucu dolgu duvarın betonarme çerçeveden ayrılmaya başlayarak yükün dolgu duvarın köşegeni üzerinden aktarılması aşamasına karşılık gelir. Bu durumda eşdeğer basınç çubuğunun eksenel rijitliği (K_2) Denklem (3) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$K_2 = \frac{E_m \cdot a_w \cdot t_w}{r_w} \quad (3)$$



Şekil 1. Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi (Panagiotakos ve Fardis 1996).

Burada E_m dolgu duvarın elastisite modülü, a_w eşdeğer basınç çubuğunun genişliği ve r_w dolgu duvarın köşegen uzunluğudur.

Eşdeğer basınç çubuğunun taşıyabileceği en büyük basınç kuvveti $F_m = 1.3 \cdot F_y$ şeklinde hesaplanmaktadır. Bu duruma karşılık gelen yatay yerdeğiştirme (δ_m) ise dolgu duvarın çatlama dayanımına karşılık gelen yerdeğiştirmeye (δ_y) bağlı olarak Şekil 1'deki kuvvet–yerdeğiştirme ilişkisinden kolaylıkla belirlenebilir (Denklem (4)).

$$\delta_m = \delta_y + \frac{F_m - F_y}{K_2} \quad (4)$$

En büyük kuvvete karşılık gelen yerdeğiştirmeye ulaşıldıktan sonra artan kısılmalar altında dolgu duvar dayanımında önemli bir düşüş meydana gelmektedir. Bu davranış eğimi K_3 ile gösterilen doğru parçası ile ifade edilmektedir. K_3 rijitliği ve artık kuvvet (F_r) Denklem (5) ve Denklem (6)'da verilen eşitsizlikler kullanılarak belirlenebilir.

$$0.005 \cdot K_1 \leq K_3 \leq 0.1 \cdot K_1 \quad (5)$$

$$0.05 \cdot F_y \leq F_r \leq 0.1 \cdot F_y \quad (6)$$

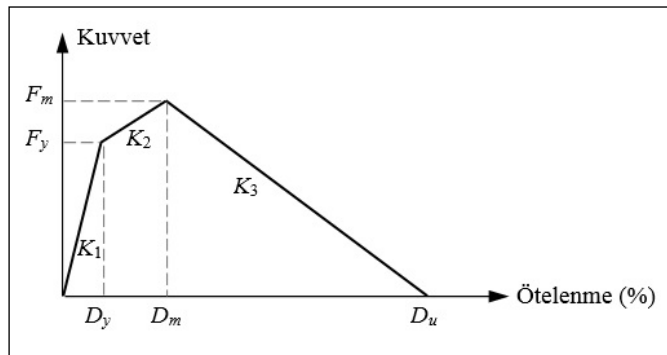
Artık kuvvete karşılık gelen nihai yerdeğiştirme Denklem (7) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\delta_r = \delta_m + \frac{F_m - F_r}{K_3} \quad (7)$$

Panagiotakos ve Fardis (1994) tarafından önerilen modelde yer alan dayanım ve rijitlik değerleri yatay doğrultuda hesaplandıklarından bunların köşegen doğrultusuna aktarılarak eşdeğer basınç çubuğunun eksenel kuvvet–kısalma ilişkisine dönüştürülmesi gerekmektedir.

2.2 Kuvvet-Yerdeğiştirme İlişkisi (Dolsek ve Fajfar 2008)

Dolsek ve Fajfar (2008) tarafından dolgu duvarın doğrusal elastik olmayan davranışı farklı eğimlere sahip üç doğru parçası ile idealleştirilmiştir. Bu modelde dolgu duvarın çatlama davranışı ve taşıyabileceği en büyük kuvvet yatay doğrultuda hesaplanmakta ve aynı doğrultuda görel kat



Şekil 2. Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi (Dolsek ve Fajfar, 2008).

öteleme oranı ile ilişkilendirilmektedir. Önerilen kuvvet–yerdeğiştirme ilişkisinde artık kuvvet bulunmamakta ve dolgu duvarın göçmesine karşılık gelen görel kat ötelemesinde kuvvet sıfırlanmaktadır (Şekil 2).

Dolgu duvarın başlangıç rijitliği (K_1), Panagiotakos ve Fardis (1996) tarafından önerilen modelde olduğu gibi Denklem (1) kullanılarak hesaplanmaktadır. Dolgu duvarın dayanımını ifade eden F_m değeri Denklem (8) kullanılarak belirlenmektedir.

$$F_m = 0.818 \cdot \frac{L_{in} \cdot t_w \cdot f_{tp}}{C_1} \cdot (1 + \sqrt{C_1^2 + 1}) \quad (8)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan C_1 değeri dolgu duvarın uzunluk (L_{in}) ve yüksekliğine (H_{in}) bağlı bir katsayıdır ve Denklem (9)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$C_1 = 1.925 \cdot \frac{L_{in}}{H_{in}} \quad (9)$$

Dolgu duvarın çatlama dayanımı en büyük kuvvetin %60'ı olarak alınmakta ve dayanıma karşılık gelen görel kat öteleme oranı (D_m) dolgu duvarda boşluk bulunmaması durumunda %0.2 olarak kabul edilmektedir. Dolgu duvar düzleminde pencere boşluğu bulunması durumunda $D_m = %0.15$ ve kapı boşluğu bulunması durumunda ise $D_m = %0.10$ alınmaktadır. Görel kat ötelenmesindeki artışa bağlı olarak dolgu duvarda meydana gelen dayanım kaybı eğimi K_3 olarak gösterilen doğru parçası ile modellenmekte ve dolgu duvarın göçmesi durumundaki ötelenme değeri (D_u) en büyük kuvvete karşılık gelen görel kat ötelenmesi oranını 5 katı olarak alınmaktadır.

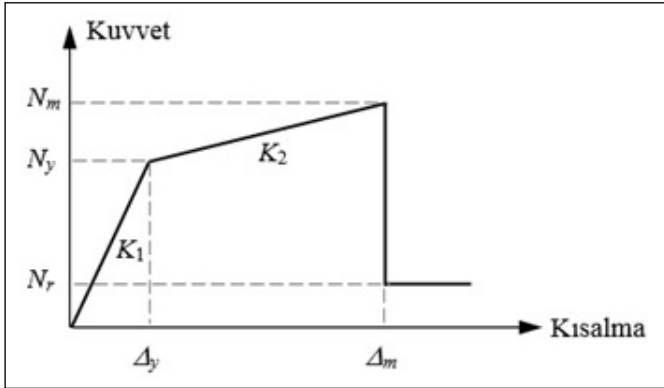
Dolsek ve Farfar (2008) tarafından geliştirilen bu modelde dayanım ve rijitlikler yatay doğrultuda hesaplandığından, eşdeğer basınç çubuğunun eksenel kuvvet–kısalma ilişkisini elde edilirken bu değerlerin dolgu duvarın köşegen doğrultusuna dönüştürülmesi gerektiğine dikkat edilmelidir.

2.3 Eksenel Kuvvet–Kısalma İlişkisi (Tsai ve Huang 2011)

Eşdeğer basınç çubuğunun doğrusal elastik olmayan davranışı dört doğru parçası kullanılarak idealleştirilmiştir. Doğrudan köşegen doğrultusundaki eksenel kuvvet ve kısalma cinsinden tanımlanan bu modelin diğerlerinden en önemli farkı dayanıma karşılık gelen kısalma değerine ulaşıldığında daha fazla kısalma olmaksızın kuvvette keskin bir düşüşün olmasıdır (Şekil 3).

Bu modelde eşdeğer basınç çubuğunun basınç dayanımı Denklem (10) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$N_m = a_w \cdot t_w \cdot f_{m90} \quad (10)$$



Şekil 3. Eksenel kuvvet-kısalma ilişkisi (Tsai ve Huang 2011).

Bu denklemde f'_{m90} dolgu duvarın yatay doğrultuda beklenen dayanımı olup dolgu duvarın basınç dayanımının (f'_m) %65'i olarak alınmaktadır. Dolgu duvarın basınç dayanımı, duvarı oluşturan tuğlanın basınç dayanımı (f'_b) ve bağlayıcı harcın basınç dayanımına (f'_j) bağlı olarak Denklem (11)'deki ampirik bağıntı ile belirlenebilir (Kaushik vd. 2007).

$$f'_m = 0.63 \cdot (f'_b)^{0.49} \cdot (f'_j)^{0.32} \quad (11)$$

Eşdeğer basınç çubuğunun en büyük kuvvetine karşı gelen kısalma ise

$$\Delta_m = \epsilon'_m \cdot r_w \quad (12)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Dolgu duvarın basınç dayanımına karşı gelen birim kısalma (ϵ'_m) ise Denklem (13) yardımıyla belirlenmektedir.

$$\epsilon'_m = \frac{0.27}{(f'_j)^{0.25}} \cdot \frac{f'_m}{(E_m)^{0.7}} \quad (13)$$

Dolgu duvarda çatlamaya neden olan eksenel kuvvet (N_y) Denklem (14) aracılığıyla elde edilmektedir.

$$N_y = \frac{N_m - \alpha \cdot K_1 \cdot \Delta_m}{1 - \alpha} \quad (14)$$

K_2/K_1 oranını ifade eden α değeri 0.2 olarak alınmaktadır. N_y basınç kuvvetine karşı gelen kısalma değeri (Δ_y), eşdeğer basınç çubuğunun K_1 eksenel rijitliği kullanılarak $\Delta_y = N_y/K_1$ şeklinde hesaplanabilir. Artık eksenel kuvvet (N) ise olarak belirlenmektedir. Bu modelde, eşdeğer basınç çubuğunun taşıdığı kuvvetin önemli bir kısmına kaybettikten sonra yüzey sürtünmeleri nedeniyle sabit bir eksenel kuvvet taşıdığı ve bu kuvvet altında kısalma yapabildiği kabul edilmektedir.

3. Boşlukların Eksenel Kuvvet-Kısalma Bağıntısına Etkitilmesi

Farklı gereksinimler nedeniyle dolgu duvar düzleminde açılan boşluklar, dolgu duvarın ve dolayısıyla çerçevenin

dayanım ve rijitliğini azaltarak bu tip çerçevelerin deprem davranışını etkilemektedir. Ayrıca açılan boşluğun konumu ve oranı, boşluklu dolgu duvarın dayanım ve rijitlik özelliklerini farklı oranda değiştirerek davranış üzerinde etkili olmaktadır. Bu nedenle, açılan boşluğa bağlı olarak dayanım ve rijitlikte meydana gelen azalma hesaplanırken boşluğun konumu ve oranı (boşluk alanı/dolgu duvar alanı) ayrıca dikkate alınmalıdır.

Çalışma kapsamında, boşluksuz dolgu duvarlar için hesaplanan dayanım ve rijitlik değerleri, rijitlik azaltma faktörü adı verilen ve 0 ile 1 arasında değişen bir katsayı ile azaltılarak farklı boşluk konumları ve oranları için boşluklu dolgu duvarlara ait eksenel kuvvet-kısalma bağıntıları oluşturulmuştur. Rijitlik azaltma faktörünün 0'a eşit olması dolgu duvar bulunmaması durumunu, 1'e eşit olması ise dolgu duvarda boşluk bulunmaması durumunu göstermektedir. Dolgu duvar düzleminde açılan kısmi boşlukların çeşitli durumları için rijitlik azaltma faktörünün boşluk oranına göre değişimini elde etmek, boşluk oranı ve konumunun dolgu duvarlı çerçevenin rijitliğini nasıl etkileyeceğini öğrenebilmek için önemlidir.

Rijitlik faktörlerinin elde edilmesinde dolgu duvarlar uygun sonlu elemanlar boyutları kullanılarak iki boyutlu kabuk elemanlar olarak analitik modele dahil edilmiştir. Dolgu duvar-çerçeve etkileşimi, dolgu duvar ile çerçeve elemanları arasında sadece eksenel basınç kuvveti aktaran boşluk (gap) elemanları kullanılarak modellenmiştir. Boşluk elemanının rijitliği (k_g) Denklem (15) aracılığıyla hesaplanmıştır.

$$k_g = \frac{E_m \cdot a_w \cdot t_w}{r_w} \quad (15)$$

Kullanılan modelleme tekniğine ait detay Şekil 4'de gösterilmiştir.

Boş çerçevenin (k_{bt}), boşluksuz dolgu duvarlı çerçevenin (k_d) ve kısmi boşluklu çerçevenin (k_{kbt}) yatay rijitlikleri belirlenmiştir. Tam dolu ve kısmi boşluklu çerçevenin rijitliklerinden boş çerçevenin rijitliği çıkarılarak; boşluksuz dolgu duvarın rijitliği (k_d) ve kısmi boşluklu dolgu duvarın rijitliği (k_{kbt}) hesaplanmıştır. Rijitlik azaltma faktörü (k) ise kısmi boşluklu dolgu duvarın rijitliği, boşluksuz dolu dolgu duvarın rijitliğine bölünerek elde edilmiştir (Ozturkoglu vd. 2017).

$$k = \frac{k_{kbt}}{k_d} \quad (16)$$

Rijitlik azaltma faktörünün boşluk oranına göre değişimini elde edebilmek için, boşluğun konumu ve şekli değiştirilmemek koşuluyla farklı boşluk oranları için

yukarıdaki işlemler tekrarlanmış ve sonuçlar yatay ekseninde boşluk oranı, düşey ekseninde ise rijitlik azaltma faktörü yer alan grafikler oluşturulmuştur. Herhangi bir boşluk konumu ve oranı için bu grafiklere giriş yapılarak rijitlik azaltma faktörü kolaylıkla elde edilebilir.

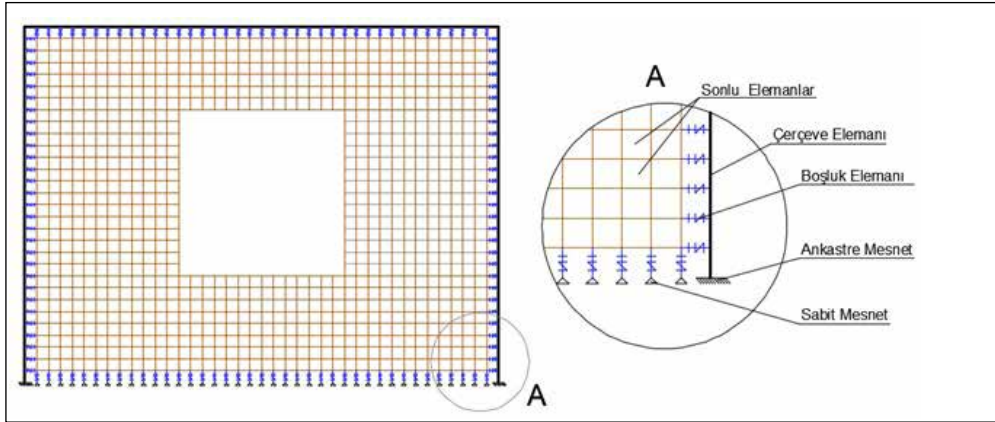
Boşluğun konumuna ve oranına bağlı olarak dolgu duvarda meydana gelen dayanım ve rijitlik azalmasını temsil eden rijitlik azaltma faktörleri kullanılarak, boşluksuz dolgu duvarlar için oluşturulan farklı aksel kuvvet-kısalma ilişkileri modifiye edilmiş ve doğrusal olmayan analizlerde bu şekliyle dikkate alınmıştır.

4. Sayısal Uygulamalar

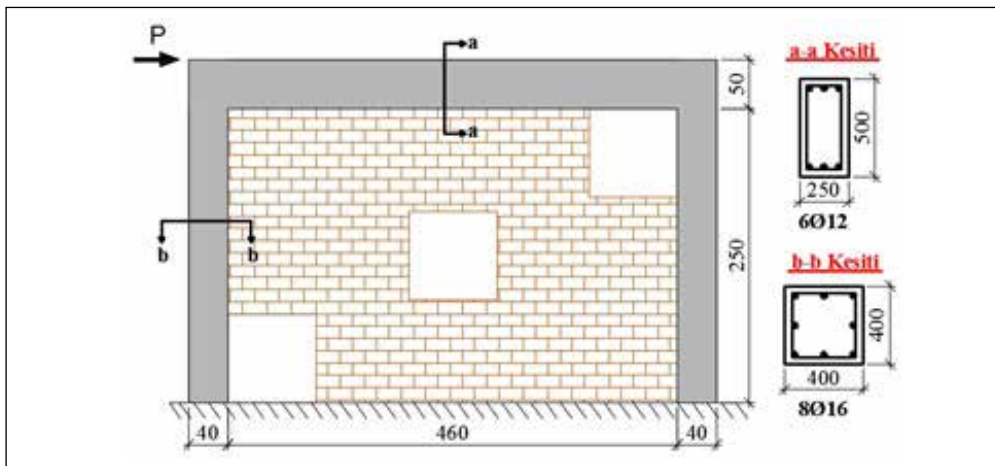
Köşegen eşdeğer basınç çubuğuna ait farklı aksel kuvvet-kısalma ilişkilerinin doğrusal olmayan davranış üzerindeki etkisini ve buna bağlı değişimleri kolaylıkla izleyebilmek için artımsal itme analizleri düzleminde farklı konum ve oranlarda boşluk bulunan dolgu duvarlı tek katlı ve tek açıklıklı bir betonarme çerçeve için gerçekleştirilmiştir. Ele alınan çerçevenin bir doğrultuda tek açıklığı, diğer doğrultuda

ise üç açıklığı bulunan bir yapı modelinin kenar aksından çıkartıldığı kabul edilmiştir. Açıklığı 5 m ve kat yüksekliği ise 3 m olan bu çerçevenin kirişi üzerindeki düzgün yayılı ölü yük $g = 18.5$ kN/m, hareketli yük ise $q = 5$ kN/m olarak alınmıştır. Çerçeveye dik doğrultudaki kirişlerden çerçeve kolonlarına aktarılan tekil ölü yük $G = 70$ kN ve hareketli yük $Q = 12.5$ kN olarak dikkate alınmıştır. Beton sınıfı C20, donatı sınıfı ise S420 olarak öngörülen çerçevenin birinci derece deprem bölgesinde ve Z3 zemin türü üzerinde yer aldığı kabul edilmiştir. Süneklik düzeyi yüksek öngörülen çerçeve Türk Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) ve TS 500 (2000) koşulları dikkate alınarak SAP 2000 bilgisayar ortamında modellenmiş ve boyutlandırılmıştır. Çerçeveye ait geometrik özellikler, kesit boyutları ve boyuna donatılar Şekil 5'de gösterilmiştir.

Çerçeve düzleminde kalınlığı $t_w = 20$ cm olan dolgu duvar dikkate alınmıştır. Dolgu duvarın basınç dayanımı $f'_b = 10$ MPa olan düşey delikli tuğlaların basınç dayanımı $f'_j = 15.2$ MPa olan bağlayıcı harç ile bir araya getirilerek oluşturulduğu varsayılmıştır. Dolgu duvarın elastisite modülü hesaplanan



Şekil 4. Dolgu duvarları sonlu elemanlar tekniğiyle modellenmesi.



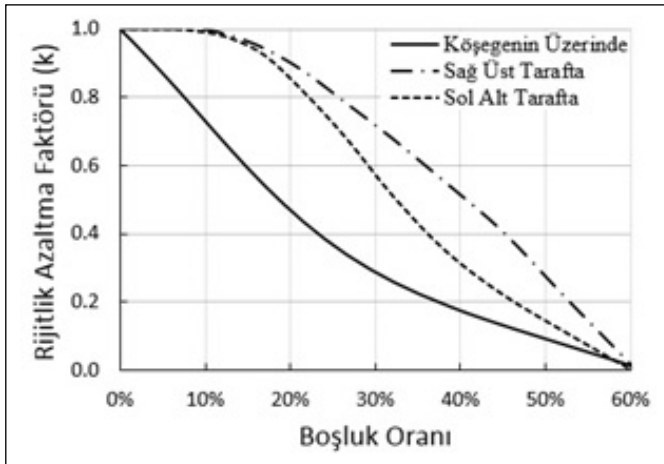
Şekil 5. Analizlerde kullanılan dolgu duvarlı çerçeve ve kesit özellikleri.

basınç dayanımına (Kaushik vd., 2007) bağlı olarak $E_m = 1661$ MPa olarak belirlenmiştir (FEMA 356 (2000)). Dolgu duvar düzleminde dolgu duvar köşegeninin üzerinde, köşegenin sağ üst tarafında ve köşegenin sol alt tarafında olmak üzere üç farklı boşluk konumu kabul edilmiştir (Şekil 5). Bu boşluk konumlarının her biri için dolgu duvarda %22, %32 ve %45 boşluk oranı dikkate alınmıştır. Boşluk oranı, dolgu duvarda açılan boşluk alanının dolgu duvarın toplam alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır.

4.1. Rijitlik Azaltma Faktörleri

Rijitlik azaltma faktörü, dolgu duvar düzleminde açılan boşluğun büyüklüğüne, konumuna ve şekline; dolgu duvarın elastisite modülüne ve kalınlığına göre değişim göstermektedir. Köşegen eşdeğer basınç çubuğunun kalınlığı ve elastisite modülü, dolgu duvarın kalınlığı ve elastisite modülüyle aynı olduğundan, kısmi boşluklardan dolayı dolgu duvarda meydana gelen rijitlik kaybını hesap modelinde dikkate almak için çubuğun genişliğinin (a_w) rijitlik azaltma faktörü ile çarpılarak azaltılması gerekmektedir.

Rijitlik azaltma faktörünün hesabı için dolgu duvarların sonlu elemanlar yaklaşımıyla modellenmesinde SAP2000 (2013) yazılımı kullanılmıştır. Oluşturulan analitik modelde kullanılan kabuk elemanların kalınlığı ve elastisite modülü,



Şekil 6. Farklı boşluk konumları için rijitlik azaltma faktörü grafiği.

Çizelge 1. Rijitlik azaltma faktörleri

Boşluk Oranı (%)	Boşluk Konumu		
	Köşegenin Üzerinde	Köşegenin Sağ Üst Tarafında	Köşegenin Sol Alt Tarafında
22	0.43	0.88	0.82
32	0.26	0.68	0.52
45	0.13	0.41	0.22

dolgu duvarların kalınlığı ve elastisite modüllerine eşit alınırken; sonlu eleman boyutlarının 10x10 cm boyutlarında seçilmesi, mühendislik yaklaşımı açısından yeterli hassaslıkta olacağı düşünülmüştür. Dolgu duvar ile çerçeve arasında tanımlanan boşluk elemanının eksenel rijitliği Denklem (16) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Kolon ve kiriş elemanlar ise çubuk eleman olarak modellenmiştir.

Boş çerçeve, tam dolgulu çerçeve ve boşluklu dolgu duvarlı çerçeve kat seviyesinden yatay doğrultuda yüklenerek yatay yerdeğiştirmeler elde edilmiş ve uygulanan kuvvet yerdeğiştirmeye oranlanarak çerçevelerin yatay rijitlikleri hesaplanmıştır. Farklı boşluk konumları ve oranları için analizler tekrarlanarak boşluklu dolgu duvarın boşluksuz dolgu duvarın rijitliğine oranı olarak hesaplanan rijitlik azaltma faktörleri elde edilmiştir. Şekil 6'da bu çalışmada kapsamında kullanılan dolgu duvar özellikleri ve boşluk konumları için rijitlik azaltma faktörünün boşluk oranına bağlı değişimi gösterilmiştir. Bu grafik kullanılarak istenilen boşluk oranı ve konumuna ait rijitlik azaltma faktörü kolaylıkla belirlenebilir. Çalışmada kullanılan boşluk oranları ve konumları için belirlenen rijitlik azaltma faktörleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Boşluk konumundan bağımsız olarak boşluk oranının artmasıyla rijitlik azaltma faktörleri küçülmektedir. Bu durum dolgu duvar düzleminde açılan boşluğun büyümesine bağlı olarak dolgu duvarın rijitliğinin azalması anlamına gelmektedir. Bununla birlikte boşluğun konumu, rijitlik azaltma faktörlerinin boşluk oranına bağlı değişimi üzerinde oldukça etkilidir. Rijitlik azalması boşluğun dolgu duvarın köşegeni üzerinde yer alması durumunda en fazladır. Köşegen üzerinde açılan boşluklar, yatay yüklü çerçevede yük aktarımının çok önemli bir kısmının gerçekleştiği bu hat üzerinde eşdeğer basınç çubuğu oluşumunu oldukça güçleştirmektedir. Bu nedenle görece küçük boşluk oranları (%22) için bile rijitlikte önemli bir azalma meydana gelmektedir. Dolgu duvar köşegenin sağ üst tarafında açılan boşlukların rijitlik üzerindeki azaltıcı etkisi çalışmada ele alınan diğer boşluk konumlarına göre daha azdır. Küçük boşluk oranları için boşluk konumunun köşegenin sağ üst tarafında veya sol alt tarafında yer alması rijitlik üzerinde aynı azaltıcı etkiye

sahiptir. %10-%15 gibi boşluk oranları için bu konumlardaki boşluklar dikkate alınmayabilir. Boşluk oranının artmasıyla birlikte köşegenin sol alt tarafında yer alan boşluk, yükün uygulandığı sol üst köşeye doğru köşegeni keserek dolgu

duvarın rijirliği üzerinde çok etkili olmaya başlamaktadır. Örneğin, boşluğun köşegenin sol alt tarafında yer alması durumu için boşluk oranının %32'den %45'e çıkması rijitlik azaltma faktörünü 2.36 kat kadar küçülmektedir. Tüm boş-

Çizelge 2. Farklı modellerin eksenel kuvvet-kısalma ilişkileri.

	N-Δ	Panagiotakos ve Fardis						Dolsek ve Fajfar						Tsai ve Huang					
		Boşluk Oranı (%)	Kuvvet (kN)		Kısalma (cm)		Rijitlik (kN/cm)		Kuvvet (kN)		Kısalma (cm)		Rijitlik (kN/cm)		Kuvvet (kN)		Kısalma (cm)		Rijitlik (kN/cm)
Tam Dolgulu	0	N_y	377	Δ_y	0.119	K_1	3167	N_y	245	Δ_y	0.077	K_1	3167	N_y	294	Δ_y	0.728	K_1	404
		N_m	490	Δ_m	0.399	K_2	404	N_m	408	Δ_m	0.439	K_2	450	N_m	385	Δ_m	1.854	K_2	81
		N_r	38	Δ_r	1.827	K_3	317	N_r	-	Δ_r	2.196	K_3	232	N_r	88	Δ_r	-	K_3	-
Boşluk Köşegenin Üzerinde	22	N_y	164	Δ_y	0.119	K_1	1378	N_y	106	Δ_y	0.077	K_1	1378	N_y	128	Δ_y	0.728	K_1	176
		N_m	213	Δ_m	0.399	K_2	175	N_m	177	Δ_m	0.329	K_2	282	N_m	168	Δ_m	1.854	K_2	36
		N_r	16	Δ_r	1.827	K_3	138	N_r	-	Δ_r	1.647	K_3	134	N_r	38	Δ_r	-	K_3	-
	32	N_y	97	Δ_y	0.119	K_1	815	N_y	63	Δ_y	0.077	K_1	815	N_y	76	Δ_y	0.728	K_1	104
		N_m	126	Δ_m	0.399	K_2	104	N_m	105	Δ_m	0.329	K_2	167	N_m	99	Δ_m	1.854	K_2	20
		N_r	10	Δ_r	1.827	K_3	81	N_r	-	Δ_r	1.647	K_3	80	N_r	23	Δ_r	-	K_3	-
	45	N_y	49	Δ_y	0.119	K_1	412	N_y	32	Δ_y	0.077	K_1	412	N_y	38	Δ_y	0.728	K_1	52
		N_m	64	Δ_m	0.399	K_2	54	N_m	53	Δ_m	0.329	K_2	83	N_m	50	Δ_m	1.854	K_2	11
		N_r	5	Δ_r	1.827	K_3	41	N_r	-	Δ_r	1.647	K_3	40	N_r	12	Δ_r	-	K_3	-
Boşluk Köşegenin Sağ Üst Tarafında	22	N_y	330	Δ_y	0.119	K_1	2773	N_y	214	Δ_y	0.077	K_1	2773	N_y	258	Δ_y	0.728	K_1	354
		N_m	429	Δ_m	0.399	K_2	354	N_m	357	Δ_m	0.329	K_2	567	N_m	337	Δ_m	1.854	K_2	70
		N_r	33	Δ_r	1.827	K_3	277	N_r	-	Δ_r	1.647	K_3	271	N_r	77	Δ_r	-	K_3	-
	32	N_y	254	Δ_y	0.119	K_1	2134	N_y	165	Δ_y	0.077	K_1	2134	N_y	199	Δ_y	0.728	K_1	273
		N_m	331	Δ_m	0.399	K_2	275	N_m	275	Δ_m	0.329	K_2	437	N_m	260	Δ_m	1.854	K_2	54
		N_r	25	Δ_r	1.827	K_3	214	N_r	-	Δ_r	1.647	K_3	209	N_r	60	Δ_r	-	K_3	-
	45	N_y	153	Δ_y	0.119	K_1	1286	N_y	99	Δ_y	0.077	K_1	1286	N_y	119	Δ_y	0.728	K_1	163
		N_m	198	Δ_m	0.399	K_2	161	N_m	165	Δ_m	0.329	K_2	262	N_m	156	Δ_m	1.854	K_2	33
		N_r	15	Δ_r	1.827	K_3	128	N_r	-	Δ_r	1.647	K_3	125	N_r	36	Δ_r	-	K_3	-
Boşluk Köşegenin Sol Alt Tarafında	22	N_y	308	Δ_y	0.119	K_1	2588	N_y	200	Δ_y	0.077	K_1	2588	N_y	240	Δ_y	0.728	K_1	330
		N_m	400	Δ_m	0.399	K_2	329	N_m	333	Δ_m	0.329	K_2	528	N_m	314	Δ_m	1.854	K_2	66
		N_r	31	Δ_r	1.827	K_3	258	N_r	-	Δ_r	1.647	K_3	253	N_r	72	Δ_r	-	K_3	-
	32	N_y	196	Δ_y	0.119	K_1	1647	N_y	127	Δ_y	0.077	K_1	1647	N_y	153	Δ_y	0.728	K_1	210
		N_m	255	Δ_m	0.399	K_2	211	N_m	212	Δ_m	0.329	K_2	337	N_m	201	Δ_m	1.854	K_2	43
		N_r	20	Δ_r	1.827	K_3	165	N_r	-	Δ_r	1.647	K_3	161	N_r	46	Δ_r	-	K_3	-
	45	N_y	83	Δ_y	0.119	K_1	697	N_y	54	Δ_y	0.077	K_1	697	N_y	65	Δ_y	0.728	K_1	89
		N_m	108	Δ_m	0.399	K_2	89	N_m	90	Δ_m	0.329	K_2	143	N_m	85	Δ_m	1.854	K_2	18
		N_r	8	Δ_r	1.827	K_3	70	N_r	-	Δ_r	1.647	K_3	69	N_r	19	Δ_r	-	K_3	-

luk konumları için, boşluk oranının %60 civarında olması halinde rijitlik azaltma faktörleri çok küçülmektedir. Bu durumda boşluklu dolgu duvarın betonarme çerçevenin yatay rijitliğine olan katkısı ihmal edilebilir.

4.2. Farklı Modeller İçin Oluşturulan Eksenel Kuvvet–Kısalma Bağıntıları

Boşluksuz dolgu duvarlar için oluşturulan kuvvet–yerdeğiştirme ilişkilerine ait dayanım ve rijitlik değerleri, dolgu duvar düzleminde farklı konum ve boyutlarda açılan boşluklar için bir önceki bölümde elde edilen rijitlik azaltma faktörleri kullanılarak azaltılmıştır. Bu şekilde sadece boşluk oranının değil, aynı zamanda boşluğun konumunun da kuvvet–yerdeğiştirme ilişkilerine etkisi dikkate alınmış olmaktadır.

Köşegen eşdeğer basınç çubuğunun doğrusal olmayan davranışını tanımlayan kuvvet–yerdeğiştirme ilişkilerinin belirlenmesinde $L_m = 460$ cm ve $H_m = 250$ cm olmak üzere dolgu duvarın köşegen uzunluğu $r_w = 523.5$ cm olarak dikkate alınmıştır. Dolgu duvarda boşluk bulunmaması durumu için köşegen eşdeğer basınç çubuğunun genişliği FEMA 356'ya göre $a_w = 63.7$ cm olarak hesaplanmıştır. Dolgu duvarın basınç dayanımı tuğla malzemenin ve harcın basınç dayanımına bağlı olarak $f'_m = 4.65$ MPa ve yatay doğrultuda beklenen basınç dayanımı ise $f'_{m90} = 3.02$ MPa olarak belirlenmiştir. Dolgu duvarın kayma modülü $G_w = 664.4$ MPa olarak hesaplanmış ve çatlama dayanımı ise $f_{tp} = 0.36$ MPa olarak dikkate alınmıştır (Uva vd. 2012a, 2012b).

Panagiotakos ve Fardis (1994) ve Dolsek ve Fajfar (2008) tarafından önerilen kuvvet–yerdeğiştirme ilişkilerinde yatay doğrultu esas alınarak belirlenen rijitlik ve dayanım değerleri, dolgu duvarın köşegeni ile yatay doğrultu arasındaki açı esas alınarak köşegen doğrultusunda hesaplanan değerlere dönüştürülmüştür. Bu şekilde doğrudan köşegen eşdeğer basınç çubuğuna ait eksenel kuvvet–kısalma ($N-\Delta$) bağıntıları oluşturulmuştur. Bu bağıntılarının karakteristik noktalarına ait eksenel basınç kuvveti ve kısalma değerleri ile köşegen doğrultusunda hesaplanan rijitlikler, çalışmada ele alınan üç model için farklı boşluk konumları ve oranları gözetilerek Çizelge 2'de verilmektedir.

Çalışma kapsamında ele alınan tüm eksenel kuvvet–kısalma bağıntılarının eksenel rijitlik ve kuvvet değerleri boşluk oranının artmasıyla azalmaktadır. Aynı boşluk oranları için Panagiotakos ve Fardis (1994) ve Dolsek ve Fajfar (2008) tarafından önerilen modellerin K_1 başlangıç rijitlikleri birbirine eşittir. Tsai ve Huang (2011) tarafından köşegen eşdeğer basınç çubuğunun eksenel rijitliği olarak

hesaplanan başlangıç rijitliği diğer modellerdekine göre oldukça düşüktür (yaklaşık onda biri). Bu durumda doğal olarak dolgu duvarın çatlama dayanımına karşılık gelen kısalma Tsai ve Huang'ın modelinde en büyük olmaktadır. En yüksek çatlama dayanımı Panagiotakos ve Fardis'in modelinden elde edilirken, en düşük çatlama dayanımı Dolsek ve Fajfar'ın modelinde hesaplanmıştır. Köşegen eşdeğer basınç çubuğunun basınç dayanımına ait en büyük değerler Panagiotakos ve Fardis tarafından önerilen kuvvet–yerdeğiştirme ilişkisinden hesaplanmıştır. Dolsek ve Fajfar ile Tsai ve Huang'ın kuvvet–yerdeğiştirme ilişkilerine ait dayanım değerleri ise daha düşük olup birbirine çok yakın elde edilmiştir. Dayanıma karşılık gelen kısaltmalar Panagiotakos ve Fardis ile Dolsek ve Fajfar'ın modelleri için birbirine çok yakın hesaplanmıştır. En büyük K_2 rijitlikleri Dolsek ve Fajfar'ın modeli için hesaplanmıştır. Bununla birlikte diğer iki modelin K_2 rijitlikleri birbirine çok yakındır. Tüm modellerde yerdeğiştirme değerleri boşluk oranından ve konumundan bağımsızdır. Bununla birlikte dolgu duvar düzleminde boşluk bulunmaması sadece Dolsek ve Fajfar'ın kuvvet–yerdeğiştirme bağıntısında dayanıma karşılık gelen yerdeğiştirmeyi etkilemekte ve boşluk bulunması durumuna göre daha büyük kısalma değeri elde edilmektedir. Tsai ve Huang'ın modeli için hesaplanan artık eksenel kuvvet Panagiotakos ve Fardis'in modelinden hesaplanan değerden %33-%40 daha fazladır. En yüksek dayanım ve rijitlik değerleri boşluğun köşegenin sağ üst tarafında yer alması durumu için hesaplanmıştır. En düşük dayanım ve rijitlikler ise beklendiği gibi boşluğun köşegen üzerinde yer alması hali için elde edilmiştir.

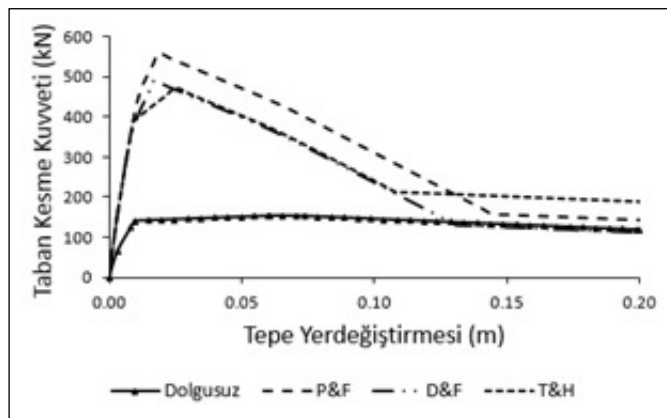
4.3. Çerçvelerin Artımsal İtme Analizi

Artımsal itme analizi, yapıların doğrusal olmayan deprem tepkisinin dinamik analize göre daha kolay bir şekilde anlaşılmasına olanak sağlayan oldukça etkili ve görece kolay bir analiz yöntemidir. Çalışma kapsamında kullanılan çerçvelerin doğrusal olmayan modeli SAP 2000 ortamında oluşturulmuştur. Malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışın idealleştirilmesinde mühendislik uygulamalarında büyük bir kolaylık sağlayan yığılı plastik davranış modeli esas alınmış ve eleman uçlarında tanımlanan plastik kesitler haricindeki bölgelerin doğrusal elastik davrandığı kabul edilmiştir. Plastik şekil değiştirme bölgesinin boyu, çalışılan doğrultudaki kesit boyunun yarısı olarak alınmıştır. Plastik kesitlere ait iç kuvvet–plastik şekil değiştirme bağıntıları pekleşme etkisi (plastik dönme artışına bağlı olarak plastik eğilme momentinin artışı) de dikkate alınarak FEMA 356'ya uygun olarak belirlenmiştir. Eksenel yük düzeyi

oldukça olan çerçeve kolonlarının ve kirişin elemanların çatlamış kesitine ait etkin eğilme rijitliği, çatlamamış kesitin eğilme rijitliğinin %40'ı olarak hesaplanmıştır.

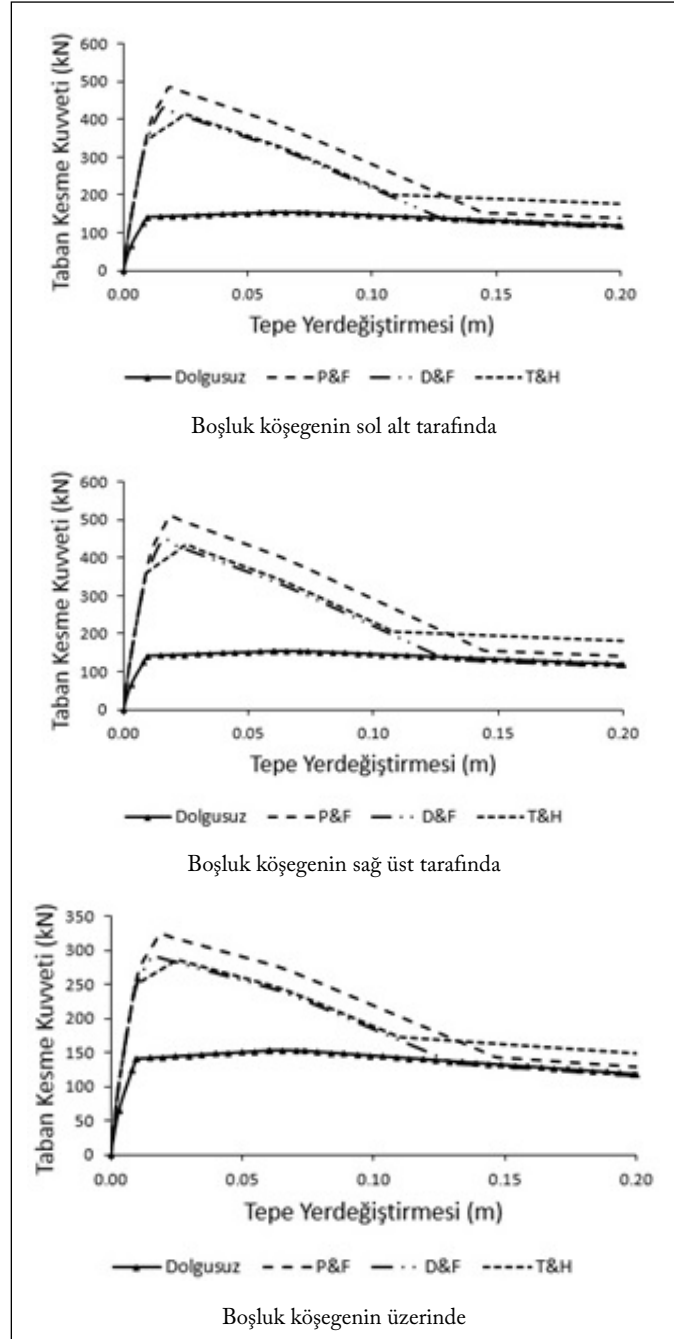
Dolgu duvarlar analitik modeli iki ucu mafsalı köşegen eşdeğer basınç çubuğu olarak dahil edilmiştir. Eşdeğer basınç çubuğunun genişliği çalışma kapsamında geliştirilen rijitlik azaltma faktörleri kullanılarak her boşluk konumu ve oranı için ayrı ayrı belirlenmiştir. Köşegen eşdeğer basınç çubuğunun malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışı ise Çizelge 2'de verilen aksel kuvvet-kısalma ilişkileri kullanılarak tanımlanmıştır.

Böylece 3 farklı boşluk oranı, 3 farklı boşluk konumu ve 3 farklı aksel kuvvet-kısalma bağıntısı için 27 adet doğrusal olmayan model oluşturulmuştur. Dolgu duvar düzleminde açılan boşlukların doğrusal olmayan davranış üzerindeki etkilerini kıyaslayabilmek için düzleminde boşluk bulunmayan dolgu duvarlar ele alınan bünye bağıntıları kullanılarak modellenmiş ve ayrıca çerçeve dolgu duvarsız olarak da dikkate alınmıştır. Bu şekilde toplamda 31 adet artımsal itme analizi gerçekleştirilmiştir. Koordinatları tepe yerdeğiştirme-taban kesme kuvveti olan itme eğrileri boşluksuz dolgu duvarlı çerçeveler için Şekil 7'de, boşluk oranı %22, %32 ve %45 olarak dikkate alınan çerçeveler için ise sırasıyla Şekil 8-10'da gösterilmiştir. Bu şekillerde dikkate alınan boşluk konumuna göre de bir gruplandırma yapılmıştır. Dolgu duvarın ve dolgu duvar düzleminde açılan boşlukların davranışı nasıl değiştirdiğini daha kolay izleyebilmek için boş çerçeveye ait itme eğrisi diğer eğrilerle birlikte tüm şekillerde gösterilmiştir. Şekiller üzerinde Panagiotakos ve Fardis'in kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri kullanılarak elde edilen itme eğrileri P&F, Dolsek ve Fajfar'ın modeli kullanılarak elde edilen itme eğrileri D&F ve Tsai ve Huang'a ait modelin esas alındığı itme eğrileri T&S kısaltmaları ile gösterilmiştir.



Şekil 7. Boş çerçevenin ve tam dolu çerçevelerin itme eğrileri.

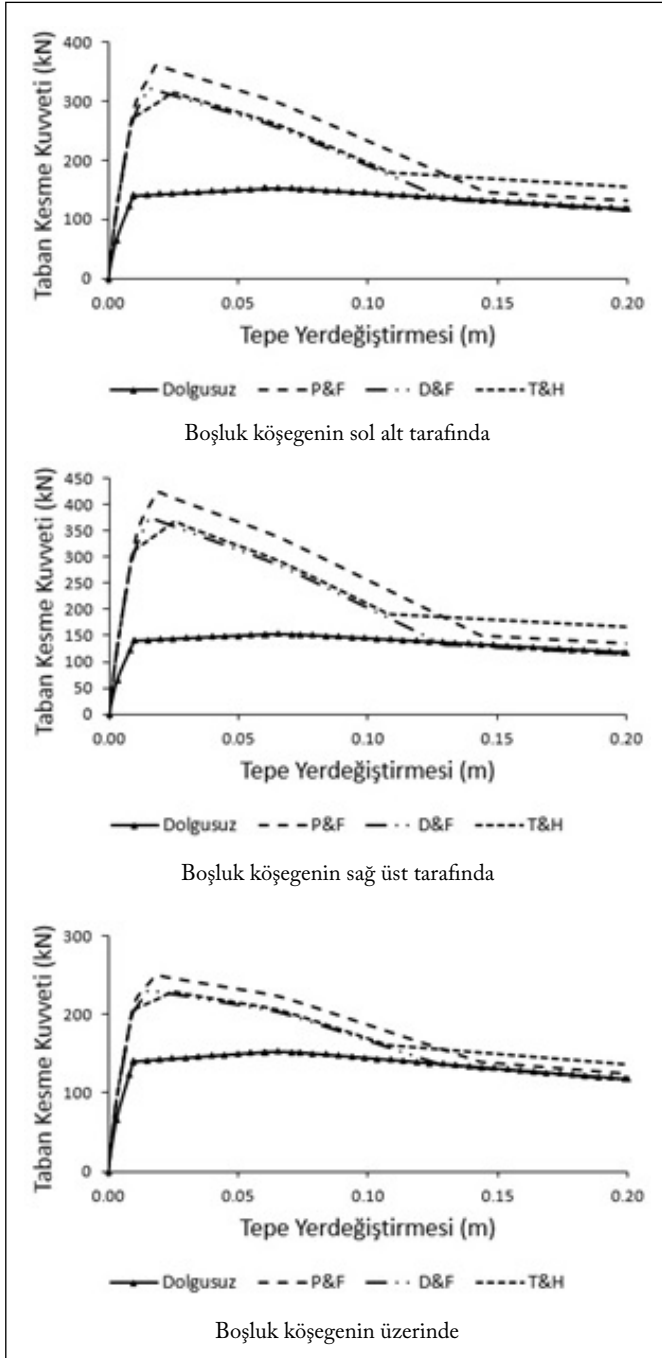
Beklendiği gibi dolgu duvarlı çerçevelerin başlangıç rijitliği dolgusuz çerçeveye oranla daha büyüktür. Bununla birlikte boşluk oranının artmasıyla birlikte bu rijitlik değeri de küçülmektedir. Farklı aksel kuvvet-kısalma bağıntıları için elde edilen itme eğrilerinin aynı boşluk oranı ve konumu için başlangıç rijitlikleri oldukça yakındır. Köşegen eşdeğer basınç çubuğunun bünye bağıntısında artık kuvvete ve sıfır kuvvete karşılık gelen kısalmayı yapması durumunda davranış boş çerçeve davranışına yaklaşmakta; artık kuvvetin



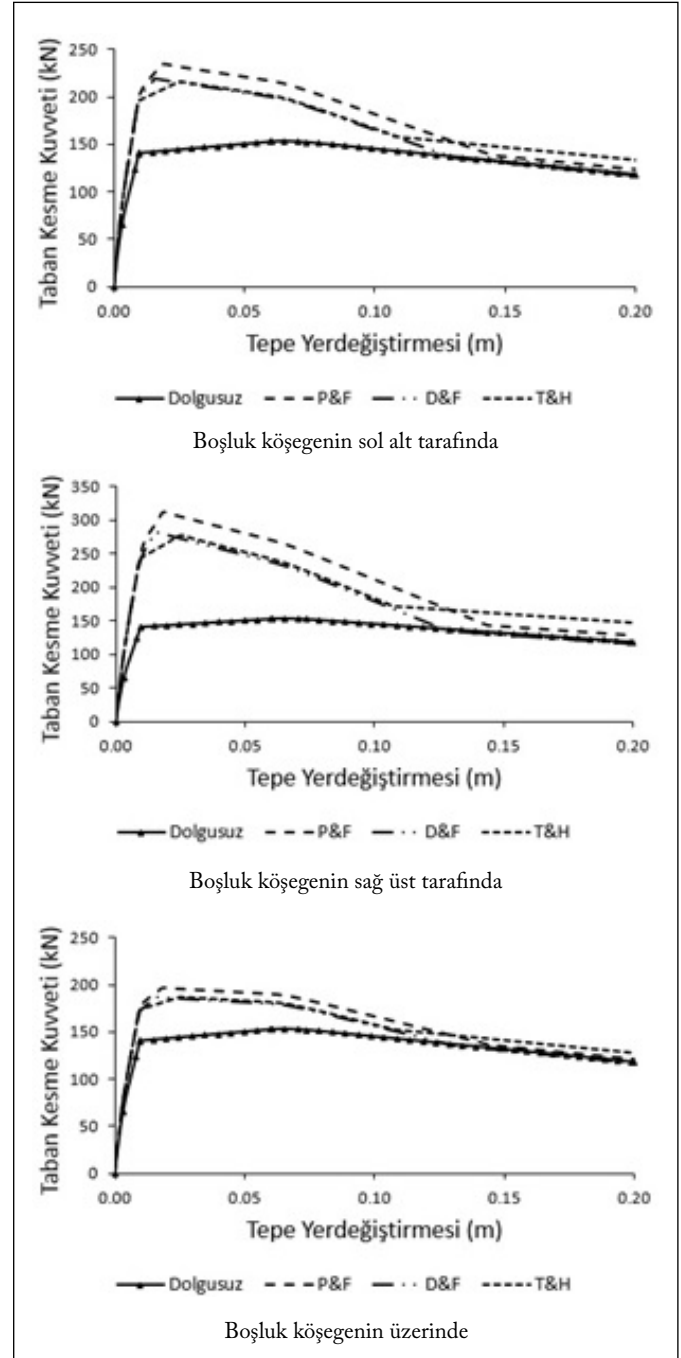
Şekil 8. %22 boşluk oranı için farklı modellere ait itme eğrileri.

tanımlanmadığı Dolsek ve Fajfar'ın modelinin kullanıldığı durumlarda ise tamamen aynı olmaktadır. Dolsek ve Fajfar ve Tsai ve Huang'ın kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinin esas alındığı artımsal itme eğrileri birbirine çok yakın bulunmuştur. Panagiotakos ve Fardis'in modelinin kullanıldığı itme eğrilerinde ise dolgu duvar devre dışı kalıncaya kadar daha yüksek dayanım değerleri elde edilmektedir. Farklı eksenel kuvvet-kısalma bağıntıları kullanılarak elde edilen itme

eğrinin başlangıç rijitlikleri, karakteristik noktalarındaki dayanımı ve yerdeğiştirme değerleri boşluk konumuna ve oranına göre değişse de, köşegen eşdeğer basınç çubuğu farklı bünye bağıntılarıyla modellenen çerçevelerin kendi içinde davranışları hep aynıdır. Başka bir değişle, Panagiotakos ve Fardis'in modelinin dikkate alınması durumunda itme eğrisi hep en üstte iken, diğer iki model için hep birbirine çok yakın elde edilmiştir.



Şekil 9. %32 boşluk oranı için farklı modellere ait itme eğrileri.



Şekil 10. %45 boşluk oranı için farklı modellere ait itme eğrileri.

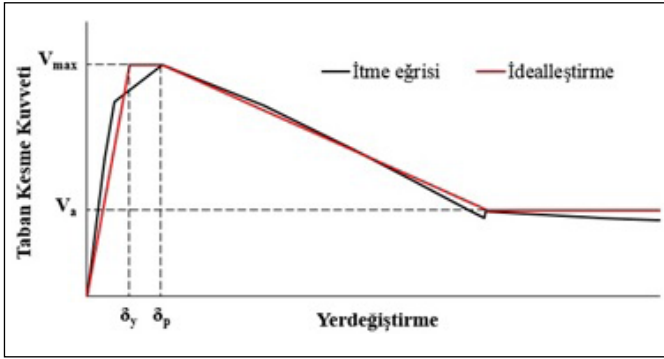
4.4. Dolgu Duvarlı Çerçevelerin İtme Eğrilerinin İdealleştirilmesi

Dolgu duvarlı çerçevelerin itme eğrileri boş çerçevenin alışlagelen itme eğrisinde oldukça farklıdır. Bu nedenle, genellikle iki doğru parçası ile idealleştirilen dolgu duvarsız

çerçevelerin itme eğrilerinden farklı olarak, dolgu duvarlı çerçeveler için oluşturulan itme eğrileri dört doğru parçası kullanılarak idealleştirilmiştir (Şekil 11). İlk doğru parçası doğrusal elastik davranış ile birlikte çerçeve elemanları ve dolgu duvarda çatlak oluşumu durumunu temsil etmektedir.

Çizelge 3. Farklı $N-\Delta$ modelleri için idealleştirilmiş itme eğrilerine ait parametreler.

N-Δ Modeli	Boşluk		V_{max} (kN)	V_a (kN)	r_u	δ_y (cm)	δ_p (cm)	δ_u (cm)	μ_s	μ	
	Konumu	Oranı (%)									
Panagiotakos ve Fardis		0	560.2	157.7	0.28	1.38	1.86	6.56	1.35	4.75	
	Köşegenin Üzerinde	22	324.4	143.1	0.44	1.22	1.87	6.46	1.53	5.30	
		32	250.0	139.6	0.56	1.15	1.83	6.50	1.59	5.65	
		45	196.7	136.0	0.69	1.00	1.85	6.56	1.85	6.56	
	Köşegenin Sağ Üst Tarafında	22	508.2	154.8	0.30	1.25	1.85	6.38	1.48	5.10	
		32	424.1	149.7	0.35	1.18	1.84	6.56	1.56	5.56	
		45	312.1	143.2	0.46	1.14	1.84	6.47	1.61	5.68	
	Köşegenin Sol Alt Tarafında	22	483.9	152.6	0.32	1.22	1.86	6.56	1.52	5.38	
		32	359.8	145.6	0.40	1.19	1.86	6.44	1.56	5.41	
		45	234.5	138.1	0.59	1.10	1.86	6.51	1.69	5.92	
	Dolsek ve Fajfar		0	490.9	129.8	0.26	1.20	1.69	6.56	1.41	5.47
		Köşegenin Üzerinde	22	292.8	133.9	0.46	1.12	1.57	6.49	1.40	5.79
32			231.5	135.6	0.59	1.00	1.55	6.56	1.55	6.56	
45			187.3	135.8	0.73	0.92	1.57	6.56	1.71	7.13	
Köşegenin Sağ Üst Tarafında		22	446.7	131.6	0.30	1.18	1.56	6.56	1.32	5.56	
		32	376.9	133.0	0.35	1.11	1.55	6.56	1.40	5.91	
		45	282.8	134.7	0.48	1.02	1.55	6.56	1.52	6.43	
Köşegenin Sol Alt Tarafında		22	426.8	131.8	0.31	1.12	1.56	7.06	1.39	6.30	
		32	322.7	133.6	0.41	1.04	1.56	7.06	1.50	6.79	
		45	218.6	135.2	0.62	0.91	1.57	6.52	1.73	7.18	
Tsai ve Huang			0	472.3	213.0	0.45	1.04	2.52	6.08	2.42	5.85
		Köşegenin Üzerinde	22	286.9	173.1	0.60	1.02	2.53	6.56	2.48	6.43
	32		228.9	161.1	0.70	1.00	2.51	6.52	2.51	6.52	
	45		186.4	151.9	0.81	1.00	2.51	6.56	2.51	6.56	
	Köşegenin Sağ Üst Tarafında	22	432.3	204.7	0.47	1.08	2.52	6.56	2.33	6.07	
		32	366.4	190.7	0.52	1.07	2.51	6.56	2.35	6.13	
		45	276.9	171.6	0.62	1.05	2.50	6.56	2.38	6.25	
	Köşegenin Sol Alt Tarafında	22	412.2	200.6	0.49	1.00	2.52	6.56	2.52	6.56	
		32	315.0	179.5	0.57	0.98	2.52	6.56	2.57	6.69	
		45	216.4	158.1	0.73	0.95	2.51	6.52	2.64	6.86	



Şekil 11. Dolgu duvarlı çerçevelerin itme eğrisinin idealleştirilmesi.

İkinci doğru parçası, çerçevede akmaya temsil eder ve dolgu duvarın gevrek yapısı nedeniyle süneklik kapasitesi oldukça düşük dolgu duvarlı çerçevelerde genellikle kısa bir bölge olarak ortaya çıkar. Üçüncü doğru parçası, dolgu duvarın göçmesiyle birlikte dayanımda meydana gelen ani düşüşü simgeler. Bu düşüşten sonra dolgu duvar daha fazla yatay yük taşıyamaz ve dolgu duvarlı çerçevenin taban kesme kuvveti–tepe yerdeğiştirme davranışı dolgusuz çerçeveninki ile özdeş olur. Bu durum da dördüncü doğru parçası ile idealleştirilmektedir.

Çalışma kapsamında farklı eksenel kuvvet–kısılma bağıntıları kullanılarak aynı boşluk oranı ve konumu için oluşturulan itme eğrileri dört doğru parçası ile idealleştirilerek dolgu duvarlı çerçevelerin yatay yük etkisindeki davranışı temsil eden bazı tipik parametreler için kıyaslama yapılmıştır. Bu göre; en büyük taban kesme kuvveti (V_{max}), dolgu duvarın göçmesine karşılık gelen taban kesme kuvveti (V_a) ve dolgu duvarın göçmesiyle dayanımda meydana gelen azalma ($r_u = V_a/V_{max}$) idealleştirilmiş itme eğrileri kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca çerçevenin akma yerdeğiştirmesi (δ_y), dayanıma karşılık gelen yatay yerdeğiştirme (δ_p) ve çerçevenin yatay yerdeğiştirme kapasitesi (δ_u) ile birlikte dayanım azalmasından önceki süneklik oranı ($\mu_s = \delta_p/\delta_y$) ve çerçevenin global süneklik ($\mu = \delta_u/\delta_y$) oranı hesaplanmıştır. δ_u yerdeğiştirmesi herhangi bir kolon alt ucunun plastik dönme kapasitesine eriştiği yatay yerdeğiştirme değeri olarak dikkate alınmıştır. Bu şekilde belirlenen dayanım, yatay yerdeğiştirme ve süneklik oranları ele alınan tüm durumlar için Çizelge 3’de verilmiştir.

Dikkate alınan tüm boşluk oranları ve konumları için en büyük V_{max} değerleri Panagiotakos ve Fardis’in kuvvet–yerdeğiştirme bağıntısının esas alındığı itme analizlerinden elde edilmiştir. Diğer iki bünye bağıntısının kullanılması durumunda ise hesaplanan V_{max} değerleri birbirine çok

yakındır. En düşük V_a değerleri, artık kuvveti sıfır kabul eden Dolsek ve Fajfar’ın modelinin kullanılması durumunda hesaplanmıştır. Bu durumdaki itme eğrisi, dolgu duvarın tamamen devre dışı kalması durumundan sonra boş çerçevenin itme eğrisine ile bire bir çakışmaktadır. Dolgu duvarın göçmesiyle dayanımda meydana en küçük azalmalar Tsai ve Huang’ın kuvvet–yerdeğiştirme bağıntısının esas alındığı durumlar için hesaplanmıştır. Diğer iki model için hesaplanan r_u değerleri ise tüm boşluk oranları ve konumları için birbirine çok yakındır. Çerçevenin akma yerdeğiştirmesi (δ_y) ve yatay yerdeğiştirme kapasitesi (δ_u) değerleri çalışma kapsamında esas tüm kuvvet–yerdeğiştirme bağıntıları için birbirine farklı değildir. Bununla birlikte dayanıma karşılık gelen yatay yerdeğiştirme (δ_p) değeri Tsai ve Huang’ın bünye bağıntısının esas alındığı analizlerde en büyük, Dolsek ve Fajfar’ın modelinin kullanıldığı itme analizlerinde ise en küçük olarak hesaplanmıştır. Bu durumda dayanım azalmasından önceki en büyük süneklik oranları da doğal olarak Tsai ve Huang’ın eksenel kuvvet–yerdeğiştirme bağıntısının esas alındığı analizlerden elde edilmiştir. Hesaplanan yerdeğiştirme süneklik oranları dikkate alınan kuvvet–yerdeğiştirme bağıntıları için birbirinden fazla farklı değildir.

5. Sonuçlar

Boşluksuz dolgu duvarların doğrusal olmayan davranışının modellenmesinde kullanılan üç farklı kuvvet–yerdeğiştirme ilişkileri, çalışma kapsamında geliştirilen rijitlik azaltma faktörleri yardımıyla modifiye edilerek düzleminde farklı konum ve oranda boşluk bulunan dolgu duvarların bünye bağıntıları oluşturulmuştur. Bu farklı bünye bağıntılarının uygulamada çok sık karşılaşılan boşluklu dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin doğrusal olmayan davranışına etkileri artımsal itme analizi yardımıyla araştırılmıştır.

Tipik olarak boşluksuz dolgu duvarların eşdeğer köşegen basınç çubuğu olarak modellenmesine olanak sağlayan kuvvet–yerdeğiştirme ilişkileri rijitlik azaltma faktörleri kullanılarak boşluklu dolgu duvarlara uyarlanmıştır. Köşegen eşdeğer basınç çubuğunun doğrusal olmayan davranışını genel olarak farklı dayanım, eksenel kısılma ve rijitlik değerleriyle temsil eden kuvvet–yerdeğiştirme modelleri dolgu duvar düzleminde açılan boşluğun konumundan ve oranından benzer şekilde etkilenmektedir. En düşük dayanım ve rijitlikler boşluğun köşegen üzerinde yer alması için elde edilirken, en yüksek dayanım ve rijitlik değerleri boşluğun köşegenin sağ üst tarafında yer alması durumu için hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan tüm kuvvet–yerdeğiştirme bağıntılarının düzleminde farklı konum ve oranlarda boşluk bulunan ve yatay doğrultuda yüklenmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde genel olarak dayanım, başlangıç rijitliği ve yerdeğiştirme sünekliği açısından beklenen davranışı ortaya çıkardığı söylenebilir. Ele alınan boşluk oranları ve konumları için farklı kuvvet–yerdeğiştirme ilişkileri kullanılarak oluşturulan itme eğrileri birbirine oldukça yakındır. Doğal olarak itme eğrilerinin idealleştirilmiş hallerine ait karakteristik parametreler de birbirinden fazla farklı değildir. Farklı kuvvet–yerdeğiştirme modeller için hesaplanan süneklik oranları birbirinden çok farklı değildir ve dahası tüm modeller için dolgu duvar boşluk oranının artmasıyla çerçevenin süneklik oranı büyüktür. Tüm kuvvet–yerdeğiştirme modelleri için en küçük süneklik oranı boşluğun dolgu duvar köşegenin sağ üst tarafında konumlanması durumu için elde edilmiştir. Bu durumda boşluk fazla etkili olmamakta ve dolgu duvarın gevrek yapısına bağlı olarak çerçevenin yatay doğrultudaki yerdeğiştirme sünekliği düşmektedir.

Mevcut yapıların deprem güvenliğini belirlenmesi ve değerlendirilmesi kapsamında gerçek yapılardaki dolgu duvarların doğrusal olmayan modelinin çalışma kapsamında ele alınan kuvvet–yerdeğiştirme ilişkileri ile temsil edilmesi durumunda gerek deprem talebi ve gerekse yapısal kapasite açısından çok farklı sonuçlar alınmayacağı söylenebilir. Bununla birlikte boşluk konumunun ve oranının kapasiteye etkisi çok fazladır. Benzer etkinin deprem talebi açısından da ortaya çıkması muhtemeldir. Bu nedenle literatürde bulunan ve genel olarak boşluksuz dolgu duvarların doğrusal olmayan modellenmesine olanak sağlayan farklı kuvvet–yerdeğiştirme ilişkilerinin boşluklu dolgu duvarlar için modifiye edilerek kullanılması önemlidir.

6. Kaynaklar

- Akpınar, U., Binici, B. 2013.** The effect of infill wall collapse on the deformation estimations of reinforced concrete frames. *J. Civ. Eng. Sci.*, 2(3): 171–177.
- Aksoy, HB., Avşar, Ö. 2015.** Dolgu duvarların betonarme çerçeve davranışına etkisinin basitleştirilmiş bir yöntemle dikkate alınması. *Pamukkale Üniv. Müh. Bilim. Derg.*, 21(3): 115–122.
- Allouzi, R., Irfanoglu, A., Haikal, G. 2014.** Non-linear finite element modeling of RC frame-masonry wall interaction under cyclic loadings. *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Anchorage, Alaska, 21–25 July.
- Asteris, PG. 2003.** Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames. *J. Struct. Eng.*, 129(8): 1071–1079.
- Asteris, PG., Chrysostomou, CZ., Giannopoulos, IP., Smyrou, E. 2011.** Masonry infilled reinforced concrete frames with openings. *III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Corfu, Greece, 25–28 May.
- Asteris, PG., Cotsovos, DM., Chrysostomou, CZ., Mohebkah, A., Al-Chaar, GK. 2013.** Mathematical micromodeling of infilled frames: State of the art. *Eng. Struct.*, 56: 1905–1921.
- Bertoldi, SH., Decanini, LD., Gavarini, C. 1993.** Telai tamponati soggetti ad azioni sismiche, un modello semplificato: confronto sperimentale e numerico. *Atti del 6° Convegno Nazionale L'ingegneria Sismica in Italia*, Perugia, Italy 13–15 Ottobre [Italianca].
- Bolea, O. 2016.** The seismic behaviour of reinforced concrete frame structures with infill masonry in the Bucharest area. *Energy Procedia*, 85: 60–76.
- Computers and Structures Inc. 2013.** SAP2000 ultimate: Integrated solution for structural analysis and design. Structural Analysis Program, Version 16.0.0, Berkeley, CA.
- DBYBHY 2007.** Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- Decanini, LD., Liberatore, L., Mollaioli, F. 2012.** The influence of openings on the seismic behaviour of infilled framed structures. *The 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal, 24–28 September.
- Dolsek, M., Fajfar, P. 2002.** Mathematical modelling of an infilled RC frame structure based on the results of pseudo-dynamic tests. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 31(6): 1215–1230.
- Dolsek, M., Fajfar, P. 2008.** The effect of masonry infills on the seismic response of a four-storey reinforced concrete frame—a deterministic assessment. *Eng. Struct.*, 30(7): 1991–2001.
- Dorji, J., Thambiratnam, DP. 2009.** Modeling and analysis of infilled frame structures under seismic loads. *Open Constr. Build. Technol. J.*, 3: 119–126.
- Ercolino, M., Ricci, P., Magliulo, G., Verderame, GM. 2016.** Influence of infill panels on an irregular RC building designed according to seismic code. *Earthq. Struct.*, 10(2): 261–291.
- FEMA 273 1997.** NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
- FEMA 306 1998.** Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings. Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- FEMA 356 2000.** Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
- Fenerci, A., Binici, B., Ezzatfar, P., Canbay, E., Ozcebe, G. 2016.** The effect of infill walls on the seismic behavior of boundary columns in RC frames. *Earthq. Struct.*, 10(3): 539–562.
- Fiore, A., Porco, F., Raffaele, D., Uva, G. 2012.** About the influence of the infill panels over the collapse mechanisms activated under pushover analyses: Two case studies. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 39:11–22.

- Hanoğlu, K.B. 2002.** Fiber reinforced plastic overlay retrofit of hollow clay tile masonry infilled reinforced concrete frames. *Doktora Tezi*, Boğaziçi Üniversitesi, 129 s.
- Kakaletsis, DJ., Karayannis, CG. 2008.** Influence of masonry strength and openings on infilled R/C frames under cycling loading. *J. Earthq. Eng.*, 12(2): 197–221.
- Kakaletsis, DJ., Karayannis, CG. 2009.** Experimental investigation of infilled reinforced concrete frames with opening. *ACI Struct. J.*, 106(2): 132–141.
- Kaushik, HB., Rai, DC., Jain, SK. 2007.** Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. *J. Mater. Civ. Eng.*, 19(9): 728–739.
- Kaushik, HB., Rai, DC., Jain, SK. 2008.** A rational approach to analytical modeling of masonry infills in reinforced concrete frames buildings. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 12–17 October.
- Koutromanos, I., Stavridis, A., Shing PB., Willam, K. 2011.** Numerical modeling of masonry-infilled RC frames subjected to seismic loads. *Comput. Struct.*, 89(11–12): 1026–1037.
- Kuang, JS., Zhang, H. 2014.** Shake table tests of infilled RC frames with different column-to-infill connections. *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, İstanbul, Turkey, 25–29 August.
- Liu, L., Wu, Z., Sun, H. 2014.** The influence of infill walls on RC frames under seismic excitation. *Archit. Eng.*, 2(4):68–72.
- Martinelli, E., Lima, C., De Stefano, G. 2015.** A simplified procedure for nonlinear static analysis of masonry infilled RC frames. *Eng. Struct.*, 101: 591–608.
- Mehrabi, AB., Shing, PB., Schuller, MP., Noland, JL. 1996.** Experimental evaluation of masonry infilled RC frames. *J. Struct. Eng.*, 122(3): 228–237.
- Mohammadi, M., Nikfar, F. 2013.** Strength and stiffness of masonry-infilled frames with central openings based on experimental results. *J. Struct. Eng.*, 139(6): 974–984.
- Mohebkah, A., Tasnimi, AA., Moghadam, HA. 2008.** Nonlinear analysis of masonry-infilled steel frames with openings using discrete element method. *J. Constr. Steel Res.*, 64(12): 1463–1472.
- Mosalam, KM., White, RN., Gergely, P. 1997.** Static response of infilled frames using quasi-static experimentation. *J. Struct. Eng.*, 123(11): 1462–1469.
- Mondal, G., Jain, SK. 2008.** Lateral stiffness of masonry infilled reinforced concrete (RC) frames with central opening. *Earthq. Spectra*, 24(3): 701–723.
- Ozturkoglu, O., Ucar, T., Yesilce, Y. 2016.** Effect of partial openings in infill wall to nonlinear behavior of reinforced concrete frames. *12th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Boğaziçi University, İstanbul, 21–23 September.
- Ozturkoglu, O., Ucar, T., Yesilce, Y. 2017.** Effect of masonry infill walls with openings on nonlinear response of reinforced concrete frames. *Earthq. Struct.*, 12(3): 333–347.
- Öztürkoglu, O. 2016.** Kısmi boşluklu dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin doğrusal olmayan davranışının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 202 s.
- Panagiotakos, TB., Fardis, MN. 1994.** Proposed nonlinear strut models for infill panels. 1st Year Progress Report of HCM-PREC8 Project, University of Patras, Greece.
- Rodrigues, H., Varum, H., Costa, A. 2010.** Simplified macro-model for infill masonry panels. *J. Earthq. Eng.*, 14(3): 390–416.
- Ricci, P., Verderame, GM., Manfredi, G. 2011.** Analytical investigation of elastic period of infilled RC MRF buildings. *Eng. Struct.*, 33(2): 308–319.
- Smyrou, E., Blandon, C., Antoniou, S., Pinho, R., Crisafulli, F. 2011.** Implementation and verification of a masonry panel model for nonlinear dynamic analysis of infilled RC frames. *Bull. Earthq. Eng.*, 9(5): 1519–1534.
- Stavridis, A., Shing, PB. 2010.** Finite-element modeling of nonlinear behavior of masonry-infilled RC frames. *J. Struct. Eng.*, 136(3): 285–296.
- Tasnimi, AA., Mohebkah, A. 2011.** Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches. *Eng. Struct.*, 33(3): 968–980.
- Thinley, K., Hao, H. 2015.** Seismic assessment of masonry infilled reinforced concrete frame buildings in Bhutan. *Tenth Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Sydney, Australia, 6–8 November.
- Tsai, MH., Huang, TC. 2011.** Numerical investigation on the progressive collapse resistance of an RC building with brick infills under column loss. *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, 58: 946–953.
- TS 500 2000.** Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Uva, G., Porco, F., Fiore, A. 2012a.** Appraisal of masonry infill walls effect in the seismic response of RC framed buildings: A case study. *Eng. Struct.*, 34: 514–526.
- Uva, G., Raffaele, D., Porco, F., Fiore, A. 2012b.** On the role of equivalent strut models in the seismic assessment of infilled RC buildings. *Eng. Struct.*, 42: 83–94.
- Valente, M. 2012.** Seismic performance assessment of a masonry infilled ductile RC structure. *Int. J. Eng. Technol.*, 4(6): 701–704.
- Wang, CY., Ho, HY., Wang, RZ., Huang, HH. (2008).** Numerical simulations of non-ductile RC frames with infilled brick panel under cyclic loading. *J. Chinese Inst. Eng.*, 31(5): 827–840.
- Yakut, A., Binici, B., Demirel, İO., Özcebe, G. 2013.** Dolgu duvarların deprem davranışına etkisi. *2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 25–27 Eylül, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay.
- Yuen, YP., Kuang, JS. 2015.** Nonlinear seismic responses and lateral force transfer mechanisms of RC frames with different infill configurations. *Eng. Struct.*, 91: 125–140.