



Out-of-plane seismic resistance of high masonry walls having rectangular buttresses

Rabia İzol*^{ID}, M. Arif Gürel^{ID}, R. Kadir Pekgökgöz^{ID}, Fatih Avcil^{ID}

Department of Civil Engineering, Harran University, Sanliurfa, 6300, Turkey

Highlights:

- High masonry walls having buttress
- Modeling of walls and numerical calculation methods
- Out-of-plane seismic resistance

Keywords:

- Masonry wall
- Buttress,
- Out-of-plane seismic resistance
- Numerical model
-

Article Info:

Research Article
Received: 24.08.2017
Accepted: 02.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460499

Graphical/Tabular Abstract

In this study the seismic resistance of high masonry walls having buttresses has been investigated by equivalent static analysis method. For this purpose, a numerical model developed for the stability analysis of masonry elements with rectangular cross-section has been utilized. Seismic coefficient versus horizontal displacement curves have been obtained for a reference buttressed wall and for the qibla wall of the Süleymaniye Mosque which has a strong buttress system. The results obtained for the reference wall were also compared with the results of the ABAQUS program. As shown Figure 1 good correlations obtained between the results.

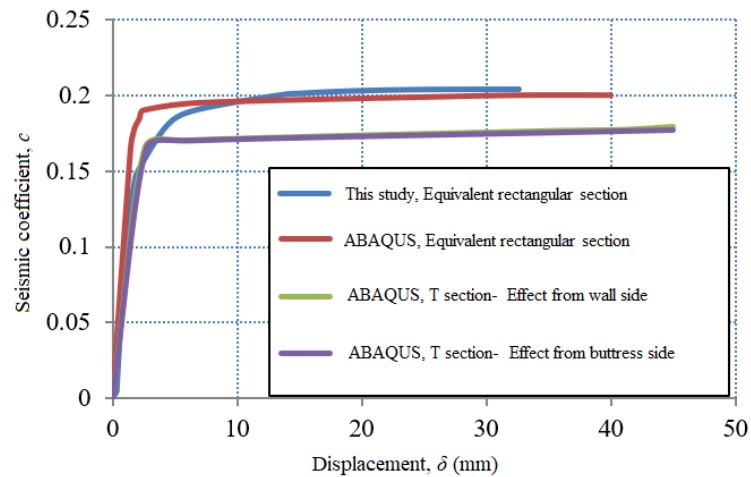


Figure 1. c - δ curves obtained by the present work and the ABAQUS program for the reference wall

Purpose: Out-of-plane seismic resistance of high masonry walls having rectangular buttresses has been investigated.

Theory and Methods:

For the calculations, a numerical model based on the discretization of the walls into elements has been used. With the calculation procedure of this model resistance of the walls against seismic forces has been obtained.

Results:

It has been determined that with respect to seismic resistance, buttressed walls are stronger than plain walls, as expected. Moreover, it has been seen once more that Mimar Sinan who amongst the greatest architects of the world architecture had accomplished not only aesthetics but also resistance requirements in his structures.

Conclusion:

Performed calculations have shown that buttresses make important contribution to the seismic resistance of masonry walls. Results of the method of presented work and that of the ABAQUS are in good agreement.

Correspondence:

Author: Rabia İzol
e-mail:
rabiaizol@harran.edu.tr
phone: +90 414 318 3000
/1343



Dikdörtgen payandalı yüksek yığma duvarların düzlem dışı deprem dayanımları

Rabia İzol*^{ID}, M. Arif Gürel^{ID}, R. Kadir Pekgökgöz^{ID}, Fatih Avcil^{ID},

Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, 63000, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Payandalı yüksek yığma duvarlar
- Duvarların modellenmesi ve sayısal hesap yöntemi
- Düzleme dik deprem dayanımı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 24.08.2017

Kabul: 02.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460499

Anahtar Kelimeler:

Yığma duvar,
payanda,
düzlem dışı deprem
dayanımı,
sayısal model

ÖZET

Bu makalede payandalı yüksek yığma duvarların deprem dayanımları eşdeğer statik analiz yöntemi ile yaklaşık olarak incelenmiştir. Bu amaçla dikdörtgen kesitli yığma elemanların stabilite (kararlılık) analizleri için geliştirilmiş olan sayısal bir yöntemden faydalanılmıştır. Sayısal yöntem çatlamayı ve ikinci mertebe etkilerini hesaba katmaktadır. Duvarlar üst kesitlerine etki eden tekil düşey ve yatay yükler, duvar yüksekliği boyunca etkiyen yatay deprem yükü ve kendi ağırlıkları altında prizmatik bir konsol eleman olarak modellenmiştir. Örnek olarak bir payandalı referans duvarın ve bir de Süleymaniye Camisinin kible duvarının deprem katsayısına karşı yatay yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Referans duvar üzerindeki hesaplar bir de ABAQUS programı ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar bu çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Ayrıca referans duvar üzerinde parametrik analizler yapılarak, payandanın duvar düzlemine dik ve paralel boyutları, düşey yük ve bu yükün dış merkezliği gibi parametrelerin dayanım üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Out-of-plane seismic resistance of high masonry walls having rectangular buttresses

H I G H L I G H T S

- High masonry walls having buttress
- Modeling of walls and numerical calculation methods
- Out-of-plane seismic resistance

Article Info

Research Article

Received: 24.08.2017

Accepted: 02.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460499

Keywords:

Masonry wall,
buttress,
out-of-plane seismic
resistance,
numerical model

ABSTRACT

In this article, the seismic resistance of high masonry walls having buttresses has been investigated by equivalent static analysis method. For this purpose, a numerical model developed for the stability analysis of masonry elements with rectangular cross-section has been utilized. The numerical method takes into account the cracking and second order effects. The walls have been modeled as a prismatic cantilever under the effects of concentrated vertical and horizontal loads at the upper section, horizontal earthquake load and self weight of the wall. Seismic coefficient versus horizontal displacement curves have been obtained for a reference buttressed wall and for the qibla wall which has a strong buttress system of the Süleymaniye Mosque. Moreover, performing parametric analyses on the reference wall, the effects of same parameters; such as perpendicular and parallel dimensions of the buttress of the wall, the magnitude and eccentricity of the vertical top load on the seismic resistance have been investigated.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: rabiailzol@harran.edu.tr, agurel@harran.edu.tr, recepkadir@harran.edu.tr, avcilfatih@harran.edu.tr
/ Tel: +90 414 318 3000 /1672

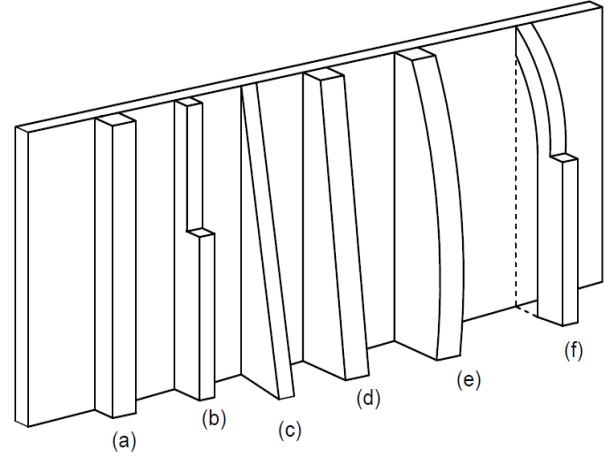
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ahşapla birlikte taş, tuğla ve kerpiç insanlık tarihindeki en eski ve önemli yapı malzemeleridir. Günümüze ulaşan tarihi yapıların birçoğunda malzemenin öncelikle taş ve sonra da tuğla olduğu görülmektedir. Bu iki malzeme ve kerpiç ile oluşturulan yapılara yığma (kâgir, kargir) yapılar adı verilir.

İnsanoğlunun çeşitli medeniyet evrelerinde değişik amaçlarla inşa ettiği, bugün insanlık mirası olarak korunup gelecek nesillere güvenle aktarılması gereken yapılara tarihi yapılar adı verilir. İnşa edildikleri çağların malzeme ve teknolojisi gereği bu yapıların hemen hemen tamamı taş ve tuğla ile inşa edildiklerinden dolayı yığma yapılardır [1]. Bu yapılar; ibadet yapıları (camiler, katedraller gibi), köprüler, eğitim yapıları, saraylar, hastaneler, idare yapıları, su yapıları, askeri yapılar, surlar ve kuleler olarak sayılabilir.

Duvarlar bina türü yığma yapıların doğal olarak en önemli kısımlarındandır. Payandasız yüksek yığma duvarların düzlemlerine dik deprem ve rüzgâr etkilerine karşı zayıf olacakları açıktır. Bundan dolayı yüksek duvarları olan yapılarda bu tür duvarların hemen her zaman bir payanda sistemi ile desteklenmiş olduğu görülmektedir. Şekil 1’de bazı tarihi yapılardaki payandalı duvarlar görülmektedir. Bilindiği gibi payandalar barajlar ve istinat duvarları gibi modern yapılarda da kullanılmaktadır.

Yığma yapılarda kullanılmış olan payandalar sabit kesitli (dikdörtgen), kademeli, üçgen, trapez, uçan payanda (flying buttress) ya da başka özel bir tipte olabilmektedir. Şekil 2’de bu payandalar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Yığma yapılardaki payanda türleri: a) dikdörtgen b) kademeli c) üçgen d) trapez e) eğrisel biçimli f) uçan payanda

(Types of buttress in masonry structures: a) rectangular buttress b) stepped buttress c) triangular buttress d) trapezoidal buttress e) curvilinear shaped buttress f) flying buttress)



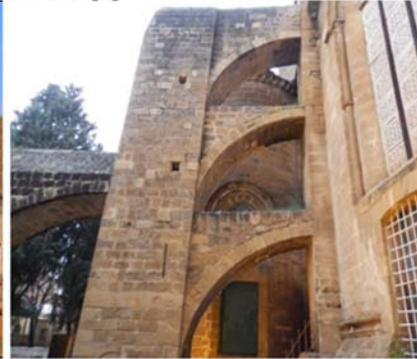
a) Süleymaniye Camisi ve Kible duvarı payandaları [Fotoğraf: Yazarlar]



b) Westminster Manastır Kilisesi, Londra [2]



c) El Cortijo del Fraile Misyonu, Almeria, İspanya [3]



d) Lefkoşa Selimiye Camisi uçan payandaları [4]

Şekil 1. Payandalı yığma yapılara örnekler (Examples of masonry buttressed structures)

Payandalar yüksek duvarlar için önemli bir destek elemanı olmasına karşılık literatürde bu elemanlarla ilgili çalışma sayısı çok azdır. Mevcut olan çalışmaların birçoğu da payandaların üst kısımlarına yakın bir noktada eğik olarak etkiyen tekil bir kuvvet etkisinde davranış ve dayanımlarını araştıran çalışmalar niteliğindedir. Söz konusu eğik yük payandanın desteklediği duvara bir tonoz ya da kemerden iletilen yükü temsil etmektedir. Deprem bölgelerindeki yapılar için deprem kuvvetleri doğal olarak en önemli yükler arasındadır. Dolayısıyla payandalı yığma duvarların bu tür bir yükleme etkisi altında da davranış ve dayanım özelliklerinin araştırılması gerekir. Bu çalışmada sabit dikdörtgen kesitli payandalara sahip yüksek yığma duvarların düzlemlerine dik deprem dayanımları araştırılmıştır. Böyle bir çalışmanın literatürde olmadığı görülmüş, bu yüzden mühendislik ve mimarlık açısından yararlı bir çalışma olacağı düşünülmüştür.

Literatürdeki ilgili çalışmalar şu şekilde özetlenebilir: De Lorenzis vd. [5, 6] ilk olarak kademeli daha sonra ise trapez yığma payandaları, çekme dayanımı olmayan sürekli birer ortam gibi ele alarak analizini yapmışlardır. Huerta yapmış olduğu çalışmada [7] payanda tasarımının tarihsel gelişiminden bahsetmiş olup aynı zamanda modern yığma payanda analizlerini özetlemiştir. Ochsendorf vd. [8], payanda malzemesini basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı ise düşük olan bir malzeme olarak ele alıp, belirli payanda formları için eğik tekil kuvvet altında çatlak biçimini elde edip, göçme yükünü belirlemişlerdir. Ochsendorf ve De Lorenzis çalışmalarında [9] dikdörtgen yığma payandaların tekil yükleme altında göçmesini incelemiş ve yapılan deney sonuçları ile [8]'deki analitik sonuçları karşılaştırmışlardır. Makris ve Alexakis çalışmalarında [10], yığma payanda ve kulelerin yatay ve düşey yükler altında sınır denge çözümlemesini yapmışlardır. Nikolinaou vd. [11] ise yapmış oldukları çalışmada erken Gotik dönemi uçan payandalarını klasik limit analiz yöntemini kullanarak incelemişlerdir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Payandalar yüksek duvarlara sahip yığma yapılarda önemli bileşenlerdir. Bu bölümde payandalı yığma duvarların düzlemlerine dik deprem etkileri altında dayanımlarını belirlemek için kullanılacak hesap yöntemi ele alınacaktır. Yöntemin kullanımı ile payandalı duvar ile birlikte payandasız duvar da dikkate alınıp, dayanımlar arasındaki fark belirlenecektir. Bu sayede payandanın duvarın deprem dayanımına katkısı görülmüş olacaktır.

2.1. Deprem Yükleme ve Diğer Yükler (Earthquake Loading and Other Loads)

Bilindiği üzere yapıların yatay deprem etkileri altında analizi üç yöntem kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bunlar; Zaman Tanım Alanında Analiz Yöntemi (Dynamical Time-history Analysis Method), Mod Birleştirme Yöntemi (Modal Superposition Analysis Method) ve Eşdeğer Deprem Yüklü Yöntemi'dir (Equivalent Static Analysis Method). Bu analiz

yöntemleri hakkında ayrıntılı bilgi Deprem Yönetmeliği 2007'de ve başka çeşitli kaynaklarda bulunabilir. Örneğin Paulay ve Priestley'in (1992), "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings" adlı kitabı [12] bunlara güzel bir örnektir. Bu çalışmada payandalı ve payandasız yüksek yığma duvarların düzlemlerine dik deprem etkileri altında hesabı, basit ve pratik olmasından dolayı, eşdeğer statik yatay yük analizi ile gerçekleştirilecektir. Bu analiz yapının yalnızca birinci titreşim modunu dikkate alıp, daha yüksek modları göz ardı ettiğinden, maksimum atalet etkilerine eşdeğer olan ve yapı yüksekliği boyunca ters üçgen şeklinde değişime sahip bir statik yatay yük dağılımını benimsemiş olur. Eşdeğer statik analiz yöntemi ülkemiz deprem yönetmeliğinde (Deprem Yönetmeliği 2007) [13] olduğu gibi dünyanın deprem riski olan çeşitli ülke yönetmeliklerinde de belli şartlar altında kullanımına müsaade edilen bir yöntemdir. Göz önüne alınacak payandalı bir duvarda dikkate alınacak hesap dilimi üzerinde yukarıda açıklanan deprem yüklemesi yanında başka yükler de doğal olarak bulunacaktır. Bunlar; dilimin düşeyde yayılı haldeki kendi ağırlığı ile birlikte duvar üst kesitine etki eden tekil düşey ve yatay yüklerdir.

2.2. Payandalı ve Payandasız Duvarların Modellenmesi ve Çeşitli Kabuller (Modeling of Plain and Buttressed Walls and Some Assumptions)

Çalışmada tabandan tepeye kadar boy kesiti ve kalınlığı değişmeyen dikdörtgen payandalara sahip duvarlar incelenecektir. Payandaların birbirlerinden eşit mesafelerde olduğu ve duvar kalınlığının da tabandan tepeye kadar sabit kaldığı düşünülecektir. Ayrıca, duvarın yatay boyutunun yeterince büyük olduğu kabul edilmekte, dolayısıyla duvara dik birleşen duvarların etkisi ihmal edilmiş olmaktadır. Bu şekildeki bir payandalı duvarda, Şekil 3a'da görüldüğü gibi bir payandayı içeren dilim hesap için ele alınacaktır. Bu dilim ve hesaba girecek yükler ise Şekil 3b'de gösterilmiştir. Bu şekilde P duvar üst kesitine gelen düşey yükü, w duvarın düşeyde yayılı olan ağırlığını, c deprem katsayısını ve cP ile cw duvara etkiyecek yatay deprem yüklemesini göstermektedir.

Şekil 3b'den görüldüğü gibi hesapta göz önüne alınacak dilim bir T kesite sahiptir. Deprem etkilerinin dilime duvar tarafından gelmesi durumunda çatlamış bir kesit için iki seçenek söz konusudur: 1) tarafsız eksenin duvar içinde kalması, dolayısıyla kesitin çalışan bölgesinin T şekilli bir alan olması, 2) tarafsız eksenin payanda içinden geçmesi, dolayısıyla kesitin çalışan bölgesinin dikdörtgen şekilli bir alan olması, Şekil 4a. Deprem etkilerinin dilime payanda tarafından gelmesi durumunda çatlamış bir kesit için yine iki seçenek söz konusudur: 1) tarafsız eksenin payanda içinde kalması, dolayısıyla kesitin çalışan bölgesinin T şekilli bir alan olması, 2) tarafsız eksenin duvar içinden geçmesi, dolayısıyla kesitin çalışan bölgesinin dikdörtgen şekilli bir alan olması, Şekil 4b. Dolayısıyla hesaplar sırasında kesitler için T şekilli ya da dikdörtgen şekilli alanlar üzerinden hesabı yürütmek gerekecektir. Bilinmektedir ki çekme gerilmesi almayan malzemenin (no-tension material) oluşturulmuş ve dikdörtgenden farklı kesite sahip herhangi

bir elemanın normal kuvvet ve eğilme momenti tesirleri altında hesabı, genel olarak kolay değildir. Çünkü belirli büyüklükte normal kuvvet ve momente maruz dikdörtgenden farklı bir kesitte tarafsız eksenin konumunun ve maksimum normal gerilmenin belirlenmesi oldukça zordur. Genel olarak bir deneme-yanılma işlemi gereklidir. Bir de kullanılacak hesap modeli ve yönteminde duvarın belirli sayıda elemana bölüneceği dikkate alınrsa, bu elemanlar arasında söz konusu olacak çok sayıda kesit için hesabın T kesit olarak yapılmaya çalışılması hesabı pratik olmaktan çıkaracaktır.

Bundan dolayı pratik olarak hesap yapabilmek amacıyla T kesitle hesap yapmak yerine atalet momenti (ikinci mertbe alan momenti) bu T kesitine eşit olacak bir dikdörtgen kesit dikkate almak oldukça uygun olacaktır. Ancak hemen belirtmek gerekir ki, bu şekilde bir yaklaşım, hesabın belirli bir yaklaşıklıkta olması sonucunu doğuracaktır. Şekil 5a, b sırasıyla payandasız ve payandalı duvar kesitini, Şekil 5c ise payandalı duvar kesiti ile eşit atalet momentine sahip eşdeğer dikdörtgen duvar kesitini göstermektedir.

2.3. Hesap Yöntemi ve Duvarın Modellenmesi (Calculation Method and Modeling of Wall)

Hesap yöntemini açıklamaya başlamadan önce hemen belirtmelidir ki, hesapta duvarın kayma dayanımı ihmal edilecek ve sadece eğilme dayanımı dikkate alınacaktır. Yüksek (narın) duvarlar inceleneceği için bu şekildeki bir hesabın geçerlilik düzeyi oldukça iyi olacaktır. Ancak orta yükseklikte ve özellikle bodur duvarlar söz konusu olduğunda kayma etkilerinin de hesapta önemli olacağı açıktır. Bu çalışmada La Mendola ve Papia'nın (1993), [14] yığma duvarların kendi ağırlıkları ve dışmerkez (eksantrik) düşey tepe yükü etkisi altında burkulma problemlerini incelemek için geliştirdikleri model ve sayısal hesap yöntemi kullanılacaktır. Belirtmelidir ki, söz konusu yöntemin hemen hemen aynı 1957'de Seames ve Conway [15] tarafından elastik çubukların büyük yer değiştirme değerlerinin hesabı yapılırken kullanılmıştır (Frisch-Fay, 1962), [16].

Model göz önüne alınan düşey taşıyıcı elemanın hesap için sonlu sayıda alt elemana bölünmesini (ayrıklaştırılmasını) esas alır. Hesap yöntemi ise aşağıda bu çalışmadaki probleme uyarlanarak açıklanacağı üzere bir ardışık yaklaşım yöntemidir.

Şekil 6a yüksekliği h ve kalınlığı t olan bir yığma duvarı, Şekil 6b ise bu duvarın hesap için elemanlara bölünmüş halini ve yükleme durumunu göstermektedir. Şekil 6b'den görüldüğü gibi duvar 0 dan n 'e kadar numaralandırılmış $n+1$ tane kesit tarafından sınırlanmış, her biri eşit $h_e=h/n$ yükseklikli ve 1 den n 'e kadar numaralandırılmış olan n tane elemana bölünmüştür. W duvarın toplam ağırlığı olmak üzere W/n her bir elemanın ağırlığını, P duvar üst kesitine etkimesi muhtemel yükü (duvar üstü yapı bölümünden duvarın birim boyuna gelen düşey yükü) ve e_p bu yükün dışmerkezlik değerini göstermektedir. W/n ağırlıkları elemanların kütle merkezlerinden etkimektedir. Daha önce belirtilmiş olduğu gibi deprem etkisi Eşdeğer Deprem Yüğü

Yöntemi ile göz önüne alındığından Şekil 6b'de görüldüğü gibi deprem yükü ters üçgen şekilli bir yükleme olarak duvara etkilmiştir. Bu yükleme Eş. 1 ile ifade edilebilir.

$$f_j = c_j \frac{W}{n} = c \left(\frac{n-j+1/2}{n-1/2} \right) \frac{W}{n} \quad (1)$$

Bu ifadedeki c deprem yüklemesinin büyüklüğünü ifade eden "deprem katsayısını" göstermektedir. Duvarın j . elemanı göz önüne alındığında bu elemana etkiyen W/n ve $c_j W/n$ kuvvetlerinin elemanın kütle merkezine etkidiklerine dikkat edilmelidir. P kuvvetinden dolayı meydana gelen yatay deprem kuvveti iyi bir yaklaşıklıkla cP değerinde alınabilir, çünkü Şekil 6b'den görüldüğü gibi P kuvvetin düzeyi duvarın cW/n yatay deprem kuvveti etkisinde olan en üst elemanın (1. elemanın) kütle merkezine çok yakındır. Böylece yukarıda tanımlanmış olan yükleme, duvarın dayanabileceği en büyük yatay deprem yükünün büyüklüğünü ifade eden c_{cnb} deprem katsayısının belirlenebilmesine olanak verecektir.

Duvarın dikkate alınmış olan yükleme etkisi altında genel bir şekil değiştirmiş biçimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu şeklin bilinçli olarak abartılı çizilmiş olduğu belirtilmelidir. Duvarın bu şekil değiştirmiş hali n adet çember yayının birleşimi olarak göz önüne alınmış olmaktadır. Bu sayede duvarın her bir elemanı içinde eğrilik değeri sabit olacaktır. Bu eğrilik değeri o elemanın üst kesitindeki eğrilik değerine eşit olarak alınacaktır. Elemanların $\zeta = h_e/t = h/nt$ olarak tanımlanacak boyutsuz yükseklik değerleri (ayrıklaştırma parametresi) yeterince küçük olduğunda, yani duvar yeterli sayıda elemana (n) ayrıldığında bu kabul yüksek bir doğruluk derecesine sahip olacaktır. Seçilmiş olan $O(x,y)$ eksen takımı duvar üst kesitinin geometrik merkezinden geçmektedir. Şekil 7'de ki terimler kullanılarak duvarın şekil değiştirmiş halinde j . kesitin geometrik merkezinin koordinatı Eş 2 ile ifade edilebilir:

$$y_j = y_{j-1} + r_j \left[\cos(\beta - \sum_{i=1}^j \alpha_i) - \cos(\beta - \sum_{i=1}^{j-1} \alpha_i) \right] \quad (2)$$

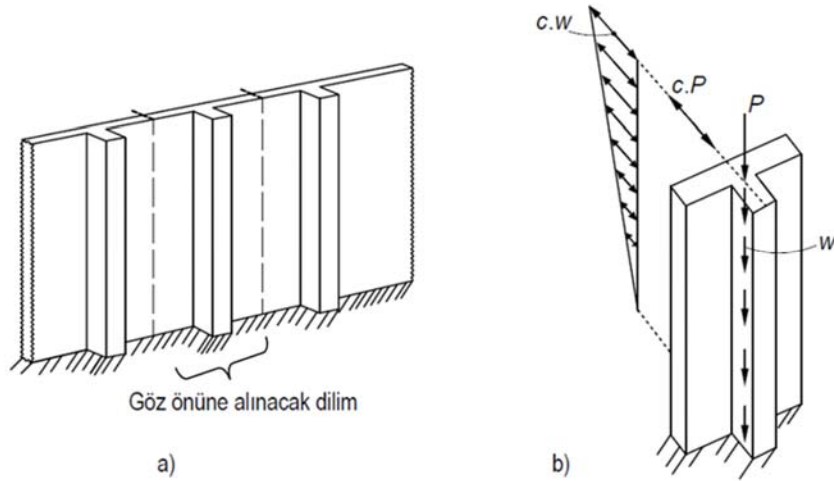
($j=1,2,\dots,n$)

Bu ifadede β duvar üst kesitinin dönme miktarını, r_j j . elemanın eğrilik yarıçapını ve $\alpha_j = h_e/r_j$ duvarın hesap modelinde j . elemanla ilişkili açıyı göstermektedir. Eş 2 ifadesinde kosinüs fonksiyonları Taylor serisine açılıp, her birinde sadece ilk üç terim dikkate alındığında Eş 2 bağıntısı boyutsuz biçimde (t değerine bölünmüş halde) Eş 3 gibi olur:

$$\frac{y_j}{t} = \frac{y_{j-1}}{t} + \xi \beta + \frac{1}{2} \xi^2 \phi_j t - \sum_{i=1}^j \xi^2 \phi_i t \quad (3)$$

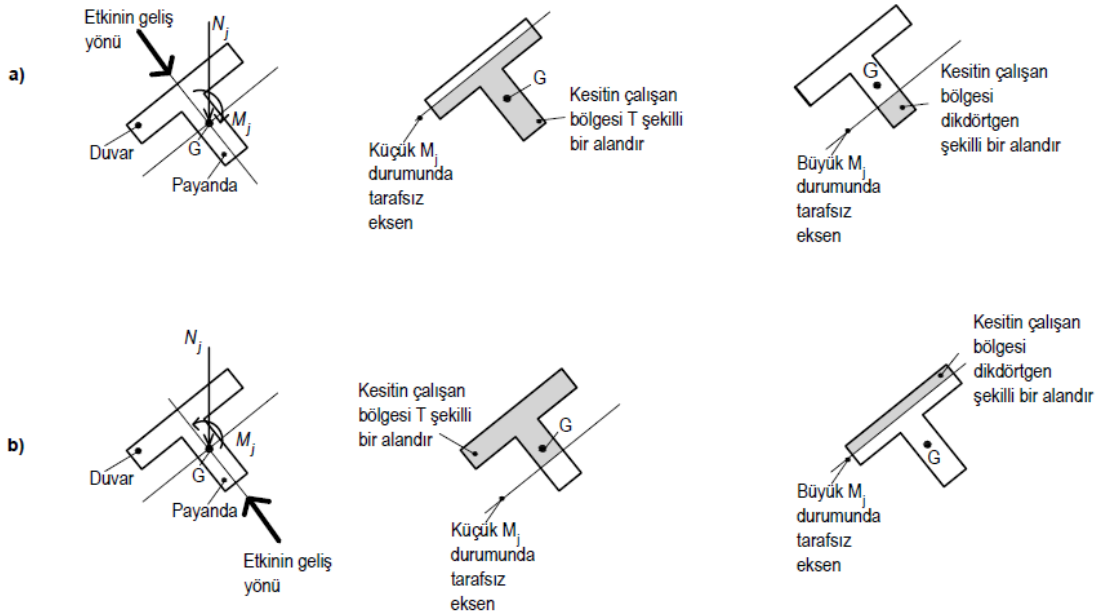
Burada $\phi_i = 1/r_i$ i . elemanın eğrilik değerini göstermektedir.

Şekil 7'ye göre $y_0 = 0$ olduğundan ve ξ ($\xi = h_e/t = h/nt$) seçilecek bir değer olduğu için duvarın β üst kesit dönme miktarı ile uyumlu şekil değiştirmiş hali Eş 3 bağıntısının $j = 1$ indisinden başlanarak tekrarlı olarak kullanımı ile elde edilecektir. Ancak bu, duvarın şekil değişimini gösteren boy kesitinde (Şekil 7) elemanların eğrilik değerleri de biliniyorsa yapılabilir.

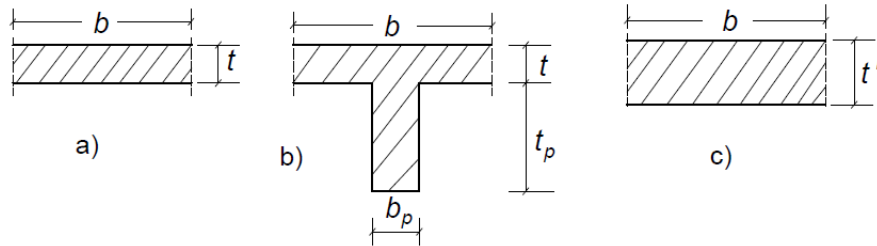


Şekil 3. a) Sabit dikdörtgen kesitli payandalara sahip duvar ve duvarın bir dilimi, b) Hesap için göz önüne alınacak duvar dilimi ve hesaba girecek yükler

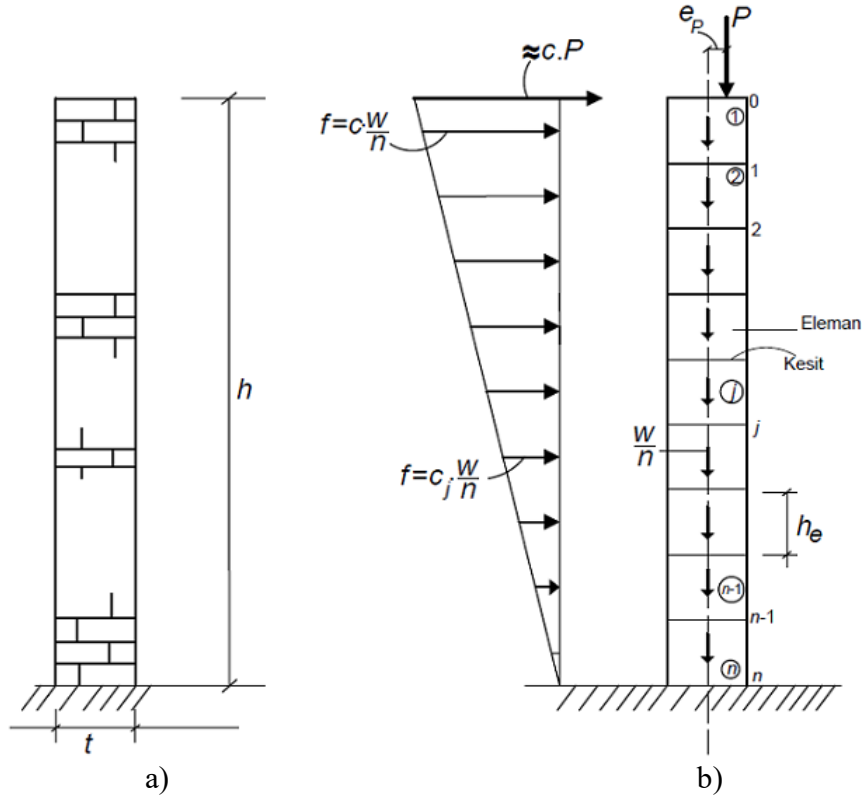
(a) wall having buttresses with constant rectangular section and a slice of the wall, b) Wall slice and loads to be considered in the calculation)



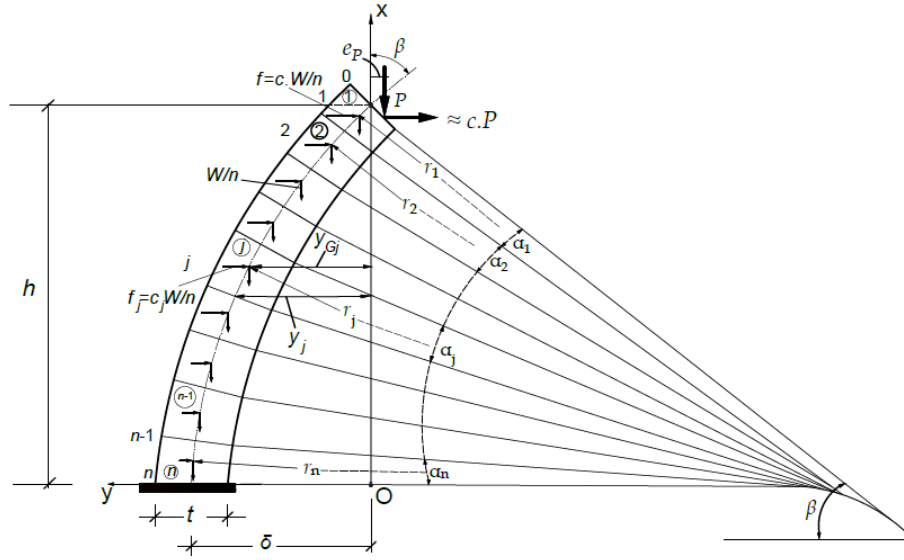
Şekil 4. Deprem etkisi altında kesitte tarafsız eksenin muhtemel pozisyonları ve kesitin basınç çalışan bölgesi, a) etkinin duvar tarafından gelmesi durumu, b) etkinin payanda tarafından gelmesi durumu (Possible positions of neutral axis and the compression domain of the cross-section under the effect of seismic loading. a) loading from wall side, b) loading from buttress side)



Şekil 5. a) Payandasız duvar kesiti, b) Payandalı duvar kesiti, c) Atalet momenti payandalı duvar kesitininine eşit olan dikdörtgen kesit (a) plain wall cross-section, b) buttressed wall cross-section, c) rectangular section having equal moment of inertia to the buttressed wall cross-section)



Şekil 6. a) Sabit kesitli duvarın geometrisi, b) Duvarın hesap için elemanlara bölünmüş hali ve yükleme durumu (a) Geometry of wall with constant cross-section, b) discretized state and loading condition of the wall)



Şekil 7. Hesap için elemanlara bölünmüş haldeki duvarın dikkate alınan yükleme altında genel bir şekil değiştirmiş hali (A general deflected shape of the discretized wall under the considered loading condition)

2.3.1. j. Kesitteki dışmerkezlilik değeri (Eccentricity at the jth cross-section)

Duvarın j. kesitindeki tesirleri ifade etmeden önce şu hususu vurgulamakta yarar vardır. Duvar üst kesitine etkileyen dışmerkez P kuvvetinin duvarın kendi ağırlığı olan W'nin bir katı olarak dikkate alınması mümkündür. Aşağıdaki

bağıntılarda, k bir katsayı olmak üzere $P = kW$ olarak alınacaktır. Şekil 7'de görülen duvar şekil değiştirmiş hali dikkate alınarak j. kesitteki basınç kuvveti ve eğilme momenti Eş 4 ve Eş 5'deki gibi ifade edilebilir:

$$N_j = P + j \frac{W}{n} = kW + j \frac{W}{n} = W \left(k + \frac{j}{n} \right) \quad (4)$$

$$M_j = kW(e_p + y_j) + \frac{W}{n} \sum_{i=1}^j [y_j - y_{Gi}] + c_j \frac{h}{n} kW + c \frac{h}{n} \frac{W}{n} \sum_{i=1}^j (n-i+\frac{1}{2})(j-i+\frac{1}{2}) \quad (5)$$

Bu ifadede y_{Gi} i . elemanın ağırlık merkezinin koordinatıdır. j . eleman için (Şekil 7) bu büyüklüğün ifadesi Eş 2 ifadesinekinden tamamen benzer bir yol izlenerek Eş 6 daki gibi elde edilir:

$$\frac{y_{Gj}}{t} = \frac{y_{j+1}}{t} + \frac{1}{2} \xi \beta + \frac{3}{8} \xi^2 \phi_j t - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^j \xi^2 \phi_i t \quad (6)$$

($j=1,2,\dots,n$)

Boyutsuz dış merkezliğin j . kesitteki değeri Eş 5 ve Eş 4 ifadelerinin sağ taraflarının oranı Eş 7’deki gibi elde edilmiş olur:

$$\frac{e_j}{t} = \frac{y_j}{t} + \frac{k}{k+\frac{j}{n}} \frac{e_p}{t} - \frac{1}{n(k+\frac{j}{n})} \sum_{i=1}^j \frac{y_{Gi}}{t} + \frac{kc\xi_j}{(k+\frac{j}{n})} \frac{c\xi}{n(k+\frac{j}{n})(n-\frac{j}{n})} \sum_{i=1}^j (n-j+\frac{1}{2})(j-i+\frac{1}{2}) \quad (7)$$

Üst kesit için ($j = 0$) bu ifade $e_0/t = e_p/t$ olur ki, e_p/t değeri atanacak bir değerdir (Şekil 7).

2.3.2. j . elemanın eğrilik değeri (Curvature of the j th element)

Yığılma yapı malzemeleri (taş, tuğla ve kerpiç) genel olarak iyi basınç dayanımına, buna karşılık oldukça düşük çekme dayanımına sahiptirler. Dolayısıyla yığılma yapı malzemeleri için "çekme gerilmesi taşımayan malzeme" (no-tension material) kabulü yapılabilir. Bu durumda incelenen duvardaki bir elemanın eğriliği onun üst kesitinin çatlamamış veya kısmen çatlamış olması durumuna bağlı olacaktır. Çünkü bilindiği gibi çekme dayanımı olmayan bir malzemeden oluşturulmuş duvar, kolon gibi bir elemanda herhangi bir kesite etkiyen basınç kuvveti o kesitin çekirdek

bölgesi içinde ise kesit çatlaksız durumda, aksi halde ise kesit kısmen çatlamış olacaktır. Buna göre genel olarak denklem (7)’deki boyutsuz dışmerkezlik ifadesiyle ilişkili olarak iki farklı moment-eğrilik bağıntısı dikkate alınmalıdır. $b \times t$ boyutlarındaki dikdörtgen bir kesitte çekirdek bölgesinin yarı köşegen uzunlukları $b/6$, $t/6$ olan bir eşkenar dörtgen olduğu bilinmektedir. Şekil 8a çatlamamış bir kesitteki şekil değiştirmeler ve eğriliği, Şekil 8b ise kısmen çatlak bir kesitteki şekil değiştirmeler ve eğriliği göstermektedir. $e_j/t \leq 1/6$ olması durumunda (Şekil 8a) ($j+1$). eleman için boyutsuz eğrilik Eş 8’de olduğu gibidir.

$$\phi_{j+1} t = \frac{M_j}{EI} t = \frac{N_j e_j}{EI} \quad (8)$$

Bu ifadede E malzemenin basınç altındaki elastisite modülü ve I kesitin eğilme eksenine göre atalet momentidir. Atalet momentinin değeri $bt^3/12$ olarak yerine yazıldığında ve $A = bt$ olduğu dikkate alınarak Eş 8 ifadesi Eş 9 haline şu gelmiş olur:

$$\phi_{j+1} t = \frac{N_j}{EA} \frac{12e_j}{t} \quad (9)$$

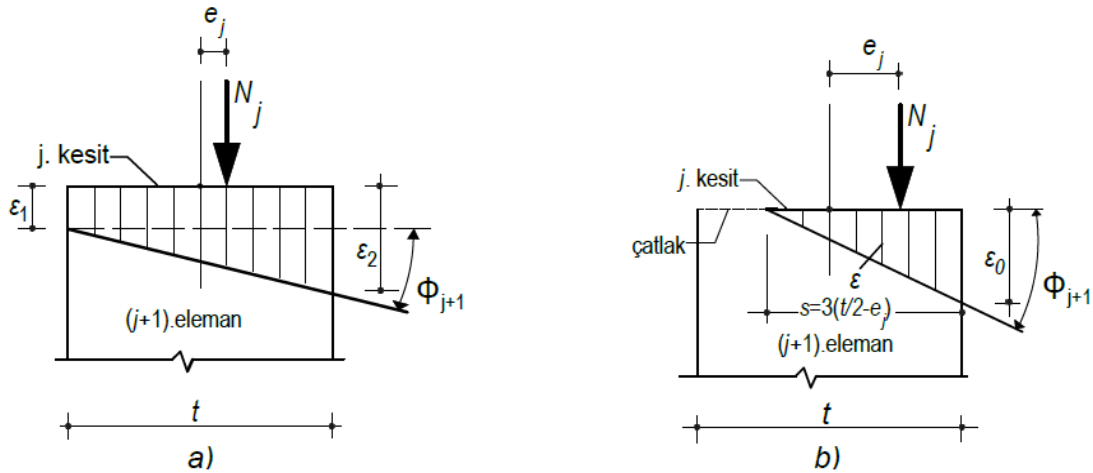
Boyutsuz dış merkezlik değerinin $1/6$ dan büyük olması durumunda ise ($e_j/t > 1/6$) Şekil 8b’de görüldüğü gibi kesit kısmen çatlamış olacaktır. Bu durumda eğrilik değeri Eş 10’da belirtildiği gibi yazılabilir:

$$\phi_{j+1} = \frac{\epsilon_0}{s} = \frac{\epsilon_0}{3(\frac{1}{2} - e_j)} = \frac{\sigma_0/E}{3(\frac{1}{2} - e_j)} \quad (10)$$

Burada σ_0 kesitteki en büyük basınç gerilmesidir ve bu gerilme değeri Eş 11’de belirtildiği gibi kolayca elde edilir:

$$\sigma_0 = \frac{2N_j}{3A(\frac{1}{2} - e_j)} \quad (11)$$

σ_0 ’ın bu ifadesi Eş 10’a yazılarak üst kesiti kısmen çatlamış bir ($j+1$). eleman için boyutsuz eğrilik ifadesi Eş 12 deki gibi elde edilmiş olur:



Şekil 8. a) Çatlamamış bir kesitte şekil değiştirmeler ve eğrilik b) Kısmen çatlak bir kesitte şekil değiştirmeler ve eğrilik (a) Strains and curvature at an uncracked cross-section, b) Strains and curvature at a partially cracked cross-section)

$$\phi_{j+1} t = \frac{N_j}{EA} \frac{2}{9 \left(\frac{e_j}{t}\right)^2} \quad (12)$$

Eş 9 ve Eş 12 boyutsuz eğrilik ifadeleri tek bir ifade olarak Eş 13’de belirtildiği şekilde yazılabilir:

$$\phi_{j+1} t = \frac{N_j \lambda_j}{EA} \quad (13)$$

Burada λ_j nin Eş 14’teki gibi olduğu açıktır.

$$\lambda_j = \begin{cases} 12e_j/t & 0 \leq e_j/t \leq 1/6 \\ 2/9(1/2 - e_j/t)^2 & 1/6 < e_j/t < 1/2 \end{cases} \quad (14)$$

(j=0,1,2,.....,n-1)

N_j ’nin Eş 4’deki ifadesi Eş 13 bağıntısına yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında (j+1). elemanın boyutsuz eğriliği Eş 15’deki biçimde ifade edilmiş olur.

$$\phi_{j+1} t = \frac{\gamma t}{E} \xi (nk+j) \lambda_j \quad (j=0,1, \dots, n-1) \quad (15)$$

Bu ifadede $\gamma = W/bth$ duvarın birim hacminin ağırlığını göstermektedir.

2.3.3. Çözüm işlemi (The solution procedure)

Altta ankastre, üstte serbest durumda olan bir yığma duvar için P/W , e_p/t ve $\gamma t/E$ ’nin (Eş 15) atanacak değerlerine karşı gelen deprem katsayısına karşı üst kesitin yer değiştirme eğrisi ($c-\delta$) ve en büyük deprem katsayısı (c_{enb}) sırasıyla Eş 7, Eş 14, Eş 15, Eş 3 ve Eş 6 denklemleri kullanılarak elde edilebilir.

Bu amaç için duvar hesap maksadıyla yeterli sayıda elemana (n) bölünür ve böylece ξ ayrıklaştırma parametresi belirli olmuş olur. Yapılan hesaplar bu parametre için 0,25 veya daha küçük (0,20 ve 0,15 gibi) değerlerin uygun olduğunu göstermiştir. Daha büyük değerlerde yanılıcı ve hatta yanlış sonuçlar elde edilebilmektedir. Deprem katsayısı c’nin küçük bir başlangıç değeri ile ve üst kesit dönmesi β ’ya ilk bir tahmini değer atayıp hesaba başlanması, Eş 7 ve ardından Eş 14 ve Eş 15 denklemlerinin $j = 0$ için kullanılmasıyla Eş 16 olarak elde edilir.

$$\phi_1 t = 12 \frac{\gamma t}{E} \xi nk \frac{c_p}{t} \quad (16)$$

Dolayısıyla Eş 3 ifadesi 1. kesitin boyutsuz yer değiştirme değerini Eş 17’deki gibi vermiş olur:

$$\frac{y_1}{t} = \xi \beta - 6 \frac{\gamma t}{E} \xi^3 nk \frac{c_p}{t} \quad (17)$$

Daha sonra yukarıda bahsedilmiş olan denklemlerin aynı sırayla, ancak $j = 1$ için kullanılmasıyla y_2/t belirlenir ve hesaba bu şekilde devam edilir (La Mendola vd. 1995) [17]. (15) ifadesindeki j indisi n-1 değerine ulaştığında, altta ankastre kabul edilmiş olan duvar tabanında dönmenin sıfır

olmasını ifade eden Eş 18’deki yakınsaklık ölçütü kontrol edilir:

$$\beta = \sum_{i=1}^n \alpha_i = \sum_{i=1}^n \xi \phi_i t \quad (18)$$

$\beta - \sum_{i=1}^n \xi \phi_i t > 0$ olması halinde başta seçilmiş olan β değeri biraz küçültülerek, aksi durumda ise biraz büyütülerek kriterin sağlanıp sağlanmadığı tekrar kontrol edilir. $\beta - \sum_{i=1}^n \xi \phi_i t$ farkının seçilecek makul derecede küçük bir değer altına inmesi durumunda işlem bitirilir. Bu çalışmada yapılan hesaplarda 5×10^{-5} gibi oldukça küçük bir tolerans değeri kullanılmıştır. Böylece başta atanmış olan c deprem katsayısına karşılık gelen gerçek β üst kesit dönme değeri belirlenince (3) denkleminde $y_n = \delta$ değeri doğrudan belirlenmiş olur. Hesabı c deprem katsayısında ve β üst kesit dönme değerinde küçük artımlar yapıp tekrarlamak suretiyle duvar için deprem katsayısına karşı yatay yer değiştirme eğrisi ($c-\delta$) çizilebilir ve dolayısıyla duvarın dayanabileceği en büyük yatay deprem yükünü temsil eden c_{enb} katsayısı belirlenmiş olur. Sınır duruma (c_{enb} değerine ulaşıldığı durum) duvar taban kesitinde boyutsuz dışmerkezlik 0,5 olduğunda veya aşırı yatay yer değiştirmeler sonucu duvarın kararlılığını yitirmesiyle ulaşılır.

Bu çalışmanın ana amacı payandalı ve payandasız yığma duvarların yatay deprem direncini belirlemek olduğundan, yukarıda anlatılmış olan kuvvet esaslı hesap şekli benimsenmiştir. Hesapları yapabilmek için C++ programlama dilinde bir bilgisayar programı yazılmıştır.

3. YÖNTEMİN ÖRNEK DUVARLAR ÜZERİNDE UYGULAMALARI (APPLICATION OF THE METHOD TO THE SAMPLE WALLS)

Bu bölümde bir önceki bölümde anlatılmış olan hesaplama yöntemi ile ilk olarak bir yığma duvarın (referans duvar) payandasız ve payandalı olması durumlarında dayanabileceği en büyük yatay deprem yükünü temsil eden c_{enb} katsayısı belirlenmiştir. İkinci örnek olarak ise Süleymaniye Camisinin kible duvarı göz önüne alınmıştır.

Uygulama 1: Bu uygulamada ele alınan payandasız yığma duvar Şekil 9a’da görüldüğü gibi 1 m boy, $t = 0,5$ m kalınlık ve $h = 6$ m yüksekliğe sahiptir. Hemen belirtilmelidir ki duvar yatay boyutunun 1 m alınması zorunluluğu yoktur. Duvar malzemesi için birim hacim ağırlığı olarak $\gamma = 20$ kN/m³ seçildiğinde duvarın toplam ağırlığı $W = 60$ kN olarak elde edilmektedir. Malzeme için elastisite modülü $E = 5,10^6$ kN/m² olarak alınmıştır. Duvarın üst kesitine herhangi bir düşey yükün etkilediği varsayılmıştır. Hesaplamalarda duvar ideal olarak 60 sonlu elemana bölünmüştür. Bu durumda ayrıklaştırma parametresi $\xi = h/nt = 6/(60 \times 0,5) = 0,20$ olmaktadır.

Payandalı yığma duvar ise Şekil 9b’de görüldüğü gibi yine 1 m boy, 0,5 m kalınlık, 6 m yüksekliğe, payandası ise 0,5 m duvar düzlemine paralel ve dik boyuta sahiptir. Bu duvar payandasız duvarla aynı malzeme özelliklerine sahiptir.

Payandalı yığma duvar için hesaba başlamadan önce Şekil 10a'da görülen payandalı yığma duvar kesiti, aynı atalet momentine sahip bir dikdörtgen kesite dönüştürülmüştür (Şekil 10b). Bu işlem sonucunda hesaplar eşdeğer dikdörtgen kesitli yığma duvar göz önüne alınarak yapılmıştır. Kesitlerle ilgili değerler Eş 19, Eş 20, Eş 21 ve Eş 22'deki gibidir.

$$y_G = 0,417 \text{ m} \quad (19)$$

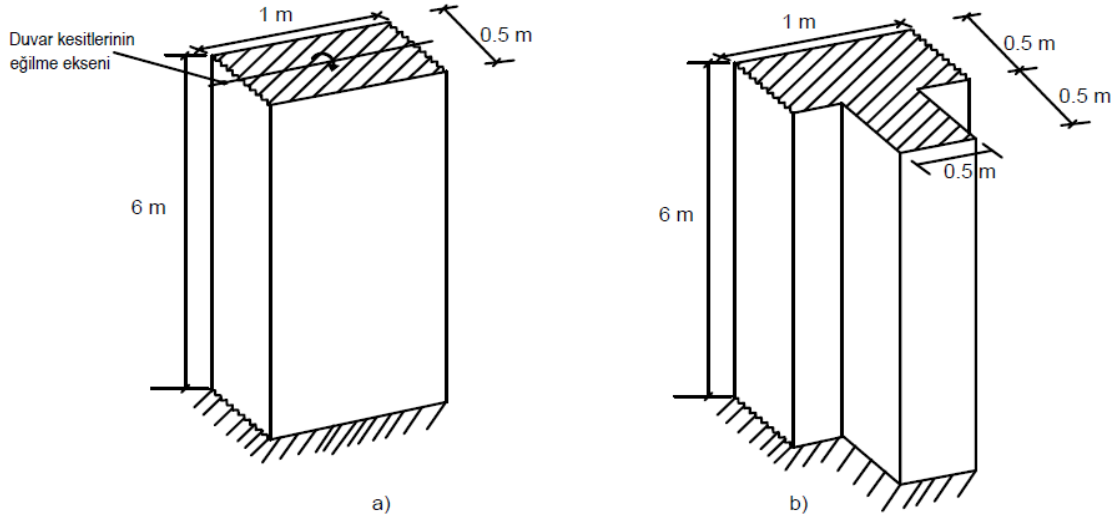
$$I_{pl} = 0,05729 \text{ m}^4 \quad (20)$$

$$I_{pl} = I'_{pl} = \frac{1 \times (t')^3}{12} = 0,05729 \text{ m}^4 \quad (21)$$

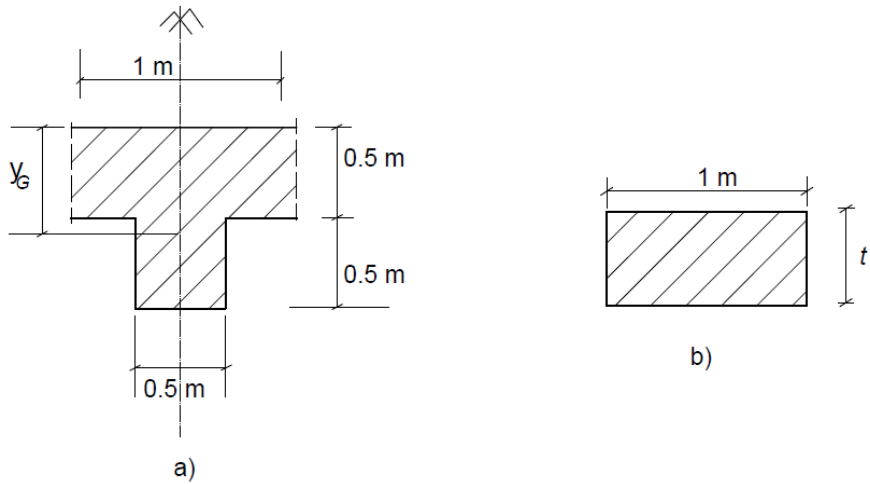
$$t' \cong 0,883 \text{ m} \quad (22)$$

Yukarıda birbirine eşit olan I_{pl} ve I'_{pl} payandalı duvarın ve eşdeğer dikdörtgen duvarın atalet momentleridir. Eşdeğer

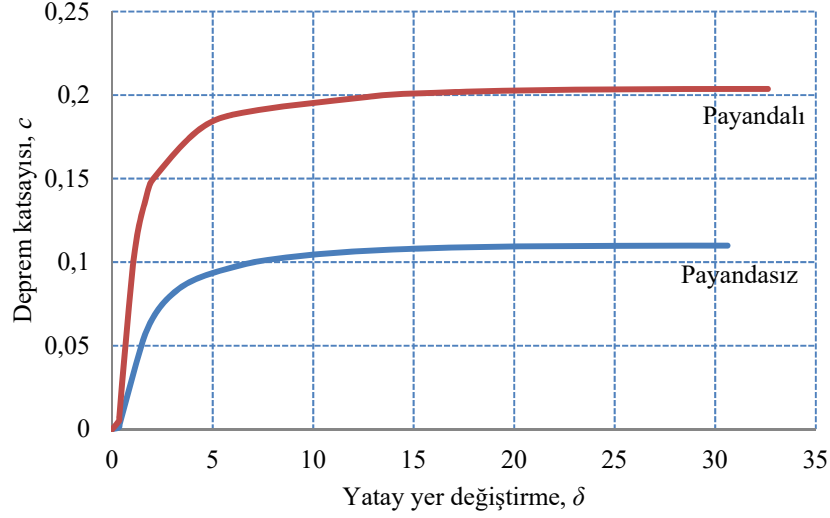
dikdörtgen kesitli yığma duvarın ağırlığı $W = 105,96 \text{ kN}$ 'dur ve hesaplamalarda bu duvar ideal olarak 34 sonlu elemana bölünmüştür. Duvar için bu eleman sayısı ile elde edilen ayrıklaştırma parametresi, payandasız duvarınki ile aynı değer olan $\xi = 0,20$ olmaktadır. Belirtilen bu değerler doğrultusunda yapılan hesaplar sonucunda payandasız ve payandalı duvarlar için Şekil 11'de gösterilen deprem katsayısı-yatay yer değiştirme ($c-\delta$) eğrileri elde edilmiştir. Bu grafiğe göre payandasız duvar için en büyük deprem katsayısı 0,110 ve buna karşı gelen yatay yer değiştirme 30,62 mm olarak, payandalı duvar için ise en büyük deprem katsayısı 0,204 ve buna karşı gelen yatay yer değiştirme 32,60 mm olarak hesaplanmıştır. Buna göre payandalı duvarın düzlemine dik deprem dayanımının payandasız duvara göre %85 daha yüksek olduğu görülmektedir. Duvarlar için toplam deprem kuvveti-yatay yer değiştirme ($F-\delta$) eğrileri ise Şekil 12'de gösterilmiştir. F kuvvetleri ters üçgen şeklinde dağılıma sahip yayılı yatay yüklemenin bileşkesi olarak $F = \sum_{j=1}^n f_j = \sum_{j=1}^n c_j \frac{W}{n}$ ifadesinden elde



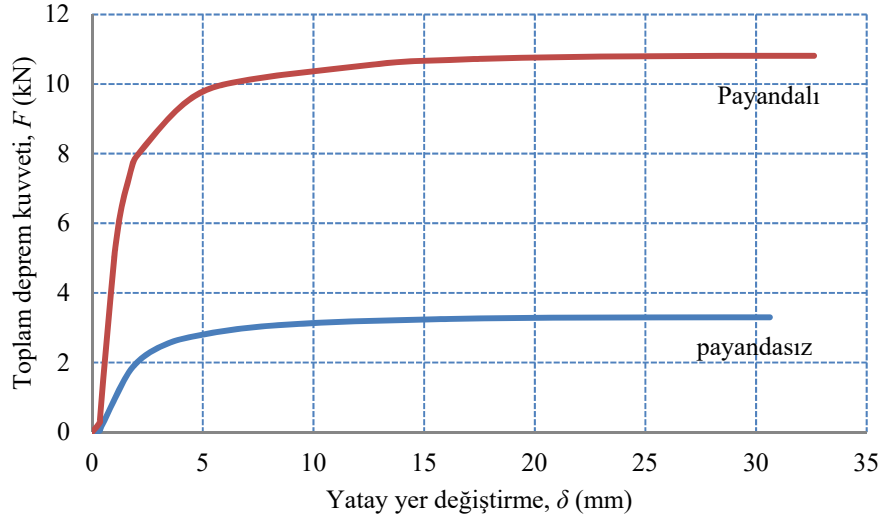
Şekil 9. a) Payandasız yığma duvar, b) Payandalı yığma duvar (a) plain masonry wall, b) buttressed masonry wall)



Şekil 10. a) Payandalı yığma duvar kesiti, b) Atalet momenti payandalı duvar kesitine eşit olan dikdörtgen kesit (a) cross-section of wall having buttress, b) rectangular section having equal moment of inertia to the buttressed wall cross-section)



Şekil 11. Payandasız ve payandalı yığma duvarların deprem katsayısı-yatay yer değiştirme eğrileri
(*c-δ* curves of plain and buttressed masonry walls)



Şekil 12. Payandasız ve payandalı yığma duvarının toplam deprem kuvveti-yer değiştirme eğrileri
(*F-δ* curves of plain and buttressed masonry walls)

edilmiştir. *c-δ* ve *F-δ* grafikleri esasta birbirinden farklı değildiler. Bununla birlikte *F-δ* grafikleri çizilerek duvarların dayanabileceği toplam yatay kuvvetin doğrudan görülebilmesi amaçlanmıştır. Hem *c-δ* hem de *F-δ* grafiklerinden açıkça görülmektedir ki; duvarların düzlemine dik deprem dayanımı üzerinde payandaların çok önemli bir katkısı olmaktadır.

Elde edilen sonuçların doğruluk düzeyi konusunda bir fikir edinmek için bu uygulamadaki payandalı duvar bir de ABAQUS programı [18] ile modellenip hesabı yapılmıştır.

Hesap duvarın 1) dikdörtgen kesitli eşdeğeri için ve 2) duvarın orijinal hali yani T kesitli hali için yapılmıştır. T kesit durumunda etkinin duvar ve payanda tarafından etkimesi ayrı ayrı düşünülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil

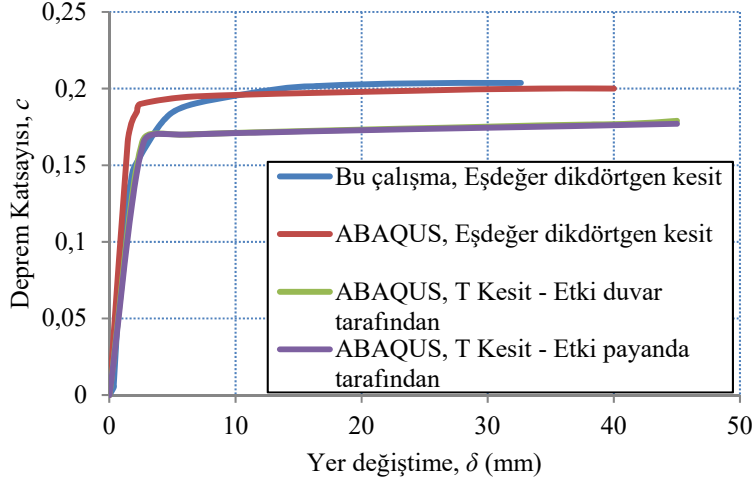
13'de bu çalışmanın yönteminin sonucuyla birlikte sunulmuştur. Görüldüğü gibi payandalı duvarın eşdeğer dikdörtgen kesitli bir duvar olarak alındığı durum için bu çalışmanın ve ABAQUS'ün sonuçları arasında çok iyi bir uyum vardır. Duvarın orijinal T kesitli hali için etkinin duvar ve payanda tarafından gelmesi durumlarında elde edilen sonuçlar neredeyse birbirleriyle çakışık durumdadır. Diğer taraftan T kesitli durum ve eşdeğer dikdörtgen kesit durumu arasında biraz fark olduğu görülebilmektedir. En büyük *c* deprem katsayıları arasındaki fark %11,5 civarındadır. Bu fark, kabul etmek gerekir ki çok küçük değildir. Ancak çok büyük de değildir.

Bu çalışmanın yöntemiyle elde edilen değerler sadece yaklaşık %10 mertebesinde daha büyüktür. Dolayısıyla, payandalı yığma duvarların düzlemlerine dik deprem

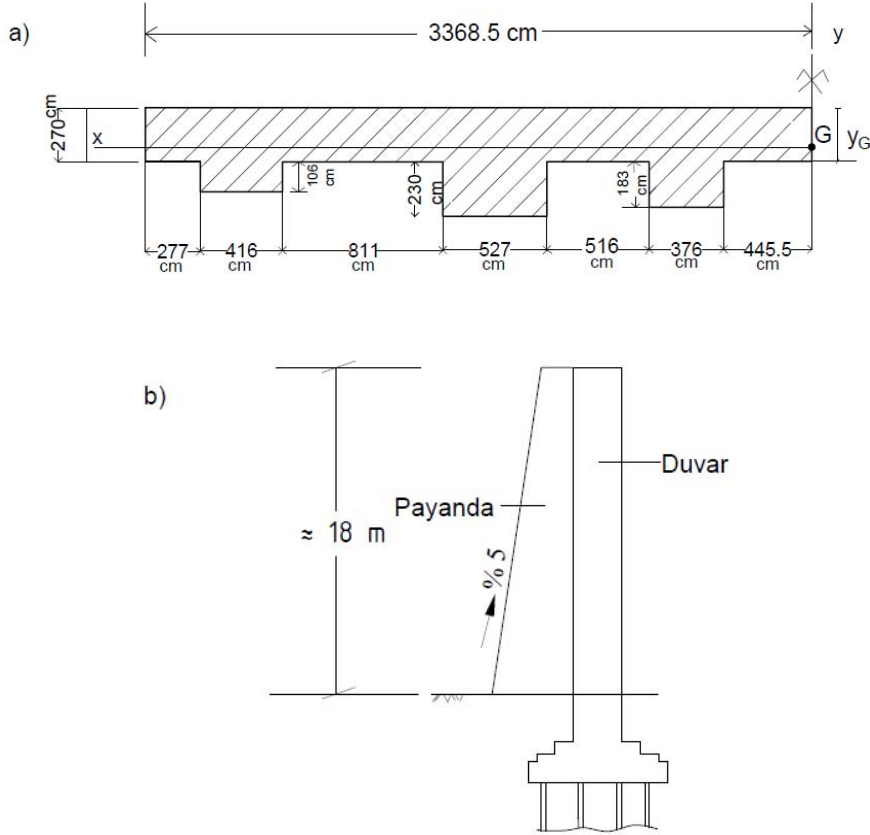
dayanımları konusunda sunulmuş olan bu çalışmanın sonuçları iyi bir yaklaşıklıkla sahiptir denebilir.

Uygulama 2: Bu örnekte ele alınacak Süleymaniye Camisinin (Şekil 1a) payandalı olan kible duvarının planı

Şekil 14a'da [19] boy kesiti ise Şekil 14b'de verilmiştir [20]. Duvarın kalınlığı yükseklik boyunca sabit, payandaların duvar düzlemine dik boy kesitinde ise boyutlar aşağıdan yukarıya doğru %5 eğimle azalmaktadır. Şekil 14'deki boyutlar zemin seviyesindeki boyutlardır. Hesapta



Şekil 13. Uygulama 1'deki duvar için mevcut çalışma ve ABAQUS programı ile elde edilen c - δ grafikleri (c - δ curves obtained by the present work and the ABAQUS program for the wall in application 1)



Şekil 14. a) Süleymaniye Camisinin payandalı olan kible duvarının planı (zemin seviyesi) [18, 19] b) Süleymaniye Camisinin payandalı olan kible duvarının boy kesiti (The plan of the buttressed qibla wall of the Süleymaniye Mosque (ground level) The elevation of the buttressed qibla wall of the Süleymaniye Mosque) [18, 19]

payandalar için taban kesiti ve üst kesit boyutlarının ortalaması kullanılmıştır. Süleymaniye Camisinin yapı taşı "Küfeki" dir. Bu taşın elastisite modülü $E = 24000 \text{ MPa}$ ve birim hacim ağırlığı $\gamma = 21,9 \text{ kN/m}^3$ değerleri [21] nolu referanstan alınmıştır. Bu referansta Küfeki taşına ait fiziksel ve mekanik özellikler ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir.

Bu uygulama için şu hususu belirtmekte yarar vardır: Caminin kible duvarı uçlarında düzlemine dik duvarlarla birleşik durumdadır. Bu nedenle, söz konusu dik duvarların kible duvarının düzlemine dik deprem dayanımı üzerinde belirli ölçüde etkisinin (katkısının) olacağı açıktır. Ancak burada ana amaç bir duvarı uçlarında kısıtlayan (tutan) dik duvarların değil, payandaların dayanım üzerindeki etkilerini belirlemek olduğundan, uçlardaki dik duvarlar hesapta dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla, bu uygulama için elde edilip sunulan bulgular bu durum dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Duvar kesitinin (Şekil 14a) y_G ve I_x değerleri Eş. 23'teki gibi hesaplanmıştır:

$$y_G = 196,57 \text{ cm}, I_x = 4,25 \times 10^{10} \text{ cm}^4 \quad (23)$$

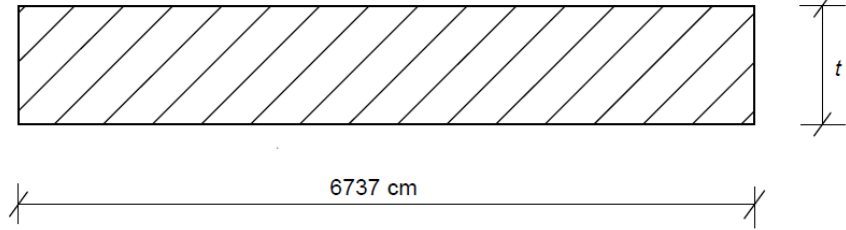
Atalet momenti yukarıda hesaplanan değere eşit olacak eşdeğer dikdörtgen duvarın t' kalınlık değeri Eş. 24'teki gibi belirlenmiştir (Şekil 15).

$$I_x = I_x' = \frac{67,37(t')^3}{12} = 330 \text{ m}^4 \rightarrow t' = 3,888 \text{ m} \quad (24)$$

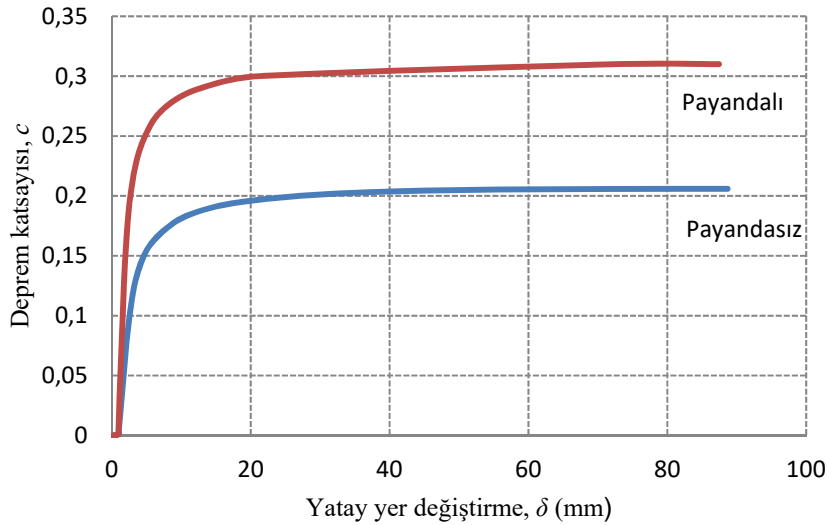
Yapılan hesaplar sonucunda elde edilen deprem katsayı-yatay yer değiştirme eğrisi ve toplam deprem kuvveti-yatay yer değiştirme eğrisi sırasıyla Şekil 16 ve Şekil 17 de gösterilmiştir. Bu şekillerde caminin duvarı yalın, yani payandasız olsaydı söz konusu olacak eğriler de gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi payandaların mevcudiyeti duvarın düzlemine dik deprem dayanımını çok belirgin şekilde artırmış olmaktadır. Ele alınmış olan bu örnek Mimar Sinan'ın inşa etmiş olduğu yapılarda estetik yanında emniyete de ne kadar önem verdiğini açıkça göstermektedir. Bu durum usta mimara saygı ve hayranlığımızı bir kat daha arttırmıştır.

4. PARAMETRİK İNCELEMELER (PARAMETRIC INVESTIGATIONS)

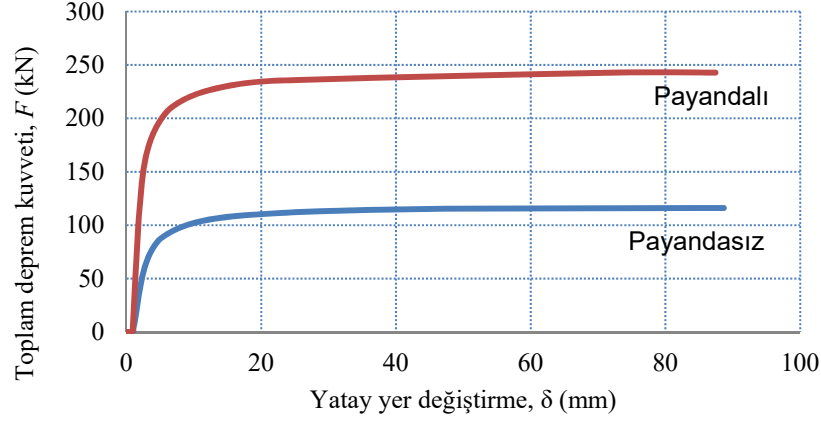
Bu bölümde geometri ve yüklemeye ait bazı parametrelerin payandalı yığma duvarların düzlemlerine dik deprem dayanımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İncelenen geometrik parametreler sırasıyla payandanın duvar düzlemine dik ve duvar düzlemine paralel boyutu, yükleme parametreleri ise duvar üst kesitine etkiyen düşey yükün duvar ağırlığına oranı ve bu yükün dış merkezlik değeridir.



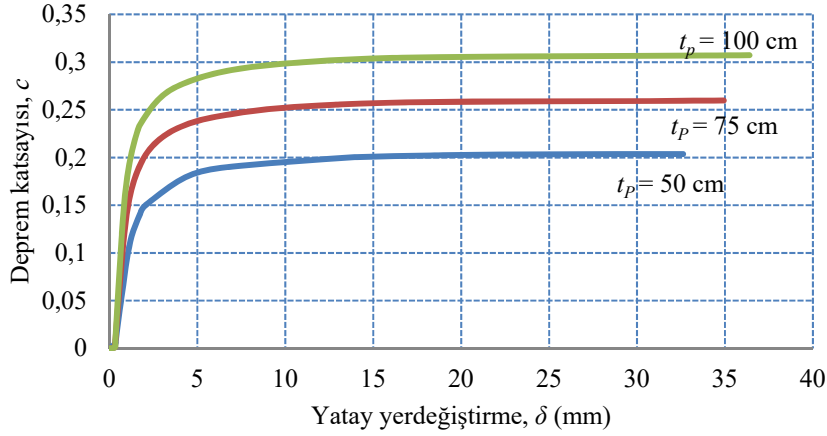
Şekil 15. Süleymaniye Camisinin kible duvarı kesiti ile eşit atalet momentine sahip olan dikdörtgen duvarın kesiti (Cross-section of the wall having equal moment of inertia with the cross-section of qibla wall of the Süleymaniye Mosque)



Şekil 16. Süleymaniye Camisinin kible duvarı için $c-\delta$ eğrileri ($c-\delta$ curves for the qibla wall of the Süleymaniye Mosque)



Şekil 17. Süleymaniye Camisinin kible duvarı için $F-\delta$ eğrileri ($F-\delta$ curves for the qibla wall of the Süleymaniye Mosque)



Şekil 18. Payandanın duvar düzlemine dik üç farklı boyutu için duvarın $c-\delta$ eğrileri
(The $c-\delta$ curves of the wall for three different sizes of the buttress perpendicular to dimension to the wall plane)

4.1. Payandanın duvar düzlemine dik boyutunun (t_p) etkisi (The effect of the buttress'perpendicular dimension to the Wall plane)

Bu parametrik incelemede Uygulama 1'de ele alınmış olan örnek payandalı yığma duvarda payandanın duvar düzlemine dik boyutu değiştirilerek elde edilen duvarlar için en büyük deprem katsayıları hesaplanmıştır. Şekil 18'de $t_p = 50, 75$ ve 100 cm duvar düzlemine dik payanda boyutları olan, sabit $b = 100 \text{ cm}$, $e_p/t = 0$, $E = 5,10^6 \text{ kN/m}^2$ ve $P = 0$ değerlerine sahip üç payandalı yığma duvar için elde edilen deprem katsayısı-yatay yer değiştirme eğrileri gösterilmektedir. Bu şekilden açıkça görülmektedir ki en büyük deprem katsayısı ve en büyük yatay yer değiştirme payandanın duvar düzlemine dik boyutunun büyümesiyle artmaktadır.

4.2. Payandanın duvar düzlemine paralel boyutunun (b_p) etkisi (The effect of the buttress'parallel dimension to the wall plane)

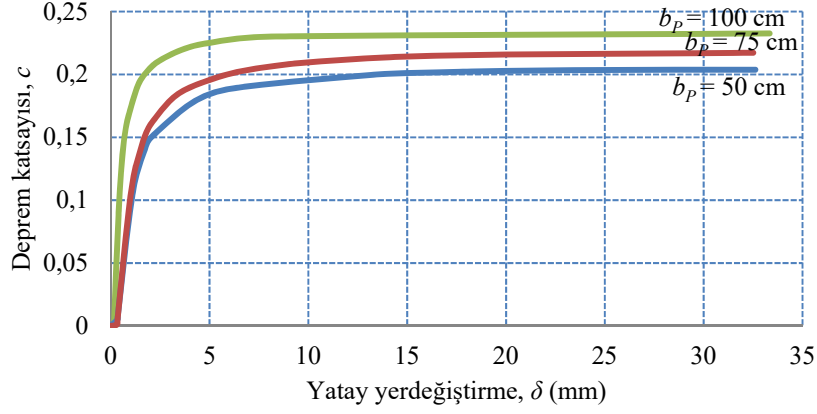
Payandanın duvar düzlemine paralel boyutunun etkisi $b_p = 50, 75$ ve 100 cm değerleri için incelenmiştir. Değişen bu boyutlara karşılık $b = 100 \text{ cm}$, $t = 50 \text{ cm}$, $e_p/t = 0$, $E = 5,10^6 \text{ kN/m}^2$ ve $P = 0$ değerleri sabit tutulmuştur. Bu üç farklı değere sahip payandalı yığma duvar için Şekil 19'da $c-\delta$

eğrileri gösterilmiştir. Eğrilerden görüldüğü üzere en büyük deprem katsayısı payandanın duvar düzlemine paralel boyutunun büyümesiyle artmaktadır. Öte yandan maksimum yatay yer değiştirme paralel boyutun artmasıyla çok küçük bir artış göstermektedir.

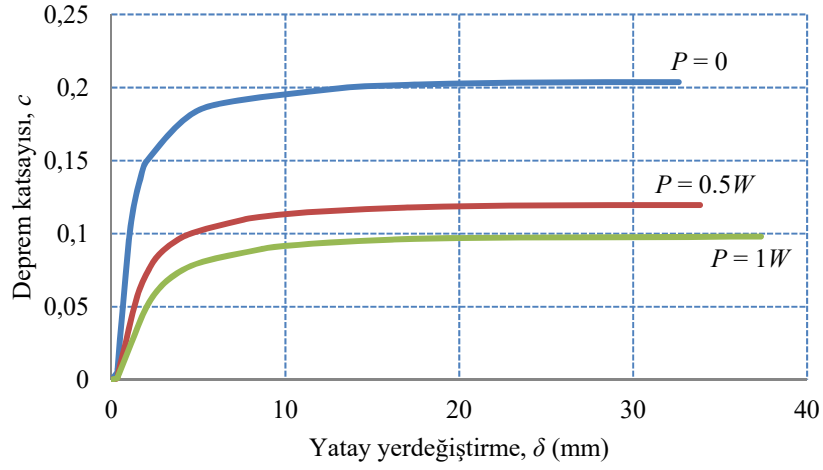
Şekil 18 ve Şekil 19 karşılaştırıldığında, payandanın duvar düzlemine dik boyutunun (t_p) duvarın düzlemine dik deprem dayanımı üzerinde, duvar düzlemine paralel boyutuna (b_p) göre, beklendiği gibi, daha etkili olduğu görülmektedir. Bunun, duvar toplam atalet momenti üzerinde payandanın duvar düzlemine dik boyutunun küpü ile gelen katkısından kaynaklandığı açıktır.

4.3. Düşey yükün (P) etkisi (Effect of vertical load)

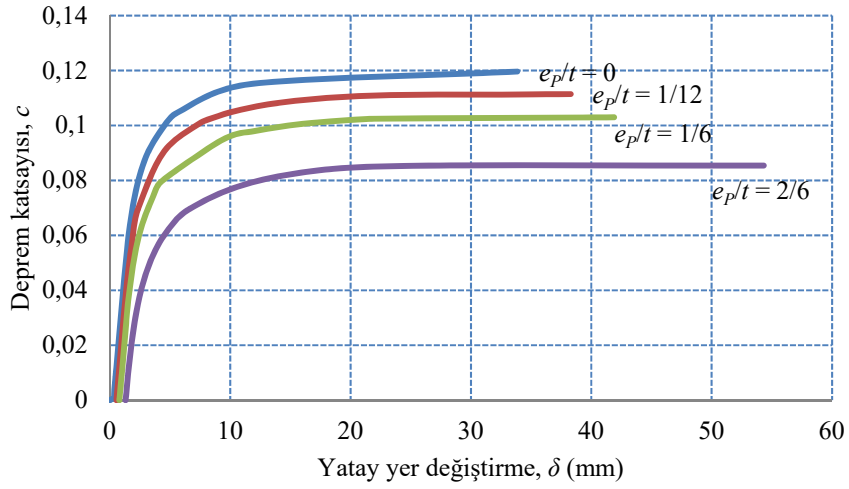
Şekil 20'de $t = 50 \text{ cm}$, $b = 100 \text{ cm}$, $e_p/t = 0$, $E = 5,10^6 \text{ kN/m}^2$ olan bir dikdörtgen payandalı yığma duvarın düşey yük/ağırlık oranının $P/W = 0, 0,5$ ve 1 gibi üç farklı değeri için yatay deprem katsayısı – yatay yer değiştirme eğrileri görülmektedir. Şekilden P/W oranı arttıkça en büyük deprem katsayısının azaldığı, buna karşılık yatay yer değiştirmenin biraz arttığı görülmektedir.



Şekil 19. Payandanın duvar düzlemine paralel üç farklı boyutu için duvarın c - δ eğrileri
(The c - δ curves of the wall for three different sizes of the buttress parallel dimension to the wall plane)



Şekil 20. Farklı P/W oranları için duvarın c - δ eğrileri (c - δ curves of the wall for different P/W ratios)



Şekil 21. Düşey yükün boyutsuz dışmerkezliğinin farklı değerleri için duvarın c - δ eğrileri
(c - δ curves of the wall for different values of the dimensionless eccentricity of the vertical load)

P düşey kuvveti bir deprem sırasında cP yatay kuvvetinin (Şekil 6b) oluşmasına yol açtığından sonuçta duvarın yatay deprem dayanımını düşürmektedir. cP kuvvetinin duvar tabanına göre önemli büyüklükte bir devirme momenti oluşturacağı açıktır.

4.4. Düşey yükün dışmerkezliğinin (e_p/t) etkisi (Effect of the eccentricity of vertical load)

$t = 50 \text{ cm}$, $b = 100 \text{ cm}$, $E = 5,10^6 \text{ kN/m}^2$ ve $P = 0,5W$ olan dikdörtgen payandalı yığma duvar için tepe düşey yükü P 'nin dışmerkezlik değeri e_p 'nin boyutsuz değerleri $e_p/t = 0, 1/12, 1/6$ ve $2/6$ için elde edilen deprem katsayısı-yatay yer değiştirme ($c-\delta$) eğrileri Şekil 21'de çizilmiştir. Bu şekilden e_p/t 'nin büyük değerlerine gidildikçe en büyük deprem katsayısının azaldığı, öte yandan en büyük yatay yer değiştirmenin arttığı görülmektedir. Bunun, büyük e_p/t değerine sahip P yüklerinin duvarda depresiz durumda dahi büyük eğilme momentleri oluşturmasından kaynaklandığı söylenebilir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Tarihi yapılar insanlığın ortak mirası olarak kabul edilen özellikte yapılardır. Günümüze güvenle ulaşabilmiş olan tarihi yapıların çoğunun malzemesinin taş ve tuğla olduğu görülmektedir. Büyük tarihi camiler ve katedraller gibi bazı özel tarihi yapılarda, o yapıların mimari özelliklerinden dolayı yapı cephelerindeki duvarlar yüksek duvarlar olarak oluşturulmuştur. Bu tür yapılardaki duvarların düzlem dışı eğilme ve kesme dayanımlarının yeterli düzeyde olması için çoğunlukla payandalı olarak inşa edilmiş oldukları görülmektedir. Bu nedenle payandalar yüksek duvarlara sahip yığma yapılarda önemli bileşenlerdir.

Payandalı tarihi yapılarda genel olarak duvarlar ile payandalar etkiyen yüklemeler altında birlikte çalışmakta, diğer bir deyişle kuvvetli bir etkileşim içinde bulunmaktadır. Çünkü bu tür yapılarda payandalar yapının duvar dokusu ile birlikte oluşturulmuş, yani örülmüş haldedir. Dolayısıyla, böyle yapılar için yalnızca payandaları değil, duvar-payanda birlikteliğini dikkate alan çalışmaların anlamlı olabileceği söylenebilir.

Bu çalışmada La Mendola ve Papia (1993) tarafından yığma duvarların stabilite analizleri için geliştirilmiş olan bir hesap modeli ve yöntemi benimsenmiştir. Söz konusu model ve yöntem kullanılıp, bir yük artımı işlemi uygulanarak örnek payandalı ve payandasız yüksek duvarların düzlemlerine dik deprem dayanımları yaklaşık olarak belirlenmiştir. Göz önüne alınmış olan bir referans duvar üzerinde yapılan hesaplar, duvarın payandalı olması durumunda düzlemine dik deprem dayanımının, payandasız olması durumundakine göre yaklaşık %85 daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu duvarın ayrıca ABAQUS programı ile de hesapları yapılmıştır. ABAQUS ve bu çalışmadaki yöntem ile elde edilen sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Bu durum sunulan çalışmadaki yöntemle payandalı yüksek yığma duvarların düzlemlerine dik deprem

dayanımlarının iyi bir yaklaşıklıkla belirlenebileceğini ortaya koymuştur.

Çalışmada ayrıca bazı parametrik incelemeler yapılmıştır. Bu incelemeler göstermiştir ki;

- Payandanın duvar düzlemine dik boyutu duvar düzlemine paralel boyutuna göre, duvarın düzlemine dik deprem dayanımı üzerinde daha etkili olmaktadır. Bu, duvar kesiti atalet momenti üzerinde payandanın duvar düzlemine dik boyutunun küpü ile gelen katkısından kaynaklanmaktadır,
- Duvar üst kesitine etki eden düşey yükün ve/veya bu yükün dış merkezlik değerinin artması duvarın deprem dayanımı azalmaktadır.

Gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edebilmek için hesapta dikkate alınmış olan duvar kesitinin olduğu gibi, yani bir T kesit olarak göz önüne alınması gerekir. Ayrıca trapez payandalı ve kademeli payandalı duvarlar da bazı tarihi yapılarda görülmektedir. Dolayısıyla bu tür payandalı yığma duvarların düzlemlerine dik deprem dayanımlarının araştırılması çalışılabilecek diğer konulardır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bayraktar A., Tarihi Yapıların Analitik İncelenmesi ve Sismik Güçlendirme Metodları, Beta Basım Yayım Dağıtım A. Ş., 1693, İstanbul, 2006.
2. <http://emebis.me/?q=http://emebis.blogspot.com.tr>. Erişim tarihi Eylül, 2015.
3. <http://spanishshilling.blogspot.com.tr>. Erişim tarihi Eylül, 2015.
4. <http://ahsenokyar.com>. Erişim tarihi Eylül, 2015
5. De Lorenzis L., Dimitri R., and Ochsendorf J., Structural Study of Masonry Buttresses: The stepped From, Structures and Buildings, ICE Publishing, 165, 9, 499-522, 2012.
6. De Lorenzis L., Dimitri R., and Ochsendorf J., Structural Study of Masonry Buttresses: The Trapezoidal From. Structures and Buildings, ICE Publishing, 165, 9, 483-498, 2012.
7. Huerta S., The Safety of Masonry Buttresses, Proceeding of the ICE- Engineering History and Heritage, 163, 1, 3-24, 2010.
8. Ochsendorf J., A., Hernando J.I., and Huerta S., Collapse of Masonry Buttresses, Journal of Architectural Engineering, ASCE, 10, 3, 88-97, 2004.
9. Ochsendorf J., and De Lorenzis L., Failure of Rectangular Masonry Buttresses under Concentrated Loading, Structures and Buildings, ICE Publishing, 161, 5, 265-275, 2008.
10. Makris N., and Alexakis H., Limit Equilibrium Analysis of Masonry Buttresses and Towers under Lateral and Gravity Loads, Archieve of Applied Mechanics, Vol. 85, Issue 6: DOI 10. 1007/s00419-015-1027-2, 2015.
11. Nikolinakou M. A., Tallon A. J., and Ochsendorf J. A., Structure and Form of Early Gothic Flying Buttresses, Revue Europeenne de Genie Civil, 9, 9-10, 1191-1217, 2005.

12. Paulay T., and Priestley MJN., Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley and Sons, Inc., USA, 1992.
13. Deprem Yönetmeliği 2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007.
14. La Mendola L., and Papia M., Stability of Masonry Piers under Their Own Weight and Eccentric Load. Journal of Structural Engineering, ASCE, 119, 6, 1678-1693, 1993.
15. Seames A.E., and Conway H.D., A Numerical Procedure for Calculating the Large Deflections of Straight and Curved Beams, Journal of Applied Mechanics Trans. ASME, 79, 24, 289-94, 1957.
16. Frisch-Fay R., Flexible Bars. Butter Worths, London, 1962.
17. La Mendola L., Papia M., and ZINGONE G., Stability of Masonry Walls Subjected to Seismic Transverse Forces, Journal of Structural Engineering, ASCE, 121, 11, 1581-1587, 1995.
18. ABAQUS Version 6.14 documentation, 2003.
19. Şanlıurfa Vakıflar Genel Müdürlüğü.
20. Arıoğlu E., and Anadol K., On the Earthquake Resistance of the Süleymaniye Mosque (İstanbul) in the Historical Perspective (1557-1973), Proceedings of 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, 1973.
21. Arıoğlu N., and Arıoğlu E., Engineering Mystery of Master Architect Sinan's "Küfeki" Shell Limestone, Architectural Science, Review, 48, 163-172, 2005

