

**SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİMS DUVAR ELEMANLARI İÇİN ÜÇ NOKTALI KESME
DENEYİNİN SAYISAL MODELİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Rojda ORMAN SUBAŞI

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ

Aralık 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

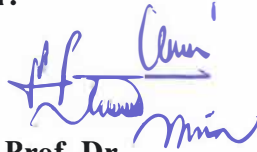
BİMS DUVAR ELEMANLARI İÇİN ÜÇ NOKTALI KESME
DENEYİNİN SAYISAL MODELİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Rojda ORMAN SUBAŞI

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 27/ 12/ 2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Erkan Çelebi
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Kemalettin Yılmaz
Üye



Dr. Öğr. Üyesi
Osman Kırtel
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.


Rojda ORMAN SUBAŞI

27.12.2018

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgisinden ve tecrübelerinden yararlandığım, yapılmış olan tez çalışması boyunca bana danışmanlık eden ve yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında benden desteğini ve bilgisini esirgemeyen meslektaşım ve aynı zamanda değerli eşim İlker SUBAŞI'ya, çalışmamın deneysel kısmında beni yönlendiren ve yardımcı olan Doç. Dr. Mücteba UYSAL'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteğini esirgemeyen ve büyük fedakârlık gösteren, bu günlere gelmemde en büyük emeği ve katkısı olan değerli babam Mehmet ORMAN'a, annem Nakise ORMAN'a ve kardeşlerim İ.Halil-Büşra-Davut ORMAN'a minnettarlığımı ve teşekkürlerimi belirtmek isterim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-----|
| TEŞEKKÜR | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ | v |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | vi |
| TABLOLAR LİSTESİ | x |
| ÖZET | xi |
| SUMMARY | xii |
| BÖLÜM 1. | |
| GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar..... | 4 |
| 1.2. Çalışmanın Kapsamı ve Amacı | 15 |
| 1.3. Tezin Organizasyonu..... | 16 |
| BÖLÜM 2. | |
| YIĞMA YAPILARIN GENEL ÖZELLİKLERİ | 11 |
| 2.1. Kullanılan Malzemeler..... | 18 |
| 2.1.1. Tuğla..... | 18 |
| 2.1.2. Bims Blok..... | 19 |
| 2.1.3. Doğal Taş..... | 20 |
| 2.1.4. Ahşap..... | 21 |
| 2.1.5. Kerpiç..... | 21 |
| 2.1.6. Harç..... | 22 |
| 2.2. Yığma Yapı Elemanları..... | 23 |
| 2.2.1. Duvarlar..... | 23 |
| 2.2.2. Kemerler, tonozlar, kubbeler..... | 23 |

| | |
|---|----|
| 2.2.3. Sütunlar..... | 25 |
| 2.3. Yığma Yapılarda Meydana Gelen Hasar Biçimleri..... | 26 |
| 2.3.1. Duvarlarda meydana gelen hasarlar..... | 27 |
| 2.3.2. Temellerde meydana gelen hasarlar..... | 29 |
| 2.3.3. Depremlerden meydana gelen hasarlar..... | 29 |
| 2.4. Yığma Yapılar İçin Hasar Ölçütleri..... | 31 |
| 2.5. Yığma Yapıların Yük Taşıma | 31 |
| | |
| BÖLÜM 3. | |
| REFERANS ALINAN DENEYSEL ÇALIŞMA..... | 35 |
| 3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler | 36 |
| 3.1.1. Bims blok..... | 36 |
| 3.1.2.Harç..... | 36 |
| 3.2. Deneyde Uygulanan Yükleme Biçimi | 37 |
| 3.3. Referans Numunelerinin Deney Sonuçları | 37 |
| | |
| BÖLÜM 4. | |
| YIĞMA DUVARLARIN MODELLENMESİ..... | 40 |
| 4.1. Yığma Duvarlarda Kullanılan Modelleme Yöntemleri..... | 40 |
| 4.1.1. Heterojen modelleme tekniği..... | 41 |
| 4.1.1.1. Basitleştirilmiş mikro modelleme..... | 41 |
| 4.1.1.2. Mikro modelleme..... | 42 |
| 4.1.2. Homojen (makro) modelleme tekniği..... | 42 |
| 4.2. Yığma Duvarlarda Kullanılan Malzeme Modelleri..... | 43 |
| 4.2.1. Malzeme kabulleri..... | 43 |
| 4.3. Yığma Duvarlar için Kullanılan Akma-Kırılma Hipotezleri..... | 47 |
| 4.3.1. Tresca akma kriteri..... | 47 |
| 4.3.2. Von Mises/Hill akma kriteri..... | 48 |
| 4.3.3. Drucker-Prager, Mohr-Coulomb akma kriterleri..... | 49 |
| | |
| BÖLÜM 5. | |
| YIĞMA DUVAR BİRİMLERİ İÇİN GELİŞTİRİLEN SAYISAL MODEL..... | 50 |

| | |
|---|----|
| 5.1. ANSYS Yazılımı Hakkında Genel Bilgi..... | 50 |
| 5.2. Eleman Tipinin Belirlenmesi..... | 51 |
| 5.3. Malzeme Özelliklerinin Atanması..... | 51 |
| 5.4. Geometrinin Oluşturulması..... | 54 |
| 5.5. Sınır Koşullarının Belirlenmesi ve Yükleme Biçimi..... | 54 |
| 5.6. Uygun Sonlu Eleman Sayısının Belirlenmesi..... | 55 |
| 5.7. Yığma Duvar Biriminin Sayısal Analizi..... | 57 |
| 5.8. Referans Deneyle İle Sayısal Modelin Karşılaştırılması..... | 59 |
| | |
| BÖLÜM 6. | |
| SAYISAL ÇALIŞMA..... | 60 |
| 6.1. Beyaz Çimento ve Doğal Su Kireci Esaslı Sıva Malzemesinin Mekanik Özellikleri..... | 60 |
| 6.1.1. Beyaz çimento ve doğal su kireci esaslı sıva malzemesi kullanılarak oluşturulan modelin sayısal analizi..... | 61 |
| 6.2. Genleştirilmiş Cam Kürecik Esaslı Sıva Malzemesinin Mekanik Özellikleri..... | 61 |
| 6.2.1. Genleştirilmiş cam kürecik esaslı sıva malzemesi kullanılarak oluşturulan modelin sayısal analizi..... | 63 |
| 6.3. Referans Deneyle İdealleştirilmesi ve Süneklik Katsayılarının Hesaplanması..... | 64 |
| 6.4. Özel Harç Kullanılarak Oluşturulan Sayısal Modellerin Süneklik Katsayılarının Hesaplanması..... | 67 |
| | |
| BÖLÜM 7. | |
| SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 70 |
| | |
| KAYNAKLAR..... | 72 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 77 |

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|--------------------------------|---|
| A_{envelope} | : Kesme kuvveti-yer değiştirme (zarf) eğrisinin alanı |
| A | : Tuğla duvar-harç ara yüzey alanı |
| c | : Kohezyon |
| F_{max} | : Maksimum kesme kuvveti |
| f_v | : Numune kayma gerilmesi |
| f_{vm} | : Ortalama kayma dayanımı |
| f_{vk} | : Karakteristik kayma dayanımı |
| k_{el} | : Elastik rijitlik |
| σ | : Duvar düşey gerilmesi |
| $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ | : Asal gerilmeler |
| δ_e | : Elastik yer değiştirme |
| δ_u | : Maksimum yer değiştirme |
| τ_{em} | : Duvar kayma emniyet gerilmesi |
| τ_o | : Duvar çatlama emniyet gerilmesi |
| μ_s | : Sürtünme katsayısı |
| μ | : Süneklik katsayısı |
| V_{cr} | : Çatlama yükü |
| V_{max} | : Zarf eğrisindeki maksimum kesme kuvveti |
| V_u | : Bilineer eğri üzerindeki maksimum kesme kuvveti |
| ε | : Şekil değiştirme |
| ϕ | : Sürtünme açısı |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1. Ülkemizde bulunan yığma yapı sayısının toplam yapı sayısına oranı [3] | 1 |
| Şekil 1.2. Yenilenen Türkiye deprem tehlikesi haritası [6]..... | 2 |
| Şekil 1.3. Duvar birimi ile harç ara yüzünün kesme etkisi altındaki davranışının anlaşılabilmesi için oluşturulan farklı deney düzenekleri [12]..... | 4 |
| Şekil 1.4. Deney yapılacak numunelerin boyutları ve deney düzeneği [11]..... | 5 |
| Şekil 1.5. Kompozit sismik tekstil malzemesi [11]..... | 5 |
| Şekil 1.6. Kullanılan düşey delikli tuğla (a), bims blok (b), tuğla ve bims bloktan oluşturulan üçlü test numuneleri (c, d) [13]..... | 6 |
| Şekil 1.7. Deney düzeneği ve sismik tekstil malzemesi kullanılarak güçlendirilen üçlü test numuneleri [13]..... | 7 |
| Şekil 1.8. Yığma binadan alınan tuğlalar ve duvarlara uygulanan güçlendirme işlemi aşamaları [14]..... | 7 |
| Şekil 1.9. Yükleme biçimi (a) ve yükleme sonrasında birinci ve ikinci sette (b) ve üçüncü setlerde (c) oluşan deformasyon durumu [14]..... | 8 |
| Şekil 1.10. Kullanılan deney düzeneği [15]..... | 9 |
| Şekil 1.11. Duvar numunelerine uygulanan deneyler [15]..... | 9 |
| Şekil 1.12. Deneyde kullanılan üç duvar numuneleri ve yükleme biçimi [16]..... | 10 |
| Şekil 1.13. Duvar birimleri üzerine uygulanan test düzenekleri [16]..... | 10 |
| Şekil 1.14. Duvarın (a) ve duvar biriminin (b) boyutları, macro (c) ve mikro (d) modelleme tekniği prosedürü [17]..... | 11 |
| Şekil 1.15. Kullanılan sonlu eleman modeli (a) ve seçilen gerilme şekil değiştirme diyagramı (b) [17]..... | 12 |
| Şekil 1.16. Referans alınan deney düzenekleri ve deney sonucunda meydana gelen deformasyon [18]..... | 12 |
| Şekil 1.17. Referans deneylerinde kullanılan duvarın boyutları ve duvara uygulanan yükleme biçimi (a), deneyde meydana gelen çatlak | |

| | |
|---|----|
| oluşumları(b), tasarlanan modelin analizi sonucunda meydana gelen çatlak oluşumu (c) [19]..... | 13 |
| Şekil 1.18. Farklı düzende yapılandırılmış CFRP ile güçlendirilmiş duvar örnekleri [20]..... | 14 |
| Şekil 2.1. Yığma yapı örnekleri [21-22-23]..... | 17 |
| Şekil 2.2: Kullanılan yapı malzemelerine göre bina oranları [24]..... | 18 |
| Şekil 2.3. Yığma tuğla malzemesi..... | 18 |
| Şekil 2.4. Bims blok malzemesi..... | 19 |
| Şekil 2.5. Doğal taşlar [29]..... | 20 |
| Şekil 2.6. Kireç oluşum döngüsü [33]..... | 22 |
| Şekil 2.7. İzmir’de bulunan kemerli yapı örneği [34]..... | 24 |
| Şekil 2.8. Sivas’ta bulunan tonoz yapı örneği [35]..... | 24 |
| Şekil 2.9. Şanlıurfa’ da bulunan kubbe yapı örneği [36]..... | 25 |
| Şekil 2.10. Yunanistan’da bulunan sütun yapı örneği [37]..... | 25 |
| Şekil 2.11. Yığma tuğla duvarlarda çatlak oluşumları ve göçme biçimleri [39].... | 27 |
| Şekil 2.12. Yığma duvarlarda meydana gelen kırılma biçimleri [40]..... | 28 |
| Şekil 2.13. Yatay ve düşey yönde çekme gerilmelerine maruz bırakılmış zayıf duvar birimlerinde oluşabilecek çatlak yayılımları [41]..... | 28 |
| Şekil 2.14. Temel oturmasından kaynaklı yapıda meydana gelen hasar [42]..... | 29 |
| Şekil 2.15. Yığma yapı planı örnekleri [43]..... | 30 |
| Şekil 2.16. Harç, prizma ve yığma duvar biriminin gerilme-şekil değiştirme eğrisi [44]..... | 32 |
| Şekil 2.17. Harç ve tuğlada meydana gelen gerilmeler (a), harç ve duvar biriminde ezilme oluşumu (b), banç yükleri etkisi altındaki duvarda düşey çatlakların oluşumu (c) [44]..... | 33 |
| Şekil 2.18. Duvar birimlerinde meydana gelen çekme kırılmalarının oluşumu (a), çekme gerilmesi altında yük-deplasman ilişkisi (b) [44]..... | 33 |
| Şekil 2.19. Çevrimsel yük etkisi altındaki yığma bir duvarda meydana gelebilecek hasarlar [41]... .. | 34 |
| Şekil 3.1. Üçlü test numunesi [28]..... | 35 |
| Şekil 3.2. Deney düzeneği [28]..... | 37 |
| Şekil 3.3. Referans numunelerinin kuvvet-yer değiştirme ilişkileri..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Şekil 3.4. TS-03 referans numunesinin deney sonrasındaki görünümü [28]..... | 38 |
| Şekil 4.1. Modelleme Yöntemleri..... | 41 |
| Şekil 4.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği [48]..... | 42 |
| Şekil 4.3. Yığılma duvarlarda mikro modelleme (a), basitleştirilmiş mikro modelleme (b), makro modelleme (c) yöntemleri [25]..... | 43 |
| Şekil 4.4. Lineer-elastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi..... | 43 |
| Şekil 4.5. Lineer olmayan elastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı ilişkisi..... | 44 |
| Şekil 4.6. Elastoplastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı ilişkisi... .. | 44 |
| Şekil 4.7. İdeal elastoplastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı ilişkisi..... | 45 |
| Şekil 4.8. Pekleşen ideal elastoplastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı ilişkisi..... | 45 |
| Şekil 4.9. Rijit plastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı ilişkisi.... | 45 |
| Şekil 4.10. İzotropik pekleşme modelinin şeması [50]..... | 46 |
| Şekil 4.11. Kinematik pekleşme modelinin şeması [50]..... | 46 |
| Şekil 4.12. Düzlem gerilme için Tresca akma kriteri [49]..... | 47 |
| Şekil 4.13. Von Mises akma yörüngesi [49]..... | 48 |
| Şekil 4.14. Hill akma modeli [48]..... | 49 |
| Şekil 4.15. Drucker Prager ve Mohr Coulomb akma yüzeyleri [52]..... | 49 |
| Şekil 5.1. Sayısal analizde kullanılan eleman tipi..... | 51 |
| Şekil 5.2. Literatürden alınmış deneyler [53]..... | 52 |
| Şekil 5.3. Duvar biriminin gerilme-şekil değiştirme diyagramı..... | 52 |
| Şekil 5.4. Harcın basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme diyagramı..... | 53 |
| Şekil 5.5. Harcın kayma gerilmesi-şekil değiştirme diyagramı..... | 53 |
| Şekil 5.6. Modelde kullanılan harcın basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrisi ile kayma gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri..... | 53 |
| Şekil 5.7. Sayısal modelin geometrisi..... | 54 |
| Şekil 5.8. Sayısal modelin belirlenen sınır koşulları ve yükleme biçimi..... | 55 |
| Şekil 5.9. İdeal sonlu eleman sayısının belirlenmesi [54]..... | 56 |
| Şekil 5.10. Sonlu eleman sayısı-maksimum kuvvet ilişkisi..... | 56 |
| Şekil 5.11. Sayısal modelin sonlu eleman örgüsü..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Şekil 5.12. Sayısal analizde meydana gelen toplam deformasyon..... | 57 |
| Şekil 5.13. Sayısal analizde meydana gelen kayma gerilmesi..... | 58 |
| Şekil 5.14. Sonlu eleman analizinin kayma gerilmesi-yer değiştirme ilişkisi..... | 58 |
| Şekil 5.15. Referans deneyler ile sonlu eleman analizinin kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması..... | 59 |
| Şekil 6.1. DH-01 sıvasının kullanılmasıyla oluşturulan modelin sayısal analizi sonucu meydana gelen kuvvet-yer değiştirme ilişkisi..... | 61 |
| Şekil 6.2. DH-02 adlı sıva malzemesiyle hazırlanan numuneler..... | 62 |
| Şekil 6.3. DH-02 adlı sıva malzemesine uygulanan deneyler..... | 62 |
| Şekil 6.4. DH-02 sıvasının kullanılmasıyla oluşturulan modelin sayısal analizi sonucu meydana gelen kuvvet-yer değiştirme ilişkisi..... | 63 |
| Şekil 6.5. Eğrilerin bilineer idealizasyonu [55]..... | 64 |
| Şekil 6.6. TS-02 deneyinin idealizasyonu..... | 65 |
| Şekil 6.7. TS-03 deneyinin idealizasyonu..... | 65 |
| Şekil 6.8. Sonlu eleman analizinin idealizasyonu..... | 66 |
| Şekil 6.9. İdealleştirilmiş eğrilerle sonlu eleman analizinin karşılaştırılması..... | 66 |
| Şekil 6.10. DH-01 idealizasyonu..... | 67 |
| Şekil 6.11. DH-02 idealizasyonu..... | 68 |
| Şekil 6.12. Geleneksel harç, DH-01 ve DH-02 malzemelerinin kullanılmasıyla oluşturulan nümerik modellerin kuvvet-yer değiştirme ilişkileri..... | 68 |

TABLolar LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Tablo 2.1. Tuğla malzemesinin mekanik özellikleri [25-26]..... | 19 |
| Tablo 2.2. Bims blok malzemesinin mekanik özellikleri [26-28]..... | 19 |
| Tablo 2.3. Doğal taşların ortalama mekanik özellikleri [25]..... | 20 |
| Tablo 2.4. Farklı Ahşap malzemerin mekanik özellikleri [31]..... | 21 |
| Tablo 2.5. Alçılı kerpiç malzemesinin özellikleri [32]..... | 21 |
| Tablo 2.6. Duvarların basınç emniyet gerilmeleri (f_{em}) [38]..... | 26 |
| Tablo 2.7. Duvarların çatlama emniyet gerilmesi değerleri (τ_{em}) [38]..... | 26 |
| Tablo 2.8. Deprem bölgelerine göre yığma yapılarda izin verilen kat sayısı [38]... | 30 |
| Tablo 2.9. Yığma yapıların çatlak genişliğine göre hasar ölçüt tablosu [7]..... | 31 |
| Tablo 3.1. Bims blok elemanına ait özellikler [28]..... | 36 |
| Tablo 3.2. Deneyde kullanılan harcın çekme dayanımı..... | 36 |
| Tablo 3.3. Deneyde kullanılan harcın basınç dayanımı..... | 37 |
| Tablo 3.4. Numunelerin ortalama kayma gerilmesi değeri [28]..... | 39 |
| Tablo 5.1. Sayısal modele tanımlanan düşey yükleme..... | 55 |
| Tablo 6.1. Beyaz çimento ve duğal su kireci esaaslı sıva malzemesi..... | 60 |
| Tablo 6.2. Küp numunelerinden elde edilen basınç dayanımı..... | 62 |
| Tablo 6.3. Silindir numunelerinden elde edilen eğilme dayanımı..... | 63 |
| Tablo 6.4. Deney sonuçlarından elde edilen ortalama değerler..... | 63 |
| Tablo 6.5. Hesaplanan kayma gerilmesi değeri, karakteristik kayma gerilmesi (f_{vk}) ve süneklik kapasiteleri (μ)..... | 67 |
| Tablo 6.6. Hesaplanan maksimum kuvvet değeri (F_{max}), kayma gerilmesi değeri, karakteristik kayma gerilmesi (f_{vk}) ve süneklik kapasiteleri (μ).... | 68 |

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Bims blok, lineer olmayan analiz, sonlu eleman yöntemi, üç noktalı kesme testi, ANSYS

Yığma yapılar çok uzun yıllardır ülkemizde ve dünyada tercih edilen bir yapı türüdür. Ülkemizde özellikle kırsal bölgelerde hiçbir mühendislik hizmeti alınmadan inşaa edilmiş çok sayıda yığma yapı bulunmaktadır. Yaşanmış olan depremler sonucundaki kayıp ve yıkımların çoğu bu tür yetersiz yığma yapılardan kaynaklanmaktadır. Bunun yanı sıra ülkemizde birçok önemli tarihi yığma yapı da bulunmaktadır. Bu nedenle yaşanan depremler sonucunda oluşan ölüm ve yıkımların önüne geçebilmek ve önemli tarihi yapıları korumak için yığma yapıların sismik davranışının tespit edilmesi gerekmektedir. Söz konusu yapıların taşıyıcı sistemi duvarlar olduğundan, bu tür yapıların yapısal davranışının anlaşılabilmesi için duvarların davranışını öngörmek gerekmektedir. Bu nedenle duvarların davranışının anlaşılması adına birçok deneysel ve nümerik çalışma yapılmıştır.

Nümerik çalışmalarda en çok kullanılan sayısal analiz yöntemi sonlu elemanlar yöntemidir. Bu çalışmada iki eksenli çevrimsel yük etkisi altındaki bims duvar elemanlarının mekanik davranışının belirlenmesinde kullanılan üç noktalı kesme testi deneylerine karşı gelen sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir matematik model geliştirilmiştir. Önerilen sayısal modele ait malzeme bilgileri ve kırılma mekaniği daha önceden Karlsruhe Institute of Technology (KIT)-Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılmış olan deneylerin sonuçlarıyla kalibre edilmiştir. Söz konusu sayısal model mikro modelleme tekniği kullanılarak ANSYS paket programında tasarlanıp analizi gerçekleştirilmiştir. Beyaz çimento ve doğal su kireci esaslı sıva ve genişletilmiş cam kürecik esaslı sıva gibi farklı yapı malzemelerinin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Bu özel yapıştırma sıvaları kullanılarak üretilen üçlü bims duvar numunelerinin harç ara yüzeyinin kayma davranışı, dayanım performansı, süneklik kapasitesi, geleneksel harç kullanılan numunelerle karşılaştırılarak incelenmiştir. Deneylerin ve matematik modelin kuvvet-yer değiştirme eğrileri idealleştirilerek süneklik katsayıları hesaplanmıştır.

Geliştirilen nümerik model ile referans deneylerinin kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiş olup sünelik kapasitesi değerleri çok yakın çıkmıştır. Kullanılan özel harçlar, duvar biriminin kayma dayanımını önemli ölçüde değiştirmiştir. Ancak hesaplanan enerji yutabilme kapasiteleri benzer çıkmıştır.

NUMERICAL MODEL OF THE TRIPLET SHEAR TESTS FOR BIMS WALL ELEMENTS

SUMMARY

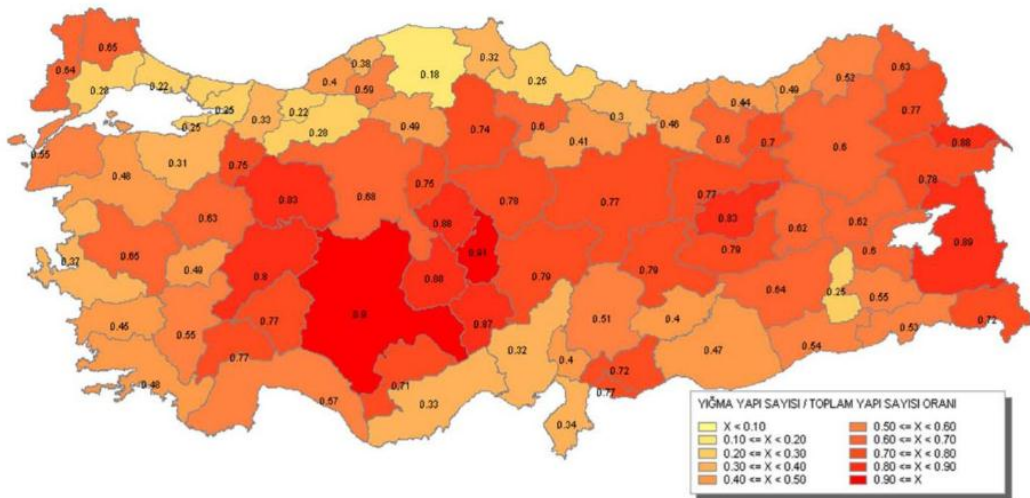
Keywords: Bims block, nonlinear analysis, finite element method, triplet shear test, ANSYS

Masonry structures have been preferred for many years in our country and the world. There are many masonry structures built in rural areas without any engineering services in our country. Most of the losses and demolitions resulting from the earthquakes caused due to such insufficient masonry structures. In addition, there are many important historical masonry structures in our country. Therefore, it is necessary to determine the seismic behavior of the masonry structures in order to prevent deaths and demolitions resulting from earthquakes and to preserve important historical buildings. Since the structural system of these structures is walls, it is necessary to foresee the behavior of the walls in order to understand the structural behavior of such structures. For this reason, many experimental and numerical studies have been done to understand the behavior of walls.

The most commonly used method in numerical investigations is the finite element method. In this study, a mathematical model was developed based on the corresponding finite element method of triplet shear test experiments used to determine the behavior of wall units under the effect of horizontal and vertical load. Material information and fracture mechanics of the numerical model were previously calibrated with the results of tests in the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) structural mechanics laboratories. In this model, the mechanical behavior of the pumice block/mortar interface under the effect of shear load was investigated numerically by using micro modeling technique. Compression and bending tests were performed to determine the mechanical properties of different building materials such as white cement and natural water lime based plaster and expanded glass granular based plaster. The shear behavior, strength and ductility capacity of the mortar interface of the triple pumice wall units produced by using special plasters were compared with the wall units using traditional mortar. Force-displacement curves of experiments and mathematical model were idealized and ductility coefficients were calculated. The force-displacement curves of the numerical model and experiments were consistent with each other. Calculated ductility capacity values are very close. The special mortars used have significantly changed the shear strength of the wall unit. However, the ductility capacities of traditional mortars and special mortars were similar.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

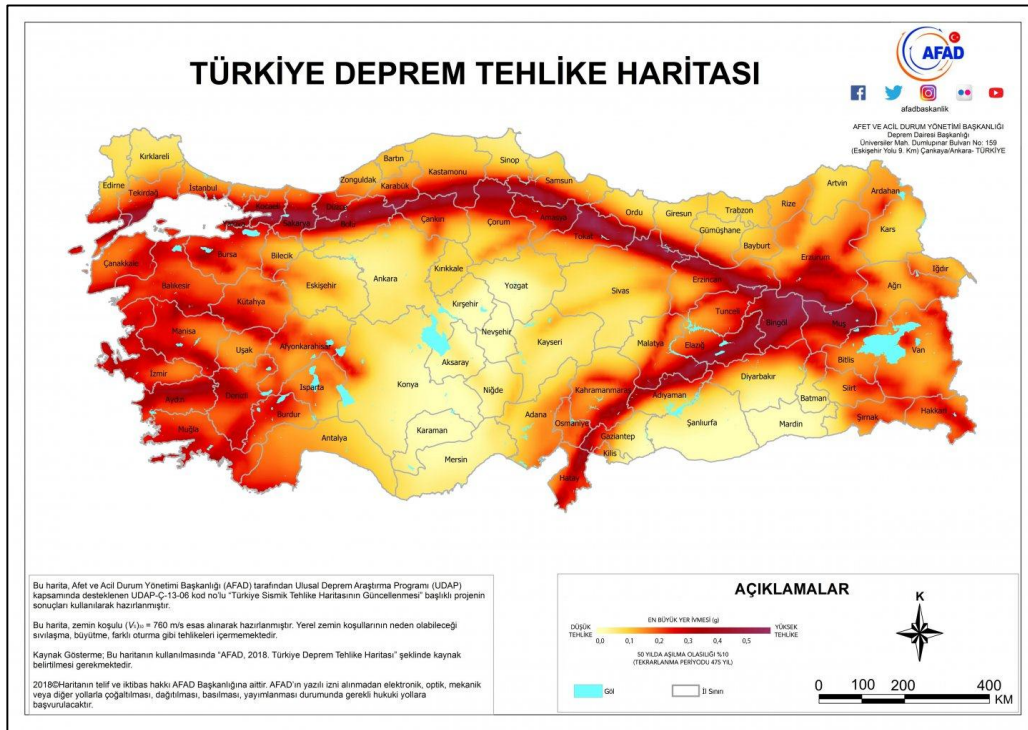
Yığma yapılar; doğal taş, tuğla, gaz beton gibi malzemelerin harçla birbirine bağlanmasıyla inşaa edilmektedir. Yığma yapılar çok uzun yıllardır varlığını sürdürmüş ve hala sürdürmeye devam etmektedir. Dünyada ve birçok medeniyete ev sahipliği yapmış olan ülkemizde kültürel miras olarak sayılan saray, köprü, cami gibi birçok önemli tarihi yığma yapı bulunmaktadır. Bunun gibi önemli tarihi yapılar; dayanımlarının belirsizliği, deprem davranışının bilinmemesi, doğal afetler, insan faktörü, zemin ve çevre koşulları, fiziksel ve kimyasal etkiler gibi nedenlerle tarihi dokuları hasar görmekte hatta yok olma tehlikesi altındadır [1]. Ülkemizdeki önemli tarihi yığma yapıların yanı sıra mühendislik kurallarına uymayarak inşaa edilen birçok yığma yapı da mevcuttur. Devlet İstatistik Enstitüsü (DİE)'nün 2000 yılı sayımlarına göre yapıların taşıyıcı sistemleri incelendiğinde %50 den fazlası yığma yapı olarak karşımıza çıkmaktadır [2]. Şekil 1.1.'de ülkemizde bulunan yığma yapı sayısının toplam yapı sayısına oranı gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Ülkemizde bulunan yığma yapı sayısının toplam yapı sayısına oranı [3]

Yığma yapıların bu kadar çok tercih edilmesinin sebepleri arasında malzeme teminin kolay olması, kısa sürede inşaa edilebilmesi ve ekonomik olması gösterilmektedir. Yığma yapılar bazı özellikleri açısından üstün olmalarına rağmen, çok ağır olmalarından ve yatay yüklere karşı dayanımlarının yetersiz olmasından dolayı depreme dayanıklı yapılar olarak kabul edilmemektedir [4]. Çoğunluğu kırsal bölgelerde yer alan ve mühendislik hizmeti almadan inşa edilen yığma yapılar depremlerden en çok etkilenen yapı türlerinden biridir.

Ülkemiz dünyanın en aktif deprem kuşaklarının birinin üzerinde yer almaktadır. Topraklarımızın %92 si deprem bölgesi içerisinde olup nüfusun yaklaşık %95'i deprem riski altındadır [5]. Bundan dolayı ülkemizde can ve mal kayıplarının en çok yaşandığı doğal afetlerden biri depremlerdir. 1 Ocak 2019 tarihinde yeni deprem yönetmeliği ile birlikte yürürlüğe girecek olan yenilenen Türkiye Deprem Tehlike Haritası Şekil 1.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Yenilenen Türkiye deprem tehlikesi haritası [6]

Ülkemizdeki depremlerde yıkılan binalarının birçoğunun yığma yapı olduğu gözlenmiştir [7]. 1970 Gediz Depremi'nde 1086 kişinin öldüğü, 17689 binanın orta ya da hafif hasar aldığı, 9473 binanın ağır hasar aldığı veya yıkıldığı ve bu binaların çoğunluğunun mühendislik hizmeti almadan inşa edilen yığma konutlar olduğu tespit edilmiştir. 1992 Erzincan Depremi'nde çoğu kırsal kesimde yer alan yaklaşık 8000 yığma yapı ağır hasar görmüş veya yıkılmıştır [8]. 2003 Bingöl depremi'nde 177 kişinin hayatını kaybettiği, yıkılmış ve ağır hasar almış binaların %30 değerine ulaştığı ayrıca birçoğunun kırsal bölgelerde yer alan yığma yapılar olduğu belirtilmiştir [4]. 2011 Van Depremi'nde 604 kişinin hayatını kaybettiği, 1,25 milyar dolarlık maddi hasarın meydana geldiği, bölgedeki binaların %86,4'ünün yığma bina olduğu ve özellikle köylerde yer alan yığma konutların birçoğunun yıkıldığı veya ağır hasar aldığı tespit edilmiştir [9]. Ülkemizin yaşamış olduğu en büyük doğal afetlerinden biri olan 1999 Marmara Depremi'nde ise ağır hasar gören ve yıkılan bina sayısının 60000'den fazla olduğu, yaklaşık 17000 kişinin hayatını kaybettiği ve 20 milyar dolara yakın maddi hasarın meydana geldiği belirtilmiştir [10].

Yaşanan bu yıkımlar ülkemizde ciddi bir yetersiz yığma yapı stoğu olduğunu göz önüne sermektedir. Son 58 yıllık veriler incelendiğinde; Ülkemizdeki depremlerden dolayı 400000'den fazla binanın yıkıldığı veya ağır hasar gördüğü belirtilmiş olup, yılda yaklaşık 7000 binanın yaşanan depremler nedeniyle yıkıldığı ve ya ağır hasar gördüğü belirtilmiştir [5]. Son zamanlarda yaşanan depremlerden ve diğer doğal afetlerden kaynaklanan ölüm ve yıkımlar yığma yapıların süneklik kapasitesinin ve kayma direncinin yetersiz olduğunu göz önüne sermiştir [11]. Bu nedenle depremlerden kaynaklanacak ölüm ve yıkımların önüne geçebilmek için yığma yapı davranışının anlaşılması önem arz etmektedir.

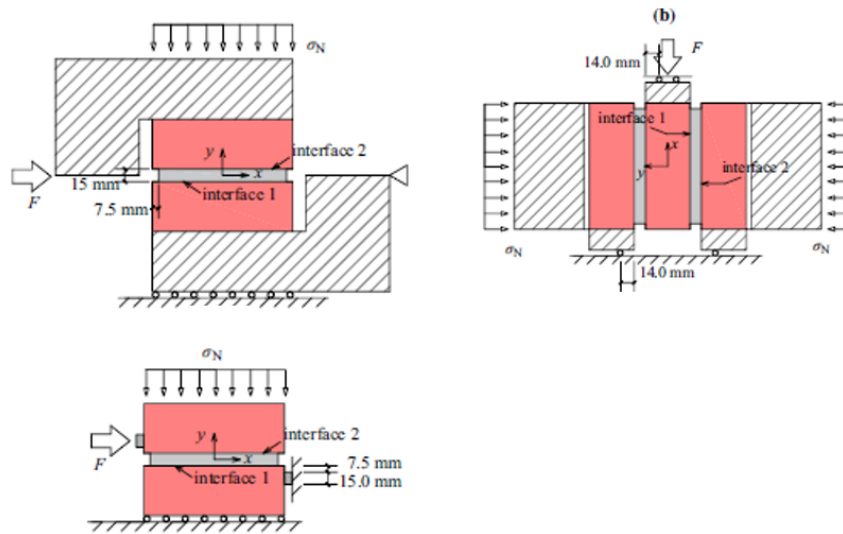
Yığma yapıların ana taşıyıcı elemanı olan duvarlar; taş, tuğla, gaz beton, pomza gibi malzemelerin çeşitli bağlayıcı harçlarla bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Duvarların dayanımında, kullanılan malzemelerin karakteristik özellikleri ve doğru yapım teknikleri oldukça önemlidir. Yığma yapıların ana taşıyıcı sistemi duvarlar olduğundan bu yapıların davranışının anlaşılabilmesi için duvarların davranışını

öngörmek gerekmektedir. Bu nedenle duvarların sismik davranışını araştırmak için birçok deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmaktadır.

1.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Yığma yapıların yapısal davranışının anlaşılabilmesi ve mevcut yığma yapıların güçlendirilmesiyle ilgili birçok deneysel ve nümerik çalışma mevcuttur. Literatür araştırması sonucunda bulunan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir.

Zang ve ark. [12], duvar üniteleriyle harç arasındaki bağın davranışını karakterize edebilmek için deneysel çalışmalarla birlikte lineer olmayan 3D analiz gerçekleştirmişlerdir. Sürtünme ve kohezyon katsayısı gibi değerler formülize edilmiştir. Duvar birimi ile harç ara yüzünün kesme etkisi altındaki davranışının anlaşılabilmesi için Şekil 1.3.'te görüldüğü gibi farklı deney düzenekleri kullanmıştır.

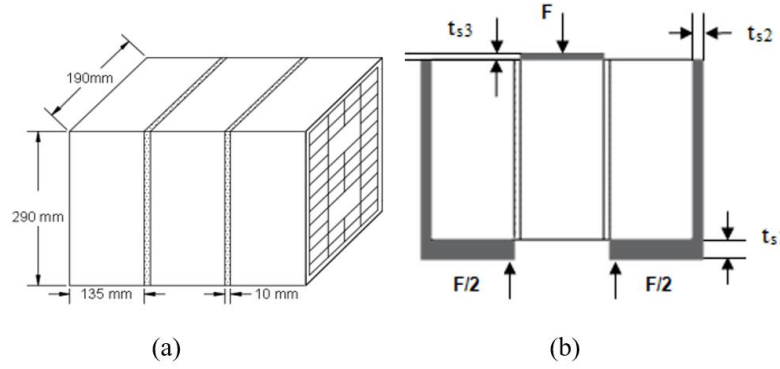


Şekil 1.3. Duvar birimi ile harç ara yüzünün kesme etkisi altındaki davranışının anlaşılabilmesi için oluşturulan farklı deney düzenekleri [12]

Çalışmalarında elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda detaylı bir mikro modelleme tekniğiyle daha iyi sonuçlar elde edilebileceği vurgulanmıştır.

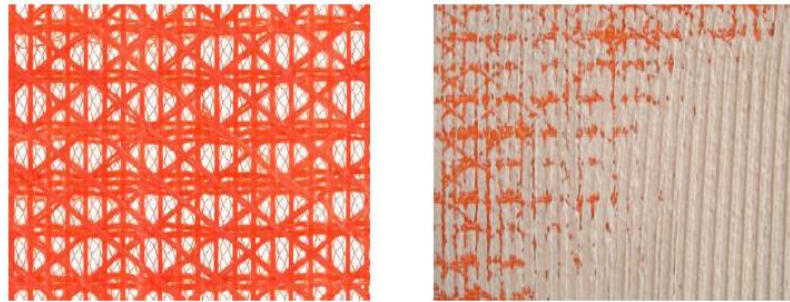
İstegün ve ark. [11] yapmış oldukları çalışmada, güçlendirilmemiş ve kompozit sismik kumaşla güçlendirilmiş tuğla duvar elemanlarının kesme gerilmeleri altındaki

davranışlarını ve çatlak oluşumlarını incelemişlerdir. 3 adet güçlendirilmemiş 6 adet güçlendirilmiş olmak üzere toplam 9 adet numune üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan numunelerin boyutları (a) ve deney düzeneği (b) Şekil 1.4.'te gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Deney yapılacak numunelerin boyutları ve deney düzeneği [11]

Güçlendirme işlemi, numunelerin yüzeylerine Şekil 1.5.'te gösterilen alkali dayanımlı cam elyaf ve polipropilen liflerden örülmüş çok eksenli sismik tekstil malzemesinin tek taraflı (3 numune) ve çift taraflı uygulanması (3 numune) ile oluşturulmuştur.

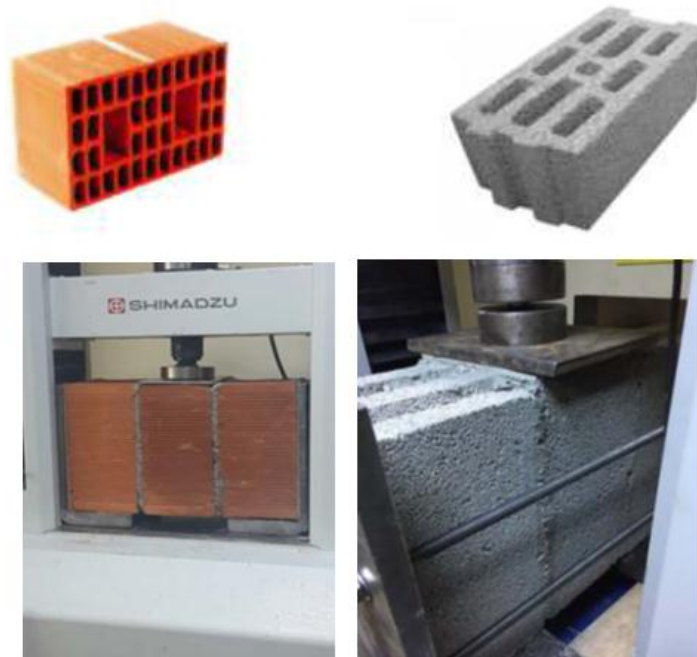


Şekil 1.5. Kompozit sismik tekstil malzemesi [11]

Kullanılan tekstik malzemesinin numune yüzeylerine yapıştırılabilmesi için genişletilmiş cam kürecik esaslı sıva kullanılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen kuvvet yer değiştirme grafikleri, kayma dayanımları ve süneklik kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca elde edilen kuvvet yer değiştirme eğrilerini idealize ederek süneklik katsayıları hesaplanmıştır. Güçlendirme işleminde kullanılan sismik tekstil malzemesinin süneklik kapasitesini belirgin ölçüde arttırdığı ve kullanılan sıva malzemesinin enerji yutma kapasitesi üzerinde etkili olduğuna dair çıkarımda

bulunulmuştur. Genleştirilmiş cam kürecik esaslı sıva ile sismik tekstil malzemeleri kullanarak tuğla malzemesiyle oluşturulmuş yığma yapıların deprem performansının geliştirilebileceği belirtilmiştir.

İstegün ve ark. [13], güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş bims blok numuneleri ile tuğla duvar numunelerinin düşey yük etkisi altındaki davranışlarının nasıl değiştiğini incelemiştir. Kullanılan düşey delikli tuğla (a), bims blok (b) ve tuğla ve bims bloktan oluşturulan üçlü test numuneleri (c,d) Şekil 1.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Kullanılan düşey delikli tuğla (a), bims blok (b), tuğla ve bims bloktan oluşturulan üçlü test numuneleri (c, d) [13]

Güçlendirme işlemi çok eksenli sismik tekstil malzemesinin cam kürecik esaslı sıva malzemesi kullanılarak numunenin tek yüzeyine yapıştırılmıştır. Sıva 20 mm kalınlıkta olup tüm numunelerin tek yüzeyine uygulanmaktadır. Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş olmak üzere toplan 12 adet numune yapılmış olup numuneler üç eksenli kesme deneylerine tabii tutulmuştur. Deney düzeneği (a) ve sismik tekstil malzemesi kullanılarak güçlendirilen üçlü test numuneleri Şekil 1.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.7. Deney düzeneği (a) ve sismik tekstil malzemesi kullanılarak güçlendirilen üçlü test numuneleri [13]

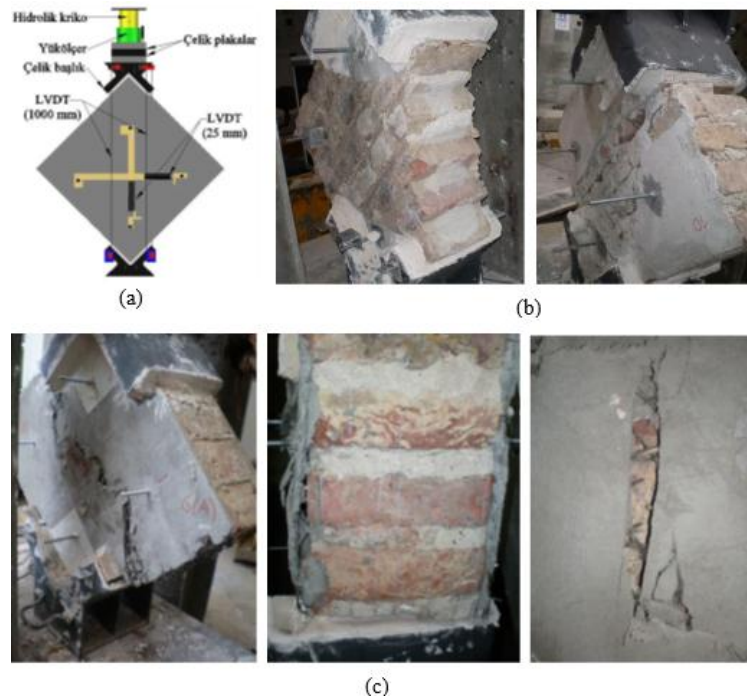
Oluşturulan numuneler Sakarya Üniversitesi'nin Yapı Mekaniği Laboratuvarında üç noktalı kesme deneylerine tabi tutulmuştur. Deneylerin sonuçlarından elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda güçlendirme işleminde kullanılan malzemelerin süneklik kapasitesini arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca yapılan deneylerden elde edilen sonuçların ışığında bims blok malzemesinin tuğlaya göre süneklik kapasitesinin daha yüksek olduğu sonucuna varılmaktadır.

Mezrea [14], 1900'lü yıllarda inşa edilmiş tarihi yığma binanın yıkımından sonra kalan hasar görmemiş tuğla numuneleri ile 6 adet duvar imal etmişlerdir. Duvar numunelerine tekstil donatılı harç malzemesi ile güçlendirme işlemi yapılmış olup kayma davranışı araştırılmıştır. Duvarlarda kullanılacak derz harçları, tarihi yapılardaki harcın mekanik özelliklerini yansıtabilmek adına yeniden üretilmiş olup basınç, eğilme gibi deneyler uygulanarak test edilmiştir. Duvarlarda kullanılan sıvanın, kayma davranışına olan etkisini araştırabilmek için iki farklı sıva uygulanmıştır. Numunelerden iki tanesine hiçbir güçlendirme işlemi yapılmamıştır. Geriye kalan numunelerden 2 tanesinin yüzeyine dayanımı düşük olan harç, diğer 2 tanesinin yüzeyine ise karbon tekstil donatılı ve orta dayanıma sahip harç malzemesi yapıştırılmıştır. Kullanılan tuğlalar ve güçlendirme aşamaları Şekil 1.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Yığma binadan alınan tuğlalar ve duvarlara uygulanan güçlendirme işlemi aşamaları [14]

İmal edilmiş ve güçlendirme işlemleri tamamlanmış 6 adet tuğla duvar numunelerine 500 kN kapasiteye sahip hidrolik bir kriko yardımıyla diyagonal basınç yüklemesi uygulanmıştır. Uygulanan yüklemeler kaydedilmiş olup duvarda oluşan yatay ve düşey yer değişimlerini belirleyebilmek için yer değişimi ölçerler yerleştirilmiştir. Yükleme biçimi (a) ve yükleme sonrasında birinci ve ikinci sette (b) ve üçüncü setlerde (c) oluşan deformasyon durumu Şekil 1.9.'da gösterilmiştir.

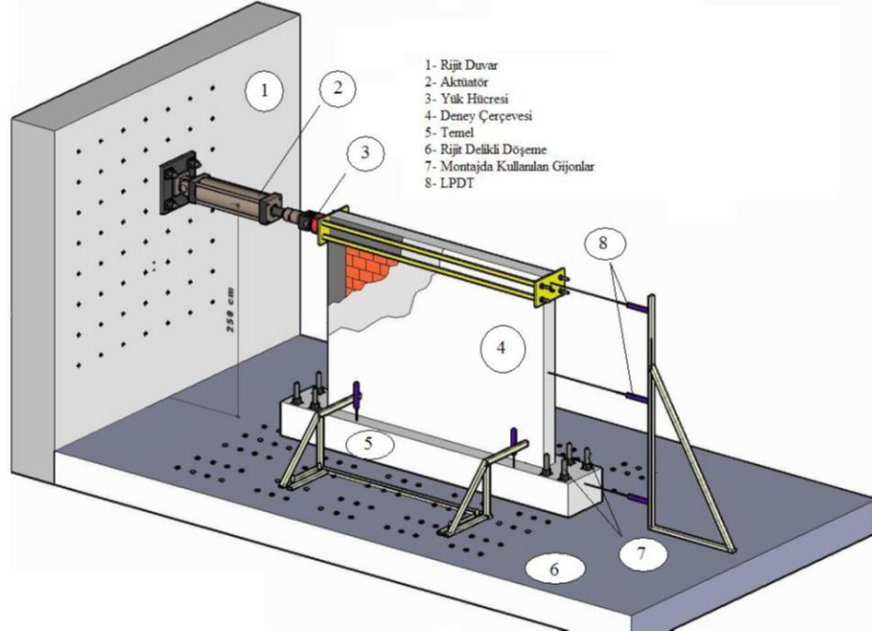


Şekil 1.9. Yükleme biçimi (a) ve yükleme sonrasında birinci ve ikinci sette (b) ve üçüncü setlerde (c) oluşan deformasyon durumu [14]

Duvar numunelerinin yüzeyine uygulanan düşük dayanıma sahip sıva, tuğla duvarlarının kayma dayanımını ve enerji yutabilme kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Tekstil donatılı ve orta dayanıma sahip harç ile güçlendirilen numunelerin ise kayma dayanımı ve tüketilen enerji miktarı incelendiğinde geriye kalan numunelere göre önemli bir artış gösterdiği açıklanmıştır.

Arslan [15], düşük dayanıma sahip beton ve geleneksel beton ile üretilen, cam lifli polimerlerden oluşturulmuş deprem kumaşı kullanılarak güçlendirilen çevrimsel yük etkisi altındaki dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız betonarme çerçevelerin düzlem içi ve düzlem dışı davranışını hem deneysel hem de teorik olarak incelemiştir. Kullanılan

deney düzeneği Şekil 1.10.'da, numunelere uygulanan deneyler ise Şekil 1.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Kullanılan deney düzeneği [15]

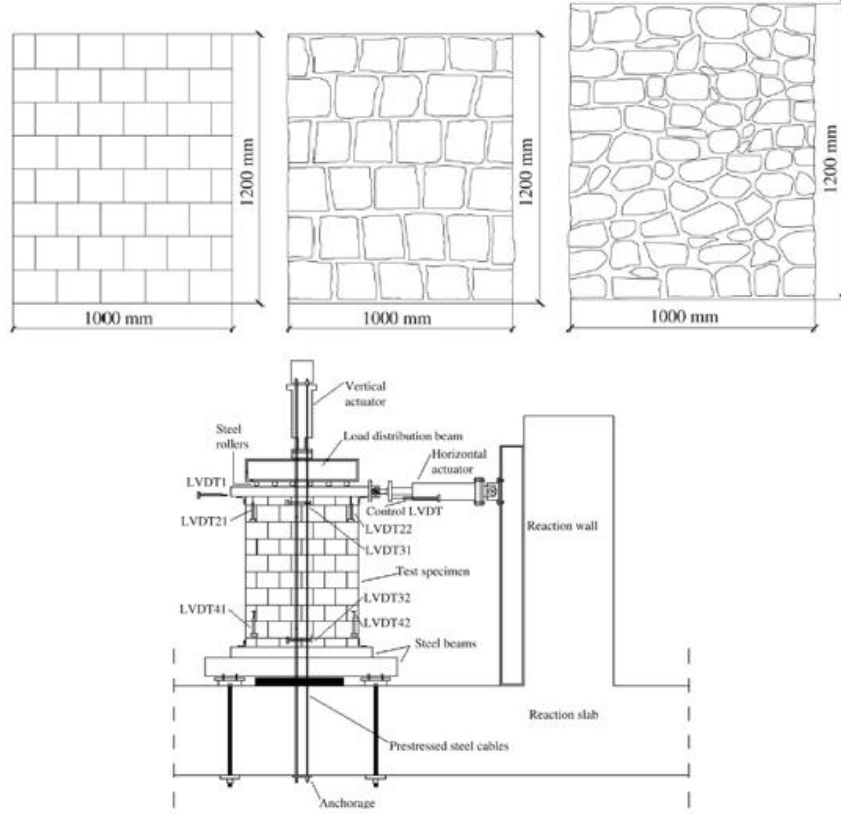


Şekil 1.11. Duvar numunelerine uygulanan deneyler [15]

Güçlendirme işleminde kullanılmış olan deprem kumaşının taşıma gücünü ve sünekliğini önemli derecede arttırdığı belirtilmiştir. Düşük dayanıma sahip beton ile üretilmiş ve söz konusu kumaş ile güçlendirilmiş tuğla dolgu duvarlı çerçevenin taşıma kapasitesinin, geleneksel beton kullanılarak üretilmiş gaz beton dolgulu çerçeveye nazaran daha büyük değere sahip olduğu açıklanmıştır.

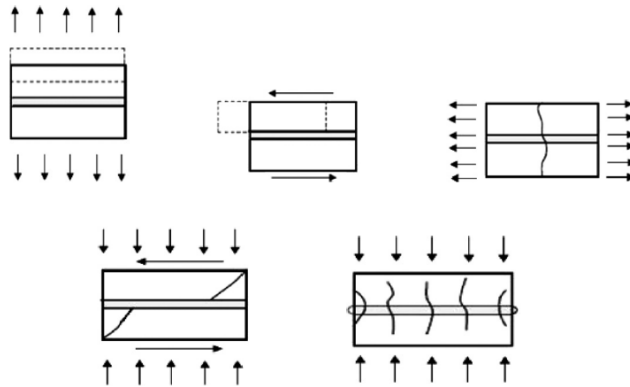
Senthivel ve ark. [16] tarafından yapılan çalışmada, Avrupa'da özellikle Portekiz'in kuzeyinde bulunan tarihi taş duvarların düzlem içi sismik performansının, kuvvet-yer

değiştirme diyagramlarının ve deformasyon özelliklerinin anlaşılabilmesi için hem deneysel hemde iki boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri yapılmış olup sonuçları karşılaştırılmıştır. Üç ayrı duvar numunesi ve deney düzeneği Şekil 1.12.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.12. Deneyde kullanılan üç duvar numuneleri ve yükleme biçimi [16]

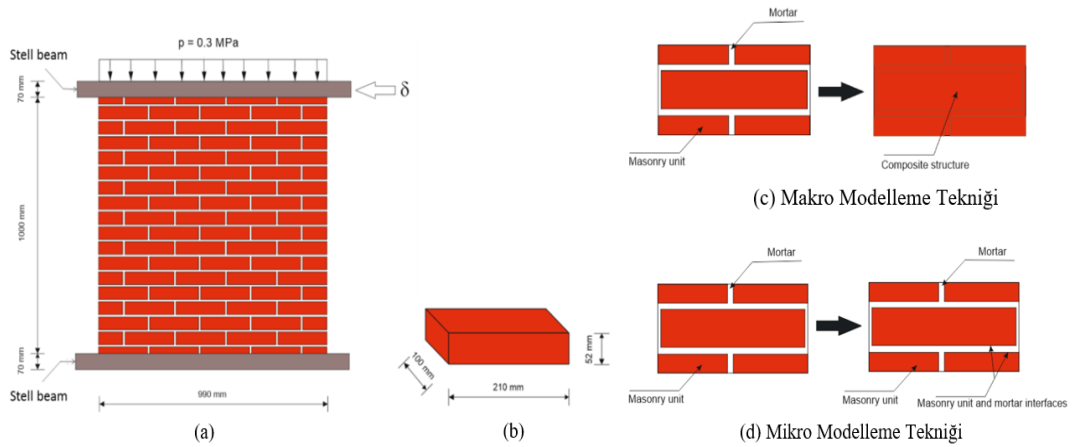
Duvar birimleri üzerine basınç, çekme, kesme vb. testler uygulanmış olup test düzenekleri Şekil 1.13.'te gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Duvar birimleri üzerine uygulanan test düzenekleri [16]

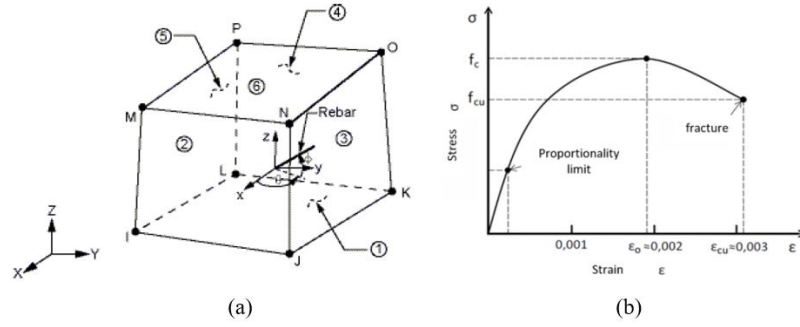
Plastisite teorisine dayalı bir micro modelleme tekniği kullanılarak FORTRAN ve EXCEL programları yardımıyla analizler yapılmıştır. Deneysel sonuçları ile nümerik analiz sonuçlarının büyük ölçüde birbirleriyle tutarlılık gösterdiği gözlenmiştir.

Kömürcü ve ark. [17] yapmış olduğu çalışmada, yığma duvarlar ile ilgili literatürde buldukları deneysel çalışmaları sonlu eleman yöntemine dayalı olan mikro ve makro modelleme tekniklerini kullanarak analizi yapmışlardır. Deneysel çalışma sonuçları ile nümerik model sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Duvarların düzlem içi yük etkisi altındaki davranışını ve çatlak dağılımını belirlemek amacıyla söz konusu çalışma yapılmıştır. Duvarın üst başlığına 0,3 MPa değerinde düşey basınç gerilmesi ile birlikte yanal yükleme uygulanmıştır. Duvarın (a) ve kullanılan duvar biriminin (b) boyutları ile yükleme biçimi, uygulanan makro (c) ve mikro (d) modelleme tekniklerinin prosedürleri Şekil 1.14.'te gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Duvarın (a) ve duvar biriminin (b) boyutları, macro (c) ve mikro (d) modelleme tekniği prosedürü [17]

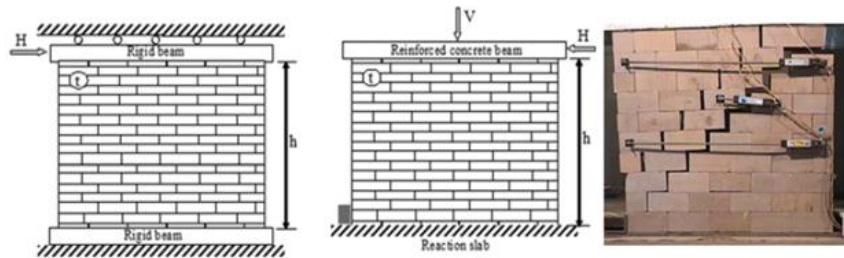
Makro modellemede duvar birimi ve harç malzemeleri sisteme tek bir malzeme olarak tanımlanırken mikro modellemede malzeme özellikleri sisteme ayrı ayrı tanımlanmaktadır. Sonlu eleman modeli olarak ANSYS kütüphanesinden seçilen 8 düğüm noktalı ve her düğüm noktasının x-y-z yönlerinde üç serbestlik derecesi olan Şekil 1.15.'te gösterilen SOLID65 sonlu elemanı (a) seçilmiştir. Kullanılan duvar malzemesi için Şekil 1.15.'te gösterilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı kullanılmıştır.



Şekil 1.15. Kullanılan sonlu eleman modeli (a) ve seçilen gerilme şekil değiştirme diyagramı (b) [17]

Uygulanan yükler etkisi altında duvarda oluşan gerilmeler ve çatlak yayılımları incelenmiştir. Çatlamların öncelikle duvarın sol üst ve sağ alt köşelerinde olduğu, çatlakların harçlardan duvarlara yayıldığı gözlenmiştir. Yaptıkları analiz sonuçları ile literatürde yer alan deney sonuçlarının kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin duvar çökene kadar benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Küçük ölçekli yapılarda mikro modelleme tekniğinin, büyük ölçekli yapılarda ise makro modelleme tekniğinin kullanılmasının daha doğru sonuçlar vereceği önerilmiştir.

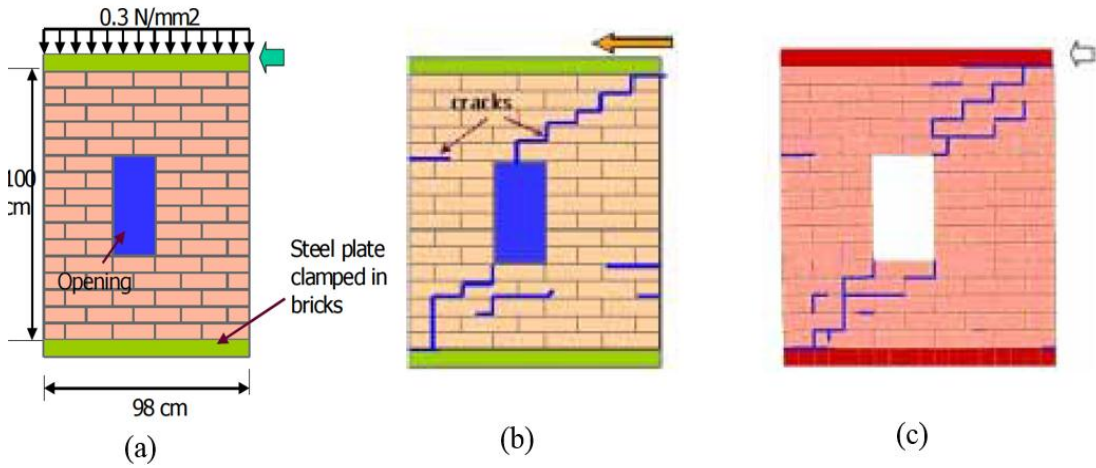
Köksal ve ark. [18] yapmış oldukları çalışmada, yatay ve düşey yüklere maruz kalan güçlendirilmemiş duvarların elasto plastik sonlu eleman analizi için makro modelleme tekniği geliştirmişlerdir. Modellemede sonlu eleman yöntemine dayalı olan LUSAS paket programından yardım alınmıştır. Drucker-Prager akma kriteri kullanılmıştır. Tuğla ve harcı tek bir malzeme olarak tanımlayarak pratik bir yöntem olan makro modelleme tekniği tercih edilmiştir. Düşey ve yanal yüklere maruz kalan duvarların davranışının anlaşılması için 3D Sonlu Eleman Analizi kullanılmıştır. Çalışmanın temel amacı duvarların yatay yöndeki davranışının elde edilmesi olduğu belirtilmiştir. Referans alınan deneylerin düzenekleri ve meydana gelen deformasyon Şekil 1.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 1.16.Referans alınan deney düzenekleri ve deney sonucunda meydana gelen deformasyon [18]

Yatay derzler duvar boyunca devam ettirilirken düşey derzler (yatay yer değiştirmelere etkisinin küçük olacağı varsayılarak) ihmal edilmiştir. Literatürden alınan deneyler ile oluşturulan sayısal model sonuçlarının tepe noktasına kadar benzer davranış gösterdiği ancak tepe noktasından sonra sapmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Sayısal modelin deneylere nazaran daha rijit davrandığı görülmüştür.

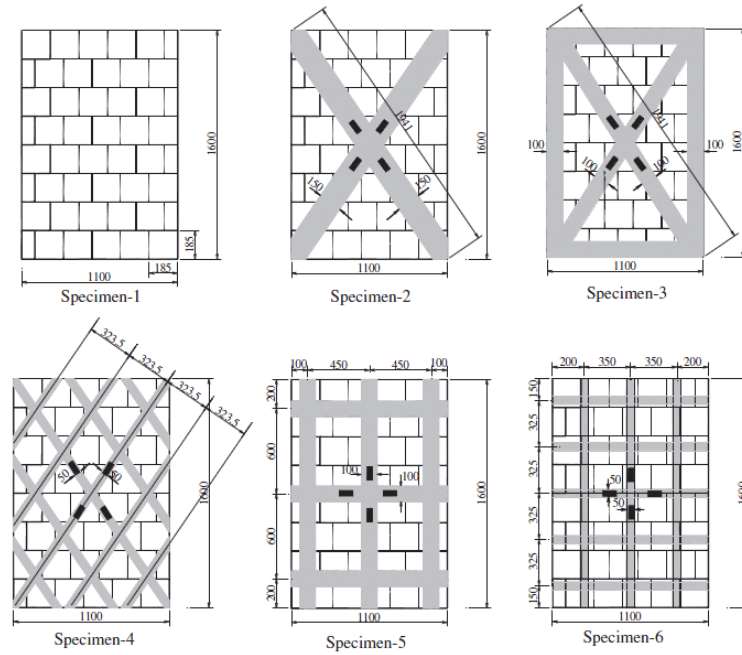
Pandey ve ark. [19], boşluklu yığma duvarlardaki çatlak oluşumlarını, blok ayrımını ve çökme öncesi malzeme davranışını belirlemek amacıyla Applied Element Model (AEM)'i uygulamışlardır. Modellemede mikro modelleme tekniğini kullanmış olup yığma duvar birimi ve harcın temas noktalarına yaylar tanımlanmıştır. Yaylara ait rijitlikler formülize edilip duvarın farklı yanal yükler etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Ayrıca boşluklu duvardaki açıklık üzerine lento bandı yerleştirilerek davranışın nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Literatürden alınan deneylerde duvara 0,3 MPa değerinde düşey basınç gerilmesi ve monotonik bir yatay yer değiştirme etki ettirilmiştir. Literatürden alınan deneydeki duvarın boyutları ve duvara uygulanan yükleme biçimi (a), deneyde meydana gelen çatlak oluşumları (b), nümerik analiz sonucunda oluşan çatlak oluşumu (c) Şekil 1.17.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.17. Referans deneylerinde kullanılan duvarın boyutları ve duvara uygulanan yükleme biçimi (a), deneyde meydana gelen çatlak oluşumları(b), tasarlanan modelin analizi sonucunda meydana gelen çatlak oluşumu (c) [19]

Lento bandının, boşluklu duvarların davranışında ve çatlak oluşumunda önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Yapılan deney sonuçlarıyla analiz sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir.

Alyavuz ve ark. [20], düzlem dışı yanal kuvvetlere karşı mukavemeti düşük olan tuğla duvarları farklı şekillerde CFRP şeritler yapıştırıp güçlendirerek değişen davranışı deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Bir adet güçlendirilmemiş ve beş adet CFRP şeritlerinin farklı düzenlerde yapıştırılarak güçlendirilmiş duvar numuneleri deneye tabi tutulmuştur. Deneyde kullanılan numuneler Şekil 1.18.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.18. Farklı düzende yapıştırılmış CFRP ile güçlendirilmiş duvar örnekleri [20]

Deneysel çalışmaların ardından CFRP ile güçlendirilmiş duvarlar, ANSYS paket programında SOLİD45 ve SOLİD46 sonlu elemanları kullanılarak makro modelleme tekniğinden yararlanılıp analiz edilmiştir. Makro modelleme tekniğinin seçilmesinin amacı, toplam düğüm noktası sayısının ve denklem sayısının azaltılarak harcanan zamanı indirgemek olduğu belirtilmiştir. CFRP şeritleri ile duvar ara yüzleri boyunca “contact elements” kullanılmıştır. Yapılan deney ile sayısal modelin analizi sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin tepe noktalarına kadar uyum sağladığı gözlenmiştir. Oluşturulan sonlu eleman modelinin deneylere göre daha rijit davrandığı ve daha az yer değiştirme yaptığı belirtilmiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Ülkemizde, özellikle kırsal bölgelerde düşük dayanımlı malzemeler kullanılarak mühendislik hizmeti almadan inşaa edilmiş sayısız yığma yapı bulunmaktadır. Yaşanan depremler sonucu bu tür yetersiz yığma yapıların birçoğu yıkılmış olup ciddi bir can kaybına sebep olmaktadır. Bu tür konutların yanı sıra yüzyıllardır birçok medeniyete ev sahipliği yapmış olan ülkemizde anıtsal nitelikte birçok yığma yapı mevcuttur. Ancak ülke topraklarımız dünyanın en aktif deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunduğu için söz konusu konutlar ve önemli tarihi yapılar deprem riski altındadır. Son yıllarda yenilenen teknolojilerle beraber betonarme ve çelik yapılar daha sık tercih edilse de Anadolu'da hala kusurlu yığma konut yapımı devam etmektedir. Bu nedenle yetersiz yığma yapıların yıkılmasının önüne geçebilmek ve önemli tarihi yapıları gelecek kuşaklara hasarsız olarak aktarmak için deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmaktadır. Deneysel çalışmaların ciddi derecede zaman ve kalifiye işçilik gerektirdiğinden ve ülkemizde deneysel çalışmalara ayrılan bütçelerin yetersiz olmasından dolayı nümerik çalışmalar önem kazanmıştır. Yığma yapıların ana taşıyıcı sistemi duvarlardan meydana gelmektedir. Bu nedenle yığma yapı davranışının anlaşılabilmesi için duvar davranışını öngörmek gerekmektedir. Bu çalışmanın temel amacı iki eksenli çevrimsel yük etkisi altındaki yığma duvar birimlerinin mekanik davranışının anlaşılmasında kullanılan üç noktalı kesme deneylerine karşılık gelen sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir sayısal model geliştirmektir.

Sonlu eleman yöntemi kullanılarak geliştirilen sayısal model, ANSYS paket programında mikro modelleme tekniği kullanılarak oluşturulmuştur. Tasarlanan sayısal modelin malzeme kabulleri ve kırılma mekaniği daha önceden gerçekleştirilmiş deney sonuçlarından elde edilmiş verilerden yararlanılarak yapılmıştır. Beyaz çimento ve doğal su kireci esaslı ve genleştirilmiş cam kürecik esaslı özel yapııştırma sıvaları gibi farklı malzemeler kullanılarak üretilen üçlü bims duvar birimlerinin harç ara yüzeyinin kayma davranışı, süneklik kapasitesi, dayanım performansı geleneksel harç kullanılan duvar birimleriyle karşılaştırılarak incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, farklı harç malzemeleri kullanıldığında değişen yapısal davranış ve süneklik kapasitesi hakkında çıkarım yapılmıştır.

1.3. Tezin Organizasyonu

Yedi bölümden meydana gelen tez çalışmasının birinci bölümde, yığma yapılar hakkında genel bilgiler verilerek geçmişte yaşanan büyük depremler sonrasında oluşan hasarlardan bahsedilmiştir. Yapılan literatür araştırması özetlenmiş olup çalışmanın amacı ve kapsamı açıklanmıştır.

İkinci bölümde yığma yapılar inşaa edilirken kullanılan malzemelerin türü ve teknik özellikleri, yığma yapı elemanları anlatılmıştır. Yığma yapılarda oluşabilecek hasar biçimleri açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde KIT'de yapılan ve referans olarak alınan deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin boyutları ve özellikleri, deney düzeneği ve yükleme biçimi detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Deney sonucunda oluşan deformasyon incelenmiştir.

Dördüncü bölümde yığma yapıların modellenmesinde kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir. Yapılan malzeme kabulleri, kullanılan akma kriterleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde geliştirilen sayısal modelde kullanılan eleman tipi, malzeme kabulü, sınır koşulları ve yükleme biçimi anlatılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarından ve referans deneylerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme ilişkileri incelenmiştir..

Altıncı bölümde kullanılan farklı sıva malzemelerinin harç olarak kullanıldığında değişen kayma davranışı incelenmiştir. Söz konusu yeni malzemelerin teknik özellikleri belirlenerek sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin ve analiz sonuçlarının kuvvet-yer değiştirme eğrileri idealize edilerek süneklik katsayıları hesaplanmıştır.

Tez çalışmasının son bölümü olan yedinci bölümde ise deneysel çalışmalar ve nümerik analiz sonuçları karşılaştırılarak değerlendirme yapılmıştır. Kullanılan yeni malzemelerin dayanımı ve süneklik kapasitesini nasıl etkilediği ifade edilmiştir.

BÖLÜM 2. YIĞMA YAPILARIN GENEL ÖZELLİKLERİ

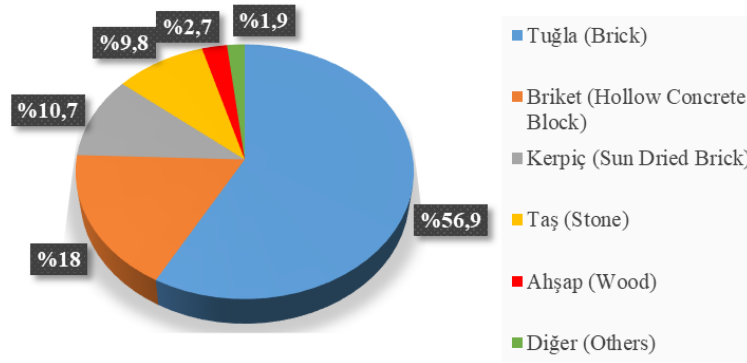
Taşıyıcı elemanları duvarlar, döşemeler, hatıllar ve temeller olan yığma yapılar; doğal taşların ya da tuğla, beton briket, pomza gibi yapay malzemelerin çeşitli bağlayıcılarla bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır (Şekil 2.1.). Kullanılan malzemelerin basınç dayanımları yüksek ancak çekme dayanımları düşüktür. Bu nedenle taşıyıcı elemanları eğilme ve kayma etkisine karşı dayanıksızdır. Yığma yapılar kullanılan malzemeler ve yapım şekillerine göre donatısız, donatılı ve çerçevesiz olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Yığma yapıların sünekliği zayıf olup deprem etkisi altında gevrek davranış göstermektedir.



Şekil 2.1. Yığma yapı örnekleri [21]- [22]- [23]

2.1. Kullanılan Malzemeler

Yığma yapılar inşa edilirken tuğla, bims blok, kerpiç gibi birçok malzeme kullanılmaktadır. Kullanılan malzemeler ve bağlayıcı harçlar yapının dayanımına doğrudan etki etmektedir. Ülkemizde 2000 yılında yapılan bina sayımında, kullanılan yapı malzemelerine göre bina oranları Şekil 2.2.'de verilmektedir.



Şekil 2.2: Kullanılan yapı malzemelerine göre bina oranları [24]

2.1.1. Tuğla

Yığma yapılarda en çok tercih edilen malzeme yığma tuğladır (Şekil 2.3.). Tuğla; kil ağırlıklı toprağın kalıplanıp yüksek ısılardaki fırınlarda pişirilmesiyle elde edilen genellikle düşey delikli olarak üretilen ucuz ve kullanışlı bir yapı malzemesidir. Tuğla malzemesinin basınç dayanıma üretildiği toprağın cinsi, boşluk oranı ve pişirilme ısısı doğrudan etki etmektedir. Söz konusu malzemenin basınç dayanımı yüksek ancak çekme dayanımı düşüktür.



Şekil 2.3. Yığma tuğla malzemesi

Tuğla malzemesine ait mekanik özellikler Tablo 2.1.'de verilmektedir.

Tablo 2.1. Tuğla malzemesinin mekanik özellikleri [25] - [26]

| Basınç Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) | Elastisite Modülü (MPa) | Poisson Oranı | Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³) |
|-----------------------|----------------------|-------------------------|---------------|---|
| 3-10 | 0,2-0,5 | 1000-5000 | 0,2 | 20 |

2.1.2. Bims blok

Pomza, sünger taşı, volkanik taş camı olarak da bilinen bims blok; volkanik olaylar sonucu meydana gelen silikat esaslı süngerimsi bir malzemedir (Şekil.2.4.). Dünyada uzun zamandır kullanılan ancak ülkemizde son on yıldır sıklıkla tercih edilen bu malzemenin iç yapısı boşluklu olduğu için düşük permabiliteli, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı olup ısı ve ses yalıtımı da sağlamaktadır [27].



Şekil 2.4. Bims blok malzemesi

Bims blok malzemesine ait mekanik özellikler Tablo 2.2.'de verilmektedir.

Tablo 2.2. Bims blok malzemesinin mekanik özellikleri [26] - [28]

| Basınç Dayanımı (MPa) | Elastisite Modülü (MPa) | Poisson Oranı | Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³) |
|-----------------------|-------------------------|---------------|---|
| 1,5 | 6500-27000 | 0,2 | 16 |

2.1.3. Doğal taş

Doğal, kristal yapılı ve inorganik bir malzeme olan taşlar, çok uzun yıllar önce kullanılmaya başlanmış ancak çok ağır olmalarından ve işçiliği zor olduğundan dolayı günümüz şartlarında çok sık tercih edilmemektedir. Yığma yapılarda kullanılan taşlar basınç gerilmelerine karşı dayanıklı olmasına karşın çekme gerilmeleri altında zayıf davranış göstermektedir. Taşların basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü gibi mekanik özellikleri malzemenin cinsine, kullanım yerine ve işçiliğe bağlıdır. Kullanılan taşlar Şekil 2.5.'te, mekanik özellikleri ise Tablo 2.3.'te verilmektedir.



Şekil 2.5. Doğal taşlar [29]

Tablo 2.3. Doğal taşların ortalama mekanik özellikleri [25]

| Taşın Cinsi | Basınç Dayanımı (MPa) | Kayma Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) |
|-------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| Granit | 30-70 | 14-33 | 4-7 | 15-70 |
| Mermer | 25-65 | 9-45 | 1-15 | 25-70 |
| Kireçtaşı | 18-65 | 6-20 | 2-6 | 10-55 |
| Kumtaşı | 5-30 | 2-10 | 2-4 | 13-50 |
| Kuvars | 10-30 | 3-10 | 3-4 | 15-55 |
| Serpantin | 7-30 | 2-10 | 6-11 | 23-45 |

2.1.4. Ahşap

Ahşap malzemesinin çekme ve eğilme dayanımlarının yüksek olmasından dolayı özellikle tarihi yapılar da döşeme taşıyıcısı ve bağlantı elemanları olarak kullanılmaktadır [30]. Ahşap yapılar 1950'li yıllardan bu yana ülkemizde tercih edilmekte ve daha çok konut yapımında kullanılmaktadır. Bazı ahşap malzemelerinin içeriğindeki liflerin yönüne göre değişen basınç ve çekme dayanımları gibi mekanik özellikleri Tablo 2.4.'te verilmiştir.

Tablo 2.4. Farklı Ahşap malzemenin mekanik özellikleri [31]

| Malzeme Türü | Dayanım Türü | Liflere Olan Yönü | Dayanım (MPa) | Elastisite Modülü (MPa) |
|--------------|--------------|-------------------|---------------|-------------------------|
| Çam | Çekme | Paralel | 10,5 | 1 |
| Çam | Basınç | Paralel | 11 | 1 |
| Çam | Basınç | Dik | 2 | 0,3 |
| Kayın | Çekme | Paralel | 11 | 12,5 |
| Kayın | Basınç | Paralel | 12 | 12,5 |
| Kayın | Basınç | Dik | 3 | 0,6 |

2.1.5. Kerpiç

Kerpiç; killi toprağın içine su, çakıl, kum, taş, tuğla parçaları ve lifli malzemeler (ot, saman vb.) katılarak yoğurulan karışımın kalıplara döküldükten sonra güneşte kurutulmasıyla elde edilen ilkel bir yapı malzemesidir. Geçmiş yıllarda çok tercih edilen bu yapı malzemesinin ucuz, temininin kolay olması ve ısı-ses izolasyonu sağlamasından dolayı günümüzde bazı köylerde hala kullanılmaktadır. TS25142 yer alan standartlara göre alçılı kerpiç malzemesinin bazı mekanik özellikleri Tablo 2.5.'te gösterilmektedir.

Tablo 2.5. Alçılı kerpiç malzemesinin özellikleri [32]

| Basınç Dayanımı (MPa) | Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa) | Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³) |
|-----------------------|-------------------------------|---|
| 3,43 | 6500-27000 | 15,2 |

2.1.6. Harç

Harç; çakıl, kum gibi malzemelerin alçı, kireç, kil, çimento gibi bağlayıcılarla çeşitli oranlarda karıştırılıp su ile yoğrulduktan sonra elde edilen plastik kıvamdaki inorganik bir malzemedir. Geçmişten günümüze kadar çamur, horasan harcı, alçı, kireç ve çimento harcı gibi birçok bağlayıcı malzemeler kullanılmıştır. Tarihte bağlayıcı malzeme olarak öncelikle çamur, Romalılarla birlikte kireç harcı ardından kum-kireç karışımlarının içine pişmiş kil ve ya volkanik tüflerin karıştırılmasıyla elde edilen karışımının su ile reaksiyona girip sertleşmesiyle elde edilen bir bağlayıcı malzeme kullanılmıştır. Horasan harcı denilen önemli tarihi yığma yapıların birçoğunda kullanılan, malzemelerin direncini arttırmak adına içine yumurta akı, kum, pişmiş toprak gibi malzemelerin katılmasıyla elde edilen bir bağlayıcı olarak kullanılmıştır.

Günümüzde yığma yapılarda en çok tercih edilen bağlayıcı türleri kireç ve çimento harçlarıdır. Ana maddesi kalsiyum oksit olan (CaO) kireç, kireç taşının (CaCO_3) çok yüksek derecede pişirilmesiyle elde edilen, suya girince katılaştıran bir bağlayıcıdır. Yüksek derecede ısıtılarak bünyelerinde bulunan CO_2 gazının uçmasıyla (kalsinasyon) sönmemiş kireç elde edilmektedir. Kalsinasyon işlemi sonrasında elde edilen sönmemiş kirecin havadaki nem veya su ile tepkimeye girmesi sonucunda oluşan ürüne sönmüş kireç denilmektedir. Kireç oluşum döngüsü Şekil 2.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Kireç oluşum döngüsü [33]

Kireç tamamen söndürülmeden kullanılırsa hacim değişikliklerine uğrayacağından yapıda hasar meydana getirmektedir. Çimento harcı, kum ve çimentodan oluşan karışıma su eklenmesiyle elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzemedir. Harçta kullanılan çimentonun miktarı ve kalitesi dayanıma etki etmektedir. Çimento esaslı harçların mukavemetinin yüksek olması, boşluksuz olması, yüzeye iyi yapışması ve dış etkilere dayanıklı olması sebebiyle tercih edilmektedir.

2.2. Yığma Yapı Elemanları

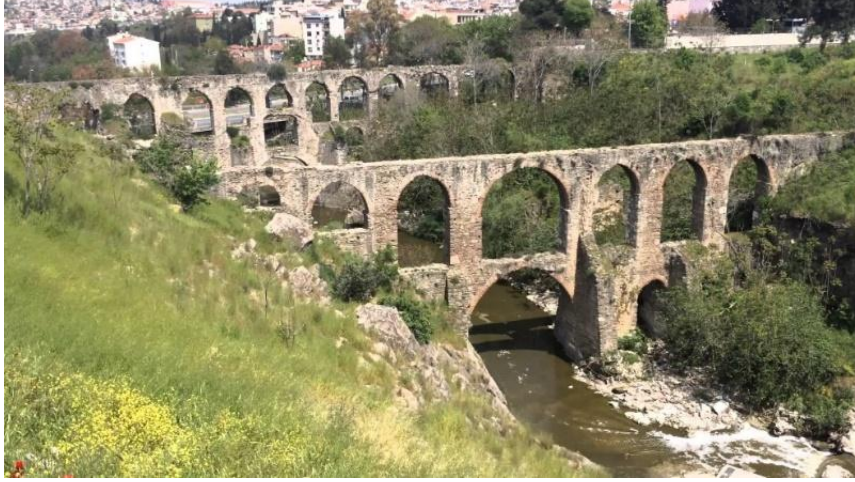
Yığma yapılarda duvar, döşeme, kubbe, tonoz, kemer, sütun gibi yapı elemanları kullanılmaktadır.

2.2.1. Duvarlar

Yapıya etkileyen iç ve dış yükleri taşıyan ve bu yükleri temele aktaran yapı elemanlarına duvar denilmektedir. Düzlem içi ve düzlem dışı yük etkisi altındaki duvarlar çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır. Zamanla bu yükler elemanda kayma mekanizması oluşturmakta ve duvarda X çatlakları meydana gelmektedir. Bu durumun yaşanmaması için yatay yöndeki direnimi arttırmak amacıyla duvarın diğer yöndeki duvarlara doğru mesnetlenmesi gerekmektedir.

2.2.2. Kemerler, tonozlar, kubbeler

Kemerler, antik çağlardan beri pencere, çatı gibi açıklıkları geçmek amacıyla taş ya da tuğla malzemeler kullanılarak inşa edilen, üzerine uygulanan yükü zemine aktaran kavisli bir mimari yapı elemanıdır. Kemerin başlama taşı olan üzengi, en büyük ve önemli taş olan kilit taşı ve aralarda kullanılan kemer taşlarından meydana gelmektedir. Şekil 2.7.'de Roma İmparatorluğu döneminde yapılan İzmir'de bulunan kemerli bir yapı örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.7. İzmir’de bulunan kemerli yapı örneği [34]

Kemerlerin aralıksız devam ettirilmesiyle meydana gelen mimari unsurlara tonoz denilmektedir. Tonozlarda kemerlerin yük taşıma prensibine göre çalışmaktadır. Şekil 2.8.’de tonoz yapı örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Sivas’ta bulunan tonoz yapı örneği [35]

Kubbeler ise kemerlerin düşey eksen etrafında 360° döndürülmesiyle oluşan yapı elemanlarıdır. Kubbeler basınca dayanıklı olmasına karşın çekme gerilmeleri altında zayıf davranış göstermektedir. Kubbenin oluşan çekme gerilmelerini karşılayamaması durumunda çatlaklar oluşmakta ve yapı elemanlarında hasar meydana gelmektedir. Kubbeler düşey yükleri kemere ve duvara aktarır zemine ulaştırırken, yatay yükleri gergiler ve payandalar karşılamaktadır. Şekil 2.9.’da kubbe örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Şanlıurfa’ da bulunan kubbe yapı örneği [36]

2.2.3. Sütunlar

Yapıları ayakta tutmak amacıyla tasarlanan, taş, mermer gibi malzemeler kullanılarak inşa edilen düşey taşıyıcı elemanlara sütun denilmektedir. Sütun başlığı, sütun gövdesi ve sütun kaidesi olmak üzere üç elemandan oluşmaktadır. Sütun başlığı, üzerindeki yükü sütun gövdesine aktarmakla görevlidir. Sütun gövdesi ise oturduğu yer olan sütun kaidesi aracılığıyla yükü zemine iletmektedir. Yunanistan’da bulunan bir sütun örneği Şekil 2.10.’da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Yunanistan’da bulunan sütun yapı örneği [37]

2.3. Yığma Yapılarda Meydana Gelen Hasar Biçimleri

Düşey ve yatay kuvvetler etkisinde kalan yığma yapılarda normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri meydana gelmektedir. Yapının sabit ve hareketli yükleri normal gerilmeleri, deprem yükleri ise kayma gerilmeleri oluşturmaktadır. Düşey yüklerin kesit alanına (kapı, pencere boşlukları eklenmeden) bölünmesiyle elde edilen normal gerilme değerinin, malzemelerin cinslerine göre belirlenen duvar basınç emniyet gerilmesini değerini aşmaması gerekmekte aksi takdirde yapıda hasar oluşmaktadır. 2007 Deprem Yönetmeliği'nde serbest basınç dayanımı bilinmeyen duvarların basınç emniyet gerilmeleri (f_{em}) Tablo 2.6.'da gösterilmektedir.

Tablo 2.6. Duvarların basınç emniyet gerilmeleri (f_{em}) [38]

| Duvarda Kullanılan Kargir Birim Cinsi ve Harç | Duvar Basınç Emniyet Gerilmesi (MPa) |
|---|--------------------------------------|
| Düşey delikli blok tuğla (delik oranı %35'den az, çimento takviyeli kireç harcı ile) | 1,0 |
| Düşey delikli blok tuğla (delik oranı %35-45 arasında, çimento takviyeli kireç harcı ile) | 0,8 |
| Düşey delikli blok tuğla (delik oranı %45'den fazla, çimento takviyeli kireç harcı ile) | 0,5 |
| Dolu blok tuğla veya harman tuğlası (çimento takviyeli kireç harcı ile) | 0,8 |

Deprem kuvvetleri etkisiyle yığma yapılarda kayma gerilmeleri oluşmakta ve bu nedenle kesme hasarları meydana gelmektedir. Kesme hasarlarının meydana gelmemesi için deprem kuvvetlerinden oluşan kayma gerilmelerinin, duvarın kayma emniyet gerilmesinden küçük olması gerekmektedir. 2007 Deprem Yönetmeliği'nde duvarların çatlama emniyet gerilmeleri Tablo 2.7.'te gösterilmektedir.

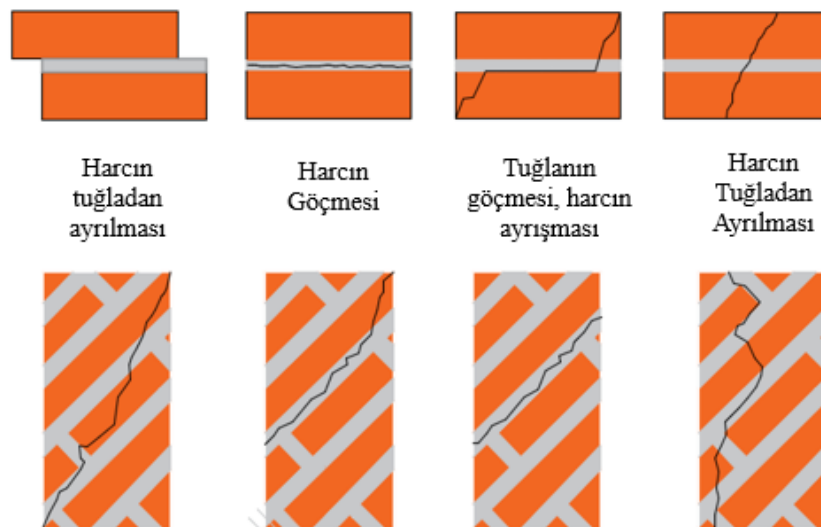
Tablo 2.7. Duvarların çatlama emniyet gerilmesi değerleri (τ_{em}) [38]

| Duvarda Kullanılan Kargir Birim Cinsi ve Harç | Duvar Çatlama Emniyet Gerilmesi (MPa) |
|---|---------------------------------------|
| Düşey delikli blok tuğla (delik oranı %35'den az, çimento takviyeli kireç harcı ile) | 0,25 |
| Düşey delikli blok tuğla (delik oranı %35'den fazla, çimento takviyeli kireç harcı ile) | 0,12 |
| Dolu blok tuğla veya harman tuğlası (çimento takviyeli kireç harcı ile) | 0,15 |

Dolayısıyla yatay ve düşey kuvvetler etkisi altındaki yığma yapılarda, çekme gerilmeleri altında çatlama oluşurken basınç gerilmeleri altında ezilme meydana gelmektedir [31]. Yükleme devam ettiği takdirde yapıda göçme meydana gelmektedir. Yığma yapılarda çok sık rastlanan hasar tipleri olarak; temelde oturma, duvar, kubbe, tonoz, kemer gibi yığma yapı elemanlarında çatlama, kalitesiz malzeme kullanımından doğan sorunlar, deprem etkilerinden kaynaklanan deformasyonlar, deprem yönetmeliği esaslarına uymadan bina yapılması olarak gösterilmektedir.

2.3.1. Duvarlarda meydana gelen hasarlar

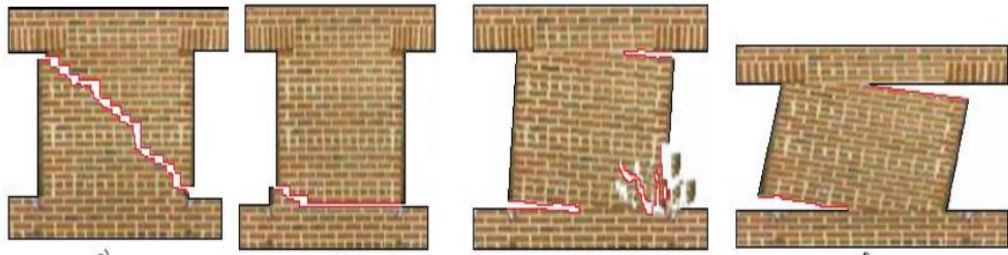
Yığma yapıların ana taşıyıcı elemanı olan duvarlarda meydana gelen hasarlar doğrudan olarak taşıyıcı sistemi etkilemektedir. Düşey ve yatay yüklerin etkisindeki duvarlarda basınç ve çekme gerilmeleri oluşmakta ve bu gerilmeler taşıma gücüne ulaştığı takdirde yapıda çatlama, dağınıklar hatta ayrılmalar meydana gelebilmektedir. Deprem etkisiyle oluşan kılcal çatlakların zamanla boyutlarının artması, duvar örgü sisteminin uygun yapılmaması, kullanılan malzemelerin kalitesiz ve dayanımlarının düşük olması, derz kullanımının yetersiz olması, gevrek malzeme kullanılması gibi birçok sebeple yığma duvarlarda hasarlar meydana gelmektedir. Yığma tuğla duvarlardaki çatlak oluşumları ve göçme biçimleri Şekil 2.11.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Yığma tuğla duvarlarda çatlak oluşumları ve göçme biçimleri [39]

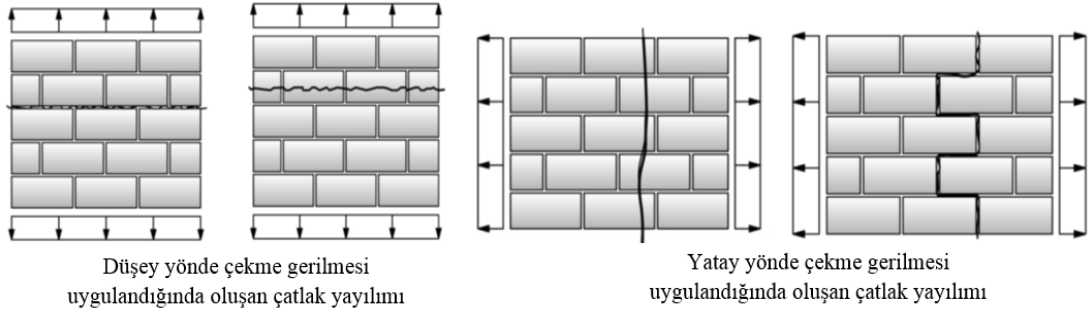
Ağır ve rijit olan yığma yapılar basınç ve çekme gerilmeleri altında sünek olmayan bir davranış gösterdiği için yapının plastik deformasyona uğramadan aniden göçmesine sebebiyet vermektedir [39].

Yatay olan derzlere paralel yük etkisi altında duvarda, tuğlaları kesen çatlaklar, kayma çatlakları, duvar topuklarındaki ezilmeler, taşıyıcı duvarların döşemelerden ayrılması gibi farklı kırılma biçimleri sırasıyla Şekil 2.12.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Yığma duvarlarda meydana gelen kırılma biçimleri [40]

Yatay ve düşey çekme gerilmelerine maruz bırakılmış zayıf duvar birimlerinde hasarlar meydana gelmektedir. Oluşabilecek hasar durumları Şekil 2.13.'te gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Yatay ve düşey yönde çekme gerilmelerine maruz bırakılmış zayıf duvar birimlerinde oluşabilecek çatlak yayılımları [41]

Duvar birimlerine yatay yönde çekme gerilmesi uygulandığında çatlağın duvar boyunca yayılması veya çatlağın harçlar üzerinde yayılarak ilerlemesi şeklinde hasar meydana gelmektedir. Düşey yönde çekme gerilmesi uygulandığında ise çatlağın, yatay yöndeki harç boyunca veya yatay yöndeki duvar birimi boyunca ilerlediği görülmektedir.

2.3.2. Temelerde meydana gelen hasarlar

Yapı temellerinde görünen hasarlar; yapının ağırlığı, deprem etkileri, oturmalar, yer altı su seviyesinin etkisi, zeminde meydana gelen sıvılaşma, temel tabanındaki taşlarda meydana gelen bozulmalar, zeminin taşıma gücünün yetersizliği gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Zeminden kaynaklanan hasarlar arasında en çok görülen hasar tipi temel oturmalarından kaynaklanan hasarlardır. Oluşabilecek en küçük temel oturmasında dahi gevrek olan yığma duvarlarda çatlamlar meydana gelmekte ve taşıyıcı sistem doğrudan etkilenmektedir [4]. Temel oturmalarının en büyük sebebi yapının geçirimsiz ve plastisitesi yüksek olan killi zeminler gibi gevşek zeminlerde inşaa edilmesidir. Şekil 2.14.'te zayıf zemine inşaa edilen yapıda temel oturmasından kaynaklı meydana gelen hasar gösterilmiştir.

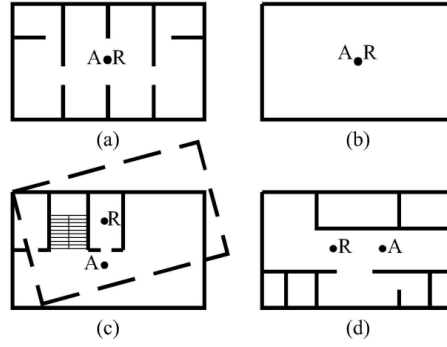


Şekil 2.14. Temel oturmasından kaynaklı yapıda meydana gelen hasar [42]

2.3.3. Depremlerden meydana gelen hasarlar

Duvarda çatlamlar, kısmi yıkılmalar ya da tamamen göçme, temel oturmaları gibi durumlar depremlerden dolayı yığma yapılarda oluşan hasarlar olarak gösterilmektedir. Gevrek davranış gösteren yığma duvarlarda küçük şiddetli depremlerde bile kritik çatlak hasarları oluşabilmektedir. Bu hasarların şekli, boyutu, yayılımı duvarda oluşan düşey gerilmeye ve yapıya etkileyen deprem kuvvetine göre değişiklik göstermektedir. Depreme dayanıklı yapı tasarımı kurallarına uyulmadan inşaa edilen binalarda deprem

etkisiyle çatlak oluşumu kaçınılmazdır. Simetrik olmayan yığma yapılarda ağırlık merkezi ve rijitlik merkezinin yakın olmaması durumunda da çatlak oluşması yüksek ihtimal olarak gösterilmektedir [43]. Şekil 2.15'te ağırlık ve rijitlik merkezlerinin yerlerine göre değişen yapı örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Yığma yapı planı örnekleri [43]

Şekil 2.15.'te gösterilen (a) ve (b) yığma yapı planlarında ağırlık merkezi ile rijitlik merkezi çakışmaktadır. Bu nedenle daha tasarım aşamasında iken depremde burulma nedeniyle oluşabilecek hasarların önüne geçilmiştir. Şekil 2.15. (c)'de ağırlık merkezi ile rijitlik merkezi birbirinden uzak konumda olduğu için yapıya gelen deprem kuvveti ağırlık merkezine etki edeceğinden yapı rijitlik merkezinin etrafında dönmeye zorlanacak ve yapıda burulma çatlakları meydana gelecektir. Şekil 2.15. (d)'de ise deprem doğrultusuna dik doğrultuda bulunan duvarın rijitliği olmadığı için deprem kuvvetinin etkisiyle duvarlarda yer değişimi yapmaya zorlanarak çatlamlar meydana gelmektedir [43]. 2007'de yayınlanan deprem yönetmeliğinde yığma yapılarla ilgili boyutlandırma, yapı düzeni, kat yüksekliği, kat adedinin belirlenmesi gibi birçok kural yer almaktadır. Ancak kırsal kesimlerde mühendislik hizmeti almadan inşa edilen yapılarda bu kuralların birçoğuna uyulmamaktadır. Deprem Yönetmeliği'nde deprem bölgelerine göre değişen yığma binaların kat adetleri Tablo 2.8.'de gösterilmektedir.

Tablo 2.8. Deprem bölgelerine göre yığma yapılarda izin verilen kat sayısı [38]

| Deprem Bölgesi | En Çok Kat Sayısı |
|----------------|-------------------|
| 1 | 2 |
| 2, 3 | 3 |
| 4 | 4 |

2.4. Yığma Yapılar İçin Hasar Ölçütleri

Yığma yapılarda deprem etkilerinden dolayı oluşan hasarların en önemli belirtisi taşıyıcı duvarlarda meydana gelen çatlaklardır. Kayma gerilmelerinin etkisiyle oluşan bu çatlakların boyutları, genişliği, yayılımı yapıların mevcut durumunun belirlenmesi için önemli ölçütlerdir. Tablo 2.9.'da yığma yapılardaki çatlakların genişliklerine göre İstanbul Teknik Üniversitesi tarafından hazırlanan hasar ölçüt tablosu verilmiştir.

Tablo 2.9. Yığma yapıların çatlak genişliğine göre hasar ölçüt tablosu [7]

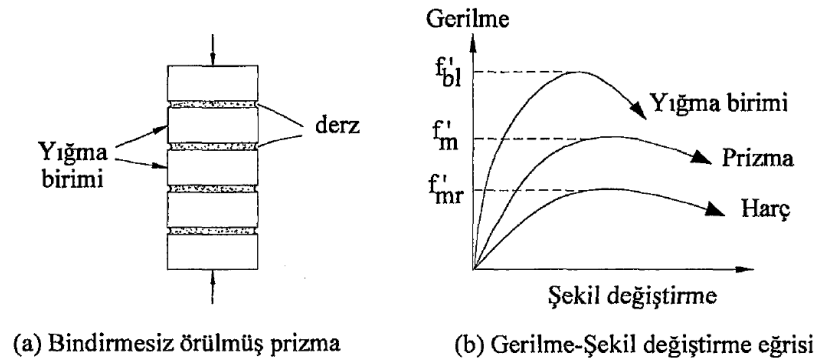
| Çatlak Genişliği | Hasar Derecesi | Açıklama |
|------------------|---------------------------|---|
| 0,1 mm'den az | Önemsiz | Yapıya ve kullanıma etkisi yoktur. |
| 0,1 mm - 0,3 mm | Önemsiz, az | Taşıyıcı sisteme ve yapının kullanımına bir etkisi yoktur. |
| 0,3 mm - 1,0 mm | Az | Taşıyıcı sisteme bir etkisi yoktur. Estetik açıdan sakıncalı olabilir. Dış cephe elemanlarının yıpranmasını hızlandırır. |
| 1,0 mm - 2,0 mm | Orta | Taşıyıcı sisteme bir etkisi yoktur. Estetik açıdan sakıncalı olabilir. Dış cephe elemanlarının yıpranmasını hızlandırır. Bu düzeydeki çatlaklar, briketleri ve pencere kapı lentolarını çatlatabilir. Birkaç metre uzaktan fark edilebilirler. Bu düzeyden daha ileri düzeydeki çatlaklarda yapıda oturanlar, önlem alınması için harekete geçebilir. |
| 2,0mm - 5,0 mm | Orta | Taşıyıcı sistemi etkilemeye başlar. Dış duvarlardan içeriye hava akımları duyumsanmaya başlar, pencere ve kapılar sıkışır ve kapanmaya başlar. Yapının kullanımı etkilenmeye başlar. |
| 5,0mm - 15 mm | Orta-ağır | Kapı ve pencereler sıkışabilir. Su ve kanal bağlantıları kırılabilir. Binaya su ve soğuk hava girer. Pencere camları çatlar ve kırılabilir, sıvalar dökülmeye başlar. Tuğla duvarlar parçalanır. Yığma kemerler çökebilir. Bu boyutlardaki çatlaklar kabul edilemez çatlak sınırı oluşturur. |
| 15mm - 25 mm | Ağır | Ciddi onarım ve güçlendirme gerektirir. Yapının stabilitesi çok büyük bir tehlike altındadır. |
| 25 mm'de büyük | Çok ağır ve çok tehlikeli | Yapıda ağır hasar, ciddi onarım ya da yeniden yapım gerekir. |

0,1 mm ile 1 mm arasındaki boyutlara sahip olan çatlaklar kılcal çatlaklar olup gözden kaçabilmektedir.

2.5. Yığma Yapıların Yük Taşıma Sistemi

Yığma yapıların tasarımında temel parametre olan basınç dayanımı, kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerine, boyutlarına, örgü şekline, derz biçimi gibi birçok etkene bağlı olmaktadır. Yığma yapıların basınç dayanımını saptamak için

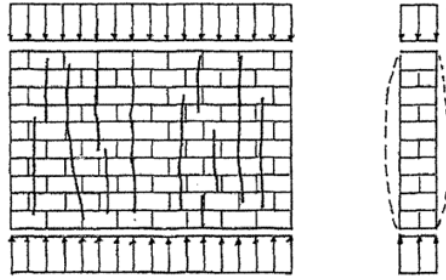
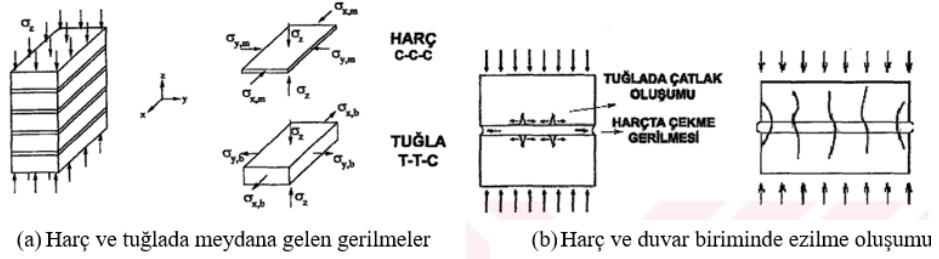
yönetmelikler tarafından farklı yöntemler belirtilmiştir. Hesap yöntemlerinde öncelikle elastisite modülü (E_m) ve basınç dayanımı (f_m) parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Harç, prizma ve yığma duvar biriminin aksenal yük etkisi altındaki davranışı şekil 2.16.'da gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Harç, prizma ve yığma duvar biriminin gerilme-şekil değiştirme eğrisi [44]

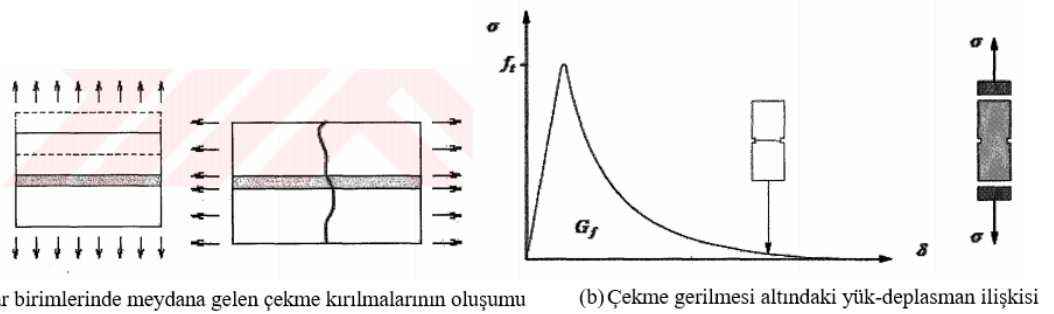
Eksenal yük etkisi altındaki yığma yapı elemanlarında oluşan kırılma mekanizması, basınç kuvvetinden dolayı harçlarda yatay yönde oluşan çekme kuvvetlerinin duvar birimlerinde meydana getirdiği düşey çatlamlar sonucunda gerçekleşmektedir. Duvar birimi ve harcın farklı deformasyon özelliklerine sahip olması sebebiyle gerçekleşen bu tür kırılma sonucunda, duvar birimleri arasında kalan harçlar oluşan basınç gerilmeleri altında ezildiğinden yatay yönde büyük deformasyonlar meydana gelmektedir. Yatay yönde meydana gelen bu deformasyonlar sonucunda düşey çatlamlar oluşmaktadır. Ayrıca yığma yapı elemanlarının aksenal yük etkisi altında oluşan kırılma mekanizması poisson oranı, elastisite modülü, duvar birimi ve harç ara yüzü, çekme dayanımı kayma direnci gibi birçok parametreye de bağlıdır [44].

Şekil 2.17. (a)'da harç ve tuğlada meydana gelen gerilmeler, (b)'de harç ve duvar biriminde ezilme meydana gelmesi, (c)'de ise basınç yükleri etkisi altındaki duvarda düşey çatlakların oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Harç ve tuğlada meydana gelen gerilmeler (a), harç ve duvar biriminde ezilme oluşumu (b), basınç yükleri etkisi altındaki duvarda düşey çatlakların oluşumu (c) [44]

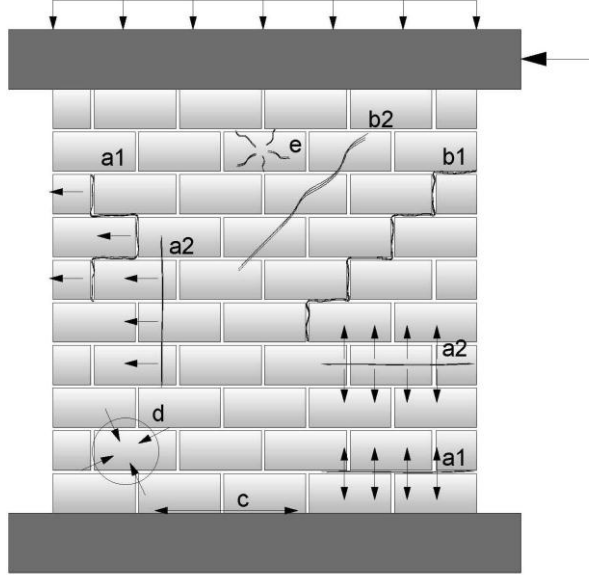
Duvarda meydana gelen çekme kırılmaları derzlere dik veya paralel şekilde oluşabilmektedir. Eğer uygulanan kuvvet derzlere dik ise duvar birimi ve harç arasındaki aderans, eğer paralel ise duvar biriminin çekme dayanımı daha önemli bir parametre olmaktadır. Şekil 2.18. (a)'da duvar birimlerinde meydana gelen çekme kırılmalarının oluşumu, (b)'de ise çekme gerilmesi altındaki yük-deplasman ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Duvar birimlerinde meydana gelen çekme kırılmalarının oluşumu (a), çekme gerilmesi altında yük-deplasman ilişkisi (b) [44]

Ani çekme kırılmalarına eğilimli olan yığma yapı elemanlarının öncelikle birleşim noktalarından kırılmalar meydana gelmektedir. Böylelikle yapının kısmen ya da tamamen göçmesine sebep olmaktadır.

Çevrimsel yük etkisi altındaki yığma bir duvarda meydana gelebilecek birçok hasar türü Şekil 2.19.'da gösterilmiştir.

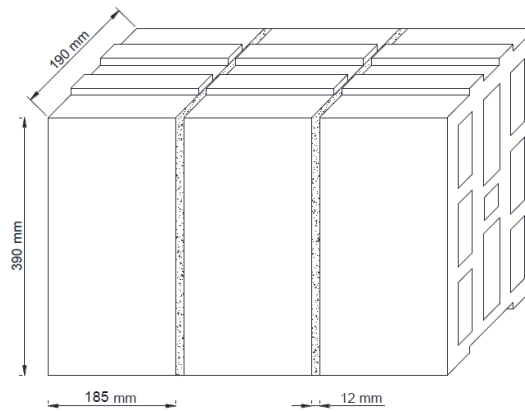


Şekil 2.19. Çevrimsel yük etkisi altındaki yığma bir duvarda meydana gelebilecek hasarlar [41]

Şekil 2.19.'da görülen; a1 ve a2 türü hasarlar, yatay ve düşey yönde oluşan çekme gerilmelerinden, b1 ve b2 türü hasarlar duvar malzemelerinde oluşan sürtünmeden ve taşlarda bulunan hatalardan, c oluşan kesme gerilmelerinden, d meydana gelen basınç gerilmelerinden ve e ise taş yüzeyindeki kusurlardan kaynaklanmaktadır.

BÖLÜM 3. REFERANS ALINAN DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada; Sakarya Üniversitesi ve Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) tarafından desteklenmiş bir proje kapsamında, Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü yapı mekaniği laboratuvarında Rizzo [28] tarafından yapılan bir takım deneysel çalışmalar referans olarak alınmıştır. Bu deneysel çalışma Prof. Dr. L. Stempniewski ve Prof. Dr. E. Çelebi danışmanlığında yürütülmüştür. Toplam 6 adet bims blok üçlü test numunelerinden 3 tanesine çeşitli güçlendirme işlemleri uygulanmıştır. Geriye kalan 3 adet numuneye ise hiçbir güçlendirme işlemi yapılmaksızın üç noktalı kesme testlerine tabi tutularak mekanik davranışları incelenmiştir. Güçlendirme işlemi, yapıların deprem performanslarını arttırmak için yapılmış olan uzun bir çalışma sonucunda ortaya çıkan çok eksenli sismik bir tekstil malzemesi olan kumaş, numunelerin her iki yüzeyine yapıştırılarak uygulanmıştır. Sismik kumaşların yapıştırılabilmesi için beyaz çimento ve doğal su kireci esaslı bir sıva malzemesi kullanılmıştır. Bims blok ve kireç esaslı harç kullanılarak oluşturulan üçlü test numunelerinin boyutları Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Üçlü test numunesi [28]

3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Bims blok ve kireç esaslı harç kullanılarak üçlü test numuneleri üretilmiş olup sismik deprem kumaşı ve beyaz çimento ve doğal su kireci esaslı sıva ile güçlendirme işlemi yapılmıştır.

3.1.1. Bims blok

Kullanılan bims blok elemanın teknik özellikleri Tablo 3.1.'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Bims blok elemanına ait özellikler [28]

| | | | |
|--|-------------------------------------|----------------------------|-------------|
|  | Boyutlar(mm) | Genişlik*uzunluk*yükseklik | 190*390*185 |
| | Brüt Kuru Birim Hacim | kgs/m ³ | 550 |
| | Net Kuru Birim Hacim Ağırlık | kgs/m ³ | 750 |
| | Basınç Dayanımı | N/mm ² | 1,50 |
| | Isıl Direnç | W/mK | 0,220 |
| | Buhar Difüzyon Faktörü | kg/m ² spa | 6,67 |
| | Elastisite Modülü | kgk/cm ² | 70,000 |
| | Yangın Kategorisi | -=1 | F180 |
| | Yangına Dayanım | | A1 |
| | Tolerans Kategorisi | - | D1 |

3.1.2. Harç

Kullanılan harcın çimento, kireç ve kum hacimsel oranı 1:3:6 olarak alınmıştır. Üçlü test numunelerinde kullanılan harcın mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, 40*40*160 mm boyutlarında oluşturulan üç adet prizma numune eğilme ve tek eksenli basınç testlerine, 40*40*40 mm boyutlarındaki 6 adet küp numune ise basınç testine tabii tutulmuştur. 28 gün bekletilen numunelerin deney sonuçlarına göre harcın çekme dayanımı Tablo 3.1.'de, basınç dayanımı ise Tablo 3.3.'te gösterilmektedir. Kullanılan harcın, kırsal bölgelerde mühendislik hizmeti almadan inşa edilen yığma yapılarda kullanılan malzemeleri temsil etmesi açısından düşük dayanımlı olması sağlanmıştır.

Tablo 3.2. Deneyde kullanılan harcın çekme dayanımı

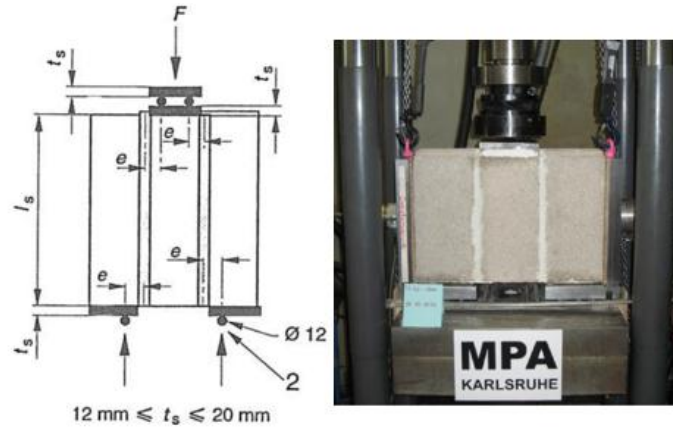
| Çekme Dayanımı (MPa) | Ortalama Çekme Dayanımı (MPa) | Standart Sapma |
|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| 1,44 | | |
| 1,33 | 1,41 | 0,067 |
| 1,45 | | |

Tablo 3.3. Deneyde kullanılan harcın basınç dayanımı

| Basınç Dayanımı (MPa) | Ortalama Basınç Dayanımı (MPa) | Standart Sapma |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| 4,56 | | |
| 4,59 | | |
| 4,34 | 4,53 | 0,154 |
| 4,35 | | |
| 4,73 | | |
| 4,61 | | |

3.2. Deneyde Uygulanan Yükleme Şekli

Basma-çekme test cihazı kullanılarak yapılan deneylerde, dakikada 1,5 mm yükleme hızına sahip bir düşey yük ve derzlerle dik olacak şekilde 0,2 MPa değerinde bir gerilme uygulanarak derzler kaymaya zorlanmıştır. Böylelikle yatay olan deprem etkisi temsil edilmiştir. Düşey yük uygulanan bölgeyi pürüzsüz hale getirebilmek ve yükü eşit dağıtabilmek amacıyla 12 mm kalınlığa sahip bir metal levha üçlü test numunelerinin üstüne yerleştirilmiştir. Ayrıca numunelerin sağına ve soluna 2 adet L profil yerleştirilerek eğilme momentinden kaynaklanan etkiler azaltılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Deney düzeneği [28]

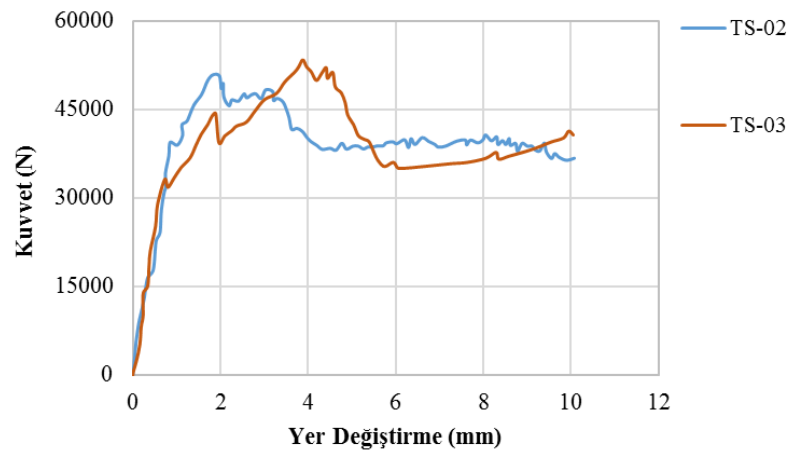
3.3. Referans Numunelerinin Deney Sonuçları

Yapılan deneylerle uygulanan maksimum kesme kuvveti ve yer değiştirme ölçülmektedir. Güçlendirme işlemi uygulanmayan üç adet referans numuneleri kesme

kuvvetleri ve yer değiştirme ilişkileri bakımından karşılaştırılmıştır. Numunelerden bir tanesi dūřey kuvvet uygulandığında her hangi bir kayma davranışı gōstermedięi sadece ortadaki bims blokta ezilme meydana geldiğinden dolayı hatalı kabul edilip sonuç geçersiz sayılmıştır. Dięer TS-02 ve TS-03 adlı iki adet numunenin u noktalı kesme deneyi sonucunda çatlak oluşumu ve gōcme durumu Őekil 3.3.'te, elde edilen kuvvet-yer değiştirme diyagramları ise Őekil 3.4.'te gōsterilmektedir.



Şekil 3.3. Referans numunelerinin kuvvet-yer değiştirme ilişkileri



Şekil 3.4. TS-03 referans numunesinin deney sonrasındaki gōrünümu [28]

Referans numunelerine yapılan deneylerde çatlakların ortadaki bims blokta başlayıp genişleyerek derzler üzerinden aşağıya doğru kaydığı gözlemlenmiştir. TS-02 ve TS-03 numunesinin ortalama F_{max} değeri 51780 N olarak bulunmuştur. Her numunenin kayma gerilmesi(f_v), EN 1052-3'e [45] göre Denklem 3.1.'de verildiği gibi azami düşey yükün (F_{max}) kesit alanına (A) bölünerek hesaplanmıştır.

$$f_v = \frac{F_{max}}{2A} \text{ (MPa)} \quad (3.1)$$

Söz edilen numunelerin ortalama kayma gerilmeleri ve karakteristik kayma gerilmeleri Tablo 3.4.'te gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Numunelerin ortalama kayma gerilmesi değeri [28]

| | |
|--|-----------|
| Ortalama Kayma Gerilmesi (f_v) | 0,350 MPa |
| Karakteristik ortalama Kayma Gerilmesi ($f_{vk}=0,80*f_v$) | 0,280 MPa |
| Standart Sapma | 0,01 |

BÖLÜM 4. YIĞMA DUVARLARIN MODELLENMESİ

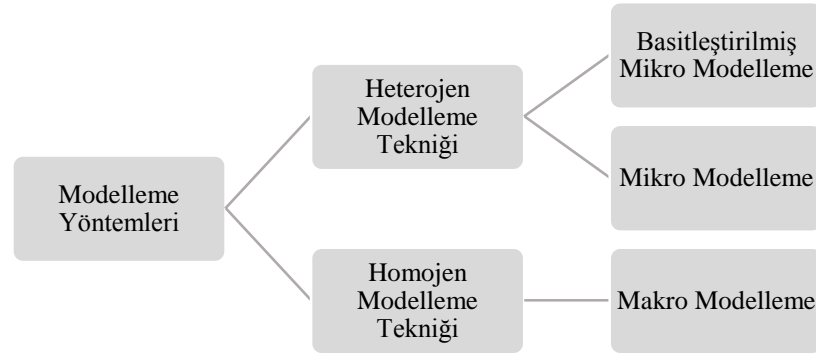
Son yıllarda gelişme gösteren bilgisayar teknolojisi ile yapı ve yapı elemanlarının sonlu eleman yöntemiyle (SEY) modellenmesi yaygın kullanılmaya başlanmıştır. SEY, karmaşık olan yapı veya yapı elemanlarının daha basit alt birimlere ayrılarak her birimin davranışının belirlenmesi ile sistem davranışının çözümlendiği sayısal yaklaşımların tümüdür [46]. Bu yöntem kullanılırken öncelikle karmaşık olan geometri sonlu eleman adı verilen basit alt birimlere ayrılır, ardından her bir alt birimin davranışı belirlenerek sistem davranışı anlaşılabilir. Söz konusu yöntemin doğruluğu kullanılan verilerin doğruluğuna bağlıdır ve ortaya çıkabilecek sonuç önceden tahmin edilmelidir [46]. Sonlu eleman modellemeleri için SAP2000, ANSYS, ABAQUS gibi birçok paket program mevcuttur. Yığma duvarların nonlineer davranışının doğru modellenebilmesi için ileri derecede plastisite ve sonlu eleman analiz bilgisi gerekmektedir [47]. Dolayısıyla bu çalışmada güçlü bir kullanıcı ara yüzüne sahip olan ANSYS paket programı tercih edilmiştir. Söz konusu programda, modelleme ve analiz esnasında ihtiyaç duyulabilecek hazır eleman modülleri var olduğundan kullanımı kolaylaştıracaktır.

Sayısal modellenmesi oldukça karmaşık olan yığma yapı ve elemanlarının statik ve dinamik yük etkisi altındaki davranışının anlaşılabilmesi için farklı modelleme yöntemleri bulunmaktadır.

4.1. Yığma Duvarlarda Kullanılan Modelleme Yöntemleri

Yığma yapıların lineer olmayan analizlerinin modellenmesinde kullanılan yöntemleri homojen ve heterojen olarak iki alt başlık altında toplanabilmektedir. Heterojen bir modelleme tekniği olan mikro modelleme kendi içerisinde basitleştirilmiş mikro ve detaylı mikro modelleme olarak ikiye ayrılmaktadır. Makro modelleme tekniği ise

homojen modelleme olarak bilinmektedir. Modelleme tekniklerine ait şema Şekil 4.1.'de gösterilmektedir.



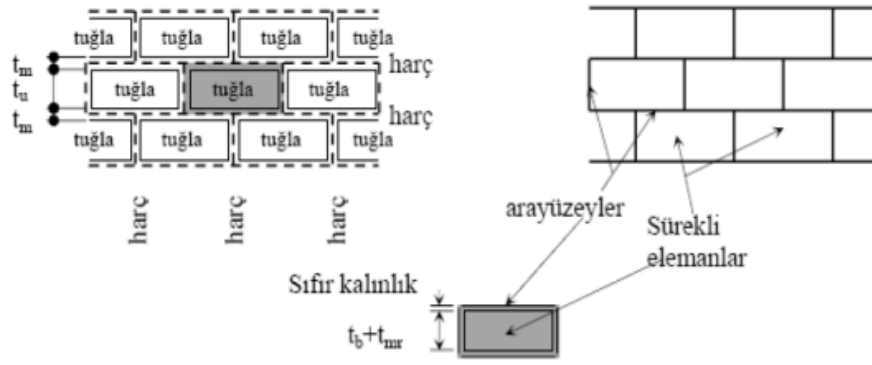
Şekil 4.1. Modelleme Yöntemleri

4.1.1. Heterojen modelleme tekniği

Ayrık modelleme olarak da bilinen heterojen modellemede, yığma duvar oluştururken kullanılan malzemelerin her biri sisteme ayrı ayrı dahil edilmektedir. Bu modelleme tekniği kendi içerisinde basitleştirilmiş mikro modelleme ve mikro modelleme olarak ikiye ayrılmaktadır.

4.1.1.1. Basitleştirilmiş mikro modelleme

Meso modelleme olarakta adlandırılan basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği ile duvar birimi ve bu birimlerin temas noktaları sonlu elemanlar, diğer kısımları ayrık elemanlar (rijit veya şekil değiştirilebilen) kullanılarak modellenmektedir. Söz konusu modellemede harç ayrı bir malzeme olarak tanımlanmamaktadır. Bu teknik kullanılarak oluşturulan model, mikro modellemeye göre daha az düğüm noktası ve eleman sayısı oluşması sebebiyle daha avantajlı görülmektedir. Ancak bu modelleme tekniği kullanılarak yapılan analizlerde olası göçme mekanizmalarının hepsinin göz önüne alınmaması önemli sorun teşkil etmektedir [48]. Oluşabilecek çatlakların ara yüzlerde meydana geldiği kabul edilmektedir. Şekil 4.2.'de basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği [48]

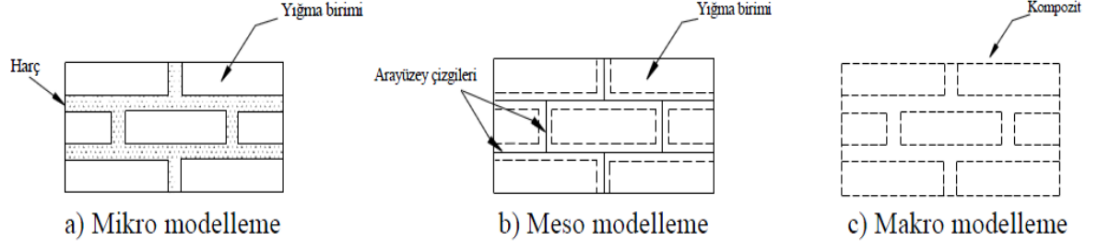
4.1.1.2. Mikro modelleme

Mikro modelleme tekniğinde yığma duvarları oluşturan elemanlar ayrı ayrı tanımlanarak değişen davranış biçimi incelenebilmektedir. Bu modelleme tekniğinin kullanılabilmesi için malzeme özelliklerinin ve sınır koşullarının çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Elastisite modülü, poisson oranı gibi elastik olmayan malzeme özellikleri hem duvar birimi hem de harç için ayrı ayrı hesaba katılmaktadır. Yığma duvarların doğrusal olmayan analizi ile kırılma mekanizması, harçlarda oluşan kayma gerilmesi, taşıyabileceği maksimum yükü ve çatlak oluşumunu gerçeğe yakın bir şekilde elde edebilmek söz konusu modelleme tekniğiyle mümkündür [48]. Bu nedenle yapılan çalışmada bu teknik kullanılarak modelleme yapılmıştır. Mikro modelleme tekniği kullanılarak oluşturulan modelde, çok sayıda düğüm noktası ve sonlu eleman meydana gelmektedir. Bu nedenle söz konusu modelleme tekniği büyük ölçülü yapılarda çözüm süreci çok uzatmasından dolayı küçük ölçekli yapıların tasarlanmasında daha çok tercih edilmektedir.

4.1.2. Homojen (makro) modelleme tekniği

Makro modelleme tekniğinde duvar birimi ve harç homojenleştirilerek tek bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Makro modelleme tekniğinde, heterojen modelleme yöntemlerine göre daha az sonlu eleman olduğundan büyük yapılarda çok sık kullanılmaktadır. Ancak bu yaklaşım ile çatlak oluşumu ve yayılımı hakkında net bir bilgiye ulaşılamamaktadır.

Yığma duvarların modellenmesinde kullanılan yöntemlerden mikro, basitleştirilmiş mikro ve makro modelleme teknikleri Şekil 4.3.'te gösterilmektedir.



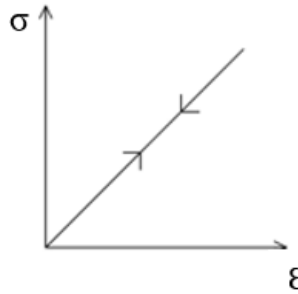
Şekil 4.3. Yığma duvarlarda mikro modelleme (a), basitleştirilmiş mikro modelleme (b), makro modelleme (c) yöntemleri [49]

4.2. Yığma Duvarlarda Kullanılan Malzeme Modelleri

Yapı ve yapı elemanlarında kullanılan gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin belirlenebilmesi amacıyla bazı kabuller yapılarak ideal malzemeler oluşturulmuştur [47]. Kullanılan malzeme modelleri, analizleri doğrudan etkilemekte bu nedenle en uygun malzeme modelinin belirlenip çözüme gidilmesi gerekmektedir.

4.2.1. Malzeme kabulleri

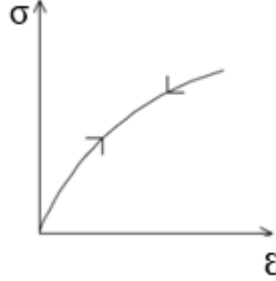
Yükleme işlemi sonucunda kalıcı deformasyon meydana gelmeyen ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin doğrusal olduğu malzemelere lineer-elastik denilmektedir. Bu malzemeye ait kuvvet-yer değiştirme ilişkisi Şekil 4.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Lineer-elastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

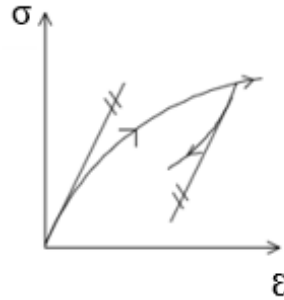
Yükleme işlemi sonucunda kalıcı deformasyon meydana gelmeyen ancak gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin doğrusal olmadığı malzemelere lineer olmayan (non-linear)

elastik denilmektedir. Bu malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı Şekil 4.5.' te gösterilmektedir.



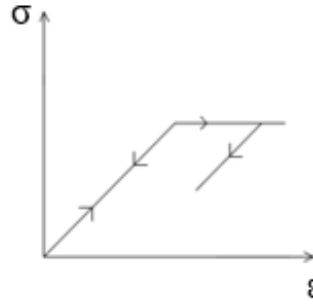
Şekil 4.5. Lineer Olmayan elastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı ilişkisi

Yükleme ve boşaltma eğrilerinin çakışmadığı ancak boşaltma eğrisinin başlangıç teğeti ile yükleme eğrisinin başlangıç teğeti paralel olan malzemelere elastoplastik elastik malzemeler denilmektedir [47]. Bu malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme diyagramı Şekil 4.6.' da gösterilmektedir.



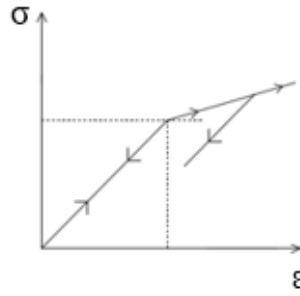
Şekil 4.6. Elastoplastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı ilişkisi

İdeal elastoplastik malzemenin yüklemeye eğrisi iki parçadan oluşmakta ve bu parçalar elastik yük değerini aştıktan sonra x eksenine paralel olarak devam etmektedir. Boşaltma eğrisi elastik şekil değiştirme değerine ulaşıncaya kadar yüklemeye eğrisi ile çakışmakta ve bu değeri aştıktan sonra yüklemeye eğrisinin eğimine paralel olarak devam etmektedir [47]. İdeal elastoplastik malzemeye ait gerilme şekil değiştirme diyagramı Şekil 4.7.'de gösterilmektedir.



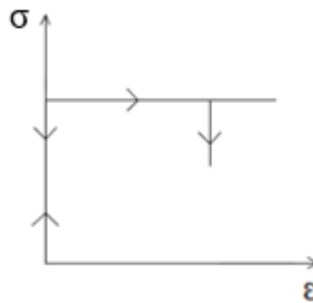
Şekil 4.7. İdeal elastoplastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı ilişkisi

İdeal elastoplastik malzemeye göre kuvvetin elastik yük değerini aştıktan sonra da pekleşme meydana geldiği malzeme pekleşen ideal elastoplastik olarak tanımlanmaktadır [47]. Pekleşen ideal elastoplastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı Şekil 4.8.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Pekleşen ideal elastoplastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı ilişkisi

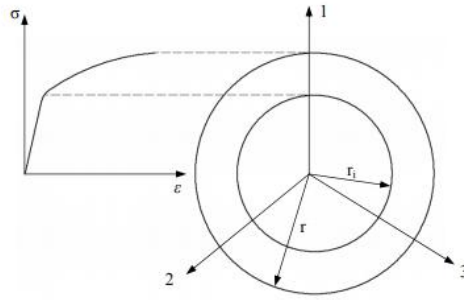
Elastik şekil değişiminin meydana gelmediği boşaltma eğrisinin elastik değeri aşmadığı durumda yükleme eğrisiyle çakışmakta, aştıktan sonra ise yükleme eğrisinin eğimine paralel olarak devam eden malzemelere rijit plastik malzeme denilmektedir (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. Rijit plastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı ilişkisi

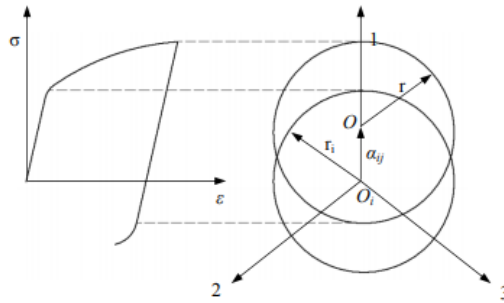
Pekleşme, akma yüzeyinin şekli ve boyutunun plastik deformasyon süresince değişmesidir [50]. Pekleşme izotropik ve kinematik olarak iki başlık altında toplanabilmektedir.

İzotropik pekleşmede yükleme-boşaltma sonrasında basınç gerilmesi ile çekme gerilmesinin eşit olduğunu kabul edilmektedir [51]. İzotropik pekleşme modelinin şeması Şekil 4.10.'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. İzotropik pekleşme modelinin şeması [51]

Tersinir yüklemelerde malzeme her an pekleşmeye uğradığı için basınç gerilmesi ile çekme gerilmesi birbirinden farklı olmaktadır. Bu nedenle tersinir yüklemelerde kinematik pekleşme modeli tercih edilmelidir. Basınç gerilmesi değerinin çekme gerilmesinden daha düşük olduğu için malzemede yumuşama meydana gelmektedir [51]. Kinematik pekleşme modelinin şeması Şekil 4.11.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Kinematik pekleşme modelinin şeması [51]

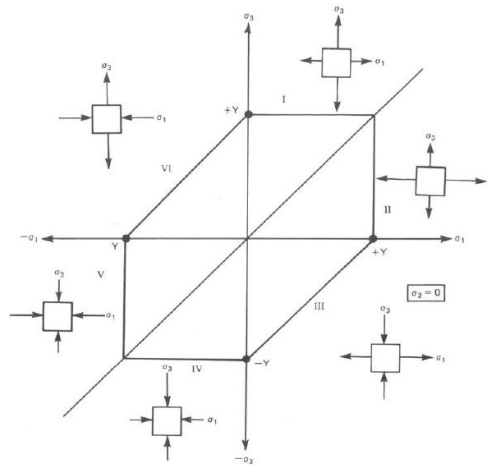
4.3. Yığıma Duvarlar için Kullanılan Akma-Kırılma Hipotezleri

Yapıyı meydana getiren malzemelerin kırılma durumları, kullanılan malzemelerin özelliklerine göre seçilecek kırılma hipotezleriyle belirlenmektedir [30]. Bazı hipotezler malzemelerin basınç ve çekme dayanımlarının birbirine yakın olduğunu diğer hipotezlerde ise farklı olduğu kabul edilerek oluşturulmuştur. Tresca, Von Mises, Mohr Coulomb, Drucger-Prager, William-Warnke gibi hipotezler mevcuttur.

4.3.1. Tresca akma kriteri

Maksimum Kayma Gerilmesi Teorisi olarakta bilinen Henry Tresca tarafından oluşturulan sünek malzemelerin akmasını iyi temsil edebilen bu hipoteze göre bir malzemenin herhangi bir noktasında akmanın olabilmesi için o noktadaki maksimum kayma gerilmesinin (τ_{\max}) akma sınırındaki kayma gerilmesine (τ_{ak}) eşit veya büyük olması gerekmektedir [52]. Bu kriter basit bir şekilde ifade edilebildiği için tercih edilmektedir. Ancak tüm asal gerilmeleri dikkate almadığından (σ_2) akma noktasının doğruluğu diğer hipotezlere nazaran daha düşük olmaktadır (Şekil 4.12.). Tresca akma kriterine göre maksimum kayma gerilmesinin bulunabilmesi için oluşturulan formül Denklem 4.1.'de verilmektedir.

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \quad (4.1)$$

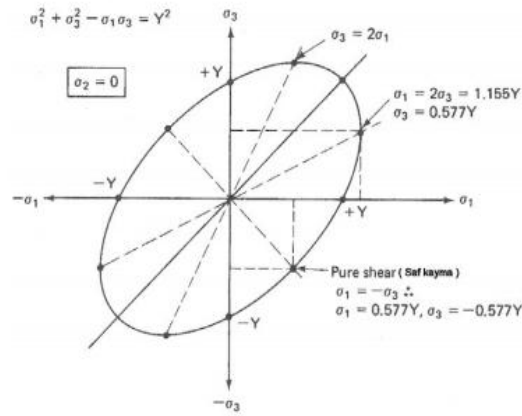


Şekil 4.12. Düzlem gerilme için Tresca akma kriteri [50]

4.3.2. Von Mises/Hill akma kriteri

Richard Von Mises tarafından oluşturulan akma kriteri bütün asal gerilmeleri dikkate aldığı için akma değeri tahmininde oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Maksimum Çarpılma Enerjisi Kriteri olarak bilinmektedir (Şekil 4.13.). Söz konusu kriter yapının herhangi bir yükleme durumunda elemanda plastik şekil değişimi gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini belirlemektedir. Bu kriter gere göre cisme uygulanan gerilme bir 'k' değerine ulaştığında akmaya başladığı kabul edilmektedir (Denklem 4.2.).

$$k^2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (4.2)$$

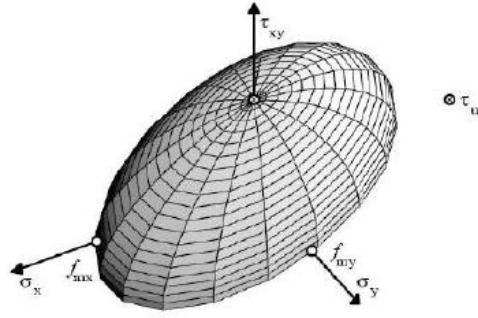


Şekil 4.13. Von Mises akma yörüngesi [50]

Hill teorisi, izotropik malzemeler için kullanılan Von Mises akma kriterinin genişletilmiş formülizasyonunu ile anizotropik malzemelerde uygulanmaktadır [48]. Bu modelin akma yüzeyi τ_{xy} bağlı olmaktadır. Anizotropik malzemeler için Von Mises akma kriteri yeniden düzenlenirse,

$$f_2 = [A\tau_x^2 + B\tau_x\tau_y + C\tau_y^2 + D\tau_{xy}^2 - 1] \quad (4.3)$$

Formülizasyonda belirtilen A, B, C, D değerleri malzeme parametrelerini belirtmektedir. Ayrıca iki eksenli gerilme durumları dikkate alınmıştır [48]. Hill akma modeli Şekil 4.14.'te gösterilmektedir.

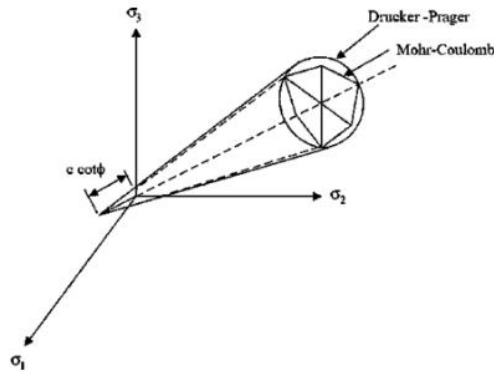


Şekil 4.14. Hill akma modeli [48]

Yığma duvarlarda kullanılan yapı malzemelerini izotrop olarak kabul etmek yanlış bir varsayımdır. Farklı yönlerden gelen kuvvet etkisi altındaki yığma duvarlarda oluşan şekil değişikliği, duvar içerisinde kullanılan malzemelere (tuğla, harç gibi) göre farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle söz konusu duvarlar ortotrop ve ya anizotrop malzeme olarak kabul edilmektedir [53]. Dolayısıyla bu çalışmada tüm asal gerilmeleri dikkate alan ve anizotrop malzemelere uygulanan Von Mises temelinde Hill akma kriteri kabulü yapılarak analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir.

4.3.3. Drucker- Prager, Mohr-Coulomb akma kriterleri

Drucker-Prager akma kriteri, Von Mises kriterinin hidrostatik gerilmenin etkisini kapsayacak şekilde genelleştirilerek kohezyona (c) ve içsel sürtünme açısına (ϕ) bağlı olarak dik bir koni şeklinde oluşturulmuştur. Mohr-Coulomb akma yüzeyi, altıgen ve yüzeyin köşelerini çevreleyecek malzeme parametrelerine sahip bir koni biçimindedir. Drucker Prager ve Mohr Coulomb akma yüzeyleri Şekil 4.15.'te gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Drucker Prager ve Mohr Coulomb akma yüzeyleri [54]

BÖLÜM 5. YIĞMA DUVAR BİRİMLERİ İÇİN GELİŞTİRİLEN SAYISAL MODEL

Çevrimsel yük etkisi altındaki bims blok kullanılarak oluşturulan yığma duvar birimlerinin mekanik davranışının anlaşılabilmesi adına kullanılan üç noktalı kesme deneyine karşılık gelen sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir sayısal model geliştirilmiştir. Oluşturulan modelde kullanılan elemanın türü, malzeme modeli ve akma-kırılma kriterleri belirlenerek doğrusal olmayan analiz ile duvar biriminin kayma mekanizması, çatlak oluşumu ve süneklik kapasitesi incelenmiştir. Üçlü duvar birimlerinin lineer olmayan davranışını yansıtabilmek için Von/Mises akma kriterinden yararlanılmıştır. Mikro modelleme tekniği kullanılarak ANSYS paket programında analizler gerçekleştirilmiştir.

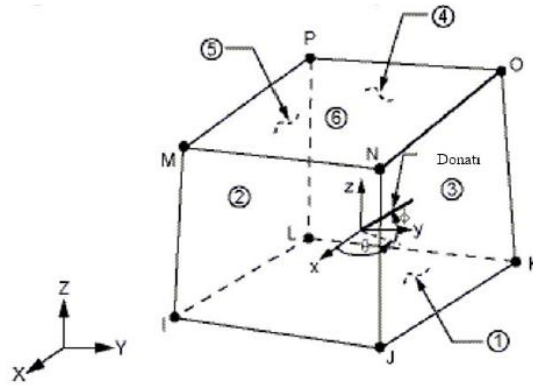
5.1. ANSYS Yazılımı Hakkındaki Genel Bilgi

Doğrusal veya doğrusal olmayan analizlerde kullanılabilen, sonlu eleman yöntemine dayalı ve birçok mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak tercih edilen yazılımdır. ANSYS programını çözüm öncesi, çözüm ve çözüm sonrası olarak üç bölüme ayırmak mümkündür [30]. Çözüm öncesi için probleme göre en uygun eleman tipi seçilir ve belirlenen malzeme özellikleri sisteme atanır. Ardından problemin geometrisi tasarlanıp mesh işlemi olarak bilinen istenilen boyuttaki sonlu eleman ağlarına ayrılır. Sonlu eleman ağının düzeni ve boyutu sonuçların doğruluğunu direkt olarak etkilemektedir. Tasarlanan geometrinin sınır koşulları belirlenip istenilen yükeleme işlemine başlanır. Çözüm kısmında üzerinde çalışılan probleme uygun ayarlar belirlenerek gerçeğe en yakın sonuçların elde edilebilmektedir. Çözüm sonrası bölümünde analiz sonuçları incelenerek gerekli yorumlar yapılmalıdır [30].

ANSYS programında çözülecek problemin türüne göre static structural, transient structural, explicit dynamics, rigid dynamics gibi birçok alt modül bulunmaktadır. Bu çalışmada probleme en uygun olan static structural alt modülü tercih edilmiştir.

5.2. Eleman Tipinin Belirlenmesi

ANSYS programı kapsamında doğrusal olmayan analiz işlemini gerçekleştirebilmek için bims blok ve harç malzemeleri için 8 düğüm noktalı, her düğüm noktasında x-y-z yönlerinde üçer yer değiştirme serbestlik derecesi olan Şekil 5.1.'de gösterilen solid eleman kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Sayısal analizde kullanılan eleman tipi

5.3. Malzeme Özelliklerinin Atanması

Üçlü test numuneleri, bims blok ve kireç esaslı harç malzemeleri kullanılarak oluşturulmuştur. Geliştirilen sayısal modelin doğrusal olmayan analizini gerçeğe yakın bir şekilde temsil edebilmek için malzemeler, multi-lineer kinematik pekleşme modeli olarak oluşturulmuştur. Malzeme özellikleri olarak Bölüm 3'te bims blok ve harcın teknik özelliklerinin yer aldığı Tablo 3.1., Tablo 3.2. ve Tablo 3.3.'teki değerler referans olarak alınmıştır. Mikro modelleme tekniği uygulandığından her iki malzeme için kendilerine ait teknik özellikler kullanılmıştır.

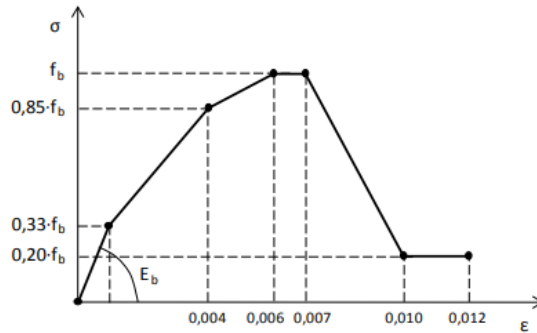
Barraza [55], duvar birimi ve harç malzemelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini belirleyebilmek için literatürde bulunan deneysel çalışmaların içerisinde yer alan

basınç, çekme, eğilme gibi deneylerin sonuçlardan yararlanarak duvar birimi için gerilme-şekil değiştirme diyagramı, harcın basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme diyagramı ve harcın kayma gerilmesi-şekil-değiştirme diyagramını oluşturmuştur. Referans aldığı bazı deneyler Şekil 5.2.'de gösterilmektedir.



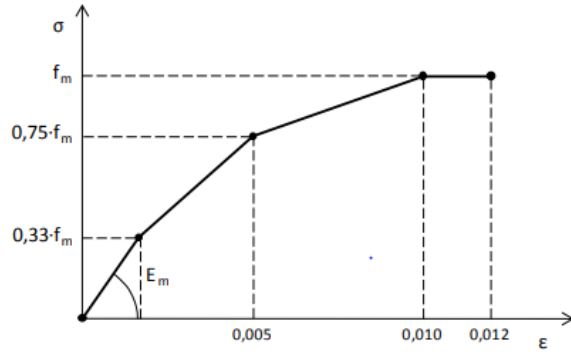
Şekil 5.2. Literatürden alınmış deneyler [55]

Duvar birimi için oluşturulmuş gerilme-şekil değiştirme diyagramı Şekil 5.3.'te verilmiştir. Eğri üzerinde verilen değerler malzemelerin niteliğine göre değişkenlik göstermektedir.

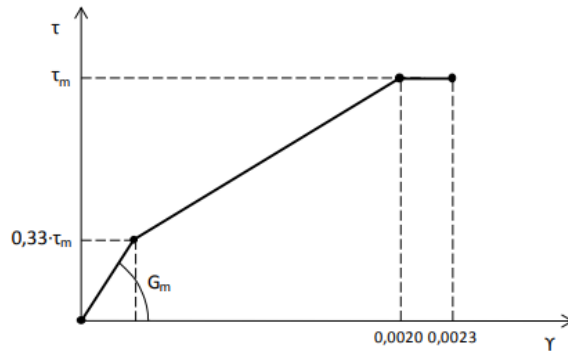


Şekil 5.3. Duvar biriminin gerilme-şekil değiştirme diyagramı

Harç için, basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme diyagramı ve kayma gerilmesi-şekil-değiştirme diyagramı Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'te gösterilmektedir.

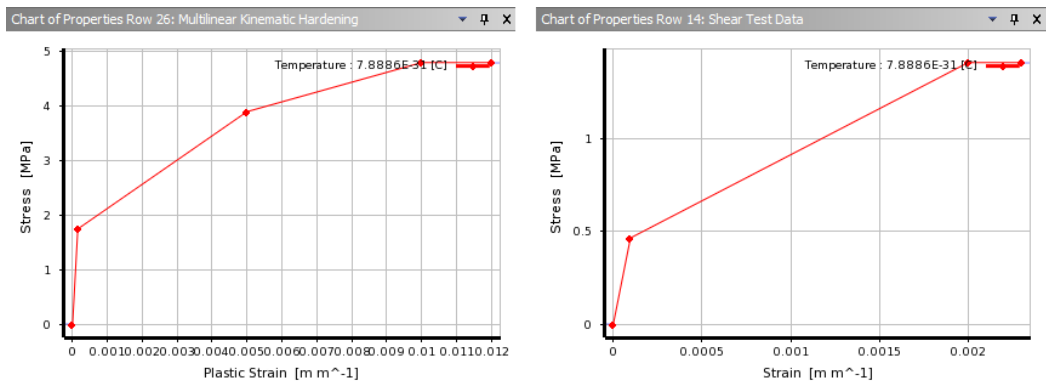


Şekil 5.4. Harcın basınç altındaki gerilme-şekil değıştirme diyagramı



Şekil 5.5. Harcın kayma gerilmesi-şekil değıştirme diyagramı

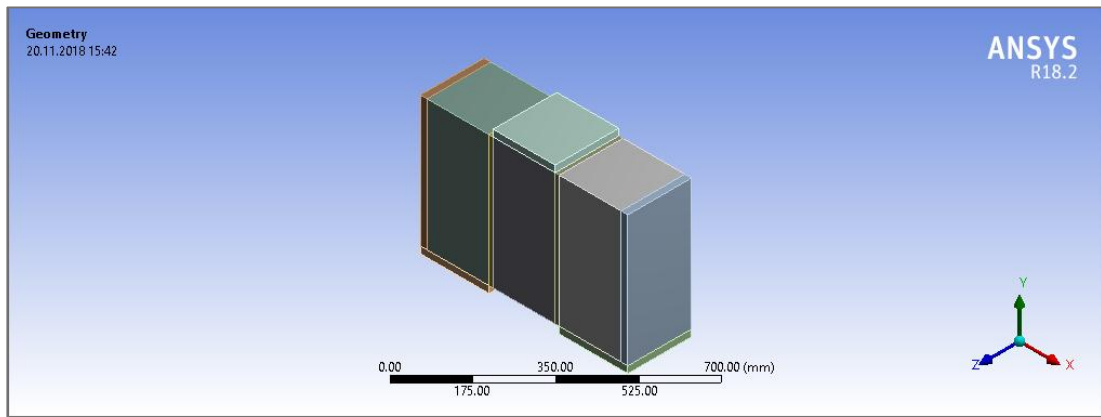
Programın “engineering data” bölümünden malzemelerin mekanik özellikleri sisteme girilmektedir. Harç için oluşturulan basınç altında gerilme-şekil değıştirme eğrisi ile kayma gerilmesi-şekil değıştirme eğrileri multilinear kinematik pekleşme modelinde oluşturulmuş olup Şekil 5.6.’da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Modelde kullanılan harcın basınç altındaki gerilme-şekil değıştirme eğrisi ile kayma gerilmesi-şekil değıştirme eğrileri

5.4. Geometrinin Oluşturulması

Kullanılan bims blok elemanın boyutları 190*390*185 mm olacak şekilde ANSYS programının “Geometry” bölümünde çizilerek bir solid eleman oluşturulmuştur. Üç adet bims blok elemanını bağlamak amacıyla 12 mm kalınlığa sahip harç malzemesini temsil etmesi amacıyla tekrar bir solid eleman tasarlanmıştır. Üçlü test numunesinin sağına ve soluna 2 adet L profil yerleştirilerek eğilmeden kaynaklı etkilerin azaltılması amaçlanmıştır. Ortadaki bims blok üzerine 12 mm kalınlığında bir yerleştirilerek düşey yükün eşit dağıtılabilmesi amaçlanmıştır. Sayısal model, programın geometry bölümünde çizilmiş olup Şekil 5.7.’de gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Sayısal modelin geometrisi

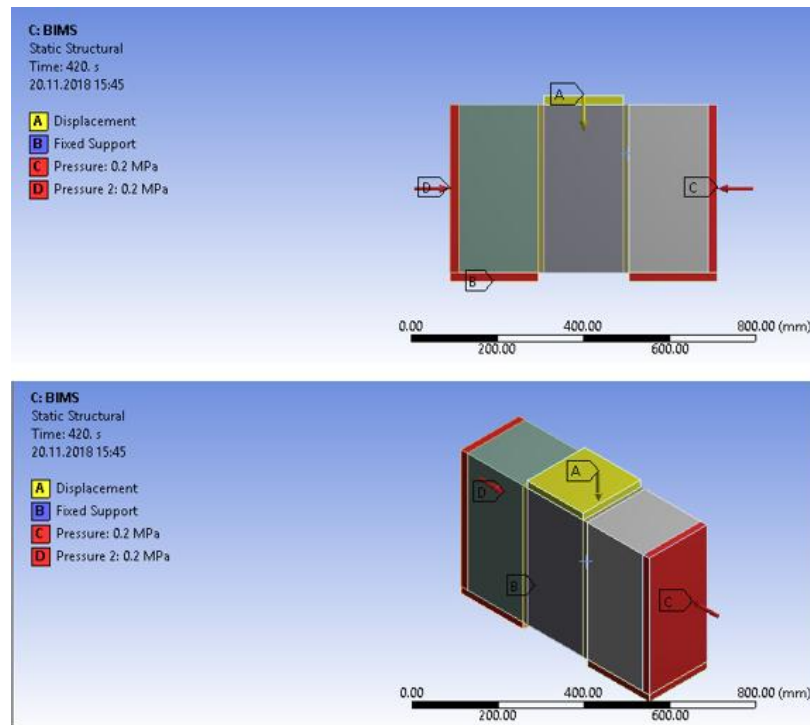
5.5. Sınır Koşullarının Belirlenmesi ve Yükleme Biçimi

Basma-çekme test cihazı kullanılarak yapılan referans deneylerini temsil etmesi amacıyla oluşturulan geometri, alttan ve yanlardan “fixed support” işlemi yapılarak sabitlenmiştir. Program kapsamında istenilen elemana belirlenen süre boyunca kuvvet, yer değiştirme, basınç, sıcaklık gibi çeşitli yüklemeler yapılabilmektedir. Oluşturulan geometri üzerine dakikada 1,5 mm yükleme hızına sahip olan bir düşey yük tanımlanmıştır. Tanımlanan düşey yük değerleri Tablo 5.1.’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Sayısal modele tanımlanan düşey yükleme

| Süre (sn) | Deplasman (mm) |
|-----------|----------------|
| 0 | 0 |
| 60 | 1,5 |
| 120 | 3 |
| 180 | 4,5 |
| 240 | 6 |
| 300 | 7,5 |
| 360 | 9 |
| 420 | 10,5 |

Tanımlanan düşey yükün ardından derzlere dik bir biçimde 0,2 MPa değerinde bir gerilme uygulanmıştır. Belirlenen sınır koşulları ve yükleme biçimi Şekil 5.8.'de gösterilmiştir.

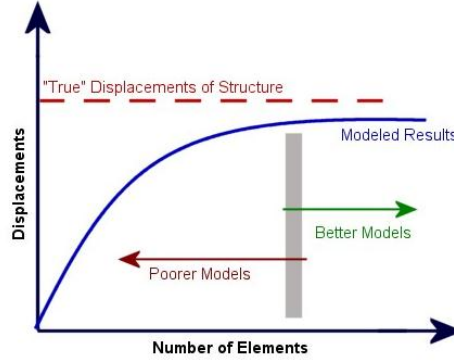


Şekil 5.8. Sayısal modelin belirlenen sınır koşulları ve yükleme biçimi

5.6. Uygun Sonlu Eleman Sayısının Belirlenmesi

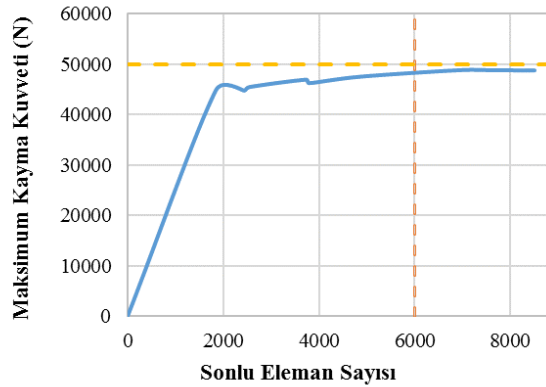
Sayısal analizlerde belirlenen sonlu eleman sayısı arttıkça gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edileceğine dair bir algı yaratılmış olsa da ideal sonlu eleman sayısının saptanması gerekmektedir. Aksi taktirde optimum değerden fazla sayıda sonlu eleman oluşturulursa düğüm noktası ve denklem sayısı fazlalaşmakta bu nedenle çözüm süreci

uzamakta ve bu durum sistemde hata meydana gelme olasılığını arttırmaktadır. İdeal sonlu eleman sayısının belirlenmesine dair grafik Şekil 5.9.'da gösterilmektedir.



Şekil 5.9. İdeal sonlu eleman sayısının belirlenmesi [56]

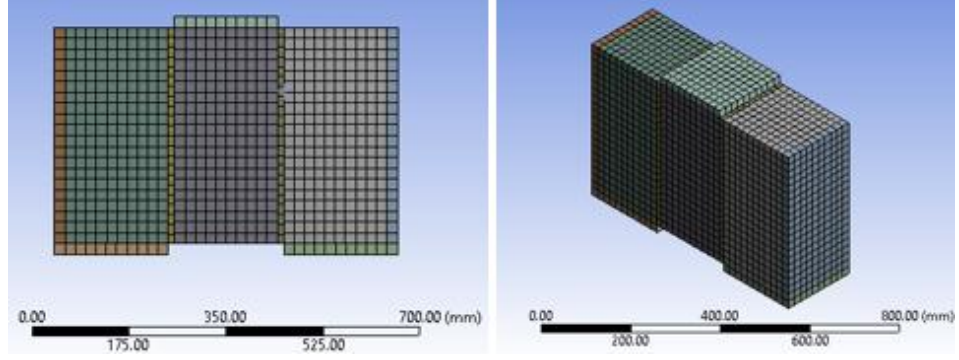
Geometri çizimi, sınır koşulları ve yükleme biçimi sisteme tanımlandıktan sonra “Mesh” bölümünden en uygun boyuta ve şekle sahip sonlu elemanlara bölünmüştür. İdeal sonlu eleman sayısının bulunabilmesi için farklı boyutlarda sonlu elemanlar seçilerek birçok analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde baz alınan maksimum kuvvet değeri ile bölünen sonlu eleman sayısının ilişkisi incelenerek ideal sonlu eleman sayısı belirlenmiş olup Şekil 5.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Sonlu eleman sayısı-maksimum kuvvet ilişkisi

Sonlu eleman sayısı-maksimum kuvvet ilişkisi grafiğinden de görüldüğü gibi sonlu eleman sayısı arttıkça analiz sonuçlarından elde edilen maksimum kuvvet değeri giderek artmakta, ancak belli bir değerden sonra sabit bir şekilde devam etmektedir.

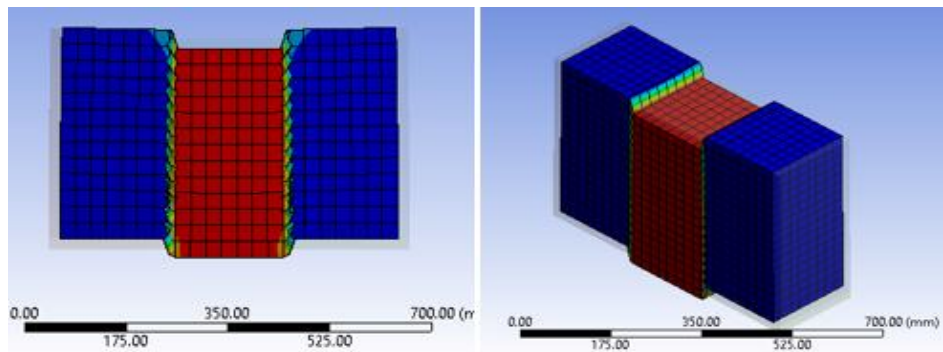
Maksimum kuvvetin sabit olduğu bölgedeki değeri, referans deneylerinin maksimum kayma kuvveti değerlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Kuvvetin sabit kaldığı bölgeden optimum sonlu eleman sayısının belirlenmesiyle Şekil 5.11.'de gösterilen sonlu eleman ağı oluşturulmuştur.



Şekil 5.11. Sayısal modelin sonlu eleman örgüsü

5.7. Yığma Duvar Biriminin Sayısal Analizi

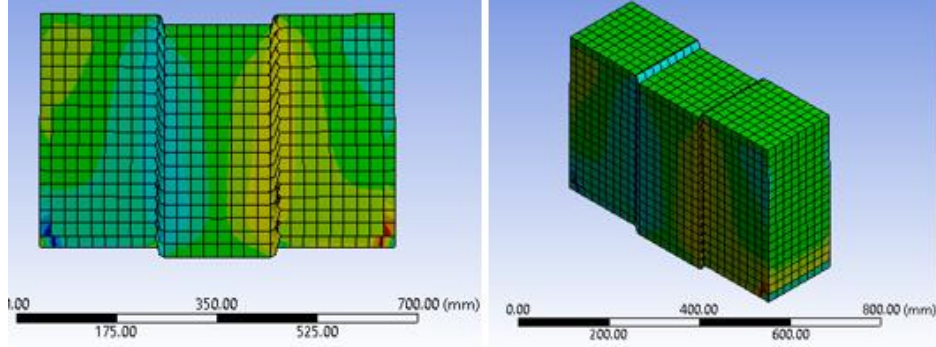
Duvar biriminin eleman tipinin, malzeme modelinin, akma kriterinin, geometri çiziminin, sınır koşullarının ve yükleme protokolünün tanımlanmasının ardından analiz işlemlerine başlanmıştır. ANSYS yazılımının “static structural” alt modülünde mikro modelleme tekniği kullanılarak duvar biriminin doğrusal olmayan analizinin tespit edilmesi adına yapılan sayısal analiz sonucunda meydana gelen deformasyon Şekil 5.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Sayısal analizde meydana gelen toplam deformasyon

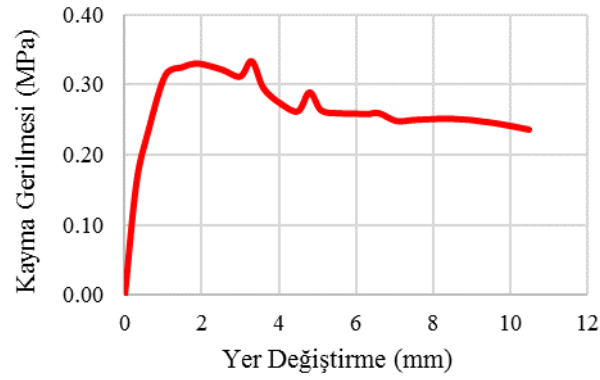
Şekil 5.12.'de görüleceği üzere uygulanan düşey yük ile harçlar kaymaya zorlanmış olup deformasyon meydana gelmiştir. Bims blok ve harç arayüzünün ayrıldığı görülmüştür.

Analiz işleminden sonra üçlü bims blok numunesinde meydana gelen kayma gerilmeleri Şekil 5.13.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Sayısal analizde meydana gelen kayma gerilmesi

Üçlü test numunesinin kayma gerilmesi-yer değiştirme ilişkisi Şekil 5.14.'te verilmiştir.

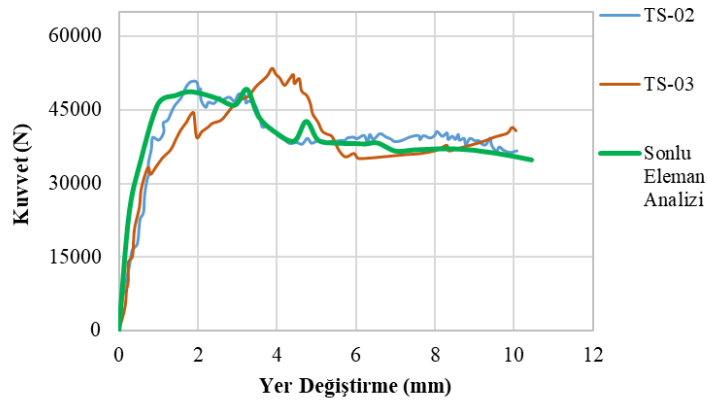


Şekil 5.14. Sonlu eleman analizinin kayma gerilmesi-yer değiştirme ilişkisi

Maksimum kayma gerilmesi değerinin 0,33 MPa olduğu görülmektedir.

5.8. Referans Deneyler İle Sayısal Modelin Karşılaştırılması

Çevrimsel yük etkisi altındaki üçlü bims blok birimlerinin davranışının belirlenebilmesi için kullanılan üç noktalı kesme deneyine karşı gelen sonlu elemanlar yöntemine dayalı geliştirilen matematik modelin, kırılma mekaniği ve malzeme kabulleri açısından kalibrasyonu daha önce gerçekleştirilmiş Bölüm 3’te anlatılan deney sonuçlarından elde edilmiş olan verilerden yararlanılarak yapılmıştır. Oluşturulan sayısal modelin ve deneylerin, harç ara yüzeyinin kayma davranışı, dayanım parametreleri ve süneklik performansı açısından karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında deneyler ile modelin kuvvet-yer değiştirme ilişkileri Şekil 5.15.’te verilmiştir.



Şekil 5.15. Referans deneyler ile sonlu eleman analizinin kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

Yapılan sonlu eleman analiz sonuçları ile referans deneylerinin sonuçlarının büyük ölçüde örtüştüğü gözlemlenmiştir. Böylelikle geliştirilen modelin doğruluğu ve kullanılabilirliği desteklenmiştir. Söz konusu model ile ülkemizde çok sık kullanılan ancak yapısal davranışı tam olarak bilinmeyen, bims blok malzemesi kullanılarak oluşturulan yığma binaların davranışının anlaşılabilmesi adına önemli bilgiler elde edilmiştir.

BÖLÜM 6. SAYISAL ÇALIŞMA

Doğruluğu ve kullanılabilirliği test edilmiş sayısal modelde geleneksel harç malzemesi yerine, beyaz çimento ve doğal su kireci esaslı sıva ve geliştirilmiş cam kürecik esaslı sıva gibi farklı malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizlerin sonucunda yapısal davranışı, kayma mekanizması ve süneklik kapasiteleri incelenmiştir. Beyaz çimento ve doğal su kireci esaslı bir yalıtım sıvası olan malzemenin mekanik özellikleri literatürden Rizzo [28] tarafından yazılan raporda mevcuttur. Ancak geliştirilmiş cam kürecik esaslı sıva malzemesinin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi adına Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda bir takım deneyler yapılmıştır.

6.1. Beyaz Çimento ve Doğal Su Kireci Esaslı Sıva Malzemesinin Mekanik Özellikleri

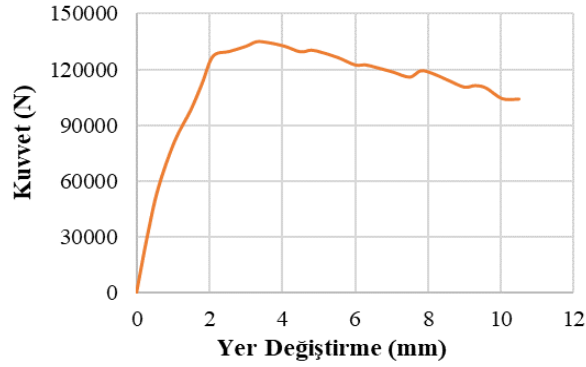
Beyaz çimento ve doğal su kireci esaslı sıva (DH-01), hazırlanması ve uygulanması kolay, iyi yapışma özelliğine sahip ve geçirimsizliği yüksek olduğu için yalıtım sağlayan, tarihi yapıların restorasyonunda kullanılabilen yeni bir yapı malzemesidir. Söz konusu malzemenin mekanik özellikleri Tablo 6.1.'de gösterilmektedir.

Tablo 6.1. Beyaz çimento ve doğal su kireci esaslı sıva malzemesi

| Malzeme | Basınç Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) | Elastisite Modülü (MPa) |
|---------|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| DH-01 | 14 | 4 | 7500 |

6.1.1. Beyaz çimento ve doğal su kireci esaslı sıva malzemesi kullanılarak oluşturulan modelin sayısal analizi

Üçlü test numunelerinde; duvar biriminin eleman tipi, malzeme modeli, akma kriteri, geometri çizimi, sınır koşulları ve yükleme protokolü referans deneyleriyle ilişkili olarak tanımlanmıştır. Sadece harç malzeme özelliği olarak söz konusu yalıtım sıvası kullanılmasıyla sayısal model meydana getirilerek doğrusal olmayan analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Harç malzemesi olarak DH-01 sıvasının kullanılmasıyla oluşturulan modelin sayısal analizi sonucunda meydana gelen kuvvet-yer değiştirme diyagramı Şekil 6.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. DH-01 sıvasının kullanılmasıyla oluşturulan modelin sayısal analizi sonucu meydana gelen kuvvet-yer değiştirme ilişkisi

6.2. Genleştirilmiş Cam Kürecik Esaslı Sıva Malzemesinin Mekanik Özellikleri

Genleştirilmiş cam kürecik esaslı sıva (DH-02), soğuğa, sıcağa, darbelere ve yangına karşı dayanıklı, kolay uygulanabilen, hafif ve doğa dostu olan bir yapı malzemesidir. İçeriğinde yer alan cam kürecik bileşeniyle ısı ve ses yalıtımı da sağlamaktadır. Söz konusu malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için basınç, eğilme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler kapsamında 40*40 mm boyutlarına sahip küp numuneler, 40*40*160 mm boyutlarında prizmalar ve 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir numuneler hazırlanıp test edilmiştir (Şekil 6.2.).



Şekil 6.2. DH-02 adlı sıva malzemesiyle hazırlanan numuneler

Hazırlanan numuneler kürde bekletilerek 28. gün sonunda basınç ve eğilme testleri uygulanmış olup yapılan deneyler Şekil 6.3.'te gösterilmektedir.



Şekil 6.3. DH-02 adlı sıva malzemesine uygulanan deneyler

Deneylerin sonucunda elde edilen değerler Tablo 6.1., Tablo 6.2. ve Tablo 6.3.'te verilmektedir.

Tablo 6.2. Küp numunelerinden elde edilen basınç dayanımı

| Küp Numuneler | Basınç Dayanımı (MPa) |
|---------------|--------------------------|
| 1 | 2,37 |
| 2 | 2,83 |
| 3 | 2,92 |

Tablo 6.3. Silindir numunelerinden elde edilen eğilme dayanımı

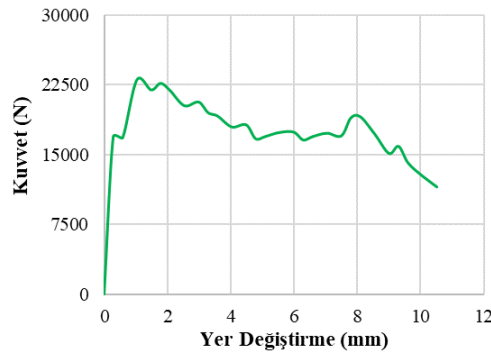
| Prizma Numuneler | Eğilme Dayanımı (MPa) |
|------------------|-----------------------|
| 1 | 0,812 |
| 2 | 1,06 |
| 3 | 1,06 |

Tablo 6.4. Deney sonuçlarından elde edilen ortalama değerler

| Malzeme | Basınç Dayanımı (MPa) | Eğilme Dayanımı (MPa) | Elastisite Modülü (MPa) |
|---------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| DH-02 | 2,71 | 1,5 | 7750 |

6.2.1. Genleştirilmiş cam kürecik esaslı sıva malzemesi kullanılarak oluşturulan modelin sayısal analizi

Üçlü test numunelerinde; duvar biriminin eleman tipi, malzeme modeli, akma kriteri, geometri çizimi, sınır koşulları ve yükleme protokolü referans deneyleriyle ilişkili olarak tanımlanmıştır. Sadece harç malzeme özelliği olarak söz konusu yalıtım sıvası kullanılmasıyla sayısal model meydana getirilerek doğrusal olmayan analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında harç malzemesi olarak cam kürecik esaslı sıvanın kullanılmasıyla oluşturulan modelin sayısal analizi sonucu elde edilen verilerden meydana gelen kuvvet-yer değiştirme diyagramı Şekil 6.4.'te gösterilmiştir.



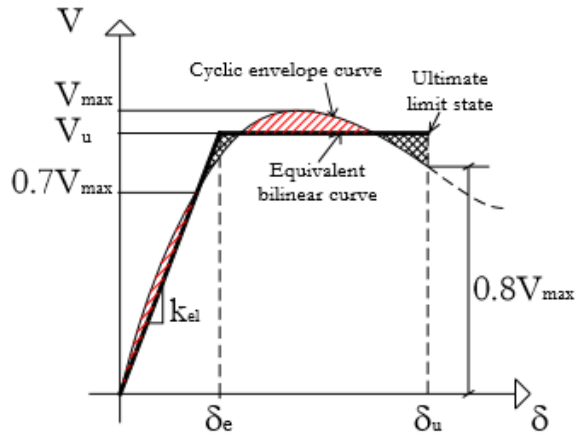
Şekil 6.4. DH-02 sıvasının kullanılmasıyla oluşturulan modelin sayısal analizi sonucu meydana gelen kuvvet-yer değiştirme ilişkisi

DH-02 malzemesi kullanılarak oluşturulan model, yüksek bir elastisite modülüne sahip olduğundan dolayı çok rijit bir davranış göstermiştir.

6.3. Referans DeneYlerinin İdealleştirilmesi ve Süneklik Katsayılarının Hesaplanması

Yığma yapı elemanlarının mekanik davranışlarının karmaşık olmasında; teknik özellikleri tam olarak bilinmeyen malzeme kullanımı, içeriği standart ölçüyle tarif edilemeyen harç uygulamaları ve işçilik hataları gibi etmenler etkili olmaktadır. Dolayısıyla yapısal davranışının anlaşılması ve çıkarımda bulunabilmesi zorlaşmaktadır. Bu nedenle deneysel çalışmaların sonucunda olası hatalar öngörülerek kuvvet-yer değiştirme eğrileri idealize edilmektedir. İdealize edilen eğrilerden süneklik katsayıları hesaplanmaktadır. Ancak süneklik katsayısının hesaplanmasına yönelik literatürde birçok yöntem bulunduğundan bu kapasite değerinin kesin bir rakamla ifade edilebilmesi doğru bulunmamaktadır.

Magenes ve ark. [57], yaptıkları deney sonuçlarından elde edilen zarf eğrilerinin, bilineer eğriyle idealleştirerek süneklik katsayılarını hesaplamışlardır (Şekil 6.5.).



Şekil 6.5. Eğrilerin bilineer idealizasyonu [57]

Bu çalışmada referans deneYlerinin kuvvet-yer değiştirme eğrileri benzer bir şekilde idealize edilerek numunelerin süneklik kapasiteleri belirlenmiştir.

$$k_{ei} = \frac{V_{cr}}{\delta_{cr}} \quad (6.1)$$

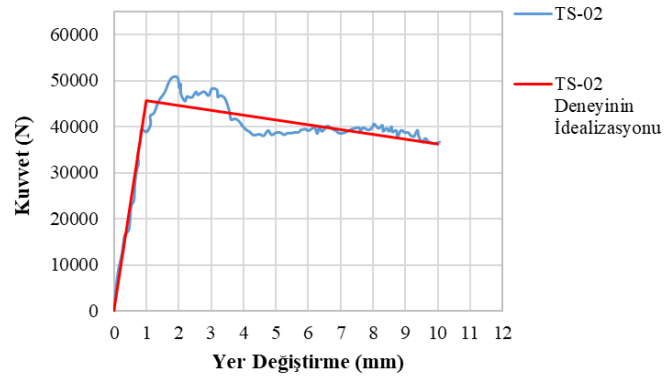
$$V_{cr} = 0,7V_{max} \quad (6.2)$$

$$V_u = \left[\delta_u - \sqrt{\delta_u^2 - \frac{2A_{envelop}}{k_{el}}} \right] \quad (6.3)$$

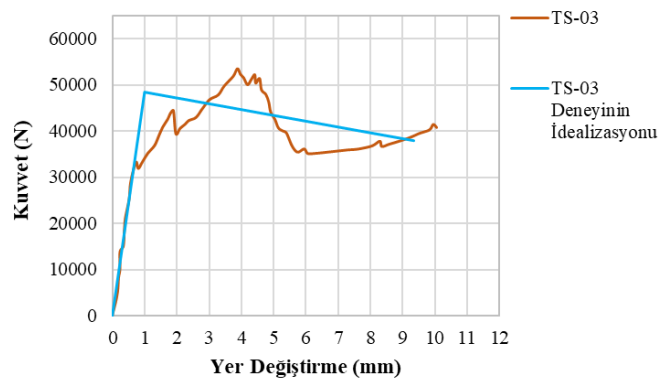
$$\delta_e = \frac{V_u}{\delta_e} \quad (6.4)$$

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_e} \quad (6.5)$$

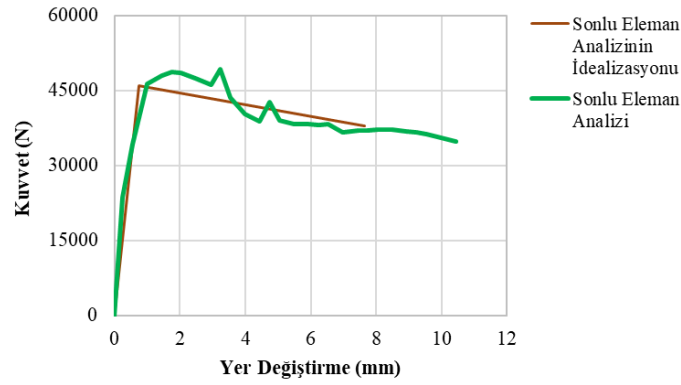
TS-02 ve TS-03 adlı referans deneyleri ve modelin kuvvet yer değiştirme eğrileri idealleştirilmiştir (şekil 6.6., şekil 6.7. ve şekil 6.8.).



şekil 6.6. TS-02 deneyinin idealizasyonu

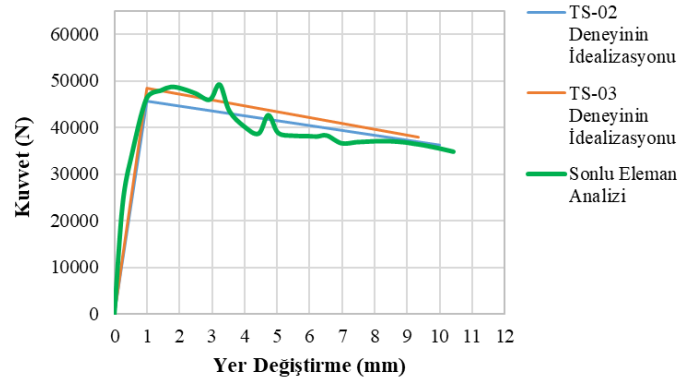


şekil 6.7. TS-03 deneyinin idealizasyonu



Şekil 6.8. Sonlu Eleman Analizinin İdealizasyonu

TS-02 ve TS-03 deneylerinin idealleştirilmiş eğrileri ile sonlu eleman analizi sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 6.9.)



Şekil 6.9. İdealleştirilmiş eğrilerle sonlu eleman analizinin karşılaştırılması

Geleneksel harç kullanılarak oluşturulan sayısal modelin sonlu eleman analizi ile referans deneylerinin idealize edilmiş kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin önemli ölçüde tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

Maksimum kuvvet değerlerinin (F_{max}) kesit alanına (A) bölünmesiyle elde edilen kayma gerilmesi (f_v) değerleri EN 1052-313 standartlarına göre hesaplanmıştır. Deneylerin ve modelin idealizasyon eğrilerinden hesaplanan kayma gerilmesi değeri, karakteristik kayma gerilmesi (f_{vk}) ve süneklik katsayıları (μ) Tablo 6.5.'te gösterilmektedir.

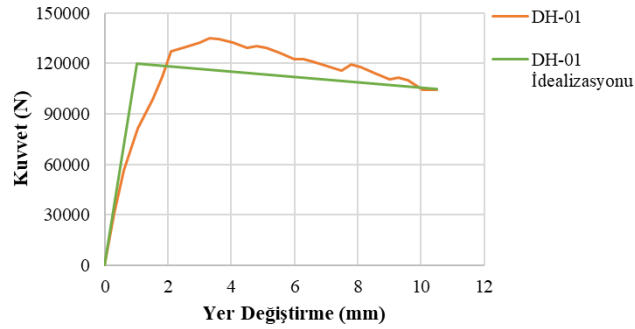
Tablo 6.5. Hesaplanan kayma gerilmesi değeri, karakteristik kayma gerilmesi (f_{vk}) ve süneklik kapasiteleri (μ)

| | Fmax (N) | f_v (MPa) | f_{vk} (0,80*f_v) | μ |
|-----------------------------|-----------------|----------------------------|--|-------------------------|
| TS-02 | 50805,47 | 0,34 | 0,27 | 10,00 |
| TS-03 | 53395,52 | 0,36 | 0,29 | 9,44 |
| Sonlu Eleman Analizi | 48796,33 | 0,33 | 0,26 | 10,14 |

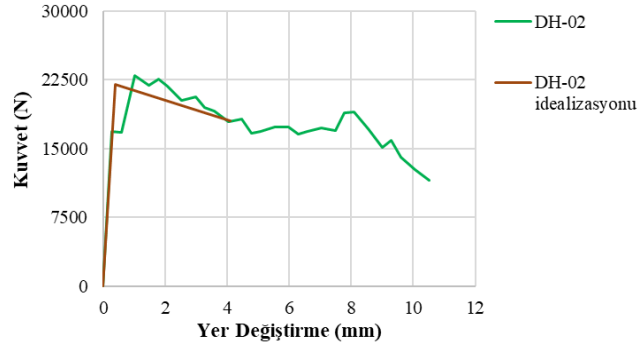
TS-02, TS-03 referans deneylerinin ve sonlu eleman analizinin sonucunda sonucu elde edilen maksimum kuvvet değerlerinin farkının %5 ile %10 arasında değiştiği, kayma gerilmesi değerlerinin farkının %3 ile %9 arasında, süneklik kapasitelerinin farkının ise %5 ile %7 arasında değiştiği görülmektedir.

6.4. Özel Harçlar Kullanılarak Oluşturulan Sayısal Modellerin Süneklik Katsayılarının Hesaplanması

DH-01 ve DH-02 adlı numunelerin sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerine söz konusu idealleştirme işlemi yapılmıştır. DH-01 numunesinin idealizasyonu Şekil 6.10.'da, DH-02 numunesinin idealizasyonu ise Şekil 6.10.'da gösterilmiştir.

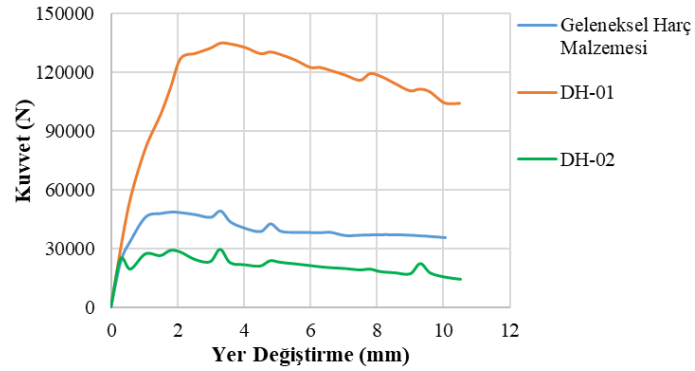


Şekil 6.10. DH-01 idealizasyonu



Şekil 6.11. DH-02 idealizasyonu

Özel harçlar kullanılarak oluşturulan sayısal modellerin analizi sonucu elde edilen kuvvet yer değiştirmeleri, geleneksel harç kullanılarak oluşturulan modelin analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 6.12.).



Şekil 6.12. Geleneksel harç, DH-01 ve DH-02 harç malzemelerinin kullanılmasıyla oluşturulan nümerik modellerin kuvvet-yer değiştirme ilişkileri

İdealleştirilmiş eğriler yardımıyla süneklik katsayıları hesaplanmıştır. Geleneksel harç malzemesi, DH-01 ve DH-02 harç malzemelerinin kullanılmasıyla oluşturulan nümerik modellerin analizi sonucunda belirlenen F_{max} , f_v , f_{vk} ve μ değerleri Tablo 6.6.'da verilmektedir.

Tablo 6.6. Hesaplanan maksimum kuvvet değeri (F_{max}), kayma gerilmesi değeri, karakteristik kayma gerilmesi (f_{vk}) ve süneklik kapasiteleri (μ)

| | F_{max} (N) | f_v (MPa) | f_{vk} (0,80* f_v) | μ |
|------------------------|---------------|-------------|-------------------------|-------|
| Geleneksel Harç | 48796,33 | 0,33 | 0,26 | 10,14 |
| DH-01 | 134478,2 | 0,91 | 0,73 | 10,52 |
| DH-02 | 23013,09 | 0,16 | 0,13 | 10,23 |

DH-01 malzemesinin kullanılmasıyla yapılan analiz sonucunda oluşan maksimum kayma kuvveti değeri geleneksel harç ve DH-02 malzemelerine göre oldukça yüksek değere sahip olduğu gözlenmiştir.

Dayanımı çok düşük olmasına rağmen DH-02 adlı numunenin süneklik kapasitesi geleneksel harç kullanılarak oluşturulan numuneye göre yüksek ancak DH-02'ye göre daha düşük çıkmıştır. Söz konusu malzeme yüksek bir elastisite modülüne sahip olduğundan dolayı çok rijit bir davranış göstermiştir.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çevrimsel yük etkisi altındaki bims blok ve geleneksel harç malzemeleri ile oluşturulan yığma duvar birimlerinin davranışını anlayabilmek amacıyla kullanılan üç noktalı kesme deneyine karşılık gelen bir matematik model geliştirilmiştir. Sonlu eleman yöntemine dayalı ve mikro modelleme tekniği kullanılarak oluşturulan model ANSYS paket programında çözülmüştür. Duvar birimi ve harç ara yüzünün kayma davranışını doğru yansıtabilmek amacıyla malzemeler Von-Mises\Hill akma kriteri temelinde multi-lineer kinematik pekleşme modeli kabulü yapılarak analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sayısal model daha önceden KIT laboratuvarında yapılmış olan deneysel çalışma ile kalibre edilerek doğrulanmıştır. Deneyler ile modelin kuvvet-yer değiştirme ilişkileri karşılaştırılmıştır. Duvar birimlerindeki derzlerin kayma mekanizması, çatlak biçimi ve süneklik kapasitesi incelenmiştir. Modelde geleneksel harç malzemesi yerine son zamanlarda tercih edilen beyaz çimento ve doğal su kireci esaslı sıva ve cam kürecik esaslı sıva adlı yeni yapı malzemeleri kullanılmıştır. Cam kürecik esaslı sıva malzemesinin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla bir takım deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yeni sıva malzemeleri kullanılarak oluşturulan nümerik modellerin analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet yer değiştirme ilişkileri, dayanım ve süneklik kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Yapılan nümerik çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- a. Bims blok ve geleneksel harç malzemeleri kullanılarak geliştirilen sayısal modelin ve referans alınan deneysel çalışmaların kuvvet yer değiştirme eğrilerinin iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Referans deneyleri ile sayısal modelin analizi sonucunda; maksimum kuvvet değerleri arasındaki farkın %5-%10 arasında, kayma gerilmesi değerleri arasındaki farkın ise %10'u aşmadığı görülmüştür.

- b. İdealize edilmiş eğriler yardımıyla deneylerin ve nümerik modelin süneklik kapasiteleri karşılaştırıldığında aradaki farkın %10 değerini geçmediği tespit edilmiştir.
- c. Geleneksel harç, beyaz çimento ve doğal su kireci esaslı sıva (DH-01), geliştirilmiş cam kürecik esaslı sıva (DH-02) olmak üzere üç adet derz harcı kullanılmıştır. DH-02 mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Söz konusu malzemenin basınç dayanımı çok düşük olmasına karşın elastisite modülünün yüksek çıktığı görülmüştür. Bu nedenle söz konusu malzemeyle oluşturulmuş modelin analiz sonucunda elastik bölgede rijit bir davranış gösterdiği gözlemlenmiştir.
- d. Basınç dayanımı yüksek olan DH-01 malzemesi kullanılarak yapılan analizler sonucunda maksimum kayma kuvveti değerinin, geleneksel harca göre 3 kat, DH-02 adlı sıvaya göre ise yaklaşık 5 kat fazla olduğu görülmektedir.
- e. Özel sıva malzemelerinin kullanılmasıyla oluşturulan matematik modellerin analizlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme diyagramları idealleştirilmiştir. İdealleştirilen eğriler yardımıyla süneklik katsayıları hesaplanmıştır. Geleneksel harç ve özel harçlı numunelerin süneklik katsayıları arasındaki farkın %5'ten daha az olduğu görülmüştür.

Mikro modelleme tekniği kullanılarak tasarlanan, sonlu eleman yöntemine dayalı olan söz konusu sayısal modelin analizi sonucunda elde edilen veriler neticesinde gerçek bir konuta ait yığma duvarın sismik davranışının anlaşılabilmesi adına önemli bilgiler içermektedir. Yığma duvar birimlerinin karmaşık olan kayma davranışını ve çatlak yayılımlarını belirleyebilmek için uzun uğraş gerektiren deneysel çalışmalara gerek duymadan geliştirilmiş olan sayısal model kullanılabilir. Geliştirilen model ile tuğla, taş gibi farklı malzemeleri kullanarak, yığma duvarların sismik davranışı öngörülebilir. Yapılması planlanan yığma binalarda geleneksel harç yerine dayanımı ve süneklik kapasitesi yüksek olan farklı harç malzemeleri denenebilir ve depremlerde oluşabilecek hasarların veya yıkımların önüne geçilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Mahrebel, H., A., Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem özellikleri, hasarlar, onarım ve güçlendirme teknikleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [2] Budak, A., Uysal, H., Aydın, A., C., Kırsal yapıların deprem karşısındaki davranışı/earthquake behaviour of rural buildings. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi., 35(3-4), 209-219, 2004.
- [3] TC. Başbakanlık Devlet İstatistik Enstitüsü, 2001, Bina Sayımı 2000, DİE Matbaası, Ankara, 236-238, 2001.
- [4] Koç, V., Depreme maruz kalmış yığma ve kırsal yapı davranışlarının incelenerek yığma yapı yapımında dikkat edilmesi gereken kuralların derlenmesi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi., 36-57, 2016.
- [5] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Müdahale, İyileştirme ve Sosyo Ekonomik Açıdan 2011 Van Depremi, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2014.
- [6] www.afad.gov.tr/tr/24212/Turkiye-Deprem-Tehlike-Haritasi., Erişim Tarihi: 11.10.2018.
- [7] Önal, M. M., Koçak A., Yığma yapı hasarları ve onarım ve güçlendirme yöntemlerinin ayrıntıları. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi., Antalya, 2005.
- [8] Ural, A., Sarılmış ve geleneksel tip yığma yapıların deprem davranışlarının incelenmesi. Deprem Sempozyumu., Kocaeli, 2005.
- [9] İnel, M., Özmen, H., B., Çaycı, B., T. Evaluation of reasons of the damages after Simav and Van (2011) earthquakes. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences., 19(6), 256-265, 2013.
- [10] Özmen, B., 17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depreminin hasar durumu. Türkiye Deprem Vakfı., Ankara, 2000.

- [11] İstegün, B., Çelebi E., Triplet shear tests on retrofitted brickwork masonry walls. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering., 11(9), 1269-1274, 2017.
- [12] Zhang, S., Rıchart N., Beyer, K., Numerical evaluation of test setups for determining the shear strength of masonry. Materials and Structures., 51(110), 2018.
- [13] İstegün, B., Subaşı, A., Çelebi, E., Sismik tekstil ile güçlendirilmiş düşey delikli yığma tuğla ve bims blokların üç noktalı kesme deneyi. 2ND International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management., 130-140, 2018.
- [14] Mezrea, P., E., Deprem kumaşıyla güçlendirilen çevrimsel yük etkisindeki dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin davranışlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2014.
- [15] Arslan, M. E., Deprem kumaşıyla güçlendirilen çevrimsel yük etkisindeki dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin davranışlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2013.
- [16] Senthivel, R., Lourenço, P., B., Finite element modelling of deformation characteristics of historical stone masonry shear walls. Engineering Structures., 31(9), 1930-1943, 2009.
- [17] Kömürcü, S., Gedikli, A., macro and micro modelling of the unreinforced masonry shear walls. III. International conference on Engineering and Natural Science., 790-797, 2017.
- [18] Köksal, H., O., Doran, B., Kuruşçu, A., O., Koçak, A., Elastoplastic finite element analysis of masonry shear walls. KSCE Journal of Civil Engineering., 20(2), 784-791, 2016.
- [19] Pandey, B., H., Meguro, K., Simulation of brick masonry wall behavior under in plane lateral loading using applied element method. In Proceedings of In 13th World Conference on Earthquake Engineering., 16, 1664-1677, 2004.
- [20] Alyavuz, B., Anıl, Ö., Bulut, N., Nonlinear finite element analysis of masonry wall strengthened with CFRP strips. Advanced Composite Materials., 25(2), 159-175, 2016.

- [21] www.islamiforum.net/Thread-KASIM%C4%B0YE-MEDRESES%C4%B0-MARD%C4%B0N., Erişim Tarihi: 20.10.2018.
- [22] www.gninsaat.com.tr/yigma-yapi-nedir., Erişim Tarihi: 18.10.2018.
- [23] www.atlasdergisi.com/kesfet/gezi/turkiyenin-10-tarihi-koprusu.html., Erişim Tarihi: 22.10.2018.
- [24] Örs, Y., Togay, A., Türkiye ahşap yapı endüstrisinde kurulu kapasite ve planlanan yatırımlar. Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi., 83-94, 2002.
- [25] Dabanlı, Ö., Tarihi yığma yapıların deprem performansının belirlenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [26] Korkmaz, A., Farklı yapısal malzeme özelliklerinin yığma yapı davranışına etkisi. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi., 3(1), 69-78, 2014.
- [27] www.byclb.com/Files/sektor_raporlari/Bims_Sektor_Raporu_2006.pdf , Erişim Tarihi: 28.10.2018.
- [28] Rizzo, S., Triplet shear tests on pumice blocks BLG19 with and without the seismic retrofitting system röfix sismacalce. Final Report, Department Reinforced Concrete, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany, 2015.
- [29] [www.karmabilgi.net/kayaclari-siniflandiralim/.](http://www.karmabilgi.net/kayaclari-siniflandiralim/), Erişim Tarihi: 02.11.2018.
- [30] Kömürcü, S., Yığma yapıların düzlem içi davranışlarının modellenmesi ve analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [31] Tetik, T., Tarihi yığma yapıların deprem performansı ve güçlendirme teknikleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [32] Acun, S., Gürdal, E., Yenilenebilir bir malzeme:kerpiç ve alçılı kerpiç. Türkiye Mühendislik Haberleri., 427(5), 71-77, 2003.
- [33] www.fenokulu.net/mobil/fen-konulari/resim2658., Erişim Tarihi: 03.11.2018.
- [34] www.izmirdergisi.com/tr/dergi-arsivi/59-35inci-sayi/166-izmir-de-eski-su-kemerleri-ve-su-yollari 20.11.2018., Erişim Tarihi: 05.11.2018.

- [35] milliyetsanat.com/haberler/sanat-terimi/tonoz/200., Erişim Tarihi: 05.11.2018.
- [36] rihtimdergi.com/harran-kubbeleri/., Erişim Tarihi: 05.11.2018.
- [37] arkeofili.com/dunya-capinda-gorulmesi-gereken-10-antik-yunan-tapinagi/., Erişim Tarihi: 05.11.2018.
- [38] DBYBHY, Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [39] Aköz, A. H., Deprem etkisi altındaki tarihi yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [40] Döndüren, M., S., Şişik, Ö., Demiröz, A., Tarihi yapılarda görülen hasar türleri. Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi., 13, 45-58, 2017.
- [41] Münich, J. C., Hybride multidirektionaltextilien zur erdbebenverstärkung von mauerwerk; experimente und numerische untersuchungen mittels eines erweiterten makromodells. Ph. D. Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology, Germany, 2010.
- [42] www.slideplayer.biz.tr/slide/10976873/., Erişim Tarihi: 08.11.2018.
- [43] Özaraç, S., Yığma yapılarda taşıyıcı tuğla duvarların gfrp ile güçlendirilmesinin deneysel olarak incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [44] Kuruşçu., A., O. Yığma yapıların analizi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2005.
- [45] EN 1052-3, European norms for methods of test for masonry-Part 3: Determination of initial shear strength., 1996.
- [46] Jafarov, O., Lifli polimerle güçlendirilmiş yığma duvarların modellenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 2012.
- [47] Dede, F., T., Tersinir-tekrarlanır yükleme altındaki betonarme çerçevelerin ansys programı ile nonlinear sonlu eleman analizi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.

- [48] Aşan Doğan, H., N., Yığma duvarların mikro ve makro modelleme teknikleriyle lineer olmayan analizi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2016.
- [49] Mutlu, Ö., Şahin, A., Tarihi yığma minarelerin modelleme yaklaşımlarının deprem davranışına etkisinin incelenmesi – bursa ulucami örneği. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences., 7(2), 123-136, 2016.
- [50] Ceylan, İ., Metallerin plastik şekillendirilmesinde kullanılan malzeme modellerinin sonlu elemanlar ile analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [51] Özer, F., Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerde şekil verme operasyonları sonucu oluşan geri yaylanmanın doğru tahmini ve telafisi. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [52] www.kisi.deu.edu.tr//mehmet.zor/MUK%20DERS%20NOTLARI/mukavemet_konu_7_Akma_ve_Kirilma_Kriterleri.pdf., Erişim Tarihi: 12.11.2018.
- [53] Demirkan, D., S., Derz kalınlığı ve duvar örme tekniğinin yapıya etkisinin anizotrop bir model üzerinde incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [54] www.researchgate.net/figure/Shape-of-the-yield-surface-defined-by-the-Drucker-Prager-criterion_fig1_225368208 Erişim Tarihi: 12.11.2018.
- [55] Barraza, J.,C., Numerical model for nonlinear analysis of masonry walls. La Serena, Chile. Doktora Tezi, 2012.
- [56] www.iesweb.com/products/visualanalysis/help/model/plateelements.html., Erişim Tarihi: 15.11.2018.
- [57] Magenes, G., Morandi, P., Penna, A., 2008. Enhanced safety and efficient construction of masonry structures in europe–d 7.1 c test results on the behaviour of masonry under static cyclic in plane lateral loads. In Proceedings of Report ESECMaSE D, p.7.

ÖZGEÇMİŞ

Rojda Orman Subaşı, 28.09.1992'de Şanlıurfa'da doğdu. İlk ve orta eğitimini Kocaeli'de bulunan Petkim İlköğretim Okulu'nda tamamladı. 2010 yılında Kocaeli'nin Körfez ilçesinde yer alan Yarımca Lisesi'nden mezun oldu. Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne 2011 yılında başladı ve 2015 yılının Haziran ayında mezun oldu. 2015-2016 eğitim öğretim yılı Bahar yarıyılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı-Yapı bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılı Eylül ayında İstanbul Arel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandığı görevine devam etmektedir.