

YIĞMA YAPILARIN DİNAMİK VE MÜHENDİSLİK DAVRANIŞININ DÜZLEM DIŞI KUVVETLER ALTINDA DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ*, Mehmet KAMANLI*

*Selçuk Üniversitesi, Müh. Mim. Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, KONYA

Özet

Bu çalışmada, düzlem dışı yüklenen yığma duvarın sismik ve kırılma davranışı, analitik ve deneysel olarak incelenmiştir. Deprem kaynaklı maksimum yer hareketi, yığma yapıyı sismik enerjiyle yükler ve yapıda yanal deplasmanlara yol açar. Bu dinamik ötelemenin sonucu olarak zemin kattan çatı katına kadar ivmeler oluşur. Zemin ivmesi çatı katına ulaşıncaya kadar büyür. Bu şekilde, çatı katında oluşan maksimum büyümüş ivme, yığma duvarı hem düzlem içi hem de düzlem dışı yükler. Deprem yüklerine maruz yığma duvarlarda oluşan düzlem içi ve düzlem dışı sismik yükler sonucunda maksimum düzlem içi zorlanmalar, zemin kat duvarlarında oluşurken, maksimum düzlem dışı zorlanmalar ise çatı katı düzeyindeki duvarlarda oluşur. Çatı katı düzeyindeki duvara etkiyen ivme, duvarın ve duvarın mesnetlendiği döşemenin doğal periyotlarının oranına göre, bir büyüme daha gösterir. Bunun sonucu olarak, düzlem dışı yüklenen çatı katı duvarının ivmesi, düzlem içi yüklenen duvarın ivmesinden çok daha büyük olur. Böylece, yığma binanın çökmesi, genellikle, çatı katı düzeyindeki duvarın düzlem dışı kırılmasıyla başlar. Yapılan çalışmada, göçme mekanizmasına, duvarların düzlem dışı dayanımının hâkim olduğu varsayılmıştır. Düzlem dışı tersinir yüklerle yüklenen yığma duvarların deneysel sonuçları sunulmuş ve açıklanmıştır. Düzlem dışı yüklenen yığma duvarın kırılma davranışı, gerçekçi boyutlara sahip bir prototip duvar üzerinde deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada deprem etkisini modelleyen tersinir düzlem içi ve dışı yükler altında yığma duvar, betonarme döşemede oluşan akma çizgilerine benzer kırılma çizgileri oluşturularak kırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yığma Yapı, Dinamik Davranış, Düzlem Dışı Yük

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE DYNAMIC AND ENGINEERING BEHAVIOR OF THE MASONRY STRUCTURES UNDER OUT-OF-PLANE FORCES

Abstract

In this study, the seismic and failure behavior of an out-of-plane loaded masonry wall was investigated analytically and experimentally. The maximum ground movement originated from the earthquake uploads the masonry structure with seismic energy and causes lateral displacements on the structure. As a result of this dynamic transition, there occur accelerations from the ground floor to the attic floor. The accelerations of the ground gradually increases until it reaches the maximum acceleration value at the attic floor which acts on the masonry wall both in-plane and out-of plane directions. The maximum in-plane and out-of-plane effects due to in-plane and out-of-plane seismic loads occur at the ground floor and attic floor walls respectively. The acceleration acting on the wall at the attic floor presents an extra increase with the natural periods of the wall and the slab to which the wall is fixed. Consequently, the acceleration of the attic floor's wall loaded out-of-plane will be so much greater than the acceleration of the wall loaded in-plane. Thus, the failure of the

masonry structure usually begins with the out-of-plane failure of the wall at the attic floor. In this study, it is assumed that the out-of-plane strength of the walls is dominant during the failure mechanism, and the experimental results of the masonry walls loaded with out-of-plane reversed loads are presented and explained. The failure behavior of the out-of-plane loaded masonry wall was investigated experimentally on a prototype wall having realistic dimensions. The failure of the masonry wall modeling the seismic effect under the effects of out-of-plane and in-plane loads occurred after having failure lines similar to the yielding lines of a reinforced concrete slab.

Keywords : Masonry Buildings , Dynamic Behaviour, Out of Plane Loading

1. GİRİŞ

Betonarme veya çelik yapılar kadar yığma yapılarda deprem riskine maruzdur. Ancak, Türkiye’de ki deprem araştırmaları betonarme ve çelik yapılar üzerinde yoğunlaştığı için, proje mühendislerinin yığma binaların deprem davranışı hakkında bilgileri oldukça yetersizdir. Bunun sonucu olarak, yığma binaların deprem riskinin saptanması ve sismik güçlendirme girişimleri istenilen düzeye ulaşmamaktadır.

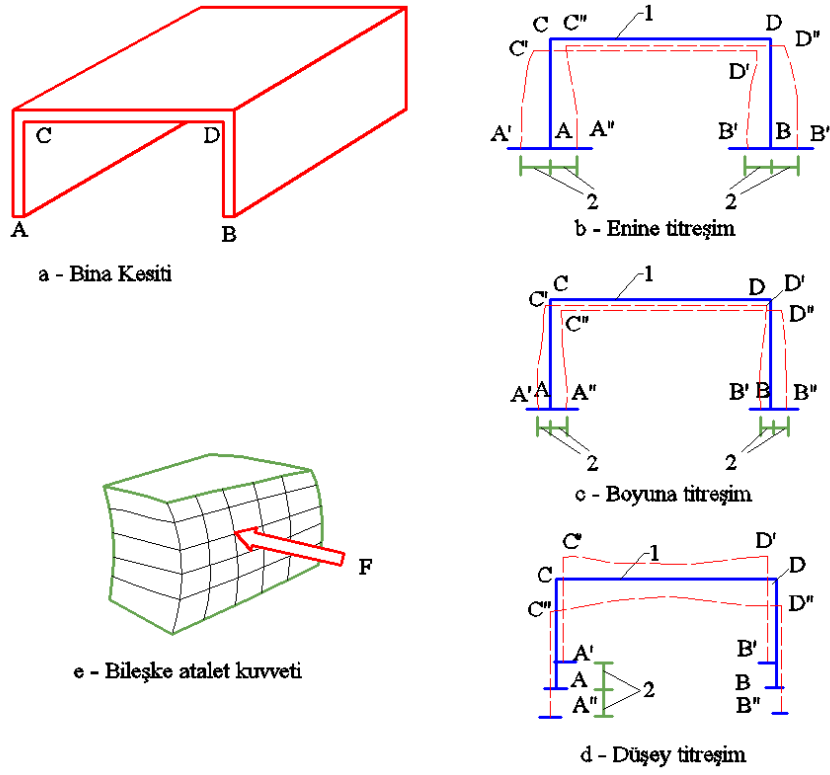
Türkiye’nin kırsal kesiminde geleneksel yapı tipi yığma binalardır. Deprem bölgelerinde yer alan çok büyük sayıda yığma bina da, deprem afetine karşı güçlendirilmeyi beklemektedir. İyileştirme ve güçlendirme çabalarına başlamadan önce, depreme maruz yığma binanın deprem davranışı ve göçme mekanizması iyi bilinmelidir.

Kırsal kesimlerde tercih edilen ve uygulama açısından kolay olan yığma yapıların diğer yapılara oranla avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Yığma yapıların en büyük dezavantajı oldukça ağır, hantal ve gevrek malzemeden inşa edilmiş olmalarıdır. Bilindiği gibi yapı ağırlığı ne denli fazla olursa deprem esnasında oluşacak atalet kuvvetleri de o denli fazla olmaktadır. Bu da yapı elemanlarının çok büyük iç tesirlere maruz kalması demektir(Şekil 1).

Yığma binanın deprem davranışında, betonarme binaya göre benzerlik olduğu kadar farklılıklar da vardır. En çarpıcı farkın, yığma duvarın düzlem dışı kırılması olduğu söylenebilir. Betonarme binaların dolgu duvarlarında da, düzlem dışı kırılmalar görülür(Şekil 2). Ancak, doğal olarak, dolgu duvarların bir taşıyıcılık görevi yoktur ve bunların düzlem dışı kırılması, yapının çökmesine neden olmaz [8].

Ancak, yığma binanın duvarları düşey ve yatay yüklerin taşınmasında ana görevler üstlenmişlerdir. Rüzgâr ve deprem gibi yatay yükler, yığma duvarlarda düzlem içi ve düzlem dışı zorlamalara neden olurlar. Yatay yükler altında, yığma duvarda kesme kuvvetleri ve momentler oluşur. Bunun sonucu olarak, yığma duvarın düzlem içi kırılması, momentin oluşturduğu basınç/çekme aksenal kuvvetler ve/veya kesme kuvvetinin oluşturduğu eğik asal gerilmeler etkisi ile meydana gelir[8].

Gerek kavram, gerekse de analitik olarak, Türkiye’de proje mühendisinin yığma duvarın düzlem dışı davranışı ve bu davranışın yol açtığı çökme potansiyeli hakkında bilgisi zayıftır (Şekil 3).



Şekil 1 Yığma yapıların deprem kuvvetleri altındaki genel davranışı



Şekil 2 Betonarme çerçevesel yapıda dolgu duvarların düzlem dışı kırılması



Şekil 3 Yığma duvarın düzlem dışı kırılması (Bam Depremi, 2004)

1.1. Yığma Yapıların Dinamik Davranışı

Yığma yapıların dinamik etkiler karşısında gösterdiği mekanik özellikleri, günümüz yapı elemanları beton ve çeliğin mekanik özelliklerinden oldukça karmaşıktır. Her şeyden önce yığma yapının bu mekanik özelliklerini etkileyen çok faktör vardır.

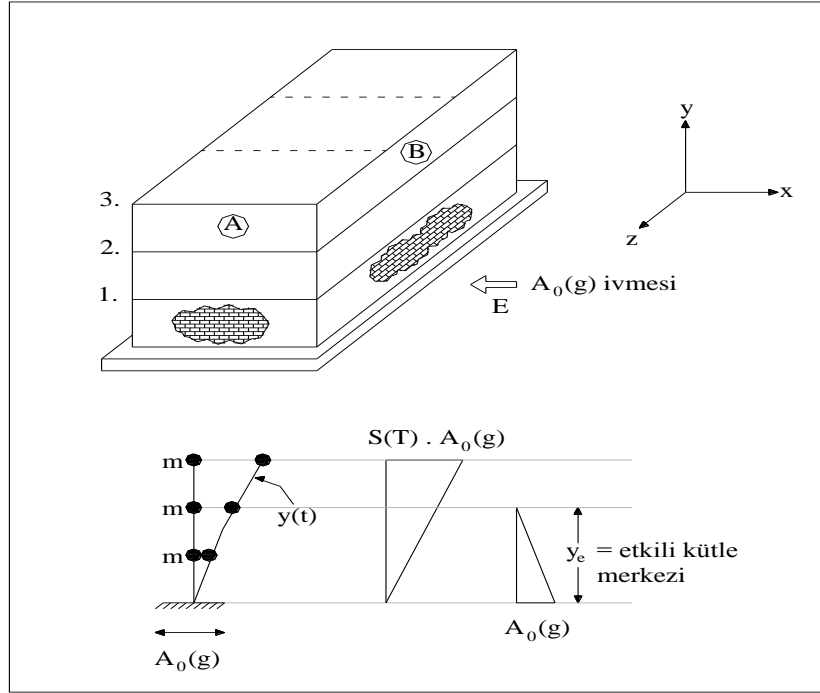
Yapıların dinamik özellikleri; periyotları, mod şekilleri ve sönüm oranlarıdır. Yığma yapılar çok rijit yapılar olduğu için doğal titreşim periyotları genellikle çok küçüktür.(0.05–0.20 saniye civarında). Bir yapının periyodu; kat yüksekliği, eni, boyu ve dolu duvar oranı ile ilgilidir. Yüksek yapıların periyodu uzun olur. Eni ve boyu büyük yapıların ise periyotları kısa olur. Deprem esnasında yapıda hasar meydana gelir ve çatlama olursa periyodu uzar. Yapı rijitliği arttıkça periyodu kısalmaktadır. Örneğin betonarme çerçeve yapıların periyodu, yığma yapıların periyodundan uzundur. Betonarme perde yapıların ise periyodu kısadır. Betonarme yapılarda periyot ile kat adedi arasında yaklaşık olarak formül (1) de gösterilen bir ilişkinin olduğu kabul edilir:

$$T=(0.1-0.07)N \quad (1)$$

burada N kat adedidir. Mesela 20 katlı betonarme bir yapının periyodu 1.6-2.0 saniye civarında olur. Betonarme yapıların periyotları çok sayıda ölçüm ile saptanabilmesine karşın yığma yapılar için sınırlı sayıda ölçüm yapılabilmektedir. Bu ölçümlere dayanarak formül (2)'dekine benzer şekilde şöyle bir formül verilebilir [1].

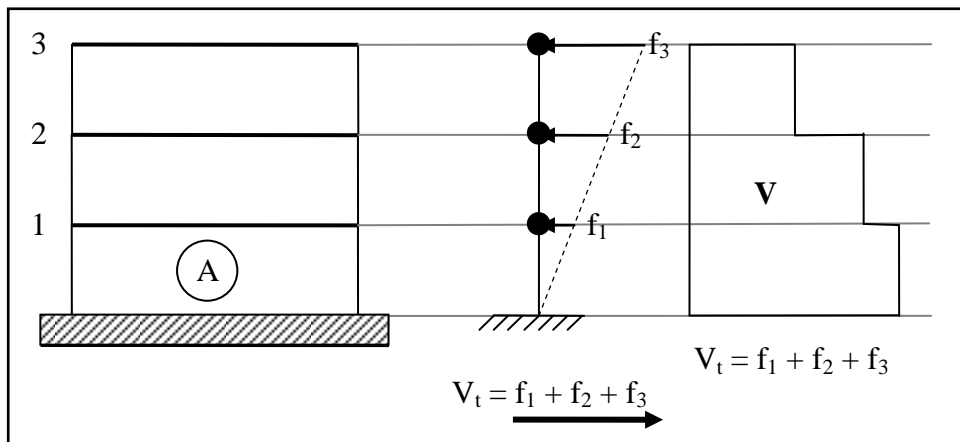
$$T=(0.035) N \quad (2)$$

Ancak sınırlı sayıda deney için bulunan bu kabul yapılırken çok dikkatli olunmalıdır. Ülkemizde yığma yapılar yönetmeliklere göre en çok 4 katlı yapılabildiği için yığma yapı periyotlarının 0.05-0.20 saniye arasında değişebileceği görülmektedir. Bu değerlerde yığma yapıların rijit yapılar olduğunu göstermektedir. Sağlam zeminlerde kısa periyotlu yapılara büyük ivmelerin geldiği, yumuşak zeminlerde ise uzun periyotlu yapılara büyük ivmelerin geldiği görülmektedir. Yığma yapılar kısa periyotlu yapılar olduğundan depremde büyük ivmelerin gelmesini önlemek için yumuşak zeminlere yapılması daha uygun olacaktır. Gerçektende birçok depremde sağlam zemin üzerindeki yığma yapıların daha çok hasar gördüğü gözlenmiştir. Depreme maruz yığma bir binanın dinamik davranışı Şekil (4)'de gösterilmiştir[10].

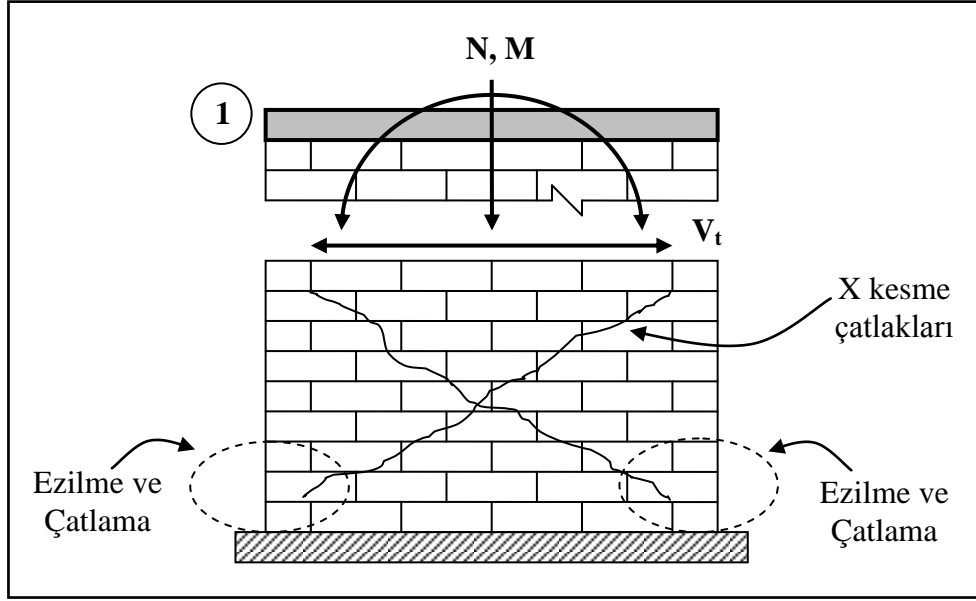


Şekil 4 Yığma binanın dinamik davranışı

Depreme maruz yığma bina 1. modunun gerektirdiği yönde ötelenir, $y(t)$. Bu ötelenmenin ikinci zaman türevi olarak, temelden çatıya bir ivme dağılımı ortaya çıkar. Afet yönetmelikleri bu ivme dağılışının doğrusal olduğunu kabul ederler[3,5]. Ancak, temel kotunda ivmenin sıfır değil $A_0(g)$ olduğu gerçeği de göz önünde bulundurulmalıdır. Yığma yapının doğal periyoduna bağlı olarak, yapıda deprem kuvvetleri oluşur. Kat düzeylerinde yoğunlaştırılan kütlelere ve bunlara tekabül eden ivmelere bağlı olarak, bu deprem kuvvetlerinin dağılımı “ters üçgen” görünümündedir[2]. Şekil 5’de gösterildiği gibi, A duvarı düzleminde f_1 , f_2 ve f_3 kat deprem kuvvetleri ve kesme kuvvetleri oluşmaktadır. Dinamik etkiler altında, en alt katta (1. kat altında) maksimum deprem etkilerine maruz A duvarı düzlem içi yüklendiği zaman oluşan çatlak deseni ve deprem zorlamaları etkileri Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 5 A duvarı üzerinde oluşan deprem kuvvetleri ve kesme kuvvet diyagramı



Şekil 6 Düzlem içi deprem zorlamaları ve etkileri

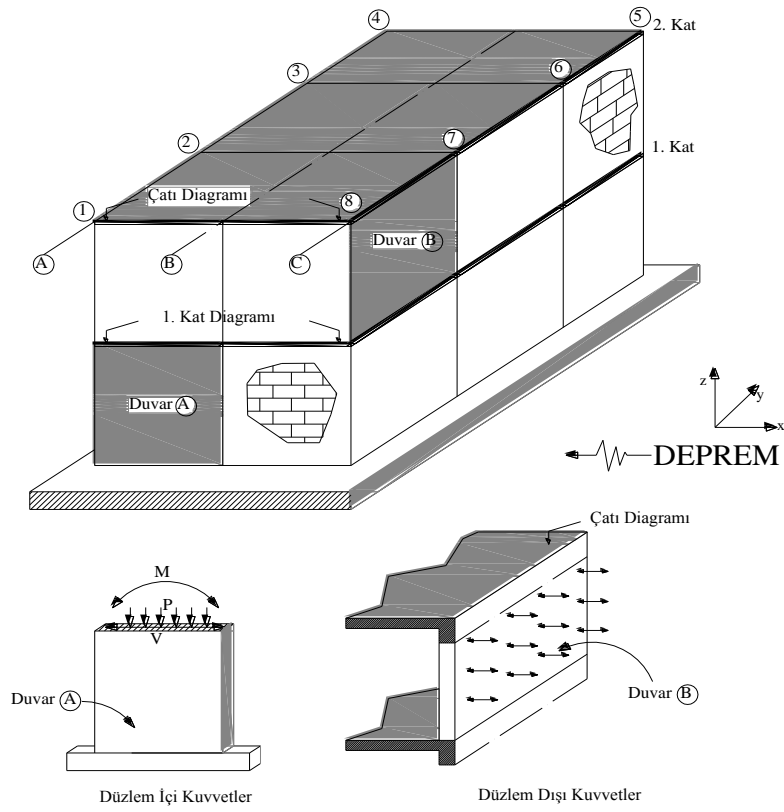
Maksimum yer ivmesinin 1. derece deprem bölgesine tekabül eden 0.4(g) değerinde olduğu düşünülürse, X-yönündeki deprem altında, 1. moduna bağlı olarak x-yönünde ötelenen yığma yapıda, 2. ve 3. kat döşemelerinde oluşacak olan ivmeler Şekil 7’de gösterilmiştir. 2. ve 3. katlar arasında yer alan B duvarı da düzlemine dik olarak, ivmelere, titreşimlere ve ötelenmelere maruz kalacaktır[9].

1.2. Yığma Duvarın Düzlem Dışı Davranışı

Depreme maruz iki katlı yığma bir bina da (Şekil 7), x-yönünden gelen deprem, x-yönünde ivmeler ve bu ivmelerin neden olduğu sismik kuvvetler oluşturur. Bunun sonucunda (A) Duvarı, düzlem içi tersinir kesme kuvvetleri (V) ve momentlere (M) maruz kalır. Ayrıca, öz yükler, hareketli yükler ve devrilme momentleri etkisi ile aksenal (P) yükü oluşturur. x-yönünden gelen deprem (B) Duvarı’nda, duvar düzlemine dik kuvvetler de meydana gelecektir. Bu sismik kuvvetler, (B) Duvarı’nı düzlem dışı sehim yapmaya zorlarlar. Sismik kuvvetlerin belli düzeyde bir büyüklüğe gelmesiyle, (B) Duvarı düzlem dışı kırılır ve yük taşıma yeteneğini yitirir. Çatı düzeyindeki duvarlardan bazılarının düzlem dışı kırılmasıyla, bir yük olarak çatı katı döşemesi taşınamaz olur. Sonuç, binanın çökmesidir[7].

x-yönünden depreme maruz yığma bina, doğal periyoduna (T_0) bağlı olarak, x-yönünde ötelenir (Şekil 8). Yığma binanın depreme karşı göstereceği tepki, eşdeğer tek serbestlik dereceli bir sistem yapılarak ve eşdeğer etkili kütle ile yüksekliği hesaplanarak basitleştirilebilir.

$$m(etik) = \sum_{i=1}^n m_i \quad (5)$$



Şekil 7 Depreme maruz yığma duvarların düzlem içi ve düzlem dışı yüklenmesi

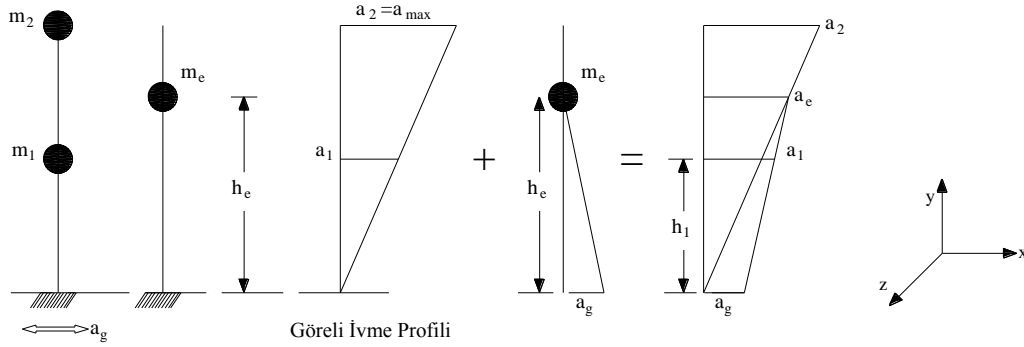
Böylece, basit model üzerinde iki katlı yığma binanın ve Duvar (A) ve Duvar (B)'nin dinamik tepkisini incelemek mümkün olur. Maksimum yer ivmesi (\ddot{a}_g)'dir.

$$h_e = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i h_i) x(h_i)}{\sum_{i=1}^n m_i h_i} \quad (6)$$

olduğu kabulü, büyük hataya yol açmaz. Bu kabul doğrultusunda, binanın herhangi bir yüksekliğinde oluşan görelî tepki ivmesi, (a_g)'nin bir işlevi olarak kolayca hesaplanabilir[4].

$$a_1 = 2.5a_g \frac{h_1}{h_e} \quad (7)$$

$$a_2 = a_{\max} = 2.5a_g \frac{h_2}{h_e} \quad (8)$$

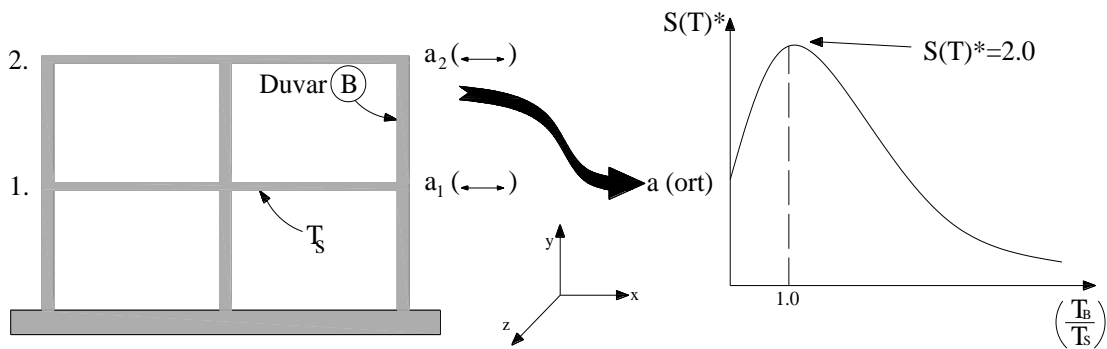


Şekil 10 Maksimum yer ivmesinin görelî tepki ivmeleri profiline süperpozisyonu

Düzlem dışı titreşim yapan Duvar (B)'yi zorlayan ivmeler (a_1) ve (a_2)'dir. Her iki ivmenin, duvar orta yüksekliğindeki ortalama büyüklüğünün Duvar (B)'yi zorlayan ivme olduğu kabul edilebilir[6]. Bu ortalama ivme zorlaması, TB/TS oranına bağlı olarak tekrar büyüyecektir (Şekil 11).

TB = Duvar (B)'nin doğal periyodu

TS = x-yönünde titreşim yapan kat döşemesinin doğal periyodu



Şekil 11 Duvar (B)'yi etkileyen düzlem dışı ivmenin büyüme göstermesi

Duvar (B)'yi düzlem dışı titreşimler yapmaya zorlayan ivmenin $a(ort.)$ olduğu varsayılır.

$$a(ort.) = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) \quad (9)$$

Duvar (B)'yi düzlem dışı titreşimler yapmaya zorlayan ivmenin büyüklüğü hesaplanır.

$$a(\text{Duv.B}) = S(T) * a(\text{ort}) \quad (10)$$

2. LİTERATÜR TARAMASI

Kanit R. ve diğerleri(2005), yaptıkları çalışmada, yığma yapıların sismik davranışlarını özetlemişlerdir. Deprem kaynaklı maksimum yer hareketi oluşturma vasıtası ile yığma yapıyı sismik enerji ile yüklemişler, zemin ivmesi çatı katına ulaşınca kadar beklemişlerdir. Göçme mekanizmasını duvarların düzlem dışı dayanımının kontrol ettiğini varsayımlardır. Düzlem dışı tersinir yüklerle yüklenen yığma duvarların deneysel sonuçlarını sunmuş ve açıklamışlardır. Erken göçmenin duvarın çevre mesnetlerini çekme gerilmesine maruz bırakan yüklem altında olduğunu gözlemlemişlerdir. Duvarın göçmesinin köşe mesnetlerinin tepeden düşey olarak ayrışmasıyla oluştuğunu tespit etmişlerdir. Duvarın histerik davranışının “kesme kırılması”nı andırdığını tespit etmişler, ve kabul edilebilir bir süneklik değeri tespit etmemişlerdir.

Kanit R. ve diğerleri(2004), yaptıkları çalışmada aşırı yüklemeye tabi tutulan yığma yapıların mekanik davranışı incelemişlerdir. Uzun süre aşırı yüke maruz kalan özel hasarlı yapıların zaman etkisi ile ani çökmeye sebep olan çatlakların oluştuğunu gözlemişler, çatlakların devamlılığını sınırlamak için yatay derzlerin çelik çubuklarla takviye edilmesini denemişlerdir. Çelik çubuklarla takviye edilen derzleri hidrolik ve polimerik harçlarla doldurmuşlar ve düşey yükler altında deneye tabi tutmuşlardır. Bu yöntemle yapılan güçlendirmenin yapının temel uzama gerilmesinin yaklaşık %40 olduğunu tespit etmişlerdir.

Kanit R. ve diğerleri(2004), yığma yapıların sismik davranışı özetlenmiştir. Deprem kaynaklı maksimum yer hareketi yığma yapıyı sismik enerji ile yükler. Bu enerji yapıda yanıl deplasmanlara yol açar. Dinamik ötelenmenin sonucu olarak zemin kattan çatı katına kadar oluşan ivmeler, zemin ivmesi çatı katına ulaşınca kadar büyür. Çatı katında oluşan maksimum ivme yığma duvarı hem düzlem içi hem de düzlem dışı yükler. Göçme mekanizmasına duvarların düzlem dışı hakim olduğu varsayılmıştır. Düzlem dışı tersinir yüklerle yüklenen yığma duvarların deneysel sonuçları sunulmuş ve açıklanmıştır. Tersinir yükün yönüne göre duvarın davranışının değiştiğini tespit etmişler, erken göçmenin duvarın çevre mesnetlerini çekme gerilmesine maruz bırakan yüklem altında oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak; test edilen yığma duvarın yönetmelikte verilen süneklik şartını sağladığını gözlemlemişlerdir.

Luciano ve ark. (1998), yaptıkları çalışmada, yığma bir yapının mekanik davranışını incelemişlerdir. Yığma yapı malzemeler, bir harç derzinde blokların düzenli yerleşimiyle gerçekleştirilen bir bileşik malzeme olarak değerlendirilmektedir. Yığma yapının genel özelliklerini görmek için mikromekanik yaklaşım önerilmektedir. Sonra FRP katmanlı saçlarla kuvvetlendirilmiş bir duvar (Bu duvarın yüzeyine bu saçlar eklenmiştir) analiz edilmektedir. Desteklenmiş ve desteklenmemiş yığma yapının genel davranışını modellemek için; harcın, bloğun ve FRP saçların ilerleyen hasarını da dikkate alarak basit bir homojenleştirme tekniği önerilmektedir. İzotropik viskozite ve elastik hasar modellerinde, harç ve blok için iki farklı hasar kriteri uygulanmaktadır. Son olarak, desteklenmiş ve desteklenmemiş yığma yapı panellerin üzerindeki hasarı incelemek için önerilen prosedür uygulanarak sayısal uygulamalar geliştirilmektedir.

3. MATERYAL VE METOT

Düzlem dışı yüklenen yığma duvarın davranışının ve kırılma şeklinin anlaşılması için Şekil 12’de gösterilen duvar deneye tabi tutulmuştur.

Yükleme mekanizması Şekil 13’de gösterilmiştir. Yük, 2 yönlü hareketle basınç ve çekme uygulayabilen bir kriko ile verilmiştir. Duvar ortasındaki delikten rijit bir çelik çubuk geçmektedir. Özdeş bir yüklem plakası, duvarın arka yüzünde de mevcuttur. Duvara uygulanan basınç/çekme hareketi ile, sismik kuvvetlerin tersinir etkisi modellenmiştir. Yüklem plakası ile duvarın tam ortasından uygulanan yüklerin, düzgün yayılı yükün oluşturacağı moment dağılımına benzer bir zorlama oluşturacağı kabul edilmiştir.



Şekil 12 Deney numunesinin deneyden önceki ön görünüşü

3.1. Materyal

Çerçevenin hazırlanmasında, çelik levhaların soğuk olarak bükülmesi ile elde edilmiş profiller kullanılmıştır. Sözü edilen profiller elektrik ark kaynağı ile kaynatılması sonucu rijit düğüm noktaları oluşturulmuştur. Deney duvarının yapımında TS-771-1’e uygun 190×190×50 mm boyutlarına sahip kil bazlı dolu harman tuğlası kullanılmıştır. Deney duvarı 1 tuğla kalınlığında olup, her iki yüzüne 20 mm kaba sıva ve 10 mm ince sıva uygulanmıştır.

3.1.1. Duvar Yapımında Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

3.1.1.1. Çerçevelerin desteklenmesinde kullanılan çelik profillerin geometrik ve mekanik özellikleri

Deney numunelerinin desteklenmesinde kullanılan I ve L çelik profiller Ereğli Demir Çelik Fabrikasında üretilen malzemelerden alınarak imal edilmiştir. Kullanılan profillere ait geometrik ve fiziksel özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Deneylerde kullanılan profillerin geometrik ve fiziksel özellikleri

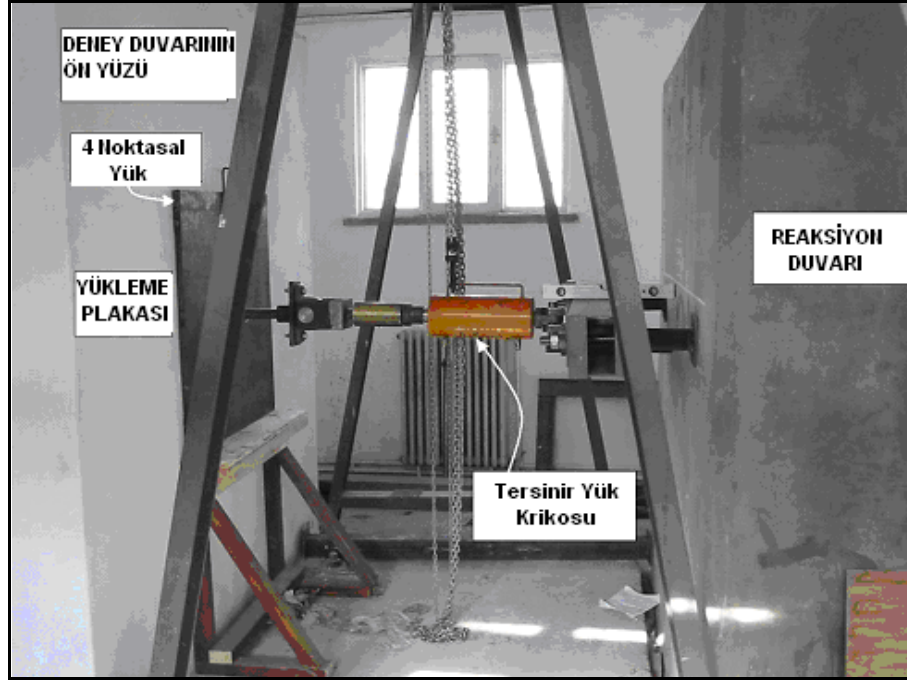
b	(mm)	60
h	(mm)	120
t	(mm)	5
F	(mm ²)	1150
G	(Kg/m)	9,03
I _x	(mm ⁴)	398156
I _y	(mm ⁴)	2539583
e ^{x1}	(mm)	16,85
e ^{x2}	(mm)	43,15
e ^y	(mm)	60
W _{ex2}	(mm ³)	9227
W _{px2}	(mm ³)	16620
W _y	(mm ³)	42326

3.1.1.2. Deneylerde kullanılan yükleme levhasının mekanik özellikleri

Deney numunesine yükün düzgün dağıtılması için, numunenin orta noktasına çelik levha yerleştirilmiştir. Levhanın boyutları 1000×1000 mm'dir. Kullanılan çelik levhanın mekanik özelliklerini belirlemek için 400×40 mm ebadındaki çelik levha numuneler laboratuarda aksel çekme deneyine tabii tutulmuş ve elde edilen mekanik özellikler Çizelge 3.2'de, deney levhasının deney esnasındaki görüntüsü Şekil 13'de verilmiştir.

Çizelge 3. 2 Deneylerde kullanılan çelik levhaların mekanik özellikleri

Akma Gerilmesi (σ_y)	(N/mm ²)	370,9
Maksimum Gerilme (σ_{max})	(N/mm ²)	515,7
Kopma Gerilmesi (σ_v)	(N/mm ²)	428,6
Akma Birim Uzaması (ϵ_y)		0,0019
Max.Gerilmeye Karşılık Gelen Birim Uzama (ϵ_{max})		0,170
Kopma Birim Uzaması (ϵ_u)		0,214
Elastisite Modülü (E)	(N/mm ²)	195210



Şekil 13 Deney numunesi yükleme levhasının deney esnasındaki görüntüsü

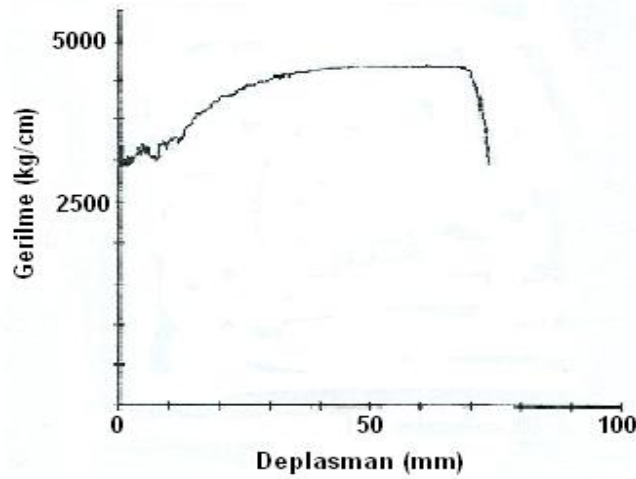
3.1.1.3. Duvar temelinin oluşturulmasında kullanılan donatının özellikleri

İmal edilen numunelerde boyuna ve enine donatı olarak TS5002’de verilen ve TS708’e uygun olan nervürlü çelik çubuklar kullanılmıştır. BÇIII donatı çelik çubukların çapları etriyelerde 8 mm, boyuna donatılarda ise 12 mm. olarak seçilmiştir. Numunelerde kullanılan 12 mm ve 8 mm’lik çelik çubuklardan 3’er adeti Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi laboratuvarında TS138 yönetmeliğine uygun olarak çekme testine tabii tutulmuştur. Elde edilen test sonuçları Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Deneyleerde kullanılan donatının özellikleri

Donatı çapı(mm.)	Donatı sınıfı	Akma Dayanımı fyk (kg/cm ²)		Kopma Dayanımı fsu (kg/cm ²)		Kopma Uzaması esu	
		Min.	Deneysel	Min.	Deneysel	Teorik	Deneysel
8	BÇIII	4200	4428	5000	6000	0,12	0,18
8	BÇIII	4200	4650	5000	5910	0,12	0,19
8	BÇIII	4200	4540	5000	6150	0,12	0,175
12	BÇIII	4200	5015	5000	5620	0,12	0,19
12	BÇIII	4200	4840	5000	6150	0,12	0,21
12	BÇIII	4200	4520	5000	6100	0,12	0,20

Deneyleerde kullanılacak \varnothing 12 donatıdan 3 adet alınarak TS138’e göre çekme deneyleine tabii tutulmuştur. Elde edilen grafiklerin bir örneği Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 14 Deneylerde kullanılan donatının gerilme deformasyon eğrisi

Deney için imal edilen bağ kiriş donatılarının resmi Şekil15’de, döşemeyi oluşturan donatıların resmi Şekil 16’da gösterilmiştir.



Şekil 15 Bağ kirişi donatı görüntüsü



Şekil 16 Döşeme donatısının görüntüsü

3.1.1.4. Duvar elemanlarının özellikleri

Deney duvarlarının yapımında TS-771-1’e uygun 190*190*50 mm boyutlarına sahip kil bazlı dolu Harman tuğlası kullanılmıştır. Kullanılan tuğlanın TS7720–1:2000 standardına göre yapılmış fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.4’de,örülmüş tuğla duvarın görüntüsü Şekil 17’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Kil bazlı dolu harman tuğlasının fiziksel ve mekanik özellikleri

Boyutlar (mm)	190*190*50
Basınç Dayanımı (MPa)	23.17
Eğilme Dayanımı (MPa)	2.61
Elastisite Modülü (MPa)	3000



Şekil 17 Örülmüş tuğla duvarın görüntüsü

3.1.1.5. Harçta kullanılan çimento ve kumun özellikleri

Harçların yapımında Ankara ilinde kurulu olan SET Çimento Sanayi A.Ş'nin TS12143'e uygun olarak ürettiği Portland Kompoze Çimento (PKÇ/B 32.5) kullanılmıştır. SET Çimento Sanayi A.Ş. tarafından üretilen çimentonun TS 19'a uygunluğu araştırılmış ve elde edilen değerler standart değerler ile birlikte Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 Kullanılan çimentonun özellikleri

Özellikler		TS 19 'da İstenen Değerler	Deneyde Bulunan Değerler
Priz	Başlama süresi	> 1 saat	1 saat 30 dak.
	Sona erme süresi	< 10 saat	4 saat 40 dak.
Hacim genişlemesi		< 10 mm.	3 mm.
200 mikron elek üzerindeki miktar		< % 1	%0,3
90 mikron elek üzerindeki miktar		< % 14	%9,3
Özgül yüzey		% 2400 cm ² / g	2900 cm ² / g
Basınç dayanımları (kg/cm ²)	7 günlük	>210	224
	28 günlük	325	354
Eğilmede çekme dayanımı (kg/cm ²)	7 günlük	40	51
	28 günlük	55	64

Gerek sıva, gerekse duvar örgü işleminde kullanılan harcın imalatında kullanılan kum, Ankara piyasasından temin edilmiş ve herhangi bir işleme tabi tutulmamıştır. Kullanılan kumun granülometrik özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Harç kumunun granülometrik değerleri

Elek Çapı	Elekten geçen	Elek üstünde kalan
8	100	0
4	75	25
2	54	46
1	33	67
0.5	17	83
0.25	6	94

3.1.1.6. Kullanılan harcın özellikleri

Duvar örgüsünde ve sıva işleminde TS 705 uygun olarak hazırlanan çimento harcı kullanılmıştır. Kullanılan çimento harcının karışım değerleri Çizelge 3.7’de ağırlık cinsinden verilmiştir.

Çizelge 3. 7 Çimento harcı için karışım değerleri

Kullanılan Malzeme	Miktar (kg)
Kum	1425
Çimento	250
Su	400

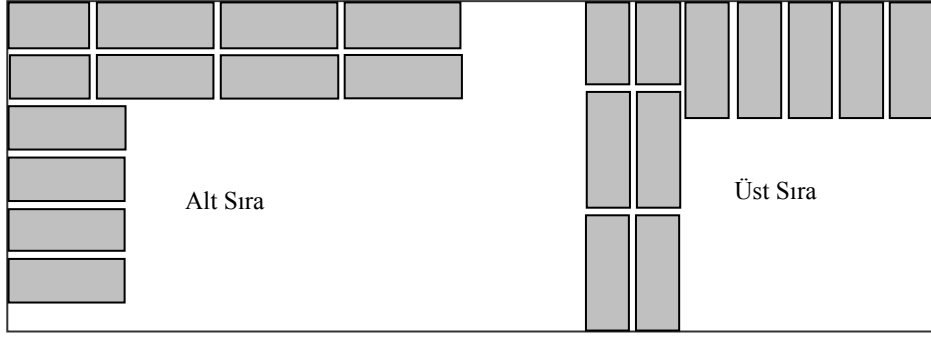
Duvar örümü yapıldıktan sonra 1 hafta boyunca kür uygulanmış ve 28 gün sonra deney yapılmıştır. Aynı süreçte harçtan numuneler alınarak 70 mm çaplı 175 mm boylu silindirik örnekler hazırlanmıştır. Bu örnekler üzerinde tek eksenli dayanım ve dolaylı çekme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen mekanik özellikler Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8 Çimento harcına ait mekanik özellikler

Numune boyutları (mm)	70*175
Basınç dayanımı (MPa)	6.6
Eğilmede çekme dayanımı	489
Elastisite modülü	8000

3.1.2. Deney Elemanlarının Üretimi

Bu çalışmada, üretilen duvar numunesi düzlem dışı tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Deney numuneleri oluşturulurken, numune duvarı oluşturan elemanlar Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü Deprem Araştırma Laboratuvarında oluşturulmuştur. Dolu harman tuğlaları tozlarından temizlendikten sonra, daha önceden oluşturulmuş bina temeli üzerine örme şekline uygun olarak ortalama 2 cm’lik derz aralığı bırakılarak panel duvarın oluşturulması tamamlanmıştır. Duvarlar hazırlanırken kullanılan örme şekli Şekil 18’de gösterilmiştir.



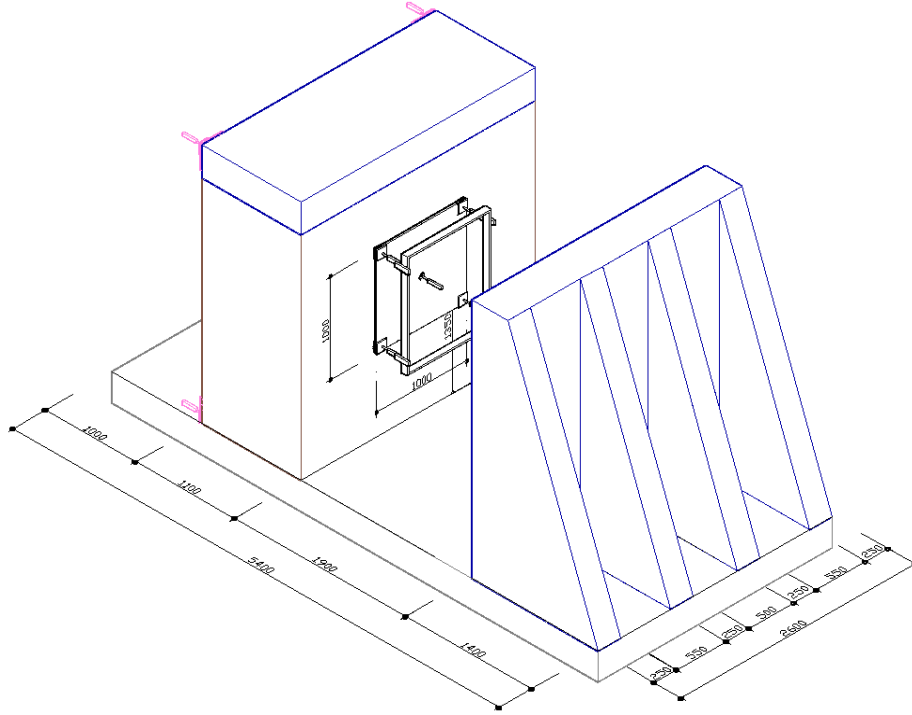
Şekil 18 Duvar hazırlanırken kullanılan örme şekli

Duvarın oluşmasında tuğlaları birleştiren harç, standartlara uygun olarak laboratuarda mevcut olan mikser de karıştırılarak hazırlanmıştır. Duvarın üzerine döşeme oluşturulması için betonarme kalıbı hazırlanmış ve numune duvar üzerine çakılmıştır. Döşeme ve bağ kirişi donatıları laboratuarda demirci ustası tarafından hazırlanarak döşeme kalıbı içine yerleştirilmiştir. Hazırlanan kalıba laboratuarda mevcut olan mikser ile hazırlanan döşeme betonu dökülerek duvar numunesi kaba hali tamamlanmıştır. Bununla ilgili resimler Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 19 Numuneye kalıp kurulması ve beton dökülmesi

Deney duvarının geometrik özellikleri Şekil 20’ de gösterilmiştir. Görüleceği gibi, deney elemanı bir prototip olup, 2.7 x 2.1 m boyutlara sahiptir.



Şekil 20 Deney duvarının geometrik şekli

3.2. Ölçme Tekniği

Deneylerde yük ölçmeleri yük hücresi, yer değiştirmeler ise LVDT ler kullanılarak yapılmıştır. Yük hücresi ve LVDT ler yardımıyla alınan değerler, anında bilgisayara data logger sistemi yardımıyla aktarılmış ve kayıt altına alınmıştır.

3.2.1. Yük ölçmeleri

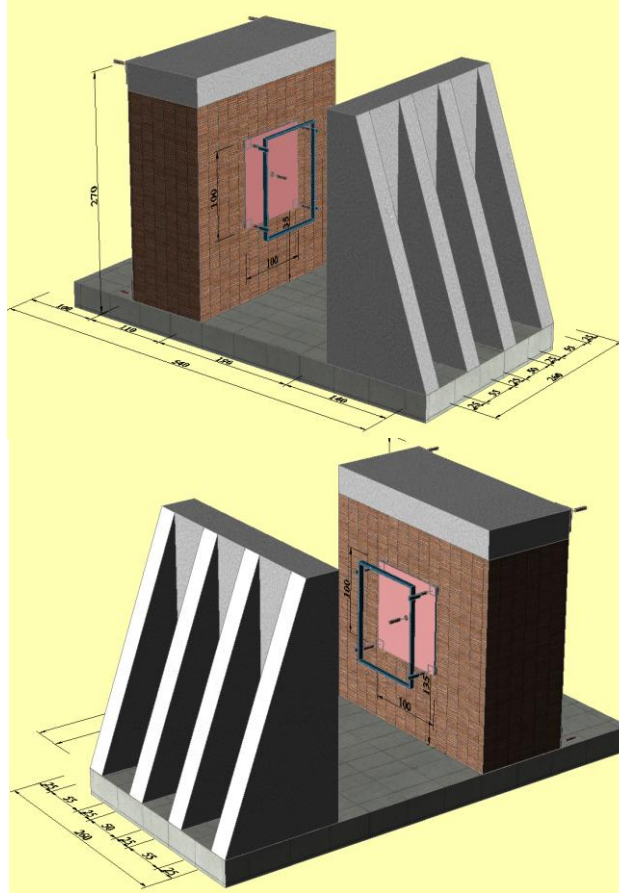
Numunelere hidrolik kriko yardımıyla uygulanan çekme ve basınç kuvveti yük hücresi kullanılmak suretiyle okunmuştur CoDA markalı yük hücresi, tatbik edilen yük durumunda basınca maruz kalmakta ve bu surette çıkış ucundan belirli bir gerilme vermek suretiyle çalışmaktadır. Yük hücresinin çıkış ucu datalogger kutusuna bağlı olup, yük hücresinden alınan gerilme data logger kutusuna, oradan da bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayarda yük hücresinden okunan yük ekrandan da takip edilebilmektedir. Bu deneylerde CoDA markalı yük hücreleri kullanılmıştır.

3.2.2. Yer değiştirmelerin ölçülmesi

Deney süresince yığma duvarda meydana gelen yer değiştirmeler ile boy kısalma ve uzamalarının ölçümleri, elektronik LVDT ler kullanılmak suretiyle yapılmıştır. Tokyo Sokki Kenkyujo Co.Ltd. marka LVDT ler, merkez milinin ileri geri hareketi sonucu belirli bir gerilim üretmektedir. Kullanılan bu LVDT ler, merkez milinin ileri geri hareketi sonucu belirli bir gerilim üretmektedir. LVDT ler sayesinde 0,01 mm hassasiyetinde okuma yapmak mümkün olabilmektedir. LVDT'lerin çıkış uçları data logger sistemine bağlanmaktadır. Deneylerde 100 ve 200 mm'lik LVDT' ler kullanılmıştır.

3.2.3. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Düzenegi

Deneylerde test edilen her bir sistem için, mümkün olduğunca aynı yerlerden olacak şekilde ölçüm sistemi kullanılmıştır. Yer değiştirme ölçümleri, çelik çerçeve sisteminin alt ve üst uçlarının yatay yer değiştirmelerinin, tabanda ve üst başlıktaki dönmelerin tespiti amacıyla gerekli yerlerde ve gerekli sayıda LVDT kullanılarak yapılmıştır. Yük ölçümleri ise, hidrolik kriko ile bağlantılı olarak çalışan yük hücresi kullanılarak yapılmıştır. Test edilen yığma yapı sistemlerinde kullanılan ölçüm düzenekleri Şekil 21’de verilmiştir.



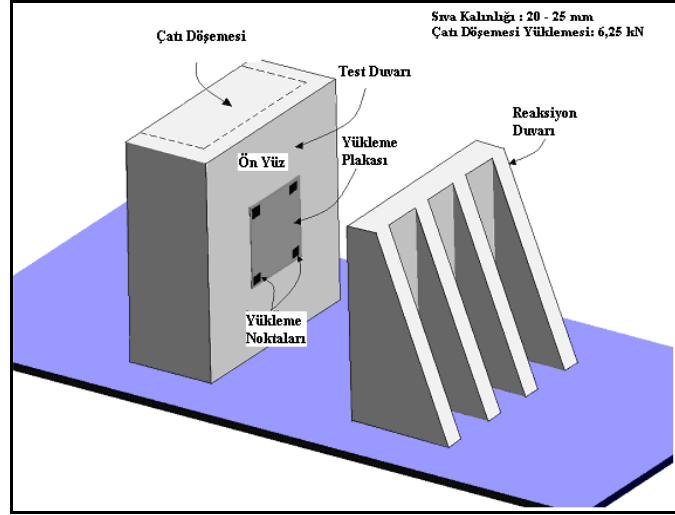
Şekil 21 Test edilen duvarda ölçüm için kullanılan düzeneklerin yerleri

3.3. Metot

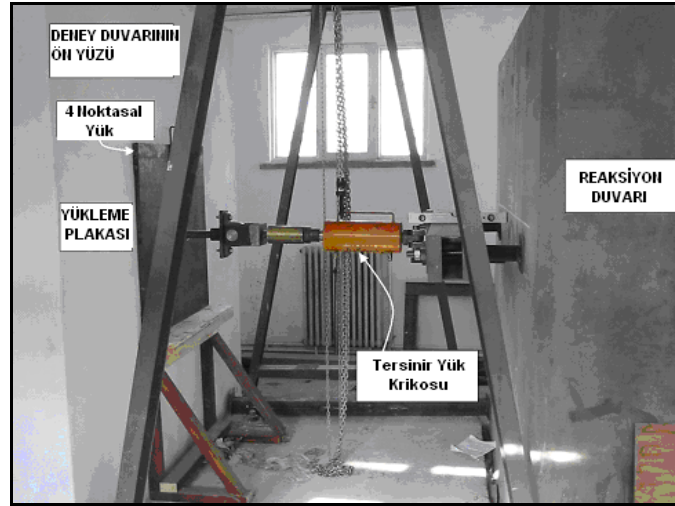
3.1. Deney Düzenegi ve Deney Numunesi

Düzlem dışı yüklenen yığma duvarın davranışının ve kırılma şeklinin anlaşılması için Şekil 22’de gösterilen duvar deneye tabi tutulmuştur.

Yükleme mekanizması Şekil 23’de gösterilmiştir. Yük, 2 yönlü hareketle basınç ve çekme uygulayabilen bir kriko ile verilmiştir. Duvar ortasındaki delikten rijit bir çelik çubuk geçmektedir. Özdeş bir yüklem plakası, duvarın arka yüzünde de mevcuttur. Duvara uygulanan basınç/çekme hareketi ile, sismik kuvvetlerin tersinir etkisi modellenmiştir. Yüklem plakası ile duvarın tam ortasından uygulanan yüklerin, düzgün yayılı yükün oluşturacağı moment dağılımına benzer bir zorlama oluşturacağı kabul edilmiştir.



Şekil 22 Yiğma duvar deney elemanı ve reaksiyon duvarı

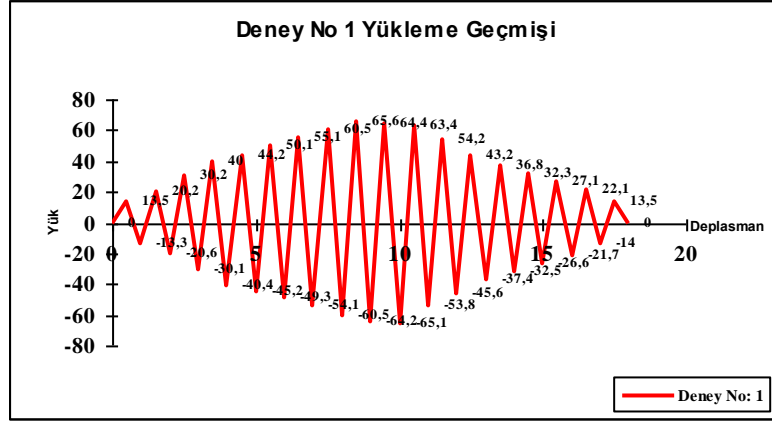


Şekil 23 Tersinir sismik hareketi modelleyen yükleme mekanizması

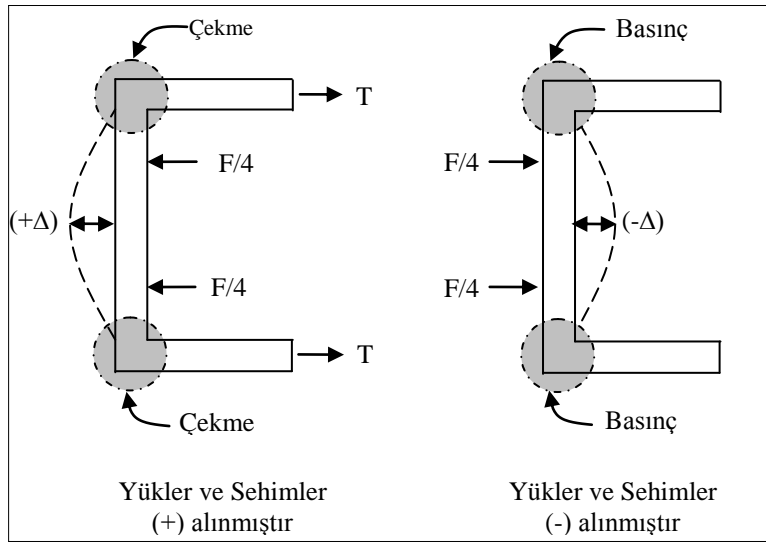
4. DÜZLEM DIŞI YÜKLENEN YIĞMA DUVAR DENEYİ

4.1. Gözlemler ve Değerlendirmeler

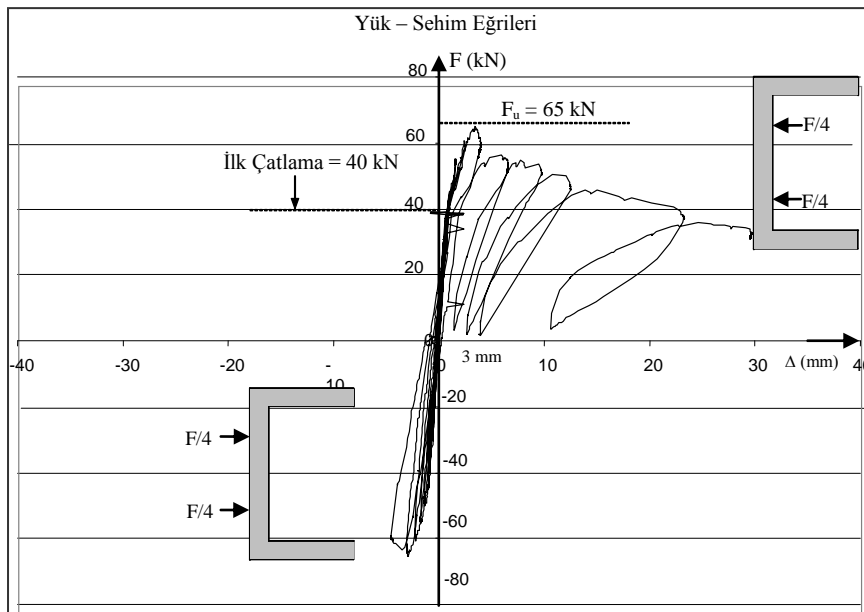
Deney duvarında oluşan düzlem dışı sehimler, duvarın ön ve arkasında yer alan yükleme plakasının 4 köşe noktasında ölçülmüştür. 4 sehimin ortalaması, döşeme merkezinde oluşan sehim olarak kabul edilmiştir. Yükün ve sehimin işareti, duvar köşeleri basınç altında kaldığı zaman (+ artı) kabul edilmiştir (Şekil 25). Yükleme ileri ve geri olmak üzere çift yönlü olarak uygulanmış ve deplasmanlar her iki yönde de ayrı ayrı kaydedilmiştir. Deney numunesine uygulanan yüklere ait yükleme ve deplasman geçmişi Şekil 24 'de ve deney duvarının yük sehim- çevrim ilişkisi Şekil 26' da verilmiştir.

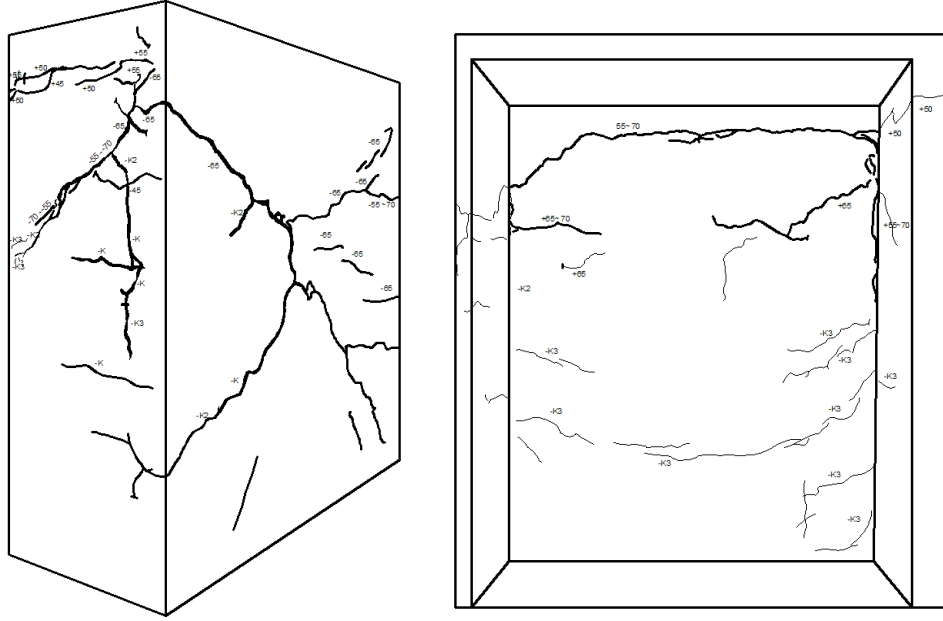


Şekil 24 Duvar deney numunesine ait yükleme geçmişi



Şekil 25 Duvarın yük çevirimlerinde kabul edilen işaret anahtarları





Şekil 29 Deney maksimum yüklemde dış ve iç yüzey çatlak haritası

Yükün 40 kN'dan daha büyük değerlere ulaşmasıyla, duvar köşelerinde ve yüzeyinde oluşan çatlakların hem uzunlukları hem de kalınlıkları artmıştır. Güç tüketimi $F_u = 65$ kN yük büyüklüğünde oluşmuştur. Duvar düzlemindeki çatlak haritası, betonarme plak döşemede oluşan "akma çizgileri"ni andırmaktadır.

Oluşan çatlak haritasından, düzlem dışı yüklenen yığma duvarın davranışının betonarme plak döşemenin davranışına benzediği söylenebilir. Öyle ise, düzlem dışı duvar yükünün duvar içinde iki yönde dağılarak kenar mesnetlere ulaştığı söylenebilir. Duvarın tuğla örgüsü ve duvar düzleminin iki yüzüne de uygulanan sıvanın, süreklilik gösteren bir yük dağılımına izin verdiği sonucu çıkarılabilir [3, 4].

Güç tükenmesine tekabül eden $F_u = 65$ kN'a ulaştıktan sonra, yük taşıma yeteneğinde çok süratli bir azalma olmuştur. Duvar, kesme kırılması davranışına benzer şekilde üzerindeki yükü boşalmıştır.

Düzlem dışı yüklenen duvar, oldukça gevrek bir kırılma davranışı gösterir ve çok az sismik enerji tüketir. Kırılmaya tekabül eden $F_u = 65$ kN yükünden sonraki çevirimde yük ancak $F = 0.85F_u = 55$ kN'a ulaşabilmiştir. Daha da sonraki yük çevirimlerinde, ulaşılabilen yük düzeyi daha da azalır ve güç tüketimi olmuştur (Şekil 15).

Düzlem dışı yüklenen duvar, betonarme plak döşemede ki akma çizgilerine benzer şekilde, karmaşık bir çatlak haritası oluşturarak güç tüketir. Kuşkusuz, tuğla yığma duvar gibi gevrek bir malzemede, akma çizgilerinin anımsattığı süneklik söz konusu değildir. Benzerlik, yalnız çatlak geometrisinde ve görünüştedir. Bu çatlakları "kırılma çizgileri" olarak tanımlamak daha uygun olabilir.

Kesin tanımı yapabilecek kırılma gerilmesinden söz etmek mümkün değildir [8]. Kırılmayı başlatan düzlem dışı kuvvetlerin büyüklüğü ve bunlara bağlı düzlem dışı ivmelerin düzeyi gibi tanımlar daha uygun düşmektedir.

4.2. ANALİTİK İNCELEME

Deney duvarının düzlem dışı ivmelere maruz olduğu düşünölsün. Düzlem dışı ivmelerin maksimum olduğu durumda, duvarı bir plak döşeme gibi sehim yapmaya ve kırılmaya zorlayan düzlem dışı yayılı kuvvetlerin büyüklüğü de maksimum olacaktır (Şekil 30).

Düzlem dışı davranışın incelendiğı duvar modelinde (Şekil 8), Duvar (B)'ye etkileyen düzlem dışı ivmenin büyüklüğü 1.96g'dir.

$$f_E = (w/g)(1.96g) \quad (11)$$

$$b_w = 250mm = 0.25m$$

$$w = 0.25(1.0)(1.0)20kN/m^3 = 5kN/m^2 \quad (12)$$

$$f_E = (5/g)(1.96g) = 9.8kN/m^2$$

Boyutları 2.7 x 2.1 m olan duvara etkileyen toplam yük aşağıda çıkarılmıştır.

$$F_E = (9.8)(2.7)(2.1) = 55.6kN$$

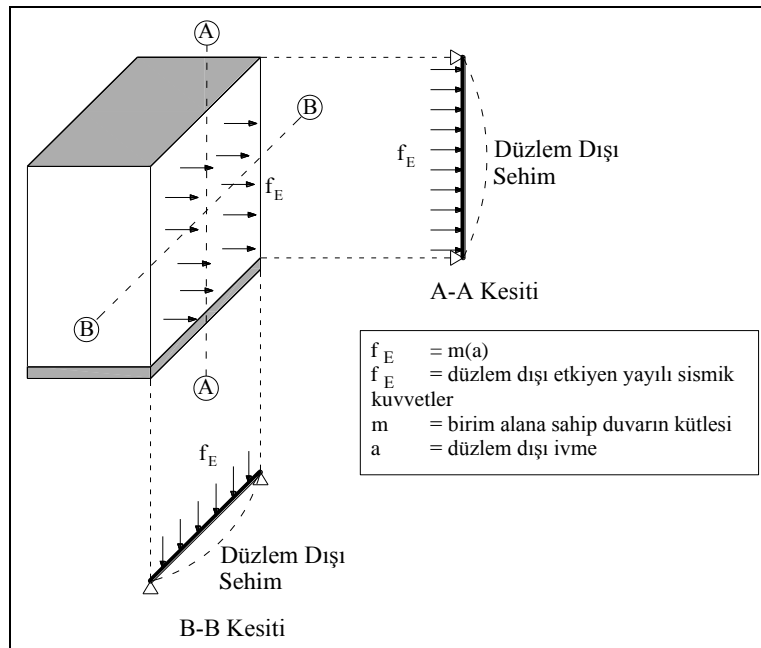
Artık, çok önemli bir sorunun zamanı gelmiştir. Düzlem dışı etkileyen toplam $F_E = 55.6$ kN yük altında, duvarda kırılma oluşacak mıdır?

Sorunun cevabı, $F_E = 55.6$ kN sismik yük talebini, deneyde elde edilen kritik yük aşamaları ile karşılaştırılarak verilebilir.

$$F_E = 55.6kN > F_{cr} = 40kN$$

F_E = Denklem 13 ile bulunan ve duvara etkileyen toplam sismik kuvvet

F_{cr} = Duvar çatlamasına neden olan toplam deney yükü



Şekil 30 Düzlem dışı sismik kuvvetlere maruz duvarda oluşan düzlem dışı sehim

İncelenen duvarda kırılma olmayacak ve duvar hala tersinir sismik kuvvetleri taşımayı sürdürecektir. Çatlakların oluşmasından sonra duvarın rijitliği azalmıştır. Bu durumda, düzlem dışı ivmelerin 1.96g düzeyini koruması beklenemez. Böylece, düzlem dışı ivmelerin düzeyi azalacak ve duvarın kırılma riski de azalacaktır. Kuşkusuz, kötü işçilik mevcut ise ve duvara süreklilik sağlayan sıva yapılmamışsa, duvarda bölgesel kırılmalar olabilir.

Güç tüketim konumunda, toplam kırılma yükü duvar düzlemine düzlem dışı etkiyen yayılı kuvvet olarak ifade edilebilir.

$$F_u = 65kN$$

$$f_E = 65/(2.1 \times 2.7) = 11.46kN/m^2$$

Bu eşdeğer düzgün yayılı kırılma yükü, aşağıda hesabı gösterilen maksimum yer ivmesine tekabül etmektedir.

Kabul edilen maksimum yer ivmesi = 0.4g

Teorik olarak hesaplanan $f_E = 9.8kN/m^2$

Deneyel olarak bulunan $f_E = 11.46kN/m^2$

$$a_g = 0.4g(11.46/9.8) = 0.468g$$

Deney duvarı 0.468g büyüklüğünde bir ivme altında kırılacaktır. Bu, kabul edilen 0.4g'lik maksimum yer ivmesinden çok az büyüktür. Öyle ise, deney duvarı projede kabul edilen 0.4g'lik yer ivmesi altında, çok küçük bir farkla "güvenilirdir" denilebilir.

AY-97'de yığma duvarlara etkiyen deprem kuvvetlerinin R=2.5 katsayısıyla azaltılması öngörülmektedir. Bu azaltma, şüphesiz, kontrollü bir hasar ve belirli bir süneklik düzeyinin oluşması anlamındadır. Ancak, deney duvarının çevirim ilişkilerinde bu azaltmayı haklı gösterecek düzeyde süneklik oluşmamıştır. Maksimum deney yükü, kırılma oluştuktan sonra süratle ve sürekli olarak azalmıştır.

5. SONUÇ

- 1-Düzlem dışı ivmelere maruz yığma duvarların kırılma şekli, taşıyıcı yığma binaların hasara ve çökmeye çok açık olduğunu göstermektedir.
- 2-Deprem titreşimleri yapan yığma yapı, döşemenin oluşturduğu diyafram ve düzlem dışı ivmelere maruz yığma duvar arasındaki dinamik etkileşim sonucunda, yığma duvarda çok büyük düzlem dışı ivmeler oluşur. Bu ivmeler, duvar düzlemine dik etkiyen büyük sismik kuvvetlerin oluşmasına neden olurlar. Bu yayılı sismik kuvvetler, betonarme plak döşemede oluşan "akma çizgileri"ne benzeyen fakat sünekliği olmayan "kırılma çizgileri" oluşturacak duvarın güç tüketimine yol açarlar.
- 3-Karışımın kaliteli ve iyi uygulanmış sıvanın varlığı, yük aktarımının gerçekleştiği sürekli bir ortam oluşturur. Bundan hareketle, taşıyıcı yığma duvarların deprem güvenliğini artırmak için, duvarın her iki yüzüne de uygulanmış sıva ihmal edilmemelidir.
- 4-Tersinir deprem yükleri altında düzlem dışı yüklenen duvarda kırılma, çevre mesnetlerin çekmeye çalıştığı yük doğrultusunda oluşur. Kırılmaya neden olan yük doğrultusu tersindiğinde, duvarlarda oldukça elastik sınırlar içinde çalışmaktadır.
- 5-Düzlem dışı yüklenen duvarda güç tüketimi, kesme kırılmasına benzer şekilde, gevrek olarak oluşmaktadır. Bu gevrekliğin sonucu olarak çok az sismik enerji tüketilmektedir. Bu durumda yığma duvar, binanın çökmesine neden olabilecek büyük deprem tehdidi altındadır.
- 6-Türk Deprem Yönetmeliği (1), yığma yapılar için Yapı Davranış Katsayısı'nın R=2.5 alınmasını öngörmektedir. Bir adet deneyle sınırlandırılmış olduğu vurgulanarak, Şekil 15'te gösterilen yığma duvarın yük çevirim ilişkisi R=2.5 katsayısının kullanımını haklı çıkaracak yeterli sünekliği göstermemektedir.
- 7-Maksimum 0.4g'lik bir yer ivmesi oluşturan depreme maruz deney duvarının dayanımı, çok küçük bir deprem güvenliği oluşturmaktadır. Ancak bunun, deney duvarı, malzeme özellikleri ve geometrik boyutlar ile sınırlı olduğu unutulmamalıdır. Değişik malzeme

özelliklerine, değişik geometrik boyutlara ve kapı pencere açıklıklarına sahip duvar deneyleri de yapılmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Arş. Grv. Dr. Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ'nün Yrd. Doç. Dr. Mehmet KAMANLI danışmanlığında tamamladığı ve S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından kabul edilen "Yığma Yapıların Yatay Derz Güçlendirme Yöntemiyle Güçlendirilmesi" isimli doktora tezinden faydalanılarak hazırlanmış ve S.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri fonu tarafından 06401055 numaralı araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 1997.
- [2] Paulay, T., Priestley, M. J. N., "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", John Wiley & Sons Inc, 1992.
- [3] West, H. W. H., Hasetline, B. A., "The Lateral Load Resistance of Brickwork to Lateral Loading Experimental Methods and Results of Tests on Small Specimens and Full Sized Walls", Structural Engineer, 55, 411-421, 1977.
- [4] Hamoush, S., McGinley, M., Mlakar, P., Terro, M. J., "Out-of-Plane Behaviour of Surface Reinforced Masonry Walls", Construction and Building Materials, Elsevier Science Ltd, 341-351, 2002.
- [5] Sinha, B. P., "An Ultimate Load Analysis of Laterally Loaded Model Orthotropic Brickwork Panels of Low Tensile Strength", Structural Engineer, 56, 81-84, 1978.
- [6] Hendry, A. W., "Structural Masonry", MacMillan Education Ltd, Hong Kong, 1990.
- [7] Kanıt, R., vd., "Depreme maruz yığma duvarın kırılması ve deprem yönetmeliğinin irdelenmesi (Deneysel Çalışma)", Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, 232-240, Antalya, 22-24 Eylül 2005.
- [8] Kanıt, R., vd., "Düzlem Dışı Yüklene Yığma Yapıların Deneysel Davranışı, YDGA2005 – Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı", 17 Şubat 2005, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
- [9] Atımtay, E, Kanıt R., "Experimental Assessment of the Seismic Behavior of Load-Bearing Masonry Walls Loaded Out-of-Plane", Turkish J. Eng. Env. Sci. 30 (2006) , 101,113. c TUBITAK
- [10] ÇÖĞÜRCÜ, M, T., " Yığma Yapıların Yatay Derz Güçlendirme Yöntemiyle Güçlendirilmesi" S. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya, 2007