

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KİLİTLİ YIĞMA BİRİM ELEMANLARLA ÜRETİLEN YIĞMA  
DUVARLARIN TEKRARLI YATAY YÜK ETKİSİ ALTINDAKİ  
DAVRANIŞLARI**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Fatma BİRİNCİ KAYAALP**

**HAZİRAN 2017  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**DOKTORA TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan :** .....

**Üye :** .....

**Üye :** .....

**Üye :** .....

**Üye :** .....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

“Kilitli Yığma Birim Elemanlarla Üretilen Yığma Duvarların Tekrarlı Yatay Yük Etkisi Altındaki Davranışları” isimli bu çalışmayı bana önererek yoğun programına rağmen her aşamasında bilgi, tecrübe ve desteğini benden esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Metin HÜSEM'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmamı inceleyerek bilgi ve tavsiyelerini paylaşan tez izleme komitesindeki değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Selim PUL ve Sayın Prof. Dr. Genççağa PÜRÇEK'e ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım. Jüri üyeliği görevini üstlenen ve değerli zamanlarını ayırıp tezimi değerlendiren değerli hocalarım Prof. Dr. Yusuf AYVAZ ve Doç. Dr. Zeki KARACA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FHD-2015-5310 kodlu araştırma projesinden elde edildiğinden dolayı KTÜ Rektörlüğü'ne ve Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Tez çalışmamın bazı aşamalarında yardımlarını gördüğüm Araş Gör. Serhat DEMİR, Araş. Gör. Hasan SESLİ, Araş. Gör. S. İstemihan COŞĞUN, Araş. Gör. Safa NAYIR, Araş. Gör. Mehmet ŞENTÜRK'e ve adını yazamadığım daha birçok arkadaşşıma teşekkür ederim. Ayrıca deney elemanlarının üretiminde yoğun programına rağmen bana vakit ayırıp yardımcı olan Doç. Dr. Süleyman ADANUR'a çok teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında desteklerini arkamda hissettiğim annem Havva BİRİNCİ'ye ve babam Prof. Dr. Ahmet BİRİNCİ'ye, çalışmam boyunca beni sürekli teşvik edip en umutsuz olduğum anlarda bile bana olan inancını kaybetmeyip desteğini esirgemeyen eşim Araş. Gör. B. Tuna KAYAALP'e minnettar olduğumu belirtir, çalışmamın ülkemiz için yararlı olmasını içtenlikle dilerim.

Fatma BİRİNCİ KAYAALP  
Trabzon 2017

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora tezi olarak sunduğum ‘‘Kilitli Yığma Birim Elemanlarla Üretilen Yığma Duvarların Tekrarlı Yatay Yük Etkisi Altındaki Davranışları’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Metin HÜSEM’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarıda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.22/06/2017

Fatma BİRİNCİ KAYAALP

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Yığma Yapı Malzemeleri .....	3
1.2.1. Doğal Taşlar .....	3
1.2.2. Kerpiç .....	4
1.2.3. Tuğla.....	6
1.2.4. Hafif Beton Bloklar ve Briketler .....	9
1.2.5. Harçlar .....	11
1.2.6. Donatı .....	12
1.2.7. Dolgu Betonu .....	14
1.3. Yığma Yapı Sistemleri .....	14
1.3.1. Donatısız Yığma Yapılar.....	15
1.3.2. Sarılmış Yığma Yapılar.....	16
1.3.3. Donatılı Yığma Yapılar .....	18
1.3.4. Öngermeli Yığma Yapılar .....	20
1.4. Yığma Duvarların Dış Yükler Etkisi Altındaki Davranışları .....	21
1.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yığma Yapıların Modellenmesi .....	29
1.5.1. Makro Modelleme .....	30
1.5.2. Detaylı Mikro Modelleme .....	32
1.5.3. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme .....	33

1.6.	Yapı Davranışlarını Etkileyen Bazı Parametreler .....	37
1.6.1.	Rijitlik Değişimi .....	37
1.6.2.	Süneklik Değişimi .....	38
1.6.3.	Enerji Tüketme Kapasitesi Değişimi.....	40
1.7.	Yığma Yapılarla İlgili Yapılan Diğer Bazı Çalışmalar .....	41
1.8.	Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	61
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	63
2.1.	Deneysel Çalışmalar.....	63
2.1.1.	Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri .....	63
2.1.1.1.	Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	63
2.1.1.2.	Normal Beton Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri .....	66
2.1.1.3.	Harçta Kullanılan Malzemelerin Özellikleri .....	67
2.1.1.4.	Donatı Özellikleri .....	67
2.1.2.	Hafif Beton Deneme Üretimleri ve Özellikleri .....	68
2.1.3.	Kilitli Yığma Birim Eleman Tasarımı ve Üretimi .....	76
2.1.4.	Yığma Duvar Deney Elemanları ve Özellikleri .....	81
2.1.4.1.	Geleneksel Yığma Tuğla ile Üretilen Yığma Duvar Deney Elemanı (GYDDE) .....	82
2.1.4.2.	Boşluklu Kilitli Yığma Duvar Deney Elemanı (KYDDE-1) .....	83
2.1.4.3.	Dolgulu Kilitli Yığma Duvar Deney Elemanı (KYDDE-2).....	83
2.1.4.4.	Dolgulu Donatılı Kilitli Yığma Duvar Deney Elemanı (KYDDE-3) .....	83
2.1.5	Normal Beton ve Harcın Üretimi .....	88
2.1.6.	Yığma Duvar Deney Elemanlarının Üretimi.....	88
2.1.7.	Deney Elemanlarında Kullanılan Beton ve Harcın Özellikleri .....	95
2.1.7.1.	Beton Özellikleri .....	96
2.1.7.2.	Harç Özellikleri .....	98
2.1.8.	Kilitli Yığma Birim Elemanlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler .....	100
2.1.8.1.	Eksenel Basınç Deneyleri.....	101
2.1.8.2.	Doğrudan Kayma Deneyi.....	104
2.1.8.3.	Diyagonal Basınç Deneyi.....	106
2.1.9.	Yığma Duvarlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler .....	109
2.2.	Analitik Çalışmalar .....	113

2.2.1. Sonlu Eleman Analizlerinde Kullanılan Malzeme ve Arayüzey Özellikleri .....	113
2.2.1.1. Beton ve Yığma Birim Elemanların Malzeme Özellikleri .....	113
2.2.1.2. Donatı Malzeme Özellikleri .....	120
2.2.1.3. Yığma Birim Elemanlar Arasındaki Arayüzeylerin Özellikleri .....	121
2.2.2. Deney Elemanlarının Modellenmesi .....	124
2.2.3. Sonlu Elemanlara Ayırma .....	128
2.2.4. Sınır Şartları, Yükleme Durumu ve Analiz .....	131
3. BULGULAR VE İRDELEMELER .....	133
3.1. Deney Elemanlarından Elde Edilen Bulgular .....	133
3.1.1. Geleneksel Yığma Duvar Deney Elemanından Elde Edilen Bulgular ....	133
3.1.2. Boşluklu Kilitli Yığma Duvar Deney Elemanından Elde Edilen Bulgular .....	137
3.1.3. Dolgulu Kilitli Yığma Duvar Deney Elemanından Elde Edilen Bulgular .....	141
3.1.4. Dolgulu Donatılı Kilitli Yığma Duvar Deney Elemanından Elde Edilen Bulgular .....	144
3.2. Deney Elemanlarından Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi .....	148
3.2.1. Deney Elemanlarının Taşıma Kapasitelerinin İrdelenmesi .....	148
3.2.2. Deney Elemanlarının Enerji Tüketme Kapasitelerinin İrdelenmesi .....	150
3.2.3. Deney Elemanlarının Rijitliklerinin İrdelenmesi .....	153
3.3. Kilitli Yığma Duvarların Sonlu Eleman Analizleri ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması .....	155
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	161
5. KAYNAKLAR.....	165
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

## ÖZET

### KİLİTLİ YIĞMA BİRİM ELEMANLARLA ÜRETİLEN YIĞMA DUVARLARIN TEKRARLI YATAY YÜK ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

Fatma BİRİNCİ KAYAALP

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Metin HÜSEM  
2017, 172 Sayfa

Türkiye'deki yapılar taşıyıcı sistemlerine göre incelendiğinde özellikle kırsal bölgelerde yığma yapıların oldukça fazla olduğu görülmektedir. Duvarların taşıyıcı olduğu bu yapı sistemleri depremlerden oldukça fazla etkilenerek yıkılmakta veya hasara uğramaktadır. Bu nedenle yığma yapıların dış yük etkisi altındaki davranışlarının belirlenip yenilikçi yığma yapım tekniklerinin geliştirilmesi ve kırsal dönüşüm zorunlu hale gelmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, kilitli yığma birim elemanlar kullanarak, yığma duvarların yatay yük taşıma kapasitelerinin artırılmasıdır. Bu amaçla birinci bölümde çalışmaya ilişkin genel bilgiler, ikinci bölümde ise kullanılan malzemelerin özellikleri, kilitli yığma birim eleman tasarım ve üretimi, deney elemanları, deney düzenekleri ve deneylerin yapıları ile gerçekleştirilen analitik çalışmalar verilmiştir. Deneylerden ve analitik çalışmalardan elde edilen bulgular ve bu bulguların irdelenmesi üçüncü bölümde yer almaktadır. Dördüncü bölümde ise çalışmanın bütününden çıkartılabilecek sonuçlar özetlenmiş ve bazı öneriler yapılmıştır.

Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar, tez kapsamında tasarlanıp köpük betonla üretilen kilitli yığma birimlerin, yığma duvarların yatay yük taşıma kapasitesini, enerji tüketme kapasitesini ve rijitliğini artırdığını göstermektedir. Bu durum, kırsal bölgelerde inşa edilecek yığma yapılarda bu elemanların kullanılması halinde, depremden dolayı oluşması muhtemel can ve mal kayıplarının azalacağını işaret etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Yığma duvar, Donatılı yığma, Kilitli yığma birim eleman, Tekrarlı yük, Düzlem içi yatay yükleme, Köpük beton, Hafif beton.

PhD. Thesis

SUMMARY

BEHAVIOR OF MASONRY WALLS BUILT WITH INTERLOCKING MASONRY  
UNITS UNDER CYCLIC LATERAL LOADING

Fatma BİRİNCİ KAYAALP

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Metin HUSEM  
2017, 172 Pages

When buildings are investigated according to their load-bearing systems in Turkey, It is seen that there are many masonry building especially in rural areas. These building system, walls of which are load-bearing wall are considerably affected by earthquakes and they are damaged or collapsed. Consequently, determining behavior of masonry building under external loads, development of new masonry construction techniques and rural renewal become necessary.

The main purpose of this study is to increase lateral load-bearing capacities of masonry walls by using interlocking masonry units. For this purpose, in the first chapter, general information related to this study has been given. In the second chapter, properties of materials used in experiments, production and design of interlocking masonry units, test specimens, experimental setups, experiments and analytical studies has been given. Findings obtained from experiments and analytical studies and discussion of these findings are in the third chapter. In the fourth chapter, the main conclusions that can be deduced from the whole of the study have been summarized and some recommendations have been made.

The results obtained from the study have shown that the interlocking masonry units designed and produced with foamed concrete within the scope of the thesis increased lateral load-bearing capacity, energy dissipation capacity and stiffness of the masonry walls. This indicates that if these elements are used in the masonry structures to be built in rural areas, the possible loss of life and property due to the earthquake will decrease.

**Key Words:** Masonry wall, Reinforced masonry, Interlocking masonry unit, Cyclic loading, In plane lateral loading, Foam concrete, Lightweight concrete.



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Kerpiç bloklar .....	5
Şekil 1.2. Kuzu ve ana kerpiç boyutları .....	6
Şekil 1.3. Dolu ve delikli harman tuğlaları .....	7
Şekil 1.4. Taşıyıcı yığma tuğlalar .....	8
Şekil 1.5. Çeşitli tiplerde taşıyıcı beton bloklar .....	11
Şekil 1.6. Yığma yapılarda kullanılan bazı donatı tipleri .....	13
Şekil 1.7. Donatısız yığma yapılar .....	16
Şekil 1.8. Sarılmış yığma yapı örneği ve elemanları .....	17
Şekil 1.9. Düşey hatıl uygulamaları .....	17
Şekil 1.10. Değişik tipteki donatılı yığma duvarlar .....	19
Şekil 1.11. Donatılı yığma yapı uygulamaları .....	19
Şekil 1.12. Yatay yük etkisi altındaki duvarlarda donatı etkisi .....	20
Şekil 1.13. Öngermeli yığma duvar tipi .....	20
Şekil 1.14. Öngermeli yığma yapı uygulamaları .....	21
Şekil 1.15. Eksenel basınç altında yığma birimlerde ve harçta oluşan gerilmeler .	22
Şekil 1.16. Eksenel basınç altında harç ve yığma birimlerdeki hasarlar .....	22
Şekil 1.17. Eksenel çekmeye maruz yığma elemanlardaki deformasyonlar .....	23
Şekil 1.18. Kayma etkisindeki yığma elemanın davranışı .....	24
Şekil 1.19. Deprem etkisi altındaki yığma yapı .....	25
Şekil 1.20. Yığma duvarların (a) eğilme etkisindeki, (b) kayma etkisindeki göçme şekilleri .....	26
Şekil 1.21. Kesme etkisindeki yığma duvarın göçme şekli .....	27
Şekil 1.22. Deprem sonrası yığma yapı duvarlarındaki düzlem dışı hasarlar .....	27
Şekil 1.23. Deprem sonrası yığma yapı duvarlarındaki düzlem içi hasarlar .....	28
Şekil 1.24. Yığma yapı modelleme yöntemleri, (a) Makro modelleme, (b) Detaylı mikro modelleme, (c) Basitleştirilmiş mikro modelleme .....	30
Şekil 1.25. İki adımlı homojenleştirme yöntemi, (a) homojenleştirmenin amacı, (b) x doğrultusundan y doğrultusuna homojenleştirme, (c) y doğrultusundan x doğrultusuna homojenleştirme .....	31
Şekil 1.26. Analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması .....	32

Şekil 1.27. Detaylı mikro modelleme .....	33
Şekil 1.28. Basitleştirilmiş mikro modelleme .....	34
Şekil 1.29. Çevrimsel yatay yük etkisinde sekant rijitliğinin belirlenmesi.....	38
Şekil 1.30. Tek eğimli eğri modeli ile deneysel zarf eğrisinin idealleştirilmesi.....	39
Şekil 1.31. Çevrimsel yük etkisi altında her bir çevrimde tüketilen enerjinin belirlenmesi.....	41
Şekil 1.32. Kompozit arayüzey kırılma kriteri .....	42
Şekil 1.33. Zarnic ve diğ.'nin çalışmasındaki deney elemanları ve deney elemanlarının farklı cephelerinde oluşan hasarlar .....	43
Şekil 1.34. Alwathaf ve diğ.'nin çalışmalarında kullandıkları deney elemanları ile deney düzeneği .....	44
Şekil 1.35. Yi ve diğ.'nin test ettikleri deney elemanı.....	45
Şekil 1.36. Voon ve Ingham'ın çalışmalarındaki bazı deney elemanları .....	48
Şekil 1.37. Porto ve diğ.'nin çalışmasındaki tuğlalar ve deney elemanları .....	52
Şekil 1.38. Avila ve diğ.'nin çalışmasındaki deney elemanlarında oluşan hasarlar.....	54
Şekil 1.39. Demir'in çalışmasındaki taş duvar deney elemanları.....	55
Şekil 2.1. Hafif beton üretimlerinde kullanılan agregalar, (a) geleneksel agrega, (b) pomza.....	64
Şekil 2.2. Hafif beton üretimlerinde kullanılan agregalar, (a) genleştirilmiş perlit, (b) ham perlit.....	64
Şekil 2.3. 600 kN kapasiteli üniversal deney aleti .....	68
Şekil 2.4. Betonların üretiminde kullanılan düşey eksenli betonyer .....	71
Şekil 2.5. Önceden tartılıp hazır hale getirilen karışım malzemeleri.....	72
Şekil 2.6. Suyu doymun hale getirilen pomzalar .....	72
Şekil 2.7. Üretimlerde kullanılan köpük jeneratörü ve çalışma prensibi .....	73
Şekil 2.8. Kilitli yığma birim eleman geometrik özellikleri .....	76
Şekil 2.9. Kilitli yığma birim eleman derz birleşimleri .....	77
Şekil 2.10. Kilitli duvar elemanlarda (a) yatay donatı, (b) düşey donatı, (c) yatay-düşey donatı kullanımı.....	78
Şekil 2.11. Yığma birim eleman kalıp sistemi.....	78
Şekil 2.12. Kilitli yığma birim eleman kalıplarının hazırlanma aşamaları .....	79
Şekil 2.13. Tam ve yarım kilitli yığma birimler .....	80
Şekil 2.14. Deney elemanlarının genel görünümü.....	81
Şekil 2.15. GYDDE deney elemanı boyut ve donatı detayları .....	84
Şekil 2.16. KYDDE-1 deney elemanı boyut ve donatı detayları.....	85

Şekil 2.17. KYDDE-2 deney elemanı boyut ve donatı detayları.....	86
Şekil 2.18. KYDDE-3 deney elemanı boyut ve donatı detayları.....	87
Şekil 2.19. Düşey delikli taşıyıcı yığma tuğla duvar inşa aşamaları .....	89
Şekil 2.20. KYDDE-1 ve KYDDE-2 deney elemanlarının üretim aşamaları.....	90
Şekil 2.21. Donatılı yığma duvar inşa aşamaları .....	91
Şekil 2.22. (a) Merkezi basınç, (b) doğrudan kayma, (c) diyagonal basınç deney elemanları .....	92
Şekil 2.23. Yığma duvarlar ve düşey hatlı donatıları.....	92
Şekil 2.24. Ahşap kalıp sistemi.....	93
Şekil 2.25. Yatay hatlı donatısı ve kalıplara yerleştirilmesi .....	93
Şekil 2.26. Yığma duvar çerçevelerinde kür uygulaması .....	94
Şekil 2.27. Üretimleri tamamlanan kilitli yığma duvar deney elemanları .....	94
Şekil 2.28. Yüksek kapasiteli (a) aksenal basınç, (b) eğilmede-yarmada çekme deney aleti.....	95
Şekil 2.29. Beton numunelerde basınç ve yarmada çekme deneyleri.....	96
Şekil 2.30. Üretilen betonlar için ortalama gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi .....	97
Şekil 2.31. Harç numunelerde basınç ve yarmada çekme deneyleri.....	98
Şekil 2.32. Harç için gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi .....	99
Şekil 2.33. Kilitli yığma birimler üzerinde gerçekleştirilen deneylerde kullanılan aletler (a) yük hücresi (loadcell), (b) yerdeğiştirme ölçer (LPDT) ve (c) veri toplama ünitesi (data logger).....	100
Şekil 2.34. Tek yığma birim aksenal basınç testi yükleme düzeneği ve deney elemanı.....	101
Şekil 2.35. Kilitli yığma birim eleman gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi .....	102
Şekil 2.36. Yığma prizma aksenal basınç testi yükleme düzeneği ve deney elemanı.....	102
Şekil 2.37. Prizmatik deney elemanındaki aksenal basınç hasarları.....	103
Şekil 2.38. Yığma prizma gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi .....	103
Şekil 2.39. Doğrudan kayma testi yükleme düzeneği ve deney elemanı.....	104
Şekil 2.40. Kayma gerilmesi-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....	105
Şekil 2.41. Doğrudan kayma deney elemanında meydana gelen hasar durumu.....	105
Şekil 2.42. Diyagonal basınç deneyi yükleme düzeneği.....	106
Şekil 2.43. Diyagonal basınç deney elemanı .....	107
Şekil 2.44. Diyagonal basınç deney elemanı nihai kırılma şekli .....	108
Şekil 2.45. Diyagonal basınç deneyi yatay ve düşey yük-yerdeğiştirme ilişkileri .	108

Şekil 2.46. Yatayda meydana gelen çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....	109
Şekil 2.47. Yığma duvar düzlem içi yükleme deney düzeneği ve ölçüm sistemi...	111
Şekil 2.48. Deneye hazır hale getirilen kilitli deney elemanından bir görünüm.....	112
Şekil 2.49. İki yönlü giderek artan yerdeğiştirme çevrimleri .....	112
Şekil 2.50. CDP malzeme modelinde, betonun basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi .....	114
Şekil 2.51. CDP malzeme modelinde, betonun çekme altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi .....	114
Şekil 2.52. CDP modelde kolon, kiriş ve dolgu elemanlarda kullanılan beton için tanımlanan aksenal basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi...	117
Şekil 2.53. CDP modelde kolon, kiriş ve dolgu elemanlarda kullanılan beton için tanımlanan aksenal çekme altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi ..	117
Şekil 2.54. CDP modelde aksenal basınç altında yığma birim elemanlar için tanımlanan gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.....	119
Şekil 2.55. CDP modelde aksenal çekme altında yığma birim elemanlar için tanımlanan gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.....	120
Şekil 2.56. Elasto-plastik malzeme modeli.....	121
Şekil 2.57. Lineer çekme-ayrılma (traction-separation) davranışı ve göçme modları.....	123
Şekil 2.58. Kilitli yığma duvarlara ait gerçek sistem ve modellenen sistem önden görünüşü .....	125
Şekil 2.59. Yığma duvar deney elemanları yükleme çerçevesinin sonlu eleman programında modellenmiş hali .....	127
Şekil 2.60. Deney elemanlarının sonlu eleman modeli.....	127
Şekil 2.61. Deney elemanlarına ait (a) boşluklu, (b) dolgulu ve (c) donatılı yığma duvar sonlu eleman modelleri.....	128
Şekil 2.62. Sonlu eleman modellerinde kullanılan (a) C3D8R, (b) C3D6 ve (c) T3D2 eleman tipleri .....	129
Şekil 2.63. Kilitli yığma birim elemanlara ait sonlu eleman modelleri .....	130
Şekil 2.64. Dolgu betonu sonlu eleman modeli .....	130
Şekil 2.65. Deney elemanlarından birine ait sonlu eleman görünümü .....	131
Şekil 2.66. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan, iki yönlü giderek artan yük çevrimleri.....	132
Şekil 3.1. GYDDE deney elemanının deney esnasından bir görünümü .....	134
Şekil 3.2. GYDDE'ye ait çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi .....	134
Şekil 3.3. Düzlem içi yükleme deneyi sonunda GYDDE'deki hasar durumu.....	135
Şekil 3.4. GYDDE'ye ait dayanım zarf eğrisi .....	135

Şekil 3.5. GYDDE'ye ait rijitlik azalımı eğrisi.....	136
Şekil 3.6. GYDDE'ye ait toplam tüketilen enerji eğrisi .....	137
Şekil 3.7. KYDDE-1'e ait çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi .....	138
Şekil 3.8. KYDDE-1'e ait deney anından bir görünüm.....	138
Şekil 3.9. Düzlem içi yükleme deneyi sonunda KYDDE-1'deki hasar durumu ..	139
Şekil 3.10. KYDDE-1'e ait dayanım zarfı eğrisi.....	139
Şekil 3.11. KYDDE-1'e ait rijitlik azalımı eğrisi .....	140
Şekil 3.12. KYDDE-1'e ait toplam tüketilen enerji eğrisi.....	140
Şekil 3.13. KYDDE-2'ye ait çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi .....	141
Şekil 3.14. KYDDE-2'de deney sonunda meydana gelen hasarlar .....	142
Şekil 3.15. KYDDE-2'ye ait dayanım zarfı eğrisi.....	142
Şekil 3.16. KYDDE-2'ye ait rijitlik azalımı eğrisi .....	143
Şekil 3.17. KYDDE-2'ye ait toplam tüketilen enerji eğrisi.....	144
Şekil 3.18. KYDDE-3'e ait iki yönlü çevrimsel yük-yerdeğiştirme ilişkisi.....	145
Şekil 3.19. KYDDE-3'te deney sonunda meydana gelen hasarlar .....	145
Şekil 3.20. KYDDE-3'te deney sonunda meydana gelen hasarların yakından görünümü.....	146
Şekil 3.21. KYDDE-3'e ait dayanım zarfı eğrisi.....	146
Şekil 3.22. KYDDE-3'e ait rijitlik azalımı eğrisi .....	147
Şekil 3.23. KYDDE-3'e ait toplam tüketilen enerji eğrisi.....	147
Şekil 3.24. Deney elemanlarının dayanımlarına ilişkin zarf eğrileri .....	148
Şekil 3.25. Deney elemanlarının taşıma kapasitelerine ilişkin histogram .....	149
Şekil 3.26. Deney elemanlarının yığılımlı olarak tükettikleri toplam enerjinin ötelenme oranıyla değişimi eğrileri .....	151
Şekil 3.27. Deney elemanlarının %2.4 bağıl ötelenme oranı için enerji tüketme kapasitelerine ilişkin histogram .....	151
Şekil 3.28. Deney elemanlarının düzlem içi çevrimsel yatay yük etkisindeki rijitliklerinin ötelenme oranıyla değişimi eğrileri.....	153
Şekil 3.29. Deney elemanlarının başlangıç rijitliklerine ilişkin histogram.....	154
Şekil 3.30. KYDDE-1 deney elemanı için elde edilen (a) analitik, (b) filtrelenmiş analitik yük-yerdeğiştirme eğrileri ile analitik dayanım zarfı eğrisi .....	156
Şekil 3.31. KYDDE-1'e ait deneysel ve analitik dayanım zarfı eğrileri .....	156
Şekil 3.32. KYDDE-2 deney elemanı için elde edilen (a) analitik, (b) filtrelenmiş analitik yük-yerdeğiştirme eğrileri ile analitik dayanım zarfı eğrisi .....	157

Şekil 3.33. KYDDE-2'ye ait deneysel ve analitik dayanım zarfı eğrileri .....	158
Şekil 3.34. KYDDE-3 deney elemanı için elde edilen (a) analitik, (b) filtrelenmiş analitik yük-yerdeğiştirme eğrileri ile analitik dayanım zarfı eğrisi .....	159
Şekil 3.35. KYDDE-3'e ait deneysel ve analitik dayanım zarfı eğrileri .....	159
Şekil 3.36. Yığma duvar deney elemanlarına ait deneysel ve analitik yük taşıma kapasiteleri.....	160



## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Doğal duvar taşlarının dayanım gruplarına göre en küçük basınç dayanımları .....	4
Tablo 1.2. Basınç dayanımları ve biçimlerine göre harman tuğlaları .....	7
Tablo 1.3. Taşıyıcı duvar yapımında kullanılan fabrika tuğlaları ve basınç dayanımları .....	8
Tablo 1.4. Tuğla yığma yapı kat sayısı ve duvar kalınlıkları.....	9
Tablo 1.5. Hafif beton blok ve briketlerin basınç dayanımları .....	9
Tablo 1.6. Harç sınıfları ve minimum basınç dayanımları .....	12
Tablo 1.7. Dolgu betonu karakteristik basınç ve kayma dayanımları.....	14
Tablo 1.8. Bazı bilimsel çalışmalarda kullanılmış olan normal ve kayma rijitlik değerleri .....	37
Tablo 2.1. Beton üretiminde kullanılan çimentonun fabrikasından alınan bazı özellikleri .....	65
Tablo 2.2. Agreganın granülometrik bileşimi .....	66
Tablo 2.3. Harç üretiminde kullanılan çimentonun fabrikasından alınan bazı özellikleri .....	67
Tablo 2.4. Deney elemanlarının üretiminde kullanılan donatıların mekanik özellikleri .....	68
Tablo 2.5. Deneme beton üretimi bileşimleri (1m <sup>3</sup> ) .....	70
Tablo 2.6. Üretilen betonların basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıkları.....	75
Tablo 2.7. Düşey delikli taşıyıcı tuğla mekanik ve fiziksel özellikleri.....	82
Tablo 2.8. Harç karışım oranları (hacimce) .....	88
Tablo 2.9. Beton karışım oranları (1m <sup>3</sup> ) .....	88
Tablo 2.10. Deney elemanlarının üretiminde kullanılan betonların bazı özellikleri .....	97
Tablo 2.11. Deney elemanlarında kullanılan harçların bazı özellikleri .....	99
Tablo 2.12. CDP modelde kolon, kiriş ve dolgu elemanlarda kullanılan beton için tanımlanan bazı mekanik özellikler .....	118
Tablo 2.13. CDP modelde yığma birim elemanlar için tanımlanan bazı mekanik özellikler .....	120
Tablo 2.14. Sonlu eleman modellerinde kullanılan donatı özellikleri .....	121

Tablo 2.15. Yığma duvar arayüzey kontak özellikleri .....	124
Tablo 2.16. Kilitli yığma birim elemanların gerçek ve sonlu eleman analizlerinde kullanılan sadeleştirilmiş modelleri .....	126
Tablo 3.1. Deney elemanlarının itmede ve çekmede taşıdıkları maksimum yükler ve bu değerlere karşılık gelen yerdeğişirmeler.....	149
Tablo 3.2. Deney elemanlarının birbirine göre taşıma kapasitelerindeki değişim oranları .....	149
Tablo 3.3. Deney elemanlarının %2.4 bağıl ötelenme oranı için birbirine göre enerji tüketme kapasite artış oranları .....	152
Tablo 3.4. Deney elemanlarının birbirine göre başlangıç rijitliklerindeki artış oranları .....	154





## SEMBOLLER DİZİNİ

$A_n$	: Net diyagonal en kesit alanı
$\alpha_c$	: Betonun gerilme şekildeğiştirme diyagramında azalan kısmı temsil eden sabit (basınç)
$\alpha_t$	: Betonun gerilme şekildeğiştirme diyagramında azalan kısmı temsil eden sabit (çekme)
$\beta_i$	: Beton içerisinde kullanılan agrega sınıflarının kütlece oranı
CDP	: Concrete Damage Plasticity
DKY	: Doygun kuru yüzey
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
$d_e$	: Elastik limit yerdeğiştirme değeri
$d_{cr}$	: Deney elemanında ilk çatlağı oluşturan yüke karşılık gelen
$d_u$	: İdealize edilmiş eğrinin nihai yerdeğiştirme değeri
$D$	: Silindir numunenin çapı
$e$	: Dışmerkezlilik
$E_c$	: Beton elastisite modülü
$E_m$	: Harç elastisite modülü
$E_u$	: Yığma birim eleman elastisite modülü
$E_o$	: Betonun başlangıç elastisite modülü
$E_b$	: Yığma prizma elastisite modülü
$F_1$	: İtmedeki maksimum yük
$F_2$	: Çekmedeki maksimum yük
$F_{cr}$	: Deney elemanında ilk çatlağı oluşturan yük
$F_u$	: İdealize edilmiş eğrinin ulaştığı maksimum yük
$F_{max}$	: Yük-yerdeğiştirme eğrisindeki maksimum yük
$f_{ct}'$	: Beton Yarmada çekme dayanımı
$f_{ct}$	: Beton çekme dayanımı
$f_c$	: Beton basınç dayanımı
$f_{ck}$	: Betonun karakteristik basınç dayanımı

$f_{cvk}$	: Betonun karakteristik kayma dayanımı
$f_{yk}$	: Donatı çeliğine ait karakteristik akma dayanımı
$f_{tk}$	: Donatı çeliğine ait karakteristik çekme dayanımı
$f_{to}$	: Betonun gerilme şekildeğiştirme diyagramındaki maksimum gerilme (çekme)
$f_{cu}$	: Betonun gerilme şekildeğiştirme diyagramındaki maksimum gerilme (basınç)
$f_{cb}$	: Yığma prizma basınç dayanımı
$f_{tb}$	: Yığma prizma çekme dayanımı
$f_{cm14}$	: 14 günlük ortalama beton basınç dayanımı
$f_{cm28}$	: 28 günlük ortalama beton basınç dayanımı
$f_{bo}/f_{co}$	: İki eksenli yükleme durumundaki akma gerilmesinin, tek eksenli yükleme halindeki akma gerilmesine oranı
GYDDE	: Geleneksel yığma duvar deney elemanı
$G_m$	: Harç kayma modülü
$G_u$	: Yığma birim eleman kayma modülü
$h$	: Diyagonal çekme deney elemanının genişliği
KB	: Köpük beton
KYDDE	: Kilitli yığma duvar deney elemanı
$K_c$	: Akma eğrisinin şeklini belirleyen değer
$\bar{k}$	: Rijitlik matrisi
$k_n$	: Normal rijitlik
$k_s$	: Kayma rijitliği
$k_{sec}$	: Sekant rijitliği
$k_e$	: Başlangıç rijitliği
$L$	: Silindir numunenin boyu
LPDT	: Doğrusal potansiyometrik yerdeğiştirme ölçer
$N$	: Kaymanın olduğu iki yüzey arasındaki normal gerilme
$n$	: Boyutsuz parametre
$P$	: Silindir numunenin yarılmaya sebep olan basınç kuvveti
$P_v$	: Diyagonal çekme deney elemanına uygulanan basınç yükü

$S/C$	: Su miktarının çimento miktarına oranı
$\bar{t}$	: Gerilme tansörü
$t_m$	: Harç kalınlığı
$t_u$	: Yığma birim eleman yüksekliği
$t$	: Diyagonal çekme deney elemanının kalınlığı
$V_a$	: Beton içerisindeki agrega hacmi
$V_w$	: Beton içerisindeki su hacmi
$V_h$	: Beton içerisinde hapsedilmiş hava hacmi
$w$	: Diyagonal çekme deney elemanının genişliği
$W_c$	: 1 m <sup>3</sup> betondaki çimento kütlesi
$W_a$	: Beton içerisindeki toplam agrega kütlesi
$\Delta$	: Kayma miktarı
$\sigma_n$	: Normal gerilme
$\epsilon_{uk}$	: Donatı çeliğinde en büyük çekme gerilmesinde oluşan birim uzama
$\epsilon_c^{in}$	: CDP'de basınçtan dolayı oluşan elastik olmayan şekil değiştirme
$\epsilon_t^{ck}$	: CDP'de çekmeden dolayı oluşan elastik olmayan şekil değiştirme
$\epsilon_{cu}$	: Betonun gerilme şekil değiştirme diyagramındaki maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme (basınç)
$\epsilon_{to}$	: Betonun gerilme şekil değiştirme diyagramındaki maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme (çekme)
$\epsilon_{cb}$	: Yığma prizmanın basınç dayanımına karşılık gelen şekil değiştirme
$\epsilon_{tb}$	: Yığma prizmanın çekme dayanımına karşılık gelen şekil değiştirme
$\delta_1$	: İtmede maksimum yüke karşılık gelen yer değiştirme
$\delta_2$	: Çekmede maksimum yüke karşılık gelen yer değiştirme
$\bar{\delta}$	: Deplasman vektörü
$\tau_s$	: Kayma gerilmesi
$\tau$	: Kayma gerilmesi
$\tau_{cr}$	: Kritik kayma gerilmesi
$\delta_n$	: Normal yer değiştirme
$\delta_s$	: Kayma yer değiştirmesi
$\delta^0$	: Başlangıç hasarı yer değiştirme değeri

$\delta/h$	: Ötelenme oranı
$\nu$	: Poisson oranı
$\nu_m$	: Harç Poisson oranı
$\eta$	: Sürtünme katsayısı
$\mu_u$	: Süneklik katsayısı
$\mu$	: Boyutsuz parametre
$\gamma_c$	: Çimentonun doymun kuyu yüzey birim kütlesi
$\gamma_{ai}$	: Betonda kullanılan i. agreganın doymun kuru yüzey birim kütlesi
$\emptyset$	: Donatı çapı
$\Psi$	: Dilatasyon açısı

Not: Semboller dizininde verilmeyen semboller metnin içinde geçtikleri yerde tanımlanmıştır.

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

İnsanoğlunun var oluşundan bugüne barınma, çalışma, dinlenme, ulaşım ve ibadet gibi gereksinimlerini karşılamak, hayvanların ve eşyaların korunmasını sağlamak için çeşitli yapı gereçleri ve yapım teknikleriyle inşa edilen yeryüzü, yer altı ve su altı tesislerine yapı adı verilmektedir. Yapıların inşa edilmesinde kullanılan ilk malzemeler taş, toprak ve ahşap iken teknolojinin gelişmesi ve artan ihtiyaçlarla orantılı olarak modern toplumlar beton, çelik gibi yenilikçi yapı malzemeleri kullanmaya başlamışlardır.

Günümüzde en yaygın halde betonarme ve çelik yapılar inşa edilse de Devlet İstatistik Enstitüsü (DİE)'nin 2000 yılı verilerine göre [1], Türkiye'deki yapılar taşıyıcı sistemlerine göre incelendiğinde %51'i yığma yapı olarak karşımıza çıkmakta ve bu tip yapıların büyük çoğunluğu kırsal alanlarda bulunmaktadır. Yığma yapılar özellikle kırsal kesimlerde malzemenin kolay temin edilebilmesi, kolay inşa edilebilmeleri, yangın ve donmaya karşı daha dayanıklı olması gibi faktörler nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Söz konusu nedenlerin ve ülkemizdeki ekonomik koşulların bu yapı sistemlerini cazip kılmaya devam edeceği muhtemeldir.

Afet işleri Genel Müdürlüğü tarafından 1996 yılında yayınlanan deprem bölgeleri haritasında Türkiye deprem tehlikesi açısından beş farklı bölgeye ayrılmıştır. Söz konusu haritaya göre ülkemizin yüz ölçümünün % 42'si birinci derece ve %24'ü ikinci derece deprem kuşağı üzerindedir. Mevcut bilimsel çalışmalar ve teknoloji ile depremin ne zaman ve nerede olacağını önceden belirlenmesinin mümkün olmadığı ve Türkiye nüfusunun çoğunluğunun yaşamını sürdürdüğü yapıların birinci ve ikinci derece deprem bölgelerinde bulunduğu dikkate alındığında, depremlerden dolayı meydana gelebilecek hasar ve can kayıplarının en aza indirilmesi için depreme dayanıklı yapılar inşa edilmesi kaçınılmazdır.

Geçmişte ülkemizde meydana gelmiş büyük depremlerden sonraki incelemelerde, çoğunluğu mühendislik hizmeti almadan inşa edilmiş olan yığma yapıların ya büyük hasar aldığı ya da tamamen göçmüş oldukları gözlemlenmiştir. Bu durum büyük can ve mal kayıplarına sebep olmuştur. Yığma yapıların, Türkiye'deki yapı stoğunun büyük bölümünü oluşturduğu da dikkate alındığında bu yapıların deprem davranışlarının belirlenerek

yenilikçi yığma yapı teknikleri geliştirilmesi ve özellikle kırsal dönüşümün gerçekleştirilmesi zorunlu hale gelmektedir.

Yığma yapılarda duvarlar, yapıya gelen yükleri taşıyan temel elemanlardır. Deprem hareketleri esnasında, yapı kütesine bağlı olarak yatay kuvvetler meydana gelmektedir. Taşıyıcı duvarlar, oluşan bu yatay yüklerden dolayı düzlem içi ve düzlem dışı eğilme momenti ve kesme kuvveti ile düşey yüklerden dolayı oluşan basınç kuvvetine maruz kalırlar. Bu yapısal elemanlar genel olarak düşey yüklere karşı yüksek dayanıma sahipken, yatay yükler etkisi altındaki davranışları geliştirilmelidir. Yığma yapılarda yatay yükler etkisi altında oluşan üç temel göçme modu vardır. Bunlar, eğilme momentlerinin ve kesme kuvvetlerinin neden olduğu göçme modlarıdır.

Bu çalışmanın temel amacı; kilitli yığma birim elemanlar kullanılarak, yığma duvarların yatay yük taşıma kapasitelerinin artırılması ile deprem etkileri altındaki davranışının iyileştirilmesi ve yapıların toptan göçmesi önlenerek can ve mal kayıplarını en aza indirgenmesidir. Ayrıca bu çalışma ile kilitli birim eleman geometrisinin yığma duvarların yatay yük taşıma kapasitesine katkısı incelenmiş olacaktır. Bu amaçla önce yığma duvarların göçme modları dikkate alınarak, istenilen duvar davranışını sağlayacak kilitli yığma birim eleman tasarımı yapılmış ve kalıpları hazırlanmıştır. Birim eleman üretimlerinde hafif beton kullanılmasına karar verilmiş ve bu çalışmanın amacına en uygun malzemeyi elde edebilmek için farklı karışım oranlarında deneme üretimleri yapılmıştır. Söz konusu üretimler sonunda, seçilen hafif beton karışımı ile yığma birim eleman üretimleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, yapısal analizlerde kullanılmak üzere söz konusu birim elemanların malzeme özelliklerini belirlemeye yönelik aksel basınç, diyagonal çekme ve kayma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonraki aşamasında kilitli yığma birim elemanlar kullanılarak dolgusuz, dolgulu ve dolgulu/donatılı olmak üzere 3 farklı tipte duvar üretilmiştir. Bununla birlikte kilitli yığma birim elemanlarla üretilen duvarlarla karşılaştırma amacıyla geleneksel yığma tuğlalı bir duvar inşa edilmiştir. Söz konusu taşıyıcı yığma duvarlar üzerinde, deprem benzeşimli düzlem içi çevrimsel yatay yük etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın teorik kısmını oluşturan analitik çalışmalar bölümünde ise bu yığma duvarlara ait sonlu eleman modelleri oluşturularak çevrimsel yatay yük etkisi altında analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bir sonraki bölümünde, analizler sonunda elde edilen sistem davranışı ve bulgular, deneylerden elde edilen bulgularla karşılaştırılıp sonuçlar irdelenmiştir. Son

bölümde ise çalışmanın tamamından elde edilen bulgular ve irdelemelere göre elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve bazı önerilerde bulunulmuştur.

## **1.2. Yığma Yapı Malzemeleri**

Yığma yapım tekniği, tarih boyunca yapının inşa edileceği yere ve üretim şartlarına bağlı olarak değişik malzeme ve tekniklerle oluşturulan köprü, tonoz, ibadethane ve konut gibi pek çok yapının inşa edildiği, ayrıca günümüzde de yaygın olarak kullanılan bir yapım tekniğidir.

Bir yapının inşasında kullanılan yapı malzemeleri, söz konusu yapının yapısal davranışlarını belirlemede önemli rol oynar. Fiziksel ve kimyasal özellikleri iyi olan malzemelerle inşa edilen yapılar çok uzun yıllar ayakta kalabilmektedir. Yığma yapıların yük taşıma kapasiteleri, duvarları oluşturan birim eleman ve bağlayıcının özellikle basınç, çekme ve kayma dayanımlarına, dayanıklılığına, su emme kapasitesi vb. bağlı olarak değişmektedir.

Literatürde, geçmiş ve günümüz teknolojisi ile inşa edilen yığma yapı duvarlarında kullanılan malzemeler olarak;

- ✓ Doğal taşlar,
- ✓ Kerpiç,
- ✓ Tuğla,
- ✓ Briket,
- ✓ Beton bloklar,
- ✓ Harçlar,
- ✓ Donatılar,
- ✓ Dolgu betonları vb. olarak karşımıza çıkmaktadır.

### **1.2.1. Doğal Taşlar**

Yığma duvarların hesap ve yapım kurallarının bulunduğu TS 2510 [2]'ye göre yığma duvarların yapımında kullanılacak olan taşlar ocak taşı olmalı ve bünyelerinde çatlak ve hava etkisi ile ayrılmış veya ayrılmaya başlamış bölgeler bulunmamalıdır. Aynı yönetmeliğe göre

duvar yapımında kullanılacak doğal taşların basınç dayanımları Tablo 1.1’de verilen değerlerin altında olmamalıdır.

Tablo 1.1. Doğal duvar taşlarının dayanım gruplarına göre en küçük basınç dayanımları [2]

Dayanım Grubu	Taş Cinsleri	En Küçük Basınç Dayanımı (MPa)
I	Kireçtaşı, (Kalker) traverten, kireç bağlayıcılı kum taşı	35
II	Yoğun kireçtaşı, dolomit, bazalt	50
III	Silis bağlayıcılı kum taşı, grovak vb.	80
IV	Granit, siyenit, diorit, melafir, diabaz vb	120

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) [3], yığma binalarda kullanılacak doğal taşlarla ilgili bazı sınırlamalar getirmiştir. Söz konusu yönetmeliğe göre; doğal taşlar, yığma binaların yalnızca bodrum ve zemin kat duvarlarında kullanılabilir ve bu duvarların kalınlığı en az 500 mm olmalıdır.

### 1.2.2. Kerpiç

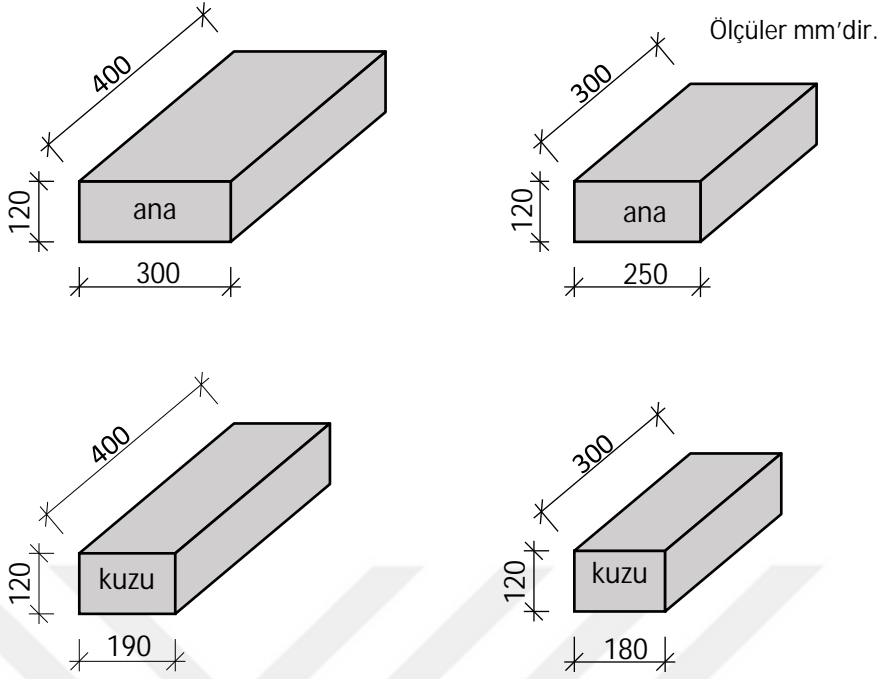
TS 2514 [4]’e göre kerpiç bloklar, killi ve uygun nitelikte toprağın içine kerpicingin çatlamaması için saman, saz türünden bitkiler, kaba ot, kenevir lifleri, ağaç dalları, rende talaşları gibi maddelerin katıldıktan sonra su ile yoğrulup kalıplara dökülerek elde edildiği yapı malzemeleridir. Kalıba dökülen kerpiçler açık havada kurutulduktan sonra kullanıma uygun hale gelir (Şekil 1.1). Kerpiç için kullanılan toprağın kil içeriği %30-%70 arasında olmalıdır. Kerpiç bloklar su ve neme karşı dayanıksızdır. Bu nedenle kerpici oluşturan kum ve kil tanelerinin birbirine yapışmasını sağlamak için plastik haldeki kerpiç bulamaca çimento ve/veya kireç katılmaktadır.





Şekil 1.1. Kerpiç bloklar

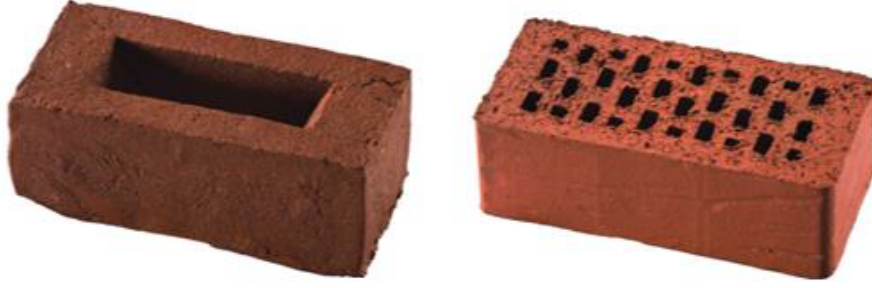
Pek çok tarihi yapının inşa edilmesinde kullanılan kerpiç, ülkemizde Güneydoğu Anadolu ve İç Anadolu bölgelerinde kırsal yapı inşasında halen sıklıkla kullanılmaktadır. DBYBHY [3]'de kerpiç bloklar kullanılarak inşa edilecek yapılarla ilgili bazı sınırlamalar vardır. Buna göre kerpiç duvarlı yığma binalar bütün deprem bölgelerinde, bodrum katı hariç, en fazla bir katlı yapılabilir. Kerpiç duvarlı yığma binalarda kat yüksekliği 2.70 m'den, eğer yapılmış ise bodrum kat yüksekliği 2.40 m'den daha çok olmamalıdır. Ayrıca taşıyıcı dış duvarlar en az 1.5, taşıyıcı iç duvarlar en az 1 kerpiç boyu kalınlığında olmalıdır. Taşıyıcı duvarlarda kuzu ve ana kerpiç adı verilen farklı boyutlarda kerpiçler kullanılmaktadır. DBYBHY [3]'ye göre kerpiç boyutları Şekil 1.2'de verildiği gibi olmalıdır.



Şekil 1.2. Kuzu ve ana kerpiç boyutları [3]

### 1.2.3. Tuğla

Yığıma yapı duvarlarında harman tuğlası ve fabrika tuğlası olmak üzere iki tür tuğla kullanılmaktadır. TS EN 771-1:2011+A1 [5]'e göre harman tuğlası kil, killi toprak ve balçığın ayrı ayrı veya birlikte harmanlanıp, gerektiğinde su, kum, öğütülmüş tuğla veya kiremit tozu ile karıştırılarak elde edildiği bir yapı malzemesidir. Harman tuğlaları, üretimi için hazırlanan bulamacın kalıplara dökülüp kurutulduktan sonra ocaklarda pişirilmesiyle elde edilmektedir. Söz konusu tuğlalar 1900x900x500 mm boyutlarında olmalıdır. Bu tuğlalar basınç dayanımlarına göre, orta dayanımlı ve az dayanımlı, biçimlerine göre ise dolu ve delikli harman tuğlaları olarak sınıflandırılırlar. TS EN 771-1:2011+A1'e göre hazırlanmış harman tuğlaları Şekil 1.3'te, basınç dayanımlarına ve biçimlerine göre harman tuğlalarının sınıflandırılması ise Tablo 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.3. Dolu ve delikli harman tuğlaları

Tablo 1.2. Basınç dayanımları ve biçimlerine göre harman tuğlaları [5]

Sınıfı		Tuğla sembolü	Ortalama birim hacim ağırlığı (maks.) (kg/m <sup>3</sup> )	Ortalama basınç dayanımı (min.) (MPa)	Basınç dayanımı (min.) (MPa)
Dolu harman tuğlası	Orta dayanımlı	DOHT/50	Sınıflandırılmamış	5	4
	Az dayanımlı	DOHT/30	Sınıflandırılmamış	3	2.5
Delikli harman tuğlası	Orta dayanımlı	DEHT/50	1400	5	4
	Az dayanımlı	DEHT/30	1400	3	2.5

Fabrika tuğlaları, taşınması ve yerine yerleştirilmesi kolay olduğu için harman tuğlalarının yerini almıştır. Bu tuğla çeşidi harman tuğlası üretiminde kullanılan malzemelerle oluşturulmakta olup tek farkı makinelerde şekillendirilmesi ve kurutulduktan sonra fırınlarda pişirilmesidir. TS 705 [6]'e göre bu tuğla çeşidi delik oranlarına ve dona dayanıklılıklarına göre sınıflandırılırlar. Aynı yönetmeliğe göre, dolu tuğlalar ile düşey delikli tuğlaların seyrek delikli ve az delikli tipleri taşıyıcı duvar yapımında kullanılabilir (Tablo 1.3). Şekil 1.4'te taşıyıcı yığma tuğlalar gösterilmektedir. Çok delikli tuğlalar ile yatay delikli tuğlalar taşıyıcı duvarların yapımında kullanılmamalıdır. Tuğlaların basınç dayanımları, uygulanan yükleri karşılamada en önemli parametre olup bu özellik tuğlanın yapıldığı toprağın cinsine, pişirilme ısısına, porozitesine, üretim biçimine, deliklerin miktarı, yeri ve yönüne, kenarların biçimine ve yükleme yönüne bağlıdır.

Tablo 1.3. Taşıyıcı duvar yapımında kullanılan fabrika tuğlaları ve basınç dayanımları [6]

Sınıfı	Birim hacim ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )	Delik oranı	Tuğla sembolleri	Ortalama basınç dayanımı (MPa)
Dolu tuğla	2000	15%	2/240	24
			2/180	18
			2/120	12
	1800	15%	1.8/220	22
			1.8/150	15
			1.8/100	10
Seyrek delikli tuğla	1600	20%	1.6/220	22
			1.6/150	15
			1.6/100	10
	1400	25%	1.4/200	20
			1.4/120	12
			1.4/80	8
Az delikli tuğla	1200	35%	1.2/150	15
			1.2/100	10
			1.2/60	6



Şekil 1.4. Taşıyıcı yığma tuğlalar

DBYBHY [3]'de yığma yapılarda deprem bölgelerine göre kat sayısı ve duvar kalınlığı sınırlandırılmıştır (Tablo 1.4). En sık kullanılan taşıyıcı tuğla boyutları ise 290x190x190 mm ile 290x190x135 mm olan tuğlalardır.

Tablo 1.4. Tuğla yığma yapı kat sayısı ve duvar kalınlıkları [3]

Deprem bölgesi	İzin verilen katlar	En küçük duvar kalınlığı (tuğla adedi)
I, II, III, IV	Bodrum kat	1
	Zemin kat	1
I, II, III, IV	Bodrum kat	1.5
	Zemin kat	1
	Birinci kat	1
II, III, IV	Bodrum kat	1.5
	Zemin kat	1.5
	Birinci kat	1
	İkinci kat	1
IV	Bodrum kat	1.5
	Zemin kat	1.5
	Birinci kat	1.5
	İkinci kat	1
	Üçüncü kat	1

#### 1.2.4. Hafif Beton Bloklar ve Briketler

TS EN 771-3:2011+A1 [5], beton blok ve briketleri, dolu ve boşluklu olmak üzere iki sınıfa, basınç dayanımlarına göre ise Tablo 1.5'te gösterildiği şekilde dört sınıfa ayırmıştır. TS EN 12602:2008+A1 [7], hafif beton blokları beton briket sınıfı içinde tanımlamıştır.

Tablo 1.5. Hafif beton blok ve briketlerin basınç dayanımları [5]

Türler	Basınç mukavemeti değerleri	
	Ortalama değer (MPa)	Minimum değer (MPa)
BB2	2.5	2
BB4	5	4
BB6	7.5	6
BB12	15	12

TS EN 771-3:2011+A1 [5]'e göre beton briketler, hafif ve normal ağırlıktaki agregaların çimento, su ve gerektiğinde katkı maddeleri ile karıştırılıp, özel kalıplara dökülerek kalıplanması ve sıkıştırılması yöntemiyle üretilen beton bloklardır. Anma

yükseklikleri en çok 135 mm ve basınç dayanımları oldukça düşüktür. Hafifliğini bünyesindeki agreganın özelliğinden alan bu elemanların yapımında agrega olarak cürufur, tuf ve pomza gibi hafif doğal agregalar ile bir miktar kum ve çakıl kullanılmaktadır. TS 2510 [2]'a göre briket kullanılarak inşa edilen taşıyıcı duvarlarda bodrum kat hariç, dış duvar kalınlığı en az 290 mm, iç duvar kalınlığı 200 mm olmalı iken bu değer DBYBHY'de bodrum ve zemin katlardaki bütün duvarlarda 300 mm, diğer katlarda ise 200 mm olarak sınırlandırılmıştır.

TS EN 12602:2008+A1 [7]'e göre hafif beton blok olarak anılan gaz ya da köpük beton bloklar, ince öğütülmüş silisli agrega ve inorganik bağlayıcılara alüminyum katılarak gözenek oluşturulan, buhar kürü ile priz kazandırılan yapı malzemeleridir.

DBYBHY [3]'ye göre, taşıyıcı duvar yapımında kullanılacak yapay yapı taşlarının (kerpiç, tuğla, briket, beton blok vb.) minimum basınç dayanımı, brüt basınç alanına göre 5 MPa'dan az olmamalıdır. Aynı yönetmelikte “boşluklu beton bloklar taşıyıcı duvar yapımında kullanılamaz” hükmü yer almaktadır. Ancak ülkemiz dışındaki donatılı ve donatısız yığma yapı uygulamalarında boşluklu beton blokların yaygın olarak kullanıldığı düşünülürse bu hükmün, DBYBHY'de özellikle donatılı ve dolgulu yığma yapımı ile ilgili herhangi bir bilgi olmaması nedeniyle sadece basit yığma yapılar için konmuş ihtiyati bir hüküm olduğu anlaşılacaktır [8].

DBYBHY'nin yığma yapılara temkinli yaklaşması, getirilen kat sınırlamaları, yığma yapıların özellikle deprem etkisi altında yetersiz görülmesi vb. etkenler ülkede üretilen yığma yapı malzemelerinin özelliklerinin ihtiyacı karşılayacak ortalama değerlerde kalmasına ve yenilikçi malzemelerin üretilmemesine neden olmaktadır. Ülkemizde 80'li yıllardan itibaren yabancı patentli, yüksek dayanımlı yeni yığma yapı malzemeleri (gazbeton, kalsiyum silicat bloklar, yapıblok vb.) üretimine başlanmıştır. Literatürde donatılı, donatısız kullanılabilen, sıva gerektirmeyen farklı boyut ve geometrilerde taşıyıcı beton bloklar mevcuttur (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Çeşitli tiplerde taşıyıcı beton bloklar

### 1.2.5. Harçlar

Harç, yığma yapılarda, yığma birimlerin arasını dolduran ve onları birbirine bağlayarak bir arada kalmalarını sağlayan bir yapı malzemesidir.

Topraktan elde edilen tuğla ve kerpicing yapı malzemesi olarak kullanılması, harcın kullanılmasına neden olmuştur. Tarihte ilk olarak bağlayıcı malzeme ihtiyacı çamurla giderilmiş, daha ileri dönemlerde ise Romalılar kireç harcı kullanmaya başlamışlardır. Daha sonra kum-kireç karışımının içine pişmiş kil veya doğal puzolanların karıştırılması ile suyla reaksiyona giren ve sertleşen bir bağlayıcı elde edilmiştir. Tarihi yığma yapılarda ve özellikle Selçuklu ve Osmanlı mimarisinde ise kireç ve öğütülmüş tuğla tozu kullanılarak elde edilen horasan harcı denilen bağlayıcı malzeme kullanılmıştır. Horasan harcının dayanımı kirecin kalitesine ve tuğla tozunun inceliğine bağlıdır. Bu harcın sertleşmesi ve gerçek dayanımına ulaşması çok uzun zaman aldığı için tarihi yığma yapılarda, yapı temelleri inşa edildikten sonra uzun bir süre üst yapı inşaatına başlanılmamıştır [9].

TS 2510 [2]'a göre harç, mineral bağlayıcılar, kum ve yeterli miktardaki suyun ve gerektiğinde harcın özelliklerini geliştirmek amacı ile kullanılan katkı maddelerinin karıştırılması ile elde edilen bir yapı malzemesidir. Mineral bağlayıcı olarak genellikle çimento, harç çimentosu ve sönmüş kireç kullanılmaktadır.

Yığma duvarların dayanımının iyi olması büyük oranda yığma birim elemanlarının (tuğla, taş, briket vb.) birbirine iyi yapışmasına ve harcın çekme dayanımına bağlı olduğu için, harçlarda basınç dayanımından ziyade çekme ve kayma dayanımı daha önemli olmaktadır.

Tablo 1.6'da TS 2510 [2]'da belirtilen harç sınıfları ve karışımları oranları (hacim olarak) ile TS EN 998-2 [10]'de verilen harç basınç dayanımlarına göre sınıflandırma birleşik olarak verilmiştir.

Tablo 1.6. Harç sınıfları ve minimum basınç dayanımları [2,10]

Harç Sınıfı		Kum	Çimento	Harç çimentosu	Kireç hamuru	Toz kireç	Minimum basınç dayanımı (MPa)
A	-	3	1	-	-	-	15
B	1	4	1	-	-	-	11
	2	4	1	1/2	-	-	
	3	4	1	-	-	1/2	
	4	4	1	-	-	1	
C	1	7-9	1	2	-	-	5
	2	5	1	-	-	-	
	3	5	1	-	1	-	
D	1	6-8	1	-	2	-	2
	2	6-8	1	-	-	3	
	3	2-3	-	1	-	-	
E	-	3	-	-	1	-	0.5

### 1.2.6. Donatı

Günümüzde yığma yapıların takviye edilmesi, dünyanın pek çok ülkesinde yığmadan ayrı düşünülmeyen bir kavramdır. Bu amaçla, basit yığma yapıların deprem hasarlarını ve can kaybını azaltmaya dönük basit donatı iyileştirmelerinden, yığma yapıyı yanal yüklere karşı etkili, uygun taşıyıcılı hale getirecek germeli ya da germesiz donatı takviyelerine kadar gelişen yapım teknikleri uygulanmaktadır [8].



Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin gevrek olmaları, bu yapıların yatay yüklere karşı yetersiz dayanım göstermelerine neden olmaktadır. Başka bir deyişle basınç gerilmelerine karşı iyi bir dayanım gösteren geleneksel yığma yapıların yatay yüklerden dolayı oluşan kesme kuvvetleri ile eğilme momentlerine karşı zayıf kaldıkları ve gevrek özellik gösterdikleri bilinmektedir. Bu dezavantajı ortadan kaldırıp, yığma yapıyı daha sünek hale getirerek yatay yük dayanımını artırmak için literatürde donatı ile takviye fikri ortaya çıkmıştır. Bu amaçla dünyada germe donatıları, dairesel çaplı geleneksel donatılar, hasır tip donatılar ile özel sandviç tip donatılar kullanılmaktadır (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Yığma yapılarda kullanılan bazı donatı tipleri

TS ENV 1996-1-1+A1 [11] yığma yapılarda kullanılan donatı çeliğinin uzama sünekliğine bazı sınırlamalar getirmiştir. Buna göre;

$$\text{Normal süneklikte; } \varepsilon_{uk} > \% 2.5 \text{ ve } \frac{f_{tk}}{f_{yk}} > 1.05$$

$$\text{Yüksek süneklikte; } \varepsilon_{uk} > \% 2.5 \text{ ve } \frac{f_{tk}}{f_{yk}} > 1.08$$

olmalıdır. Burada  $\varepsilon_{uk}$  donatı çeliğinde en büyük çekme gerilmesinde oluşan birim uzama karakteristik değerini,  $f_{tk}$  ve  $f_{yk}$  sırasıyla donatı çeliğine ait karakteristik çekme dayanımını ve karakteristik akma dayanımını göstermektedir.

DBYBHY’de yığma yapılarda donatı kullanımı, yalnızca yatay ve düşey hatıl uygulamaları ile sınırlı kalmaktadır. Diğer taraftan literatüre bakıldığında donatıların yatay derzler boyunca, düşey delikli yığma birimlerin boşlukları boyunca dolgu betonu ile ayrıca kapı ve pencere boşluklarının etrafında yatay ve düşey olarak kullanıldıkları görülmektedir. Konu ile ilgili daha detaylı bilgi donatılı yığma yapılar bölümünde verilmektedir.

### 1.2.7. Dolgu Betonu

Yığma yapılarda yığma birim elemanlardaki boşlukları doldurmak için tek başına ya da donatı ile birlikte kullanılır. Dolgu betonu hem kesmeye karşı hem de aksel kuvvetlere karşı dayanımı artırmaktadır.

TS EN 1996-1-1+A1 [11]’e göre en düşük boyutu 50mm olan boşluklar ile beton örtü kalınlığının 15-20 mm arasında olduğu yerlerde dolgu betonunda kullanılacak agrega çapı en fazla 10 mm olmalıdır. Aynı yönetmeliğe göre dolgu betonuna ait karakteristik basınç dayanımı ( $f_{ck}$ ) ve karakteristik kayma dayanımı ( $f_{cvk}$ ) Tablo 1.7 ‘deki gibidir.

Tablo 1.7. Dolgu betonu karakteristik basınç ve kayma dayanımları [11]

Beton dayanım sınıfı	C12/15	C15/25	C20/25	C25/30 veya daha yüksek
$f_{ck}$ (MPa)	12	16	20	25
$f_{cvk}$ (MPa)	0.27	0.3	0.39	0.45

### 1.3. Yığma Yapı Sistemleri

Literatüre bakıldığında yığma yapı sistemlerinin sınıflandırılmasındaki temel yaklaşımın, donatı kullanımını esas aldığı görülmektedir. Buna göre yığma yapılar;

- ✓ Donatısız yığma yapılar
- ✓ Sarılmış yığma yapılar

- ✓ Donatılı yığma yapılar
- ✓ Öngermeli ve ard germeli yığma yapılar olarak sınıflandırılabilir.

### 1.3.1. Donatısız Yığma Yapılar

Taş, tuğla, briket, kerpiç gibi yığma birim elemanlarla, bunların arasında aderans sağlayacak olan harçtan meydana gelen taşıyıcı duvarların oluşturduğu sisteme donatısız yığma yapı sistemi adı verilmektedir. Bu sisteme sahip yapılarda donatı gibi sünekliği artıracak herhangi bir malzeme bulunmadığından, dinamik etkiler karşısında gevrek davranış göstermektedir. Donatısız yığma yapı sistemlerinde bağlayıcı olarak kullanılan harcin kayma dayanımı, duvar üzerinde oluşacak olan kayma gerilmelerinden fazla olmalıdır. Aksi halde yığma birim elemanlarda çatlaklar meydana gelmektedir. Bu tip yığma yapılarda dayanımı etkileyen bir diğer faktör de yığma birimlerin örülme şeklidir. Yığma birim elemanlar örülürken düşey derzler hiçbir zaman üst üste gelmemeli, şaşırtmalı olarak dizilmelidir.

Donatısız yığma yapılarda, döşemeden gelecek yüklerin duvarlara aktarılmasını ve döşemelerin duvarlar üzerine mesnetlenmesini sağlamak amacıyla yatay hatıl adı verilen küçük kirişler yapılmaktadır. Bu kirişler, deprem sırasında döşemeler üzerine etkiyecek olan yatay yüklere karşı döşemenin rijit diyafram gibi çalışmasını sağlayarak, bu yüklerin duvarlara aktarılmasına imkân vermektedir.

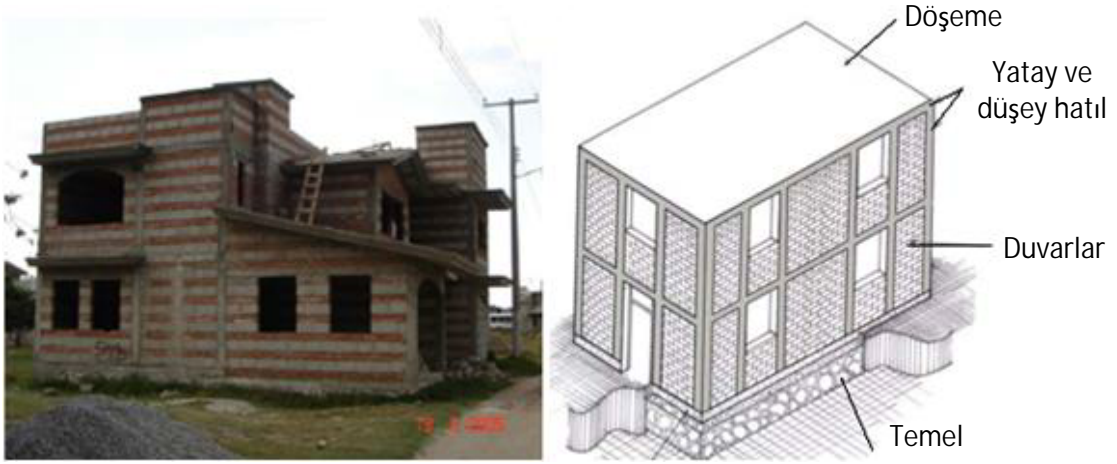


Şekil 1.7. Donatısız yığma yapılar [13]

### 1.3.2. Sarılmış Yığma Yapılar

Yığma yapıların depreme karşı dayanımını artırmak için taşıyıcı duvarlar yatay ve düşeyde hatıl adı verilen ve içinde az miktarda donatı bulunan elemanlarla desteklenirler. Hatılların görevi, oluşma ihtimali olan çatlakların büyümesine izin vermeyerek duvarlar arasındaki bütünlüğü sağlamaktır. Böylece hatıllar, duvarların hem yatay hem de düşey yük taşıma kapasitesini kaybetmesini önlerler.





Şekil 1.8. Sarılmış yığma yapı örneği ve elemanları [12,13]

Yığma binalarda duvarların özellikle deprem yükleri altında bütünlüğün korunması bakımından yatay hatılların bulunması ve bunların döşeme plakları ile birbirlerine bağlanması gerekir [14]. Yatay hatıllar, deprem gibi etkilerden dolayı katlara ve çatıya gelen yatay yükleri taşıyıcı duvarlara aktarırlar.

Yığma duvar köşeleri ve kapı-pencere boşluk kenarları gibi yatay yükler açısından sorunlu olabilecek bölgeler ile uzunluğu 4 m'den fazla olan duvarların ortasına en az duvar kalınlığı kadar düşey hatıllar yerleştirilmelidir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Düşey hatıl uygulamaları [15]

DBYBHY (2007), deprem bölgelerinde inşa edilecek yığma yapılar için sarılmış yığma yapıların kullanılmasını öngörmektedir. Yönetmelikte, deprem bölgeleri dikkate alınarak yığma yapıların kat sayıları, minimum taşıyıcı duvar kalınlıkları, temellerinin nasıl

yapılması gerektiği, duvar kalınlıkları, duvar serbest boyları, yatay ve düşey hatıl boyut ve donatı miktarları ile ilgili sınırlamalar mevcuttur.

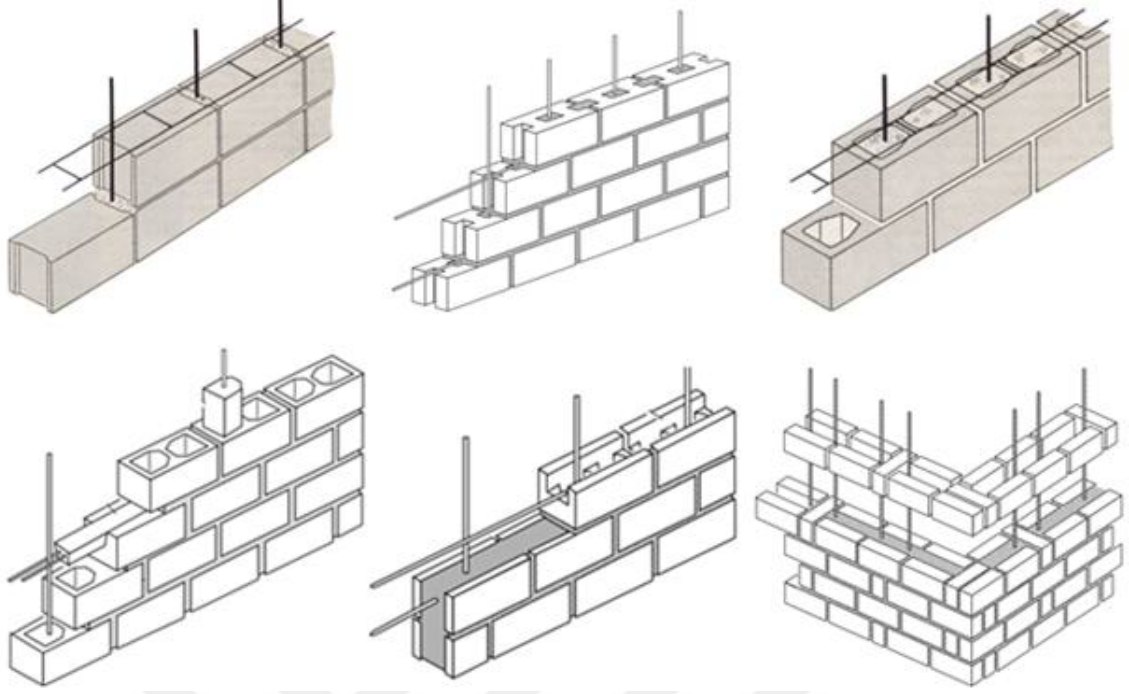
### 1.3.3. Donatılı Yığma Yapılar

Yığma yapılar, basınç dayanımı çok yüksek olmasına rağmen çekme dayanımı çok zayıf olan yapılardır. Yatay ve düşey yükler etkisi altında oluşan çekme gerilmelerini önlemek için yığma yapının ağırlığından faydalanılır ki bu da eleman boyutlarını artırarak sağlanır. Bu çözüm, ekonomik ve efektif olmamasının yanında yapıya gelen deprem yüklerini artırmakta, yapıyı oldukça rijit hale getirerek gevrek kırılmalara neden olmaktadır. Bu durum yığma yapılara gelen atalet kuvvetlerini azaltıp, çekme gerilmelerine karşı daha etkili olmalarını sağlayacak donatılı yığma yapı tekniği fikrini ortaya çıkarmıştır.

Yığma yapıda donatı kullanılması ile yapıya sünek davranış kazandırılmakta böylece yapının kullanımı etkinleştirilerek duvar kalınlıklarının azaltılması, deprem dayanımının artırılması, dolayısıyla da çok katlı yapıların üretilmesi mümkün olmaktadır. Uygulama ne ölçekte ve boyutta olursa olsun, yığma yapının yeterli sünekliği verecek şekilde donatılandırılması özellikle deprem bölgelerindeki uygulamalar için vazgeçilmez bir gerekliliktir [8].

Bu tür yığma yapılarda donatı üç farklı şekilde kullanılır. Bunlar donatının;

- ✓ Yığma birim elemanların yatay birleşim bölgelerinden yani her sıradaki yığma birim eleman üzerinden geçirilerek kullanıldığı,
- ✓ Yığma birim elemanların düşey boşluklarından geçirilip bu boşlukların yüksek dayanımlı beton ile doldurulup takviye edildiği,
- ✓ Çift sıra örgülü taşıyıcı duvar arasından yine yüksek dayanımlı beton dolgu takviyesi ile yatay ve düşey olarak geçirilerek kullanıldığı sistemlerdir (Şekil 1.10 ve Şekil 1.11).

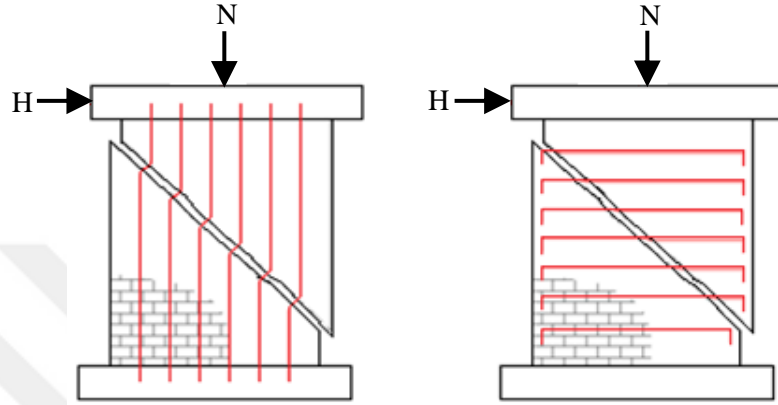


Şekil 1.10. Değişik tipteki donatılı yığma duvarlar [8]



Şekil 1.11. Donatılı yığma yapı uygulamaları

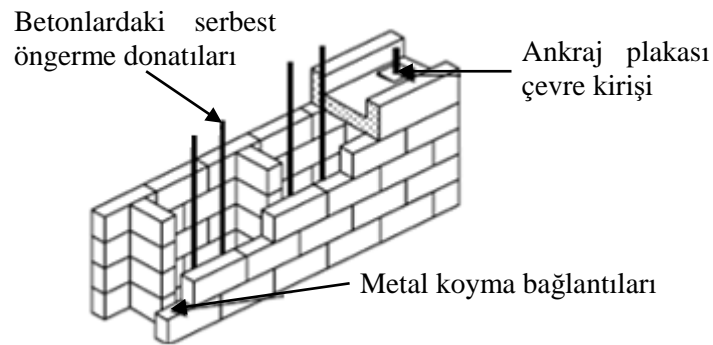
Yığma yapıların yatay yük taşıma kapasitelerini artırmak için kullanılan bu donatılardan, düşeyde yerleştirilenler genellikle duvarlarda kayma gerilmelerin neden olduğu şekildeğiştirme ve ayrılmaları ile eğilme çatlaklarını, yatayda yerleştirilenler ise diyagonal kesme çatlaklarını önlemek amacıyla kullanılırlar [16] (Şekil 1.12). Donatısız yığma yapılara göre daha fazla kalifiye işçilik gerektirir ve daha pahalı sistemlerdir.



Şekil 1.12. Yatay yük etkisi altındaki duvarlarda donatı etkisi [16]

#### 1.3.4. Öngermeli Yığma Yapılar

Ülkemizde kullanımına pek rastlanmayan ön germeli yığma yapılarda taşıyıcı duvarların eğilme, kesme ve çatlama dayanımlarını sağlamak amacıyla öngerme donatıları yerleştirilmektedir. Genellikle çift sıra halinde örülen taşıyıcı duvarlarda iki duvar arasında ön-germe donatıları yerleştirilmekte ve ara boşluğu dolduran çimento harcıyla öngerilme duvara aktarılmaktadır [17]. Şekil 1.13 ve Şekil 1.14'te bir ön germeli yığma duvar tipi ile ön germeli yığma yapım uygulamaları görülmektedir.



Şekil 1.13. Ön germeli yığma duvar tipi [18]



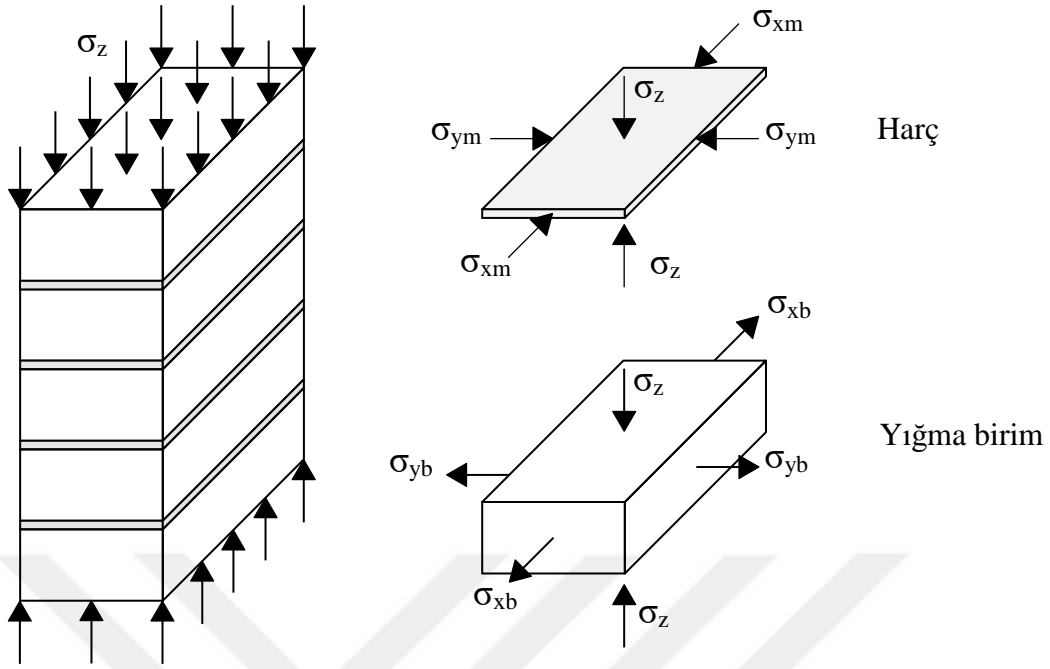


Şekil 1.14. Ön germeli yığma yapım uygulamaları

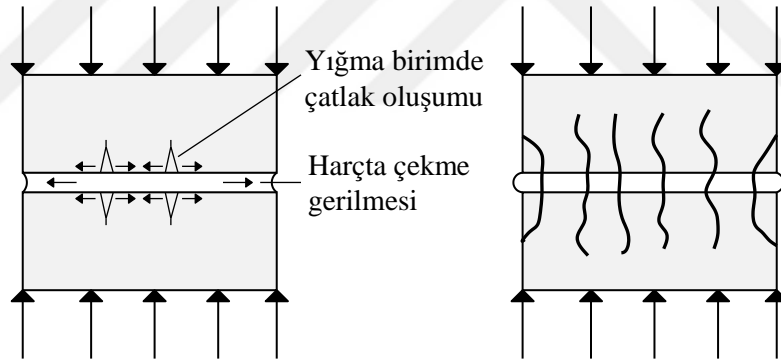
#### 1.4. Yığma Duvarların Dış Yükler Etkisi Altındaki Davranışları

Yığma yapılarda taşıyıcı elemanlar duvarlardır ve duvarlar yığma birim elemanlar ve harçtan meydana gelirler. Bu nedenle yığma yapıların çeşitli yükler etkisi altındaki davranışı incelenirken, duvarlar tek parça elemanlar olarak düşünülmemeli, duvarları oluşturan yığma birimlerin, harcın ve harç ile yığma birim arasındaki aderansın bu yükler karşısındaki davranışı incelenmelidir.

Eksenel basınç altındaki yığma birimlerde ve harçta oluşan gerilmeler Şekil 1.15'te gösterilmektedir. Eksenel basınç kuvvetinden dolayı harçta oluşan yatay yöndeki çekme kuvvetleri yığma birim elemanlarda düşey yönde çatlaklara sebep olur. Harç ile yığma birimlerin farklı birim şekildeğiştirme özelliklerine sahip olması gerçekleşen bu tip kırılmalarda, birim elemanlar arasındaki harç lastik bir yastık gibi davranır ve basınç gerilmesi altında ezildiğinde oldukça büyük yatay birim deformasyonlar meydana gelir. Düşey yükler altında, yığma birimler ile harçta çekme çatlakları olduğundan, bu elemanların çekme dayanımları önem kazanır [19]. Harç ve yığma birimlerde oluşan hasarlar Şekil 1.16'da gösterilmektedir.



Şekil 1.15. Eksenel basınç altında yığma birimlerde ve harçta oluşan gerilmeler [19]

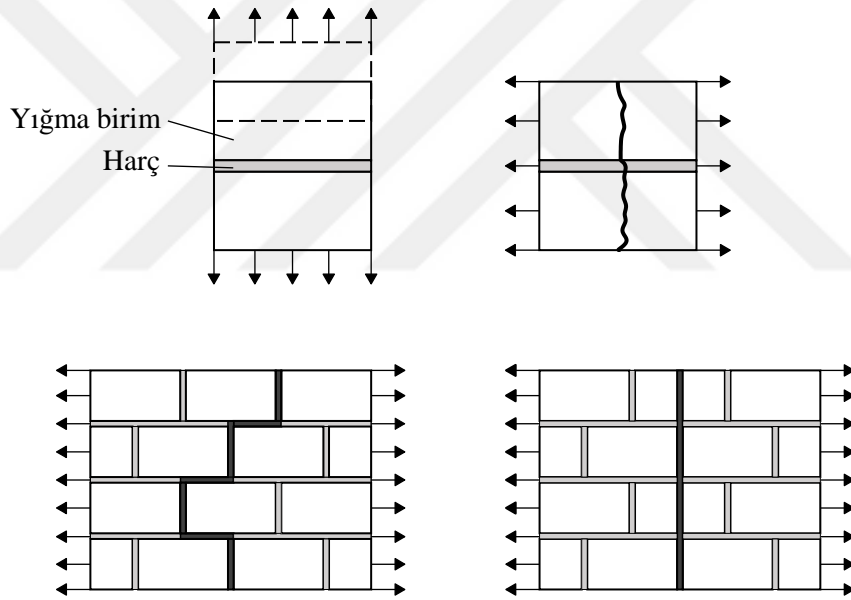


Şekil 1.16. Eksenel basınç altında harç ve yığma birimlerdeki hasarlar [20]

Yığma duvarların basınç dayanımı, yığma birim elemanların dayanımından, harç özelliklerinden, işçilikten ve kür koşullarından etkilenmektedir. Harç dayanımının yığma birim elemanların dayanımından yüksek olması duvar basınç dayanımını çok az artırmaktadır. Buna karşılık aynı harç dayanımında daha yüksek dayanımlı yığma birim kullanılması duvar basınç dayanımını daha yüksek bir oranda artırmaktadır. En iyi davranışı ise yüksek dayanımlı tuğla ile yüksek dayanımlı harç göstermektedir. Derz kalınlığı azaldıkça da duvar basınç dayanımı artmaktadır [21]. Ayrıca yığma birim elemanlardaki

düşey boşlukların az olması, düşey yük taşıyan alanı artıracığından, duvar basınç dayanımı da artacaktır.

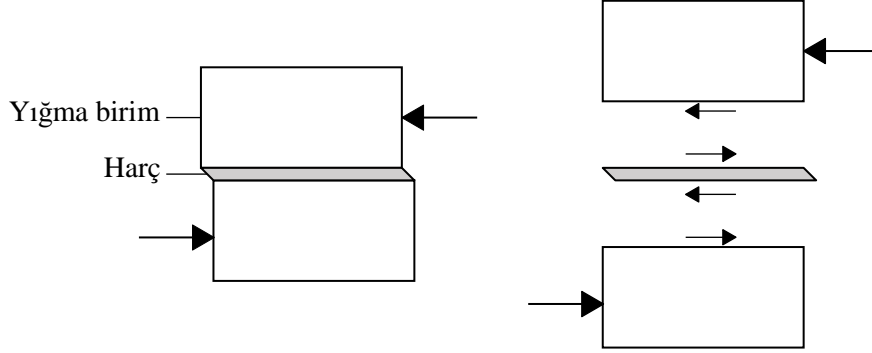
Eksenel çekmeye maruz yığma elemanlarda hasarlar, kuvvetin uygulanma yönüne göre derzlere paralel veya derzlere dik olarak oluşmaktadır. Çekme kuvvetleri yatay derzin normali doğrultusunda uygulandığında harç ve birim eleman arasındaki aderans, derze paralel uygulandığında ise tuğlanın çekme dayanımı daha önemli olmaktadır. Eksenel çekme etkilerine maruz kalan yığma prizmalardaki şekildeğişiklikler iki şekilde meydana gelir. Bunlardan ilki yığma birim ile harç arasındaki aderansın kaybolması ile merdiven şeklinde ayrılmalar, ikincisi ise hem yığma birimde hem de harçta oluşan yatay derzlere dik şekildeğişikliklerdir [18]. Yığma elemanlarda çekme kuvvetlerinden dolayı oluşan hasarlar Şekil 1.17’de verilmektedir.



Şekil 1.17. Eksenel çekmeye maruz yığma elemanlardaki deformasyonlar [20]

Aynı doğrultu üzerindeki birbirine zıt iki kuvvet, birbirine komşu iki yığma birim eleman arasındaki harcın yatay yönde ötelenmesine neden olur. Harcın bu ötelenmeye karşı gösterdiği direnç sonucu da derzlerde kayma (kesme) kırılmaları meydana gelir (Şekil 1.18). Kayma kırılmaları diyagonal olarak da gerçekleşebilir. Söz konusu durum yığma yapı elemanına etki eden kesme kuvvetinin doğrultusuna göre belli bir açıyla oluşan kayma gerilmelerinin etkisiyle meydana gelir. Bu durumda harç dayanımı yığma birim eleman

dayanımından küçük ise yığma elemanlarda oluşan hasarlar derzlerde, tersi durum söz konusu ise yığma birimler üzerinde oluşmaktadır.



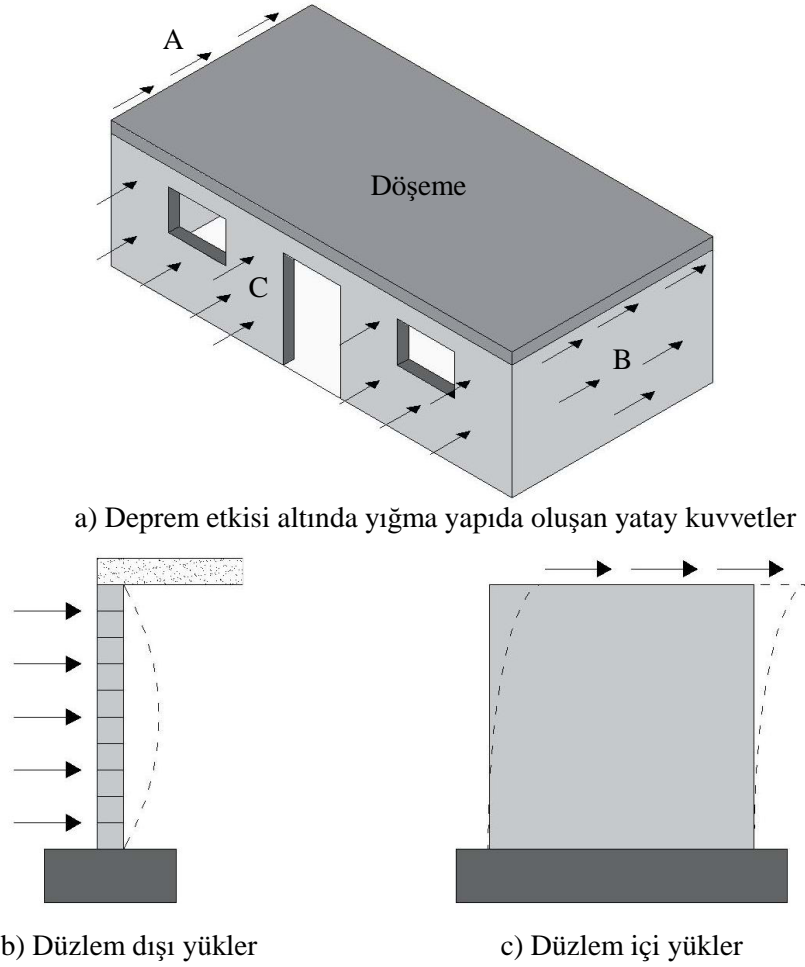
Şekil 1.18. Kayma etkisindeki yığma elemanın davranışı [19]

Yığma yapılarda duvarlar, yapıya gelen yükleri karşılamada kullanılan temel elemanlar olup diyafram özelliği gösteren döşemeler bu yükleri duvarlara aktarmada kullanılan yardımcı elemanlar olarak bilinirler. Bu yükler; yapının kendi ağırlığından oluşan düşey basınç kuvveti, depremin neden olduğu düzlem içi ve düzlem dışı eğilme momentleri ve kesme kuvvetleridir. Yığma yapılar düşey basınç kuvvetlerine karşı oldukça dayanımlı iken yatay yükler altındaki davranışlarının geliştirilmesi gerekmektedir.

Aktif deprem kuşağında olan ülkemizde bugüne kadar olan depremlerde hasar gören yapılar incelendiğinde en çok hasar gören yapı tipinin mühendislik hizmetlerinden yoksun olan yığma yapılar olduğu görülmektedir. Bilindiği üzere yığma yapılar ağır ve enerji yutma kapasiteleri düşük yapılardır. Özellikle deprem kuvvetleri söz konusu olduğunda ortaya çıkan enerjiyi tüketememekte ve büyük yatay kuvvetlere maruz kalıp taşıma kapasitesine ulaştıklarında ani ve gevrek olarak kırılmaktadır. Yapının ağır olması deprem sırasında oluşan atalet kuvvetlerini artıracığından, yapılar çok büyük iç kuvvetlere maruz kalmaktadır.

Deprem kuvvetleri gibi yatay yükler, yapılarda kesme kuvvetleri ve momentlerin oluşmasına neden olur. Momentin etkisi ile de yapılarda basınç ve çekme gerilmeleri meydana gelir. Şekil 1.19'da deprem kuvvetlerinin yığma duvarlar üzerindeki dağılımı ile duvarlardaki şekildeğiştirmeler şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 1.19'da döşeme, A ve B duvarları arasında bir yatay kiriş gibi davranarak üzerine gelen yükleri bu duvarlara aktarmaktadır. A ve B duvarları, deprem etkisi ile oluşan düzlem içi yatay yüklere maruz kalmaktadır. Bu nedenle bu duvarlara kesme duvarları adı verilmektedir. Şekil 1.19'da

görülen C duvarı ise söz konusu yükler etkisinde düzlem dışı yüklemeye maruzdur. Bu iki duvar tipi arasındaki fark, kesme duvarlarının yatay yükleri karşılamada temel elemanlar olmasıdır [22].

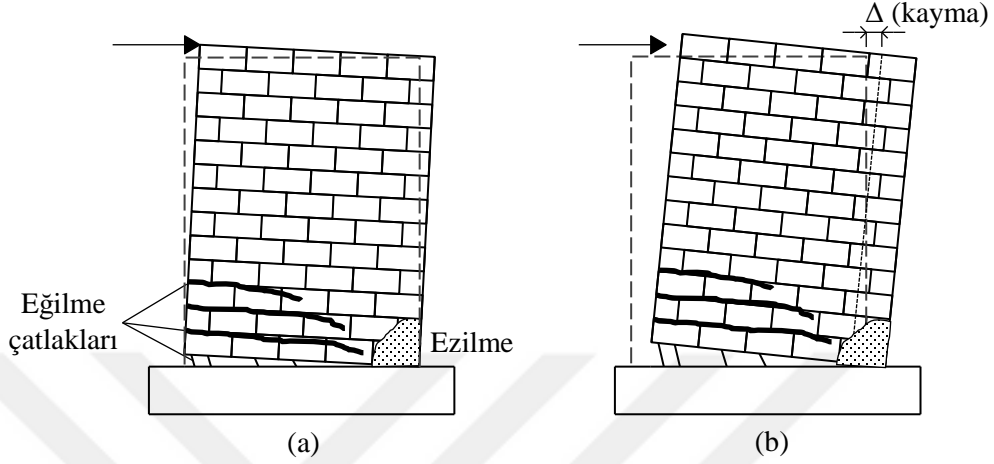


Şekil 1.19. Deprem etkisi altındaki yığma yapı [22]

Düzlem içi yatay yükler etkisi altında yığma duvarlarda göçme 3 şekilde meydana gelir. Bunlar; eğilme momentlerinin ve kesme kuvvetlerinin neden olduğu göçme şekilleridir.

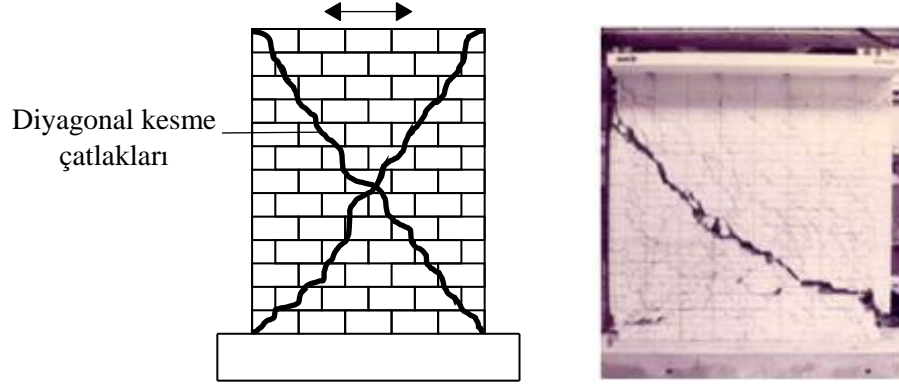
Eğilme momentlerinden dolayı yığma duvarların çekme bölgelerinde, yatay derzler boyunca yatay eğilme çatlakları oluşmaktadır. Basınç bölgesinde ise dış yüklerin etkisi ile oluşan basınç gerilmeleri, duvarın basınç dayanımını aştığında duvarda ezilmeler meydana gelmektedir. Yığma yapılarda genellikle kullanılan duvar malzemesinin çekme dayanımı, harcın ise kayma dayanımı düşüktür. Buna bağlı olarak yatay yüklerin neden olduğu en önemli hasarlardan biri de duvarlarda oluşan kayma gerilmeleri dolayısıyla çekme

gerilmelerinin meydana getirdiği çatlak, ayrılma ve dağılmadır [23]. Yığma duvarlarda eğilme ve kayma etkisinde meydana gelen hasarlar ve göçme şekilleri Şekil 1.20’de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 1.20. Yığma duvarların (a) eğilme etkisindeki, (b) kayma etkisindeki göçme şekilleri [23]

Yığma yapıların deprem etkisi altında kuvvet dağılımı olması halinde, duvarlar, çatıdan ve temelden gelen etkilerin altında kesme kuvvetleri ile zorlanmaktadır. Bunun sonucunda boşluklar arasındaki duvarlarda oldukça gevrek davranış gösteren 45 derecelik çekme çatlakları oluşmaktadır. Harç dayanımı yığma birim elemanın dayanımından düşük olması halinde çekme çatlakları derzlerden geçmektedir. Harç dayanımının yığma birim eleman dayanımından yüksek olduğu durumlarda ise çatlaklar yığma birim elemanı da keserek devam etmektedir. Deprem yükünün tersinir bir yük olması ve ilk oluşan çatlaklara dik yönde de çatlak olması sonucu X-şeklinde eğik çekme çatlakları meydana gelmektedir. Çatlakların yeri ve açısı, duvardaki boşluk miktarına ve yerine göre değiştirmektedir [24]. Yığma duvarlarda meydana gelen kesme çatlakları Şekil 1.21’de gösterilmektedir.



Şekil 1.21. Kesme etkisindeki yığma duvarın göçme şekli [23]

Yığma yapılarda deprem sonucu meydana gelen hasarlar Şekil 1.22 ve Şekil 1.23 'te görülmektedir. Bu hasarlara ek olarak farklı temel oturmaları, yeterli rijitlikte döşeme-hatıl bağlantısı yapılmaması, duvar köşe bağlantılarının iyi yapılmamış olması vb. etkiler de bu yapılarda hasarlara neden olur.



Şekil 1.22. Deprem sonrası yığma yapı duvarlarındaki düzlem dışı hasarlar [22]





Şekil 1.23. Deprem sonrası yığma yapı duvarlarındaki düzlem içi hasarlar [22, 23, 24]



### 1.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yığma Yapıların Modellenmesi

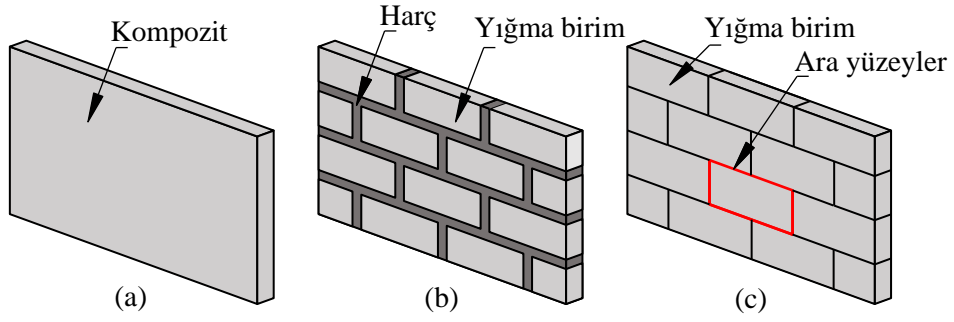
Son yıllarda bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde, sayısal yöntemlerin kullanıldığı bilimsel araştırmalar hız kazanmış ve daha az zamanda daha büyük yapı sistemlerine ilişkin modellerin çözümü mümkün hale gelmiştir [18]. Yığma yapıların modellenmesinde genellikle, farklı mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir matematiksel çözüm yöntemi olan sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, incelenecek olan yapı veya yapı elemanı problemin karakterine uygun sonlu sayıda ve şekilde elemanlara bölünür. Deneylerden elde edilen malzeme özellikleri yine problemin karakterine uygun bir malzeme modeli ile birleştirilerek bu elemanlar atanır ve her elemana ait düğüm noktalarında matris denklemleri oluşturulur. Daha sonra sonlu sayıdaki eleman düğüm noktalarından birleştirilip sistemin tamamı ifade edilir. Mesnetlerin ve elemanların hareket yetenekleri ile yükleme durumu da dikkate alınarak matris denklemler her bir eleman için tek tek çözülmesi sonucunda tüm yapı sisteminin davranışı belirlenmiş olmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yığma yapıların modellenmesinde kullanılan eleman ve kabuller, betonarme yapılar için kullanılanlardan farklıdır. Çünkü betonarme heterojen bir malzeme olmasına rağmen, yapılan kabullerle bir yapısal elemanı aynı çeşit sonlu elemanla geçmek mümkün olmaktadır. Oysa yığma yapı duvarlarında taş ve tuğla gibi yığma birimlerin ve farklı karakteristiklere sahip harcın bulunması tek tip sonlu eleman kullanmayı zorlaştırmaktadır. Bu durumda ya kabule uygun ve gerçekten uzaklaşmayacak şekilde bir modelleme tekniği geliştirmek gerekmektedir. Ya da bu birimleri ayrı ayrı modellemek yolu tercih edilmelidir. Yığma birimlerin ve ara yüzey elemanlarının ayrı ayrı modellendiği bu durumda ise bilinmeyen sayısı oldukça fazla olmaktadır. Özellikle doğrusal olmayan çözümlenmelerde iterasyonların da işleme katıldığı düşünülürse, sistemin çözüm süresi aşırı oranlarda artmaktadır [18].

Literatürde [20, 25, 26] yığma yapıların modellenmesinde farklı durumlar için kullanılacak yöntemler aşağıdaki gibi üç gruba ayrılmıştır. Bunlar;

- ✓ Makro modelleme
- ✓ Detaylı mikro modelleme
- ✓ Basitleştirilmiş mikro modelleme

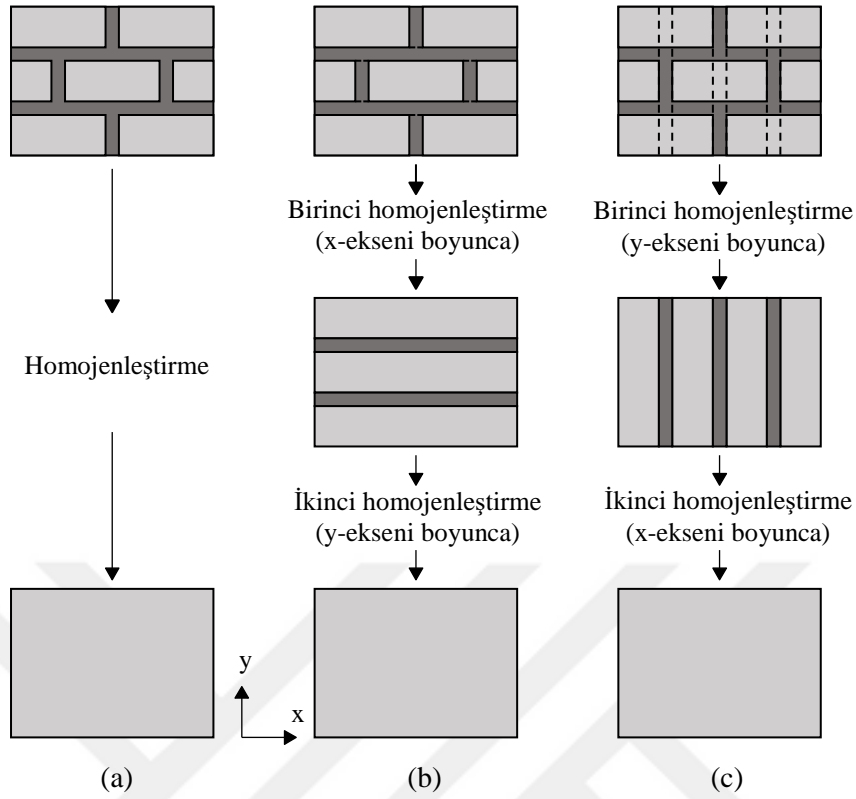
Yığma yapı sistemlerinin modellenmesinde kullanılan söz konusu yöntemler Şekil 1.24'te gösterilmektedir.



Şekil 1.24. Yığma yapı modelleme yöntemleri, a) makro modelleme, b) detaylı mikro modelleme, c) basitleştirilmiş mikro modelleme [27]

### 1.5.1. Makro Modelleme

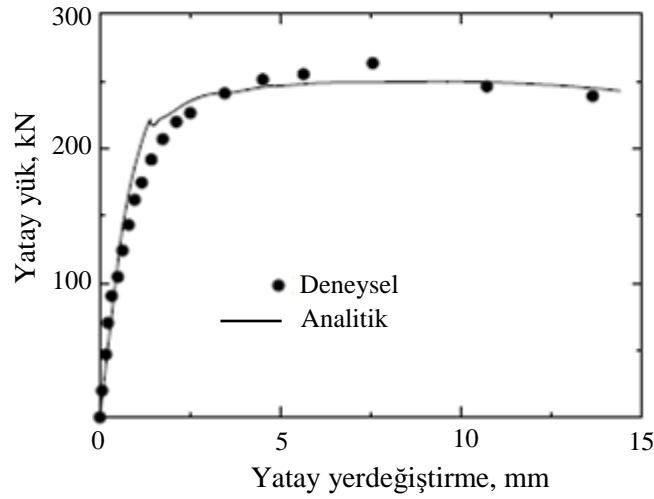
Bu yöntemde yığma yapı ya da yapı elemanı, birim eleman ve harç arasında ayırım yapılmaksızın ve harç ile yığma birim elemanlar arasındaki etkileşim dikkate alınmaksızın kompozit bir malzeme olarak düşünülmektedir (Şekil 1.24-a). Yöntemde yığma birim ve harçın özelliklerinin homojenleştirme yöntemleriyle birleştirilmesi sonucu elde edilen eşdeğer mekanik özellikler dikkate alınır. Şekil 1.25'te iki adımlı bir homojenleştirme yöntemi gösterilmektedir. Yığmanın homojen, izotrop veya anizotrop olduğu kabul edilir.



Şekil 1.25. İki adımlı homojenleştirme yöntemi, a) homojenleştirme amacı, b) x doğrultusundan y doğrultuna homojenleştirme, c) y doğrultusundan x doğrultusuna homojenleştirme [20]

Makro modelleme karmaşık ve büyük boyutlu yığma yapı sistemlerinin analizlerinde kullanılmaktadır. Yöntem uygulamaya yönelik çalışmalarda, yapısal analiz sonuç dosyalarının boyutları ile çözüm süresini azalttığı ve daha homojen sonlu eleman ağları oluşturulabildiği için sıklıkla tercih edilmektedir.

Makro modelleme yönteminde, eşdeğer malzeme özelliklerinin doğru belirlenmesi, model ve analizin doğruluğunu etkileyen en önemli parametredir. Bu durumun sağlanması halinde deneysel ve nümerik sonuçlar arasında uyum elde edilebilmektedir. Şekil 1.26'da Lourenço'nun [20] makro modelleme yöntemi ile modellemiş olduğu bir duvarın analizinden elde edilen sonuçlar ile deneyden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 1.26'dan da görüleceği üzere doğru tanımlanmış bir malzeme modeli ile makro düzeyde bir analiz yapmak deneyselle yakın sonuçlar verebilmektedir.

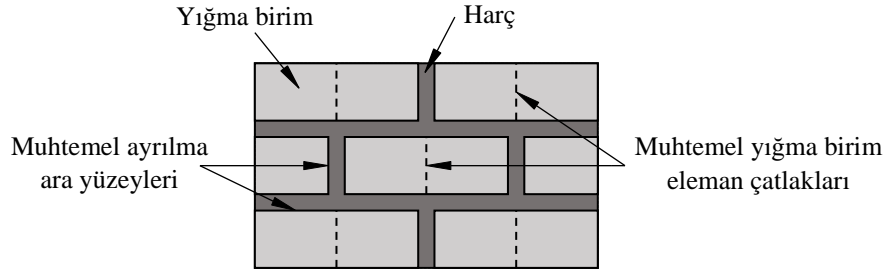


Şekil 1.26. Analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması [20]

Yapıyı veya yapı elemanını temsil etmek için oluşturulan eşdeğer modelin basitliğinden dolayı, harç ve birim eleman birleşim noktalarındaki hasarlar gibi bazı hasar formları bu yöntemde elde edilememektedir. Dolayısı ile yapının veya yapı elemanlarının detaylı analizlerinin istendiği durumlara uygun bir modelleme tekniği değildir.

### 1.5.2. Detaylı Mikro Modelleme

Yığma yapıların modellenmesi için kullanılan en gelişmiş modelleme tekniği detaylı mikro modellemedir. Bu yöntemde yığmayı oluşturan harç, yığma birim ve harç ile yığma birim arasındaki ara yüzeyler ayrı ayrı modellenir (Şekil 1.27) dolayısı ile yığmanın ve harcın elastisite modülleri, Poisson oranları ile elastik olmayan diğer özellikleri ayrı ayrı dikkate alınır [20]. Yöntemde yığmayı oluşturan malzemelerin mekanik özelliklerinin elde edilebilmesi için detaylı malzeme deneyleri yapılmalıdır.



Şekil 1.27. Detaylı mikro modelleme

Bu yaklaşımla yapılan modellemelerde muhtemel hasarların, yığma birim ile harç arasındaki ara yüzeylerde ayrılmalar ve yığma birimlerin ortalarında düşey çatlaklar olarak meydana gelebileceği kabulü yapılır [25].

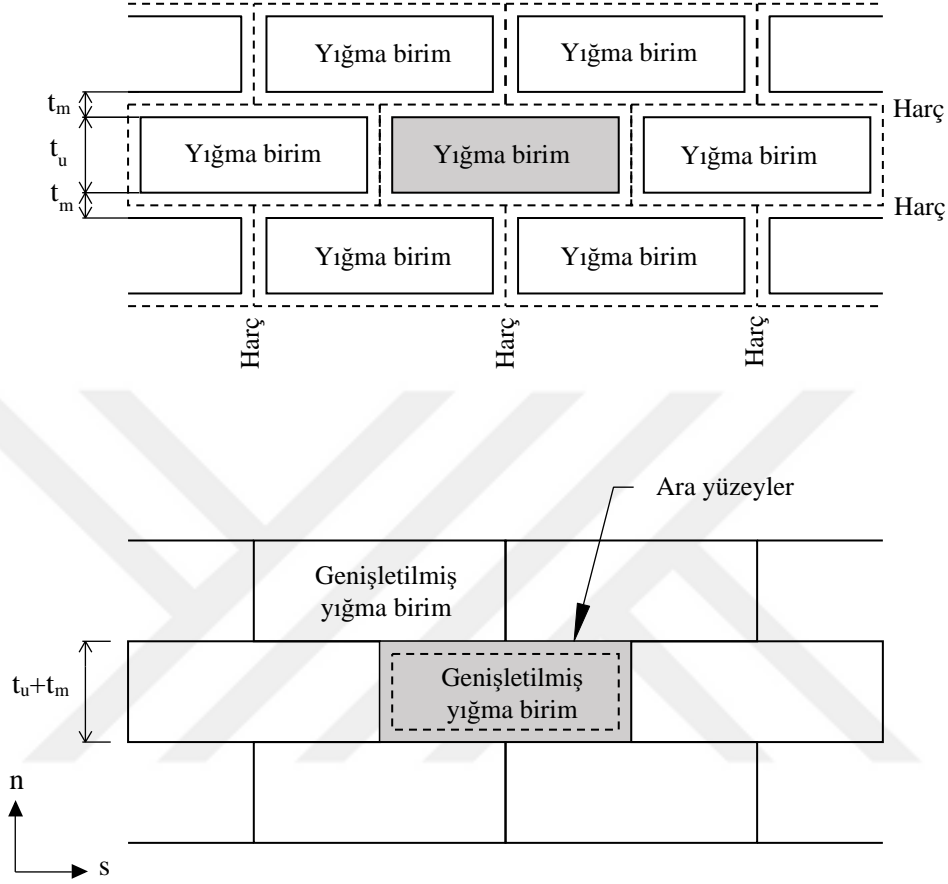
En gelişmiş modelleme tekniği olan detaylı mikro modellemenin temel amacı yığma yapının veya yapı elemanının bölgesel davranışlarının belirlenmesidir [28]. Yöntemde yığmayı oluşturan her bir eleman ayrı ayrı modellendiği için analizlerde çok sayıda denklemin çözülmesi gerekmektedir. Bu durum hem analiz süresini çok uzatmakta hem de çok büyük sonuç dosyaları meydana getirmektedir. Bu nedenle söz konusu yöntem bölgesel analizler için sıklıkla kullanılırken, büyük boyutlu yapıların tamamının analizinin gerekli olduğu çalışmalarda tercih edilmemektedir.

### 1.5.3. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme

Detaylı mikro modelleme yöntemi her ne kadar yığma duvarların gerçek davranışlarının anlaşılmasında kullanılan en iyi modelleme yöntemlerinden biri olsa da günümüzdeki bilgisayar teknolojisinin durumu da göz önüne alındığında büyük sistemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmadığı görülmektedir. Çok büyük boyutlardaki sistem rijitlik matrisi, çözüm süresini uzatmakta ve büyük sonuç dosyaları üretmektedir. Bu sebeplerden dolayı basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi geliştirilmiş böylece daha büyük yığma sistemlerin daha kısa zamanda ve daha düşük kapasiteli bilgisayarlarda çözümü mümkün hale gelmiştir [29, 30].

Yöntemde yığma birimler, harç kalınlığının orta noktasından geçtiği düşünülen bir ara yüzeye ya da birleşim yüzeyine kadar genişletilen birim elemanlarla temsil edilir. Başka bir ifadeyle bir yığma birim, harç kalınlığının ortasından geçtiği varsayılan bir ara yüzey

boyunca oluşacağı kabul edilen çatlaklarla çevrilidir. Bu yöntemde harcın Poisson oranı ihmal edilir [26]. Şekil 1.28’de basitleştirilmiş mikro modelleme örneği gösterilmektedir.



Şekil 1.28. Basitleştirilmiş mikro modelleme [31]

Basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi ile yapılan modellemelerde tanımlanan ara yüzeylerde çekme ve kayma davranışları birlikte tanımlanmalıdır. Bunun sonucu olarak bu yaklaşımda, modelde meydana gelebilecek olan çekme ve kayma çatlaklarının tanımlanan bu ara yüzeyler ile birim elemanların ortasında düşey çatlaklar olarak meydana geleceği kabulü yapılır.

Basitleştirilmiş mikro modellemede ara yüzeylerin elastik davranış kabulü ile;

$$\bar{\mathbf{t}} = \bar{\mathbf{k}} \times \bar{\boldsymbol{\delta}} \quad (1.1)$$

eşitliği tanımlanır. Burada  $\bar{\mathbf{t}}$  gerilme tansörünü,  $\bar{\mathbf{k}}$  ve  $\bar{\boldsymbol{\delta}}$  ise sırasıyla rijitlik matrisini ve deplasman vektörünü göstermektedir. Eşitlik (1.1)'deki;

$$\bar{t} = \begin{bmatrix} \sigma_n \\ \tau_s \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$$\bar{k} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$\bar{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

ile ifade edilmektedir. Bu denklemlerdeki  $\sigma_n$  normal gerilmeyi,  $\tau_s$  kayma gerilmesini,  $k_n$  normal rijitliği,  $k_s$  kayma rijitliğini,  $\delta_n$  normal yer değiştirmeyi,  $\delta_s$  kayma yer değiştirmesini göstermektedir.

Harcın, ara yüzeylerle temsil edildiği bu yöntemde, ara yüzeylerde sırasıyla normal ve kayma rijitlikleri olan  $k_n$  ve  $k_s$  değerleri tanımlanır. Bu değerlerin elde edilmesi için literatürde farklı bağıntılar geliştirilmiştir.

Lourenço [20] ara yüzey rijitliklerini harcın elastisite modülü ( $E_m$ ) ile yığma birimin elastisite modülü ( $E_u$ ) arasında bağıntılar geliştirerek tanımlamıştır. Bu bağıntılara göre;

$$k_n = \frac{E_u E_m}{t_m (E_u - E_m)} \quad (1.5)$$

$$k_s = \frac{G_u G_m}{t_m (G_u - G_m)} \quad (1.6)$$

dir. Burada  $E_u$  ve  $E_m$  yığma birimin ve harcın elastisite modüllerini,  $G_u$  ve  $G_m$  yığma birimin ve harcın kayma modüllerini,  $t_m$  ise harç tabakasının kalınlığını göstermektedir. Söz konusu eşitliklerde kayma modüllerinin hesabında;

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.7)$$

eşitliği kullanılmaktadır. Bu eşitlikte  $\nu$  Poisson oranıdır. Harç elastisite modülünün yığma birim elastisite modülünden daha büyük olduğu durumlarda eşitlik (1.5) ve (1.6) negatif olmakta bu da söz konusu eşitliklerin kullanımını sınırlandırmaktadır.

Spada ve diğ. [28] ise arayüz rijitliklerini eşitlik (1.8) ve (1.9)'da olduğu gibi yalnızca harcın elastisite modülüne bağlı olarak tanımlanmışlardır. Söz konusu eşitlik çok ince harç tabakasına sahip modellerde çok büyük rijitlik değerleri vereceği için bu tip yığma birimlerin modellenmesinde kullanımı uygun olmamaktadır.

$$k_n = \frac{E_m}{t_m} \quad (1.8)$$

$$k_s = \frac{G_m}{t_m} \quad (1.9)$$

Pluijm [29] çalışmasında çok ince harç tabakasına sahip yığma elemanların modellenmesi için yığma birim eleman ve yığmanın elastisite modülleri ile harcın Poisson oranına bağlı olarak eşitlik (1.10) ve (1.11)'i önermiştir.

$$k_n = \frac{E_u E_m}{E_u (t_u + t_m) - E_m t_u} \quad (1.10)$$

$$k_s = \frac{k_n}{2(1+\nu_m)} \quad (1.11)$$

Eşitlik (1.10) ve (1.11)'de  $E_u$  ve  $t_u$  yığma birim elemanın elastisite modülünü ve yüksekliğini,  $E_m$  harç ve yığma birim elemandan oluşan yığma prizmanın aksel basınç deneyinden elde edilen elastisite modülünü,  $t_m$  ve  $\nu_m$  ise harç tabakasının kalınlığı ile harcın elastisite modülünü ifade etmektedir.

Bazı bilimsel çalışmalarda [30, 20, 31, 32, 33, 34] kullanılmış olan normal ve kayma rijitlik değerleri Tablo 1.8'de verilmektedir. Bu değerlerden anlaşılacağı üzere normal rijitlik değeri 3 MPa/mm ile 16020 MPa/mm, kayma rijitlikleri ise 30 MPa/mm ile 11856 MPa/mm arasında değişim göstermektedir.



Tablo 1.8. Bazı bilimsel çalışmalarda kullanılmış olan normal ve kayma rijitlik değerleri

Araştırmacı	Normal rijitlik, $k_n$ (MPa/mm)	Kayma rijitliği, $k_s$ (MPa/mm)
Lourenço [20]	82	36
Haach ve diğ. [30]	20	48
Movila ve diğ. [31]	150	40
Sarhosis ve diğ. [32]	38.1	17.5
Thamboo [33]	24	30
Zamani Ahari [34]	3	30

## 1.6. Yapı Davranışlarını Etkileyen Bazı Parametreler

Yapıların dış yükler etkisi altındaki davranışlarının değerlendirilmesinde bazı parametreler dikkate alınmalıdır. Bunlardan bazıları yapının rijitlik ve sünekliğindeki değişim ile enerji yutma kapasitesindeki değişimlerdir.

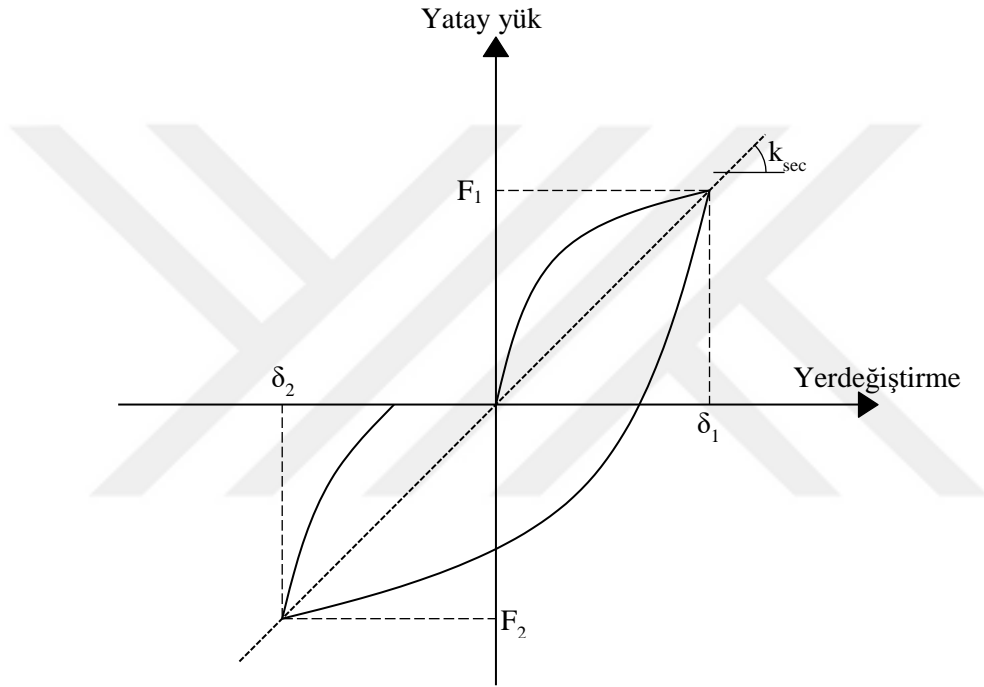
### 1.6.1. Rijitlik Değişimi

Rijitlik, bir cismin ya da bir yapı sisteminin, üzerine uygulanan dış yükler etkisi altında meydana gelebilecek olan yerdeğiştirmelere karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Bir cismin rijitliği arttıkça şekildeğiştirme olabilmesi için gereken kuvvet de artmaktadır.

Bir deney elemanındaki rijitlik değişimleri, söz konusu elemanın deney başlangıcından sonuna kadar işlevini yerine getirme yeteneğinin değerlendirilmesinde kullanılan parametrelerden biridir. Çevrimsel yatay yük etkisi altındaki deney elemanlarının rijitliklerinde, birbirini takip eden her bir çevrimde azalma meydana gelmektedir. Çevrimsel yatay yük etkisi altında, duvarlardaki rijitlik değişimleri incelenirken genellikle sekant rijitliği ( $k_{sec}$ ) dikkate alınmaktadır. Bu rijitlik, deneylerden elde edilen yük-yerdeğiştirme grafiğindeki her bir çevrim için maksimum çekme ve itme kuvvetleri ile bunlara karşılık gelen yerdeğiştirmeleri birleştiren doğrunun eğimi olarak tanımlanmakta ve;

$$k_{\text{sec}} = \frac{|F_1| + |F_2|}{|\delta_1| + |\delta_2|} \quad (1.12)$$

eşitliğinden elde edilmektedir. Burada;  $F_1$  ve  $F_2$  sırasıyla itme ve çekmedeki maksimum yükleri,  $\delta_1$  ve  $\delta_2$  ise sırasıyla itme ve çekmedeki maksimum yüklere karşılık gelen yerdeğiştirmeleri göstermektedir (Şekil 1.29).



Şekil 1.29. Çevrimsel yatay yük etkisinde sekant rijitliğinin belirlenmesi [35]

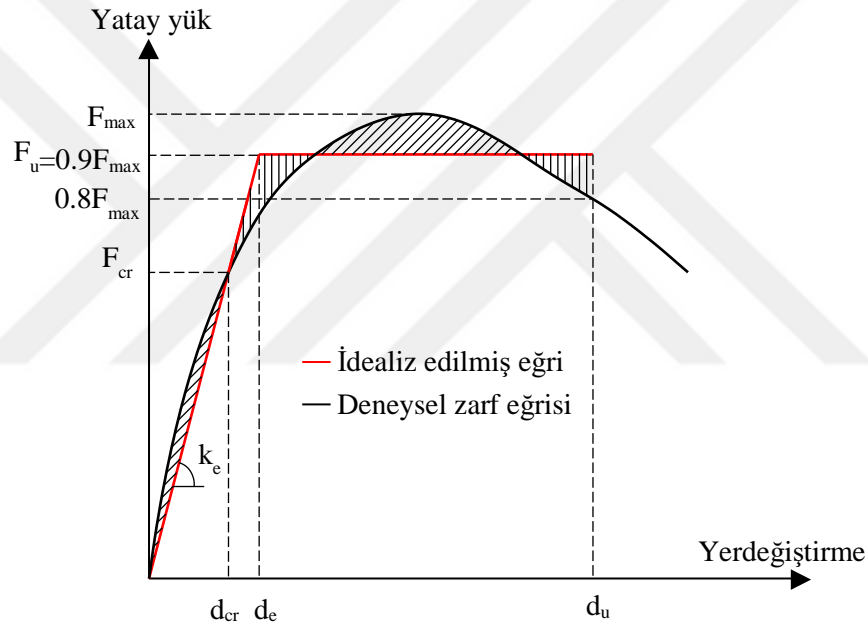
Deney numuneleri için elde edilen rijitlik değişimlerinin birbirleri ile daha sağlıklı karşılaştırılabilmesi için genellikle elde edilen rijitlik değerlerinin, kat ötelenme oranlarına bağlı olarak değişimi grafiksel olarak çizdirilmektedir.

### 1.6.2. Süneklik Değişimi

Süneklik, bir yapının, bir elemanın ya da bir kesitin, taşıma kapasitesinde önemli bir azalma olmadan elastik sınırlar ötesinde şekildeğiştirme yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Yığma duvarların, düzlem içi çevrimsel yatay yük etkisi altındaki

performansını değerlendirebilmek için kullanılan yöntemlerden biri yük-yerdeğiştirme eğrilerinin idealleştirilerek bu eğrilerden elde edilen süneklik katsayılarının değerlendirilmesidir [36, 37, 38].

Yığıma duvarların deneysel olarak elde edilen zarf eğrilerinin idealleştirilmesi için Tomazevic [39] tek eğimli eğri modelini önermiştir. Şekil 1.30'da gösterilmekte olan bu model, deneysel olarak elde edilen zarf eğrisinin idealize edilmiş eğrinin bittiği noktaya kadarki bölümünün altında kalan alan ile idealize edilmiş eğri altında kalan alanın eşit olması gerektiği prensibine dayanır. Dolayısı ile yutulan enerji miktarının sabit kalacağı varsayımı yapılmaktadır.



Şekil 1.30. Tek eğimli eğri modeli ile deneysel zarf eğrisinin idealleştirilmesi [39]

Şekil 1.30'da görülen  $F_{cr}$  ve  $d_{cr}$  sırasıyla deney elemanında ilk çatlağı oluşturan yük ve bu değere karşılık gelen yerdeğiştirme değerleridir. Bu değerlere bağlı olarak deney elemanının düzlem içi yatay yük etkisi altındaki başlangıç rijitliği olarak tanımlanan ( $k_e$ );

$$k_e = \frac{F_{cr}}{d_{cr}} \quad (1.13)$$

eşitliğinden elde edilmektedir. Pek çok duvar üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda Tomazevic [39] idealize edilmiş olan eğrinin ulaştığı maksimum yatay yük olan  $F_u$  'nun;

$$F_u = 0.9 F_{\max} \quad (1.14)$$

olarak alınmasının uygun olacağını belirtmiştir. Tek eğimle idealize edilen eğrinin elastik limit yerdeğiştirme değeri ( $d_e$ );

$$d_e = \frac{F_u}{k_e} \quad (1.15)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmaktadır. Ayrıca idealize edilmiş eğrinin nihai yerdeğiştirme değeri olan  $d_u$  'u %20 dayanım azalmasına karşılık gelen yerdeğiştirme değerini göstermektedir. Sonuç olarak süneklik katsayısı ( $\mu_u$ )

$$\mu_u = \frac{d_u}{d_e} \quad (1.16)$$

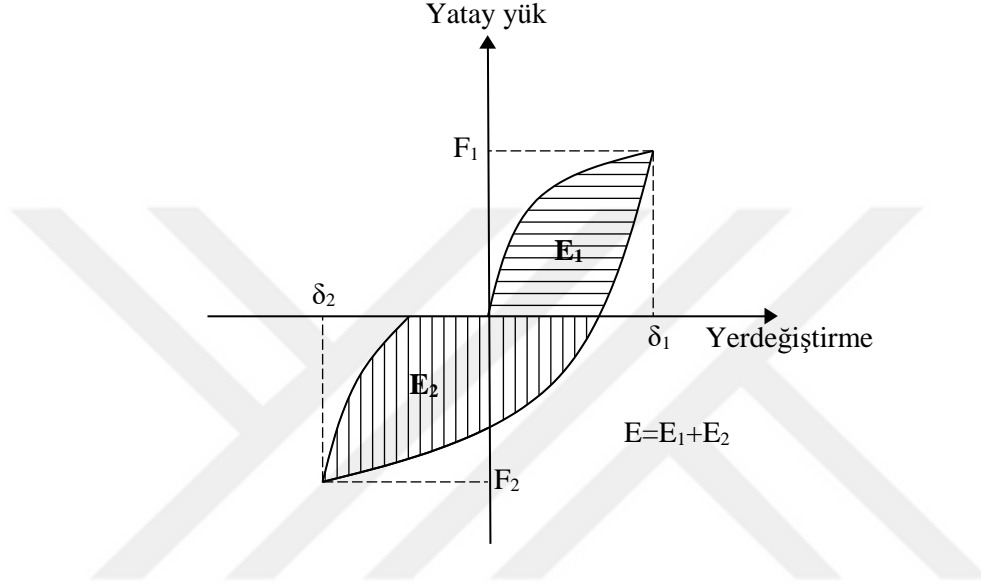
olarak tanımlanmaktadır.

### 1.6.3. Enerji Tüketme Kapasitesi Değişimi

Çevrimsel yatay yük etkisi altındaki yapı sistemlerinin performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri de enerji tüketme kapasiteleridir. Bilindiği gibi deprem gibi dış yüklerden dolayı meydana gelen enerjinin büyük kısmı, yapı tarafından çoğu zaman büyük şekilde değişimler yapılarak karşılanmaktadır. Söz konusu enerjinin yapı tarafından mümkün olduğunca az hasara uğrayarak hapsedilmesi, yapının enerjisiyi oluşturan dış yük etkisi altındaki başarısını ortaya koymaktadır.

Çevrimsel yatay yük etkisi altındaki deney elemanlarının enerji tüketme kapasiteleri, yük-yerdeğiştirme elde edilmektedir. Tam çevrimlerin dikkate alındığı bu hesaplamalarda her bir çevrimde tüketilen enerji, itme ve çekmedeki yük-yerdeğiştirme eğrisinin altındaki

alanların toplanması ile hesaplanmaktadır (Şekil 1.31). Her bir çevrimde tüketilen enerji değerleri yığışımli olarak toplanarak, deney elemanına ait toplam tüketilen enerji grafiği elde edilmektedir. Deney elemanlarının enerji tüketme kapasitelerinin birbirleri ile daha sağlıklı karşılaştırılabilmesi için genellikle tüketilen enerji değerlerinin, kat ötelenme oranı ile değişimlerini gösteren grafikler kullanılmaktadır.



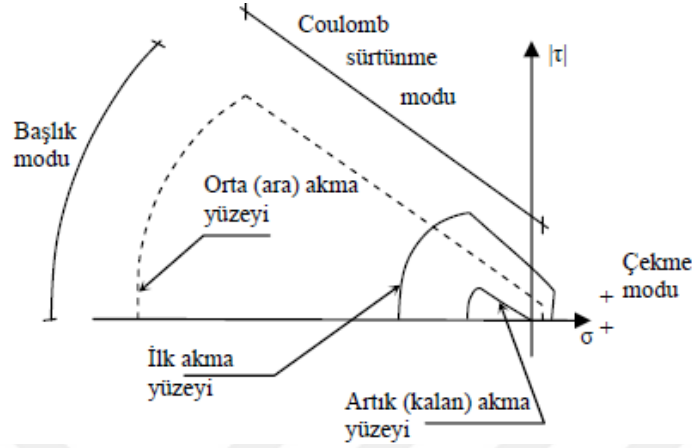
Şekil 1.31. Çevrimsel yük etkisi altında her bir çevrimde tüketilen enerjinin belirlenmesi [35]

### 1.7. Yığma Yapılarla İlgili Yapılan Diğer Bazı Çalışmalar

Bu bölümde yığma yapılar ve yığma yapı elemanları ile ilgili yapılan bazı çalışmalara yer verilmektedir. Çalışmanın genel amacına uygun olarak, çoğunluğunu, yığma yapıların düzlem içi yatay yük etkisi altındaki davranışlarının deneysel ve teorik incelendiği çalışmaları oluşturduğu bu bölümde düzlem dışı yükleme, yığma yapıların modellenmesi ve yığma malzeme özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar da yer almaktadır.

Lourenço [20] çalışmasında, donatısız yığma yapıların modellenmesinde kullanılan yöntemler ve yığma yapıların doğrusal olmayan elastik ötesi davranışları hakkında bilgiler vermektedir. Çalışmada, yığma yapıların basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi ile modellenmesinde kullanılmak üzere kompozit arayüzey kırılma kriteri önerilmektedir (Şekil 1.32). Duvarlardaki çekme çatlakları, derzlerdeki kaymalar ve yığma birim elemanlarda meydana gelen çekme çatlakları ile ezilmelerin hepsinin bir arada düşünöldüğu bu kırılma

teorisinde yığma birimlerin elastik davranış gösterdikleri buna karşın elastik ötesi davranışın ise yığma birimler arasındaki arayüzelerde meydana geldiği kabulü yapılmaktadır.

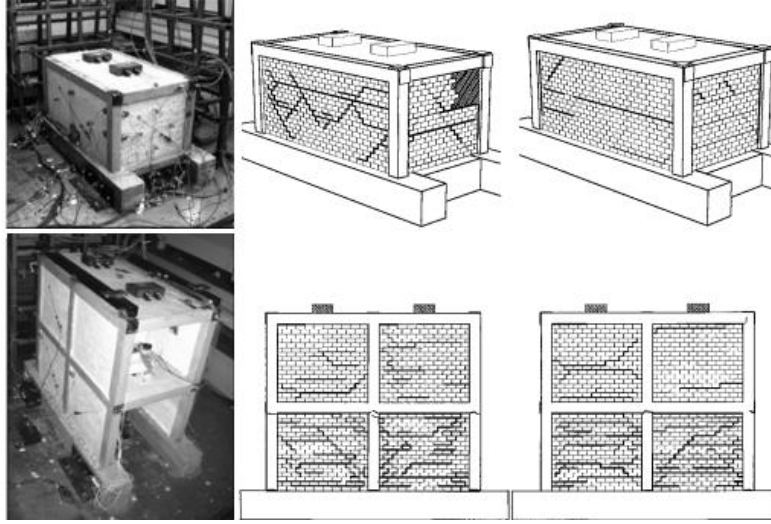


Şekil 1.32. Kompozit arayüzey kırılma kriteri [20]

Saberi [40], yükseklik/genişlik oranı 1’den büyük olan boşluklu (kapı boşluklu) yığma duvarların deprem altındaki davranışlarını incelemiş ve duvarların yükseklik/genişlik oranlarının davranışa olan etkisini araştırmıştır. Yarı-statik deney yönteminin kullanıldığı çalışmada duvarlar sabit düşey yük etkisi altında düzlem içi yüklenmiştir.

Gencer [41], yığma birim olarak pomzalı bimsbloklar kullanarak tek katlı ve tek açıklıklı bir yığma yapı inşa etmiş ve bu yapı üzerinde sarsma tablası deneyini uygulamıştır. Deney sonucunda elde ettiği yapı kesme dayanım değerlerini daha önce yapılmış olan çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır. Çalışmada, literatürde düşey delik oranı farklı tuğlalar ve farklı harçlar kullanılarak inşa edilmiş yığma yapı deneylerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, bimsblok yığma yapının kesme dayanımının ortalama değerlerde kaldığı sonucuna varılmıştır.

Zarnic ve diğ. [42], Eurocode-8’e (Design of Structures for Earthquake Resistance) göre 1/4 ölçeğindeki kutu kesitli tek katlı ve H kesitli iki katlı iki yığma yapı inşa etmiş ve bu yapılar üzerinde sarsma tablası deneyini gerçekleştirmişlerdir (Şekil 1.33). Çalışmada kullanılan harcın dayanımının, birim eleman dayanımından düşük seçilmesi sonucu deney elemanlarındaki hasarların, yatay derzlerdeki açılmalarla kendini gösterdiği vurgulanmıştır. Çalışma sonunda, Eurocode-8’e uygun olarak inşa edilen yığma yapıların yüksek sismik performans göstereceği sonucuna varılmıştır.



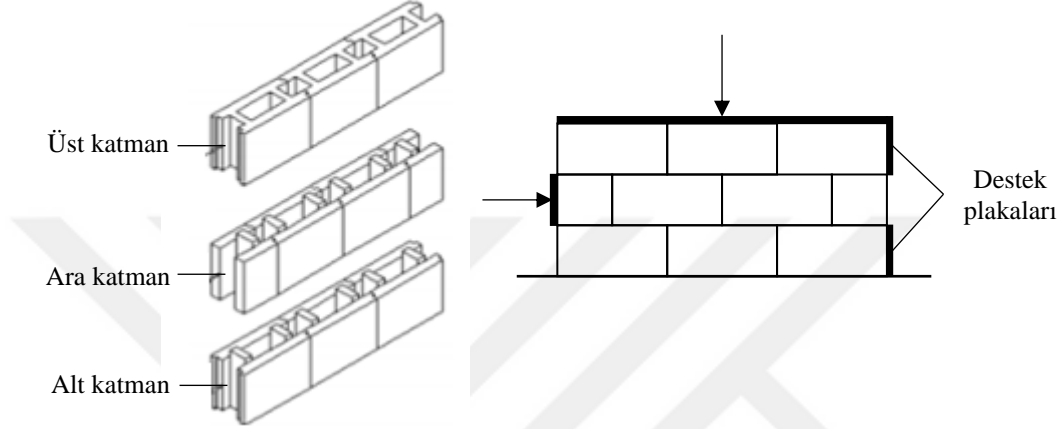
Şekil 1.33. Zarnic ve diğ.'nin çalışmasındaki deney elemanları ve deney elemanlarının farklı cephelerinde oluşan hasarlar [42]

Zhang ve diğ. [43] kapı ve pencere boşluklarının yığma yapıların düzlem dışı yatay yük taşıma kapasitelerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla NZS 4229'a (Concrete Masonry Buildings Not Requiring Specific Engineering Design) uygun olarak, 9000x2400x190 mm boyutlarında inşa ettikleri boşluklu ve boşluksuz donatılı yığma duvarların çevrimsel yatay yük etkisi altındaki düzlem dışı davranışlarını incelemiştir. Çalışma sonunda, kapı ve pencere boşluklarının yığma duvarların taşıma kapasitelerini olumsuz etkilediği sonucuna varmışlardır. Çalışmada ayrıca, söz konusu standartta belirtilen minimum donatı miktarından daha az donatı kullanılması durumunda bile deney numunelerinin düzlem dışı yük etkisi altında sünek davranış gösterdiği ve taşıma kapasitelerinin üzerinde performans gösterdikleri belirtilmiştir.

Karasin ve Karaesmen [44] çalışmalarında, 2003 Bingöl depreminde hasar gören yapıları incelemiş ve en çok hasar gören yapı tipinin yığma yapılar olduğunu tespit etmişlerdir. Söz konusu deprem sırasında yığma yapılarda oluşan hasarların nedenleri olarak; yatay ve düşey hatlı eksikliğini, duvar-köşe bağlantılarının iyi yapılmamış olmasını göstermişlerdir. Ayrıca köşe bağlantıları iri taşlarla oluşturulmuş yapıların, depremde daha az hasar gördüğünü tespit etmişlerdir. Hasar nedenleri olarak gördükleri sorunları barındıran yığma yapıları, depremde hasar görme riski yüksek yığma yapılar olarak tanımlamışlar ve bu yapılarda güçlendirme yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Alwathaf ve diğ. [45] kilitlenebilir birim elemanların harçsız olarak kullanıldığı durumda yığma deney elemanlarının kayma dayanımı ve göçme mekanizmalarını deneysel

olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında 3 birim eleman üzerinde 3 sıra olarak hazırladıkları elemanlar üzerinde farklı aksenal yük seviyelerinde kayma deneyi gerçekleştirmişlerdir (Şekil 1.34). Çalışma sonunda gerçekleştirilen regresyon analizlerinden, kilitlenebilir elemanların sürtünme katsayısının, arada harç gibi bir yapıştırıcı etki olmamasına rağmen, Coulomb kırılma kriterine uygun olarak yaklaşık 0.603 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1.34. Alwathaf ve diğ.'nin çalışmalarında kullandıkları deney elemanları ile deney düzeneği [45]

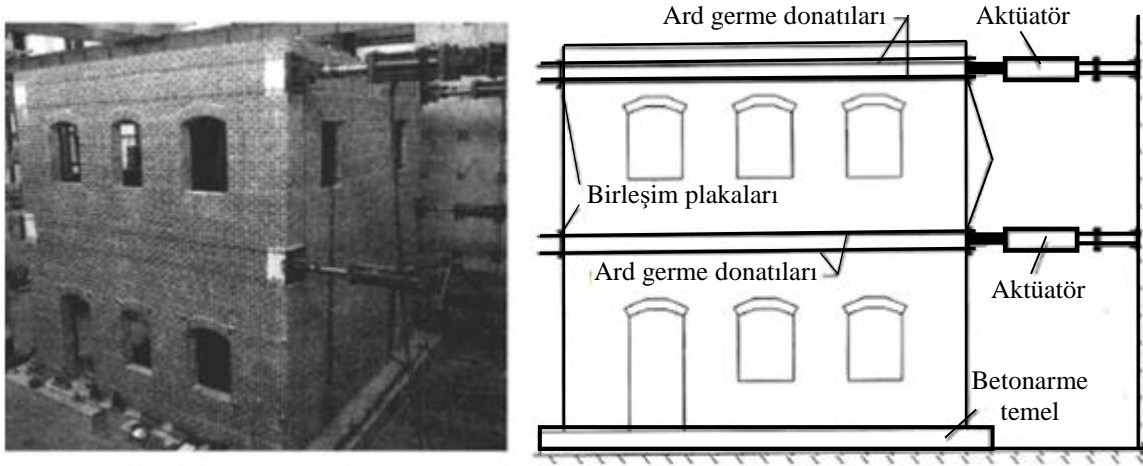
Kuran [46] tarafından yürütülen çalışmada, düşey delikli tuğla kullanılarak inşa edilen tek katlı bir yığma yapı sarsma tablasında test edilerek önce hasara uğratılmış, ardından hasarlı yapının farklı şekillerde düzenlenen çelik şeritlerle güçlendirilerek tekrar test edilmiştir. Deneyden elde edilen sonuçlar kullanılarak, çelik şeritlerle güçlendirmenin yığma yapının dayanım, rijitlik, sönüm oranı ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Pallares ve diğ. [47] çalışmalarında, 30m yüksekliğindeki bir endüstriyel yığma bacanın deprem yükleri altındaki davranışını teorik olarak elde etmeyi amaçlamışlardır. Bacaya ait 3 boyutlu sonlu eleman modeli makro modelleme yöntemiyle oluşturulmuş ve 5 farklı yapay deprem kaydı altında analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada söz konusu depremler etkisi altında bacanın maksimum yerdeğiştirme, gerilme dağılımları ve göçme modları araştırılmıştır.

Yi ve diğ. [48] mevcut donatısız yığma yapıların lineer olmayan özelliklerini belirlemek amacıyla iki katlı tam ölçekli bir yığma yapıyı yerdeğiştirme kontrollü çevrimsel yatay yük etkisi altında test etmişlerdir (Şekil 1.35). Deneyden elde edilen veriler



değerlendiğinde yığma yapının başlangıç rijitliğinin yüksek olduğu fakat artan yerdeğiştirmelerle birlikte rijitliğin hızla düştüğü belirlenmiştir. Deney elemanında meydana gelen hasarın daha çok birinci katta, boşluklar arasındaki duvarların ezilmesiyle ve tuğla-harç arayüzeylerinin kaymasıyla meydana geldiği gözlemlenmiştir. Farklı boşluk oranlarına sahip duvarlardan oluşan yığma yapıda, birbirine dik duvarların kanat oluşturmasının deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesine olumlu etki ettiği belirlenmiştir. Çalışmada, deneysel gözlemler FEMA-356 ile karşılaştırıldığında, mevcut yönetmeliklerin önemli ölçüde geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.



Şekil 1.35. Yi ve diğ.'nin test ettikleri deney elemanı [48]

Chaimoon ve Attard [49] çalışmalarında farklı değerlerde sabit düşey yük uygulanan donatısız yığma duvarların monotonik (tek yönlü artan) yatay yük etkisi altındaki davranışları teorik olarak elde etmeyi amaçlamışlardır. Teorik analizlerde, yığma birim olarak kullanılan tuğla için farklı kohezyon, dilatasyon açısı ve kırılma enerjisi değerlerinin yığma duvarın yatay yük taşıma kapasitesine etkileri incelenmiştir. Duvarlara ait sonlu eleman modelleri mikro modelleme yöntemiyle ve iki boyutlu olarak oluşturulmuştur. Çalışmada tuğla ve harcın elastik, buna karşın tuğla-harç arayüzeylerinin ise elastik ötesi davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Harç ve tuğlalar arasındaki arayüzeylerde Lourenço [20] tarafından önerilen kompozit arayüzey kırılma teorisinin kullanıldığı çalışmada eleman tipi olarak sabit şekildeğiştirme oranına sahip üçgensel elemanlar kullanılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Çöğürçü [50], düzlem dışı yüklenen yığma duvarların yatay derzlerinde epoksi reçineli FRP kullanımının duvarlarda oluşan çatlaklara etkisini analitik ve deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada kil bazlı harman tuğlası ile aynı geometri ve malzeme özelliğine sahip 2 ayrı prototip duvar üretilmiştir. Birinci duvar deprem benzeşimli düzlem dışı çevrimsel yatay yük etkisi altında test edilmiş ve kırılma davranışı incelenmiştir. İkinci duvarın yatay derzleri epoksili FRP ile takviye edilmiş ve aynı yükleme protokolü altında test edilerek uygulamanın duvar davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonunda, uygulanan güçlendirme yönteminin, duvarın düzlem dışı yatay yük dayanımında yaklaşık %25'lik bir artışa buna rağmen süneklikte %48'lik bir azalmaya neden olduğu belirtilmiştir. Ayrıca derzlerinde FRP kullanılan deney elemanının %22 oranında daha az enerji tükettiği ve deney elemanlarının kesme kırılmasını andıracak şekilde gevrek kırıldığı vurgulanmıştır.

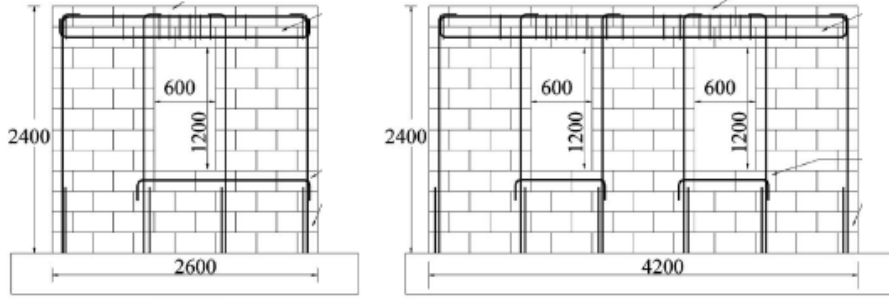
Ural ve Doğançün [51], 3'ü sarılmış (düşey hatıllar ile) olmak üzere 4 adet yığma yapının bilgisayar yardımıyla deprem performanslarını değerlendirmişlerdir. Modellemelerde basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminin kullanıldığı çalışmada bütün modeller betonarme döşeme ile bir kapı boşluğu ve karşılıklı olarak birer pencere boşluğuna sahiptir. Analizler sonucunda en fazla düşey hatıla sahip olan modelin diğerlerine göre daha az yerdeğiştirme yaptığı, periyotlarının daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca, düşey hatılların yığma yapıların deprem performanslarını artırdığı vurgulanmıştır.

Wijanto'nun [52] çalışmasında Kil bazlı tuğlalarla inşa edilen I şeklindeki flanşlı duvarların deprem davranışlarını incelenmiştir. Çalışmada biri kevlav (çok hafif karbon kökenli ve çok sağlam liflerden oluşan bir malzeme) fiberlerle güçlendirilmek üzere iki yığma duvar, deprem benzeşimli düzlem içi yatay yük etkisi altında deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Çalışma sonunda geleneksel yığma duvarın gevrek kırılma ile göçmediği, dayanım kaybı yaşamadan enerjiyi tüketebildiği ve maksimum kat ötelenme oranı %0.52 iken yerdeğiştirme sünekliğinin 8-10 değerleri arasında olduğu belirlenmiştir. Duvar malzemesinin homojen olmamasından kaynaklı olarak yük-yerdeğiştirme eğrilerinin çekmede ve itmede simetrik olmadığı vurgulanmıştır. 2mm kalınlığındaki Kevlar fiberlerin yığma duvarda gerilme yığılmalarının beklendiği bölgelerde kullanılması halinde düzlem içi yatay yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca deney duvarlarına dik olarak inşa edilen flanşların, deney elemanlarının rijitliğini ve eğilme dayanımlarını artırdığı vurgulanmıştır.

Dias [53], yığma yapı duvarlarındaki çatlakların genelde yığma birimler arasındaki ara yüzelerde meydana geldiğini vurguladığı çalışmada bu çatlakların nedeni olarak, ara yüzelerin düşük kesme dayanıma sahip zayıf düzlemler olmasını göstermiştir. Çalışmada otoklavlanmış gözenekli hafif betondan, genişletilmiş kil agregalı hafif betondan ve kilden imal edilen yığma birimler kullanarak arayüzelerin kayma davranışına etkisi hakkında bilgi edinmeyi ve bu etkileri en aza indirmek için önleyici çözümler bulmayı hedeflemiştir. Ayrıca, bu çalışma birim elemanlar arasındaki harcın, kayma davranışını belirlemeyi amaçlayan teorik hesapların ve deneylerin sonuçlarını sunmaktadır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, harç tabakasının özelliklerinin duvarın davranışı için önemli derecede etkilediği ve arayüzelerde güçlendirme elemanlarının bulunmasının kayma davranışı üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu vurgulanmıştır.

Kalkan [54] çalışmada, yığma duvarların, püskürtme beton kullanılarak güçlendirilmesinin duvarların düzlem dışı davranışına etkisini araştırmıştır. Çalışmada, harman tuğlası kullanılarak aynı geometriye ve malzeme özelliklerine sahip iki duvar inşa edilmiştir. Duvarlardan biri, hasır donatılarında kullanıldığı püskürtme betonla güçlendirilmiş ve her iki duvar da aynı deney şartlarında düzlem dışı çevrimsel yük etkisinde test edilmiştir. Çalışmada güçlendirilmemiş duvarla karşılaştırıldığında püskürtme beton kullanılarak güçlendirilmiş duvarın dayanımının 3.1 kat arttığı, sünekliğinin 2.64 kat artarak 5.81'e ulaştığı, enerji tüketme kapasitesinin 13.94 kat arttığı ve rijitliğinin ise 0.46 kat azaldığı belirtilmiştir.

Voon ve Ingham [55], NZS 4229'e göre (Concrete Masonry Buildings Not Requiring Specific Engineering Design) 8 farklı tipte donatılandırılmış boşluklu yığma duvarın düzlem içi çevrimsel yatay yük etkisi altındaki davranışlarını incelenmişlerdir (Şekil 1.36). Yapılan analitik ve deneysel çalışmalar değerlendirildiğinde, Yeni Zelanda yığma yapı standardı NZS 4229'un tasarımda oldukça güvenli tarafta kaldığı ve ekonomik olmadığı vurgulanmıştır. Ayrıca deney elemanlarının hiçbirinin gevrek ve ani kırılmadığı, dayanımlarını ve rijitliklerini yavaş yavaş kaybettikleri belirtilmiştir. Ayrıca duvarlarda bırakılan kapı ve pencere boşluklarının yüksekliklerinin artmasının duvar dayanımını azalttığı, boşlukların altında ve üstünde donatı kullanımının duvar dayanımını artırıp ani göçmeleri engellediği ve söz konusu donatı boylarının artmasının çatlakları azalttığı belirlenmiştir.



Şekil 1.36. Voon ve Ingham'ın çalışmalarındaki bazı deney elemanları [55]

Shedid ve diğ. [56] çalışmalarında birim eleman düşey boşlukları donatı ve harç ile doldurulmuş yığma duvarların, eğilme etkisinde yüksek süneklik gösterdiğini kanıtlamayı amaçlamıştır. Çalışma kapsamında 6 adet tam ölçekli duvar inşa edilmiştir. Söz konusu duvarlar, düşey donatı miktarı ve konumları ile duvarlar üzerine uygulanan sabit eksenel yükün elastik ötesi davranış ve süneklik üzerindeki etkilerini araştırmak için tersinir çevrimsel yatay yükleme altında test edilmiştir. Deneylerde, düşey donatının akma sınırına kadar, tepe deplasmanı ve donatı miktarı arasında iyi bir ilişki görülürken eksenel yük seviyesinin tepe deplasmanı üzerinde etkisinin az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, deney elemanları taşıma kapasitesine ulaştığında, düşey donatı miktarı ve eksenel yük oranının tepe deplasmanı üzerindeki etkisinin azaldığı görülmüştür. Buna karşın, düşey donatı miktarının süneklik üzerinde çok etkili olduğu fakat sünekliğin eksenel yük miktarına bağlı olmadığı belirtilmiştir.

Shariq ve diğ. [57], farklı genişlik/yükseklik oranına sahip duvarlarda bırakılan kapı-pencere boşluklarının, yığma yapıların deprem davranışları üzerindeki etkisini teorik olarak incelemiştir. Sismik analizlerde tepki spektrumu yönteminin kullanıldığı çalışmada davranışın değerlendirilmesi için maksimum çekme gerilmesi ve maksimum kayma gerilmesi parametrelerinin değişimleri incelenmiştir. Çalışmada, deprem kuvvetinin yığma yapıların boşluklu kısa kenarları doğrultusunda uygulanması halinde kayma ve çekme gerilmelerinin maksimum olduğu, maksimum çekme gerilmelerinin kısa duvarlarda, maksimum kayma gerilmelerinin ise yüksek duvarlarda olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca duvarın genişlik/yükseklik oranı arttıkça maksimum gerilmelerin de arttığı, duvarlardaki boşluk artışının boşluk kenarlarındaki gerilmeleri de arttırdığı belirtilmiştir.

Thanoon ve diğ. [58], Alwathaf ve diğ.'nin [45] çalışmalarında kullandıkları harçsız kilitlenebilir beton bloklarla üretilen dolgulu ve dolgunsuz yığma elemanların, eksenel basınç yükleri altındaki davranışını teorik olarak incelemiştir. Harcın kullanılmadığı çalışmada,

kilitli yığma yapıların modellenmesi için bir sonlu eleman algoritması önerilmiştir. Söz konusu algoritma ile kilit yüzeyleri arasındaki geometrik kusurların mekanik özellikleri, bloklar arasındaki etkileşimi, bloklar ve kama arasındaki ayrılmayı ve lineer olmayan malzeme özellikleri tanımlanabilmektedir. Önerilen algoritmanın uygulanabilirliği analiz edilen yığma elemanların göçme mekanizmasını ve lineer olmayan yapı davranışlarına bağlı olarak araştırılmış ve uygulanabilir olduğu vurgusu yapılmıştır.

Ural ve Doğançün [59], yığma duvarların kayma davranışlarını etkileyen parametrelerden biri olan desteksiz duvar uzunluğunun davranışa etkisi araştırmışlardır. Bu amaçla, ortasında bir pencere boşluğu bulunan altı adet farklı uzunluktaki yığma duvarın modellerine ait doğrusal olmayan analizler değerlendirilmiştir. Basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminin kullanıldığı çalışmada, tüm duvar modelleri sarılmış yığma duvar olarak tasarlanmıştır. Yapılan analizler neticesinde Türk deprem yönetmeliğine göre [3] tasarlanan sarılmış yığma duvarların, dolu gövdeli duvar uzunluğunun 1.5 m-1.8 m arasında olması halinde, yatay yük dayanımının maksimum olduğu belirtilmiştir.

Ural [60] çalışmasında, yığma yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri için Matlab dilinde iki program yazmıştır. Doğrusal analiz yapan program (FEMMAS-L) kullanılarak iki boyutlu bir duvar ile üç boyutlu bir kemerin analizi, doğrusal olmayan program (FEMMAS-NL) ile ise iki boyutlu bir duvarın analizi gerçekleştirilerek programların doğrulukları denetlenmiştir. Çalışmada ayrıca FEMMAS-NL programı ile harç ve tuğla dayanımlarının aksenal basınç altındaki duvar davranışına etkileri, duvar örgü biçimlerinin duvarın kayma davranışına etkileri, düşey ve yatay hatılların duvarların düzlem içi ve düzlem dışı davranışlarına etkileri araştırılmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde, elastik ötesi davranışı tanımlamak için Drucker-Prager kırılma kriteri kullanılmıştır.

Minaie [61], donatılı yığma duvarların deprem etkisi altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında iki farklı yığma birim kullanılarak farklı boyutlarda yarısı parçalı dolgulu ve diğer yarısı tamamen dolgulu sekiz adet tam ölçekli duvar inşa edilmiştir. Söz konusu duvarların düzlem içi çevrimsel yatay yük etkisi altındaki davranışları yatay yük taşıma kapasitesi, göçme modları, yerdeğiştirme sünekliği, enerji tüketme kapasitesi ve rijitlik değişimi parametrelerine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmaların yanı sıra, deney elemanlarının sonlu eleman analizleri gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla ilişkilendirilmiştir. Doğrusal olmayan analizlerde yığma birimlerin ve dolgunun elastik ötesi davranışını tanımlamak için Concrete Damage Plasticity malzeme modeli kullanılmıştır.

Tu ve diğ. [62] tek katlı, farklı duvar kalınlıklarında, tek doğrultuları duvarsız ve hatıllarla çevrilmiş 4 farklı yığma deney elemanını sarsma tablası deneyi ile düzlemleri dışında yüklemişlerdir. Çalışmada, duvar kalınlığının, yapının düzlem dışı yatay yüklere karşı dayanımı ve rijitliğini artırdığı belirtilmiştir.

Lorenço ve diğ. [63], kâğıt ve ağaç endüstrisinden temin ettikleri katı atıklarla, ısı yalıtım özelliği geleneksel yığma birimlerle karşılaştırıldığında yüksek olan düşey boşluklu ve basınç dayanımı 5 MPa olan bir yığma birim eleman geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, geliştirilen bu yığma birimlerle inşa edilen deney elemanlarının basınç dayanımları ile dolgulu, dolgusuz, dolgusuz ve yatay donatılı 6 adet yığma duvarın düzlem içi yatay yük etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Çalışma sonunda, söz konusu birim elemanların termal özelliklerinin sürdürülebilirliğin önemli olduğu Portekiz iklimi için yeterli olduğu ve deprem bölgelerinde inşa edilecek yapılarda kullanılabileceği belirtilmiştir.

Haach ve diğ. [64, 65] çalışmalarında, düzlem içi yüklenmiş donatılı yığma duvarların davranışlarının belirlenmesi için teorik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deney elemanlarının düzlem içi davranışını, eksenel basınç kuvveti, yükseklik/genişlik oranı, yatay ve düşey donatı oranları ile sınır şartları gibi parametrelere bağlı olarak değerlendirmişlerdir. Teorik çalışmalardan, sınır şartlarının, duvarların düzlem içi davranışlarında temel rol oynadığı, ayrıca eksenel basınç kuvveti ve donatı oranlarının duvarların nihai dayanımını artırdığı sonuçlarına varılmıştır. Çalışmada yükseklik/genişlik oranı arttıkça ve düşük eksenel basınç kuvveti etkisinde, duvarların düzlem içi yüklere karşı dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca donatıların duvarların kesme dayanımına etkileri incelendiğinde; düşey donatıların kesme dayanımını neredeyse hiç etkilemediği buna karşın yatay donatıların dayanımı oldukça artırdığı sonucu gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalarda ise teoriği destekleyen sonuçlar bulunmuştur. Her iki çalışmada da yatay ve düşey donatı olarak kafes tip donatı, yığma birim olarak ise Eurocode-6 standardına uygun, boşluk oranı %46 olan özel üretim beton bloklar kullanılmıştır. Deneysel çalışmada teoriğe ek olarak, tuğla örgü şeklinin duvarların düzlem içi davranışlarını nasıl etkilediği araştırılmış ve tuğla duvar örgü şeklinin duvarın düzlem içi davranışında değişiklik meydana getirmediği belirtilmiştir. Ayrıca deneyler sırasında, eksenel basınç kuvvetindeki artışın duvarları daha gevrek ve rijit hale getirdiği ayrıca yatay donatıların duvarda çok daha kontrollü ve uniform çatlaklar meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

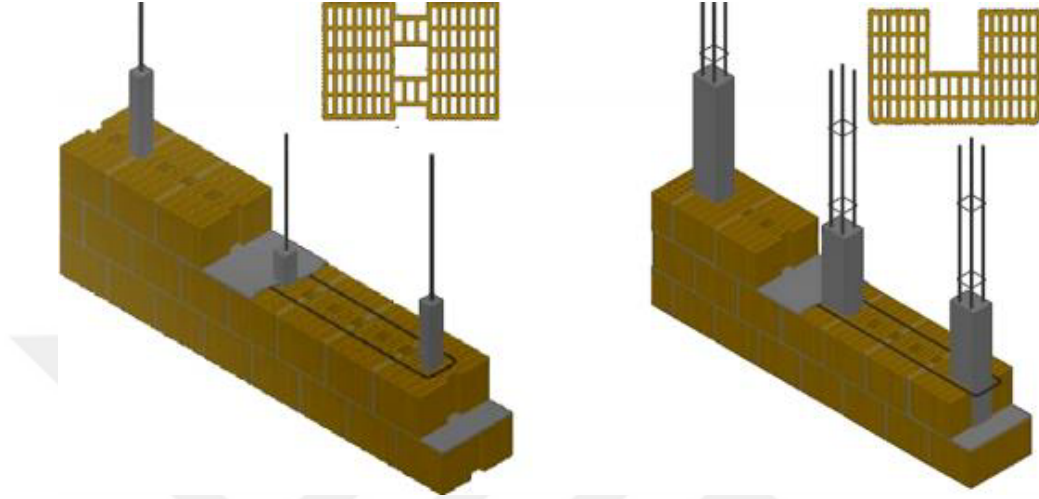
Rivera ve diğ. [66] düzlem dışı, monotonik yatay yük etkisi altındaki sarılmış yığma duvarların yapısal davranışlarını deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Bu amaçla 6

adet tam ölçekli duvar inşa edilmiş, bu duvarlardan bazıları üç kenarından diğerleri ise dört bir kenarından çelik profillerle desteklenmiştir. Çalışmaya göre farklı sınır şartlarına sahip yığma duvarlara ait göçme mekanizmaları ile çatlak şekilleri ve dağılımları benzer, ayrıca düzlem dışı nihai yatay yük dayanımları yakın değerlerdedir. Analitik çalışma sonunda elde edilen veriler deneysel verilerle karşılaştırıldığında sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu dolayısı ile geliştirilen analitik modelin düzlem dışı yatay yük dayanımını belirlemede kullanılabileceği belirtilmiştir.

Abou-Zeid ve diğ. [67] yığma duvarların patlama yükleri altındaki davranışını belirlemek ve patlama yüklerine karşı dayanımı artırmak için bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, deney elemanları, biri geleneksel yöntemlerle inşa edilmiş donatısız, diğer beşi ise soğukta işlem görmüş U-profillerle dıştan sarılmış tam ölçekli yığma duvarlardır. Deneylerde 50 kg-250 kg arasında değişen miktarlarda amonyum-nitrat patlayıcı kullanılmış ve 15m patlama mesafesi bırakılmıştır. Deney sonunda, U-profillerle sarılmış yığma duvarların düzlem dışı yükler etkisi altındaki davranışının geleneksel yığma duvarlardan çok daha iyi olduğu, patlama yüklerine karşı davranışı iyileştirmek için önerilen sargılamanın, yığma duvarlarda eğilmeden ziyade kesme kırılmaları meydana getirdiği, sarılmış yığma duvarların herhangi bir hasar gözlemlenmeden 761 kPa darbe yüküne dayanabildiği belirtilmiştir.

Porto ve diğ. [68] ticari kullanıma uygun (fabrika, depo vb.) donatılı uzun yığma yapıların düzlem dışı yükler etkisi altındaki davranışlarını ikinci merteye etkileri altında deneysel olarak ve teorik olarak incelemişlerdir. Çalışmada kil esaslı H ve C şekilli iki farklı tuğla kullanılmıştır (Şekil 1.37). Çalışmanın ilk aşamasında yığmanın mekanik özelliklerini belirlemek için tek eksenli basınç ve 4 nokta eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu tuğlalar kullanılarak 6 m yüksekliğinde 2 farklı donatılı yığma duvar inşa edilmiş ve düzlem dışı çevrimsel yük etkisi altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Yığma duvarların sonlu eleman modelleri makro modelleme yöntemi kullanılmış ve deneysel verilerden elde edilen moment-eğrilik ilişkisi yardımıyla gerçek davranışı yansıtacak şekilde iyileştirilmiştir. Daha sonra farklı duvar narinlik oranları ve donatı oranlarında bu duvarların düzlem dışı davranışları teorik olarak ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, H-tuğlalıya karşılaştırıldığında C-tuğlalı donatılı yığma duvarın yatay yük dayanımının 3 kat daha fazla, maksimum yükteki yerdeğiştirme ile maksimum yerdeğiştirme değerlerinin ise 2 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir. Yüksek yerdeğiştirme kapasitesine rağmen C-tuğlalı yığma duvarın ikinci merteye etkilerine karşı daha yüksek bir güvenlik

düzeyi sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca H-tuğlalı yığma duvarda ikinci mertebe momentlerin baskın olduğu göçme şekillerinden kaçınmak için düşey donatı oranının %0.08 olarak alınmasının uygun olacağı önerilmiştir.



Şekil 1.37. Porto ve diğ.'nin çalışmasındaki tuğlalar ve deney elemanları [68]

Porto ve diğ. [69] daha önceki çalışmalarında [68] kullandıkları birim elemanlarla inşa ettikleri yenilikçi donatılı yığma duvarların çevrimsel yatay yükler etkisi altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada, duvarlar üzerindeki aksel basınç kuvvetinin duvarların kesme dayanımını artırdığı, duvar üzerindeki çatlakları gevrek kesme çatlaklarından daha sünek kesme/eğilme çatlaklarına çevirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca duvar yükseklik/genişlik oranı arttıkça sistemin daha sünek hale geldiği fakat yükseklik/genişlik oranı küçük olan elemanların daha yüksek enerji tüketme kapasitesine ve sönüm oranına sahip olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada donatı kullanımının sistemin sünekliğini artırdığını fakat yüksek oranlarda kullanılan donatının ise sistemi gevrek bir şekilde kırılmaya zorladığı vurgulanmıştır. Yatay donatı olarak kullanılan geleneksel donatı ve kafes şeklindeki donatıların sistemin global davranışı üzerindeki etkisinin benzer olduğu fakat aynı yerdeğiştirme değerlerinde kafes tipteki donatıya sahip duvarların daha az enerji tükettiği belirtilmiştir.

Movila ve diğ. [31] yığma duvarların düzlem içi monotonik yatay yükler etkisi altındaki davranışlarını teorik olarak belirlemek için basitleştirilmiş mikro modelleme yaklaşımı önermişlerdir. Teorik analizlerde duvarların tuğla ve arayüzlerden oluştuğu kabul edilerek ATENA-2D yazılımında iki boyutlu olarak modellenmiştir. Tuğlaların

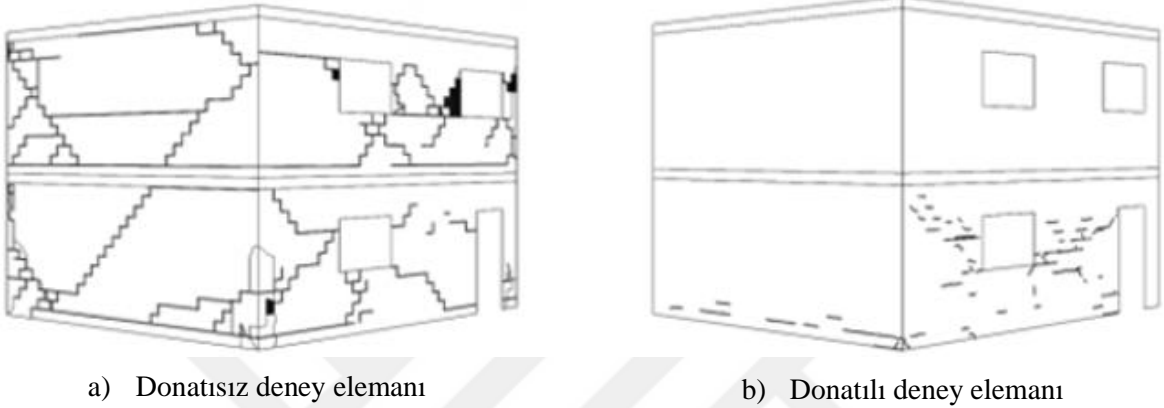


davranışlarının tanımlanmasında, yazılım içinde beton gibi gevrek malzemeler için tanımlanmış olan 3D Nonlinear Cementitious-2 malzeme modeli kullanılmıştır. Tuğlalar arasından geçtiği kabul edilen ara yüzeylerin tanımlanmasında ise ara yüzeylerde yalnızca kaymaların ve çekme çatlaklarının meydana geleceği kabulüyle Mohr-Coulomb kırılma kriteri rijitlik katsayıları ile birlikte kullanılmıştır. Çalışmada arayüzey rijitliklerinin hesabında harcın mekanik özellikleri ile tuğlanın mekanik özelliklerinin ayrı ayrı dikkate alındığı iki farklı hesap yöntemi sunulmuştur. Malzeme özelliklerinin literatürde daha önce yapılmış olan bir çalışmadan alındığı bu çalışmada, teorik analizler sonucu elde edilen veriler söz konusu çalışmadaki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır ve yaklaşımın doğruluğu denetlenmiştir.

Tarque ve diğ. [70] kerpiç duvarların düzlem içi davranışlarını belirlemeye yönelik teorik analizler gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında daha önce Blondet ve diğ. [13] çalışmasındaki malzeme özelliklerini kullanmışlar ve sonuçlarını bu çalışmadaki deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. 2-boyutlu ve makro modellenen duvarların analizinde, çatlakların bölgesel olduğu varsayımını dikkate alan malzeme modelleri seçilmiştir. ABAQUS yazılımında Concrete Damage Plasticity (CDP) malzeme modeli ve Midas yazılımında ise Total Strain malzeme modeli kullanılmıştır. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde iki modelleme yaklaşımının birbirine çok yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlarla uyum yakalandığı belirtilerek bu modelleme yaklaşımlarının kerpiç duvarlarda uygulanabilir olduğunu savunulmuştur. Çalışma sonunda, özellikle de maksimum yüke ulaşıldıktan sonra, duvarların global davranışını, basınç dayanımının çok etkilemediği, buna karşın çekme dayanımının davranışta temel rol oynadığı vurgulanmıştır.

Avila ve diğ.'nin [71] çalışmalarında, orta ölçekli konut tipi yığma yapıların, deprem etkisi altındaki davranışlarını belirleyerek bu yapıların tasarım ve inşaa aşamalarına katkı sağlayacak bilgileri elde etmeyi amaçlanmıştır. Bu amaçla 1/2 ölçeğinde küçültülmüş 2 katlı iki yığma yapı ele alınmıştır. Bu yapılardan biri Eurocode-8'de belirtilen minimum donatı oranları dikkate alınıp, kafes tip yatay ve düşey donatı ile desteklenerek inşa edilmiştir. Diğeri ise geleneksel yığma yapı sistemi dikkate alınarak donatısız inşa edilmiştir. Her iki yapıya kuzey-güney ve doğu-batı yönlerinde farklı deprem kayıtları ile sarsma tablası deneyi uygulanmıştır. Çalışmada katlar arası ötelenmeler, düzlem dışı duvar deplasmanları ve yapılarda meydana gelen hasarlar incelenmiştir. Deneylerde, geleneksel tipte donatısız inşa edilen yığma yapının öngörülen deprem yükü altında oldukça fazla plastik deformasyon

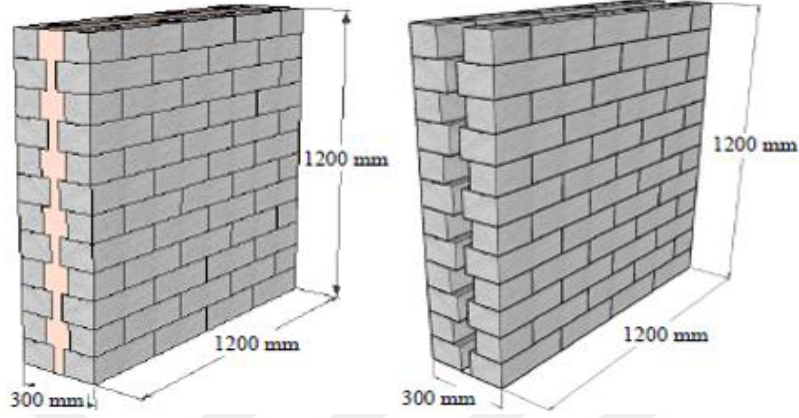
yaptığı, birleşim bölgelerinin hasara uğradığı fakat yapının göçmediği, donatılı yığma yapıda ise birinci katta gözlenen ve kayda değer görülmeyen küçük çatlakların meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 1.38). Çalışmada, ele alınan geleneksel donatısız yığma yapının deprem etkisi altında gösterdiği sünek davranıştan dolayı bu tip yapıların deprem bölgelerinde kullanılabilmesi sonucu çıkmıştır.



Şekil 1.38. Avila ve diğ.'nin çalışmasındaki deney elemanlarında oluşan hasarlar [71]

Demir'in [72] çalışmasında, Şekil 1.39'da görülen çift cidarlı taş yığma duvarların düzlem içi çevrimsel yatay yük etkisi altındaki davranışları, deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Çalışmada, 1/3 ölçekli sekiz adet duvar numunesi üretilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numunelerde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çok sayıda malzeme deneyi yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise duvar numunelerinin sonlu eleman modelleri mikro modelleme yöntemi kullanılarak oluşturulmuş ve davranışları teorik olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonunda, incelenen taş duvarların göçme modları, yatay yük taşıma kapasiteleri, süneklik ve enerji yutma kapasiteleri ile ilgili bilgiler elde edilmiştir. Deneylerde duvarların düzlem içi yük etkisi altındaki davranışlarında temel olarak kesme etkilerinin hâkim olduğu ancak duvarlar üzerine uygulanan aksenal basınç kuvvetlerine bağlı olarak eğilme etkilerinin de kısmen ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca duvar üzerine uygulanan aksenal basınç kuvvetlerinin artması ile duvarın başlangıç rijitliğinin arttığı ve duvarlarda zıvana yerine kenet kullanımının rijitlikte önemli miktarda artışa sebep olmadığı belirlenmiştir. Deney elemanlarının ihmal edilemeyecek düzeyde deformasyon yapma yeteneğine sahip olduğu ve yerdeğiştirme sünekliği değerlerinin 5.2-10.7 arasında değiştiği görülmüştür. Ayrıca duvarların doğrusal elastik sınırın ötesine geçtiği ve her bir çevrimde önemli miktarda kalıcı

deformasyona uğradıkları gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen, hasar gelişimi, göçme modları, yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin deneysel verilerle uyumlu olduğu belirtilmiştir.



Şekil 1.39. Demir'in çalışmasındaki taş duvar deney elemanları [72]

Banting ve El-Dakhkhni'in [73] çalışmasında, Kuzey Amerika yığma yapı yönetmeliğine (Masonry Standards Joint Committee and Canadian Standards Associations S304.1) uygun inşa edilen donatılı yığma yapıların davranışlarının belirlenmesi ve yeni yığma yapım tekniklerinin önerilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, donatılı yığma yapıların plastik mafsallık bölgelerinde sınırlayıcı elemanlar kullanılarak, düzlem içi çevrimsel tersinir yatay yük etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Deneysel olarak aynı boyutlarda, farklı aksel düşey yük uygulanmış olan, 4 adet duvar elemanı kullanılmıştır. Deney eleman boyutları, sistemde kesme çatlaklarından ziyade eğilme çatlaklarının oluşacağı varsayımı ile 1.8x4m olarak belirlenmiştir. Çalışmada deney elemanlarının davranışları, kat ötelenme oranları, maksimum yatay yük taşıma kapasitesi, düşey donatı akma yükü ve hasar durumları gibi parametreler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Çalışmada incelenen duvar elemanların sünekliklerinin 6.6-15.2, kat ötelenme oranlarının %1.8-3.7 ve viskoz sönüm değerlerinin ise %17.4-22.5 arasında değiştiği belirlenmiştir. Çalışma sonunda plastik mafsallık bölgelerinde sınırlayıcı eleman kullanımının, donatılı yığma duvarların çevrimsel yatay yük etkisi altındaki davranışlarını iyileştirdiği belirtilmiştir.

Medeiros ve diğ.'nin [74], sarılmış ve sarılmamış yığma duvarların düzlem içi yükler etkisi altındaki performansını inceledikleri çalışmada, basınç dayanımı 5.7 MPa olan hafif beton bloklar kullanılmıştır. Deneysel olarak üçü sarılmış olmak üzere toplam altı adet duvar deney elemanı dolgulu/dolgunsuz, düşey derzlerin harçlı/harçsız, yatay derzlerin

donatılı/donatsız olması durumları için test edilmiştir. Çalışmanın teorik bölümünde, deney elemanlarının sonlu eleman modelleri makro modelleme yöntemi ile oluşturulmuştur. Yığma birim ve dolgu betonunu temsil etmek için İzotropik Smeared (Isotropic Smeared Crack Model) Çatlak malzeme modeli kullanılmıştır. Çalışma sonunda, sarılmamış yığma duvarlarda meydana gelen çatlakların, maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra gözle görünür hale geldiği, dolgulu sarılmamış yığma duvarların, dolgunsuz duvarlara göre daha gevrek davranış gösterdiği, yatay derzlerde ve hatılarda kullanılan donatıların sistemi daha sünek hale getirdiği belirtilmiştir.

Dündar [75], farklı duvar ve harç malzemesi ile üretilen duvarların kayma davranışlarını incelediği çalışmada aynı boyutlarda 18 adet duvar numunesi üzerinde diyagonal basınç deneyi gerçekleştirmiştir. Deney numunelerinin boyutları laboratuvar şartlarına uygun olarak 900x900 mm olarak seçilmiştir. Duvarlarda, bağlayıcı olarak takviyeli ve polipropilen lifli harç, yığma birim olarak ise harman tuğlası, yığma tuğla ve bimsbloklar kullanılmıştır. Çalışmada, deney elemanlarına ait yük-yerdeğiştirme grafikleri, göçme şekilleri, kayma dayanımı, rijitlik modülü, enerji tüketme kapasiteleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonunda, lifli harç kullanılan deney elemanlarının kayma dayanımının, takviyeli harç ile üretilenlerden daha fazla olduğu, bimsblok ile örülen deney elemanlarının daha gevrek kırıldığı vurgulanmıştır. Ayrıca harç ile yığma tuğla arasındaki aderansın fazla olması ve tuğlada bulunan deliklere harcın girip kilit davranışı oluşturması nedeniyle, bu deney elemanına ait kayma dayanımının diğerlerine göre daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Zamani Ahari'nin çalışmasında [34] çimento esaslı kompozitler (ECC) kullanılarak güçlendirilen yığma deney elemanları üzerinde aksel basınç ile direk kayma ve aramid lif takviyeli polimer (AFRP) ile güçlendirilen deney numuneleri üzerinde ise diyagonal çekme deneylerini gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca deney elemanlarının sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve bu modeller deneysel veriler kullanılarak iyileştirilmiştir. Sonlu eleman modellerinde basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminin kullanıldığı çalışmada, yığma tuğlaların lineer elastik, çimento esaslı kompozitlerin (ECC) ve aramid lif takviyeli polimer (AFRP) elasto plastik davrandığı kabul edilmiştir. Yığma birim olarak kullanılan tuğlalar arasındaki arayüzey davranışlarının temsil edilmesi için teğetsel (tangential), normal ve kohezif (cohesive) davranış ile hasar (damage) kontak özellikleri kullanılmıştır.

Moroz ve diğ. [76] gelişmekte olan ülkelerin kırsal bölgelerinde sıklıkla inşa edilen donatsız yığma yapıların deprem davranışlarını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada,

geleneksel çelik donatının yığma yapılarda kullanımının bu yapıların yatay yük taşıma kapasitelerini artırdığı fakat gelişmekte olan pek çok ülkedeki çeliğin maliyeti düşünüldüğünde ekonomik olmayan bir çözüm olacağı vurgulanmışlardır. Bu nedenle çalışmada, geleneksel çelik yerine, çekme dayanımı 180-440 MPa, basınç dayanımı ise 38-65 MPa arasında değişen Tankin bambu kamışları ile farklı şekillerde donatılan 6 adet yığma duvar düzlem içi yatay yükler etkisi altında test edilmiştir. Deneylerde, donatısız yığma duvarlarla karşılaştırıldığında donatı olarak kullanılan bambunun, duvarın kesme kuvvetlerine karşı dayanımı ve sünekliği artırdığı ayrıca geleneksel donatılı yığma duvarlar ile bambu donatılı duvarların oldukça benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Çalışma sonunda, bambunun geleneksel donatı kullanımına alternatif olarak, düşük maliyetli yığma yapılarda güvenle kullanılabilceği vurgulanmıştır.

Paparo ve Beyer'in çalışmasında [77] Orta Avrupa'da konut tipi yapıların inşasında kullanılan donatısız yığma duvar-betonarme perde kompozit sistemlerin deprem davranışları belirlemek için 2 katlı bir kompozit duvar sistemi sabit düşey yük ve çevrimsel yatay yük etkisi altında test edilmiştir. Çalışmada, farklı kat ötelenme oranlarında, duvarlarda oluşan hasarlar incelenmiştir. Kompozit sistemin nihai kat ötelenme oranının, yatay ve düşey yükler etkisi altında kırılan donatısız yığma duvar tarafından kontrol edildiği, fakat perde duvarda herhangi bir çatlak oluşmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yalnızca donatısız yığma duvarlardan oluşan sistemlerin aksine, yığma duvar-betonarme perde kompozit sistemdeki çatlakların duvarın ilk katında değil yükseklik boyunca homojen dağıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca eksenel yük düzeyindeki artışın donatısız yığma duvarın şekil değiştirme kapasitesini azalttığı bu nedenle nihai kat ötelenme oranı açısından, en kritik yüklemenin eksenel basınç yükü olduğu vurgulanmıştır.

Pardoon ve Rahgozar [78] FRP'ler ve püskürtme betonla güçlendirilmiş kerpiç duvarların, Mohammadpanah ve diğ. [79] ise FRP'lerin yatay, düşey ve diyagonal olarak kullanıldığı boşluklu ve boşluksuz yığma duvarların düzlem içi monotonik yük etkisi altındaki davranışlarını elde ettikleri teorik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Her iki çalışmada da yığma birimlerin elastik, ara yüzeylerin ise elastik ötesi davranış gösterdiği kabul edilmiştir.

Cao ve diğ.'nin çalışmasında [80], geri dönüşüm agregası kullanarak üretilen yığma birimlerin deprem riski altındaki kırsal bölgelerde inşa edilecek düşük katlı yapılarda kullanımının uygun olup olmadığını belirlemek için teorik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ilk olarak, farklı harç sınıfları için eksenel basınç deneyleri

gerçekleştirilmiş ve bu deneyler sonunda harç basınç dayanımındaki artışın, deney elemanlarının basınç dayanımına etkisinin az olduğu belirlenmiştir. Daha sonra söz konusu yığma birimler kullanılarak üretilen ve hatıl bulundurmeyen sekiz adet duvar, farklı genişlik/yükseklik oranlarına ve donatılı/donatısız olma durumlarına göre sınıflandırılarak düzlem içi çevrimsel yatay yük etkisi altında test edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonunda, düşey boşluklarına donatı yerleştirilmesiyle duvarlarda oluşturulan gizli hatılların, duvarın yatay yük dayanımını artırdığı, duvarda oluşan çatlakları daha dengeli dağıttığı ve duvarları daha sünek hale getirdiği belirlenmiştir. Çalışmanın teorik bölümünde, yığma duvarların sonlu eleman modelleri makro modelleme yöntemiyle oluşturulmuş olup Concrete Damage Plasticity (CDP) malzeme modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak, geri dönüşüm agregasından üretilen yığma birimlerin, düşük maliyetli, kolay üretilebilir ve deprem performanslarının yeterli olduğu belirtilerek deprem riski altındaki kırsal bölgelerde inşa edilecek olan düşük katlı yapılarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Al-Shaikh ve Falah tarafında yürütülen çalışmada [81], betonarme çerçeve ile sarılmış olan yığma duvarların düzlem içi yatay yük etkisi altındaki davranışının teorik olarak elde edilebilmesi için bir sonlu eleman modelleme yaklaşımı önerilmiştir. Donatının lineer elastik davrandığı kabul edilen çalışmada, beton ve yığma birimlerin lineer olmayan davranışı Concrete Damage Plasticity (CDP) malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminin kullanıldığı çalışmada arayüzeyler kontak özellikleri ile tanımlanmıştır. Çalışma sonunda elde edilen teorik sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmış ve modelleme yaklaşımının kullanılabilir olduğu vurgulanmıştır.

Sarhosis ve diğ.'nin çalışmasında [32] ayrıık elemanlar yöntemi kullanılarak, sarılmış yığma duvarların monotonik yatay yük etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Çalışmada harç, sıfır kalınlıklı kohezif arayüzey olarak tanımlanmıştır. Önerilen teorik model literatürdeki deneysel çalışma verileri ile doğrulandıktan sonra ayrıca duvarlar üzerinde bulunan boşlukların adet ve konumlarının duvarın yatay yük taşıma kapasitesine, göçme mekanizmasına ve rijitliğine etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonunda duvarlarda birden fazla boşluk bırakılmasının ve özellikle yükleme noktasına yakın boşlukların duvarın dayanımını ve rijitliğini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca yatay yükün, tepe noktasından tekil yük olarak uygulanma şeklinin, hatıl yüksekliği boyunca uniform yayılı yük olarak değiştirilmesi halinde duvarın rijitliğinin ve dayanımının azaldığı vurgulanmıştır.

Bolhassani ve diğ. [82] boşluklu beton briketlerle oluşturulan yığma numunelerin basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi ile modellenmesini temel alan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada bir briket modeli, boşluklu ve dolgulu olarak iki ayrı şekilde ele alınmıştır. Boşluklu ve dolgulu yığma elemanlar üzerinde direk kayma, diyagonal çekme ve aksenal basınç deneylerini ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve elde edilen deneysel veriler kullanılarak sonlu eleman modelleri iyileştirilmiştir. Yığma birimlerin davranışı Concrete Damage Plasticity (CDP) malzeme modeli ile arayüzeyler ise kontak özellikleri ile temsil edilmiştir. Teorik analizlerde, boşluklu yığma birimlerin boşlukları ihmal edilerek geometri malzeme deneylerinden elde edilen sonuçları kapsayacak şekilde iyileştirilmiştir. Dolgulu yığma elemanların modellenmesinde ise geometri değiştirilmeden, yığma birim ve dolgu betonun özellikleri birleştirilerek tek malzeme olarak kabul edilmiştir. Bolhassani ve diğ.'nin bir diğer çalışmasında [83] ise söz konusu boşluklu beton briketlerle oluşturulan parçalı dolgulu yığma duvarların düzlem içi çevrimsel yatay yük etkisi altındaki davranışları deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Çalışmada aynı miktarda donatılı farklı parçalı dolgu şekline sahip, yükseklik/genişlik oranı 1 olan, 3 adet yığma duvar incelenmiştir. Deney elemanlarının davranışlarının karşılaştırılmasında, kat ötelenme oranları, yerdeğiştirme süneklikleri, maksimum yatay yük dayanımları, enerji tüketme kapasiteleri ve duvarlarda oluşan çatlak şekilleri gibi parametreler kullanılmıştır. Çalışmadaki yığma duvarların modellenmesinde önceki çalışmadaki malzeme özellikleri ile modelleme yaklaşımı kullanılmış ve teorik sonuçlarla deneysel sonuçların uyumluluğu denetlenmiştir.

Mohamad ve Chen [84], Bolhassani ve diğ.'nin [82] çalışmasına benzer bir çalışma yürütmüşlerdir. Kendiliğinden ısı yalıtım özelliğine sahip yeni nesil beton briketlerin kullanıldığı çalışmada, dolgulu halde yığma eleman malzeme deneyleri (aksenal basınç ve direk kayma) ve deneylere ait sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir.

Ramirez ve diğ.'nin çalışmasında [85], yükseklik/genişlik oranı, kesme donatısı miktarı ve sabit aksenal basınç kuvvetinin, düzlem içi çevrimsel yük etkisi altındaki parçalı dolgulu-donatılı duvarların kesme dayanımına, rijitliğine, yerdeğiştirme sünekliğine, enerji tüketme kapasitesine ve kat ötelenme oranına etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonunda duvar rijitliklerini etkileyen temel parametrenin genişlik/yüksekli oranı olduğu, yatay donatıların duvar kesme dayanımını artırdığı fakat en dikkat çekici artışın genişlik/yükseklik oranı fazla olan duvarlarda meydana geldiği ayrıca uygulanan aksenal basınç kuvvetindeki artışın da duvar kesme dayanımını artırdığı belirtilmiştir. Deney elemanlarındaki hasarların maksimum yüke kadar benzer şekilde ilerlediği ve söz konusu parametrelerin duvar

sünekliliklerinde dikkate değer değişiklikler yaratmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, duvarların enerji tüketme kapasitelerini etkileyen parametrenin genişlik/yükseklik oranı olduğu ve aynı yerdeğiştirme değerinde kısa duvarların daha fazla enerji tükettiği belirlenmiştir. Benzer şekilde derzlerdeki yatay donatı oranı arttıkça duvarın enerji tüketme kapasitesinin arttığı belirtilmiştir. Son olarak genişlik/yükseklik oranındaki artışın, kat ötelenme oranını artırdığı belirlenmiştir.

Chen ve Liu [86], çelik çerçeve ile sınırlandırılmış beton yığma duvarlara uygulanan düşey yük seviyesi ve uygulanma şeklinin, duvarı genişlik/yükseklik oranının, çerçeve rijitliğinin ve yığma birimlerin basınç dayanımının, duvarların düzlem içi davranışına etkisini araştırdıkları bir teorik çalışma gerçekleştirmiştir. Çelik kolonların aksel yük taşıma kapasitelerinin %10-50'si arasında değişen değerlerdeki düşey yük, duvar üzerine üç farklı şekilde uygulanmıştır. Bunlar, duvar üzerindeki çelik yükleme kirişi üzerine uniform yayılı yük, duvar etrafındaki çelik kolonlara tekil yük ve yükün yarısının yükleme kirişine uniform ve diğer yarısının ise kolonlar üzerine tekil yük olarak uygulandığı yükleme şekilleridir. Çalışmada, duvarların sonlu eleman modelleri ANSYS yazılımında, 2-boyutlu basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Teorik analiz sonuçlarından, aksel basınç yükünün çelik çerçeve uniform yayılı yük olarak uygulanması halinde duvarın rijitliğinin ve yatay yük taşıma kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca düşey yükün kolonlar üzerine tekil yük olarak uygulanması halinde en düşük yatay yük taşıma kapasitesinin elde edildiği vurgulanmıştır. Çalışma sonunda teorik analizlerden elde edilen veriler üzerinde regresyon analizleri gerçekleştirilerek, sabit aksel basınç yükü altında ve çelik çerçevelerle desteklenmiş beton yığma duvarların yatay yük dayanımının ve rijitliklerinin belirlenebileceği bir takım basit formülasyonlar önerilmiştir.

Okail ve diğ.'nin çalışmasında [87], aynı boyutlara sahip kil ve beton esaslı iki farklı briketin kullanıldığı sarılmış yığma duvarların, düzlem içi monotonik artan yük etkisi altındaki davranışları, duvar yükseklik/genişlik oranı, düşey hatlılardaki donatı oranı, duvarların boşluklu/boşluksuz olması ile boşlukların boyutları gibi parametrelerdeki değişimler dikkate alınarak incelenmiştir. Çalışmanın deneysel aşamasında yükseklik/genişlik oranı 1 olan 6 adet boşluklu/boşluksuz yığma duvar test edilmiştir. Teorik aşamada ise deneysel veriler kullanılarak duvar sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Makro modellemenin kullanıldığı çalışmada, yığma birimler Mohr-Coulomb malzeme modeli ile, yığma birimler ve hatlı arasındaki arayüzeyler ise kontak özellikleri ile temsil edilmiştir. Çalışmanın son bölümünde doğrulanan sonlu eleman modelleri ile farklı



kapı/pencere boşlukları ile donatı oranına sahip 12 adet yığma duvar teorik olarak incelenmiştir. Elde edilen verilerden, duvar yatay yük dayanımının, duvardaki boşluk oranı arttıkça azaldığı, boşluklu duvarlardaki düşey hatıl donatı oranı arttıkça ise arttığı belirlenmiştir. Ayrıca beton briketlerle inşa edilen duvarların yatay yük taşıma kapasitelerinin daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Arslan ve diğ. [35] sıkıştırılmış toprağın en eski yığma yapım tekniklerinden biri olduğunu ve günümüzde, sürdürülebilirlik, çevre dostu, yenilenebilirlik, ısı yalıtım özelliklerinden dolayı bilimsel çalışmalarda sıklıkla karşımıza çıktığını vurguladıkları çalışmalarında bu yığma yapım tekniğiyle oluşturulan yığma duvarların yapısal performanslarını incelemiştir. Çalışmada dördü sıkıştırılmış toprakla, biri geleneksel yığma tuğla ile ve diğeri ise gaz betonla oluşturulan toplam 6 duvar düzlem içi çevrimsel yatay yük etkisi altında test edilmiştir. Sıkıştırılmış toprakla oluşturulan duvarlar farklı oranlarda çimento, fiberglas ve yüksek fırın cürufu ile stabilize edilmiştir. Çalışmada duvarların yapısal performanslarının değerlendirilmesi, başlangıç rijitliği, enerji tüketme kapasiteleri, yatay yük dayanımları gibi yapısal parametreler dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışma sonunda, ağırlıkça %10 çimento oranına sahip sıkıştırılmış topraklı yığma duvarların yapısal performansının diğerlerine oranla çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Aynı oranda çimentonun kullanıldığı duvarlar karşılaştırıldığında fiberglas katkısının duvar dayanımını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca günümüzde sıklıkla kullanılan düşey delikli yığma tuğla ile üretilen duvarın yapısal performansının gaz betonlu duvarın oldukça gerisinde kaldığı belirlenmiştir.

### **1.8. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı**

Teknik literatürde başlık 1.7’de özetlenen, çoğunluğu yığma yapıların düzlem içi davranışlarının belirlenip, bu davranışın iyileştirilmesi amacıyla yapılan pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda çoğunlukla düzlem içi davranışın iyileştirilmesi, takviye elemanlar (yatay-düşey donatı kullanımı, flanş eklentileri, püskürtme beton ve FRP uygulamaları vb.) yardımıyla gerçekleştirilmeye çalışılmış ancak, yığma birim eleman geometrisinin düzlem içi davranışı nasıl ve ne derece etkilediği konusunda yeterli çalışma yapılmamıştır. Bununla birlikte bu çalışmalarda, yığma duvarlarda donatı kullanımının yığma duvar düzlem içi davranışını iyileştirdiği görülmüş fakat yatay-düşey donatının birlikte kullanılabilirdiği ve yatay-düşey derzlerde süreksizlik sağlayan kilitlere sahip yığma

birim elemanlara rastlanmamıştır. Ayrıca, köpük beton gibi hafif beton kullanılarak taşıyıcı yığma birim eleman üretimi ve bu elemanlarla üretilen duvarların dış yük etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesi ile ilgili çalışmalara da teknik literatürde rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın temel amacı; kilitli yığma birim elemanlar kullanılarak, yığma duvarların düzlem içi yatay yük taşıma kapasitelerinin artırılması ile deprem etkileri altındaki davranışının iyileştirilmesi ve yapıların toptan göçmesi önlenerek can ve mal kayıplarını en aza indirgenmesidir. Ayrıca bu çalışma ile kilitli birim eleman geometrisinin yığma duvarların düzlem içi yatay yük taşıma kapasitesine katkısı incelenmiş olacaktır. Bununla birlikte, dolgusuz, dolgulu ve donatılı duvarların harçlı ya da harçsız olarak üretilebilir hale gelmesini sağlayan, duvar içinden donatı geçirilmesi ve betonlama aşamasında herhangi bir kalıp kullanılmaması ile yığma yapı inşa maliyetini azaltmayı amaçlayan, kırsal dönüşümde depreme dayanıklı çok katlı yığma yapıların inşa edilmesine imkan verebilecek, hafif, bir yığma birim eleman tasarımı gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, literatürdeki söz konusu eksiklikler de dikkate alınarak, köpük beton ile, geometrik olarak yatay ve düşey donatıların birlikte kullanılabilmesine imkân veren, yatay ve düşeyde kilitlere sahip yığma birim elemanlar üretilmiştir. Söz konusu birim elemanlardaki kilitlerle yığma duvarların düzlem içi kayması önlenmeye çalışılmıştır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Kilitli yığma birim elemanlar kullanılarak, yığma duvarların yatay yük taşıma kapasitelerinin artırılması amacıyla gerçekleştirilen çalışmanın bu bölümü deneysel ve analitik çalışmalar olarak ikiye ayrılmaktadır. Deneysel Çalışmalar bölümünde; deneylerde kullanılan malzemelerin özellikleri, hafif beton üretimleri, kilitli yığma birim eleman tasarım ve üretimi, deney duvarlarının üretimi, deney duvarlarında kullanılan beton ve harç özellikleri, yığma birimler üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile yığma duvarlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler verilmektedir. Analitik Çalışmalar bölümünde ise; sonlu eleman modellerinde kullanılan malzeme özellikleri ile duvar deney elemanlarına ait sonlu eleman modelleri hakkında bilgiler verilmektedir.

### 2.1. Deneysel Çalışmalar

#### 2.1.1. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

##### 2.1.1.1. Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

###### a) Agregası

Hafif beton üretiminde, agrega olarak geleneksel agrega, ham ve genişletilmiş perlit ile pomza kullanılmıştır.

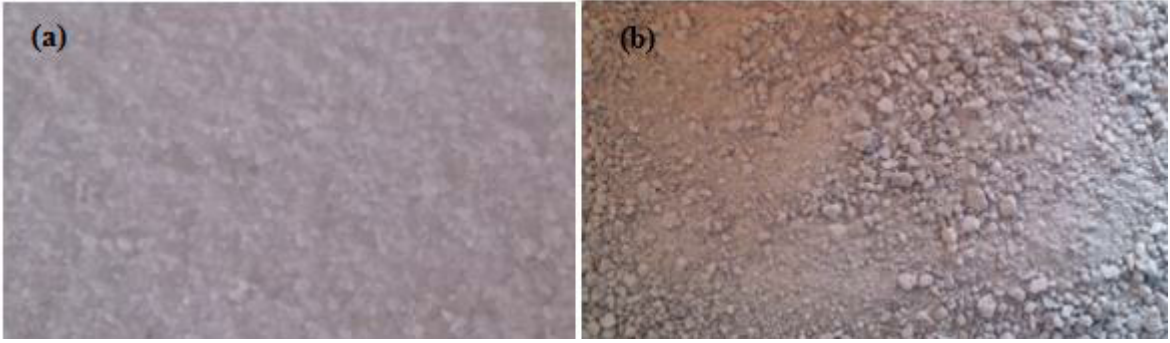
Beton bileşimlerinde geleneksel agrega olarak 1-2 mm, 2-4 mm ve 4-8 mm tane çaplarındaki agregalar farklı granülometrik bileşimlerde kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan geleneksel agreganın doygun kuru yüzey (DKY) özgül kütlesi  $2.70 \text{ gr/cm}^3$ 'tür.

Hafif beton üretimlerinde kullanılan bir diğer agrega, doğal hafif agrega sınıfına giren pomzalıdır. Pomza, gözenekli yapıda açık renkli sünger taşı sınıfına giren volkanik bir kayadır (Şekil 2.1). Kullanılan pomzanın DKY özgül kütlesi  $1.38 \text{ gr/cm}^3$ 'tür.



Şekil 2.1. Hafif beton üretimlerinde kullanılan agregalar, (a) geleneksel agregata, (b) pomza

Hafif beton üretimlerinde, 0.3-0.6 mm tane çapına sahip genişletilmiş perlit agregası kullanılmıştır. Bununla birlikte bazı hafif beton karışımlarında belli oranlarda ham perlit de kullanılmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Hafif beton üretimlerinde kullanılan agregalar, (a) genişletilmiş perlit, (b) ham perlit

#### b) Çimento

Taşıyıcı hafif beton deneme üretimlerinde ve birim eleman üretimlerinde CEM-I 42.5R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait fabrikasından alınan bazı özellikler Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1. Beton üretiminde kullanılan çimentonun fabrikasından alınan bazı özellikleri

CEM I 42.5R		
Fiziksel özellikler		
Özgül kütle (gr/cm <sup>3</sup> )		3.15
Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)		3675
200 mikron elek üstü kalan (%)		0.00
90 mikron elek üstü kalan (%)		1.05
Priz süresi (saat) (Vicac indisi)	Başlangıç	02:25
	Bitiş	04:15
Toplam hacim genişlemesi (mm)		0.90
Mekanik özellikler		
7 gün	Eğilme dayanımı (MPa)	6.90
	Basınç dayanımı (MPa)	45.80
28 gün	Eğilme dayanımı (MPa)	8.70
	Basınç dayanımı (MPa)	52.50

c) Mineral ve Kimyasal Katkı Maddeleri ile Karışım ve Kür Suyu

Mineral katkı maddesi olarak silis dumanı (mikro silis) ve uçucu kül kullanılmıştır.

Silis dumanı betona uygun oranda katıldığında dayanımı artırmaktadır. Üretimlerde çimento ağırlığının %10-15'i aralığında değişen oranlarda silis dumanı kullanılmıştır.

Kullanılan uçucu külün köpük betonlarda da işlenebilirliği artırdığı fakat priz süresini geciktirdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle bazı deneme üretimlerinde uçucu kül kullanılmamıştır. Ayrıca üretimde kullanılan köpükte tepkimeye girerek köpüğün sönmesine neden olduğu gözlemlenmiştir.

Hafif betonların üretiminde ve küründe içmeye elverişli laboratuvar şebeke suyu kullanılmıştır.

d) Diğer Malzemeler

Yığma birim elemanların üretiminde kullanılan hafif beton, hücreli hafif beton olarak da bilinen köpük betondur. Köpük beton üretiminde, sentetik ve reçine esaslı sıvı köpük

ajanları kullanılmıştır. Üretimlerde ilk olarak sentetik bazlı köpük ajanı kullanılmıştır. Fakat karşılaşılan köpük kıvamı ve hidratasyon problemlerinden dolayı organik reçine esaslı sıvı köpük ajanı ile deneme üretimlerine devam edilmiştir. Birim eleman üretimlerinde de organik reçine esaslı köpük ajanı kullanılmıştır.

Bazı deneme üretimlerinde kimyasal katkı maddesi olarak ASTM C-494 C tipi priz hızlandırıcı kullanılmıştır. Ayrıca betonun çekme dayanımını artırarak rötre çatlaklarına engel olan, aşınma ve darbe dayanımı gibi özelliklerini iyileştiren 20mm'lik polipropilen lifler (elyaf) kullanılmıştır.

### 2.1.1.2. Normal Beton Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

#### a) Agregası

Normal beton üretimlerinde, DKY özgül kütlesi  $2.70 \text{ gr/cm}^3$  ve maksimum tane çapı 12mm olan geleneksel kalker agregası kullanılmıştır. Bu agregalara ait granülometrik bileşim Tablo 2.2'te verilmektedir.

Tablo 2.2. Agregası granülometrik bileşimi

Granülometrik sınıflar (mm)	Toplam kütle (%)
0-2	25
2-4	17
4-8	30
8-12	28

#### b) Çimento, Karışım ve Kür Suyu ile Katkı Maddeleri

Normal beton üretimlerinde CEM-I 42.5R tipte çimento kullanılmıştır. Karışım ve kür suyu olarak içilebilir özellikteki laboratuvar şebeke suyu kullanılmıştır. Mineral katkıların (uçucu kül, silis dumanı vb.) kullanılmadığı betonlarda, betonun donatı aralarına kolay girmesi ve betonda boşluk kalmaması amacıyla, süper akışkanlaştırıcı (YKS Rheobuild 1000) kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır.

### 2.1.1.3. Harçta Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Yığılma birimlerin örülmesinde kullanılan harçta agrega olarak, DKY özgül kütlesi 2.65 gr/cm<sup>3</sup> olan 0-4 mm aralığında geleneksel kum ve çimento olarak, fabrikasından alınan bazı özellikleri Tablo 2.3'te verilen CEM-II 32.5R tipte portland çimentosu kullanılmıştır.

Tablo 2.3. Harç üretiminde kullanılan çimentonun fabrikasından alınan bazı özellikleri

CEM II 32.5R		
Fiziksel özellikler		
Özgül kütle (gr/cm <sup>3</sup> )		3.05
Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)		3465
200 mikron elek üstü kalan (%)		0.00
90 mikron elek üstü kalan (%)		2.00
Priz süresi (saat) (Vicac indisi)	Başlangıç	02:50
	Bitiş	04:25
Toplam hacim genişlemesi (mm)		0.80
Mekanik özellikler		
7 gün	Eğilme dayanımı (MPa)	3.70
	Basınç dayanımı (MPa)	29.90
28 gün	Eğilme dayanımı (MPa)	6.70
	Basınç dayanımı (MPa)	37.00

### 2.1.1.4. Donatı Özellikleri

Deney elemanlarında donatı olarak nervürlü çelik çubuklar kullanılmıştır. Çelik çubukların çapları etriyelerde 8 mm, boyuna donatılarda ise 12 mm olarak seçilmiştir. Söz konusu donatılar üzerinde 600 kN kapasiteli universal deney aleti ile merkezi çekme deneyi yapılmıştır (Şekil 2.3). Deneylerden elde edilen donatı mekanik özellikleri Tablo 2.4'de verilmektedir.



Şekil 2.3. 600 kN kapasiteli üniversal deney aleti

Tablo 2.4. Deney elemanlarının üretiminde kullanılan donatıların mekanik özellikleri

Donatı	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma birim uzaması (%)	Elastisite modülü (MPa)
Φ8	438	608	25.4	210577
Φ12	479	599	22.5	208261

### 2.1.2. Hafif Beton Deneme Üretimleri ve Özellikleri

Yığma birim elaman üretimlerinde kullanılması planlanan uygun taşıyıcı hafif beton bileşimini bulmak için yapılan deneme beton üretimlerindeki karışım hesaplarında TS 802 [88]'de belirtilen mutlak hacim yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre agrega mutlak hacmi;

$$V_a = 1000 - \left( \frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h \right) \quad (2.1)$$



bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada;  $W_c$ , 1 m<sup>3</sup> betondaki çimento kütleini (kg),  $V_a$ ,  $V_w$ ,  $V_h$  sırasıyla agrega, su ve hapsedilmiş hava hacmini (dm<sup>3</sup>), ve  $\gamma_c$  ise çimentonun DKY birim kütlelerini (kg/dm<sup>3</sup>) göstermektedir. Agrega yığnında i adet farklı agrega sınıfı kullanıldığı düşünöldüğünde, her bir agreganın kütlei farklı olacağından toplam agrega kütlei;

$$\sum \left( \beta_i \frac{W_a}{\gamma_{ai}} \right) = 1000 - \left( \frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h \right) \quad (2.2)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada  $\beta_i$  ve  $\gamma_{ai}$  sırasıyla, kullanılan agrega sınıflarının kütlece oranını ve DKY birim kütleini (kg/dm<sup>3</sup>),  $W_a$  ise toplam agrega kütleini (kg) göstermektedir. Agrega sınıflarının ayrı ayrı kütleleri ise;

$$W_{ai} = \beta_i W_a \quad (2.3)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

Hesaplanan deneme üretimi bileşim oranları Tablo 2.5'te verilmektedir. Her bir deneme betonu için 10 adet 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir.

Tablo 2.5. Deneme beton üretimi bileşimleri (kg/m<sup>3</sup>)

Beton Türü	Çimento	Silis Dumanı	Uçucu Kül	Normal Agregası					Pomza				Genleştirilmiş Perlit	Ham Perlit	Su		Köpük Ajansı	Priz Hızlandırıcı	Polipropilen Lif	S / C	
				<0.25 mm	0.25-1 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm			Köpük Üretiminde	Karışmada					
KB1	500	70	188	0	0	43	0	128	0	0	0	0	0	64	171	380	0	13	0	5	0.76
KB2	400	0	70	0	0	250	188	188	0	34	68	0	48	71	290	0	30	0	3	0.73	
KB3	400	0	70	0	0	250	188	188	0	34	68	0	48	71	220	0	20	0	3	0.55	
KB4	400	0	70	0	0	250	188	188	0	34	68	0	48	71	280	0	20	0	3	0.70	
KB5	400	0	70	0	0	250	188	188	0	34	68	0	48	71	240	0	14	0	3	0.60	
KB6	400	0	70	0	0	250	188	188	0	34	68	0	48	71	240	0	8	0	3	0.60	
KB7	400	0	70	0	0	0	250	312	0	34	92	63	48	71	240	0	8	0	3	0.60	
KB8	400	0	70	0	0	0	250	312	0	34	92	63	48	71	240	0	10	4	3	0.60	
KB9	500	50	0	0	0	0	170	396	0	115	173	0	0	0	125	125	4	0	3	0.50	
KB10	500	50	0	0	0	0	170	396	0	115	173	0	0	0	75	125	2.5	0	3	0.40	
KB11	500	50	0	0	209	89	89	119	67	67	89	0	58	0	125	125	2.5	0	3	0.50	
KB12	500	50	0	0	203	87	87	116	67	67	89	0	58	0	125	125	2.5	0	3	0.50	



Şekil 2.4. Betonların üretiminde kullanılan düşey eksenli betonyer

Deneme betonlarının karılmasında 75 litre kapasiteli düşey eksenli bir betonyer kullanılmıştır (Şekil 2.4). Her bir deneme betonunda karışıma giren agrega, su ve çimento tartılıp hazırlanmıştır (Şekil 2.5). Fakat pomza kullanılan bazı numunelerde, pomzalar bir gün önceden doygun hale getirilmiştir (Şekil 2.6). Beton üretimi için kullanılan betonyer öncesinde nemli hale getirilmiştir. Deneme üretimlerinde önce iri agregalar betonyere atılmış ve 5 dk. kadar karıştırılmıştır. Daha sonra sırasıyla çimento ve diğer bağlayıcılar katılarak bileşimdeki kuru maddeler karıştırılmıştır. Son aşamada beton için gerekli olan su, bazı denemelerde tamamen köpük olarak eklenmiş diğerlerinde ise karışım suyu ile birlikte köpük ayrı ayrı eklenmiştir. Bu şekilde hazırlanan hafif betonlar, 150x150x150 mm'lik kup numunelerin içine yerleştirilmiştir. Her bir üretimde 10 adet küp numune hazırlanmıştır. Deneme köpük betonlarda agreganın dibe çökmesini engellemek için sarsma tablası minimum düzeyde kullanılmıştır.



Şekil 2.5. Önceden tartılıp hazır hale getirilen karışım malzemeleri



Şekil 2.6. Suya doymun hale getirilen pomzular

Deneme üretimlerinde kullanılan köpük, su ve köpük ajanının basınçlı hava ile birleşmesinden oluşan bir malzemedir (Şekil 2.7). Deneyleerde uygun köpük kıvamı için gereken optimum basıncın 4-5 bar civarında olması, optimum köpük ajanı miktarının ise her 30 lt su için 0.6 lt köpük ajanı olması gerektiği gözlemlenmiştir. Bu şartlar sağlandığı durumda elde edilen köpüğün birim hacmi 80-90 gr/lt arasında olmaktadır. Ayrıca sentetik köpük ajanı ile üretilen köpüğün, üretildikten yaklaşık 90 dk. sonra sönmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, daha geç sönen köpük oluşmasına olanak veren organik reçine esaslı bir köpük ajanı ile devam edilmesini zorunlu kılmıştır. KB10 ve sonrası üretimlerde reçine esaslı köpük ajanı kullanılmıştır.



Şekil 2.7. Üretimlerde kullanılan köpük jeneratörü ve çalışma prensibi

Geç priz alma problemi ile karşılaşıldığı için, hazırlanan numuneler için  $23 \pm 2$  °C 'de kür odasında bir gece bekletildikten sonra kalıplarından çıkartılmış ve aynı koşullardaki kür havuzunda deney gününe kadar bekletilmiştir.

Her bir deneme betonu için aşağıda verilen işlemler uygulanmıştır.

KB1 serisi üretimde, beton karma suyunun tamamı köpük üretiminde kullanılmış, beton karışımına sadece köpük olarak ilave edilmiştir. Karma suyunun tamamının köpük üretiminde kullanılması ve karışıma köpük olarak verilmesi betonun karışım ve işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemiştir.

Çimento dozajının 400'e düşürüldüğü KB2 deneme üretiminde önceki karışım oranlarındaki bağlayıcı miktarının fazla, iri malzemenin ise az olması sebebiyle silis dumunu eklenmemiş, uçucu kül ise çimento miktarının yaklaşık %17 si olarak kullanılmıştır. Bu deneme üretiminde pomzular suya doymun hale getirilmiş ve beton karışımında sadece köpük kullanılmıştır. Önceki denemelerde kullanılan köpük yoğunluğunun az olması köpük ajanı miktarının artırılması fikrini ortaya çıkarmıştır. Fakat bu üretimde de köpük hacmi çok fazla olan ve homojen olmayan bir beton ortaya çıkmıştır. Kalıplarına yerleştirildikten yaklaşık 5 saat sonra betonun priz almadan köpüğün sönererek numunelerin sündüğü gözlemlenmiştir.

KB3 numunesinde önceki deneme üretiminde yaşanan problemler referans alınarak su ve köpük ajanı miktarı azaltılmıştır. Pomzular suya doymun hale getirilmiştir. Fakat bu üretimde de istenilen homojenlikte bir karışım elde edilememiştir. Beton kıvamı çok kuru kalmış ve yeterli köpük yoğunluğu elde edilememiştir.

KB4 ve KB5 referans üretiminde bir öncekine kıyasla çok akıcı kıvamda bir beton elde edilmiştir. Geç priz alma problemi bu üretimde de kendini göstermiştir. Ayrıca bu üretimden elde edilen numunelerin, 7 gün sonunda hala yeterli prize ulaşmaması ve numunelerin kalıptan çıkarılma aşamasında sorunlarla karşılaşılması bu numunelerin dayanımlarını belirlemede problemler ortaya çıkarmıştır. Bu referans üretimlerden alınan tek olumlu geri dönüş köpük kalitesinin iyileşmesi olarak görülmüştür.

KB6 ve KB7 deneme betonları arasındaki tek fark kullanılan agrega miktarları ile ilgili olup, köpük üretimi için kullanılan basınç ise 4-5 bar olarak sabitlenmiştir. Nispeten orta kıvamlı (kuruya yakın) bir beton elde edilmiştir.

KB8'de kıvamı artırabileceği düşüncesiyle köpük ajanı miktarı artırılmıştır. Fakat ortaya çıkan beton yine kuru kıvamda olmuştur. Priz hızlandırıcı kullanılan tek numune olan KB8'de de geç priz alma sorunu ile karşılaşmıştır. Bunun sebebinin priz hızlandırıcının köpük ajanı ile uyum sağlayamaması olduğu düşünülmektedir.

8 adet deneme üretimi sonunda elde edilen tüm olumsuzluklar derlendiğinde ortaya çıkan sonuç, köpük kıvamının yeterli olmaması, betonun geç priz alması ve köpüğün sönmesidir. Bu olumsuzluklar düşünüldüğünde kıvam probleminin, betonda kullanılacak suyun bir kısmının köpük, diğer kısmının ise karışım suyu olarak katılması ile çözülebileceği düşünülmüştür. Uygun yoğunluklu köpük kıvamı için, köpük jeneratörünün 4-5 bar aralığında çalıştırılmasının, sentetik bazlı köpük ajanı yerine organik reçine esaslı bir köpük ajanı kullanılmasının ve köpük ajanı miktarının azaltılmasının faydalı olacağı gözlemlenmiştir. KB9 ve sonrası deneme üretimleri bu fikir dahilinde düzenlenmiştir.

KB9 deneme üretiminde, kullanılan köpük ajanı miktarı 30 lt su için yaklaşık 1 lt KB10'da ise her 30 lt su için yaklaşık 0.6 lt köpük ajanı olarak düzenlenmiştir. Bu iki üretim sonucunda köpük beton üretimi için optimum köpük ajanı miktarının KB10 üretiminde sağlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca en büyük problemlerden biri olan priz almadan köpüğün sönmesi, KB9 ve KB10 numunelerinde uçucu kül kullanılmayarak ve organik reçine esaslı köpük ajanı kullanılarak çözülmüştür. Bütün üretimler boyunca kıvam açısından en uygun beton, KB10 betonu olarak görülmüştür. Ayrıca S/C oranının 0.4-0.5 arasında tutulmasının bundan sonraki deneme betonu üretimlerinde daha sağlıklı sonuçlar ortaya çıkaracağı sonucuna varılmıştır.

KB11'de kullanılan geleneksel agrega ve pomza miktarları, maksimum tane çapı 8mm olan agrega granülometri eğrileri kullanılarak yeniden düzenlenmiştir. Bu üretimde en uygun kıvamlı beton elde edilmiştir. KB11 üretimi KB12'de geleneksel agrega

granülometrisindeki çok küçük değişimler hariç neredeyse tekrarlanmıştır. KB11 ve KB12'nin, köpük kalitesi ve beton kıvamı açısından en uygun üretimler olduğu gözlemlenmiştir.

Geç priz alma probleminden dolayı bütün numunelerin 14 günlük ve 28 günlük basınç dayanımları elde edilmiştir. 14 günlük dayanım için numuneler 7 günlük iken, 28 günlük dayanım için ise 21 günlük iken kür havuzundan çıkartılmış ve deney gününe kadar sıcaklığı  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  ve bağıl nemi %70 olan bir ortamda bekletilmiştir. Her bir üretimden hazırlanan 10 adet numunenin, 5'i 14 günlük basınç dayanımını, geri kalan 5 numune ise 28 günlük basınç dayanımını belirlemede kullanılmıştır. Her bir üretim için, basınç deneylerinden önce numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları da belirlenmiştir. Buna göre her bir deneme betonuna ait ortalama basınç dayanımları ve özgül kütleleri Tablo 2.6' da verilmektedir.

Tablo 2.6. Üretilen betonların basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıkları

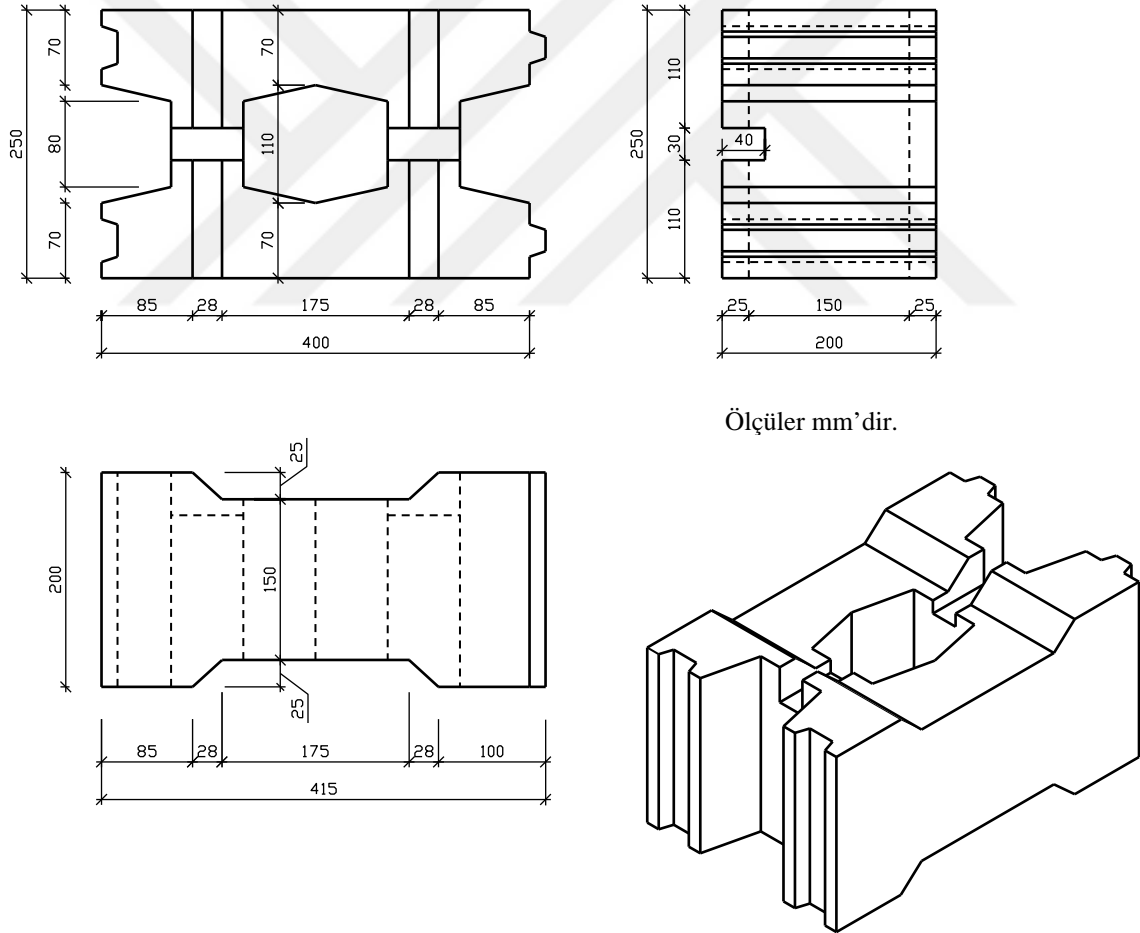
Beton türü	Kuru birim kütle ( $\text{kg/m}^3$ )	DKY birim kütle ( $\text{kg/m}^3$ )	Basınç dayanımı (MPa)	
			$f_{\text{cm}14}$	$f_{\text{cm}28}$
KB1	1350	1441	5.20	7.30
KB2	1268	1340	1.54	2.43
KB3	1538	1629	9.66	10.37
KB4	1326	1390	0.56	0.85
KB5	1322	1380	0.95	1.26
KB6	1161	1406	2.14	2.60
KB7	1133	1445	1.38	1.57
KB8	1118	1468	1.11	1.34
KB9	1110	1157	1.26	1.49
KB10	1093	1096	0.42	0.62
KB11	1285	1357	9.22	9.69
KB12	1246	1313	9.01	11.43

Tablo 2.6'dan görüldüğü gibi, KB1, KB2, KB3, KB4 ve KB5 serisi üretimlerden elde edilen betonların kuru birim hacim ağırlıkları diğerlerine göre daha fazla, KB4 ve KB5 serisi betonların ise basınç dayanımları daha azdır. KB6, KB7, KB8, KB9 ve KB10 serisi betonların, kuru birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımları diğer serilere göre daha düşük elde edilmiştir. KB11 ve KB12 serisi betonların kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla  $1285 \text{ kg/m}^3$  ve  $1246 \text{ kg/m}^3$ , basınç dayanımları ise  $9.69 \text{ MPa}$  ve  $11.43 \text{ MPa}$  olarak elde edilmiştir. Tablo 2.6'dan, yığma birim eleman üretiminde KB11 ve KB12'nin kullanılmasının daha

uygun olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, yığma birim eleman üretiminde KB12 serisinin karışım oranlarının kullanılmasının uygun olduğu ortaya çıkmıştır.

### 2.1.3. Kilitli Yığma Birim Eleman Tasarımı ve Üretimi

Çalışmanın birinci bölümünde verilen, yığma duvarların düzlem içi davranışlarının ve hasarların belirlendiği çalışmalar, detaylı olarak araştırıldıktan sonra, bu bölümde yığma duvarların yatay yükler etkisi altındaki davranışlarını iyileştirebilecek özel geometriye sahip bir kilitli yığma birim eleman tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu elemana ait geometrik özellikler Şekil 2.8’de gösterilmektedir.

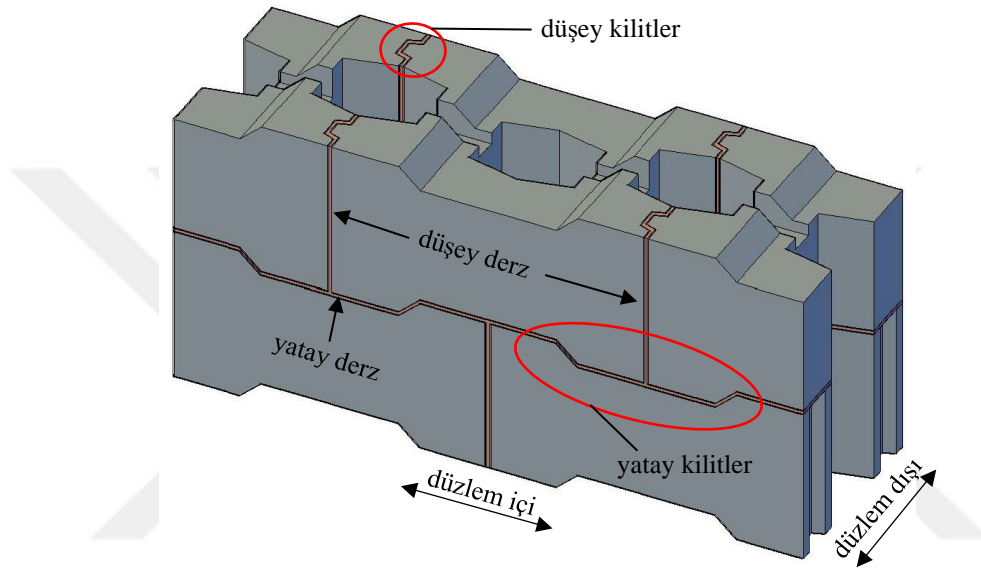


Şekil 2.8. Kilitli yığma birim eleman geometrik özellikleri

Tasarlanan yığma birim elemanları ile, dolgunsuz, dolgulu ve donatılı duvarlar harçlı ya da harçsız olarak üretilebilir hale gelmektedir. Tasarlanan elemanlar yatay ve düşey

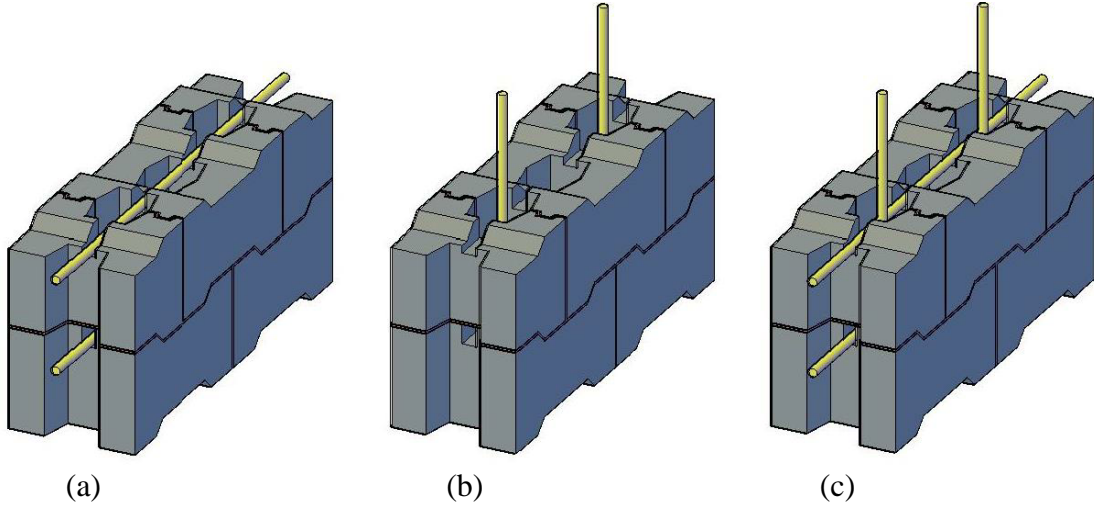


kilitlere sahiptir. Yatay kilitler, günümüzde kullanılan yığma duvar elemanlarından farklı olarak, yatay derzler boyunca oluşan kayma düzlemini süreksiz hale getirmektedir. Yığma yapılarda yatay yüklerden dolayı oluşan bir diğer hasar, duvarların düzlem dışı devrilmesidir. Söz konusu yığma birim elemanları üzerinde, düşey eksen doğrultusundaki kilitlerin, duvarın düzlem dışı davranışına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Kilitli yığma birim eleman derz birleşimleri Şekil 2.9’de ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil 2.9. Kilitli yığma birim eleman derz birleşimleri

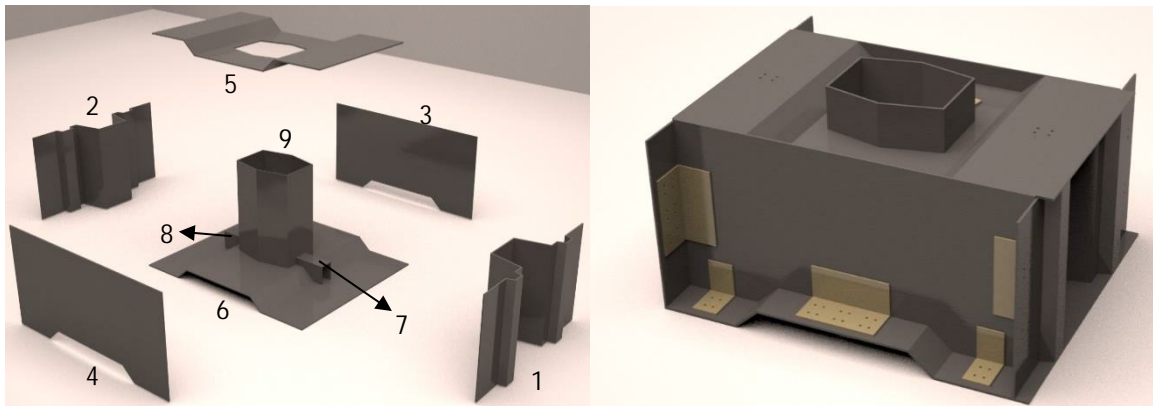
Literatürde yığma duvarlarda kullanılan donatının, duvarın yatay yük etkisi altındaki davranışını iyileştirdiği ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur [43, 54, 55, 64, 68, 71, 74, 80]. Duvarlarda donatı kullanımı, yığma yapıları dış yükler etkisi altında daha sünek bir davranışa zorlamaktadır. Geliştirilen kilitli duvar elemanlarının üst orta bölümünde yatay kanallar bırakılmıştır. Bu kanallar sayesinde oluşturulan duvarlarda yatay donatı kullanımı mümkün hale gelmektedir. Ayrıca duvar elemanlardaki düşey boşluklar da düşey donatı kullanımına izin vermektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Kilitli duvar elemanlarda (a) yatay donatı, (b) düşey donatı, (c) yatay-düşey donatı kullanımı

Çalışmanın bu bölümünde ayrıca, yeni nesil yığma birim elemanların üretimi için uygun bir kalıp sistemi tasarlanmıştır. Dokuz parçadan oluşan kalıp sistemine ait detaylar Şekil 2.11’de verilmektedir. Birim elemanları kalıptan çıkarma işlemini kolaylaştırıp elemanlardaki hasarları en aza indirmek için, kalıp sistemindeki her bir parça birbirinden bağımsız, sökülebilir şekilde tasarlanmıştır.

Kalıbın üst başlığında (Şekil 2.11’deki 5 numaralı parça), birim eleman üretiminde kullanılacak beton dökülürken fazla malzemenin dışarı atılması ve betonun kalıba yerleşmesini kolaylaştırmak amacıyla delikler bırakılmıştır. Bu aşamada 5mm’lik sac plakalar kullanılarak 10 adet kalıp hazırlanmıştır. Kalıpların hazırlanmasına ait aşamalar Şekil 2.12’de verilmektedir.



Şekil 2.11. Yığma birim eleman kalıp sistemi



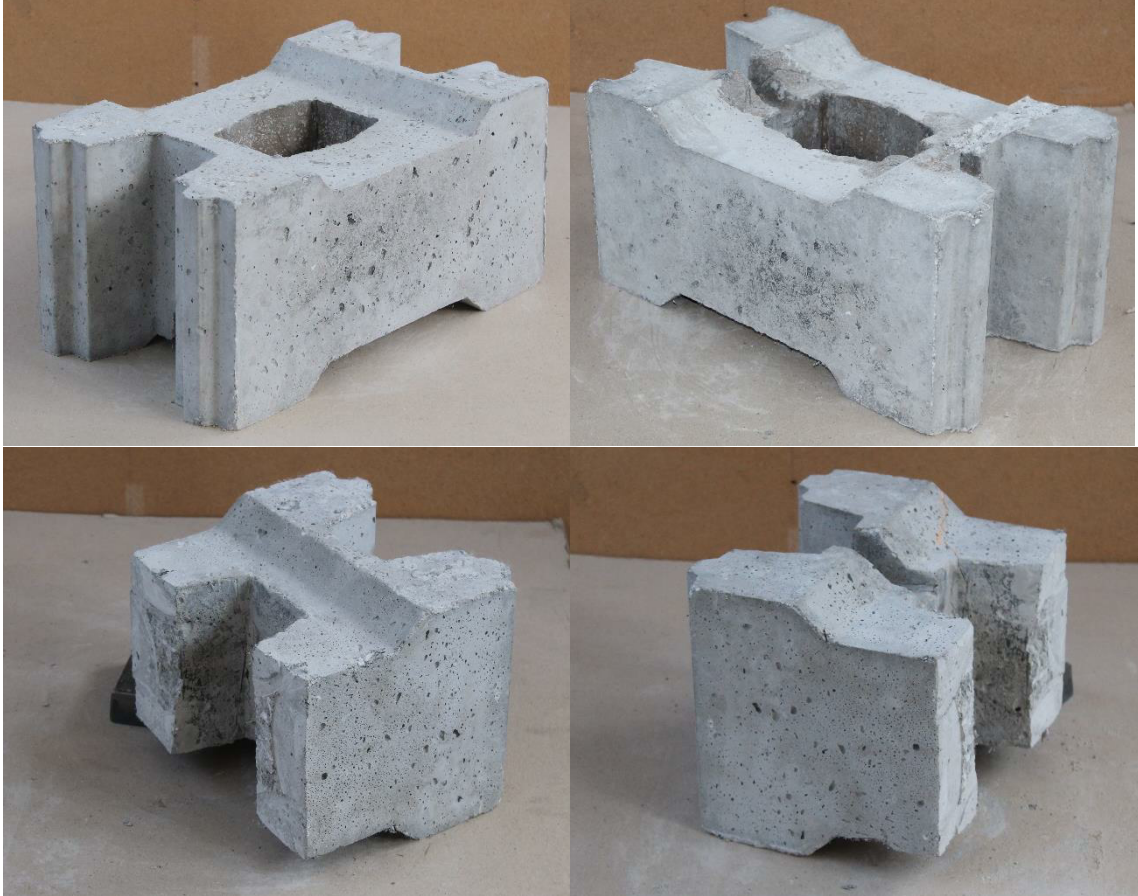
Şekil 2.12. Kilitli yığma birim eleman kalıplarının hazırlanma aşamaları

Daha önce yapılan deneme üretimlerine göre, KB12 serisi üretimin karışım oranlarının, bu çalışma kapsamında üretilecek yığma birim elemanları için uygun olduğuna karar verilmişti. Kilitli yığma birim eleman kalıplarının hazırlanmasından sonra, KB12 serisinde kullanılan karışım oranlarına göre üretilen köpük beton, kalıplarına dökülmüş ve 1 gün sonra kalıbından çıkartılan birim elemanlar sıcaklığı  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  olan kür havuzunda 21 gün boyunca tutulmuştur. 21. günde kür havuzundan çıkartılan numuneler sıcaklığı  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  ve bağıl nemi %75 olan ortamda bekletilmiştir. Her üretimde 10 birim eleman üretilmiştir.



Duvar deney elemanlarının üretiminde kullanılan birim elemanların yaşları minimum 28 gündür.

Deney duvarları için ihtiyaç duyulan yarım elemanlar, birim elemanların ortadan ikiye bölünmesi ile elde edilmiştir. Üretilen tam ve yarım kilitli yığma birimler Şekil 2.13'te görülmektedir.



Şekil 2.13. Tam ve yarım kilitli yığma birimler

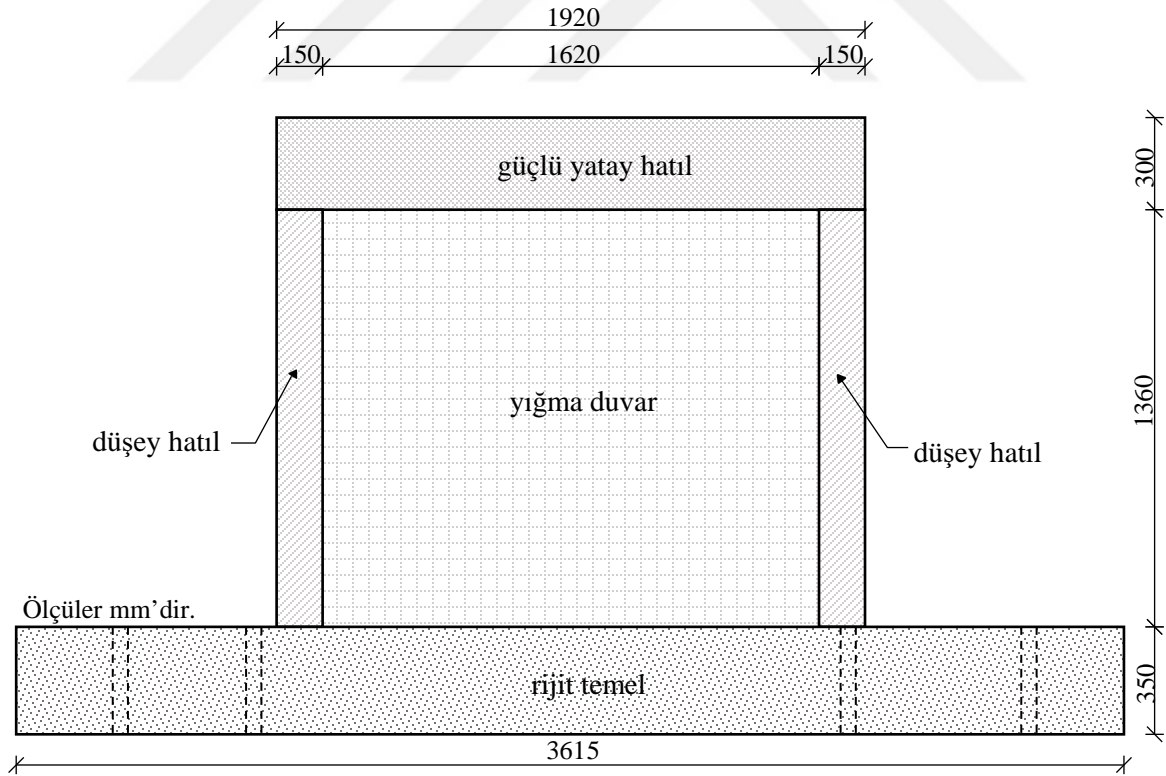
Yığma birim elemanların üretimi aşamasında her bir üretim için, deneme üretimleri arasındaki dayanım değişimlerinin belirlenebilmesi için 6'şar adet 150x150x150 mm boyutlarında küp şahit numuneler alınmıştır. Şahit numuneler, yığma birim elemanlarla aynı koşullarda saklanmış ve 28. günde merkezi basınç deneyi ile basınç dayanımları belirlenmiştir.

Duvar deney elemanlarında kullanılmak üzere 14 farklı üretimde toplam 140 yığma birim eleman üretilmiş ve toplam 42 adet şahit numune alınmıştır. Şahit numunelerden elde edilen en düşük dayanım 7.43 MPa, en yüksek dayanım ise 10.95 MPa olarak elde edilmiştir.

Bu numunelerin ortalama dayanımları 10.15 MPa, standart sapma ise 1.75 olarak hesaplanmıştır. Bu da yığma birim elemanların basınç dayanımlarının dağılımında üretimden üretime büyük farklılıklar olmadığını göstermektedir. Yığma birim elemanların üretimi aşamasında alınan şahit numunelerin ağırlığı ortalama olarak  $1325 \text{ kg/m}^3$  elde edilmiştir. Bu da deneme üretimlerinde elde edilen DKY'li birim hacim ağırlık değeri ile ( $1313 \text{ kg/m}^3$ ) yaklaşık olarak aynıdır.

#### 2.1.4. Yığma Duvar Deney Elemanları ve Özellikleri

Taşıyıcı yığma duvarların yatay yük taşıma kapasitelerini artırmak ve kilitli yığma birimlerle inşa edilen yığma duvarların tekrarlı yatay yük etkisi altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında, biri geleneksel yığma tuğla ile diğer üçü ise kilitli birim elemanlarla oluşturulan toplam 4 adet yığma duvarın üretilmesi planlanmıştır. Deney elemanlarının genel görünümü Şekil 2.14'te verilmektedir.



Şekil 2.14. Deney elemanlarının genel görünümü


Bütün deney elemanlarının betonarme yükleme çerçevelerinde (düşey hatıl ve güçlü yatay hatıl) C30 sınıfı beton hedeflenmiştir. Donatı olarak S420 sınıfı çelik kullanılmıştır. Deney elemanlarında kullanılacak olan donatı ve boyutlarda DBYBHY’deki [3] sınırlamalar dikkate alınmıştır. Düşey ve yatay donatılarda, 12 mm çapında, etriyelerde ise 8 mm çapında donatılar kullanılmıştır. Boyuna donatıların, rijit temele ankrajında 250 mm ankraj boyu dikkate alınmıştır. Düşey hatılarda ve güçlü yatay hatılda boyuna donatı olarak 4Ø12 donatının kullanıldığı deney elemanlarında etriye aralıkları düşey hatılarda 150 mm ve yükleme girişinde 100 mm’dir.

Deney duvarlarının hepsi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarında daha önceden üretilmiş ve boyutları 3615x350x780 mm olan rijit temeller üzerine inşa edilmiştir.

#### 2.1.4.1. Geleneksel Yığma Tuğla ile Üretilen Yığma Duvar Deney Elemanı (GYDDE)

Geleneksel taşıyıcı yığma tuğlalarla üretilen bu deney elemanı (GYDDE), mevcut yığma duvarların tekrarlı yatay yük etkisi altındaki davranışının belirlenmesi amacıyla üretilmiştir. Bu deney elemanında bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2.7’de verilen geleneksel düşey delikli taşıyıcı yığma tuğla kullanılmıştır. Söz konusu deney elemanında duvar, geleneksel yığma birimler ile bunları birbirine bağlayan harçtan oluşmaktadır.

Tablo 2.7. Düşey delikli taşıyıcı tuğla mekanik ve fiziksel özellikleri

	Boyutlar (mm)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )	Ortalama Ağırlığı (kg/adet)
	290x190x135	5-7.8	600-700	5-5.2

GYDDE kodlu deney elemanı, duvar kalınlığı 290 mm olacak şekilde yığma tuğlalar uzun kenar doğrultusunda yan yana konularak üretilmiştir. GYDDE kodlu deney elemanına ait boyut ve donatı detayları ve kesitler Şekil 2.15’te verilmektedir.

#### **2.1.4.2. Boşluklu Kilitli Yığma Duvar Deney Elemanı (KYDDE-1)**

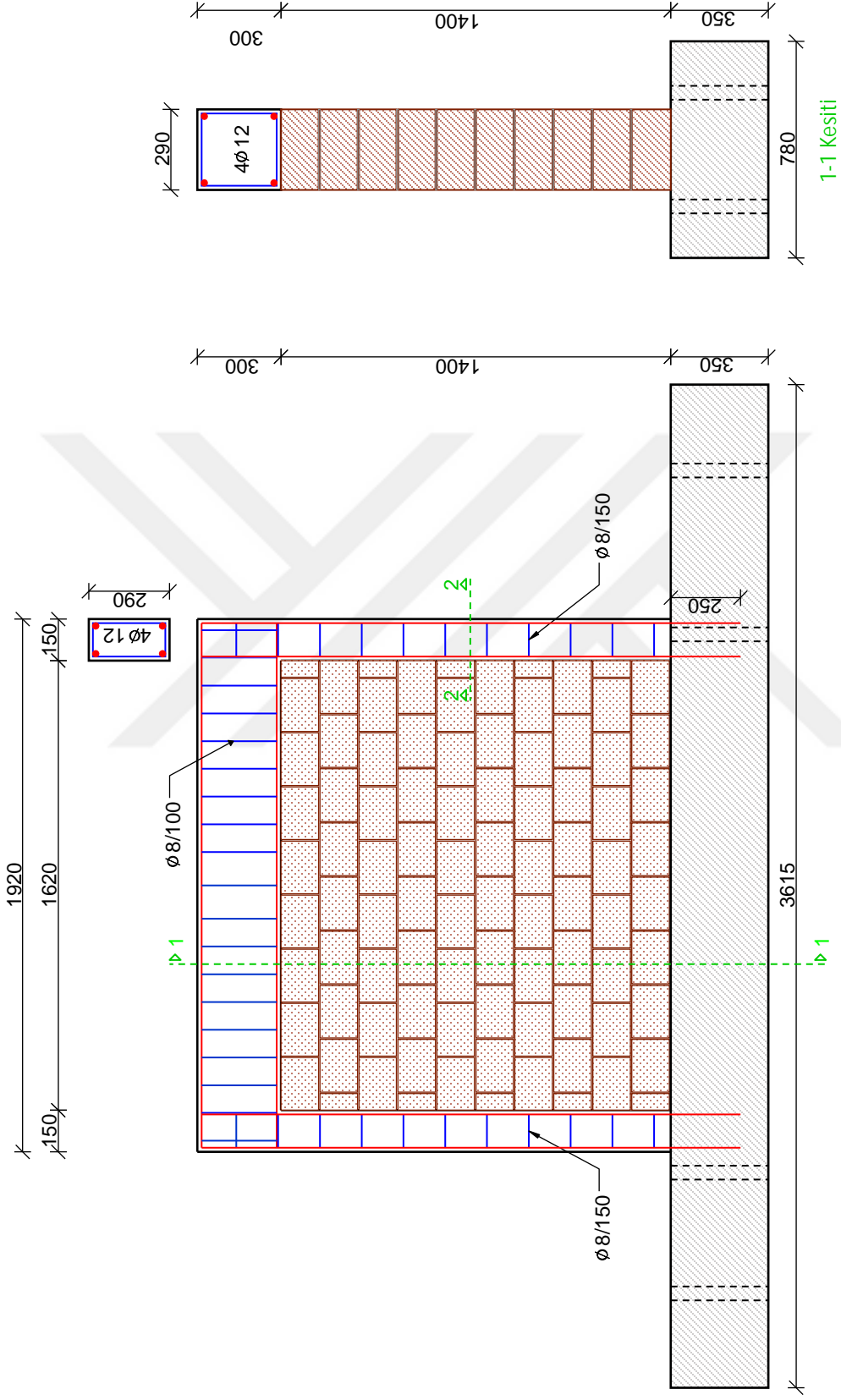
Bu çalışma kapsamında geliştirilip üretilen kilitli yığma birim elemanlarla üretilen boşluklu kilitli yığma duvar deney elemanına (KYDDE-1) ait boyut, donatı detayları ve kesitler Şekil 2.16'da verilmektedir. Bu deney elemanında, duvar, kilitli yığma birimler ile bunları yatay ve düşeyde birbirine bağlayan harçtan oluşmaktadır ve duvar kalınlığı 250 mm'dir. Yatay ve düşey hatıllardaki donatı miktarı ve düzeni GYDDE ile aynıdır.

#### **2.1.4.3. Dolgulu Kilitli Yığma Duvar Deney Elemanı (KYDDE-2)**

Kilitli yığma birimlerin harçla birleştirilmesi ile oluşturulan dolgulu kilitli yığma duvar deney elemanının (KYDDE-2), KYDDE-1'den farkı, kilitli yığma birim elemanların düşey boşluklarının beton ile doldurulmasıdır. Böylece dolgunun, yığma duvarın çevrimsel yatay yük davranışına etkisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Boyut, yatay ve düşey hatıllarda kullanılan donatı miktarı ve konumları KYDDE-1 ile aynı olan bu deney elemanına ait detaylar Şekil 1.17'de verilmektedir.

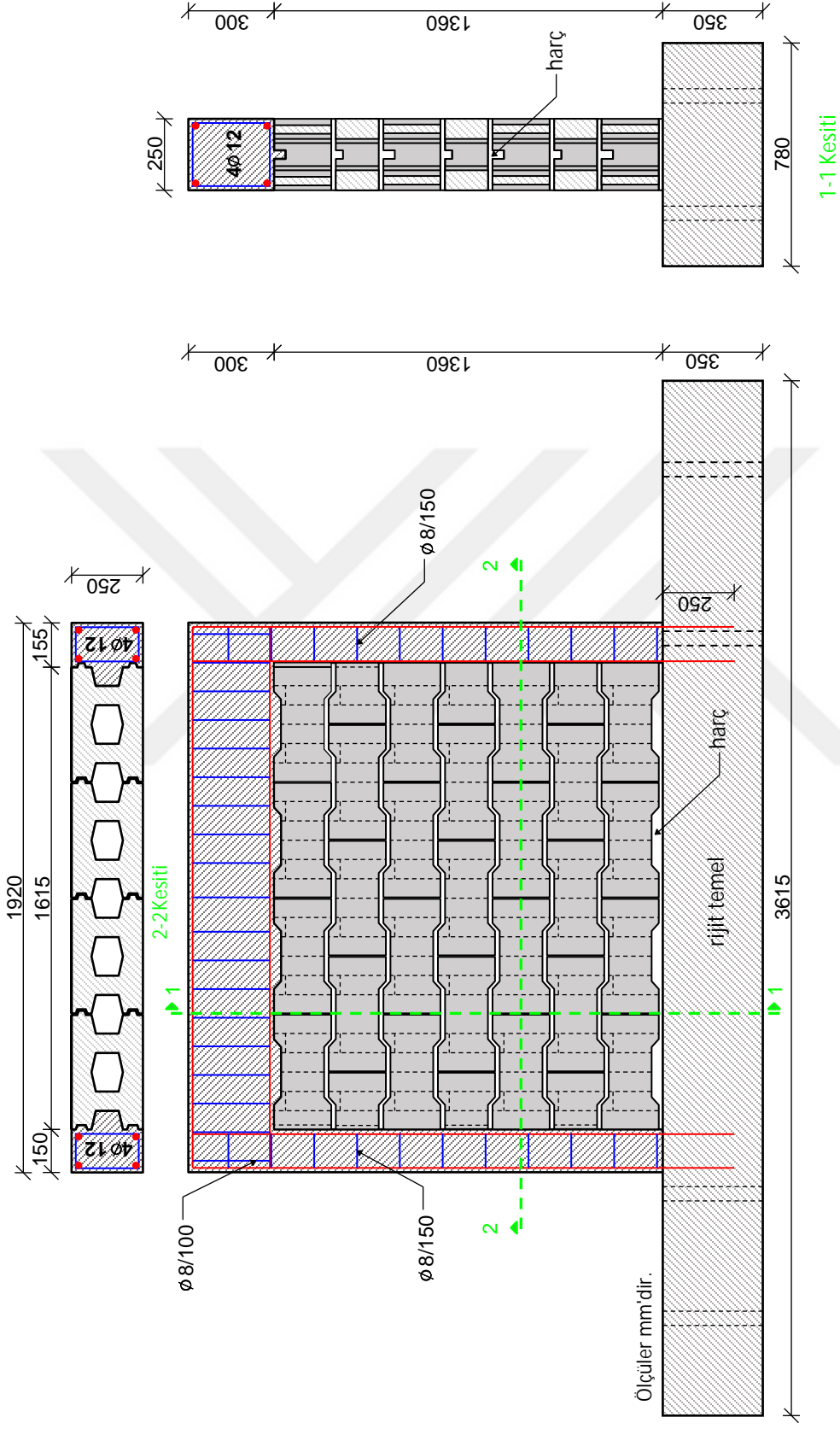
#### **2.1.4.4. Dolgulu Donatılı Kilitli Yığma Duvar Deney Elemanı (KYDDE-3)**

Kilitli birimlerle oluşturulan donatılı yığma duvarların çevrimsel yatay yük etkisi altındaki davranışını belirlemek üzere tasarlanan dolgulu donatılı kilitli yığma duvar deney elemanının (KYDDE-3), KYDDE-2 deney elemanından farkı, yatay ve düşey donatıların bulunmasıdır. Bu deney elemanında, her bir dolgu içerisinde düşeyde bir adet 12 mm çaplı donatı ve kilitli yığma birimlerin yatay düzlemleri boyunca bırakılan kanallarda, her bir tuğla seviyesinde, yine birer adet 12 mm çaplı donatı yerleştirilmiştir. KYDDE-3'e ait detaylar Şekil 1.18'de verilmektedir. Duvar içindeki donatıların rijit temele ankrajında, düşey hatıl donatılarına benzer şekilde 250 mm'lik ankraj boyu dikkate alınmıştır.

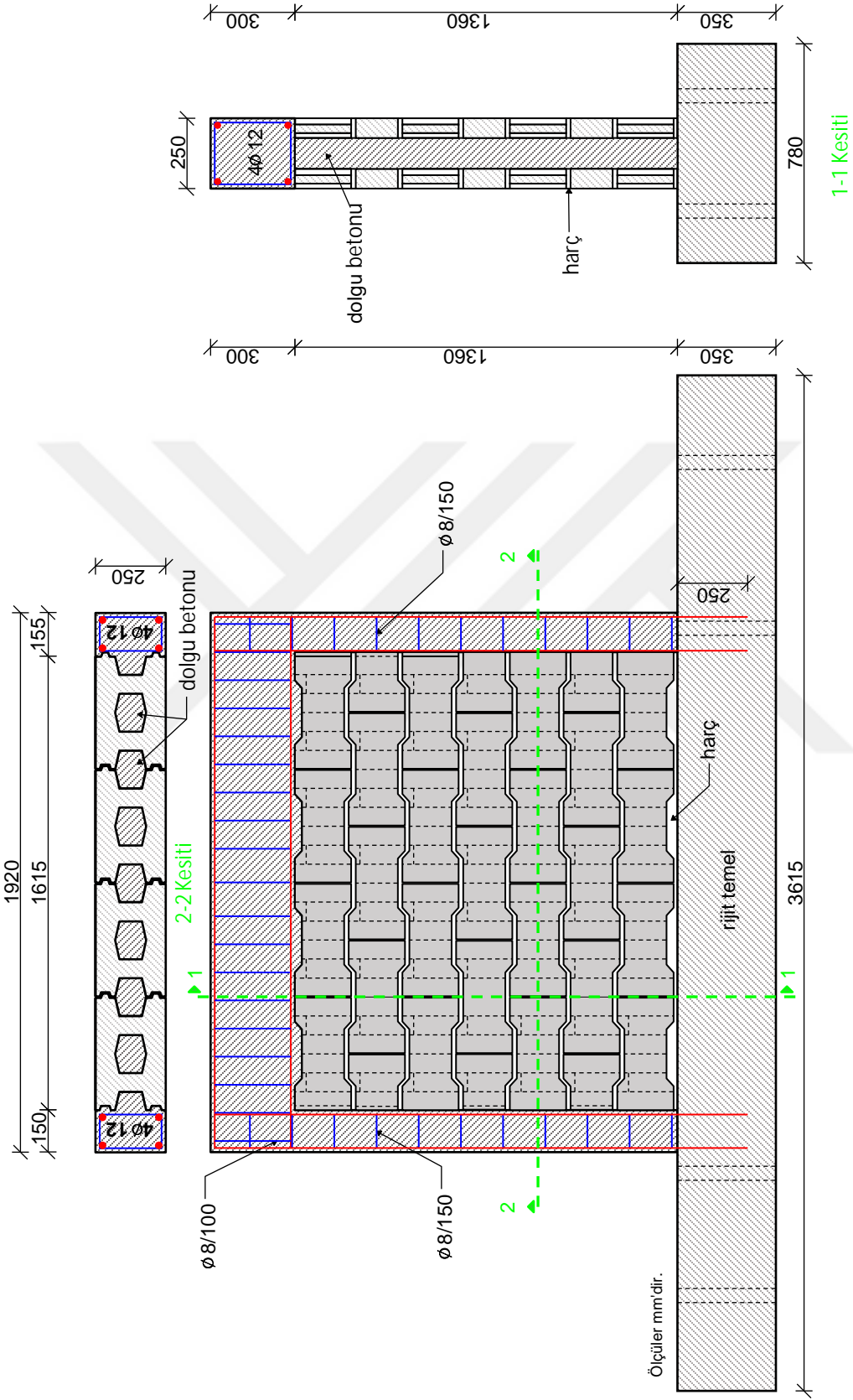


Şekil 2.15. GYDDE deney elemanı boyut ve donatı detayları

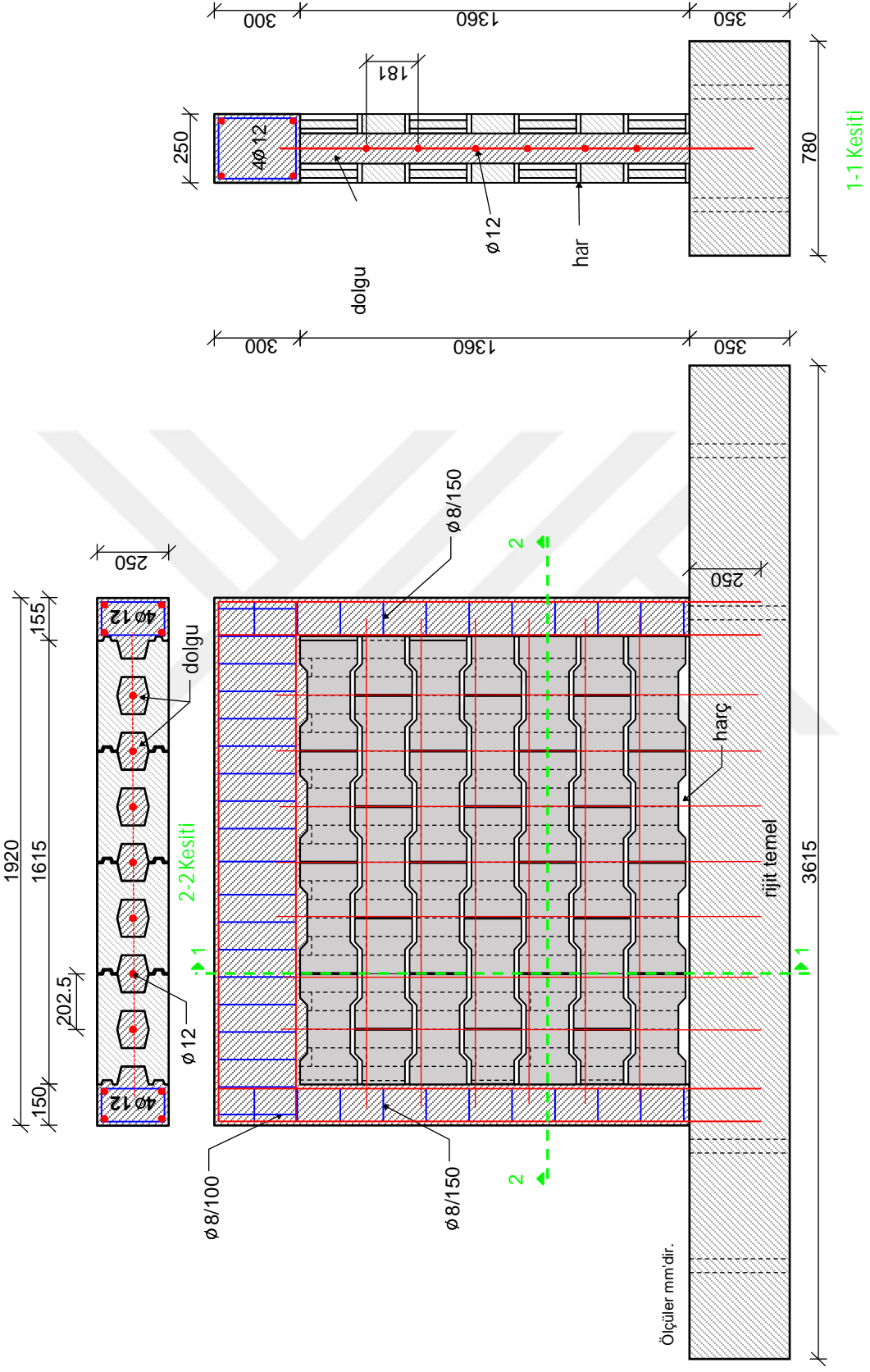




Şekil 2.16. KYDDE-1 deney elemanı boyut ve donatı detayları



Şekil 2.17. KYDDE-2 deney elemanı boyut ve donatı detayları



Şekil 2.18. KYDDE-3 deney elemanı boyut ve donatı detaylar

### 2.1.5. Normal Beton ve Harcın Üretimi

Deney elemanların üretiminde, yığma birimlerin yatay ve düşey derzlerinde bağlayıcı olarak kullanılan harç tipi ve karışımı TS 2510'da [2] belirtilen C-2 tipi harçtır. C-2 tipteki harcın hacimce karışım oranları Tablo 2.8'de verilmektedir. Bu harç tipine ait minimum basınç dayanımı TS EN 998-2'ye [10] göre 5MPa olmalıdır.

Tablo 2.8. Harç karışım oranları (hacimce)

C-2 sınıfı harç	Çimento (CEM-1 32.5R)	Kum (0-4mm)
	1	5

Bu çalışmada yatay ve düşey hatıllar ile duvar dolgusunda kullanılan beton laboratuvar ortamında üretilmiştir. Deney elemanlarının yükleme çerçevelerinde ve duvar dolgusunda kullanılacak dolgunun hedeflenen basınç dayanımı 30 MPa'dır. Beton karışım oranları Tablo 2.9'da verilmektedir.

Tablo 2.9. Beton karışım oranları (1 m<sup>3</sup>)

Çimento (CEM-I 42.5R) (kg)	Agrega (kg)	Su (kg)	Katkı Maddesi (kg)	S/Ç Oranı
350	1825	193	3.5	0.55

### 2.1.6. Yığma Duvar Deney Elemanlarının Üretimi

Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilen bu çalışmada biri geleneksel yığma tuğla ve diğer üçü kilitli birim elemanlarla oluşturulan toplam 4 adet yığma duvarla inşa edilmiştir. Kilitli birim elemanlarla üretilen yığma duvarlar, başlık 2.1.4'te verildiği şekilde boşluklu, dolgulu ve dolgulu-donatılı olacak şekilde hazırlanmıştır

Duvarların üretilmesinde karışım oranları Tablo 2.8'de verilen harç kullanılmıştır. Üretilen harcın mekanik özelliklerinin belirlemek için her bir deney elemanından 6 adet 100

mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde silindir numuneler alınmıştır. Söz konusu numuneler 28 gün boyunca sıcaklığı  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  olan standart kür havuzunda bekletilmiştir.

Kilitli yığma birim elemanlarla üretilen yığma duvarların yatay yük etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında biri geleneksel yığma tuğla ile üretilen deney elemanı (GYDDE) diğer üçü ise bu çalışma kapsamında tasarlanan kilitli yığma birim elemanlarla üretilen boşluklu (KYDDE-1), dolgulu (KYDDE-2) ve dolgulu donatılı (KYDDE-3) deney elemanları üretilmiştir.

Geleneksel yığma duvar deney elemanının üretiminde Tablo 2.7’de özellikleri verilen düşey delikli tuğla kullanılmıştır. Bu tuğlalarla yatay ve düşey derz kalınlıkları yaklaşık 5 mm olacak şekilde, daha önce özellikleri verilen harç kullanılarak GYDDE üretilmiştir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Düşey delikli taşıyıcı yığma tuğla duvar inşa aşamaları

Bu çalışma kapsamında tasarlanan kilitli birim elemanlar kullanılarak üretilen boşluklu deney elemanı (KYDDE-1), rijit temel üzerine 30 mm kalınlığında harç serilerek, bir sırada 4 yığma birim olacak şekilde inşa edilmiştir. Yığma birim elemanlar arasındaki derz kalınlıkları yaklaşık olarak yatayda 16 mm ve düşeyde ise 5 mm'dir. Boşluklu kilitli yığma duvar deney elemanında 7 sıra yığma birim eleman kullanılmıştır.

Kilitli yığma birim elemanlarla üretilen KYDDE-2 deney elemanı KYDDE-1'de olduğu gibi hazırlanmıştır (Şekil 2.20). Bu deney elemanında KYDDE-1'den farklı olarak yığma birim eleman boşluklarının beton ile doldurulacak olmasıdır.



Şekil 2.20. KYDDE-1 ve KYDDE-2 deney elemanlarının üretim aşamaları

KYDDE-3 deney elemanı KYDDE-1 ve KYDDE-2'de olduğu gibi üretilmiştir. Bu deney elemanında, birim elemanlarda bırakılan yatay derzlerden her sırada 12 mm çapında yatay donatı ve boşluklardan 12 mm çaplı düşey donatı geçirilmiştir. Düşey donatılar daha önce belirtildiği gibi rijit temele ankraj boyu 250 mm olacak şekilde ankre edilmiştir (Şekil 2.21).





Şekil 2.21. Donatılı yığma duvar inşa aşamaları

Kilitli yığma birim elemanlarla oluşturulan duvarların analizlerde kullanılacak malzeme özelliklerini belirlemek için duvar inşa aşamalarına benzer şekilde merkezi basınç, doğrudan kayma ve diyagonal basınç deney elemanları da üretilmiştir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. (a) Merkezi basınç, (b) doğrudan kayma ve (c) diyagonal basınç deney elemanları

Bütün duvarların inşası tamamlandıktan sonra duvarların etrafını saracak olan düşey hatlı donatılarının temel üzerindeki konumları belirlenerek yaklaşık 250 mm derinliğindeki deliklere 12 mm çaplı donatılar epoksi ile ankre edilmiştir. Deney elemanlarının tamamında düşey ve yatay hatlılarda 4Ø12 donatı kullanılmıştır. Etriye olarak 8 mm çaplı donatının kullanıldığı deney elemanlarında düşey ve yatay hatlılardaki etriye aralığı sırasıyla 150 mm ve 100 mm olacak şekilde düzenlenmiştir. Deney elemanlarının düşey hatlı donatıları Şekil 2.23'te, 20 mm kalınlığında ahşaptan üretilmiş olan kalıp sistemi Şekil 2.24'te ve yatay hatlı donatıları ile bu donatıların kalıp içindeki konumu Şekil 2.25'de gösterilmektedir.



Şekil 2.23. Yığma duvarlar ve düşey hatlı donatıları





Şekil 2.24. Ahşap kalıp sistemi



Şekil 2.25. Yatay hatıl donatısı ve kalıplara yerleştirilmesi

Deney elemanlarının yükleme çerçevelerini oluşturan donatıların ve kalıbın hazırlanmasından sonra betonlama işlemine geçilmiştir. Tablo 2.8'deki karışım oranlarının kullanıldığı betonda maksimum tane çapı 12 mm'dir. Betonun donatı aralarına kolay girmesi ve betonda boşluk kalmaması amacıyla, süper akışkanlaştırıcı (YKS Rheobuild 1000) katkı maddesi kullanılmıştır. Düşey eksenli betoniyerle üretilen betonlar kalıplara 3 aşamada yerleştirilmiş ve her aşamada beton vibratörle sıkıştırılmıştır. Beton döküldükten 2 gün sonra

kalıplar sökölerek deney elemanları laboratuvar ortamında ıslak ıval altında 28 gün saklanmıştır (şekil 2.26). Üretilen betonun mekanik özeliklerini belirlemek üzere her duvar elemanı için betondan 6 adet 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde standart silindir numuneler alınarak 28 gün boyunca, kr havuzunda bekletilmiştir. Üretimleri tamamlanan yığma duvar deney elemanları şekil 2.27’de görülmektedir.



şekil 2.26. Yığma duvar çerçevelerinde kr uygulaması



şekil 2.27. Üretimleri tamamlanan kilitli yığma duvar deney elemanları

### 2.1.7. Deney Elemanlarında Kullanılan Beton ve Harcın Özellikleri

Deney elemanlarının üretimi sırasında alınan beton ve harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilen aksenal basınç ve yarmada çekme deneylerinde, kapasiteleri sırasıyla 2500 kN ve 200 kN olan, sabit hızla yükleme yapabilen bilgisayar kontrollü bir deney aleti kullanılmıştır (Şekil 2.28). Ayrıca deney elamanında kullanılan beton ve harcın birim şekildeğiştirmesinin belirlenmesi için, her bir seriden bir adet numuneye 2 adet aktif boyu 90 mm olan birim şekildeğiştirme ölçerler (strain gauge) yerleştirilmiştir.



Şekil 2.28. Yüksek kapasiteli (a) aksenal basınç, (b) eğilmede-yarmada çekme deney aleti

Çekme yüklerinin dolaylı olarak uygulanması ile çekme dayanımının tespit edilmesinde kullanılan yarmada çekme deneyinde beton ve harcın yarmada çekme dayanımı,

$$f_{ct}' = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2.1)$$

bağıntısıyla elde edilmektedir. Burada, P, L ve D sırasıyla silindir numunenin yarılmasına sebep olan basınç kuvveti, silindir numunenin boyu ve silindir numunenin çapıdır. Yarmada çekme dayanımı ( $f_{ct}'$ ) ile gerçek çekme dayanımı ( $f_{ct}$ ) arasındaki ilişki;

$$f_{ct} = \frac{f_{ct}'}{1.5} \quad (2.2)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir.

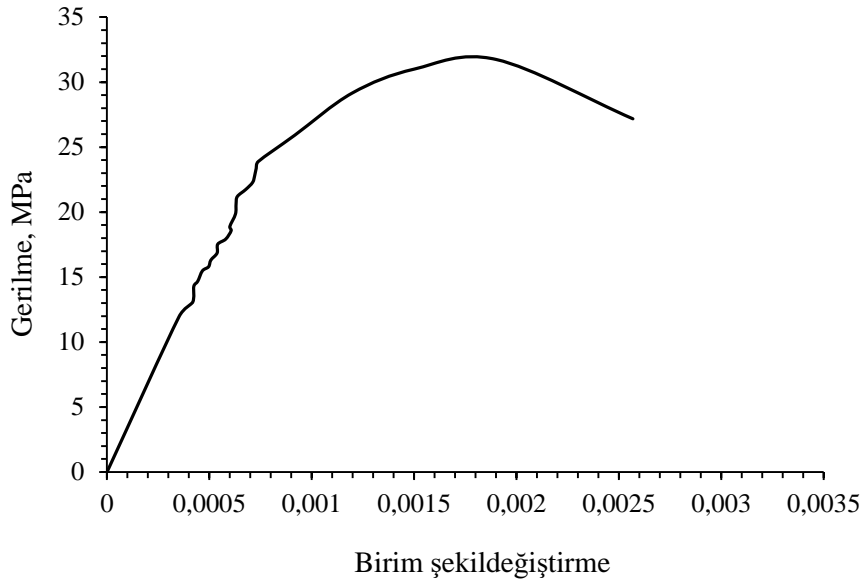
### 2.1.7.1. Beton Özellikleri

Deney elemanlarından alınan 6'şar standart silindir numunenin 3 tanesi basınç dayanımı ile birim şekildeğişimleri belirlemede ve diğer 3 tanesi ise yarmada çekme dayanımı belirlemede kullanılmıştır (Şekil 2.29).



Şekil 2.29. Beton numunelerde basınç ve yarmada çekme deneyleri

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen ortalama gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi Şekil 2.30'da ve betonun mekanik özellikleri ise Tablo 2.10'da verilmektedir.



Şekil 2.30. Üretilen betonlar için ortalama gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi

Tablo 2.10. Deneysel elemanların üretiminde kullanılan betonların bazı özellikleri

Deneysel elemanları	Silindirik basınç dayanımı (MPa)	Ortalama silindirik basınç dayanımı (MPa)	Yarıda çekme dayanımı (MPa)	Ortalama yarıda çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü, $E_c$ (MPa)
KYDDE-1	31.70	33.80	4.56	4.6	31211
	31.75		4.51		
	32.10		4.59		
KYDDE-2	33.80		4.71		
	33.87		4.64		
	34.15		4.56		
KYDDE-3	33.72		4.54		
	29.68		4.51		
	33.86		4.56		
GYDDE	37.70		4.61		
	36.75		4.71		
	36.26		4.66		

Tablo 2.10’da görüldüğü gibi, kullanılan betonların dayanımları arasındaki fark büyük olmamıştır. Şahit numunelerden elde edilen silindirik basınç dayanımlarının standart sapması 2.30 MPa ve kullanılan betonun karakteristik basınç dayanımı ise 30.40 MPa olarak elde edilmiştir. Hedeflenen basınç dayanımına ulaşılmıştır. Bununla birlikte, ortalama yarıda



çekme dayanımı, ortalama silindir dayanımının %13.6'sına karşılık gelmektedir. Teknik literatürde aksel çekme dayanımının eşitlik (2.2)'de gösterildiği şekilde, yarmada çekme dayanımının üçte ikisi kadar alınabileceği belirtilmektedir. Bu durumda üretilen betonların aksel çekme dayanımları, 3.07 MPa olmaktadır. Ancak bu değer aksel çekme için yönetmeliğin önerdiği  $0.35\sqrt{f_{ck}}$  değerinden (1.93 MPa) daha büyüktür.

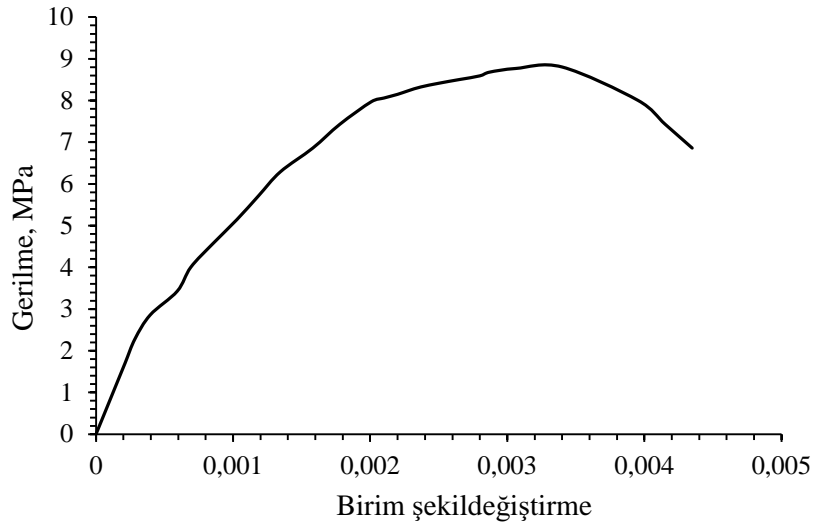
### 2.1.7.2. Harç Özellikleri

Yığma birim elemanların arasında bağlayıcı olarak kullanılan harçtan her bir deney elemanı için alınan 6 adet standart silindir numunenin 3 tanesi basınç dayanımı ile birim şekildeğiştirmeleri belirlemede ve 3 tanesi ise yarmada çekme dayanımı belirlemede kullanılmıştır. Çapı 100 mm ve yüksekliği 200 mm harç numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler Şekil 2.31'de görülmektedir.



Şekil 2.31. Harç numunelerde basınç ve yarmada çekme deneyleri

Deneyler sonucunda elde edilen harcın ortalama gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi ile harcın bazı özellikleri sırasıyla Şekil 2.32 ve Tablo 2.11'de verilmektedir.



Şekil 2.32. Harç için gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi

Tablo 2.11. Deney elemanlarında kullanılan harçların bazı özellikleri

Deney elemanları	Silindir basınç dayanımı (MPa)	Ortalama silindir basınç dayanımı (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Ortalama yarmada çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü, $E_m$ (MPa)
KYDDE-1	8.87	8.73	2.03	2.13	6772
	8.82		1.94		
	8.78		2.12		
KYDDE-2	8.54		2.24		
	8.61		2.52		
	8.38		2.46		
KYDDE-3	8.33		1.97		
	8.38		2.03		
	8.46		2.07		
GYDDE	9.58		2.13		
	9.13		2.10		
	8.86		2.02		

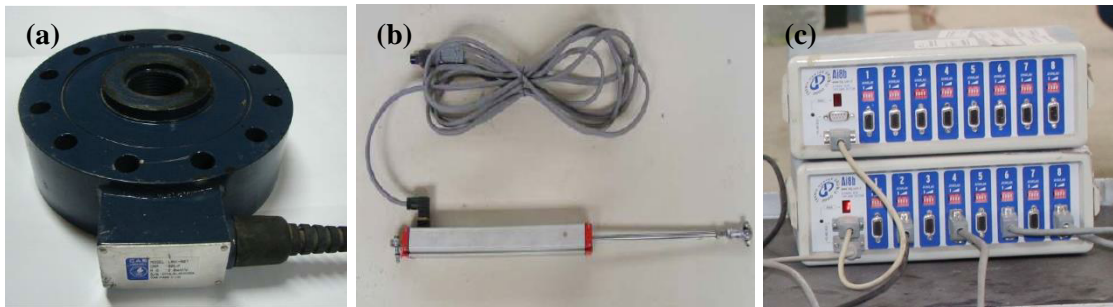
C-2 tipi harcın kullanıldığı deney elemanlarında, TS ENV 998-2'ye [10] göre minimum harç basınç dayanımı 5 MPa olmalıdır. Tablo 2.11'den görüldüğü 8.73 MPa ortalama basınç dayanımı ile söz konusu hedefe ulaşılmıştır. Yapılan deneylerden ortalama yarmada çekme dayanımı 2.13 MPa olarak elde edilmiştir. Teknik literatüre uygun olarak

yarmada çekme dayanımının üçte ikisi, harç aksenal çekme dayanımı olarak kabul edildiğinde bu değer 1.42 MPa olmaktadır.

### 2.1.8. Kilitli Yığma Birim Elemanlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

Teknik literatürde yığma duvarların malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneyler, aksenal basınç deneyleri, doğrudan kayma deneyi ve diyagonal basınç deneyleri olarak belirtilmektedir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen söz konusu deneylerde yük ve yerdeğiştirme ölçümleri yapılmıştır.

Deney elemanlarının yüklenmesinde hidrolik bir silindir kullanılmıştır. Deneylerde yük değerleri, hidrolik silindirin ucuna bağlanan ve elektronik olarak ölçüm yapabilen 1000 kN kapasiteli yassı tip bir yük hücresi (loadcell) ile elde edilmiştir. Söz konusu yük hücresi her deneyden önce kalibre edilmiştir. Deneylerde yerdeğiştirmeler, iki ucu mafsallı 50 mm, 200 mm ve 300 mm'lik doğrusal potansiyometrik yerdeğiştirme ölçerler (LPDT) yardımı ile elektronik olarak ölçülmüş ve bilgisayara kaydedilmiştir. Yük hücresi ve LPDT'lerden alınan ölçümler, bağlantı elemanları yardımıyla veri toplama sistemine (data logger) iletilmektedir. Saniyede 16 veri kaydedebilen 32 kanallı genel amaçlı veri toplama sistemi, yerdeğiştirme ölçümünü 1/20000 hassasiyetle yapabilmektedir. Kilitli yığma birim elemanlar üzerinde gerçekleştirilen deneylerde kullanılan aletler Şekil 2.33'te gösterilmektedir.



Şekil 2.33. Kilitli yığma birimler üzerinde gerçekleştirilen deneylerde kullanılan aletler (a) yük hücresi (loadcell), (b) yerdeğiştirme ölçer (LPDT) ve (c) veri toplama ünitesi (data logger)

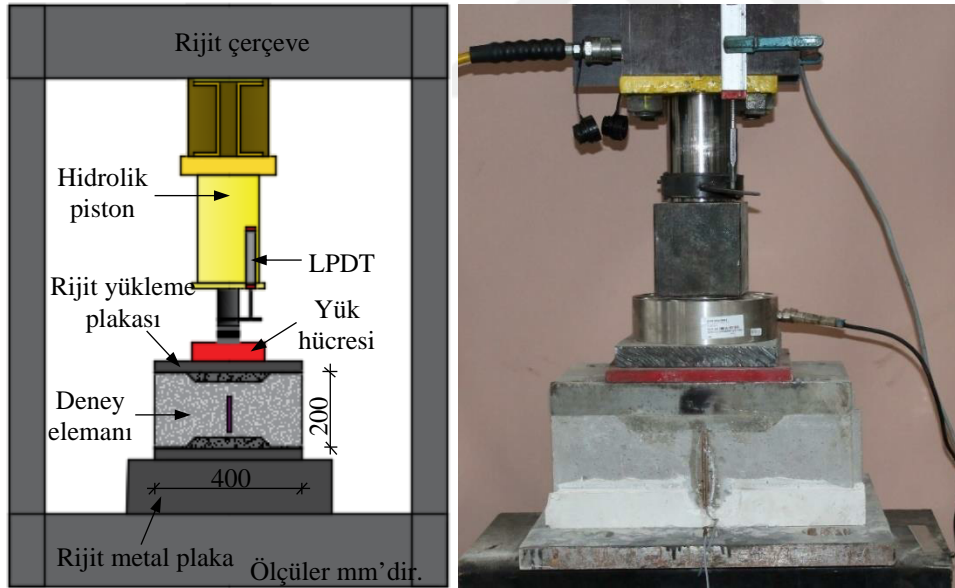


### 2.1.8.1. Eksenel Basınç Deneyleri

Eksenel basınç deneyleri iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada tek bir kilitli yığma tuğlanın ve ikinci aşamada ise iki yığma birim ve harçtan oluşan deney elemanının basınç dayanımları belirlenmiştir. Her iki deney, yük artış hızı sabit tutulmaya çalışılarak monotonik artan yük etkisi ile gerçekleştirilmiştir. Yükün eşit dağıtılması amacıyla, deney elemanlarının üstüne ve altına, beton ve alçı ile başlıklama yapılmıştır.

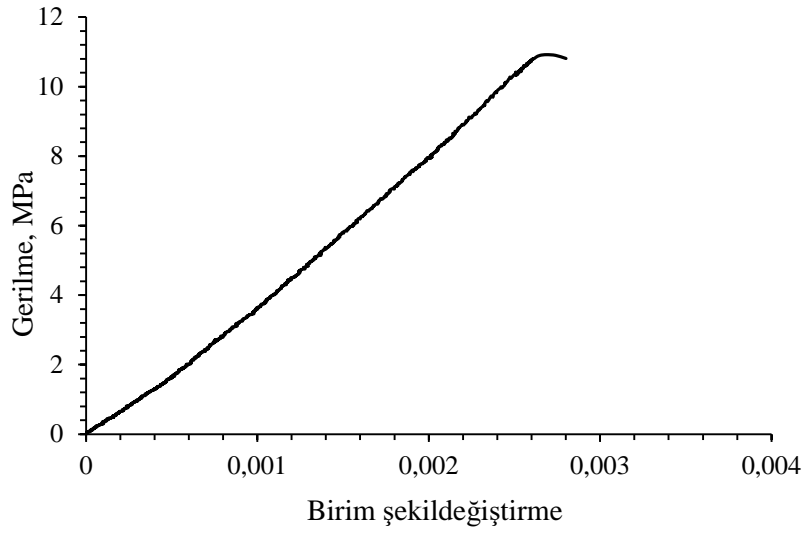
Gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkileri, deneylerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri kullanılarak elde edilmiştir. Burada gerilmeler, elemana uygulanan yükün yükleme net alanına (boşluklar çıkartıldıktan sonra kalan alan) bölünmesiyle ve şekildeğiştirmeler ise yerdeğiştirmelerin, elemanın toplam boyuna bölünmesiyle elde edilmiştir.

Tek bir yığma birim elemanın basınç dayanımı belirlemek üzere gerçekleştirilen deney düzeneği, ölçüm sistemi ve deneye hazır hale getirilen deney elemanı Şekil 2.34'te görülmektedir.



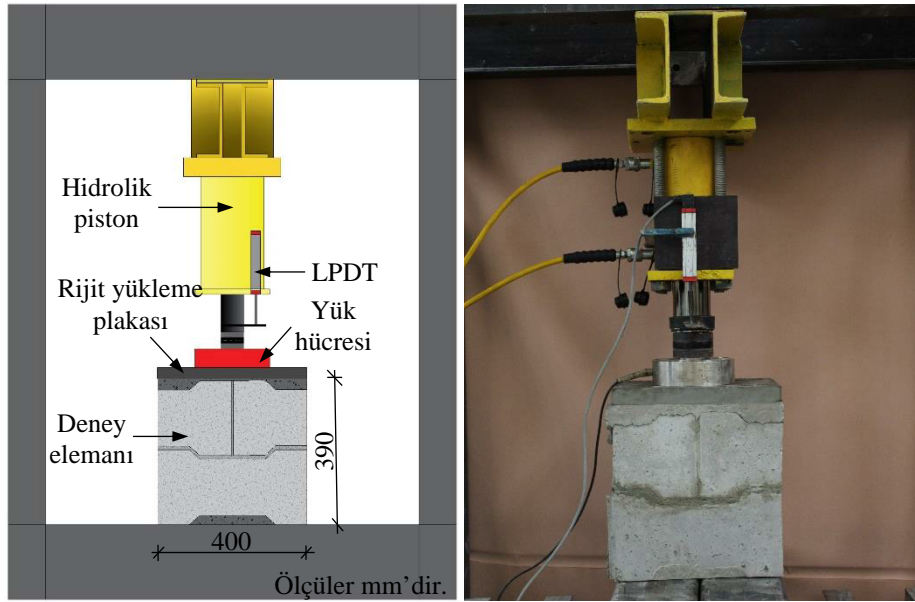
Şekil 2.34. Tek yığma birim eksenel basınç testi yükleme düzeneği ve deney elemanı

Tek bir kilitli yığma birim eleman üzerinde gerçekleştirilen eksenel basınç deneyi sonunda, yığma birim eleman basınç dayanımı 10.81 MPa ve elastisite modülü 3756 MPa olarak elde edilmiştir ve gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 2.35'te görülmektedir.



Şekil 2.35. Kilitli yığma birim eleman gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi

ASTM C1314'te [89] boşluklu yığma prizmaların basınç dayanımının, en az iki yığma birimden oluşan ve yükseklik/kalınlık oranı 1.3-5 arasında değişen numunelerin aksel basınç testinden elde edilmesi gerektiği belirtilmektedir. Bu çalışmada yükseklik/kalınlık oranı 1.56 olan bir tam, iki yarım yığma birim ve harçtan oluşan prizmatik deney elemanı üzerinde aksel basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu standarda göre hazırlanmış olan deney elemanı ile yükleme düzeneği Şekil 2.36'da görülmektedir.



Şekil 2.36. Yığma prizma aksel basınç testi yükleme düzeneği ve deney elemanı

Prizmatik eleman üzerinde gerçekleştirilen aksenal basınç deneyi sonunda, ilk hasar alttaki yığma birim elemanın ortasında, düşey çatlak olarak ortaya çıkmış daha sonra bu çatlak ikinci sıradaki düşey derze doğru yayılmıştır. Yarım yığma birimlerin orta bölgelerinde ise deneyin ilerleyen aşamalarında düşey çatlaklar oluşmuştur. Prizmatik deney elemanında oluşan hasarlar Şekil 2.37’de ve gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi ise Şekil 2.38’de görülmektedir.



Şekil 2.37. Prizmatik deney elemanındaki aksenal basınç hasarları

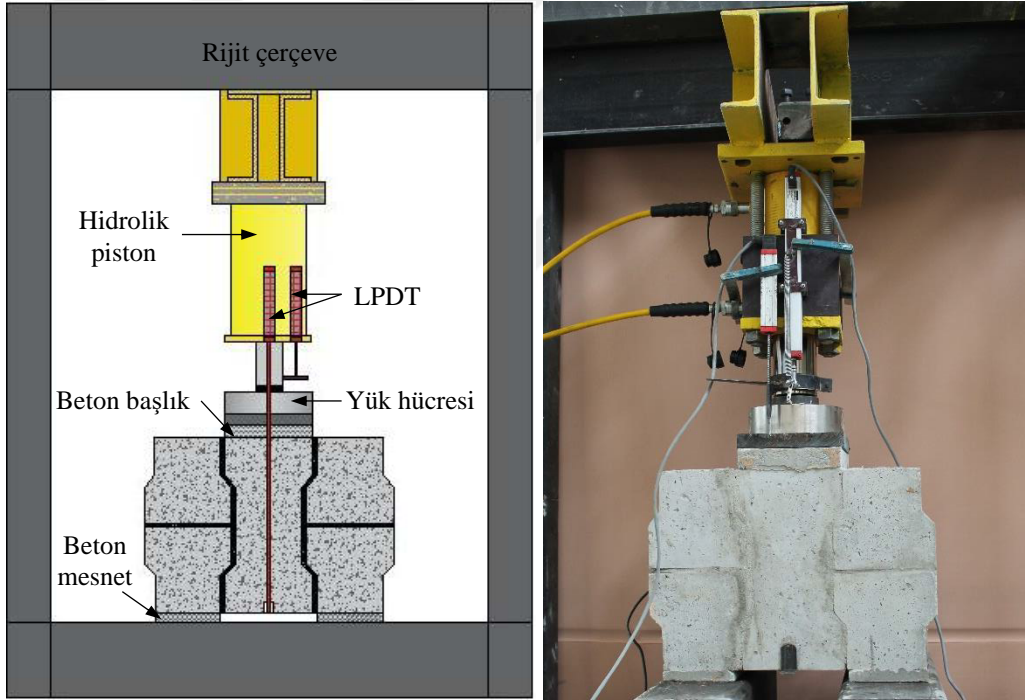


Şekil 2.38. Yığma prizma gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi

Kilitli yığma birim elemanlarla oluşturulan prizmatik deney elemanının aksenal basınç deneyinde, maksimum gerilme 8.40 MPa, bu gerilmeye karşılık gelen birim şekildeğiştirme ise 0.0025'dir. Ayrıca grafikten elde edilen yığma prizma elastisite modülü ise 4270 MPa'dır.

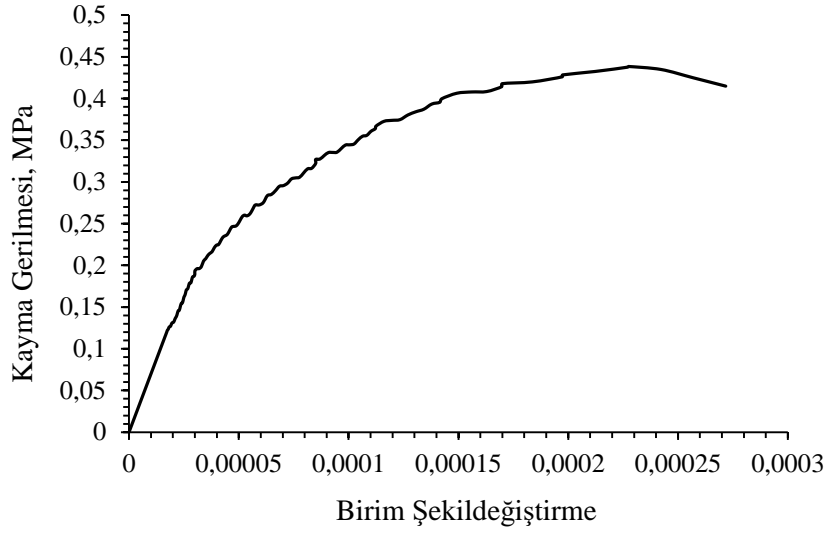
### 2.1.8.2. Doğrudan Kayma Deneyi

Derzler arasındaki kayma dayanımının belirlenmesi için BS EN 1052-3'e [90] göre ön basınç kuvveti olmaksızın gerçekleştirilen doğrudan kayma deneyine ait yükleme düzeneği ve deney elemanı Şekil 2.39'da görülmektedir.



Şekil 2.39. Doğrudan kayma testi yükleme düzeneği ve deney elemanı

Doğrudan kayma deneyi sonunda elde edilen gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği Şekil 2.40'da gösterilmektedir. Gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi, deneysel yük-yerdeğiştirme verileri kullanılarak elde edilmiştir. Burada gerilmelerin hesabında alan olarak, deney elemanının ortasında bulunan tam yığma birim elemanın sağındaki ve solundaki harcın toplam alanı, şekildeğiştirmeler elde edilen uzunluk ise ortalama düşey derz uzunluğu olarak alınmıştır.



Şekil 2.40. Kayma gerilmesi-birim şekildeğiştirme ilişkisi

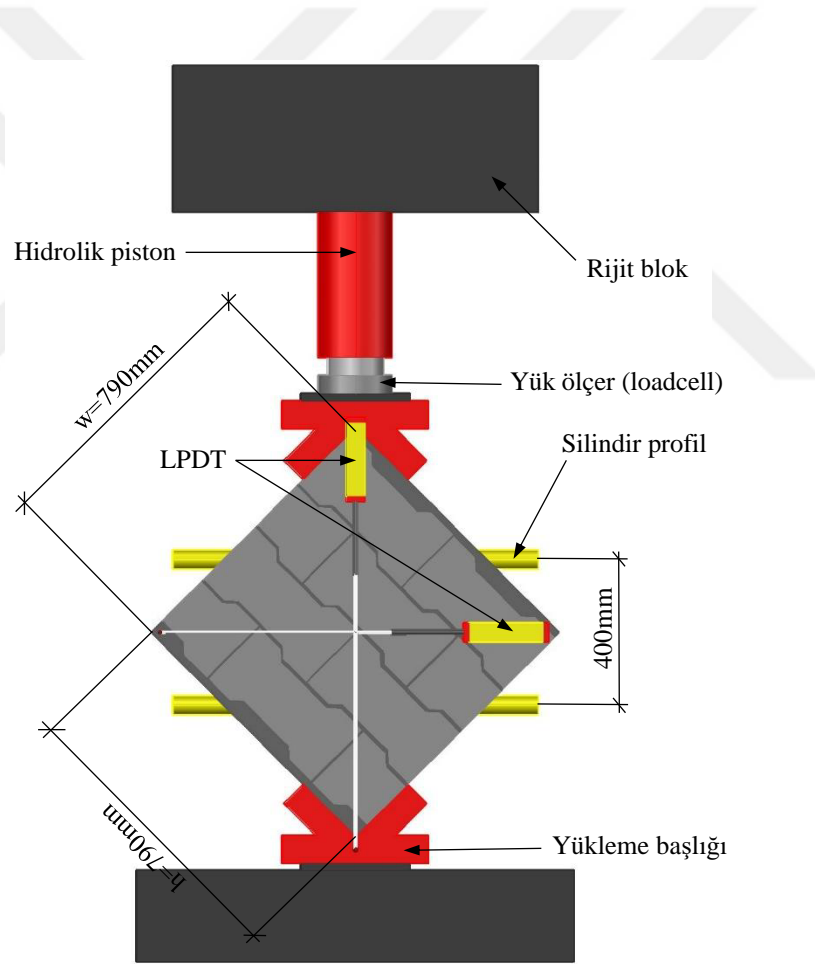
Direk kayma deneyi, aksenal basınç deneylerinde olduğu gibi yük artış hızı sabit tutulmaya çalışılarak monotonik artan yük etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.38'teki grafikten anlaşıldığı gibi, maksimum kayma gerilmesi 0.44 MPa olurken buna karşılık gelen şekildeğiştirme ise 0.00023'tür. Deney elemanı, beklendiği gibi düşey derz boyunca ayrılarak hasara uğramıştır (Şekil 2.41).



Şekil 2.41. Doğrudan kayma deney elemanında meydana gelen hasar durumu

### 2.1.8.3. Diyagonal Basınç Deneyi

Diyagonal basınç deneyinde, aksel basınç yükü altında, diyagonal kısalma ve buna dik doğrultudaki diyagonal uzamadan yararlanarak harç ve tuğladan oluşan duvarın kayma dayanımını belirlemek amaçlanmaktadır. Ayrıca bu deneyle dolaylı olarak çekme dayanımını da elde edilebilmektedir. ASTM E519/E519M [91] standardında bahsedilen bu deneyde, numune ölçüleri 1200x1200 mm olarak tanımlanmış olmakla birlikte, KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarı'ndaki imkanlar dahilinde numune boyutları 790x790 mm olarak seçilmiştir. Deney numunesine ait yükleme düzeneği ve yerdeğiştirme ölçerlerin yerleri Şekil 2.42'de görülmektedir.

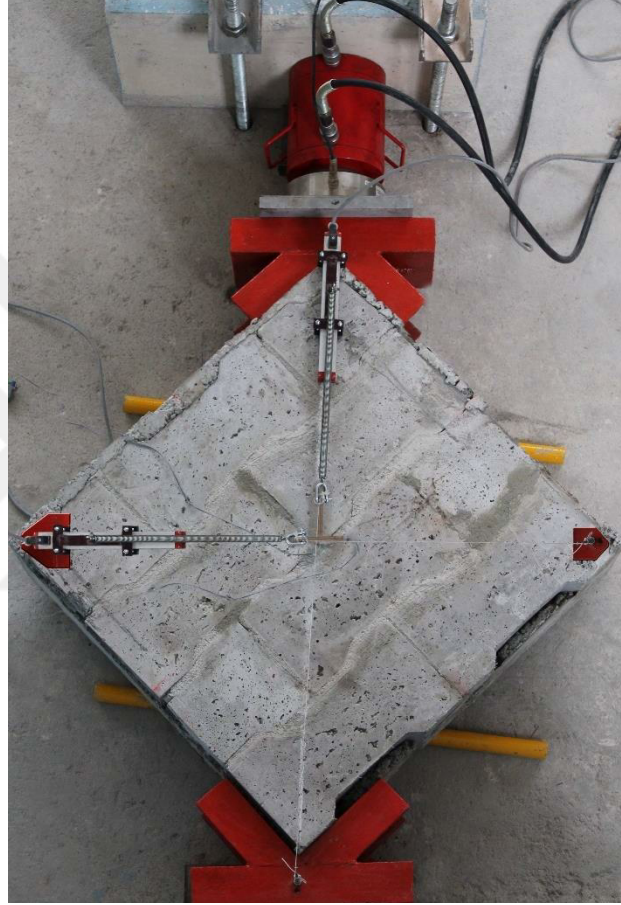


Şekil 2.42. Diyagonal basınç deneyi yükleme düzeneği

Deney numunesi yatayda 45° döndürülerek düşey artan monotonik basınç etkisi altında test edilmiştir. ASTM E519/E519M'e [91] göre yatayda gerçekleştirilen diyagonal basınç deneyinde, deney elemanının altına hareketi kolaylaştırıcı dairesel elemanlar



yerleştirilmelidir. Kilitli birim elemanlarla oluşturulan deney elemanının altına, söz konusu durumu sağlamak için 50 mm çapında ve 1000 mm uzunluğunda 2 adet silindir profil 400 mm ara ile yerleştirilmiştir. Deney elemanının tek yüzüne köşegenler doğrultusunda iki adet yerdeğiştirme ölçerleri (LPDT) sabitlenmiştir. Deneye hazır hale getirilen deney elemanı Şekil 2.43’de görülmektedir.

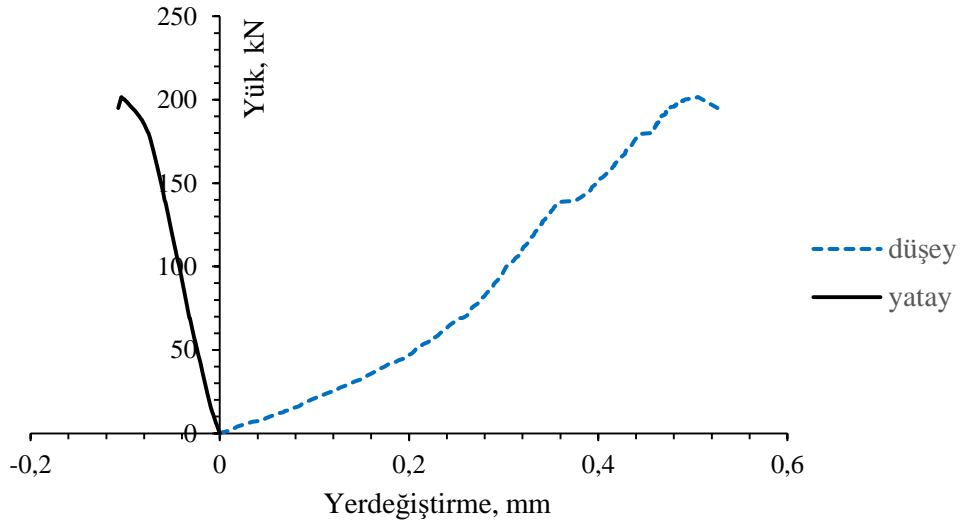


Şekil 2.43. Diagonal basınç deney elemanı

Deneyde yükleme, hidrolik kriko ile gerçekleştirilmiş ve yük değerleri 500 kN kapasiteli bir yük ölçer (loadcell) kullanılarak ölçülmüştür. Yükleme adımları, yükleme hızı sabit tutulmaya çalışılarak, saniyede 10 kN’luk artımlar ile uygulanmıştır. Deney sonunda elde edilen nihai kırılma şekli Şekil 2.44’te ve yük-yatay yerdeğiştirme ile yük-düşey yerdeğiştirme ilişkileri ise Şekil 2.45’te verilmiştir.



Şekil 2.44. Diyagonal basınç deney elemanının nihai kırılma şekli



Şekil 2.45. Diyagonal basınç deneyi yatay ve düşey yük-yerdeğiştirme ilişkileri

Şekil 2.44 ve Şekil 2.45 incelendiğinde, deney elemanının 202 kN'luk maksimum diyagonal basınç yükü altında düşey yönde 0.505 mm kısaldığı ve buna dik yönde ise 0.104 mm uzayarak gevrek şekilde dayanımını kaybettiği gözlemlenmiştir.

ASTM E519M-15'e göre gerçekleştirilen deneylerde yatay yönde meydana gelen kayma gerilmeleri;

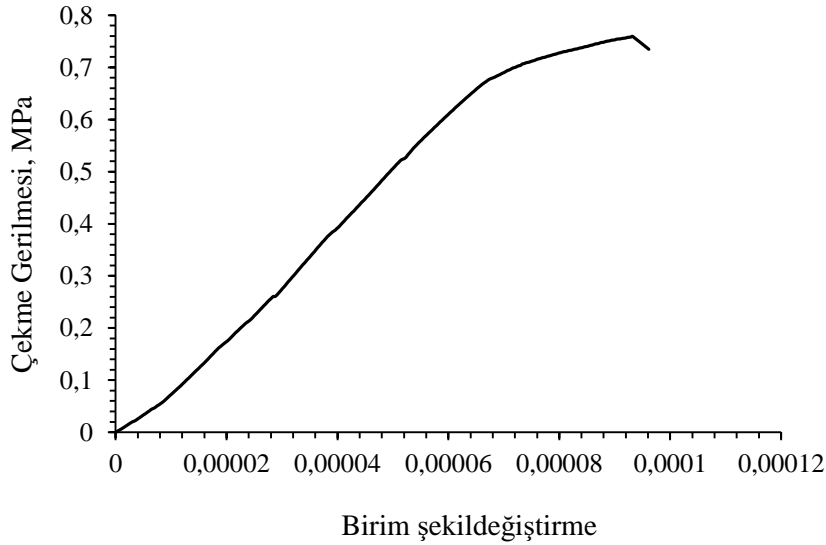


$$\tau = \frac{0.707 P_v}{A_n} \quad (2.3)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Burada,  $P_v$  , uygulanan yük ve  $A_n$  , net diyagonal en kesit alanıdır. Net en kesit alanının hesabında ise;

$$A_n = \frac{(w+h)}{2} t n \quad (2.4)$$

eşitliği kullanılmaktadır. Burada; w, h ve t sırasıyla deney numunesinin genişliğini, yüksekliğini ve kalınlığını ifade etmektedir. Numune en kesit alanı doluluk oranı ise n olarak tanımlanmaktadır. Bu eşitliklere göre hazırlanan yatayda oluşan çekme gerilmesi-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 2.46'da verilmektedir. Deney elemanının çekme dayanımı 0.76 MPa olarak elde edilmiştir.



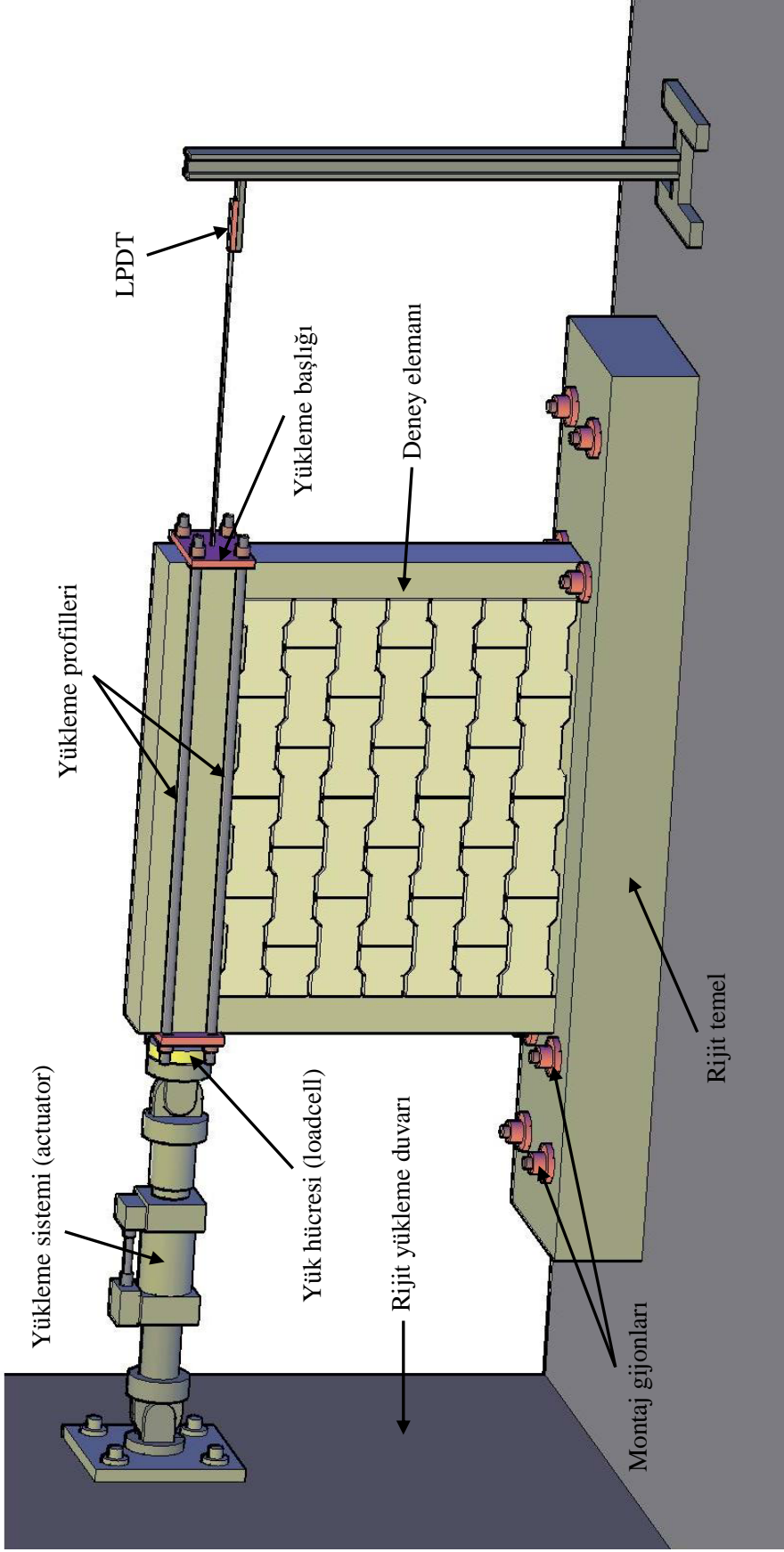
Şekil 2.46. Yatayda meydana gelen çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme ilişkisi

### 2.1.9. Yığma Duvarlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

Üretilen geleneksel ve kilitli yığma duvarların düzlem içi çevrimsel yatay yük etkisi altındaki davranışlarını belirleme deneyleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarında bulunan rijit duvarda

gerçekleştirilmiştir. Deney elemanlarının rijit delikli döşemeye montajları gijonlarla yapılmıştır ve 8 adet gijon kullanılmıştır. Deney düzeneği ile ölçüm sistemi Şekil 2.47’de ve deneye hazır hale getirilen kilitli deney elemanlarından biri ise Şekil 2.48’de görülmektedir.



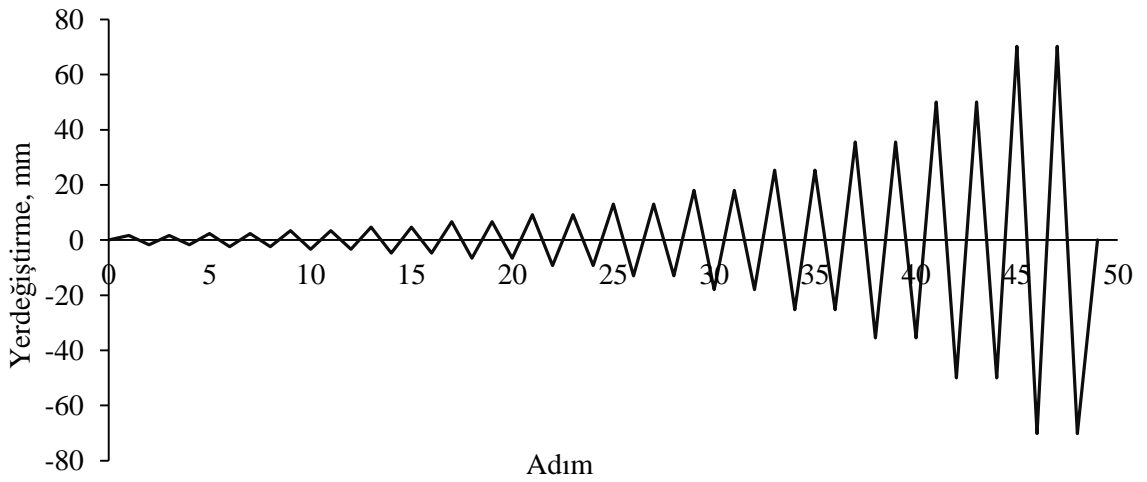


Şekil 2.47. Yığma duvar düzlem içi yüklemeye deney düzleniği ve ölçüm sistemi



Şekil 2.48. Deneye hazır hale getirilen kilitli deney elemanından bir görünüm

Çevrimsel yatay yük uygulanması için yukarıda verildiği gibi hazırlanan deney elemanlarına, FEMA-461'e [92] göre hazırlanan yükleme protokolü, bilgisayar yardımıyla uygulanmıştır. Deney elemanları üzerine uygulanan yatay yük protokolü, iki yönlü (itme ve çekme) giderek artan yerdeğiştirme çevrimleri şeklinde verilmiştir (Şekil 2.49). Deney esnasında elemanlarda meydana gelen çatlaklar gözlemlenerek, yük ve ölçüm alınan yerdeki yerdeğiştirme değerleri veri toplama sistemi ile kayıt altına alınmıştır.



Şekil 2.49. İki yönlü giderek artan yerdeğiştirme çevrimleri

## 2.2. Analitik Çalışmalar

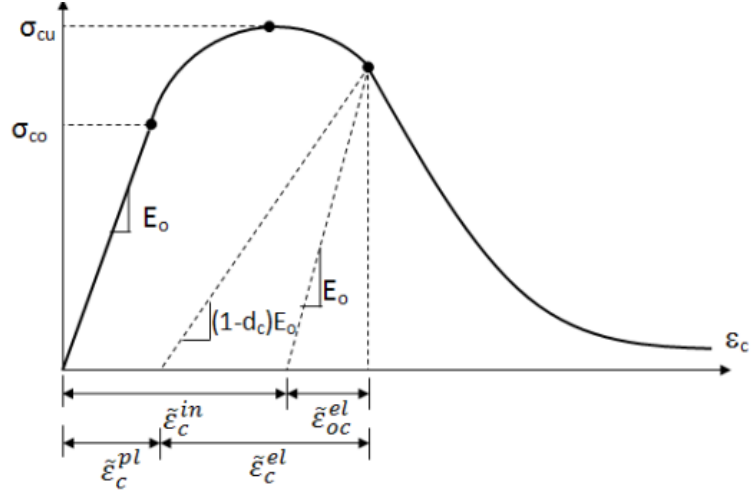
Çalışmanın bu bölümünde, kilitli yığma birim elemanlarla üretilen, yığma deney elemanlarının düzlem içi çevrimsel yük etkisi altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Analitik çalışma sonunda elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapmak için kullanılmıştır. Deneysel elemanların modellenmesinde ve analizlerinde, ABAQUS/CAE [93] sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Yığma duvarların modellenmesinde, basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi kullanılmıştır.

### 2.2.1. Sonlu Eleman Analizlerinde Kullanılan Malzeme ve Arayüzey Özellikleri

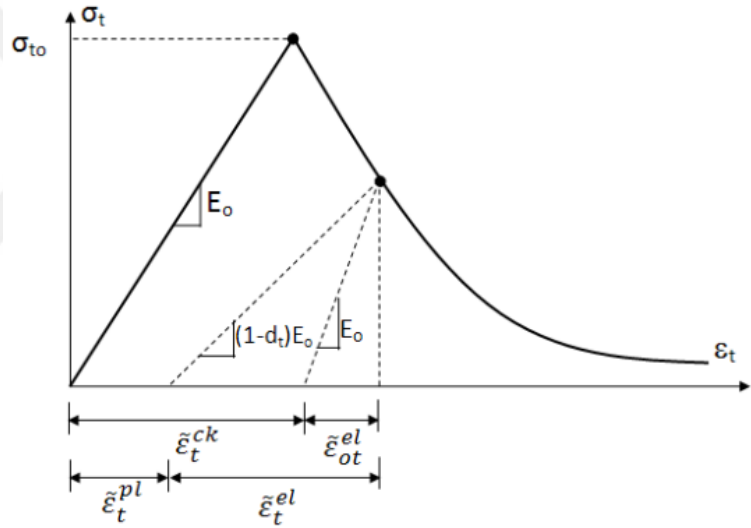
#### 2.2.1.1. Beton ve Yığma Birim Elemanların Malzeme Özellikleri

Deney elemanlarının sonlu eleman modellerinin oluşturulması sırasında beton, yığma birim elemanlar, donatı özellikleri ile arayüzey özellikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Beton ve yığma birim elemanlar için malzeme modeli olarak ABAQUS yazılımı içerisindeki plastik beton hasar modeli olan CDP (Concrete Damage Plasticity) malzeme modeli kullanılmıştır. CDP malzeme modeli, tekrarlı, monotonik vb. yüklemeye maruz betonun ve diğer yarı gevrek malzemelerin (harç, yığma birimler, kaya vb.) modellenmesinde kullanılan bir mekanik hasar modelidir. Teknik literatürde [61, 70, 80, 82] yığma yapıların modellenmesinde de sıklıkla kullanılan bu malzeme modelinde, basınç ezilmeleri ve çekme çatlakları olmak üzere iki temel göçme mekanizması tanımlanmaktadır. CDP malzeme modelindeki, betonun aksenal basınç ve aksenal çekme etkileri altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 2.50 ve Şekil 2.51'de görülmektedir. Söz konusu eğrilerden anlaşılacağı gibi, betonun aksenal basınç ve aksenal çekme altında elastik rijitliğinin azalmasını sağlayan iki bağımsız değişken tanımlanmıştır. Bunlar sırasıyla, aksenal basınç ve aksenal çekme altında, betonun elastik rijitliğindeki azalmayı kontrol eden 0-1 değerleri arasındaki  $d_c$  ve  $d_t$  parametreleridir [94].



Şekil 2.50. CDP malzeme modelinde, betonun basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi [94]



Şekil 2.51. CDP malzeme modelinde, betonun çekme altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi [94]

CDP’de basınç ve çekmeden dolayı oluşan elastik olmayan şekildeğiştirmelerin;

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (2.6)$$

eşitliklerinden hesaplanması önerilmektedir [94]. ABAQUS programında, betonun basınç ve çekme altındaki plastik şekil değiştirme değerlerini, rijitlik azaltma parametreleri ve elastik olmayan şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak otomatik olarak hesaplanmaktadır.

CDP malzeme modelinde, çekme ve basınçtaki gerilme şekil değiştirme ilişkilerinin yanında dilatasyon açısı ( $\psi$ ), dış merkezlik ( $e$ ), üç boyutlu gerilme uzayında akma yüzeyinin deviyatör düzleminde oluşturduğu akma eğrisini belirleyen değer ( $K_c$ ), viskozite parametresi ve iki eksenli yükleme durumundaki akma gerilmesinin, tek eksenli yükleme halinde elde edilen akma gerilmesine oranı ( $f_{bo}/f_{co}$ ) gibi bazı parametrelere de ihtiyaç duyulmaktadır [94]. ABAQUS [93],  $f_{bo}/f_{co}$  oranının 1.16,  $K_c$  değerinin 2/3,  $e$  değerinin ise 0.001 olarak alınmasını önermektedir. Beton için dilatasyon açısının  $25^0 < \psi < 40^0$  alınmasının uygun olacağı belirtilmiştir [95].

Bu çalışmada, betonun çekme ve basınçtaki gerilme-şekil değiştirme ilişkisi elde edilirken GB50010 [96] dikkate alınmıştır. Betonun Poisson oranının 0.2 olarak dikkate alındığı çalışmada, karakteristik basınç dayanımı ve elastisite modülü, çekme dayanımı ise başlık 2.1.7.1'deki standart silindir eksenel basınç deneyinden elde edilmiştir.

GB50010'a [96] göre eksenel basınç etkisi altındaki betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi matematiksel olarak aşağıdaki eşitliklerden hesaplanmaktadır.

$$y = \begin{cases} \frac{E_c \varepsilon_{cu}}{f_{cu}} x & (x \leq 0.143, \sigma \leq 0.4f_{cu}) \\ \frac{nx}{n-1+x^n} & (0.143 < x \leq 1) \\ \frac{x}{\alpha_c (x-1)^2 + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.7'deki  $E_c$ ,  $f_{cu}$ ,  $\varepsilon_{cu}$  ve  $\alpha_c$  sırasıyla betonun elastisite modülünü, gerilme-şekil değiştirme diyagramındaki maksimum gerilmeyi ve bu gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme ile gerilme şekil değiştirme diyagramında azalan kısmı temsil eden bir sabiti göstermektedir. Eşitlikteki  $n$ ,  $x$  ve  $y$  ise sabit sayılar olup;

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{cu}}{E_c \varepsilon_{cu} - f_{cu}} \quad (2.8)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cu}} \quad (2.9)$$

$$y = \frac{f}{f_{cu}} \quad (2.10)$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, analitik hesaplardaki;  $\alpha_c=1.36$ ,  $f_{cu} = 30 \text{ MPa}$ ,  $\varepsilon_{cu} = 0.00167$  ve  $E_c = 31211 \text{ MPa}$  'dır. Ayrıca  $n=2.36$  olarak hesaplanmıştır.

GB50010'a [96] göre betonun aksenal çekme etkisindeki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi;

$$y = \begin{cases} \frac{E_c \varepsilon_{to}}{f_{to}} x & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\alpha_t (x-1)^{1.7} + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (2.11)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Burada;  $f_{to}$ ,  $\varepsilon_{to}$  ve  $\alpha_t$  sırasıyla betonun çekme dayanımını ve bu değere karşılık gelen şekildeğiştirme oranı ile gerilme-şekildeğiştirme diyagramında azalan kısmı temsil eden bir sabiti göstermektedir. Eşitlikteki x ve y sabit sayılar olup;

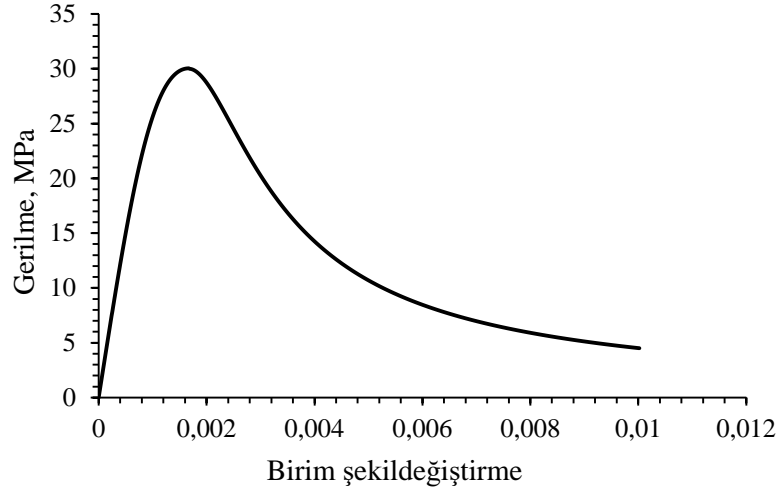
$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{to}} \quad (2.12)$$

$$y = \frac{f}{f_{to}} \quad (2.13)$$

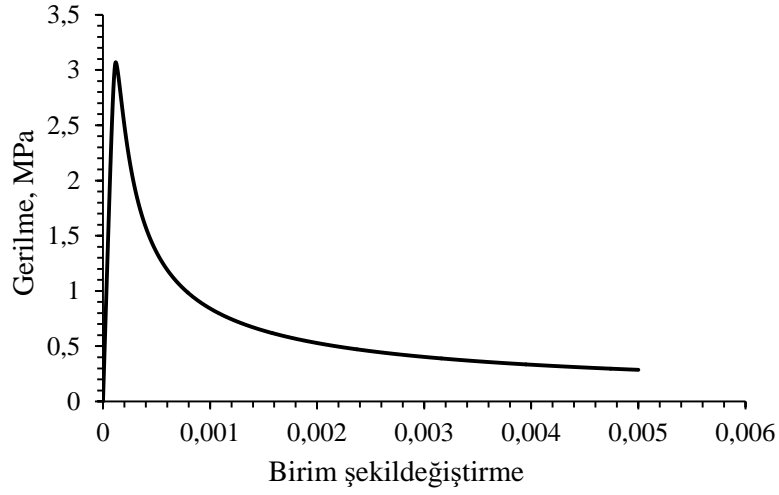
eşitlikleri ile hesaplanmaktadır. Analitik hesaplarda dikkate alınan  $\alpha_t = 2.95$ ,  $\varepsilon_{to} = 0.000119$  ve  $f_{to} = 3.07 \text{ MPa}$  'dır.

Deney elemanlarının sonlu eleman analizlerinde, yukarıdaki denklemlerden elde edilen, betonun basınç ve çekme altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 2.52 ve Şekil 2.53'te ve diğer özellikleri Tablo 2.12'de verilmektedir.





Şekil 2.52. CDP modelde kolon, kiriş ve dolgu elemanlarda kullanılan beton için tanımlanan aksenal basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 2.53. CDP modelde kolon, kiriş ve dolgu elemanlarda kullanılan beton için tanımlanan aksenal çekme altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

Tablo 2.12. CDP modelde kolon, kiriş ve dolgu elemanlarda kullanılan beton için tanımlanan bazı mekanik özellikler

Özgül ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )		2385
Elastik özellikler	Elastisite modülü, E (MPa)	31211
	Poisson oranı, $\nu$	0.2
Plastik özellikler	Dilatasyon açısı, $\psi$	36
	Dışmerkezlilik, $e$	0.1
	$f_{bo}/f_{co}$	1.16
	$K_c$	0.667
	Viskozite Parametresi	0.001

Bu çalışmadaki analitik hesaplarda dikkate alınan, kilitli yığma birim elemanların basınç etkisi altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi;

$$y = \begin{cases} \frac{E_b \varepsilon_{cb}}{f_{cb}} x & (x \leq 0.365, f \leq 0.67f_{cb}) \\ \frac{\mu}{1+(\mu-1)x^{\left(\frac{\mu}{\mu-1}\right)}} x & (x > 0.365) \end{cases} \quad (2.14)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır [97]. Bu eşitlikte;  $E_b$ ,  $f_{cb}$  ve  $\varepsilon_{cb}$  sırasıyla yığma prizmanın elastisite modülünü, basınç dayanımını ve basınç dayanımına karşılık gelen birim şekildeğiştirmeyi ifade etmektedir. Burada,  $n$ ,  $x$  ve  $y$  sabitleri ise;

$$\mu = \frac{E_b \varepsilon_{cb}}{f_{cb}} \quad (2.15)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{to}} \quad (2.16)$$

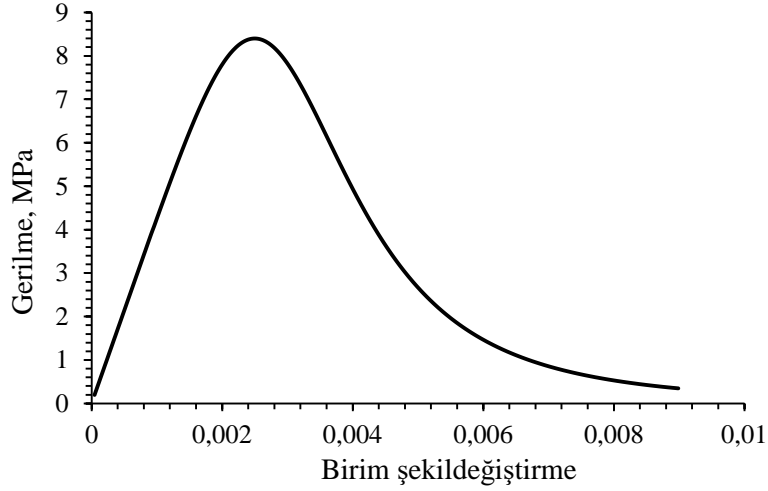
$$y = \frac{f}{f_{to}} \quad (2.17)$$

eşitliklerinden hesaplanmaktadır [97]. Yığma birim elemanların Poisson oranının 0.2 olarak dikkate alındığı çalışmada, basınç dayanımı ve elastisite modülü ve basınç dayanımına

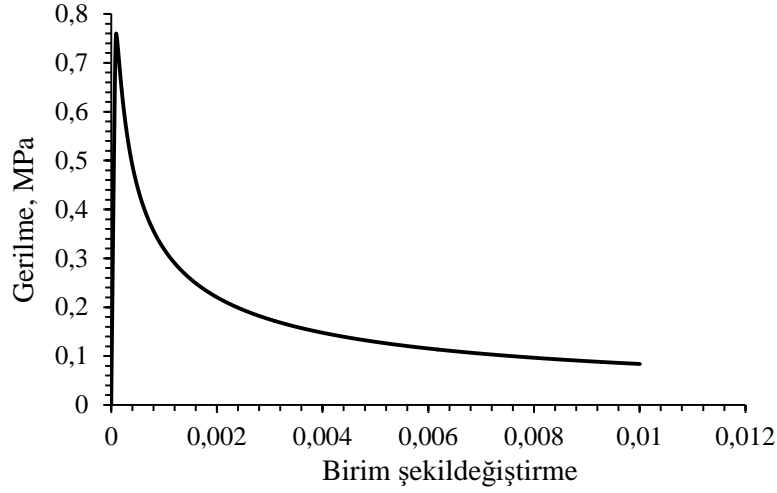
karşılık gelen birim şekildeğiştirme, başlık 2.1.8.1'deki kilitli yığma birimlerden oluşan prizmatik numunenin aksenal basınç deneyinden elde edilmiştir. Analitik hesaplarda kullanılan değerler,  $f_{cb} = 8.40 \text{ MPa}$ ,  $\varepsilon_{cb} = 0.0025$  ve  $E_b = 4270 \text{ MPa}$ 'dır. Bu değerlerden  $\mu = 1.27$  olarak hesaplanmıştır.

Yığmanın çekme gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi ise betonun çekme gerilme-şekildeğiştirmesi ile benzer şekilde hesaplanmıştır. Bu hesaplarda yığma birim elemanların çekme dayanımı başlık 2.1.8.3'ten  $f_{tb} = 0.76 \text{ MPa}$  ve bu değere karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri ise  $\varepsilon_{tb} = 0.000093$  olarak dikkate alınmıştır.

Analitik hesaplarda yığma birim elemanlar için kullanılan, yukarıda verilen eşitliklerden elde edilen, kilitli yığma birim elemanların basınç ve çekme altındaki gerilme şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 2.54 ve Şekil 2.55'te, diğer özellikleri Tablo 2.13'te verilmektedir. Tablo 2.13'teki yığma birim mekanik özelliklerinden dilatasyon açısı, deneme yanılma yöntemi ile elde edilmiştir.



Şekil 2.54. CDP modelde aksenal basınç altında yığma birim elemanlar için tanımlanan gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi



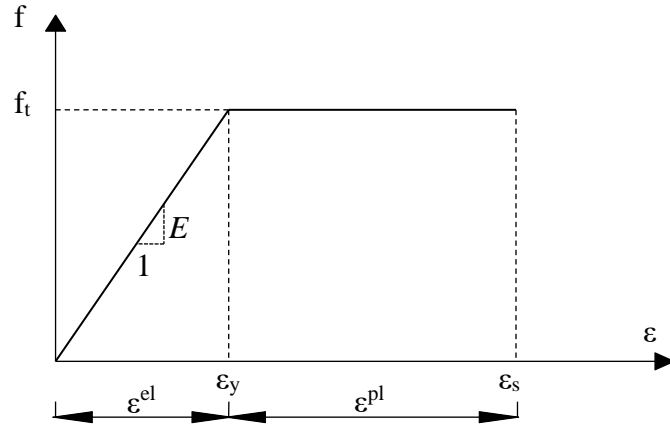
Şekil 2.55. CDP modelde eksenel çekme altında yığma birim elemanlar için tanımlanan gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi

Tablo 2.13. CDP modelde yığma birim elemanlar için tanımlanan bazı mekanik özellikler

Özgül ağırlık ( $\text{kg/m}^3$ )		1350
Elastik özellikler	Elastisite modülü, $E$ (MPa)	4270
	Poisson oranı, $\nu$	0.2
Plastik özellikler	Dilatasyon açısı, $\psi$	32
	Dışmerkezlilik, $e$	0.1
	$f_{bo}/f_{co}$	1.16
	$K_c$	0.667
	Viskozite Parametresi	0.001

### 2.2.1.2. Donatı Malzeme Özellikleri

Deney elemanlarında kullanılan donatının malzeme özelliklerinin tanımlanmasında, elastik ve plastik davranışın birbirinden ayrı düşünüldüğü, elasto plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modelinde elastik davranış, elastisite modülü ( $E$ ) ve Poisson oranı ( $\nu$ ) ile tanımlanırken, plastik davranış ise gerçek gerilme ve plastik şekildeğiştirme ile tanımlanmaktadır (Şekil 2.56).



Şekil 2.56. Elasto-plastik malzeme modeli

Deney elemanlarında kullanılan 8 mm ve 12 mm çaplı donatılar için sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.14’te verilmektedir. Sonlu eleman analizlerinde donatının akmadan sonraki dayanımı ihmal edilmiştir.

Tablo 2.14. Sonlu eleman modellerinde kullanılan donatı özellikleri

		Özgül ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	7800
Ø8	Elastik özellikler	Elastisite modülü (MPa)	210577
		Poisson oranı	0.3
	Plastik özellikler	Akma dayanımı, (MPa)	438
		Plastik şekildeğiştirme	0.25
Ø12	Elastik özellikler	Elastisite modülü (MPa)	208261
		Poisson oranı	0.3
	Plastik özellikler	Akma dayanımı (MPa)	471
		Plastik şekildeğiştirme	0.22

### 2.2.1.3. Yığma Birim Elemanlar Arasındaki Arayüzeylerin Özellikleri

Basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminde, için yığma birim elemanlar, harç kalınlığının orta noktasından geçtiği düşünülen bir ara yüzeye kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilmektedir. Bu durumda modelde meydana gelebilecek çatlakların

arayüzeylerde olacağı kabul edilmektedir. Bu nedenle yığma birimlerin arasındaki arayüzeyler özelliklerinin tanımlanması çok önemli olmaktadır.

Bu çalışmada arayüzey özelliklerinin tanımlanmasında, yüzey kontak davranış özellikleri olan normal davranış, teğetsel davranış, kohezif davranış ve hasar kriterleri dikkate alınmıştır.

Normal davranışın tanımlanması ile analizler sırasında yığma birimlerin birbiri içine girmesi engellenmektedir. Yığma birimler arasında tanımlanan kontağın sıfır kalınlıklı olması sebebiyle normal davranış sert (hard) kontak olarak dikkate alınmıştır [82].

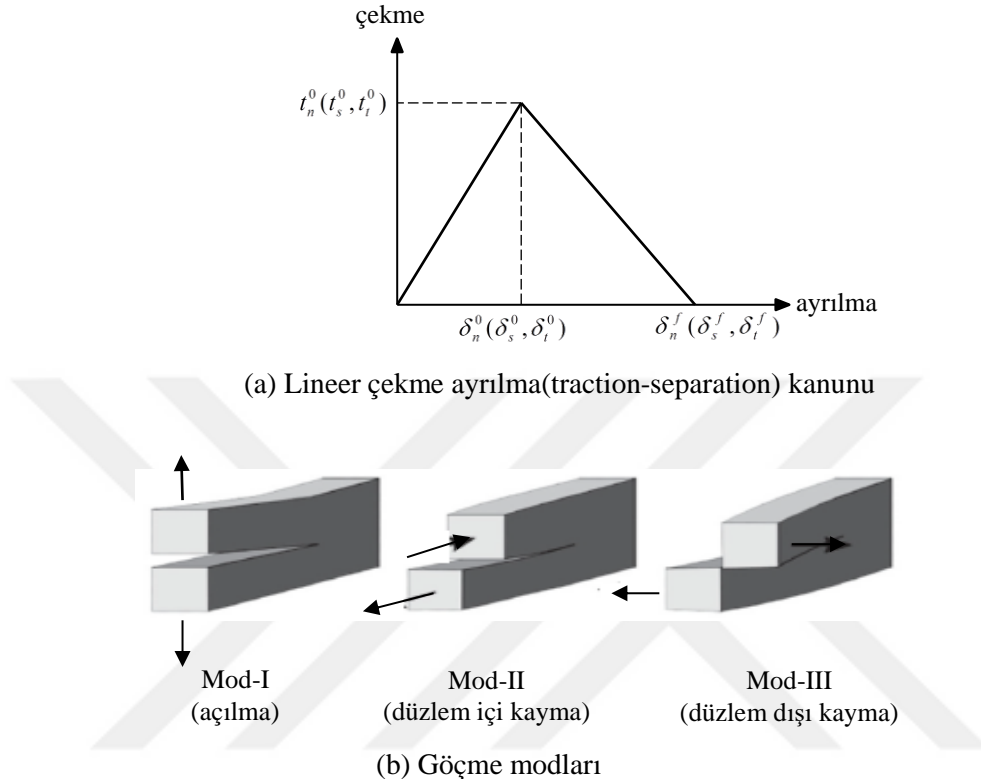
Harcın dayanımını kaybetmesi durumunda iki yığma birim eleman arasındaki kayma gerilmelerinin sürtünme kuvveti ile karşılanacağı kabulü ile tanımlanan teğetsel davranış Coulomb teorisini temel almaktadır. Teğetsel davranış, iki yüzey arasındaki kayma gerilmeleri, maksimum kayma dayanımına ulaşıncaya kadar sistemi etkilememektedir. Bu teoriye göre kritik kayma gerilmesi;

$$\tau_{cr} = \eta N \quad (2.7)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Burada  $\eta$  ve  $N$  sırasıyla sürtünme katsayısı ve kaymanın olduğu iki yüzey arasındaki normal gerilmeyi ifade etmektedir [93]. Yapılan çalışmalar sonunda yığma yapılar için sürtünme katsayısının 0.6-0.8 arasında alınmasının uygun olacağı belirtilmiştir [82, 84]. Bu çalışmadaki analizlerde sürtünme katsayısına söz konusu aralıkta değerler verilmiş ve en uygun değer 0.78 olduğuna karar verilmiştir.

Bu çalışmada birbirine harçla yapışmış olan iki yığma birim arasındaki ara yüzeyde meydana gelecek hasarın başlangıç ve ilerlemesinin tanımlanmasında çekme-ayırılma (traction-separation) kanunu dikkate alınmıştır (Şekil 2.57). İki yüzey arasındaki yapışmayı kohezif arayüzey olarak tanımlamayı sağlayan bu yasaya göre yüzeyler arasındaki kohezyonun azalması kohezif rijitliğin azalması ile ortaya çıkmaktadır. Bu durumda teğetsel davranış kayma dayanımına katkıda bulunmakta ve kohezif davranışın tamamen ortadan kalkması halinde arayüzeylerdeki kaymaları yalnızca teğetsel davranış kontrol etmektedir [34]. Lineer traction-separation kanunu eşitlik 1.1'deki ifadeyi temel almakta olup davranışın tanımlanmasında normal ve kayma rijitlikleri olan  $k_n$  ve  $k_s$  değerlerinin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yığma yapılarda kohezif davranışın tanımlanmasında bu katsayıların harç ve yığma birim elastisite modüllerine bağlı olarak hesaplanması gerektiği belirtilmektedir [20, 28, 29]. Bu çalışmada normal ve kayma rijitlik

değerleri eşitlik 1.8 ve 1.9'daki gibi harcın elastisite modülü ve kayma modülüne bağlı olarak sırasıyla  $423 \text{ N/mm}^3$  ve  $169 \text{ N/mm}^3$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.57. Linear çekme-ayrılma (traction-separation) davranışı ve göçme modları [93]

Linear traction-separation kanunu arayüzey hasarları olarak Şekil 2.50'de görülen, açılma, düzlem içi kayma ve düzlem dışı kayma olmak üzere üç temel göçme modunu dikkate almaktadır [93]. Kohezif özelliğin azalmaya başlaması sistemde maksimum gerilmelere ulaşıldığı ve arayüzeylerde hasarların oluşmaya başladığı anlamına gelmektedir. Başka bir deyişle düzlemsel ve normal yönden herhangi birindeki gerilmelerin maksimum gerilmeleri aşması halinde arayüzeylerde, Şekil 2.50'de gösterilen göçme modları oluşmaya başlamaktadır. Bu çalışmada hasar başlangıç değerleri, yüzeyin normali doğrultusundaki ayrılma modu için harcın çekme dayanımı olan  $1.42 \text{ MPa}$ , düzlem içi kayma göçme modu için ise doğrudan kayma deneyinden elde edilen maksimum kayma gerilmesi  $0.44 \text{ MPa}$  dikkate alınmıştır.  $\delta^0$  olarak ifade edilen başlangıç hasarı yerdeğiştirme değerinin ise yapılan analizler sonunda  $1.4 \text{ mm}$  alınmasının uygun olacağı belirlenmiştir. Çalışmada düzlem dışı

yönde herhangi bir yükleme durumu söz konusu olmayacağı için düzlem dışı kayma durumuna ait parametreler dikkate alınmamıştır.

Bu çalışmada dikkate alınan yığma birim elemanlar arasındaki arayüzeylerin kohezif kontak özellikleri Tablo 2.15'te özetlenmektedir.

Tablo 2.15. Yığma duvar arayüzey kontak özellikleri

Normal davranış (normal behavior)	Sert kontak (hard contact)		
Teğetsel davranış (tangential behavior)	Sürtünme katsayısı, $\eta$		0.78
Kohezif davranış (cohesive behavior)	Rijitlik katsayıları	$k_n$ (N/mm <sup>3</sup> )	423
		$k_s$ (N/mm <sup>3</sup> )	169
		$k_t$ (N/mm <sup>3</sup> )	0
	Hasar	$t_n^0$ (MPa)	1.42
		$t_s^0$ (MPa)	0.44
		$t_t^0$ (MPa)	0
		$\delta^0$ (mm)	1.4

### 2.2.2. Deney Elemanlarının Modellenmesi

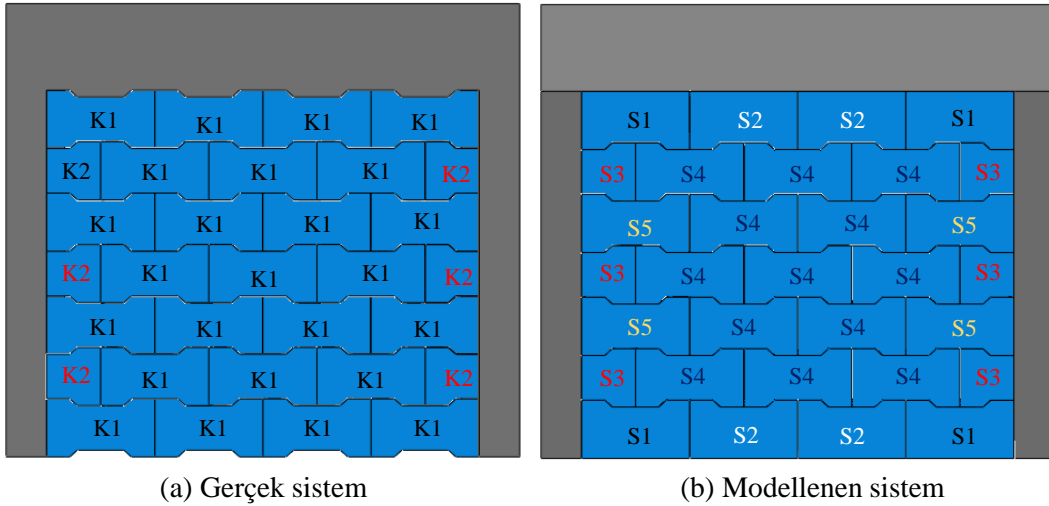
Basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi ile yığma duvarların modellenmesinde, arayüzeylerde tanımlanan kontak özelliklerinin çokluğu sebebiyle analiz süresi çok uzamaktadır. Bu nedenle kilitli birim elemanların geometrilerinde sistemin nihai davranışını etkilemeyecek şekilde bazı sadeleştirmeler yapılmıştır. Bütün kilitli yığma duvar deney elemanlarının modellenmesinde uygulanan bu geometrik sadeleştirmeler ve modellemeler ile ilgili bazı detaylar aşağıda açıklanmaktadır.

- ✓ Yığma birim elemanların düşey kilitlerinin düzlem içi davranıştan ziyade düzlem dışı davranışa katkısının daha çok olacağı dikkate alınarak modellemelerde bu kilitler ihmal edilmiştir.
- ✓ Yığma birim elemanların üst orta bölümünde yatay donatı geçişine olanak sağlayan kanallar modellemelerde dikkate alınmamıştır.



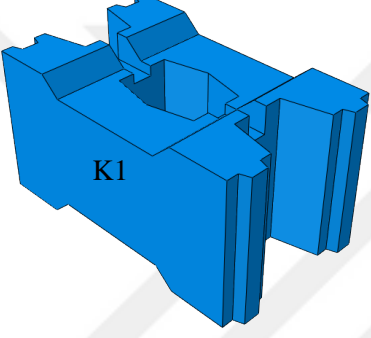
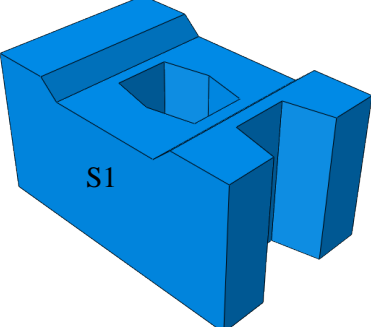
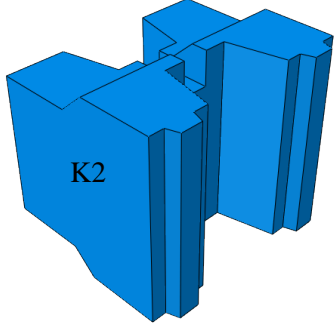
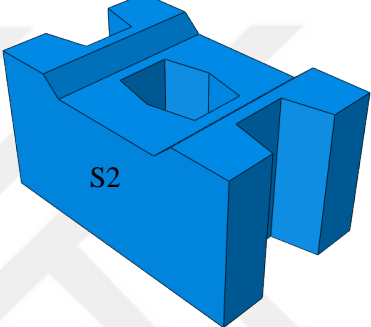
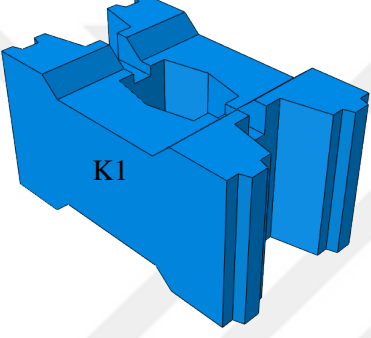
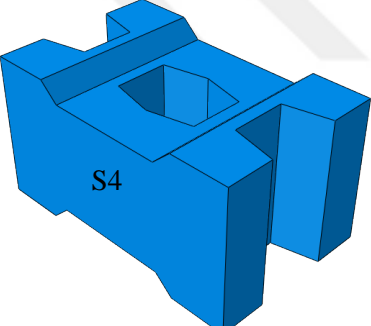
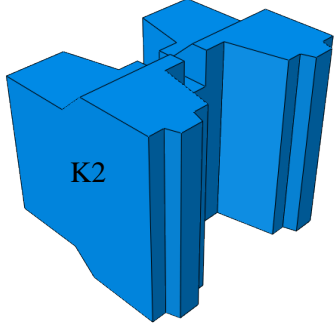
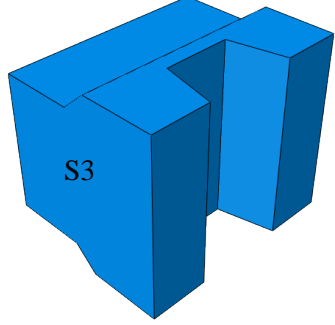
- ✓ Duvar içinden donatıların geçtiği KYDDE-3'te yatay donatıların kilitli yığma birimlerin içinden geçtiği kabul edilmiştir.
- ✓ Yığma duvarların betonarme çerçeve ile birleştiği bölgelerdeki yığma birim elemanların içindeki boşluklar modellerde dolu kabul edilmiştir.
- ✓ Yığma duvarların ilk sırasını oluşturan kilitli yığma birimlerin altta kalan yatay kilitleri ve en üst sıradaki yığma birimlerin ise üstte kalan yatay kilitleri dikkate alınmamıştır.
- ✓ Yığma duvarların üzerindeki yüklem kirişi modellerde rijit kiriş olarak dikkate alınmıştır.
- ✓ Deneysel elemanlarının üzerine inşa edildiği rijit temeller modellemelerde dikkate alınmamıştır.

Basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi ile yığma duvarların modellenmesi için yığma birimler, harç kalınlığının orta noktasından geçtiği düşünülen bir ara yüzeye kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilmiştir. Kilitli yığma birimlerle üretilen deneysel elemanlarına ait gerçek sistem ve sonlu eleman modellerinde kullanılan iyileştirilmiş sisteme ait önden görünüş Şekil 2.54'te görülmektedir. Ayrıca, Şekil 2.58'de görülen gerçekteki sisteme ait her bir kilitli yığma birim elemanın, sonlu eleman analizlerinde kullanılan sadeleştirilmiş modelleri Tablo 2.16'da ayrıntılı olarak görülmektedir.



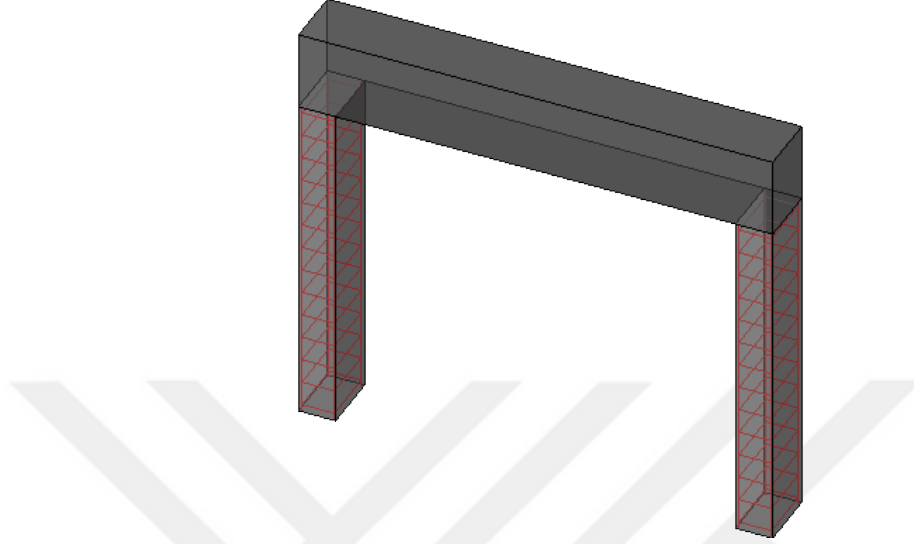
Şekil 2.58. Kilitli yığma duvarlara ait gerçek sistem ve modellenen sistem önden görünüşü

Tablo 2.16. Kilitli yığma birim elemanların gerçek ve sonlu eleman analizlerinde kullanılan sadeleştirilmiş modelleri

Gerçek kilitli yığma birim elemanlar	Sonlu eleman analizlerinde kullanılan sadeleştirilmiş kilitli yığma birim elemanlar
 <p>K1</p>	 <p>S1</p>
 <p>K2</p>	 <p>S2</p>
 <p>K1</p>	 <p>S4</p>
 <p>K2</p>	 <p>S3</p>

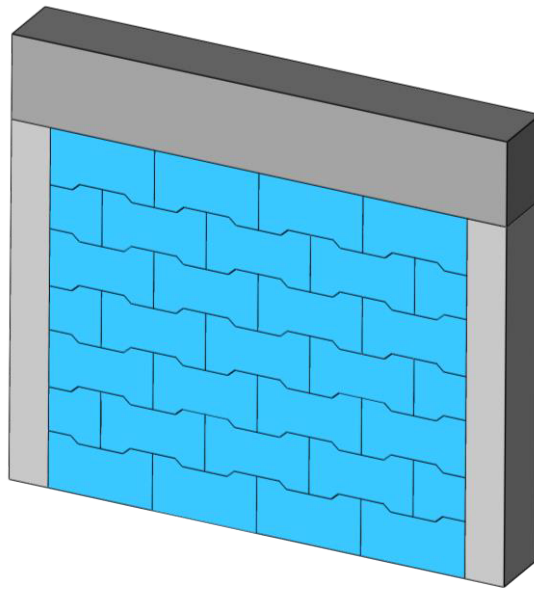
Kilitli yığma birim elemanlarla inşa edilen deney elemanlarına ait analitik modeller bahsedilen bütün detaylar dikkate alınarak basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi ile

oluşturulmuştur. Deney elemanlarının tamamında aynı olan yükleme çerçevesinin sonlu eleman programında modellenmiş hali şekil 2.59'da görülmektedir.

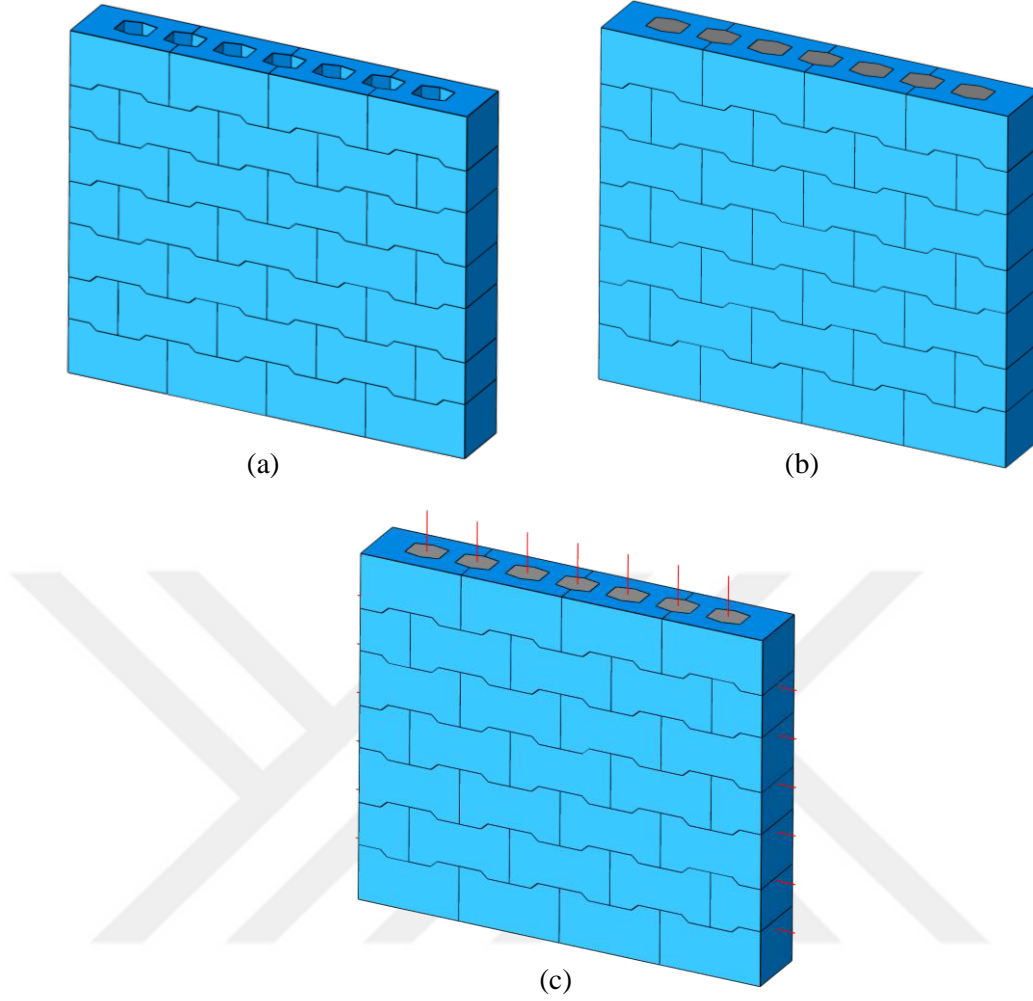


şekil 2.59. Yığma duvar deney elemanları yükleme çerçevesinin sonlu eleman programında modellenmiş hali

Deney elemanlarının ve bu deney elemanlarına ait boşluklu, dolgulu ve donatılı yığma duvarların, sonlu eleman programında modellenmiş halleri sırasıyla şekil 2.60 ve şekil 2.61'de görülmektedir.



şekil 2.60. Deney elemanlarının sonlu eleman modeli

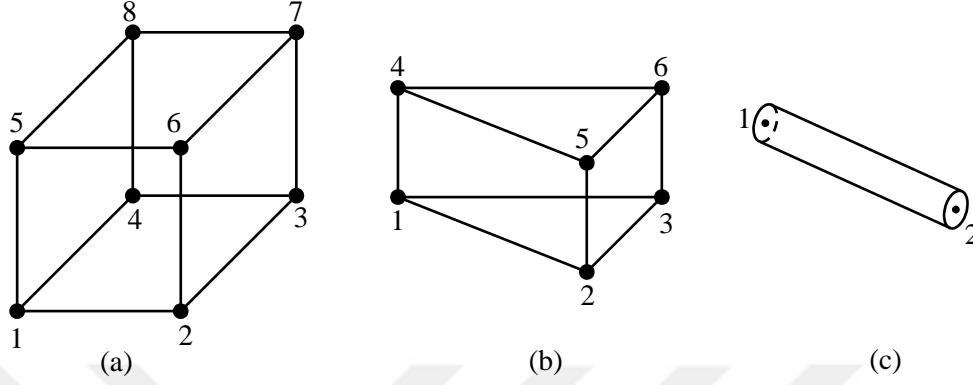


Şekil 2.61. Deney elemanlarına ait (a) boşluklu, (b) dolgulu ve (c) donatılı yığma duvar sonlu eleman modelleri

### 2.2.3. Sonlu Elemanlara Ayırma

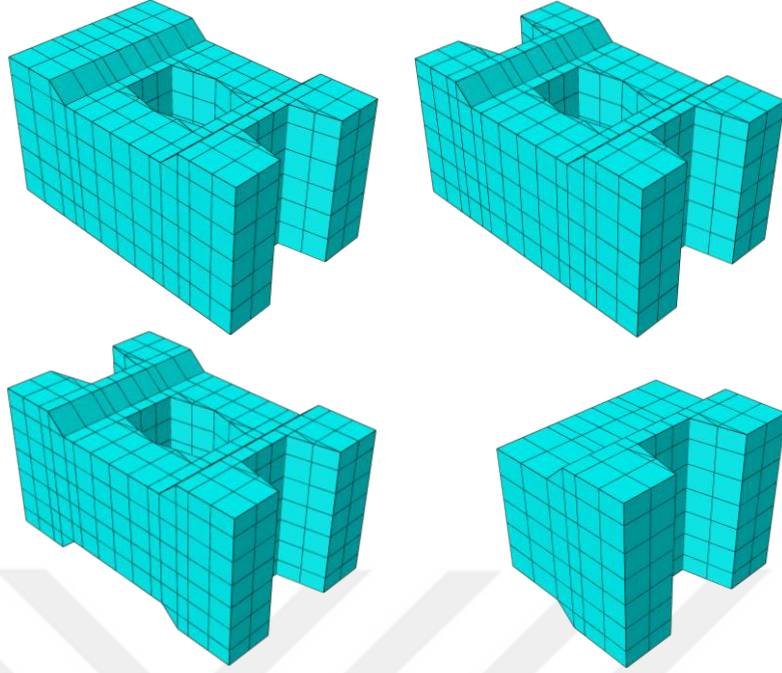
Deney elemanlarının modellenmesinde, yığma birimler ve rijit kirişler doğrusal kübik C3D8R katı eleman ile modellenirken, donatılar ise T3D2 çubuk eleman ile modellenmiştir. Ayrıca kilitli birim elemanların ve dolgu betonunun eğrisel bölgelerinde C3D6 katı eleman kullanılmıştır. Kübik katı eleman C3D8R, her biri üç serbestlik derecesine sahip olan toplam 8 düğüm noktasına sahiptir. Donatıların modellenmesinde kullanılan T3D2 çubuk elemanı ise her bir ucunda bir düğüm noktasına ve her bir düğüm noktasında ise üç ötelenme serbestlik derecesine sahip, yalnızca çekme veya basınç kuvvetleri alabilen bir sonlu eleman tipidir. Üçgen prizma şeklindeki C3D6 katı eleman tipi her biri üç serbestlik derecesine sahip

toplam altı düğüm noktasına sahiptir. C3D8R kübik katı eleman, C3D6 kama eleman ve T3D2 çubuk eleman tipleri ve düğüm noktaları Şekil 2.62’de görülmektedir.

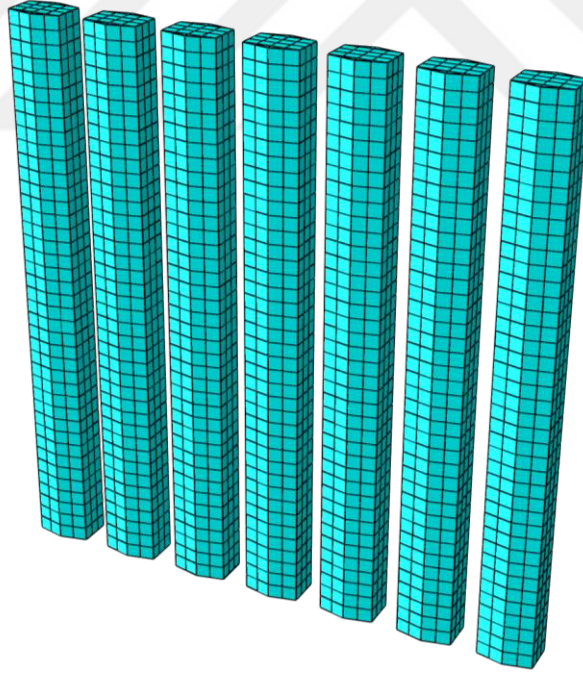


Şekil 2.62. Sonlu eleman modellerinde kullanılan (a) C3D8R, (b) C3D6 ve (c) T3D2 eleman tipleri [93]

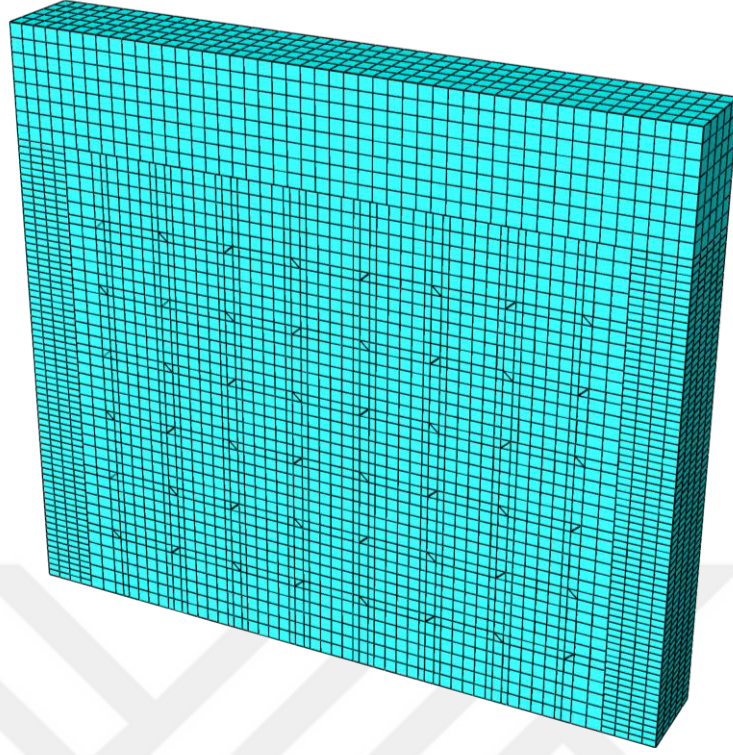
Modellenen deney elamanlarının sonlu elemanlara ayrılması kontrollü mesh yapılarak sağlanmıştır. Modellerde kilitli birimler ve dolgu betonu en küçük boyutu 18.75mm ve en büyük boyutu 35mm olan kübik ve kama elemanlara, düşey hatıllar 37.5x20x50mm boyutlarındaki kübik elemanlara, rijit kiriş en küçük boyutu 37.5mm ve en büyük boyutu 40mm olan kübik elemanlara ayrılmıştır. Bütün deney elemanlarının sahip olduğu tam ve yarım kilitli yığma birim elemanlara, KYDDE-2 ve KYDDE-3’ün sahip olduğu dolgu betonuna ve deney elemanlarının sonlu eleman modellerine ait bir görünüş sırasıyla Şekil 2.63, Şekil 2.64 ve Şekil 2.65’te görülmektedir.



Şekil 2.63. Kilitli yığma birim elemanlara ait sonlu eleman modelleri



Şekil 2.64. Dolgu betonu sonlu eleman modeli



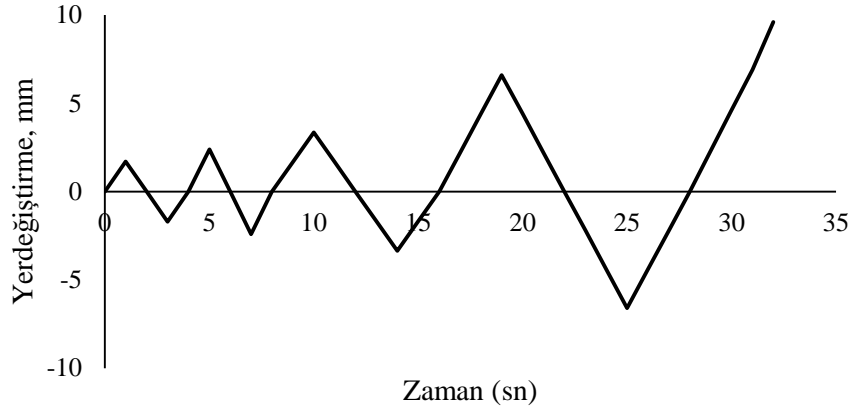
Şekil 2.65. Deney elemanlarından birine ait sonlu eleman görünümü

#### **2.2.4. Sınır Şartları, Yükleme Durumu ve Analiz**

Kilitli birimlerle oluşturulan deney elemanlarının sonlu eleman modellerinde sınır şartı olarak bütün elemanların tabanları ankastre mesnet olarak modellenmiştir.

Sonlu eleman modelleri analizlerinde Şekil 2.66'da görülen düzlem içi yükleme protokolü dikkate alınmıştır. Özellikle yüzey kontaklarının çokluğu sebebiyle çok uzayan analiz süreleri analitik çözümü zorlaştırmıştır. Bu nedenle yükleme protokolünde her bir itme ve çekme çevrimi bir kez yapılmış ve deneysel gözlemlere göre maksimum yük elde edilecek şekilde revize edilmiştir.





Şekil 2.66. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan, iki yönlü giderek artan yük çevrimleri

Analizlerde yakınsama problemlerini ortadan kaldıran, zamana bağlı dinamik ve yarı-statik problemlerin modellenip çözümlenmesine olanak sağlayan dinamik/explicit analiz tipi seçilmiştir. Yükleme protokolü, sistem saniyede ortalama 1.7 mm yerdeğiştirme yapacak şekilde planlanmış olup toplam analiz süresi 32 sn. olarak belirlenmiştir. Yükleme adımlarının küçük seçilmesi ile, sistemin yerdeğiştirme hızının artırılması ile artan sistem kinetik enerjisinin, explicit analizlerde sabit kalması gereken toplam enerji değerini değiştirerek elde edilen sonuçların güvenilirliğinin azalması önlenecektir [93].



### **3. BULGULAR VE İRDELEMELER**

Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında, biri geleneksel taşıyıcı yığma tuğla ve diğer üçü bu çalışma kapsamında geliştirilen kilitli yığma birim elemanlar ile üretilen toplam dört adet yığma duvar, tekrarlı yatay yük etkisi altında deneye tabi tutulmuştur. Deney elemanlarının özellikleri Bölüm 2’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Kilitli yığma birim elemanlar kullanılarak, yığma duvarların yatay yük taşıma kapasitelerinin artırılması amacıyla gerçekleştirilen çalışmanın bu bölümünde; elde edilen bulgular verilmiş ve deney elemanlarının yük-yerdeğiştirme ilişkileri, dayanım zarfı eğrileri, enerji tüketme kapasiteleri ve rijitlik azalmasına ait grafikler elde edilmiş ve irdelenmiştir.

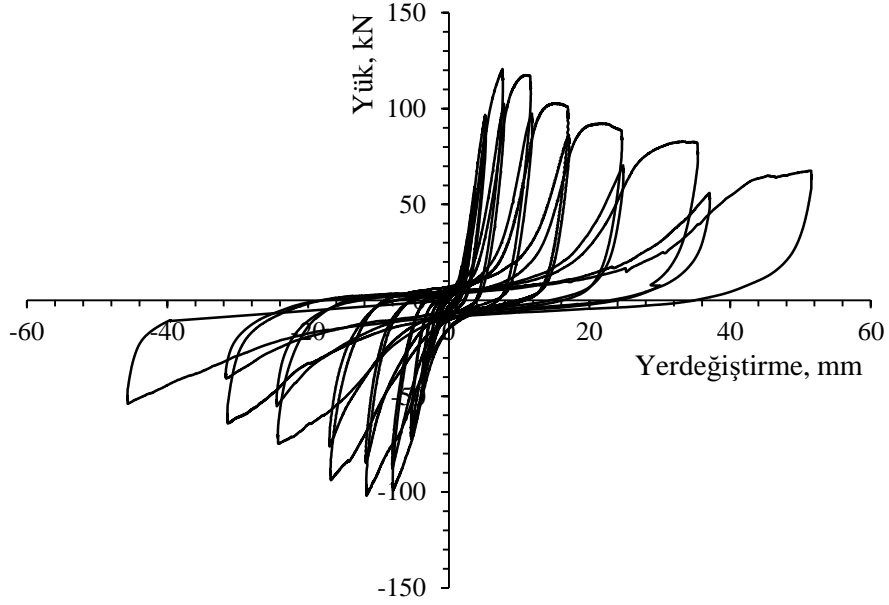
#### **3.1. Deney Elemanlarından Elde Edilen Bulgular**

##### **3.1.1. Geleneksel Yığma Duvar Deney Elemanından Elde Edilen Bulgular**

Geleneksel düşey delikli yığma tuğla ile üretilen (GYDDE) deney elemanının deney esnasından bir görünümü Şekil 3.1’de, deney sonunda elde edilen çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrileri ise Şekil 3.2’de verilmektedir. Söz konusu eğri incelendiğinde, itmede elde edilen maksimum yükün 120.66 kN ve bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirmenin 7.64 mm, çekmede elde edilen maksimum yükün ise 101.92 kN ve yerdeğiştirme değerinin ise 11.71 mm olduğu görülmektedir.



Şekil 3.1. GYDDE deney elemanının deney esnasından bir görünümü



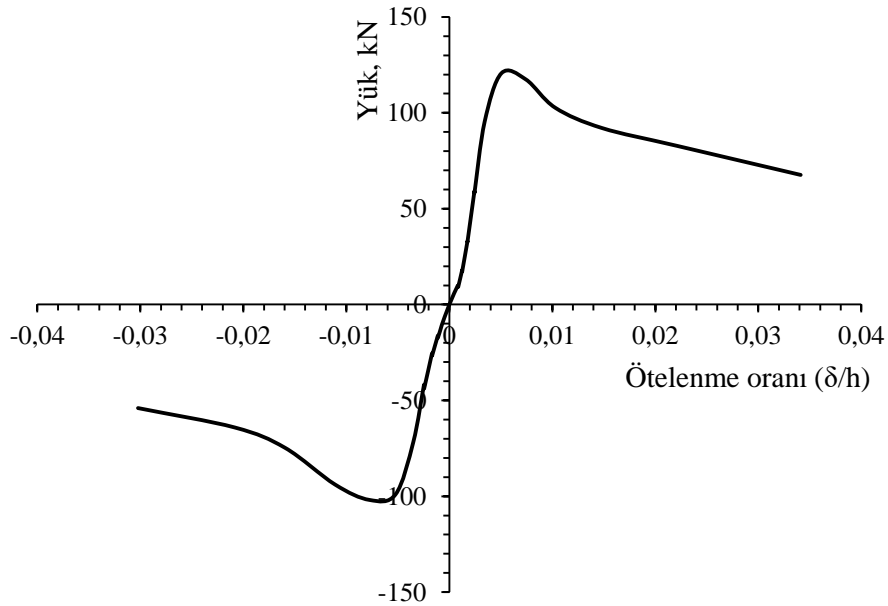
Şekil 3.2. GYDDE'ye ait çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi

Geleneksel yığma tuğlalı GYDDE üzerinde gerçekleştirilen deney sırasında oluşan ilk çatlak, çekme yönündeki diyagonal üzerinde olmuştur. Çatlaklar, merdiven şeklinde ilerleyerek yayılmıştır. Deneyin ilerleyen çevrimlerinde, deney elemanı üzerinde X şeklinde kesme çatlakları ortaya çıkmıştır. Deney sonrası oluşan hasarlar Şekil 3.3'te görülmektedir.



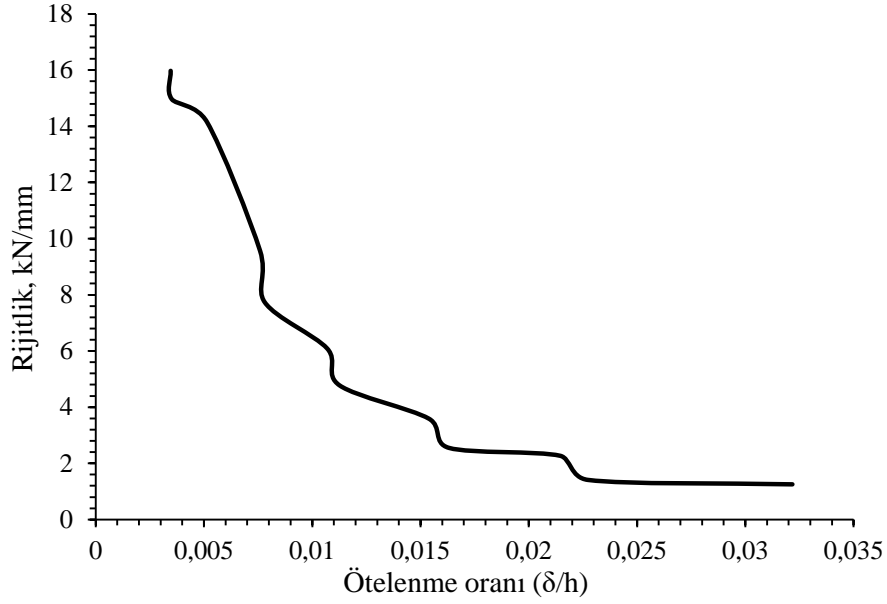
Şekil 3.3. Düzlem içi yükleme deneyi sonunda GYDDE'deki hasar durumu

Deneyden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrilerinin tepe noktaları birleştirilerek elde edilen dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.4'te verilmektedir. Söz konusu şekilden de görüldüğü gibi deney elemanı GYDDE, itmede ve çekmede yaklaşık aynı davranışı göstermiştir. Deney elemanı maksimum yük taşıma kapasitesine itmede yaklaşık %0.51 ve çekmede ise %0.77'lik bağıl ötelenmeyle ulaşmıştır.



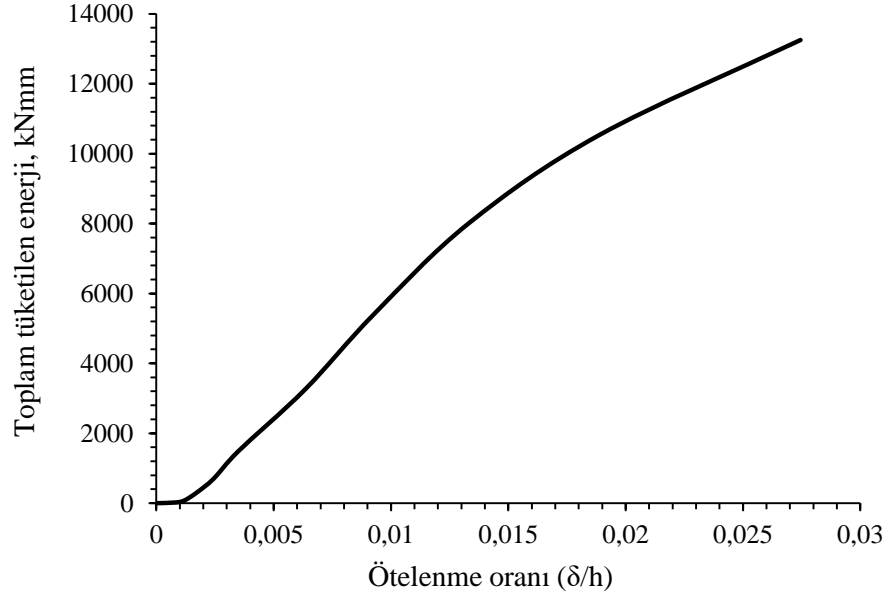
Şekil 3.4. GYDDE'ye ait dayanım zarf eğrisi

Her çevrimde elde edilen maksimum yatay yükün, bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirmeye oranından belirlenen rijitlik azalımı eğrisi Şekil 3.5'te görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi %0.35 bağıl ötelenmede 15.97 kN/mm olan rijitlik değeri deney sonunda yaklaşık %92 azalarak 1.25 kN/mm'ye düşmüştür.



Şekil 3.5. GYDDE'ye ait rijitlik azalımı eğrisi

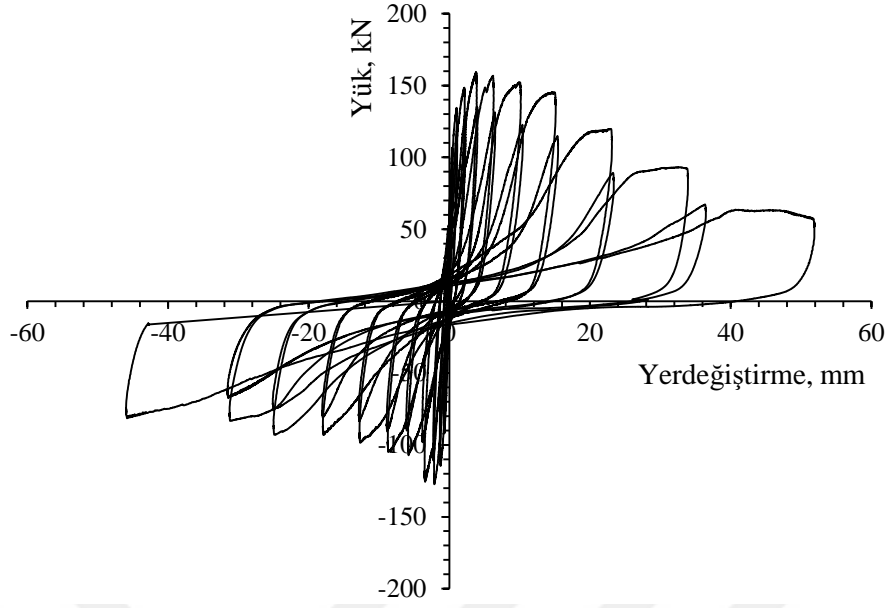
Çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrileri kullanılarak toplam tüketilen enerji eğrisi çizilmiştir. Her bir çevrimde tüketilen enerjinin hesabında, itmede ve çekmede yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alanlar hesaplanmış ve bu iki alanın toplamı söz konusu çevrimde tüketilen enerji olarak dikkate alınmıştır. Daha sonra, her bir çevrim için elde edilen bu değerler yığışımli olarak toplanarak, toplam tüketilen enerji eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 3.6). Geleneksel yığma tuğlalı GYDDE'nin deney boyunca tükettiği toplam enerji 13251 kNmm'dir.



Şekil 3.6. GYDDE'ye ait toplam tüketilen enerji eğrisi

### 3.1.2. Boşluklu Kilitli Yığma Duvar Deney Elemanından Elde Edilen Bulgular

Kilitli yığma birim elemanlar, bunları birleştiren harç ve yükleme çerçevesinden oluşan KYDDE-1 üzerinde gerçekleştirilen deney sonunda elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.7'de görülmektedir. Söz konusu eğri incelendiğinde, maksimum yükün itmede 159.08 kN, buna karşılık gelen yerdeğiştirmenin ise 3.78mm olduğu, çekmede ise bu değerlerin sırasıyla 125.66 kN ve 3.43 mm olduğu görülmektedir. KYDDE-1'in deney anından görüntüsü Şekil 3.8'de verilmektedir.



Şekil 3.7. KYDDE-1'e ait çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi



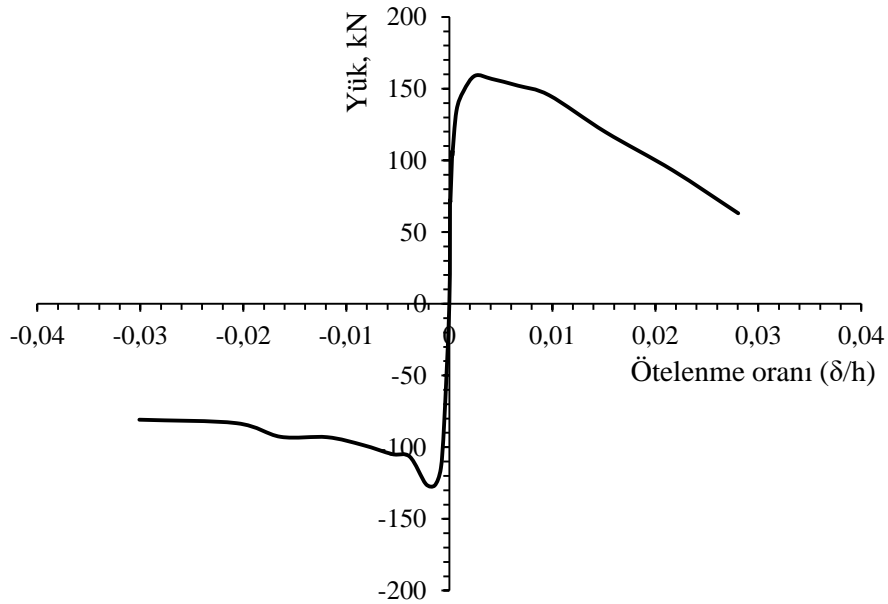
Şekil 3.8. KYDDE-1'e ait deney anından bir görünüm

KYDDE-1 deney elemanı üzerinde gerçekleştirilen deney sırasında, ilk kılcal çatlakların çekmede yaklaşık 120 kN seviyelerinde ve buna karşılık gelen 3.3mm'lik yerdeğiştirme değerinde başladığı gözlemlenmiştir. Deney elemanı yaklaşık 150 kN'luk yüke ve 9.2 mm'lik yatay yerdeğiştirme değerine ulaştığında ise ilk kesme çatlakları ortaya çıkmıştır. Söz konusu çatlak Şekil 3.9'dan da görüldüğü gibi kilitli yığma birim elemanları keserek ilerlemiştir.



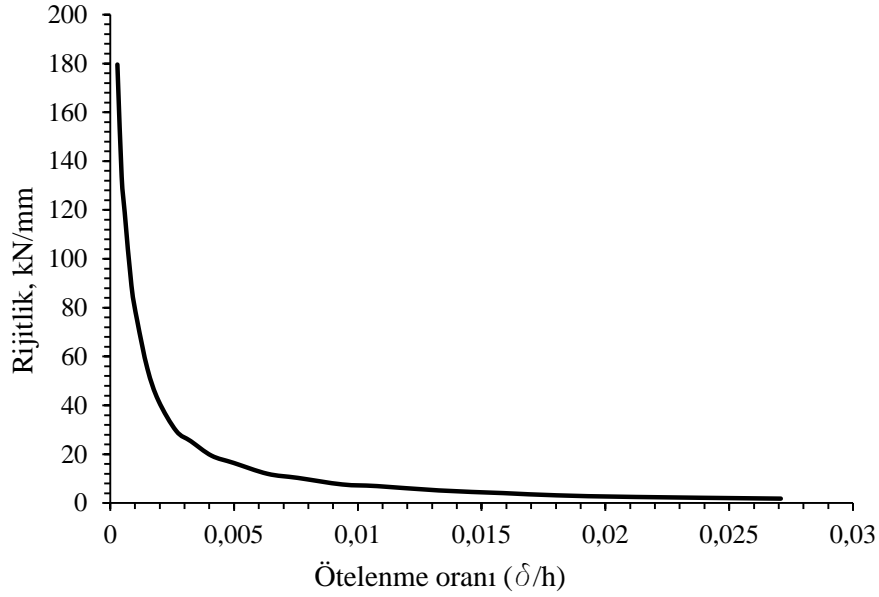
Şekil 3.9. Düzlem içi yükleme deneyi sonunda KYDDE-1'deki hasar durumu

KYDDE-1'e ait dayanım zarfı eğrisinin görüldüğü Şekil 3.10 incelendiğinde itmede ve çekmedeki davranış arasında bir miktar farklılık olduğu görülmektedir. Bu durumun, kilitli yığma birimlerin ezilerek dayanımını kaybetmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 3.10'dan görüldüğü gibi sistem maksimum yük taşıma kapasitesine itmede %0.25'lik ve çekmede ise %0.23'lik bağıl ötelenme ile ulaşmıştır.

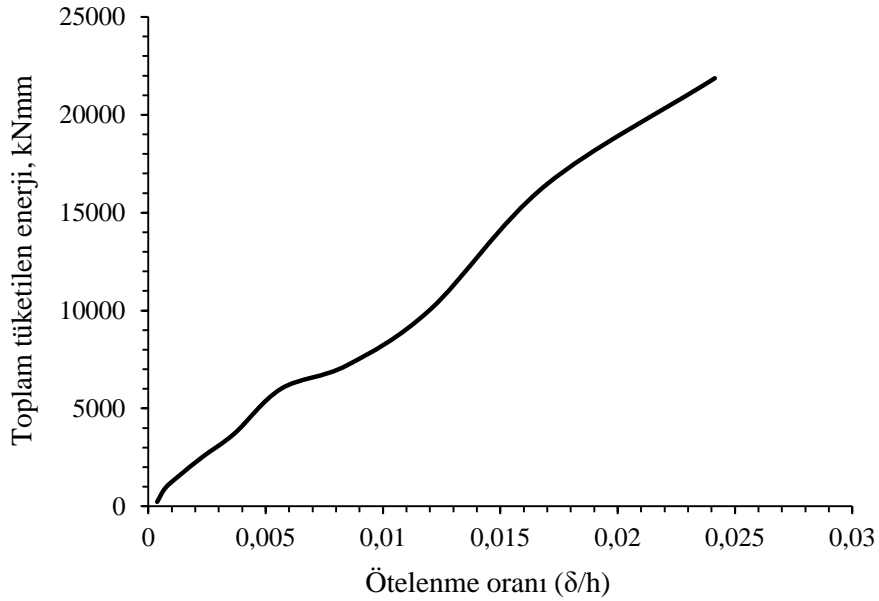


Şekil 3.10. KYDDE-1'e ait dayanım zarfı eğrisi

KYDDE-1'e ait rijitlik azalımı ve toplam tüketilen enerji eğrileri sırasıyla Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de görülmektedir. Şekil 3.10'dan da anlaşılacağı üzere KYDDE-1'in başlangıç rijitliği 179.55 kN/mm'dir. Ayrıca %0.3 bağıl ötelenme seviyelerinde 25.35 kN/mm olan rijitlik değerinin deney sonunda yaklaşık %93 azalarak 1.81 kN/mm seviyelerine düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.11. KYDDE-1'e ait rijitlik azalımı eğrisi



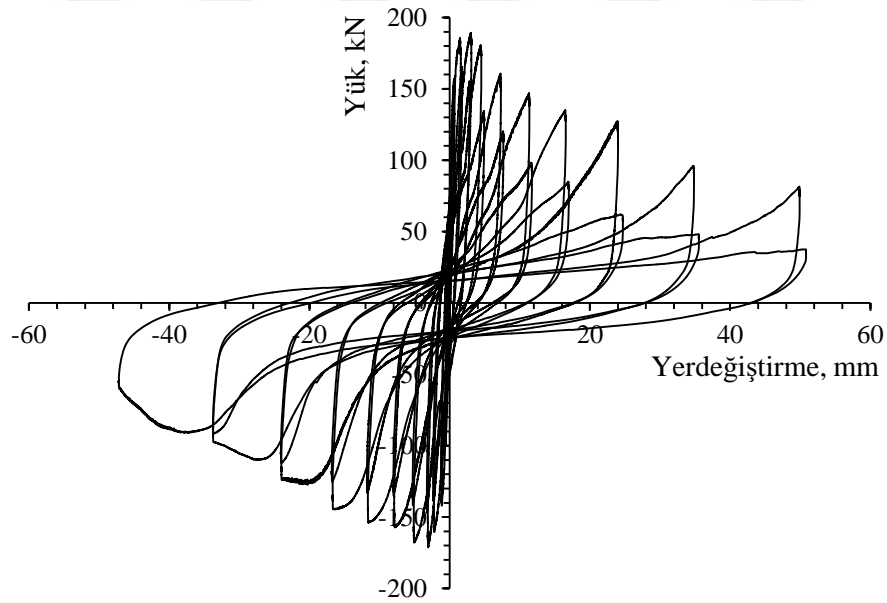
Şekil 3.12. KYDDE-1'e ait toplam tüketilen enerji eğrisi



Bu çalışma kapsamında tasarlanıp üretilen kilitli yığma birimler ve harcın oluşturduğu boşluklu KYDDE-1 deney elemanının, deney süresince tükettiği toplam enerji değeri 21869 kNmm'dir (Şekil 3.12).

### 3.1.3. Dolgulu Kilitli Yığma Deney Elemanından Elde Edilen Bulgular

KYDDE-2 olarak adlandırılan ve kilitli birim elemanlar, harç ve yığma birimlerin ortasındaki boşluklardaki dolgu betonundan oluşan bu deney elemanındaki ilk mikro çatlaklar çekmede yaklaşık 6.6 mm'lik yatay yerdeğiştirme ve buna karşılık yaklaşık 160 kN yük seviyelerinde meydana gelmiştir. Bu deney elemanının düzlem içi yüklenmesi sonucu elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.13'te görülmektedir. Eğriden görüldüğü gibi, dolgulu deney elemanı KYDDE-2'nin itmede ulaştığı maksimum yük değeri 189.31 kN iken, çekmede bu değer 171.16 kN olmuştur. İtmede ve çekmede maksimum yüklere karşılık gelen yerdeğiştirme değerleri ise sırasıyla 3.02 mm ve 3.08 mm'dir.



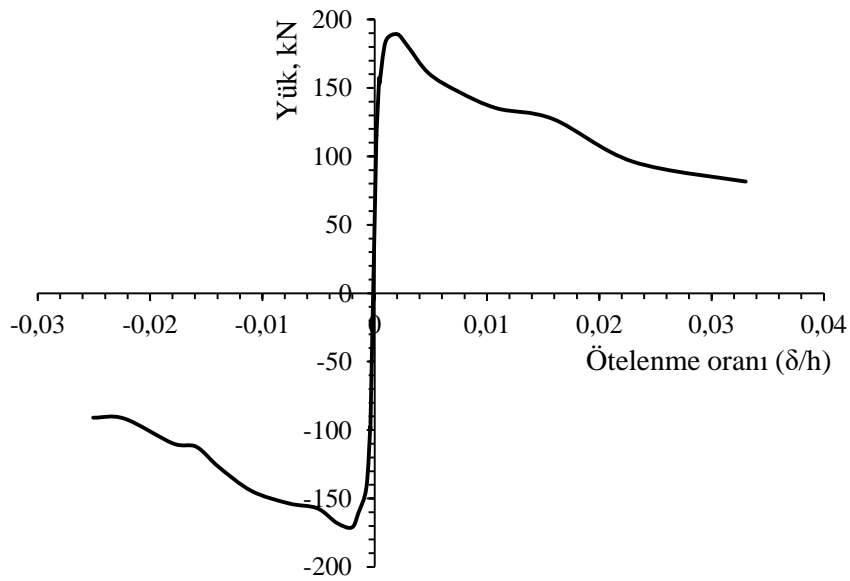
Şekil 3.13. KYDDE-2'ye ait çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi

KYDDE-2'de deney sırasında oluşan çatlaklar derzlerden değil, KYDDE-1'de olduğu gibi yığma birimleri keserek ilerlemiştir. Deney elemanı maksimum yükten sonra 160 kN seviyesine ulaştığında sistemdeki çatlaklar belirgin hale gelmeye başlamıştır. Deney sonunda KYDDE-2'de meydana gelen hasarlar Şekil 3.14'te görülmektedir.



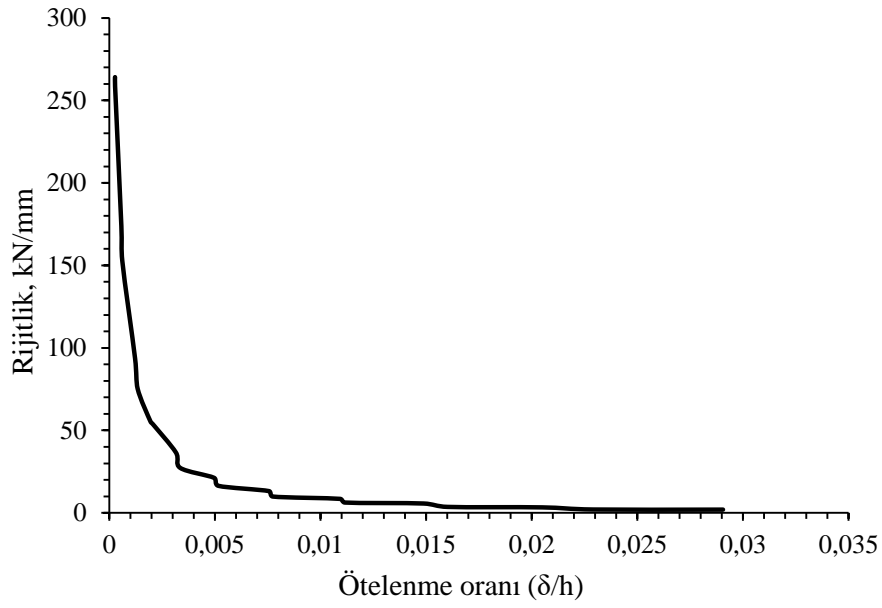
Şekil 3.14. KYDDE-2’de deney sonunda meydana gelen hasarlar

Yük-yerdeğiştirme eğrisindeki tepe noktaların birleştirilmesiyle oluşturulan dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.15’te görülmektedir. Bu eğri incelendiğinde KYDDE-1’de olduğu gibi itme ve çekme davranışı arasında bir miktar farklılık olduğu görülmektedir. Bu farkın daha önce de belirtilen yığma birimlerin ezilerek dayanımlarını kaybetmelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca eğriden itme ve çekmedeki maksimum yük değerlerine %0.22’lik bağıl yerdeğiştirme değeri ile ulaşıldığı görülmektedir.

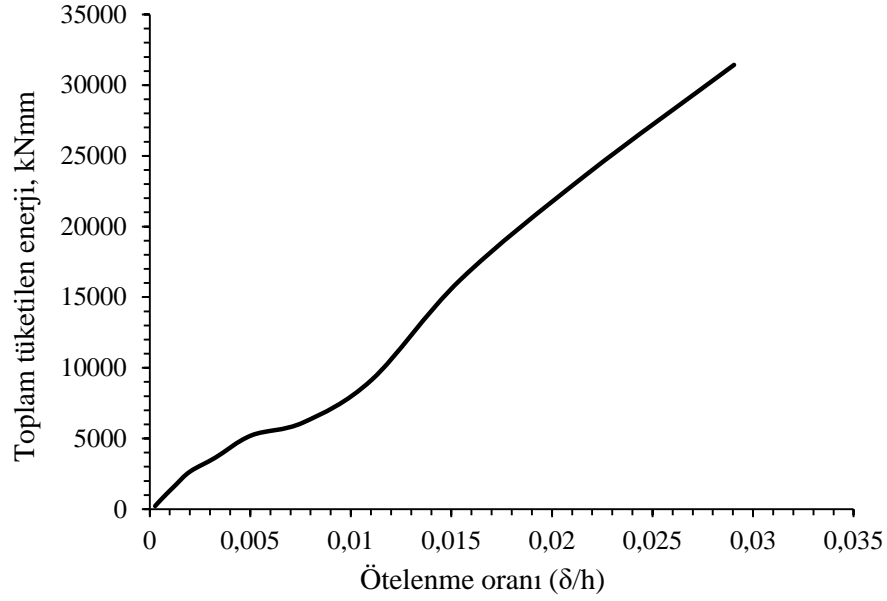


Şekil 3.15. KYDDE-2’ye ait dayanım zarfı eğrisi

Deneyde her bir çevrimdeki maksimum yük ve bunlara karşılık gelen yerdeğiştirme değerlerinin oranlarında elde edilen rijitlik azalımı grafiği Şekil 3.16'da görülmektedir. Bu eğriden görüldüğü gibi sistemin başlangıç rijitliği 264.12 kN/mm'dir. Ayrıca %0.3'lük bağıl ötelenmedeki sistem rijitliği 36.64 kN/mm iken bu değer deney sonunda %95 azalarak 1.97 kN/mm seviyelerine düşmüştür. Deney elemanın bağıl ötelenme oranına bağlı olarak tükettiği toplam enerjiyi gösteren eğri Şekil 3.17'de verilmektedir. Bu eğriden, KYDDE-2'nin deneyin başlangıcında sonuna kadar toplam 31457 kNmm enerji harcadığı görülmektedir.



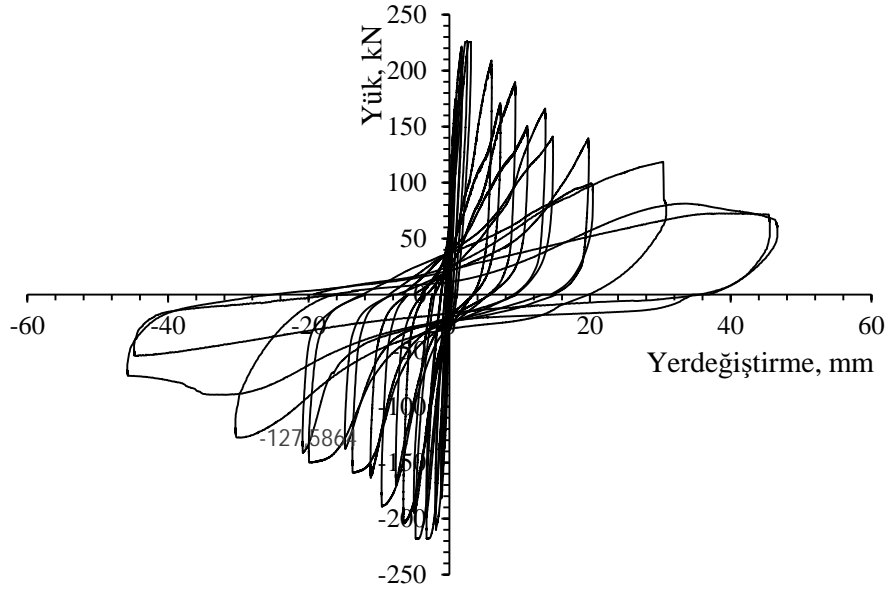
Şekil 3.16. KYDDE-2'ye ait rijitlik azalımı eğrisi



Şekil 3.17. KYDDE-2'ye ait toplam tüketilen enerji eğrisi

#### 3.1.4. Dolgulu Donatılı Kilitli Yığma Duvar Deney Elemanından Elde Edilen Bulgular

KYDDE-2'den farklı olarak, dolgu betonu içerisine ve yatay derzlerde bulunan kanallara donatı yerleştirilen KYDDE-3 duvar elemanı üzerinde yapılan deneyden elde edilen yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.18'de verilmektedir. Bu eğriler incelendiğinde, itmede ve çekmede ulaşılan maksimum yükün sırasıyla 225.49 kN ve 217.72 kN olduğu, bunlara karşılık gelen yerdeğiştirmelerin ise yine sırasıyla 3.08 mm ve 3.22 mm olduğu görülmektedir.



Şekil 3.18. KYDDE-3'e ait iki yönlü çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisi

KYDDE-3'e ait deney sonundan bir görüntü Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de verilmektedir. Söz konusu şekiller incelendiğinde KYDDE-3 deney elemanındaki çatlakların duvar boyunca homojen dağıldığı ve çatlak genişliklerinin mm düzeylerinde kaldığı görülmektedir. Ayrıca oldukça az hasar gören deney elemanındaki göçmenin taban kesme kuvveti ile meydana geldiği görülmektedir.

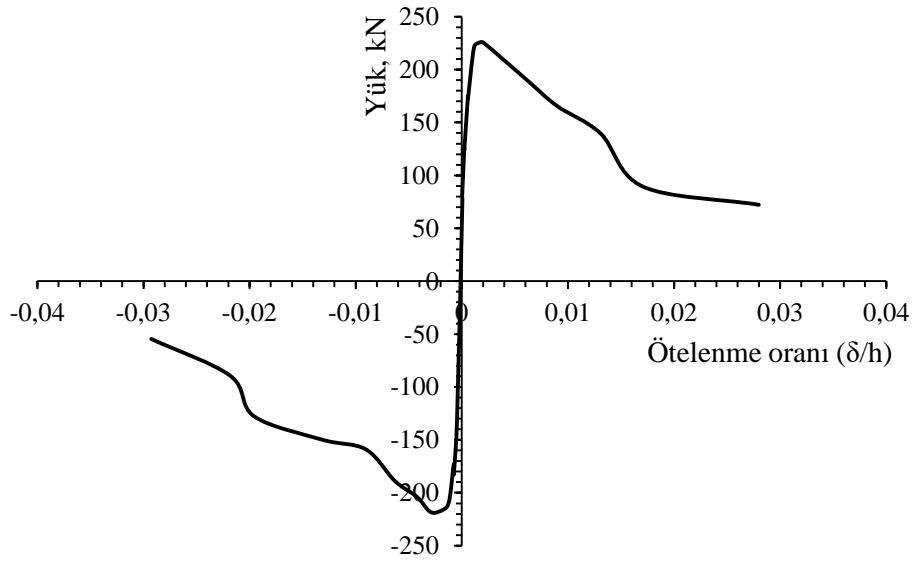


Şekil 3.19. KYDDE-3'te deney sonunda meydana gelen hasarlar



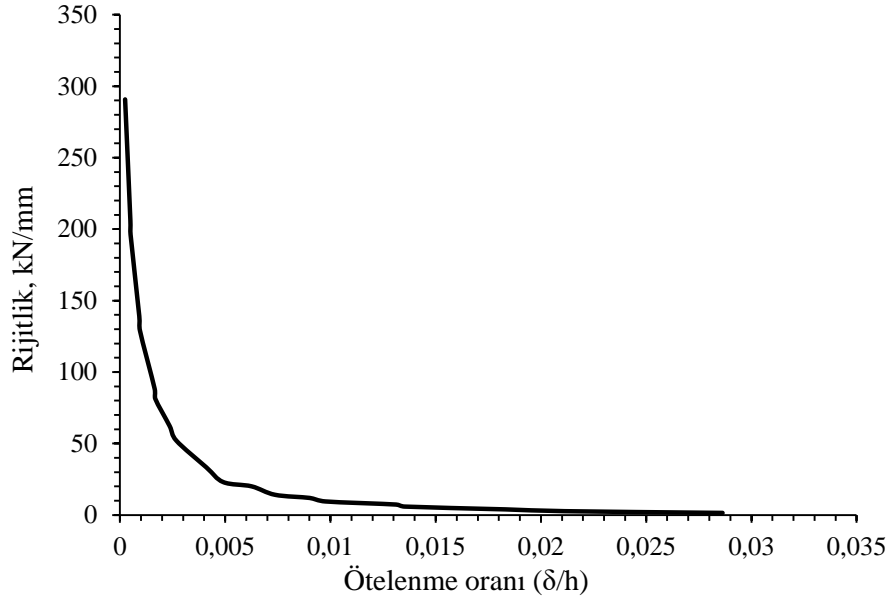
Şekil 3.20. KYDDE-3'te deney sonunda meydana gelen hasarların yakından görünümü

Bu deney elemanının Şekil 3.21'de görülmekte olan dayanım zarf eğrisi incelendiğinde davranışın itmede ve çekmede yaklaşık simetrik olduğu görülmektedir. Ayrıca itme ve çekmede maksimum yük seviyelerine sırasıyla %0.20 ve %0.21 bağlı ötelenme değerleriyle ulaşıldığı görülmektedir.

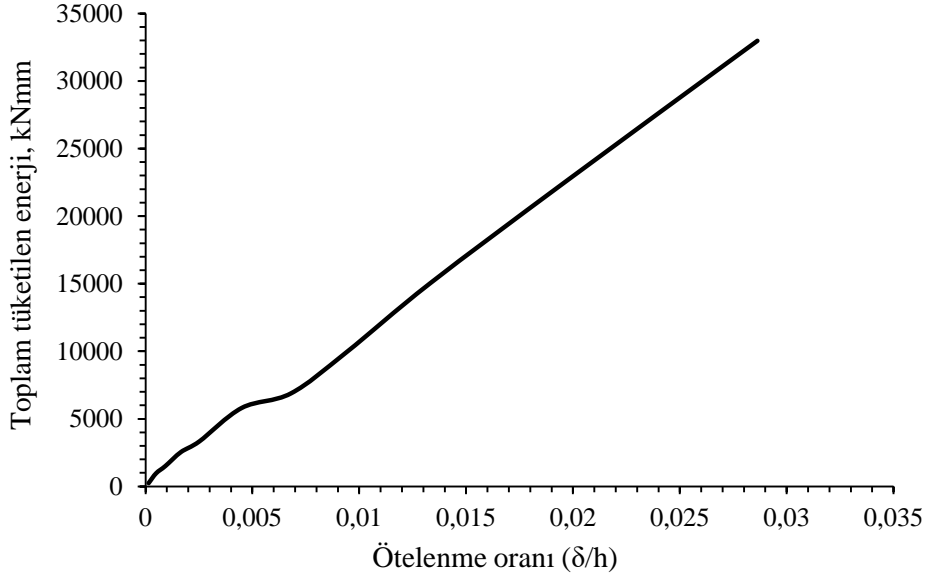


Şekil 3.21. KYDDE-3'e ait dayanım zarf eğrisi

KYDDE-3'ün deneysel verilerinden elde edilen rijitlik azalımı ve toplam tüketilen enerji eğrileri Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te verilmektedir. Bu eğrilere göre sistemin başlangıç rijitliği 291 kN/mm sistemin tükettiği toplam enerji ise 32973 kNmm'dir.



Şekil 3.22. KYDDE-3'e ait rijitlik azalımı eğrisi

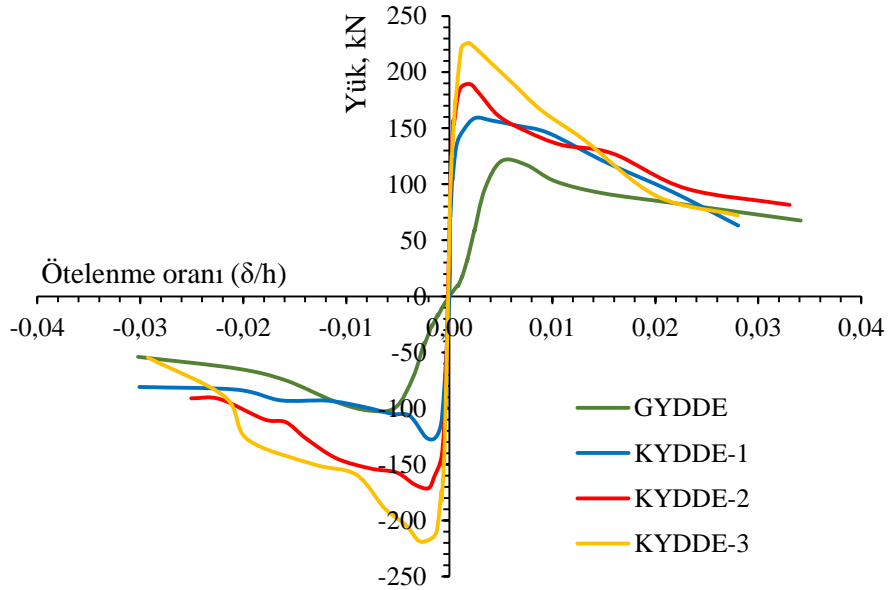


Şekil 3.23. KYDDE-3'e ait toplam tüketilen enerji eğrisi

## 3.2. Deney Elemanlarından Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi

### 3.2.1. Deney Elemanlarının Taşıma Kapasitelerinin İrdelenmesi

Düzlem içi çevrimsel yatay yük etkisi altındaki yığma duvar deney elemanlarının dayanım zarf eğrileri Şekil 3.24'te görülmektedir. Ayrıca, itmede ve çekme ulaşılan maksimum yük ve bu değerlere karşılık gelen yerdeğiştirmeler de Tablo 3.1'de verilmektedir. Söz konusu şekil ve tablodan, bu çalışma kapsamında tasarlanıp üretilen kilitli yığma birim elemanlarının, yığma duvarların taşıma kapasitelerini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Geleneksel yığma tuğla ile üretilen GYDDE duvar elemanı, en düşük taşıma kapasitesine sahip iken, en yüksek taşıma kapasitesine sahip deney elemanı kilitli yığma birimlerle dolgulu/donatılı üretilen KYDDE-3 deney elemanı olmuştur. Kilitli duvar elemanları arasında ise en düşük taşıma kapasitesine sahip olan dolgusuz KYDDE-1 iken bunu dolgulu duvar elemanı KYDDE-2 takip etmiştir.



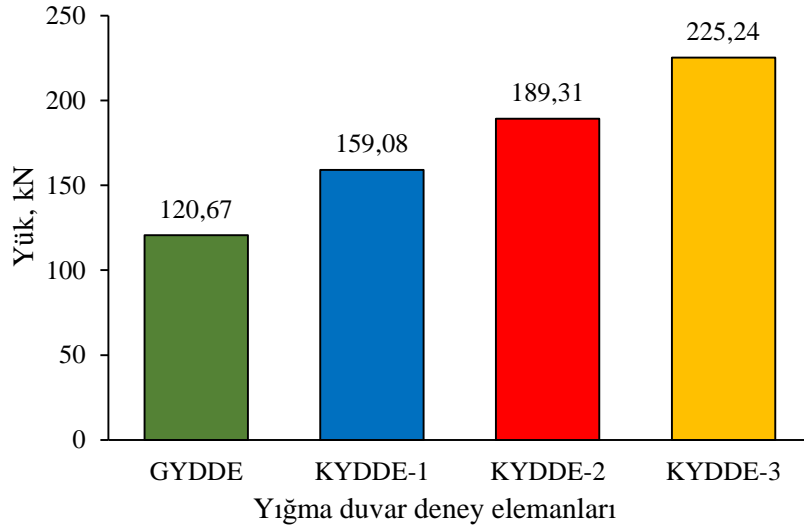
Şekil 3.24. Deney elemanlarının dayanımlarına ilişkin zarf eğrileri

Yukarıda söz edilen deney elemanlarının taşıma kapasitelerine ait histogram Şekil 3.25'te ve bu elemanların birbirine göre taşıma kapasitelerindeki değişim oranları ise Tablo 3.2'de verilmektedir.



Tablo 3.1. Deney elemanlarının itmede ve çekmede taşıdıkları maksimum yükler ve bu değerlere karşılık gelen yerdeğiştirmeler

Deney elemanı	Tanım	İtmede		Çekmede	
		Yük (kN)	Yerdeğiştirme (mm)	Yük (kN)	Yerdeğiştirme (mm)
GYDDE	Geleneksel yığma tuğlalı deney	120.67	7.64	101.92	11.71
KYDDE-1	Boşluklu kilitli yığma duvar	159.08	3.78	125.66	3.45
KYDDE-2	Dolgulu kilitli yığma duvar	189.31	3.02	171.16	3.08
KYDDE-3	Dolgulu donatılı yığma duvar deney	225.24	4.16	217.76	4.57



Şekil 3.25. Deney elemanlarının taşıma kapasitelerine ilişkin histogram

Tablo 3.2. Deney elemanlarının birbirine göre taşıma kapasitelerindeki değişim oranları

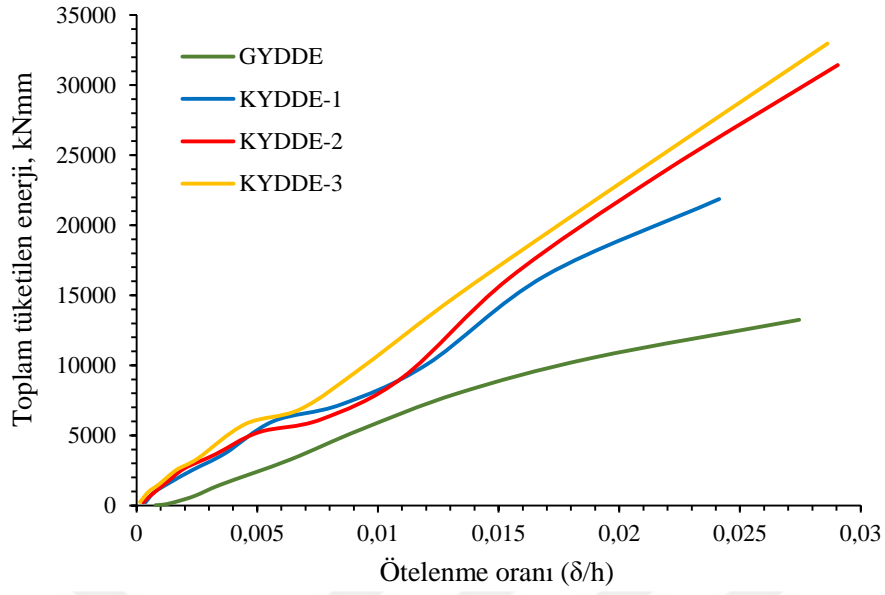
	GYDDE	KYDDE-1	KYDDE-2	KYDDE-3
	Taşıma kapasitesi artış oranları (%)			
GYDDE		31.83	56.89	86.66
KYDDE-1			19.00	41.59
KYDDE-2				18.98

Tablo 3.2'den görüldüğü gibi kilitli yığma birim elemanlarla oluşturulan boşluklu KYDDE-1'in yatay yük taşıma kapasitesi, geleneksel yığma tuğla ile oluşturulan GYDDE'ye göre %31.83 daha fazladır. Ayrıca dolgulu KYDDE-2, geleneksel yığma tuğlalı GYDDE ve boşluklu KYDDE-1'e göre sırasıyla %56.89 ve %19 daha fazla yatay yük taşıma kapasitesine sahiptir. Dolgulu-donatılı KYDDE-3 ise GYDDE'ye göre %86.66, boşluklu KYDDE-1' göre %41.59 ve dolgulu KYDDE-2'ye göre %18.98 daha fazla yatay yük taşıma kapasitesine sahiptir.

Yukarıdaki şekil ve tablolardan da görüldüğü gibi yeni nesil kilitli yığma birim elemanların kullanımı, deney elemanlarının yatay yük etkisi altındaki taşıma kapasitelerini önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca kilitli birim eleman kullanılan deney elemanlarında dolgu betonu kullanımı ve/veya yatay-düşey donatı kullanımı da deney elemanlarının taşıma kapasitelerine dikkate değer seviyede katkı sağlamaktadır.

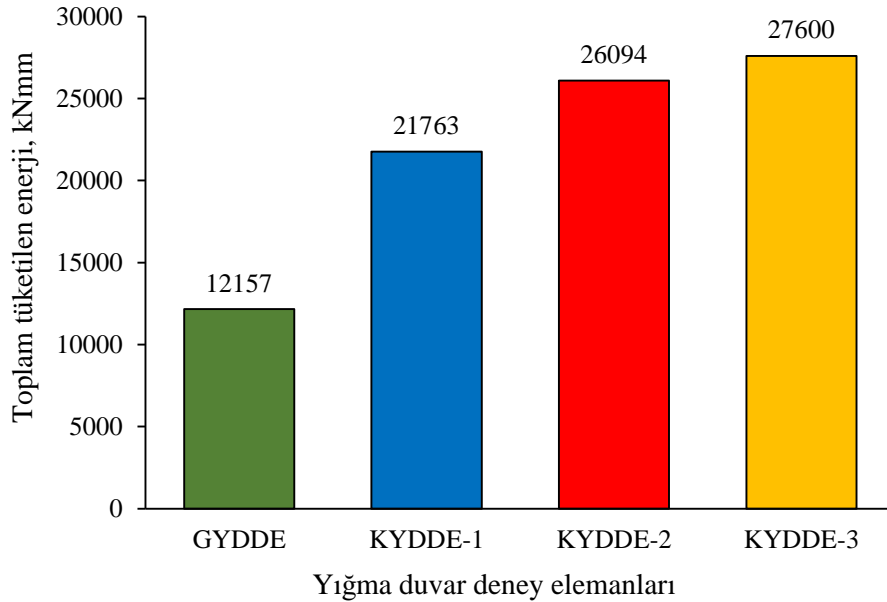
### **3.2.2. Deney Elemanlarının Enerji Tüketme Kapasitelerinin İrdelenmesi**

Her bir çevrimdeki yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alanların yığılımlı olarak toplanmasıyla deney elemanlarının her birinin deney boyunca, tükettiği toplam enerji hesaplanmıştır. Deney elemanlarının toplam tükettikleri enerjinin, ötelenme oranına ( $\delta/h$ ) bağlı değişimi Şekil 3.26'da verilmiştir. Bu şekilden; dolgulu-donatılı deney elemanı olan KYDDE-3'ün en fazla enerjiyi tükettiği ve bunu sırasıyla dolgulu KYDDE-2, boşluklu KYDDE-1 ve GYDDE'nin takip ettiği görülmektedir. Söz konusu eğrilerden de anlaşıldığı gibi, kilitli birim elemanlarla üretilen duvarlar, deney boyunca geleneksel tuğlalı duvara göre çok daha fazla enerji tüketmişlerdir.



Şekil 3.26. Deney elemanlarının yığışımli olarak tükettikleri toplam enerjinin ötelenme oranıyla değişimi eğrileri

Deney elemanlarının %2.4 bağlı ötelenme oranındaki toplam tüketilen enerji histogramı Şekil 3.27’de, birbirine göre enerji tüketme kapasite artış oranları ise Tablo 3.3’te verilmektedir.



Şekil 3.27. Deney elemanlarının %2.4 bağlı ötelenme oranı için enerji tüketme kapasitelerine ilişkin histogram

Tablo 3.3. Deney elemanlarının %2.4 bağıl ötelenme oranı için birbirine göre enerji tüketme kapasite artış oranları

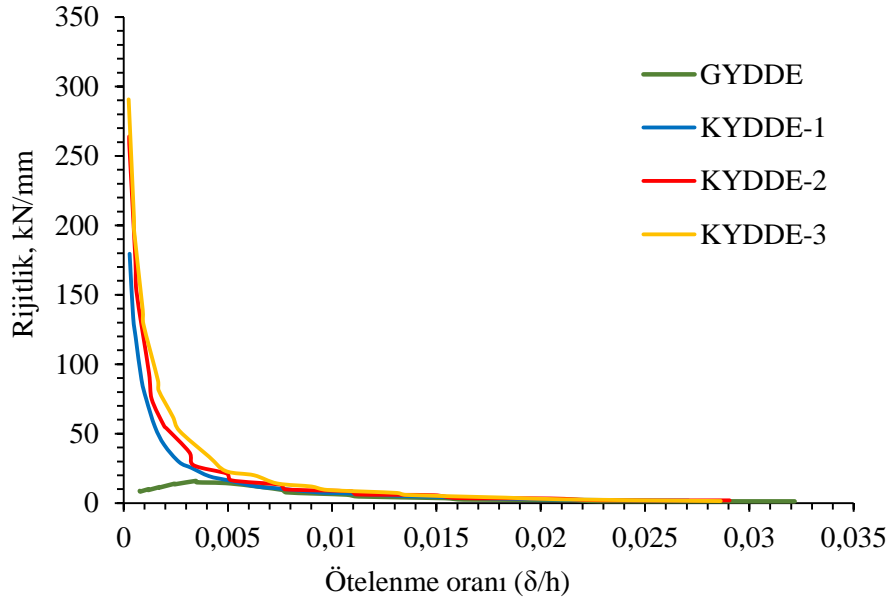
	GYDDE	KYDDE-1	KYDDE-2	KYDDE-3
	Enerji tüketme kapasitesi artış oranları (%)			
GYDDE		79.01	114.64	127.03
KYDDE-1			19.90	26.82
KYDDE-2				5.77

Şekil 3.27 ve Tablo 3.3 incelendiğinde kilitli yığma birim elemanlarla üretilen deney elemanlarının geleneksel tuğlalı deney elemanına oranla çok fazla enerji tükettiği anlaşılmaktadır. Dolgulu-donatılı KYDDE-3'ün 27600 kNmm'lik enerji değeri ile diğerlerine oranla bir miktar daha fazla enerji tükettiği görülmektedir. KYDDE-3'ü sırasıyla, 21763 kNmm ile dolgulu KYDDE-2, 21763kNmm ile boşluklu KYDDE-2 ve 12157 kNmm ile geleneksel tuğlalı GYDDE'nin takip ettiği görülmektedir. Deney elemanlarının enerji tüketme kapasitelerindeki artış oranlarından, dolgulu-donatılı KYDDE-3'ün, dolgulu KYDDE-2, boşluklu KYDDE-1 ve geleneksel tuğlalı GYDDE'e göre sırasıyla %5.77, %26.82 ve %127.03 daha fazla enerji tükettiği görülmektedir. Ayrıca dolgulu KYDEE-2'nin enerji tüketme kapasitesinin ise KYDDE-1 ve GYDDE deney elemanlarına göre sırasıyla %19.90 ve %114.64 daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca, yalnızca yığma birimler ve harç ile oluşturulan dolgusuz KYDDE-1'in ise yalnızca geleneksel yığma tuğla ve harç ile üretilen GYDDE'e göre %79.01'luk bir oranla çok daha fazla enerji tükettiği anlaşılmaktadır.

Yukarıda verilen şekil ve tablolardan da anlaşılacağı üzere, kilitli yığma birim elemanların, yığma duvarların enerji tüketme kapasitelerine katkısı çok yüksek olmakta dolayısı ile sistemi daha sünek hale getirmektedir. Ayrıca kilitli birim elemanlarla üretilen duvarlarda dolgu betonu kullanılmasının, boşluklu kilitli duvarlara oranla sistemi daha sünek hale getirdiği sonucu çıkmaktadır. Deney elemanların da donatı kullanılmasının ise dolguluya oranla sistemin enerji tüketme kapasitesine katkısının az olduğu görülmektedir. Bu duruma, deney elemanlarında, eğilmeden ziyade kesme davranışının etkin olmasının sebep olduğu düşünülmektedir.

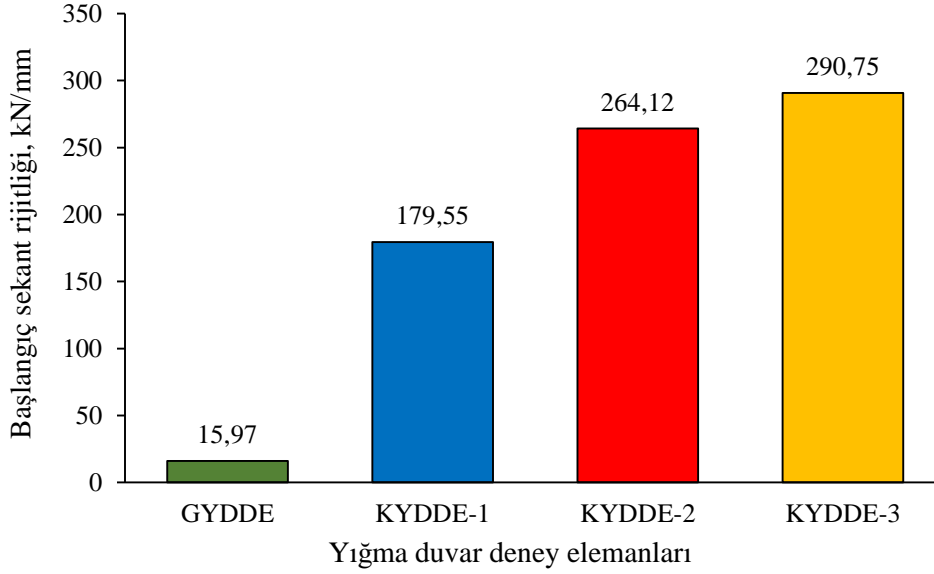
### 3.2.3. Deney Elemanlarının Rijitliklerinin İrdelenmesi

Deney elemanlarının her bir çevrimdeki rijitliklerinin belirlenmesinde kullanılan sekant rijitliklerinin, ötelenme oranlarına bağlı değişimi Şekil 3.28’de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, kilitli yığma birimli deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri, geleneksel yığma tuğlalı deney elemanına oranla çok yüksektir. Yük taşıma kapasitesi en fazla olan dolgulu-donatılı duvar elemanının (KYDDE-3) başlangıç rijitliği de diğer deney elemanlarından daha büyüktür. Bunu sırasıyla dolgulu duvar deney elemanı (KYDDE-2) ve boşluklu duvar deney elemanı (KYDDE-1) takip etmektedir. Bu durum, kilitli yığma birimlerin yığma duvarların yük taşıma kapasitesi ile enerji tüketme kapasitesine olduğu gibi rijitliğine de katkı sağladığını göstermektedir.



Şekil 3.28. Deney elemanlarının düzlem içi çevrimsel yatay yük etkisindeki rijitliklerinin ötelenme oranıyla değişimi eğrileri

Düzlem içi yüklenen deney elemanlarının, başlangıç rijitlik oranları Şekil 3.29’da birbirlerine göre başlangıç rijitlik artış oranları ise Tablo 3.4’te görülmektedir.



Şekil 3.29. Deney elemanlarının başlangıç rijitliklerine ilişkin histogram

Tablo 3.4. Deney elemanlarının birbirine göre başlangıç rijitliklerindeki artış oranları

	GYDDE	KYDDE-1	KYDDE-2	KYDDE-3
	Başlangıç rijitliklerindeki artış oranları (%)			
GYDDE		1024.27	1553.84	1720.62
KYDDE-1			47.10	61.94
KYDDE-2				10.08

Şekil 3.29 ve Tablo 3.4'ten görüldüğü gibi kilitli yığma birim elemanlar kullanılarak inşa edilen deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri geleneksel yığma tuğla ile inşa edilen deney elemanından çok daha fazladır. Ayrıca dolgulu-donatılı deney elemanının (KYDDE-3) başlangıç rijitliği dolgulu deney elemanına (KYDDE-2), %10.08, boşluklu deney elemanına (KYDDE-1) %61.94 daha fazladır. Dolgulu deney elemanı (KYDDE-2) ise boşlukluya (KYDDE-1) %47.10 daha fazla başlangıç rijitliğine sahiptir.

Sonuç olarak, yığma duvarlarda kullanılan kilitli yığma birimlerin varlığı, sistemin başlangıç rijitliğini çok fazla artırmaktadır. Kilitli yığma birimli deney elemanları kendi içinde değerlendirildiğinde ise duvarlarda kullanılan dolgunun ve donatının sistemin

rijitliğine katkı sağladığı ve en fazla katkının dolgulu-donatılı sistemle (KYDDE-3) elde edildiği görülmektedir.

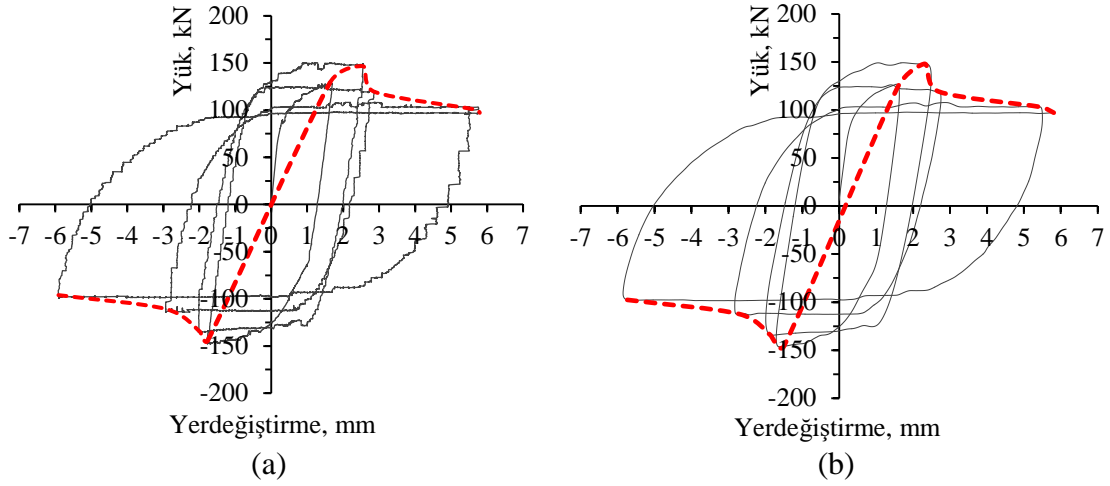
### **3.3. Kilitli Yığma Duvarların Sonlu Eleman Analizleri ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması**

Çalışmanın bu bölümünde, kilitli duvarlara (KYDDE-1, KYDDE-2 ve KYDDE-3) ait sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan analitik sonuçlar, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde ABAQUS paket programı ve yığma duvar modellerinde basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi kullanılmıştır.

Sonlu eleman model analizlerinde yüzey kontaklarının çokluğu ve bilgisayar kapasitelerinin yetersizliği sebebiyle analiz süreleri çok uzamakta ve bu durum analitik çözümü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, daha önce de belirtildiği gibi, analitik çözümlerde, deneysel çalışmada kullanılan yük protokolü maksimum yatay yük taşıma kapasitesi elde edilecek şekilde revize edilerek kullanılmıştır. Ayrıca analitik yük-yerdeğiştirme eğrilerinde deneyselle uyumlu sıkışma etkisi (pinching effect) yakalanamadığı için deneysel ve analitik yük-yerdeğiştirme eğrileri ile bu eğrilerden elde edilen enerji tüketme kapasiteleri açısından bir karşılaştırma yapılmamıştır. Söz konusu sıkışma etkisi (pinching effect) çalışma konusu dışında kalmaktadır.

Analitik olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrilerindeki gürültü fazlalığı sebebiyle Lokal Regresyon Filtreleme yöntemiyle [98] filtreleme yapılmıştır. Aşağıdaki şekillerde filtrelenmiş ve filtrelenmemiş durumların her ikisi de gösterilmiştir.

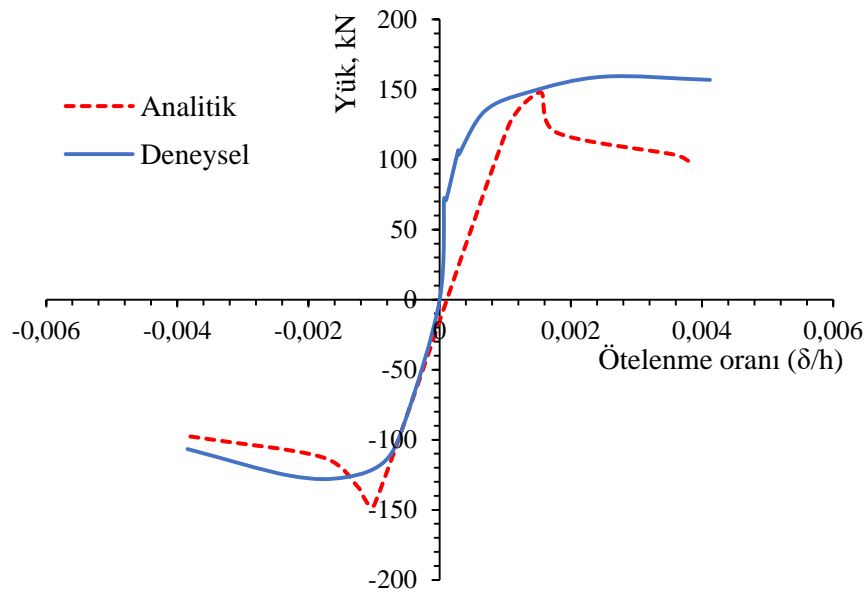
Kilitli yığma birimlerle üretilen boşluklu duvar deney elemanı KYDDE-1'e ait analitik olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri bu eğrilerden elde edilen dayanım zarf eğrisi Şekil 3.30'da verilmektedir.



Şekil 3.30. KYDDE-1 deney elemanı için elde edilen (a) analitik, (b) filtrelenmiş analitik yük-yerdeğiştirme eğrileri ile analitik dayanım zarfı eğrisi

Şekil 3.30'dan görüldüğü gibi sonlu eleman analizleri sonunda KYDDE-1 deney elemanı ikinci çevrimde itmede 148.04 kN ve çekmede ise 146.09 kN maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Bu değerlere karşılık gelen yerdeğiştirmeler ise itmede ve çekmede sırasıyla 2.32 mm ve 1.5 mm'dir. Aynı eğrilerden davranışın yaklaşık simetrik olduğu görülmektedir.

Bu deney elemanın ait deneysel ve analitik dayanım zarfı eğrileri ise Şekil 3.31'da gösterilmektedir.

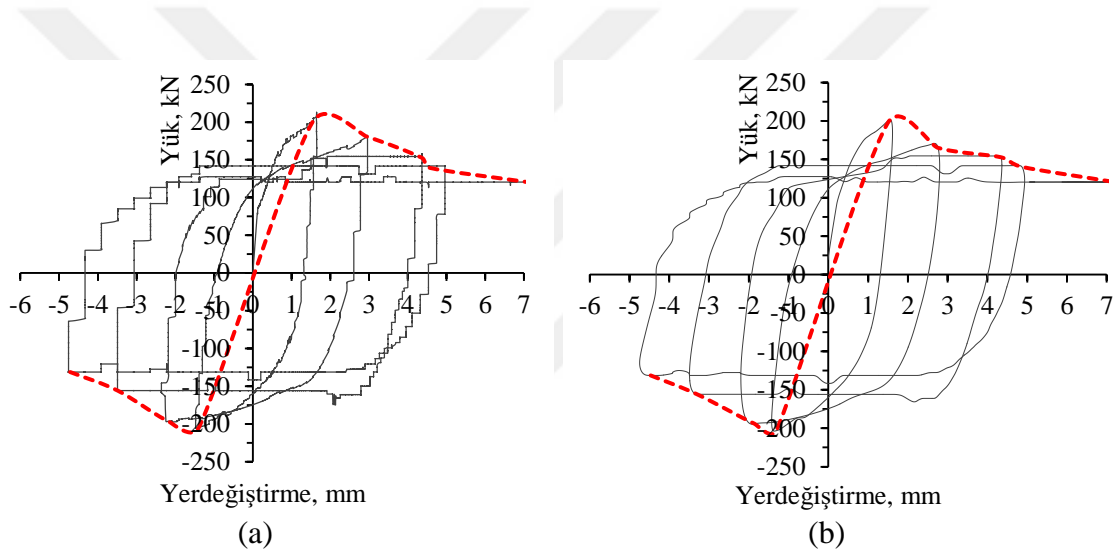


Şekil 3.31. KYDDE-1'e ait deneysel ve analitik dayanım zarfı eğrileri



Şekil 3.31'deki analitik ve deneysel dayanım zarfı eğrileri incelendiğinde, deneysel yük taşıma kapasitesinin analitik yük taşıma kapasitesinden itmede %6.94 daha fazla olduğu çekmede ise %16.26 daha az olduğu görülmektedir. Bu durum boşluklu yığma duvar deney elemanı KYDDE-1 için, taşıma kapasitesi açısından, deneysel ve teorik sonuçların birbiriyle kabul edilebilir yakınlıkta değerler verdiğini göstermektedir. Medeiros ve diğ. ile Okail ve diğ.'in yaptıkları çalışmalarda yığma yapılar için deneysel ve analitik sonuçlar arasındaki %20 civarındaki farkın kabul edilebilir olduğunu belirtmişlerdir [74, 87].

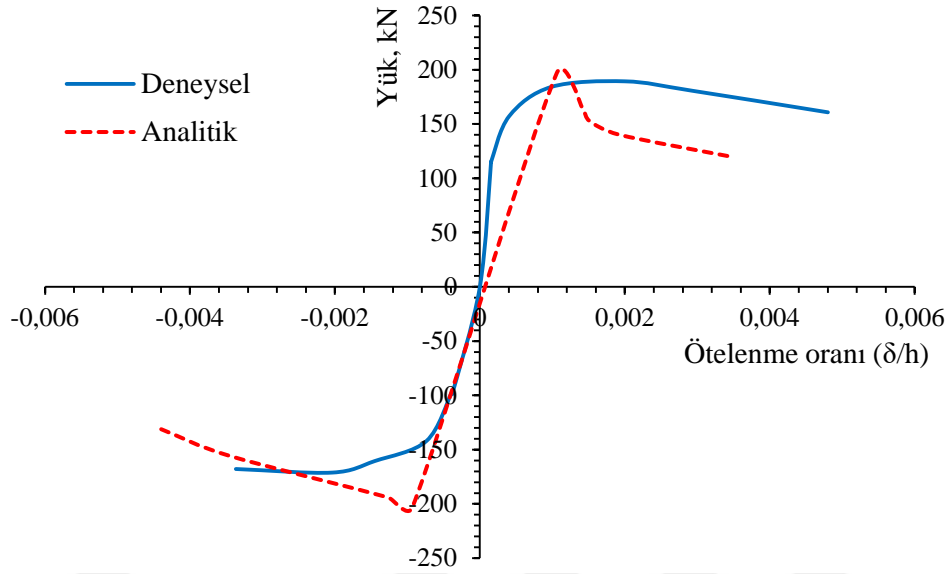
Dolgulu yığma duvar deney elemanı (KYDDE-2) için gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri ile bu eğrilerden elde edilen dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.32'de verilmektedir.



Şekil 3.32. KYDDE-2 deney elemanı için elde edilen (a) analitik, (b) filtrelenmiş analitik yük-yerdeğiştirme eğrileri ile analitik dayanım zarfı eğrisi

Şekil 3.32'deki yük-yerdeğiştirme eğrilerinin yaklaşık simetrik olduğu görülmektedir. Bu durum itmedeki ve çekmede davranışın benzer olduğu göstermektedir. Aynı eğrilerden henüz ilk çevrimde ulaşılan maksimum yükün itmede 196.78 kN ve çekmede ise 203.12 kN olduğu görülmektedir. Bu değerlere karşılık gelen yerdeğiştirmeler ise itmede ve çekmede sırasıyla 1.49 mm ve 1.31 mm'dir.

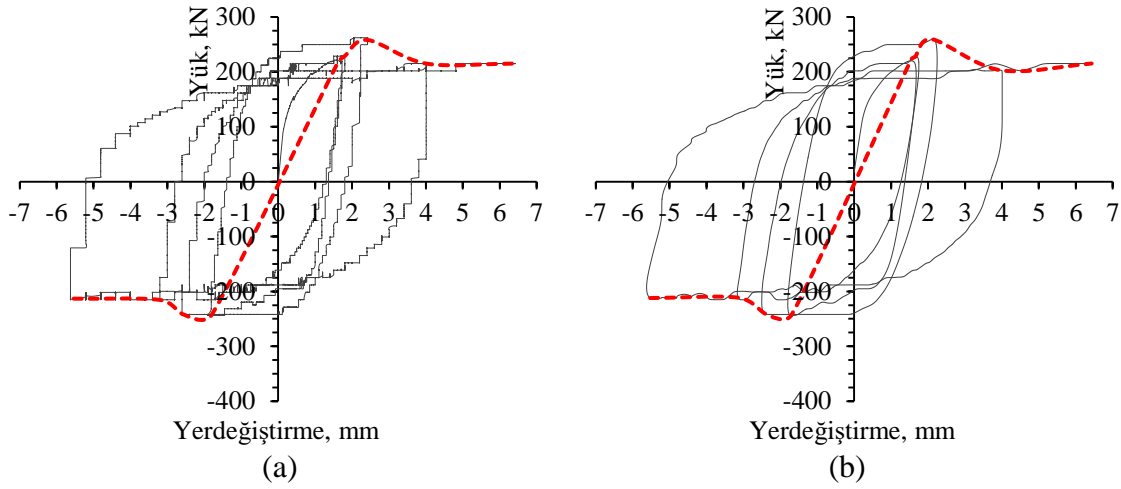
Dolgulu KYDDE-2 deney elemanına ait analitik ve deneysel dayanım zarfı eğrileri Şekil 3.33'te verilmektedir.



Şekil 3.33. KYDDE-2'ye ait deneysel ve analitik dayanım zarfı eğrileri

Şekil 3.33'teki deneysel ve analitik dayanım zarfı eğrileri incelendiğinde itmedeki analitik yük taşıma kapasitesinin deneyselden %3.94 daha fazla olduğu, çekmede ise bu farkın %18.67'ye yükseldiği görülmektedir. Bu farkın yığma duvarlar için kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir. Bu durumda dolgulu KYDDE-2 deney elemanı için analitik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların taşıma kapasitesi açısından yakın değerler verdiğini göstermektedir.

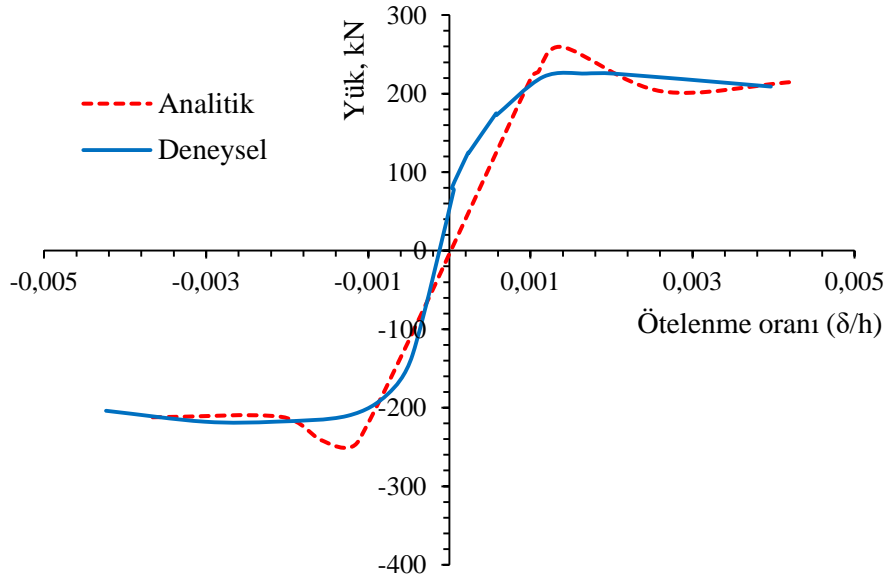
Dolgulu-donatılı yığma duvar deney elemanına (KYDDE-1) ait analitik olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri bu eğrilerin maksimum noktalarının birleştirilmesi ile oluşturulan dayanım zarfı eğrisi Şekil 3.34'te verilmektedir.



Şekil 3.34. KYDDE-3 deney elemanı için elde edilen (a) analitik, (b) filtrelenmiş analitik yük-yerdeğiştirme eğrileri ile analitik dayanım zarfı eğrisi

Şekil 3.34'ten dolgulu donatılı deney elemanı KYDDE-3 için analitik çalışmalar sonunda elde edilen maksimum yükün itmede 259.45 kN, çekmede ise 242.01 kN olduğu görülmektedir. Bu değerlere karşılık gelen yerdeğiştirmeler ise itmede 3.1 mm ve çekmede 1.69 mm'dir.

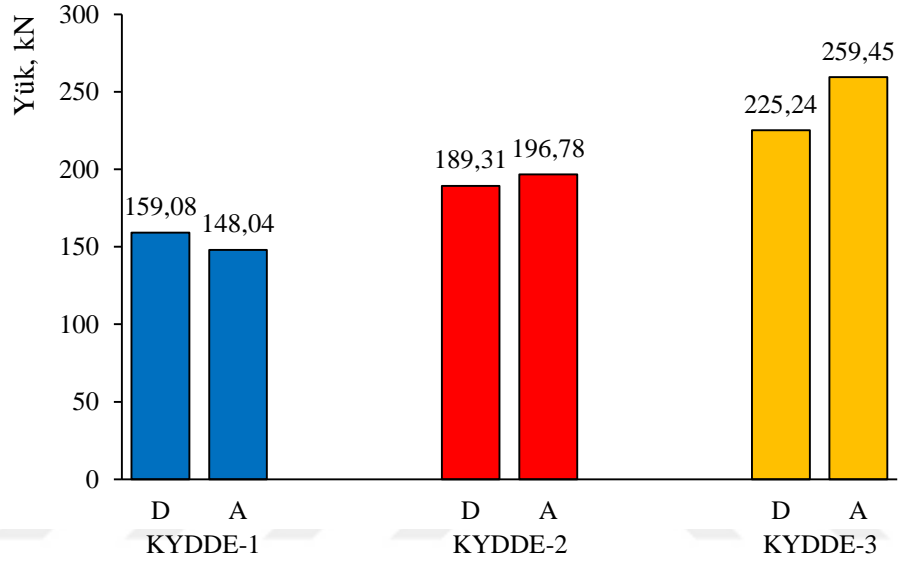
KYDDE-3 deney elemanına ait deneysel ve analitik dayanım zarfı eğrileri Şekil 3.35'te verilmektedir.



Şekil 3.35. KYDDE-3'e ait deneysel ve analitik dayanım zarfı eğrileri

Şekil 3.35'ten görüldüğü gibi dolgulu-donatılı deney elemanı KYDDE-3'ün itmedeki analitik yük taşıma kapasitesinin deneyselden % 15.19 olduğu, çekmede ise aradaki farkın % 11.13 olduğu görülmektedir.

Sonlu eleman analizleri gerçekleştirilen KYDDE-1, KYDDE-3 ve KYDDE-3 deney elemanlarının deneysel ve analitik olarak elde edilen maksimum yük taşıma kapasitelerini gösterir histogram Şekil 3.36'da görülmektedir.



Şekil 3.36. Yığma duvar deney elemanlarına ait deneysel ve analitik yük taşıma kapasiteleri

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilen bu çalışmanın temel amacı; çalışma kapsamında tasarımı gerçekleştirilip üretilen kilitli yığma birimlerle üretilen yığma duvarların yatay yük taşıma kapasitelerinin artırılması ile deprem etkisi altındaki davranışlarının iyileştirilmesi ve yığma yapıların toptan göçmesinin önlenmesi ya da en aza indirgenmesidir. Bununla birlikte ülkemizde yığma yapı stoğunun büyük bir kısmının kırsal bölgelerde bulunduğu bilinmektedir. Dolayısı ile geliştirilen yığma birim elemanların kolay üretilip taşınması, inşa edilmesi, ayrıca yığma birim elemanların boşluklarına beton dolgu ile birlikte yatay ve düşey doğrultuda donatı yerleştirilirken kalıp kullanılmaması diğer bir deyişle inşa kolaylığı ve maliyetin azaltılması da hedeflenmiştir. Bu çalışmanın bütününden çıkartılabilecek başlıca sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

Bu çalışma kapsamında tasarlanarak, köpük beton ile üretilen kilitli yığma birim elemanlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonunda;

- ✓ Bir adet kilitli yığma birim elemanın ortalama basınç dayanımı 10.15 MPa ve elastisite modülü 3756 MPa olarak elde edilmiştir.
- ✓ Kilitli yığma birimler ve harçtan oluşan yığma deney elemanının ortalama basınç dayanımı 8.4 MPa ve elastisite modülü 4270 MPa olarak elde edilmiştir.
- ✓ Bir adet kilitli yığma birim elemanın hacmi  $0.013 \text{ m}^3$  ve ortalama doğal birim hacim ağırlığı  $1313 \text{ kg/m}^3$ 'tür.
- ✓ Yığma birim elemanların ortalama kayma dayanımı 0.44 MPa olarak elde edilmiştir.
- ✓ Üretilen yığma birim elemanların ortalama çekme dayanımı 0.76 MPa olarak elde edilmiştir.

Kilitli yığma birimlerle oluşturulan yığma duvarlar ile geleneksel yığma tuğlalı duvar üzerinde gerçekleştirilen düzlem içi tekrarlı yükleme deneyleri ve analitik çalışmalar sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- ✓ Çalışma kapsamında tasarlanıp üretilen kilitli yığma birim elemanlar, yığma duvarların yatay yük taşıma kapasitesini, enerji tüketme kapasitesini ve rijitliğini önemli ölçüde artırmaktadır.
- ✓ Deney elemanlarının düzlem içi yatay yük etkisi altındaki davranışı yaklaşık olarak

simetriktir.

- ✓ Yatay yük etkisindeki boşluklu kilitli yığma duvar deney elemanında (KYDDE-1) meydana gelen hasarlar, derzlerde ve kilitlerde oluşmamış, yığma birimleri kesen çatlaklar olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca deney elemanında toptan göçme meydana gelmemiştir.
- ✓ Yatay yük etkisindeki dolgulu yığma duvar deney elemanında (KYDDE-2), köşelerde düşey çatlaklar oluşmuş ayrıca mikro düzeydeki çatlaklar duvar boyunca yayılmıştır. Bununla birlikte duvar, iki köşesinde oluşan düşeye yakın derin çatlaklarla taşıma gücünü kaybetmiş ve toptan göçme meydana gelmemiştir.
- ✓ Yatay yük etkisindeki dolgulu-donatılı yığma duvar deney elemanı (KYDDE-3), betonarme perde davranışına yakın bir davranış göstermiş ve mikro düzeyde meydana gelen çatlaklar, birbirinden bağımsız bir şekilde duvarın geneline yayılmıştır. İlerleyen aşamalarda çatlaklar bazı bölgelerde birleşmiş fakat toptan göçme meydana gelmemiştir. Ayrıca yığma duvar taşıma gücünü, taban kesme kuvveti ile kaybetmiştir.
- ✓ Kilitli yığma duvar deney elemanlarının göçme şekillerinden, birim elemanlardaki kaymayı önleyecek kilit sisteminin işlevini başarıyla yerine getirdiği ve kilitlerde parçalanma olmadığı görülmüştür. Bu durum, yığma duvarlarda bu elemanların kullanılması halinde, depremden dolayı oluşması muhtemel can ve mal kayıplarının azalacağına işaret etmektedir.
- ✓ Kilitli yığma birimlerle üretilen boşluklu yığma duvar deney elemanı, geleneksel yığma tuğlalı deney elemanından yaklaşık %32 daha fazla yatay yük taşıma kapasitesine, %79 daha fazla enerji tüketme kapasitesine ve %1024 daha fazla başlangıç rijitliğine sahiptir. Bu durum yalnızca birim elemanlar ve harç kullanılarak üretilen boşluklu yığma duvarların çevrimsel yatay yük etkisi altındaki davranışlarının, geleneksel yığma duvarlardan çok daha iyi olduğunu göstermektedir.
- ✓ Boşluklu yığma duvarın düşey boşluklarının betonla doldurulması halinde, yığma duvarın boşlukluya oranla yatay yük taşıma kapasitesi yaklaşık %19, enerji tüketme kapasitesi %20 ve başlangıç rijitliği ise %47 artmıştır. Bu durum dolgu betonunun kilitli yığma duvarların rijitliğini oldukça fazla, yatay yük taşıma kapasitesi ile enerji tüketme kapasitesini ise dikkate değer oranda artırdığını göstermektedir.

- ✓ Düzlem içi davranışları incelenen kilitli yığma duvarların taşıma kapasiteleri, enerji tüketme kapasiteleri ve başlangıç rijitlikleri bakımından en iyi davranışı dolgulu-donatılı deney elemanı KYDDE-3 göstermiştir. Öyle ki, KYDDE-3 deney elemanının taşıma kapasitesi KYDDE-1 ve KYDDE-2 yığma duvar deney elemanlarından sırasıyla %42 ve %19, enerji tüketme kapasitesi %27 ve %6 ve başlangıç rijitlikleri %62 ve %10 daha fazla olmuştur. Bu durum yığma duvarlarda yatay ve düşey doğrultuda donatı kullanımının, duvarın sünekliğini, taşıma kapasitesini ve rijitliğini artırdığını göstermektedir.
- ✓ Çalışma kapsamında üretilen deney elemanlarının boyutları belirlenirken sistemin eğilmeden ziyade kesme etkisindeki davranışı belirlenmek istendiğinden yaklaşık kare deney elemanları üretilmiştir. Ayrıca seçilen boyutlardaki duvarlar, eğilmeden daha çok kesme kuvvetine maruz kaldığından, birim elemanlarda kullanılan kilitlerin görevlerini yapıp yapmadıkları da denetlenmiştir. Ancak bu durum eğilme etkisinde daha fazla katkı sağlayacağı düşünülen donatının, etkisinin azalmasına neden olmuştur.
- ✓ Düzlem içi yüklenen deney elemanlarının, deneysel ve analitik çözümlemesiyle elde edilen taşıma kapasiteleri pratik olarak birbiriyle örtüşmektedir.
- ✓ Kırsal bölgelerde bu çalışmanın içeriğinde verilen kilitli yığma birimler kullanılarak yığma yapıların üretilmesi halinde söz konusu yapıların deprem davranışlarının geleneksel yığma birimlerle inşa edilen yapılara göre daha iyi olacağı görülmektedir.
- ✓ Geliştirilen 4 tarafı kilitli yığma birim elemanlardan yatay/düşey doğrultuda donatının geçirilmesi ve boşlukların betonlanması aşamasında herhangi bir kalıp kullanılmamasının yığma yapı inşasında maliyeti azaltıp inşa kolaylığı sağlayacağı açıktır.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, konuyla ilgili araştırmaların geliştirilmesi amacıyla bazı öneriler aşağıda verilmiştir.

- ✓ Yükseklik/genişlik oranı fazla olan kilitli yığma duvarlar donatılı inşa edilerek, donatının düzlem içi davranışa etkisi araştırılabilir.
- ✓ Tekrarlı yükleme etkisi altındaki yük-yerdeğiştirme eğrilerinde sıkışma etkisi (pinching effect) yakalanamadığı için farklı sonlu eleman modelleme programları ve farklı malzeme modelleri kullanılarak yığma duvarların düzlem içi yükleme altındaki davranışları ile ilgili çalışmalar yapılabilir.

- ✓ Çalışma kapı/pencere boşluğu olmayan yığma duvar deney elemanları üzerinde gerçekleştirilmiş olduğundan, söz konusu kilitli yığma birim elemanlar kullanılarak üretilen farklı boyut ve konumda kapı ve pencere boşluğuna sahip yığma duvarların düzlem içi davranışları incelenebilir.
- ✓ Köpük beton kullanımıyla birim hacim ağırlığı daha düşük betonlarla yığma duvarların düzlem içi davranışları araştırılabilir.
- ✓ Farklı eksenel yük ve farklı harç sınıflarında kilitlerin sistem davranışına etkisi araştırılabilir.

Bu çalışma kapsamında tasarım ve üretimi gerçekleştirilen kilitli yığma duvar sisteminin patentinin alınması için “Kilitli Duvar Eleman Yapılanması” başlığı ve “2016/14324” başvuru numarası ile 12.10.2016 tarihinde Türk Patent Enstitüsü’ne başvuru yapılmış olup, başvuru dosyası değerlendirme aşamasındadır.



## 5. KAYNAKLAR

1. D.İ.E., Bina Sayımı 2000, Yayın No:2471, Ankara, 2001.
2. TS 2510, Kâgir Duvarlar Hesap ve Yapım Kuralları, T.S.E, Ankara, 1977.
3. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY), T.S.E., Ankara, 2007.
4. TS 2514, Kerpiç Bloklar Yapım ve Kullanma, T.S.E., Ankara, 1977.
5. TS EN 771-1:2011+A1, Kâgir Birimler- Özellikler- Bölüm 1: Kil Kâgir Birimler, T.S.E, Ankara, 2015.
6. TS 705, Duvarlar İçin Dolu ve Düşey Delikli Fabrika Tuğlaları, T.S.E., Ankara, 1985.
7. TS EN 12602:2008+A1, Önyapımlı Donatılı Gazbeton Yapı Elemanları, T.S.E., Ankara, 2013.
8. Orhon, A., V., Çok Katlı Konut Yapılarında Takviyeli Yığma Yapımın Türkiye Koşullarına Uygulanabilirliği Açısından Bir Model Önerisi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2003.
9. Kuban, D., Mimarlık Kavramları, Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, İstanbul, 1998.
10. TS EN 998-2, Kâgir harcı- Özellikler- Bölüm 2: Kâgir Harcı, T.S.E., Ankara. 2011.
11. TS EN 1996-1-1+A1, Eurocode 6: Kagir yapıların tasarımı- Bölüm 1-1: Donatılı ve Donatısız Kagir Yapılar İçin Genel Kurallar, T. S.E., Ankara. 2013.
12. Tena Colunga, A., Juarez-Angeles, A. and Salinas-Vallejo, V., H., Cyclic Behavior of Combined and Confined Masonry Walls, *Engineering Structures*, 31 (2009) 240-259.
13. Blondet, M., Construction and Maintenance of Masonry Houses for Masons and Craftsmen, Pontificia Universidad Catolica del Peru, Lima, 2005.
14. Aydınoğlu, M., N., Celep, Z., Özer, E. ve Sucuoğlu, H., Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik Açıklamalar ve Örnekler El Kitabı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2009.
15. Jain, S., K., Brzev, S., Bhargava, L., K., Basu, D., Ghosh, I., Rai, D., C. and Ghaisas, K., V., Confined Masonry for Residential Construction, Indian Institute of Technology Gandhinagar, Gujarat, 2015.
16. Tomazevic, M., Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings, Series in Innovation In Structures and Construction, Imperial College Press, London, 1999.

17. Sayın, E., Yığma Yapıların Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ. 2009.
18. Ural, A., Yığma Yapıların Doğrusal Olmayan Elastik Ötesi Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
19. Kuruşçu, A., O. Yığma Yapıların Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
20. Lourenco, P., B., Computational Strategies for Masonry Structures, PhD Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 1996.
21. Bayülke, N., Yığma Yapıların Deprem Davranışı ve Güvenliği, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ekim 2011, Ankara, 23-36.
22. Brzev, S., Earthquake-Resistant Confined Masonry Construction, National Information Center of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, India, 2007.
23. Leiva, G., H., Seismic Resistance of Two-Story Masonry Walls With Openings, PhD Thesis, The University of Texas, Texas, 1991.
24. Önal, M., M., ve Koçak, A., Yığma Yapı Hasarları ve Onarım ve Güçlendirme Yöntemlerinin Ayrıntıları, Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi Eylül 2005, Bildiriler Kitabı, 93-108.
25. Oliviera, D., V., Experimental and Numerical Analysis of Blocky Masonry Structures Under Cyclic Loading, PhD Thesis, Minho University, Portugal, 2003.
26. Romano, A., Modelling, Analysis and Testing of Masonry Structures, PhD Thesis, The University of Naples Federico II, Italy, 2005.
27. Li, T. and Atamturktur, S., Fidelity and Robustness of Detailed Micro Modeling, Simplified Micro Modeling, And Macro Modeling Techniques for a Masonry Dome, Journal of Performance of Constructed Facilities, 28, 3 (2014) 480-490.
28. Spada, A., Giambanco, G. and Rizzo, P., Damage and Plasticity at The Interfaces in Composite Materials and Structures, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 198, 49–52 (2009) 3884-3901.
29. Pluijm, V., R., Shear Behaviour of Bed Joints, Proceedings of the 6th North American Masonry Conference, June 1993, Drexel University, Philadelphia, USA, 125-136.
30. Haach, V., G., Vasconcelos, G. and Lourenço, P., B., Parametrical Study of Masonry Walls Subjected to In-Plane Loading Through Numerical Modeling, Engineering Structures, 33, 4 (2011) 1377-1389.
31. Movila, I., Atanasiu, G., M. and Zahn, F., A., Modeling of the Lateral Load Behavior of Unreinforced Masonry Walls Using the Software Atena 2D, The 15th World Conference on Earthquake Engineering, September 2012, Lisbon, 6744-6753.

32. Sarhosis, V., Tsavdaridis, K. D. and Giannopoulos, I., Discrete Element Modelling of Masonry Infilled Steel Frames with Multiple Window Openings Subjected to Lateral Load Variations, The Open Construction and Building Technology Journal, 8 (2014) 93-103.
33. Thamboo, J., A., Development of Thin Layer Mortared Concrete Masonry, PhD Thesis, Queensland University of Technology, Australia, 2014.
34. Zamani Ahari, G., Structural In-Plane Behavior of Masonry Walls Externally Retrofitted with Fiber Reinforced Materials, PhD Thesis, Kyushu University, Japan, 2013.
35. Arslan, M., E., Emiroğlu, M. and Yalama, A., Structural Behavior of Rammed Earth Walls Under Lateral Cyclic Loading: A Comparative Experimental Study, Construction and Building Materials, 133 (2017) 433-442.
36. Vasconcelos G. and Lourenco P., B., In-Plane Experimental Behavior of Stone Masonry Walls under Cyclic Loading, Journal of Structural Engineering, 135, 10 (2009), 1269-1277.
37. Demir, C., Seismic Behaviour of Historical Stone Masonry Multi-Leaf Walls, PhD Thesis, İstanbul Technical University, Turkey, 2012.
38. Doğu, E., Çift Cidarlı Moloz Dolgulu Tarihi Taş Duvarların Yatay Yükler Altındaki Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2010.
39. Tomazevic, M., Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings, Series in Innovation In Structures and Construction, Imperial College Press, London, 1999.
40. Saberi, M., Deprem Yüklerinin Altında Yığma Binaların Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.
41. Gencer, Ö., Pomza Katkılı Bimsbeton Bloklar ile Yapılmış Yığma Yapı Üzerinde Deprem Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2000.
42. Zarnic, R., Gostic, S., Crewe, A. and Taylor, C., Shaking Table Tests of 1/4 Reduced Scale Models of Masonry Infilled Reinforced Concrete Frame Buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30 (2001) 819-834.
43. Zhang, X., Singh, S., Bull, D. and Cooke. N., Out of Plane Performance of Reinforced Masonry Walls with Openings, Journal of Structural Engineering, 127 (2001) 51-57.
44. Karasin, A. ve Karaesmen, E., 1 Mayıs Bingöl Depreminde Meydana Gelen Yığma Yapı Hasarları, Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Artırılması Çalıştayı, Şubat 2005, Ankara, Bildiriler Kitabı, 112-119.

45. Alwathaf, A., H., Thanoon, W., A., Jaafar, M., S., Noorzaei, J. and AbdulKadir, M., R. Shear Characteristic of Interlocking Mortarless Block Masonry Joints, Masonry International: Journal of the British Masonry Society, 18 ,3 (2005) 139-146.
46. Kuran, F., Yığma Yapıların Çelik Şeritlerle Rehabilitasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
47. Pallares, F., J., Agüero, A., and Martin, M., Seismic Behavior of Industrial Masonry Chimneys, International Journal of Solids and Structures, 43 (2006) 2076-2090.
48. Yi, T., Moon, F. L., Leon R. T. and Kahn, L. F., Lateral Load Tests on a Two-Story Unreinforced Masonry Building, Journal of Structural Engineering, 132, 5 (2006) 643-652.
49. Chaimoon, K. and Attard, M., M., Modeling of Unreinforced Masonry Walls Under Shear and Compression, Engineering Structures, 29 (2007) 2056–2068.
50. Çöğürçü, M., T., Yığma Yapıların Yatay Derz Güçlendirme Yöntemiyle Güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2007.
51. Ural, A. ve Doğangün, A., Mikro Modelleme Tekniği Kullanılarak Yığma Yapıların Deprem Performanslarının İncelenmesi, Uluslararası Deprem Sempozyumu, Ekim 2007, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Bildiriler Kitabı, 323-331.
52. Wijonto, J., S., Seismic Assessment of Unreinforced Masonry Walls, PhD thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2007.
53. Dias, J., L., M., Cracking Due to Shear in Masonry Mortar Joints and Around the Interface Between Masonry Walls and Reinforced Concrete Beams, Construction and Building Materials, 21, 2 (2007) 446-457.
54. Kalkan, N., Düzlem Dışı Tersinir Yüklenen Yığma Yapıların Donatılı Püskürtme Betonu İle Güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
55. Voon, K., C., Ingham, J., M., Experimental In-Plane Strength Investigation of Reinforced Concrete Masonry Walls with Openings, Journal of Structural Engineering, 134, 5 (2008) 758-768.
56. Shedid, M., T., Drysdale, R., G. and El-Dakhakhni, W., W., Behavior of Fully Grouted Reinforced Concrete Masonry Shear Walls Failing in Flexure: Experimental Results, Journal of Structural Engineering, 134, 11 (2008) 1754-1767.
57. Shariq, M., Abbas, H., Irtaza, H. and Qamaruddin M., Influence of Openings on Seismic Performance of Masonry Building Walls, Building and Environment, 43, 7 (2008) 1232-1240.

58. Thanoon, W., A., Alwathaf, A., H., Noorzaei, J., Jaafar, M. S. and Abdulkadir, M., R., Nonlinear Finite Element Analysis of Grouted and Ungouted Hollow Interlocking Mortarless Block Masonry System, Engineering Structures, 30, 6 (2008) 1560-1572.
59. Ural, A. ve Doğangün, A., Yiğma Duvarların Kayma Kapasitelerini Etkileyen Parametreler: Desteksiz Duvar Uzunluğu, E-Journal of New World Sciences Academy, 4, 3 (2009) 340-350.
60. Ural, A., Yiğma Yapıların Doğrusal Olmayan Elastik Ötesi Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
61. Minaie, E., Behavior and Vulnerability of Reinforced Masonry Shear Walls, PhD Thesis, Drexel University, Pennsylvania, USA, 2009.
62. Tu, Y., H., Chuang, T., H., Liu, P., M., and Yang, Y., S., Out-Of-Plane Shaking Table Tests on Unreinforced Masonry Panels in RC Frames, Engineering Structures, 32, 12 (2010) 3925–3935.
63. Lourenço, P., B., Vaconcelos, G., Medeiros, P. and Gouveia, J., Vertically Perforated Clay Brick Masonry for Loadbearing and Non-Loadbearing Masonry Walls, Construction and Building Materials, 24, 11 (2010) 2317-2330.
64. Haach, V., G., Vasconcelos, G. and Lourenço, P., B., Experimental Analysis of Reinforced Concrete Block Masonry Walls Subjected to In-Plane Cyclic Loading, Journal of Structural Engineering, 136, 4 (2010) 452-462.
65. Haach, V., G., Vasconcelos, G. and Lourenço, P., B., Parametrical Study of Masonry Walls Subjected to In-Plane Loading Through Numerical Modeling, Engineering Structures, 33, 4 (2011) 1377-1389.
66. Rivera, J., L., V., Macias, D., N., Baqueiro, L., E., F. and Moreno, E., I., Out of Plane Behaviour of Confined Masonry Walls, Engineering Structures, 33, 5 (2011) 1734-1741.
67. Abou-Zeid, B., El-Dakhkhni, W., Razaqpur, A., and Foo, S., Performance of Unreinforced Masonry Walls Retrofitted with Externally Anchored Steel Studs Under Blast Loading, Journal of Performance of Constructed Facilities, 25 (2011) 441–453.
68. Porto, F., Mosele, F. and Modena, C., Cyclic Out-of-Plane Behaviour of Tall Reinforced Masonry Walls Under Effects, Engineering Structures, 33, 2 (2011) 287-297.
69. Porto, F., Mosele, F. and Modena, C., In-plane Cyclic Behaviour of a New Reinforced Masonry System: Experimental Results, Engineering Structures, 33,9 (2011) 2584–2596.
70. Tarque, N., Camata, G., Spacone, E., Varum, H. and Blondet, M., Elastic and Inelastic Parameters for Representing the Seismic In-Plane Behaviour of Adobe Walls, Terra 2012: XI Conferencia Internacional sobre el Estudio y Conservacion del Patrimonio Arquitectonico de Tierra. Pontificia Universidad Catolica del Peru. Lima, Peru.

71. Avila, L., Vasconcelos, G., Lourenço, P., B., Mendes, N., Alves, P., and Costa, A, C., Seismic Response Analysis of Concrete Block Masonry Buildings: An Experimental Study Using Shaking Table, The 15th World Conference on Earthquake Engineering, September 2012, Lisbon.
72. Demir, C., Seismic Behaviour of Historical Stone Masonry Multi-Leaf Walls, PhD Thesis, İstanbul Technical University, Turkey, 2012.
73. Banting, B., R. and El-Dakhakhni, W., W., Force and Displacement Based Seismic Performance Parameters for Reinforced Masonry Structural Walls with Boundary Elements, Journal of Structural Engineering, 138, 12 (2012) 1477-1491.
74. Medeiros, P., Vasconcelos, G., Lourenço, P., B. and Gouveia, J., Numerical Modeling of Non-confined and Confined Masonry Walls, Construction and Building Materials, 41 (2013) 968-976.
75. Dündar, B., Farklı Duvar ve Harç Malzemeleri İle Üretilen Duvarların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2013.
76. Moroz, J., G., Lissel, S., L. and Hagel, M., D., Performance of Bamboo Reinforced Concrete Masonry Shear Walls, Construction and Building Materials, 61, 30 (2014) 125-137.
77. Paparo, A. and Beyerb, K., Quasi-Static Cyclic Tests of Two Mixed Reinforced Concrete-Unreinforced Masonry Wall Structures, Engineering Structures, 71 (2014) 201–211.
78. Pardon, J., H., H., Rahgozar, R. and Narmashiri, K., Comparison of Seismic Behavior of Masonry Structures Retrofitted with Peripheral Shotcrete and FRP Composites, Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences, 4 (2014) 2440-2447.
79. Mohammadadpanah, H., Yekrangnia, M., Bakhshi A. and Ghannad, M., A., FEM modeling of in-plane behavior of retrofitted adobe walls under cyclic loading, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEES), August 2014, Turkey.
80. Cao, W., Zhang, Y., Dong, H., Zhou, Z. and Qiao, Q., Experimental Study on the Seismic Performance of Recycled Concrete Brick Walls Embedded with Vertical Reinforcement, Materials, 7, 8 (2014) 5934-5958.
81. AL-Shaikh, I. and Falah, N., Numerical Analysis of Masonry-Infilled Reinforced Concrete Frames, Journal of Science and Technology, 19, 2 (2014) 21-38.
82. Bolhassani M., Hamid A., A., Lau A., C., V. and Moon F., Simplified Micro Modeling Of Partially Grouted Masonry Assemblages, Construction and Building Materials, 83, 15 (2015) 159–173.

83. Bolhassani, M., Hamid, A., A. and Moon, F. L., Enhancement of Lateral In-Plane Capacity of Partially Grouted Concrete Masonry Shear Walls, Engineering Structures, 108 (2016) 59-76.
84. Mohamad, A., A., E. and Chen, Z., Experimental and Numerical Analysis of the Compressive and Shear Behavior for a New Type of Self-Insulating Concrete Masonry System, Applied Sciences, 6, 9 (2016) 245-258.
85. Ramirez, P., Sandoval, C. and Almazan, J., L., Experimental Study on In-Plane Cyclic Response of Partially Grouted Reinforced Concrete Masonry Shear Walls, Engineering Structures, 126 (2016) 598-617.
86. Chen, X. and Liu, Y., A Finite Element Study of The Effect of Vertical Loading on The In-Plane Behavior of Concrete Masonry Infills Bounded by Steel Frames, Engineering Structures, 117 (2016) 118-129.
87. Okail, H., Abdelrahman, A., Abdelkhalik, A. and Metwaly, M., Experimental and Analytical Investigation of the Lateral Load Response of Confined Masonry Walls, HBRC Journal, 12, 1 (2016) 33-46.
88. TS 802, Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, T.S.E., Ankara, Haziran 2009.
89. ASTM C1314-14, Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
90. BS EN 1052-3:2002, Methods of Test for Masonry. Determination of Initial Shear Strength, British Standards Institution, London, 2002.
91. ASTM E519/E519M-15, Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 2015.
92. FEMA 461, Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, Federal Emergency Management Agency, Washington, 2007.
93. Abaqus/CAE 2016 Programme, Dassault Systemes Simulia Corp. Providence, RI, USA, 2016.
94. Hibbitt, H., Karlsson, B. ve Sorensen P., 2011. Abaqus Analysis User's Manual Version 6.11 Dassault Systems Simulia Corp, Providence, RI, USA, 2011.
95. Malm, R., Predicting Shear Type Cracks Initiation and Growth in Concrete with Nonlinear Finite Elements Methods, PhD thesis, Royal Institute of Technology, Division of Structural Design and Bridges, Stockholm, Sweden, 2009.
96. GB50010-2010, Chinese National Standards. Code for Design of Concrete Structures, Architecture and Industry Press of China, Beijing, China, 2011.

97. Yang, W., Z., Constitutive Relationship Model for Masonry Materials in Compression Building Structure, Building Structure, 38 (2008) 80-82.
98. <https://www.mathworks.com/help/curvefit/smoothing-data.html?requestedDomain=www.mathworks.com>. 2 Nisan 2017.





## ÖZGEÇMİŞ

Fatma BİRİNCİ KAYAALP, 1985 yılında Trabzon'un Çaykara ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 2002 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2006 yılında İnşaat Mühendisliği bölümündeki lisans eğitimini tamamlayarak aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı ve 2010 yılında "Taş Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi" isimli teze Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. 2009-2013 yılları arasında Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane Meslek Yüksekokulu İnşaat Teknolojisi bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalıştı. Aralık 2013-Ekim 2014 arasında Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü'nde İnşaat Mühendisi olarak çalıştı. Aralık 2014'te Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı'na Araştırma görevlisi olarak atandı. Evli olan Fatma BİRİNCİ KAYAALP halen Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümündeki görevine devam etmektedir.