

Payandalı Yüksek Yiğma Duvarların Düzlemlerine Dik Deprem Etkileri Altında Yaklaşık Analizi

Rabia İzol, M. Arif Gürel, R. Kadir Pekgökgöz

Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

e-posta: rabiaizol@harran.edu.tr, agurel@harran.edu.tr, recepkadir@harran.edu.tr

Geliş Tarihi: 27.03.2017

Kabul Tarihi: 14.04.2017

Özet

Bu çalışmada tarihi mimaride yaygın olarak kullanılmış olduğu görülen yiğma payandalar ve payandalı duvarların düzlemlerine dik deprem dayanımları ele alınmıştır. İlk önce bir literatür özeti verilmiştir. Daha sonra payandalı duvarların deprem etkileri altında hesabı için kullanılan yöntemden bahsedilmiştir. Yöntem örnek bir duvar modeli üzerinde uygulanıp, bu duvarın payandasız ve çeşitli boyutlarda payandalı olması durumları için düzlemine dik deprem dayanımı belirlenmiştir. Hesap sonucunda duvarın payandalı olması durumlarında dayanımının beklendiği gibi daha yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Payanda; Yiğma duvar; Düzlem dışı deprem dayanımı

An Approximate Analysis of Buttressed High Masonry Walls Under Out-of-plane Seismic Effects

Abstract

In this study, the out-of-plane seismic resistance of masonry buttresses and buttressed walls, widely used in the historical architecture, has been investigated. Firstly, a literature summary is given. Then, the method used for the calculation of buttressed walls under seismic forces is mentioned. The method has been applied to a sample wall model and the out-of-plane seismic resistance was determined for the cases of plain wall and wall having buttresses of various sizes. As a result of the calculations, it was found out that, as expected, the strength of the wall is higher in case of the existence of buttresses.

Key words: Buttress; Masonry wall; Out-of-plane seismic resistance

1. Giriş

Betonarme ve çelik malzemelerin kullanımından önce insanoğlunun elindeki malzemeler ahşap ve yiğma (kagir) yapı malzemeleri olan taş, tuğla ve kerpiç idi. Günümüze ulaşmış olan tarihi yapılara bakıldığında başlıca malzemelerin taş ve tuğla olduğu görülmektedir. Bu malzemelerle oluşturulmuş olan bina türü yapılarda (konut, ibadet yapısı, okul gibi) duvarlar ve bunları destekleyen elemanlar olan payandalar ana bileşenler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Literatüre bakıldığında hem tarihi yapı hem de modern yapı yiğma duvarları ile ilgili çok sayıda çalışma görülmektedir. Duvarların düzlem içi (in-plane) ve düzlem dışı (out-of-plane) davranış ve dayanımı ile ilgili çalışmalar ön plandadır. Tarihi yapı

duvarları için destek elemanı görevi yapan payandalarla ilgili çalışmalara da rastlanmaktadır. Ancak bunların sayısı sadece duvarlarla ilgili olanlara göre çok daha azdır. Aşağıda ele alınacağı gibi mevcut olanlar da çoğunlukla payandaların üst bölümlerine yakın bir düzeyde etkiyen eğik bir tekil kuvvet altında davranış ve dayanım üzerinde yoğunlaşmıştır. Halbuki deprem bölgelerindeki her tür yapı gibi tarihi yapılar için de en önemli yüklerden biri deprem esnasında söz konusu olan yüklerdir. Bu yükler yayılı özellikte olan yatay ve düşey atalet (ivme-tepki) kuvvetleridir. Dolayısıyla, payandaların bu açıdan da incelenmesi gerektiği açıktır. Bu çalışmada sabit dikdörtgen kesitli payandaları olan yüksek yiğma duvarların düzlemlerine dik deprem etkileri altında dayanımları araştırılmıştır. Sayısal bir hesap

yöntemi kullanılarak, deprem etkilerine eşdeğer statik yatay kuvvetler altında yaklaşık bir hesap yapılmıştır.



Şekil 1. Haliç' ten Süleymaniye Camisinin ve payandalı kible duvarının görünüşü [1]

2. Önceki Çalışmalar

Giriş kısmında da belirtilmiş olduğu gibi yiğma payandalar ve payandalı yiğma duvarlar ile ilgili çalışma sayısı çok azdır. Burada literatürde mevcut olan çalışmalar gözden geçirilecektir.

Ochsendorf ve diğerleri [2] yiğma payandaların göçme davranışını incelemişlerdir. İncelemelerini payandanın üst bölümüne yakın ve yan yüzlerinden birine etkileyen tekil yatay ve düşey yükler etkisindeki sabit dikdörtgen kesitli payandalar üzerinde yapmışlardır. Payanda malzemesini basınçta ezilmeyecek kadar dayanımı yüksek, çekme dayanımı olmayan sürekli bir ortam olarak ele alıp, kayma ihtimalini de yok sayarak tipik payanda formları için göz önüne alınan yükleme altında çatlak biçimini elde edip göçme yükünü belirlemişlerdir. Çatlağın genel olarak eğik tekil yük uygulanmış olan payanda yüzünden tabana doğru ilerleyen yaklaşık doğrusal bir biçimde olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca yiğma payandaların devrilme analizleri için genel metotlar önerip, payandaların güvenlik düzeylerinin belirlenmesi için yöntemler sunup irdelemişlerdir.

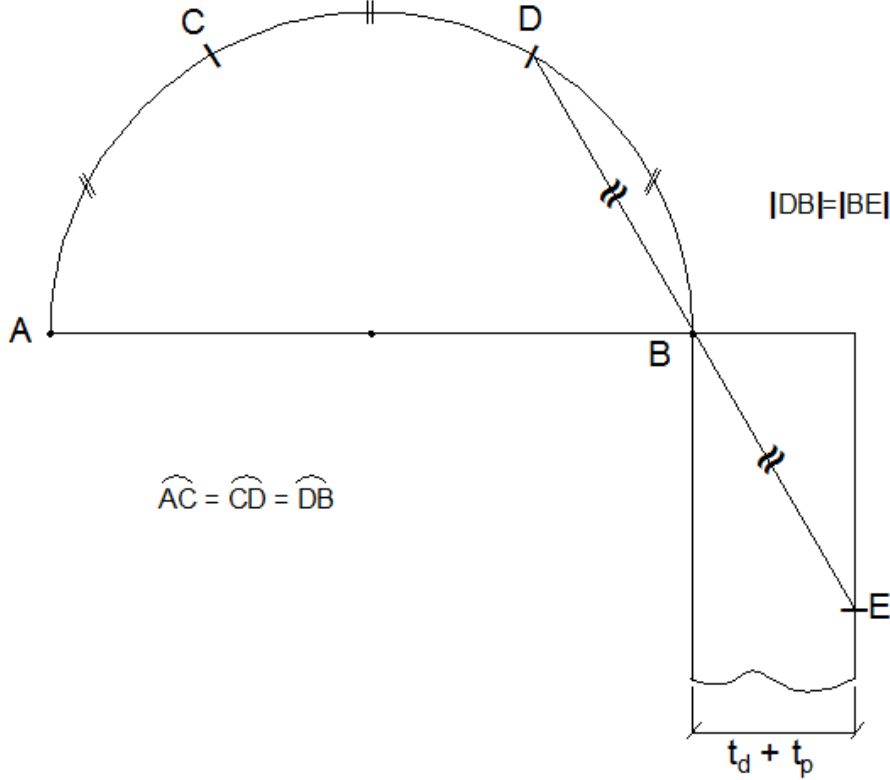
Nikolinakou ve diğerleri [3] erken Gotik dönemi uçan payandalarının (flying buttresses) yapısal işlevlerini ve etkinliklerini klasik limit analiz yöntemini kullanarak ele almışlardır. Uçan payandaların uzunluk, iç kemer eğriliği, kalınlık ve eğilim gibi farklı biçimsel karakteristiklerinin önemi yanında kayma ve mesnet hareketi gibi muhtemel göçme şekillerini parametrik olarak ve bir dizi Gotik payandası dikkate alarak incelemişlerdir.

Ochsendorf ve De Lorenzis [4] dikdörtgen yiğma payandaların tekil yükleme altında göçmesi üzerinde çalışmışlardır. Modeller üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinin sonuçları bu konuda Ochsendorf ve diğerlerinin [2] çalışmasındaki analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, yiğma payandaların güvenliği üzerinde kayma, sınırlı basınç dayanımı ve eğiklik (şakülde ayrılma) gibi parametrelerin etkisini de incelemişlerdir.

Huerta [5] çalışmasında payanda tasarımının gelişimini tarihsel bir çerçevede ele almıştır. Özellikle Gotik mimarisinde payandaların nasıl boyutlandırıldığı üzerinde ayrıntılı olarak durmuştur. Bu bağlamda, örneğin beşik tonoz ile örtülmüş bir katedralde, tonozu taşıyan duvar +

payanda sisteminde toplam kalınlığın şu şekilde belirlendiğini aktarmıştır (Şekil 2): Öncelikle tonoz kesitini, ki bu bir kemer olacaktır, üç eşit yaya bölen noktalar belirlenir. Daha sonra bu noktalardan biri

ile kemerin mesnet noktasını birleştiren doğru parçası aynı uzunlukta kendi doğrultusunda dışa doğru uzatıldığında duvar + payanda sisteminin dış kenarı elde edilmiş olmaktadır.



Şekil 2. Gotik mimarisinde duvar + payanda toplam kalınlığının belirlenişi (Huerta, 2010)

Huerta [5] ayrıca modern yiğma payanda analizindeki son durumu özetleyip, payandaların güvenlik belirleme yöntemlerini de irdelemiştir.

De Lorenzis ve diğerleri [6,7] ilk olarak kademeli daha sonrada trapez biçimli yiğma payandaların yapısal analizini oldukça ayrıntılı bir şekilde ele almışlardır. Bu çalışmalarında söz konusu payanda tiplerinin göçme yüklerini, onları çekme dayanımı olmayan sürekli birer ortam gibi düşünerek analitik olarak belirlemeye çalışmışlardır.

Makris ve Alexakis [8] yiğma payandaların ve kulelerin yatay ve düşey (yer çekimi) yükleri altında limit denge analizini yapmışlardır. Payandalar açısından incelemeleri genel olarak yukarıdaki çalışmalara benzerdir. Ancak sıfır çekme dayanımının payandalar için fiziksel olarak anlamlı olup olmadığını irdelemek yanında, bodur yiğma payandaların üst kesitinin bir tarafında etkiyen eğik

bir tekil yük etkisi altında kayma göçmesini de incelemiştir.

Ülkemizdeki kaynaklara bakıldığında ise tarihi yapılardaki payandalarla ilgili çok az bilgiye rastlanmaktadır. Örneğin "Mimar Sinan'ın Yapılarında Yapım Teknikleri ve Malzeme" [9] başlıklı çalışmasında Zeynep Ahunbay, duvarlar, sütunlar ve ayaklar yanında payandalardan bahsederken, çalışmasının başlığından da anlaşılacağı üzere payandaların sadece biçim ve dokusundan (örgü yapısından) bahsetmiştir.

Görüldüğü gibi yiğma payandalar konusunda yapılmış olan çalışmalar, yiğma yapıların bütünü dikkate alındığında yapılmış olan çalışmalara oranla çok çok azdır. Yukarıda belirtilmiş olan çalışmaların çoğu da payandaların eğik bir yük etkisi altında davranışının anlaşılması ve dayanımının belirlenmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Payandaların

deprem etkileri altında davranış ve dayanımı ile ilgili bir çalışmaya rastlanamamıştır. Buradan motive olunarak, payandalı duvarların düzlemlerine dik deprem dayanımlarının incelenmesinin çalışmaya değer konu olduğu görülmüş ve bu çalışmada bu konu ele alınmıştır.

3. Materyal ve Yöntem

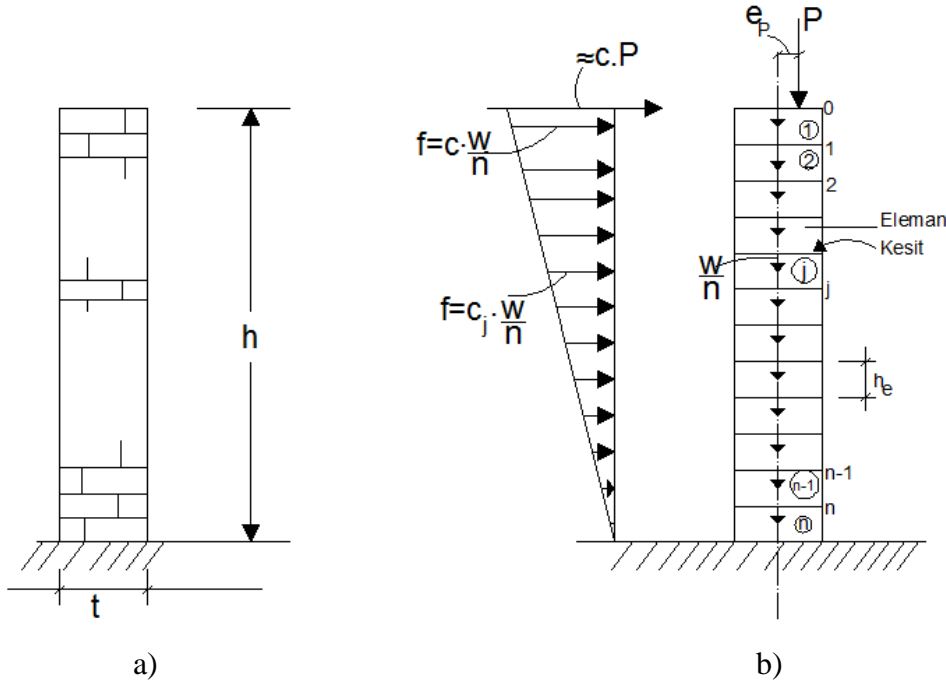
Payandalar yüksek duvarlara sahip yiğma yapılarda önemli bileşenlerdir. Bu bölümde payandalı yiğma duvarların düzlemlerine dik deprem etkileri altında dayanımlarını belirlemek için kullanılacak hesap yöntemi kısaca anlatılacaktır. Yöntemin kullanımı ile payandalı duvar ile birlikte payandasız duvar da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

Düzenli aralıklarla payandaları olan uzun bir yiğma duvarda, duvarın bir payandayı içeren herhangi bir dilimi dikkate alındığında bu dilimin kesitinin bir T kesit olacağı açıktır. Çekme almayan malzemeden

oluşturulmuş bir T kesit ile hesap yapmanın zorluğundan dolayı, hesap yapılırken bu kesit ile eşit atalet momentine sahip bir dikdörtgen kesit göz önüne alınacaktır. Ayrıca, dinamik özellikte olan deprem etkilerine eşdeğer statik yükler dikkate alınacaktır. Bu söylenenlerden dolayı elde edilecek sonuçların makul ancak yaklaşık sonuçlar olacağı belirtilmelidir.

3.1. Hesap Yöntemi ve Duvarın Modellenmesi

Bu çalışmada La Mendola ve Papia'nın [10] yiğma duvarların kendi ağırlıkları ve dış merkez düşey tepe yükü etkisi altında kararlılık problemlerini incelemek için geliştirdikleri sayısal hesap yöntemi kullanılmıştır. Yöntem göz önüne alınan düşey taşıyıcı elemanın hesap için sonlu sayıda alt elemana bölünmesini (ayrıklaştırılmasına) esas alır. Yöntemin ayrıntıları ilgili kaynakta ve İzol' da [11] anlatılmıştır. Şekil 3' de eşdeğer duvarın geometrisi, yükleme durumu ve ayrıklaştırılmış hali görülmektedir.



Şekil 3. a) Sabit kesitli duvarın geometrisi, b) Duvarın hesap için elemanlara bölünmüş hali ve yükleme durumu

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 dış merkezlik değerini göstermektedir. W/n ağırlıkları

elemanların kütle merkezlerinden etkimektedir. Deprem etkisi Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ile göz önüne alındığında Şekil 3 b)'de görüldüğü gibi deprem yükü ters üçgen şekilli bir yükleme olarak duvara etkilmiştir. Bu yükleme

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

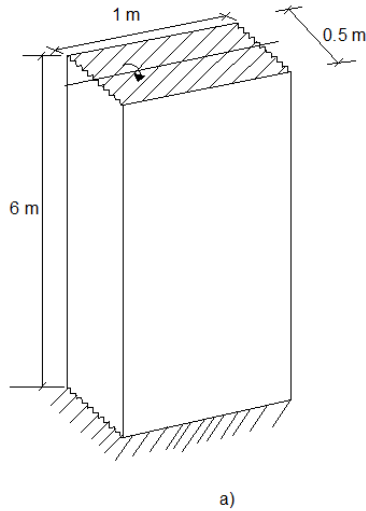
fonksiyonu ile ifade edilebilir. Bu ifadedeki c deprem yüklemesinin büyüklüğünü ifade eden "deprem katsayısını" göstermektedir. Duvarın j . elemanı göz önüne alındığında bu elemana etkiyen W/n ve $c_j.W/n$ kuvvetlerinin elemanın kütle merkezine etkidiklerine dikkat edilmelidir.

Hesapta amaç deprem etkilerinin şiddetini temsil eden c deprem katsayısına karşı eşdeğer duvarın üst kesitinin δ yatay yer değiştirmesi eğrisini çizip, buradan duvarın dayanabileceği en büyük deprem yükünü gösteren c_{max} değerini elde etmektir. Bu yapılırken küçük bir c değeri ile hesaba başlanıp, ardışık bir yaklaşım tekniği kullanılarak duvarı göçme durumuna getirecek c değerine (c_{max}) değerine ulaşılır.

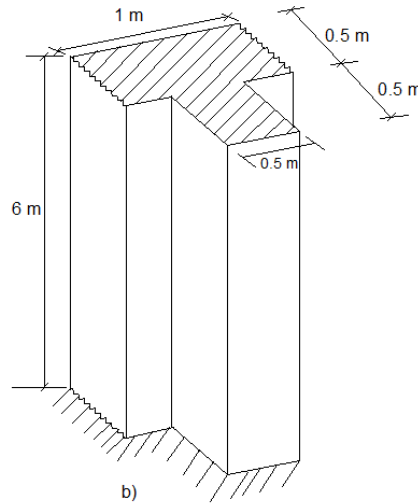
3.2. Yöntemin Uygulanması

Bu bölümde bir önceki bölümde özetle anlatılmış olan hesaplama yöntemi ile bir yığma duvarın payandalı ve payandasız olması durumlarında dayanabileceği en büyük yatay deprem yükünü temsil eden c_{max} katsayısı belirlenmiştir. Ele alınan payandasız yığma duvar Şekil 4 a' da görüldüğü gibi 1 m boy, 0.5 m kalınlık ve 6 m yüksekliğe sahiptir. Duvar malzemesi için birim hacim ağırlığı $\gamma = 20$ kN/m³ olarak seçildiğinde duvar toplam ağırlığı $W = 60$ kN olarak elde edilmektedir. Duvarın üst kesitine herhangi bir düşey yükün etkilediği varsayılmıştır. Hesaplamalarda duvar ideal olarak 60 sonlu elemana bölünmüştür ve elastisite modülü $E = 5.10^3$ N/mm² olarak alınmıştır.

Payandalı yığma duvar ise Şekil 4 b' de görüldüğü gibi 1 m boy, 0.5 m kalınlık, 6 m yüksekliğe, payanda ise 0.5 m genişliğe ve 0.5 m kalınlığa sahiptir.



Şekil 4. a-) Payandasız yığma duvar



b-) Payandalı yığma duvar

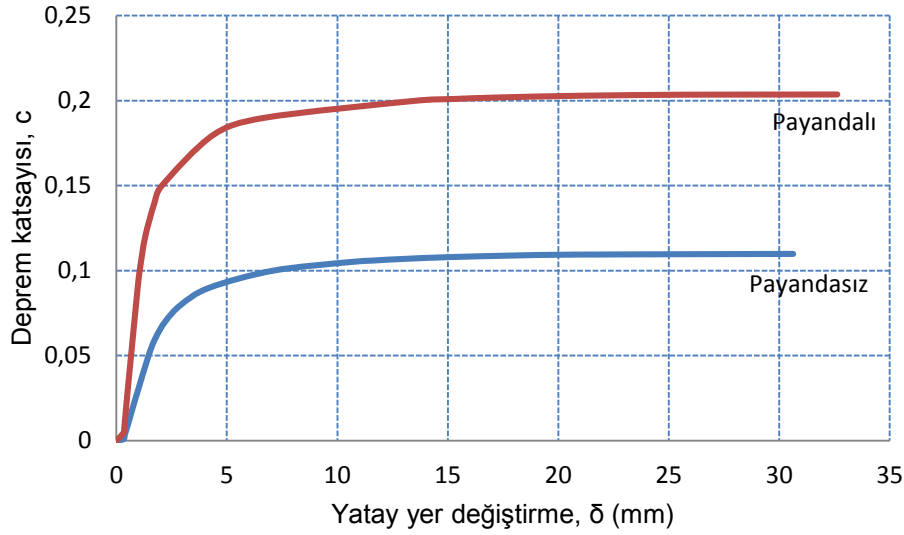
Belirtilen bu değerler doğrultusunda yapılan hesaplama sonucunda payandasız ve payandalı duvarlar için Şekil 5' de gösterilen deprem katsayısı-yatay yer değiştirme ($c-\delta$) eğrileri elde edilmiştir. Bu

grafiğe göre payandasız duvar için en büyük deprem katsayısı 0.110, buna karşılık gelen yer değiştirme 30.62 mm, payandalı duvar için en büyük deprem katsayısı 0.204, buna karşılık gelen

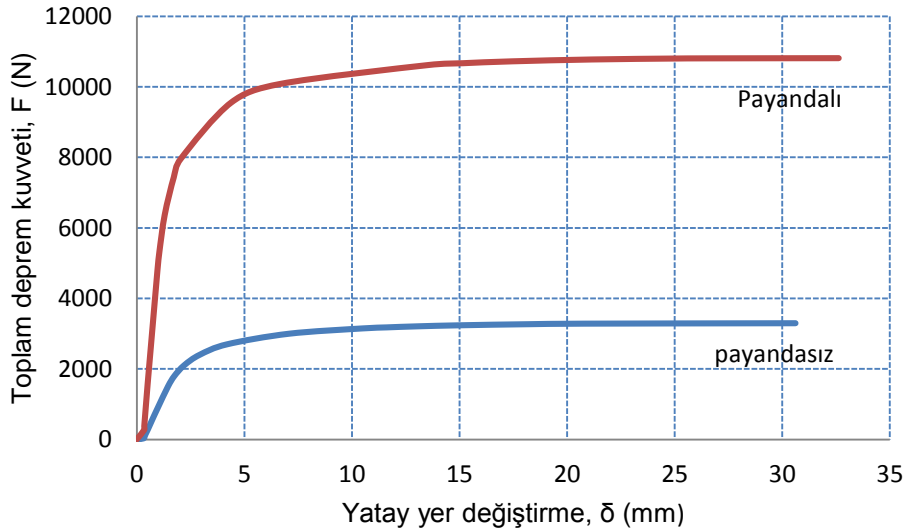
yer değiştirme 32.62 mm ve olarak hesaplanmıştır. Buna göre payandalı duvarın düzlemine dik deprem dayanımının payandasız duvara göre yaklaşık %85 daha yüksek olduğu görülmektedir.

Göz önüne alınan payandasız ve payandalı yığılma duvarlar için toplam deprem kuvveti-yatay yer değiştirme ($F-\delta$) eğrileri ise Şekil 6' da gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Hem $c-\delta$ hem de $F-\delta$ grafiklerinden payandanın mevcudiyetinin duvarın düzlemine dik deprem dayanımı üzerinde ne kadar olumlu bir katkısının olduğu açıkça görülmüş olmaktadır. Bu yüzden Türk-İslam ve Avrupa mimarisinde şaheserler oluşturmuş olan usta mimarların yapılarında yüksek duvarları payandalarla desteklemiş olmalarının bir rastlantı değil tamamen bilinçli olduğu söylenebilir.



Şekil 5. Payandasız ve payandalı yığılma duvarların deprem katsayısı-yatay yer değiştirme eğrileri



Şekil 6. Payandasız ve payandalı yığılma duvarının toplam deprem kuvveti-yer değiştirme eğrileri

Sonuçlar

Sunulan çalışmada, tarihi mimaride önemli bileşenlerden olan payandalar ve payandalı yığılma duvarların düzlemlerine dik deprem etkileri altında dayanımları üzerinde durulmuştur. Sayısal bir hesap yöntemi kullanılarak payandalı duvarların yaklaşık deprem hesabının nasıl yapılacağı anlatılmış, yöntem

payandalı ve payandasız örnek yığılma duvarlara uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar payandaların yığılma duvarların düzlemlerine dik deprem dayanımları üzerinde beklendiği gibi çok olumlu katkılarına olduğunu göstermiştir. Hesapta dikkate alınan dilimin olması gerektiği gibi T kesit olarak ve deprem çözüm

yönteminin de dinamik yöntem olarak ele alınması daha sağlıklı sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.

Kaynaklar

- [1]. <http://www.kadimdostlar.com>
- [2]. Ochsendorf, J., A., Hernando, J. I., and Huerta, S., "Collapse of Masonry buttresses", Journal of Architectural Engineering, ASCE, Vol, 10, No. 3: 88-97, 2004.
- [3]. Nikolinakou, M. A., Tallon, A. J., and Ochsendorf, J. A., "Structure and Form of Early Gothic Flying Buttresses", Revue Europeenne de Genie Civil, Vol. 9, No. 9-10:1191-1217, 2005.
- [4]. Ochsendorf, J., and De Lorenzis, L., "Failure of Rectangular Masonry Buttresses under Concentrated Loading. Structures and Buildings", ICE Publishing, 161, 5: 265-275, 2008.
- [5]. Huerta, S., "The Safety of Masonry Buttresses", Proceeding of the IC- Engineering History and Heritage, Vol. 163, Issue 1: 3-24, 2010.
- [6]. De Lorenzis, L., Dimitri, R., and Ochsendorf, J., "Structural Study of Masonry Buttresses: The stepped Form. Structures and Building", ICE Publishing, 165, 9: 499-522, 2012.
- [7]. De Lorenzis, L., Dimitri, R., and Ochsendorf, J., "Structural Study of Masonry Buttresses: The Trapezoidal Form. Structures and Building", ICE Publishing, 165, 9: 483-498, 2012.
- [8]. Makris, N., And Alexakis, H., "Limit Equilibrium Analysis of Masonry Buttresses and Towers under Lateral and Gravity Loads. Archive of Applied Mechanics. Vol. 85, Issue 6: DOI 10. 1007/s00419-015-1027-2, 2015.
- [9]. <http://acikerisim.fsm.edu.tr>
- [10]. La Mendola, L., and Papia, M., "Stability of Masonry Piers under Their Own Weight and Eccentric Load", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 6:1678-1693, 1993.
- [11]. İzol, R., Dikdörtgen Payandalı Yüksek Yığıma Duvarların Düzlem Dışı Deprem Dayanımları, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Sunumu henüz yapılmamıştır), 2017.