



**KTO KARATAY ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA PROGRAMI**

**KESME TAŞ İLE YAPILAN KATMANLI DUVARLARIN DENEYSEL
OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Ahmad Javid ZIA

Doktora Tezi

**KONYA
Aralık 2020**

KESME TAŞ İLE YAPILAN KATMANLI DUVARLARIN DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI

Ahmad Javid ZIA

KTO Karatay Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Programı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Abdulkerim İLGÜN

Konya
Aralık 2020

KABUL VE ONAY

Ahmad Javid ZIA tarafından hazırlanan “**Kesme Taş ile Yapılan Katmanlı Duvarların Deneysel Olarak Araştırılması**” başlıklı bu çalışma, 18 Aralık 2020 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: **Prof. Dr. Hüsnü CAN** _____
KTO Karatay Üniversitesi

Tez Danışmanı: **Dr. Öğr. Üyesi Abdulkerim İLGÜN** _____
KTO Karatay Üniversitesi

Jüri Üyesi: **Prof. Dr. Mehmet Emin KARA** _____
Aksaray Üniversitesi

Jüri Üyesi: **Prof. Dr. Alper İLKİ** _____
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyesi: **Prof. Dr. Özgür ANIL** _____
Gazi Üniversitesi

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Hüseyin Bekir YILDIZ
Enstitü Müdürü

BİLDİRİM

Enstitü tarafından onaylanan Doktora tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını basılı veya dijital biçimde arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullar dahilinde erişime açma iznini KTO Karatay Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle, Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak ve gelecekteki çalışmalar (makale, kitap, lisans, patent vb.) için tezimin tamamının veya bir bölümünün kullanım hakları yalnızca bana ait olacaktır.

Tezimin bütünüyle kendi çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izinle kullanılması zorunlu olan kaynakları, yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde izinlerin suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayımlanan “Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında, tezim, aşağıda belirtilen koşullar haricince, YÖK Ulusal Tez Merkezi ve KTO Karatay Üniversitesi Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.¹

Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ... ay ertelenmiştir.²

Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir.³⁴

18 Aralık 2020

Ahmad Javid ZIA

¹ MADDE 6(1) Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.

² MADDE 6(2) Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internette paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.

³ MADDE 7(1) Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.

⁴ MADDE 7(2) Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

ETİK BEYAN

KTO Karatay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Hazırlama ve Yazım Kurallarına uygun olarak Dr. Öğr. Üyesi Abdulkerim İLGÜN danışmanlığında tarafımdan üretilen bu tez çalışmasında; sunduğum tüm veri, enformasyon, bilgi ve belgeleri bilimsel etik kuralları çerçevesinde elde ettiğimi, tüm değerlendirme, analiz, bulgu ve sonuçları bilimsel usullere uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım kaynakların tümüne bilimsel normlara uygun biçimde atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

18 Aralık 2020

Ahmad Javid ZIA

Oğullarım Ahmad Edrees ZIA ve Ahmad Sulaiman ZIA'ya

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her safhasında büyük emeği olan, kişisel ve kariyerimin gelişiminde oynadığı rolle ve lisansüstü eğitim sürecinde bir danışmandan öte, bir arkadaş, meslektaş ve yeri geldiğinde bir baba gibi yol gösteren, yapıcı eleştirilerde bulunan ve yılların tecrübesini paylaşarak hayata farklı bakış açısı kazandıran pek kıymetli hocam Dr. Örg. Üyesi Abdulkerim İLGÜN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez İzleme Komitesinde yer alan Prof. Dr. Hüsnü CAN ve Prof. Dr. Mehmet Emin KARA hocalarımın katkılarından, yapıcı eleştirilerinden ve yol gösterimlerinden ötürü şükranlarımı arz ederim.

Çalışmalarımın tamamlanması için her zaman beni motive eden, yeri geldiğinde her türlü yardımda bulunan KTO Karatay Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünün hocalarına canı gönülden minnettar olduğumu bildiririm.

Deneysel çalışmaların tamamlanabilmesi için büyük ölçekte maddi yardımda bulunan başta sayın mütevelli heyet başkanımız Selçuk ÖZTÜRK ve sayın rektörümüz Prof. Dr. Bayram SADE olmak üzere KTO Karatay Üniversitesi Ar-Ge, Proje ve İnovasyon Eko Sistemine, Şekeroğlu Gayrimenkul Geliştirme Yatırım Tic. ve San. A.Ş. ve Arıbaş Metal firmasına teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora tezimde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve terbiye edici sohbetleri ile her zaman yol gösteren kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Şakir DEMİRTAŞ'a şükranlarımı sunarım.

Tez sürecinde her zaman ve her konuda yaptığımız tartışmalar ve fikir alışverişlerinden büyük dersler aldığım, beni motive eden ve tezin yazım aşamasında büyük katkısı bulunan değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Faik SEVİMLİ 'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Tez yazım aşamasında özellikle Türkçe dilindeki yazım hatalarımı gösteren ve düzelten can dostum Öğr. Gör. Mustafa Sami KAÇAR hocama gönülden şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarda büyük emekleri olan değerli mesai arkadaşlarım Arş. Gör. Abdullah MÜSEVİTOĞLU, Mim. Hüseyin MÜSEVİTOĞLU, Yük. Müh. Sadarettin SANCIOĞLU, Dr. Gökhan KARADAĞ, Yük. Müh. Selim Sadi DURU'ya ve birbirinde değerli lisans öğrencileri, Hasan Furkan SOYDOĞAN, Semih ARIBAŞ, Hülya KAYA, Münife KÖKLÜ, Zeynep ALCI ve Serkan SALKIM'a teşekkürlerimi sunarım.

Ve her şeyden öte akademik kariyerimde beni teşvik eden, maddi ve manevi destekte bulunan değerli babam ve abim başta olmak üzere aileme sonsuz şükranlarımı sunarım. Çalışmamın tamamlanmasında sabırla beni destekleyen değerli eşim Munira ZIA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık, 2020

Ahmad Javid ZIA

ÖZET

Ahmad Javid ZIA

Kesme Taş ile Yapılan Katmanlı Duvarların Deneysel Olarak Araştırılması

Doktora Tezi

Konya, 2020

Bu tez kapsamında, Türkiye'nin bulunduğu coğrafyanın geçmişi ile birleşmiş, anıtsal eser kimliğinde, modern, güvenilir ve ekolojik mimariye sahip doğal taş binaların inşası için, içi boş çok katmanlı doğal taş duvarın tasarımı ve düzlem içi davranışının araştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu duvar geleneksel çok katmanlı doğal taş duvarlardan esinlenmiş ve aradaki fark ise iç ve dış katmanlar arasındaki boşluğun bulunması ve bu katmanların, tez kapsamında geliştirilen metal bağlantı elemanları ile birbirine bağlanmasıdır. Böylece günümüzün mühendislik hizmetlerinden faydalanarak tasarlanan duvarların uygulanması ve doğal taşın verdiği ihtişamla, servis ömrü uzun, mimari geçmişi ve değeri olan yığma binaların inşası için zemin hazırlanmaya amaçlanmıştır. Bu bağlamda kapsamlı literatür araştırılması ardından tasarlanan duvarın düzlem içi mekanik özelliklerinin belirlenmesi için uygun deneyler belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında önce tasarlanan duvar numunelerinde kullanılan bireysel elemanların mekanik özellikleri belirlenmiş ardından duvarın basınç dayanımı, elastisite modülü ve başlangıç kayma dayanımı mikro boyutlu duvar numuneler kullanılarak tespit edilmiştir. Buna ek olarak makro boyutlu duvar numuneler kullanılarak duvarın düzlem içi kayma dayanımı, diyagonal basınç deneyi ile ve t_{ef}/h_{ef} oranı gibi parametrelerin etkisi, tek eksenli basınç deneyi ile belirlenmiştir. Deneysel çalışmaların ardından tek katmanlı duvarın basınç ve başlangıç kayma dayanımının nümerik modeli tasarlanmış ve analizleri yapılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tasarlanan duvarın uygulanması önerilmiş ve ileride yapılacak çalışmalara ışık tutulmuştur.

Anahtar Kelimeler

Katmanlı doğal taş duvar, kenet, zıvana, kireç harcı, horasan harcı, kesme doğal taş

ABSTRACT

Ahmad Javid ZIA

Experimental Investigation of Multi-Layered Cut Stone Walls

Ph. D. Thesis

Konya, 2020

In this thesis, the in-plane behavior of a multi-layered wall with cavity inside the layers which is designed for the construction of natural stone buildings that is modern, safe and has monumental identity with ecological architecture which is merged with the history of geographical area where Turkey is located was investigated. This wall is inspired by traditional multi-layered natural stone walls and the difference is that there is a gap between the inner and outer layers and these layers are connected with metal connectors developed within the scope of the thesis. Thus, it is aimed to prepare ground for the construction of stone masonry buildings by application of walls designed using today's engineering services which would have long service life, architectural history and value coming from stone's resplendence. In this context, appropriate experiments were determined to designate the in-plane mechanical properties of the designed wall after a comprehensive literature review. Within the scope of experimental studies, first the mechanical properties of the individual elements used in the designed wall specimen were determined, and then the compressive strength, elasticity modulus and initial shear strength of the wall were determined using micro-dimensional wall specimens. In addition, by using macro-dimensional wall specimens, in-plane shear strength of the walls was determined by diagonal compression test and the effects of some parameters such as h_{ef}/t_{ef} were determined by uniaxial compressive test. After the experimental studies, the numerical model of the compression and initial shear strength of the single layer wall was designed and analyzed, and results were compared with the experimental results. According to the results obtained, the application of the designed wall was proposed, and future studies were enlightened.

Keywords

Multi-layered natural stone wall, clamp, bolts, lime mortar, khorasan mortar, natural cut stone

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
BİLDİRİM	ii
ETİK BEYAN.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER DİZİNİ.....	xii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	10
2.1. Bireysel Elemanlar	11
2.1.1. Doğal Taş (Mayra Bej)	11
2.1.2. Harçlar	15
2.1.3. Metal bağlantı elemanları	16
2.2. Duvarların mekanik özellikleri.....	18
2.2.1. Mikro boyutlu Numuneler	19
2.2.2. Makro Boyutlu Numuneler.....	26
2.2.3. Nümerik Analiz (Sonlu Elemanlar Metodu).....	36
3. MATERYAL VE YÖNTEM	40
3.1. Bireysel Elemanların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	40
3.1.1. Taş.....	41
3.1.2. Harçlar	45
3.1.3. Bağlantı elemanları.....	46
3.2. Duvarların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	48
3.2.1. Mikro boyutlu numuneler	49
3.2.2. Makro boyutlu numuneler	60
3.3. Sonlu Elemanlar Metodu ile Duvarın Modellenmesi ve Analizi	70
3.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM).....	71
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	77

4.1. Bireysel Elemanların Mekanik Özellikleri.....	77
4.1.1. Taşın Mekanik Özelliği	77
4.1.2. Harçlar	80
4.1.3. Bağlantı Elemanları	83
4.2. Metal Bağlantı Elemanlarının Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi	85
4.3. Mikro Boyutlu Duvar Numunelerin Mekanik Özellikleri.....	90
4.3.1. Basınç dayanımı.....	90
4.3.2. Başlangıç kayma dayanımı	104
4.4. Makro Boyutlu Duvar Numunelerin Mekanik Özellikleri	131
4.4.1. Basınç dayanımı.....	131
4.4.2. Diyagonal kayma dayanımı	134
5. TAŞ DUVARLARIN NÜMERİK OLARAK MODELLENMESİ.....	158
5.1. Başlangıç Kayma Deneyinin Nümerik Modellenmesi.....	158
5.2. Tek Eksenli Basınç Deneyinin Nümerik Modellenmesi	161
6. SONUÇLARIN İRDELENMESİ	163
6.1. Bireysel Malzemelerin Mekanik Özellikleri	163
6.2. Metal Bağlantı Elemanların Parametrik Tasarımı.....	165
6.3. Duvarların Mekanik Özellikleri	165
6.3.1. Mikro Boyutlu Duvar Numunelerin Düzlem İçi Davranışı.....	165
6.3.2. Makro boyutlu duvar numunelerin düzlem içi davranışı.....	169
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	173
KAYNAKLAR	175
ÖZGEÇMİŞ	182

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Basınç deney numuneleri için TS EN 1052-1 standardın kuralları	50
Tablo 2. Mikro basınç deney numunelerin kodlama düzeni	52
Tablo 3. Diyagonal kayma deneyinde kullanılan numunelerin detayı.....	66
Tablo 4. Kireç harcına ait basınç ve eğilmede çekme dayanımı.....	81
Tablo 5. Horasan harcına ait basınç ve eğilmede çekme dayanımı	82
Tablo 6. Kenetlerde kullanılan çeliğin mekanik özellikleri	83
Tablo 7. Zıvanalarda kullanılan çeliğin mekanik özellikleri	84
Tablo 8. Farklı zıvana çaplarına ait kayma gerilmeleri.....	86
Tablo 9. Mikro basınç deneyine ait özet tablo	103
Tablo 10. SWIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri	104
Tablo 11. SWIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri	108
Tablo 12. SWMLIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri	111
Tablo 13. DWMLIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri.....	114
Tablo 14. SWHIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri.....	118
Tablo 15. SWMHIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri	121
Tablo 16. DWMHIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri	124
Tablo 17. Duvar numunelere ait enerji tüketme kapasiteleri	130
Tablo 18. Diyagonal basınç deney numunelerin boyutları	135
Tablo 19. Diyagonal basınç deney sonuçları	157
Tablo 20. Nümerik modelde taşın elastik ve plastik davranışı	159

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kyklopien duvar örme yöntemi (Cyclopean masonry).....	2
Şekil 2. Atina Akropolü'nün tapınaklarına ait görüntüler.....	3
Şekil 3. Pentheon, Roma	3
Şekil 4. Kemer taşıyıcı sistemler.....	5
Şekil 5. Geleneksel çok katmanlı doğal taş duvarların kesiti.....	5
Şekil 6. Çok katmanlı duvarın kırılmaları.....	6
Şekil 7. Tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarın detayları (mm).....	7
Şekil 8. Doğrudan çekme deney düzeneği	12
Şekil 9. Sarsma tablası üzerinde serbest duran kolon deney düzeneği	18
Şekil 10. Standarda uygun olmayan deney numuneleri	20
Şekil 11. Küfeki taştan imal edilen numuneler	21
Şekil 12. Standarda uymayan basınç deney numuneleri	22
Şekil 13. İki eksenli deney düzeneği.....	23
Şekil 14. Basit kesime deney düzeneği.....	23
Şekil 15. Deney düzeneği.....	24
Şekil 16. Deney numuneleri (mm).....	24
Şekil 17. Deney düzeneği.....	25
Şekil 18. Deney düzeneği ve numune ebadı (birim: cm).....	27
Şekil 19. Çok katmanlı duvarların güçlendirilmesinde kullanılan paslanmaz çelik	30
Şekil 20. Farklı tabaka sayısına sahip numuneler	30
Şekil 21. Önerilen birim üçgen ve oluşturdukları tuğla birimleri	38
Şekil 22. Taşların kesilmesi ve basınç deneyi için hazırlanması	41
Şekil 23. Taşların basınç deney düzeneği	42
Şekil 24. Elastisite modülü deneyinde yükleme düzeni.....	43
Şekil 25. Elastisite modülü deney düzeneği.....	44
Şekil 26. Taşların eğilme deney düzeneği.....	45
Şekil 27. Kenet ve zıvana detayları (ölçüler mm ölçeğindedir) ve kesme deney düzeneği	48
Şekil 28. Taşlarda zıvana deliklerin açılması.....	49
Şekil 29. TS EN 1052-1 standardın önerdiği numune boyutu	50
Şekil 30. TS EN 1052-1 standardına uygun hazırlanan basınç deney numuneleri	51
Şekil 31. Mikro boyutlu basınç deneyi için numune dağılımı	52

Şekil 32. Basınç deney numunelerin imalat aşamaları.....	53
Şekil 33. Mikro boyutlu basınç deney düzeneği	54
Şekil 34. Kayma dayanımı ve iç sürtünme açısı	56
Şekil 35. Bireysel elemana bağlı olarak numune tipi.....	57
Şekil 36. Başlangıç kayma deney için hazırlanan numuneler.....	58
Şekil 37. TS EN 1052-3 Standardı ve deneysel çalışmada kullanılan deney düzenekleri	59
Şekil 38. Başlangıç kayma deney düzeneğindeki	59
Şekil 39. Deney düzeneğindeki araçların yerleşimi	63
Şekil 40. Makro boyutlu basınç deney düzeneği	63
Şekil 41. Diyagonal basınç deneyi için üretilen numune detayları	65
Şekil 42. ASTM E519’de önerilen V başlık ebatları	67
Şekil 43. ASTM E519’a uygun diyagonal numune platformu	68
Şekil 44. ASTM E519’a uygun diyagonal basınç deney düzeneği.....	69
Şekil 45. Yığılma yapılar için nümerik modelleme yöntemleri	72
Şekil 46. Derzlerin kırılma şekilleri (a) çekme kırılması, (b) ve (c) kayma kırılması	74
Şekil 47. Taşların basınç dayanımına ait gerilme – gerinim grafiği	78
Şekil 48. Taşların basınç dayanımı	78
Şekil 49. Taşların eğilmede çekme dayanımı	79
Şekil 50. Taşların yarmada çekme dayanımı	79
Şekil 51. Taşların elastisite modülü	80
Şekil 52. Kireç harcın basınç ve eğilmede çekme dayanımı.....	80
Şekil 53. Horasan harcın basınç ve eğilmede çekme dayanımı	82
Şekil 54. Kenetlerde kullanılan S235JR çeliğine ait gerilme – gerinim diyagramı	83
Şekil 55. Zıvanalarda kullanılan hasır çeliğine ait gerilme – gerinim diyagramı	84
Şekil 56. Optimum zıvana çapının belirlenmesi için hazırlanan numuneler	85
Şekil 57. Zıvana çapının yatay yüklere karşı davranışı.....	86
Şekil 58. Farklı zıvanalara ait maksimum kayma gerilmesi	87
Şekil 59. Farklı zıvanalara ait maksimum kayma kuvveti	87
Şekil 60. Kenet elemanlarının uygulanma biçimleri.....	88
Şekil 61. Kenetli ve kenetsiz basınç deneyleri.....	89
Şekil 62. Kenet elemanlarının basınç dayanımındaki etkisi	89
Şekil 63. SWC grubuna ait basınç kırılma şekilleri	91
Şekil 64. SWC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı.....	91

Şekil 65. SWLC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı	92
Şekil 66. SWLC grubuna ait basınç kırılma şekilleri.....	93
Şekil 67. SWMLC grubuna ait basınç kırılma şekilleri	94
Şekil 68. SWMLC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı.....	95
Şekil 69. DWMLC grubuna ait basınç kırılma şekilleri	96
Şekil 70. DWMLC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı	97
Şekil 71. SWHC grubuna ait basınç kırılma şekilleri	98
Şekil 72. SWHC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı.....	99
Şekil 73. SWMHC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı	99
Şekil 74. SWMHC grubuna ait basınç kırılma şekilleri.....	100
Şekil 75. DWMHC grubuna ait basınç kırılma şekilleri	101
Şekil 76. DWMHC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı.....	102
Şekil 77. Mikro boyutlu duvar tiplerine ait ortalama basınç dayanımı.....	102
Şekil 78. Mikro boyutlu duvar tiplerine ait ortalama maksimum kırılma yükü.....	103
Şekil 79. SWIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri	105
Şekil 80. SWIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi	105
Şekil 81. SWIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi	106
Şekil 82. SWIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi).....	106
Şekil 83. SWIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti).....	107
Şekil 84. SWLIS deney numuneleri.....	108
Şekil 85. SWLIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri.....	108
Şekil 86. SWLIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi.....	109
Şekil 87. SWLIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi.....	109
Şekil 88. SWLIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi)	110
Şekil 89. SWLIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti)	110
Şekil 90. SWMLIS deney numuneleri	111
Şekil 91. SWMLIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri.....	111
Şekil 92. SWMLIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi	112
Şekil 93. SWMLIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi	112
Şekil 94. SWMLIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi).....	113
Şekil 95. SWMLIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti).....	113
Şekil 96. DWMLIS deney numuneleri.....	114
Şekil 97. DWMLIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri	115
Şekil 98. DWMLIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi	115

Şekil 99. DWMLIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi.....	116
Şekil 100. DWMLIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi)	116
Şekil 101. DWMLIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti)	117
Şekil 102. SWHIS deney numuneleri	118
Şekil 103. SWHIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri	118
Şekil 104. SWHIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi	119
Şekil 105. SWHIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi	119
Şekil 106. SWHIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi)	120
Şekil 107. SWHIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti).....	120
Şekil 108. SWMHIS deney numuneleri.....	121
Şekil 109. SWMHIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri.....	121
Şekil 110. SWMHIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi.....	122
Şekil 111. SWMHIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi.....	122
Şekil 112. SWMHIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi)	123
Şekil 113. SWMHIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti)	123
Şekil 114. DWMHIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri.....	124
Şekil 115. DWMHIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi.....	125
Şekil 116. DWMHIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi	125
Şekil 117. DWMHIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi).....	126
Şekil 118. DWMHIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti).....	126
Şekil 119. Farklı duvar tiplerine ait karakteristik başlangıç kayma dayanımı	127
Şekil 120. Karakteristik başlangıç kayma dayanımına karşı gelen kayma kuvveti	127
Şekil 121. Farklı duvar tiplerine ait iç sürtünme açısı	128
Şekil 122. Enerji tüketme kapasitesi için düzenlenen gerilme – deplasman grafikleri.	129
Şekil 123. Duvar tiplerine ait ortalama enerji tüketme kapasitesi	130
Şekil 124. Makro boyutlu numunelerin düşey yük altında kırılma şekilleri.....	132
Şekil 125. Makro boyutlu numunelere ait gerilme – gerinim grafikleri	133
Şekil 126. Makro boyutlu numunelere ait düşey yük – deplasman grafikleri	133
Şekil 127. Makro boyutlu numunelere ait basınç dayanım.....	134
Şekil 128. Makro boyutlu numunelere ait elastisite modülü	134
Şekil 129. Yığma duvarların düşey ve yatay yüklerdeki ötelemeleri	136
Şekil 130. Bilineer yaklaşımın uygulama aşamaları	140
Şekil 131. Deney histeresisine bilineer yaklaşımının uygulanması	141
Şekil 132. SWLDT grubuna ait kırılma şekilleri	144

Şekil 133. SWLDT grubuna ait gerilme – gerinim grafiği	145
Şekil 134. SWLDT grubuna ait rijitlik ölçütleri	145
Şekil 135. SWHDT grubuna ait kırılma şekilleri.....	146
Şekil 136. SWHDT grubuna ait gerilme – gerinim grafiği.....	147
Şekil 137. SWHDT grubuna ait bilineer grafiği	147
Şekil 138. SWHDT grubuna ait rijitlik ölçütleri.....	148
Şekil 139. SWMDT grubuna ait kırılma şekilleri	149
Şekil 140. SWMDT grubuna ait şematik gerilme – gerinim grafiği.....	150
Şekil 141. SWMDT grubuna ait şematik gerilme – gerinim grafiği.....	150
Şekil 142. SWMDT grubuna ait düzeltilmiş gerilme – gerinim grafiği	151
Şekil 143. SWMDT grubuna numunelere ait düzeltilmiş gerilme – gerinim grafikleri	152
Şekil 144. SWMDT grubuna ait bilineer grafiği.....	152
Şekil 145. SWMDT grubuna ait rijitlik ölçütleri	153
Şekil 146. DWMDT grubuna ait kırılma türleri	154
Şekil 147. 4. gruptaki numunelere ait düzeltilmiş gerilme – gerinim grafikleri	155
Şekil 148. 4. gruba ait bilineer grafiği.....	156
Şekil 149. 4. gruba ait rijitlik ölçütleri	156
Şekil 150. Nümerik analizlerde kullanılan taşın basınç ve kesme davranışı	159
Şekil 151. Başlangıç kayma modelin oluşumu, mesnet, yük koşulları ve ağ düzeni....	160
Şekil 152. Başlangıç kayma deneyi ile nümerik analizin kıyaslanması.....	161
Şekil 153. Tek eksenli basınç modelin oluşumu, mesnet, yük koşulları ve ağ düzeni .	162
Şekil 154. Basınç deneyi ile nümerik analizin kıyaslanması	162

SİMGELER DİZİNİ

Simge	Açıklama
$(1 - D)$	D, hasar gelişim değişkenini
A_b	Mikro boyutlu duvarların başlangıç kayma deneyinde uygulanan basınç alanı (mm^2)
$A_{bilineer}$	Bilineer grafiğin altındaki alan (mm^2)
A_d	Makro duvar numunenin basınç alanı (mm^2)
$A_{histeresis}$	Deney histeresisin altında kalan alana (mm^2)
A_{md}	Mikro duvar basınç alanı (mm^2)
A_n	Diyagonal deneyde duvar numunesinin kayma enkesit alanını (mm^2)
b_b	Mikro boyutlu duvarın başlangıç kayma alanının kısa kenarı (mm^2)
b_h	Numune genişliği ve yüksekliğini (mm)
c	kohezyon olarak bilinen sıfır normal gerilme karşılık gelen kayma dayanımını (N/mm^2)
d	Yarmada çekme deneyinde numunenin yüksekliğini (mm)
E	Elastisite modülü (N/mm^2)
e	başlangıç kayma deneyinde silindir çelik mesnetlerin merkezinden, numunelerdeki derz merkezi arasındaki mesafe (mm)
E_d	Enerji tüketme kapasitesi (J)
$E_{d,giriş}$	Katı cisimler, belirli bir enerji girişi (J)
E_h	Harcın elastisite modülü (N/mm^2)
E_m	Makro duvar numunelerin elastisite modülü (N/mm^2)
E_{md}	Mikro duvar numunelerin elastisite modülü (N/mm^2)
E_t	Taşın elastisite modülü (N/mm^2)
F_b	Mikro boyutlu duvarların başlangıç kayma deneyinde uygulanan basınç kuvveti (N)
$F_{b,maks}$	Mikro boyutlu duvarın başlangıç kayma kuvveti (N)
f_{bo}/f_{co}	başlangıç eşeksenli basınç akma gerilmesinin başlangıç tek eksenli basınç akma gerilmesine oranı
f_c	Basınç dayanımı (N/mm^2)
F_{cr}	Diyagonal basınç deneyinde ilk çatlağı oluşturan kuvvet
f_{ct}	Numunenin yarmada çekme dayanımını (N/mm^2)
$F_{d,maks}$	Makro duvar numunenin maksimum basınç kuvveti (N)

F_e	Eğilme deneyinde nihai kırılma yükü (N)
F_i	Herhangi bir deplasmana karşı gelen kuvvet (N)
F_k	Çeliğin kesme dayanımı (N/mm ²)
F_{maks}	Maksimum diyagonal basınç yükü (N)
f_{maks}	karakteristik başlangıç kayma dayanımına karşı gelen kayma yükü (N)
f_{md}	Mikro boyutlu duvarların basınç dayanımı (N/mm ²)
$F_{md,maks}$	Mikro boyutlu duvarların maksimum basınç kırılma yükü (N)
F_u	Bilineer grafiğinde yatay doğrunun değeri (N)
f_{vok}	karakteristik başlangıç kayma dayanımı (N/mm ²)
F_y	Eğilme deneyinde nihai kırılma yükünü (N)
F_{yd}	Çeliğin akma dayanımı (N/mm ²)
g	Diyagonal basınç deneyinde yüklemeye paralel olan ipli potansiyometrenin ilk boyu (mm)
G_h	Harcın kayma modülü (N/mm ²)
G_t	Taşın kayma modülü (N/mm ²)
h	Diyagonal deney numunesinin yüksekliği (mm)
h_1 ve h_2	Kesme taşın yüksekliği (mm)
h_d	Zıvana deliğinin yüksekliği (mm)
h_{ef}	Yığma duvarın efektif yüksekliği (mm)
h_h	Harcın kalınlığı (mm)
h_s	Numunenin yüksekliği (mm)
h_u	Numunede bireysel elemanın yüksekliği (mm)
h_z	Zıvananın yüksekliği (mm)
K	Rijitlik
K	Elastik sertlik matrisi
K_e	Bilineer grafikteki ilk lineer çizginin eğimi
K_{mn}	Normal yönde duvar derzlerinin rijitliği
K_{ss}	Birinci kesme yönündeki duvar derzlerinin rijitliği
K_{tt}	İkinci kesme yönündeki duvar derzlerinin rijitliği
l	Eğilme deneyinde iki mesnet arasındaki mesafeyi (mm)
L	Dikdörtgen numunenin uzunluğu (mm)
l_b	Mikro boyutlu duvarın başlangıç kayma alanının uzun kenarı (mm)
l_s	Numunenin uzunluğu (mm)

l_u	Numunedeki bireysel elemanın uzunluğu (mm)
n	Bireysel elemanın katı olan brüt alanı
Ort. E_d	Ortalama enerji tüketme kapasitesi (J)
R_{tf}	Eğilme deneyinde numunenin eğilme dayanımını (N/mm ²)
S_{scr}	Kritik diyagonal kayma gerilmesi (N/mm ²)
S_{smaks}	Diyagonal kayma gerilmesi (N/mm ²)
t	Duvarın genişliği (mm)
$\tan \alpha_k$	Karakteristik iç sürtünme açısı (derece)
t_{bj}	Duvar numunesindeki derz kalınlığı (mm)
t_{ef}	Yığılma duvarın efektif genişliği (mm)
t_n^{maks}	Normal yöndeki duvar derzlerinde izin verilen maksimum çekme gerilmesi (duvar derzlerinin çekme dayanımı) (N/mm ²)
t_s	Numunenin kalınlığı
t_s	Birince kesme yönü boyunca duvar derzlerinde kayma gerilmesi (N/mm ²)
t_s^{maks}	Birince kesme yönünde duvar derzlerinde izin verilen maksimum kayma gerilmesi (duvar derzlerinin kayma dayanımı) (N/mm ²)
t_t	İkinci kesme yönü boyunca duvar derzlerinde kayma gerilmesi (N/mm ²)
t_t^{maks}	İkinci kesme yönünde duvar derzlerinde izin verilen maksimum kayma gerilmesi (duvar derzlerinin kayma dayanımı) (N/mm ²)
t_u	Numunedeki bireysel elemanın kalınlığı (mm)
w	Diyagonal deney numunenin uzunluğu (mm)
α	Açı (derece)
δ	Öteleme oranı
δ_{cr}	Kritik öteleme oranı
δ_i	Her hangi bir yüke karşı deplasman (mm)
δ_{maks}	Maksimum öteleme oranı
δ_{SD}	$3\delta_{cr}$ veya δ_{maks} öteleme oranlarına eş değer öteleme oranı
δ_u	Nihai öteleme oranı
δ_u	Akma öteleme oranı
Δl_b	Net deplasman (mm)
Δ_n	Normal yönde deplasman (mm)
Δ_s	Birinci kesme yönde deplasman (mm)
Δ_t	İkinci kesme yönde deplasman (mm)

Δx	X yönündeki uzama (mm)
Δy	Y yönündeki uzama (mm)
$\Delta \varepsilon$	Net birim şekil değiştirme
$\Delta \sigma$	Net gerilme (N/mm ²)
ε	Birim şekil değiştirme
ε_0	%20 gerilmeye karşı gelen birim şekil değiştirme
ε_d	Makro duvar numunelerde birim şekil değiştirme
ε_{md}	Mikro duvar numunelerde birim şekil değiştirme
ε_u	%1 gerilmeye karşı gelen birim şekil değiştirme
ε_{yd}	Çeliğin akma birim şekil değiştirmesi
λ	Narinliğe bağlı kapasite azaltma katsayısı
μ	Sürtünme katsayısı
μ_d	Süneklik katsayısı
ν	Poisson oranı
σ_0	%20 ortalama basınç gerilmeye karşı gelen gerilme (N/mm ²)
σ_b	Başlangıç kayma deneyinde düşey (normal) gerilme (N/mm ²)
σ_n	Normal gerilme (N/mm ²)
σ_m	Makro duvar numunelerin basınç dayanımı (N/mm ²)
σ_u	%1 ortalama basınç gerilmeye karşı gelen gerilme (N/mm ²)
τ	Kayma gerilmesi (N/mm ²)
τ_b	Başlangıç kayma gerilmesi (N/mm ²)
τ_{kritik}	Kritik kayma gerilmesi (N/mm ²)
\varnothing_d	Zıvana deliğinin çapı (mm)
\varnothing_z	Zıvananın çapı (mm)

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltma	Açıklama
3D	Üç boyutlu
AEM	(Applied Element Method) limit analizi ve uygulanan elemanlar yöntemi
C3D8R	Azaltılmış entegrasyona sahip sekiz düğümlü üç boyutlu eleman
CDP	(Concrete Damaged Plasticity) Abaqus paket programında bulunan betonun plastik kırılma modeli
DEM	(Discrete Element Method) ayrık elemanlar yöntemi
DWMDT	(Double Wall Metal Diagonal Tension) makro boyutlu çift katmanlı kireç + metal bağlantılı diyagonal basınç deney numunesi
DWMHC	(Double Wall Metal Khorasan Compression) mikro boyutlu çift katmanlı horasan harç + metal bağlantılı basınç deney numunesi
DWMHIS	(Double Wall Metal Khorasan Initial Shear) mikro boyutlu çift katmanlı horasan + metal bağlantı elemanlı başlangıç kayma deney numunesi
DWMLC	(Double Wall Metal Lime Compression) mikro boyutlu çift katmanlı kireç harç + metal bağlantılı basınç deney numunesi
DWMLIS	(Double Wall Metal Initial Shear) mikro boyutlu çift katmanlı kireç + metal bağlantı elemanlı başlangıç kayma deney numunesi
E	Elastisite Modülü
FEM	(Finite Element Method) sonlu elemanlar yöntemi
G	Kayma Modülü
K. S.	Katman sayısı
Ken. D.	Kenet durumu
KTO	Konya Ticaret Odası
LVDT	(Linear Variable Differential Transformer) Lineer Değişken Diferansiyel Transformatörler
MDWMLC	(Macro Double Wall Metal Lime Compression) makro boyutlu çift katmanlı kireç harç + metal bağlantılı basınç deney numunesi
MÖ	Milattan Önce
MSWC	(Macro Single Wall Compression) Makro boyutlu tek katmanlı harçsız basınç deney numunesi
MSWLC	(Macro Single Wall Lime Compression) Makro boyutlu tek katmanlı kireç harçlı basınç deney numunesi
MSWMLC	(Macro Single Wall Metal Lime Compression) makro boyutlu tek katmanlı kireç harç + metal bağlantılı basınç deney numunesi

N. Kodu	Numune kodu
Ort. Bas. Ger.	Ortalama Basınç Gerilmesi
Ort. Kay. Ger.	Ortalama Kayma Gerilmesi
Ort. Kay. Kuv.	Ortalama Kayma Kuvveti
Stan. Bas. Ger.	Standart Basınç Gerilmesi
SW3IS	(Single Wall 3 Initial Shear) mikro boyutlu tek katmanlı harçsız 3 mm'lik zıvana içeren başlangıç kayma deney numunesi
SW4IS	(Single Wall 4 Initial Shear) mikro boyutlu tek katmanlı harçsız 4 mm'lik zıvana içeren başlangıç kayma deney numunesi
SW5IS	(Single Wall 5 Initial Shear) mikro boyutlu tek katmanlı harçsız 5 mm'lik zıvana içeren başlangıç kayma deney numunesi
SW6IS	(Single Wall 6 Initial Shear) mikro boyutlu tek katmanlı harçsız 6 mm'lik zıvana içeren başlangıç kayma deney numunesi
SWC	(Single Wall Compression) mikro boyutlu tek katmanlı harçsız basınç deney numunesi
SWDT	(Single Wall Diagonal Tension) makro boyutlu tek katmanlı kireç harçlı diyagonal basınç deney numunesi
SWHC	(Single Wall Khorasan Compression) mikro boyutlu tek katmanlı horasan harçlı basınç deney numunesi
SWHDT	(Single Wall Khorasan Diagonal Tension) makro boyutlu tek katmanlı horasan harçlı diyagonal basınç deney numunesi
SWHIS	(Single Wall Khorasan Initial Shear) mikro boyutlu tek katmanlı horasan harçlı başlangıç kayma deney numunesi
SWIS	(Single Wall Initial Shear) mikro boyutlu tek katmanlı harçsız başlangıç kayma deney numunesi
SWLC	(Single Wall Lime Compression) mikro boyutlu tek katmanlı kireç harçlı basınç deney numunesi
SWLIS	(Single Wall Lime Initial Shear) mikro boyutlu tek katmanlı kireç harçlı başlangıç kayma deney numunesi
SWMDT	(Single Wall Metal Diagonal Tension) makro boyutlu tek katmanlı kireç + metal bağlantılı diyagonal basınç deney numunesi
SWMHC	(Single Wall Metal Khorasan Compression) mikro boyutlu tek katmanlı horasan harç + metal bağlantılı basınç deney numunesi
SWMHIS	(Single Wall Metal Khorasan Initial Shear) mikro boyutlu tek katmanlı horasan + metal bağlantı elemanlı başlangıç kayma deney numunesi
SWMLC	(Single Wall Metal Lime Compression) mikro boyutlu kireç harç + metal bağlantılı basınç deney numunesi

SWMLIS	(Single Wall Metal Lime Initial Shear) mikro boyutlu tek katmanlı kireç + metal bağlantı elemanlı başlangıç kayma deney numunesi
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
Uyg. Bas. Ger.	Uygulanan Basınç Gerilmesi

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun varoluşundan bu yana en temel ihtiyaçlarından biri barınmadır. Yerleşik düzene geçmeden önce bu ihtiyaç, doğal yapılar (mağaralar, ağaç kovuğu, vb) kullanılarak gidermiştir. Yerleşik düzene geçildikten sonra artan ihtiyaçlar ve dış etkilere ve tehditlere karşı güvenliğini korumak için kalıcı barınaklar inşa edilmeye başlamıştır. Böylelikle insanlar tarih boyunca dış etkilere ve doğal afetlere karşı uzun yıllar ayakta durabilen yapıların inşa etme tekniklerini ve bunların inşasında kullanılan malzeme çeşitliliğini artırmıştır. Bu gelişmeler yerleşik düzenin temelini oluşturan yığma yapıların inşası ile başlamış, günümüz dünyasının her türlü ihtiyacını karşılayan binaların, özellikle gökdelenler gibi yüksek, sağlam ve ihtişamlı yapıların, inşası için yeni tekniklerin keşfedilmesiyle devam etmiştir.

İlk çağlardan bugüne insanlar, barınakların inşasında sadece inşaat tekniklerinin geliştirilmesi ile yetinmemiş, sosyolojik, ekonomik, politik ve dini inançlarını simgeleyen, bilgi düzeylerini gösteren ve kurdukları medeniyetlerin ihtişamını yansıtan eserlerin üretilmesinde de gayret göstermiş ve bunu da başarılı bir şekilde uygulamıştır. Günümüzde eski medeniyetlere ait halen ayakta olan bu eserlerden örnekler vardır ve birer kültür mirası olarak korunmaktadır. Söz konusu miras genellikle yığma yapılardan oluşmakta ve bunların arasında en çok taş binalar yer almaktadır.

Yığma yapılar günümüzdeki yapı stokunun hala önemli bir kısmını teşkil etmektedir. Bu yapıların en eskisi yaklaşık 8000 yıllık bir geçmişe sahiptir. Bu yapıların gelişim süreci ise, büyük ve kabaca oyulmuş taşların kuru ve harçsız olarak üst üste konulması ile başlamıştır. Şekil 1’de örneği verilen bu tip yapılara literatürde “kyklop duvar örgüsü” (cyclopean masonry) adı verilmiştir. Klasik çağ döneminde işçiliğin gelişimi ile duvarlar ve iskelelerin inşasında pürüzsüz yüzeye sahip düzgün şekillendirilmiş taşlar kullanılmaya başlanmış ancak duvarlar harçsız olarak örülmüştür. Bu tekniğin kullanımının, Atina Akropolü'nün tapınaklarında ve daha sonra Roma’da Kolezyum yapımında kullanıldığı görülmüştür. Şekil 2’de Atina Akropolü’nün tapınaklarına ait görüntüler verilmiştir.

Dünyanın diğer bazı bölgelerinde ise süreç biraz farklı gelişmiştir. Örneğin Mezopotamya’daki inşaatlarda kullanılacak uygun taşların eksikliğinden dolayı duvarların inşası için yapay bireysel elemanların üretimi geliştirmiştir. Bu elemanlar

günümüzde kerpiç olarak bilinen çamurdan üretilip güneşte kurutulmuş yapı elemanlarıdır. Kerpiç gevrek yapısı ve dayanıksızlığı ile uzun vadede güven vermediği için yeni yapı elemanların geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Böylece günümüzde de kullanılan ateş tuğlasının (harman tuğla) üretimi gelişmiştir (Como, 2015).



Şekil 1. Kyklopien duvar örme yöntemi (Cyclopean masonry)

(Kaynak: (Medley ve Zekkos, 2007; Sepehr, 2014))

Yığılma duvarlarda harç olarak bağlayıcı malzemelerin kullanımı da çok eskilere dayanmaktadır. Tarih boyunca çeşitli malzemeler harç olarak kullanılmıştır. İlk harç çamur ve kilin karışımından üretilmiş ve zaman içerisinde Mısırlılar bu karışımda bağlayıcı olarak alçıyı, Persler ise bitümü ilave etmişlerdir. Kirecin Etrüskler tarafından keşfedilmesi, duvar teknolojisinin gelişiminde temel dönüm noktası olmuştur. Daha sonraları kireç taşı yakıldığında ve su ile birleşince zaman içinde dayanım kazandığı da keşfedilmiştir. Harçların gelişimi bunlarla bitmeyip zaman içerisinde puzolan ve uçucu küllerin kullanımı gibi iyileştirme çabaları günümüze kadar devam etmiştir (Como, 2015).

Bağlayıcı elemanlardaki en önemli gelişmelerden bir diğeri ise 18. yüzyıldaki çimentonun keşfidir. Her ne kadar ilk çimentonun Romalılar tarafından kullanıldığı düşünülse de günümüzde kullanılmakta olan çimento John Aspdin adlı bir İngiliz duvarcı tarafından bulunmuş ve Portland'daki taşlara benzediğinden dolayı "Portland Çimentosu" adını vermiştir (Ersoy ve Özcebe, 2001).



Şekil 2. Atina Akropolü'nün tapınaklarına ait görüntüler

(Kaynak: (Minollari, 2017))

Son zamanlarda yapı teknolojisinin gelişmesiyle betonarme/çelik gibi yapı malzemeleri ön plana çıkmış, bunun sonucunda da yığma yapı uygulamaları, genellikle ekonomik düzeyi düşük kırsal bölgelerle sınırlı kalmıştır. Yürürlükte olan yönetmelikler yığma yapıların depreme karşı dayanıklı olabilmesi için düşey ve yatay betonarme hatıl gibi elemanlarla güçlendirilmesini istemektedir. Tarih boyunca dayanıklılık, ihtişam ve güç simgesi olan doğal kesme taş, artık binalarda taşıyıcı özelliği ile değil belki sadece dekoratif amaçlar için kullanılmakta ve betonarme-çelik gibi modern yapı malzemelerden oluşan binalara ihtişam ve sanatsal bir görüntü sunmaktadır. Dekoratif olarak kullanılan bu taşlar uygulama hatalarından dolayı düşük şiddetli depremlerde bile ciddi hasarlar alarak kırılmaya ve cephelerden ayrılmaya maruz kalmaktadır.



Şekil 3. Pantheon, Roma

(Kaynak: (Ranogajec, 2015))

Modern kompozit yapı malzemelerinden oluşan betonarme yapılar her ne kadar düzlem içi ve düzlem dışı yüklere karşı dayanıklı, ekonomik, tasarımı ve uygulanması kolay olsa da ömürleri taş binalar kadar uzun değildir. Bunun sebebi ise betonarme binalarda kullanılan malzemelerin ömrünün uzun olduğu, ancak çevresel olumsuz etkilerin

betonarme binaların ömrünü kısalttığı bilinmektedir. Bu da maliyetli onarımlara ve günlük hayat düzeninin bozulmasına yol açmaktadır. Tarihi yapılar incelendiğinde Pentheon (Şekil 3) gibi servis ömrü neredeyse 2000 yılı aşkın binaların inşaatında betonun kullanıldığı kabul edilse de günümüzde kullanılan yönetmeliklerde betonarme binalar için tasarım ömrü genellikle 70 – 100 yıl olarak düşünülmektedir. Bunun sebebi ise hem ekonomik şartlar hem de servis ömrü boyunca betonarme binanın performansının göz önünde bulundurulmasıdır (Noyce ve Grevello, 2016).

Diğer taraftan günümüzde tarihi miras niteliğindeki yığma yapılara bakıldığında, birçok doğal kesme taştan oluşan binalar görülebilmektedir. Bunun temel sebebi doğal kesme taştan yapılmış binalar, çevrenin olumsuz etkilerinden betonarme binalar kadar etkilenmeden uzun yıllar ayakta kalabilmektedir.

Yığma binalarda, yatay ve düşey yükler döşeme ve taşıyıcı duvarlar tarafından temele aktarılmaktadır. Taşıyıcı duvarların kalınlıkları bu yüklere göre belirlenmektedir. Taş duvarlarda kullanılan taş ve harçlar gevrek elemanlar olduğundan, yığma binalar düşey yüklere karşı yeterli kesit alanıyla dayanıklı ama yatay yüklere karşı zayıftır. Bundan dolayı tarih boyunca bu tip taşıyıcı sistemlerin tasarımı sırasında çekme gerilmelerine maruz kalmaları, olabildiğince ya en aza indirilmiş ya da hiç maruz kalmaması için değişik sistemler geliştirilmiştir. Buna örnek; büyük açıklıkları geçebilmek için geliştirilen kemer sistemlerdir (Şekil 4).

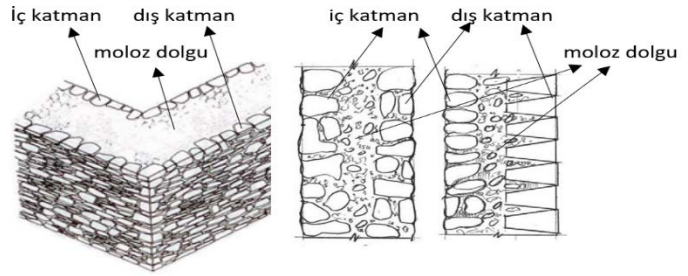
Doğal taştan inşa edilmiş taşıyıcı duvarların bir başka sorunu da düşük kayma gerilme dayanımıdır. Tarihi yapılar incelendiğinde, bu sorunu çözmek için duvar kesitlerinin artırılması yoluna gidildiği görülmektedir. Oysaki duvarların kalınlıklarının artırılması ile bazı yeni sorunlar da ortaya çıkmaktadır. Bunlar; duvarların binanın oturma alanında fazla yer işgal etmeleri, duvarda düzgün kesilmiş bireysel elemanlar kullanıldığında ekonomik olmaktan çıkması, binanın toplam ağırlığının artırması ve bununla birlikte binaya gelen deprem yükünün artırılması olarak sayılabilir. Tarihi yapılara bakıldığında bu sorunların ortadan kaldırılması için çok katmanlı duvar sistemlerinin ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 4. Kemer taşıyıcı sistemler

(Kaynak: (Çelikkollu, 2015))

Çok katmanlı duvarlar birçok medeniyet tarafından kullanılmıştır. Bu duvarlar genellikle üç katmandan oluşmaktadır. İç ve dış katmanda düzgün kesilmiş bireysel elemanlar kullanılırken orta katman taş ve harcın karışımından meydana gelen moloz ile doldurulmak suretiyle inşa edilmiştir. Bu tip duvarlara opus caementicium adı verilmiştir. Bunlar özellikle Roma, Bizans ve Osmanlı İmparatorlukları dönemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Bu tekniğin kullanıldığı tarihi yapıların sayısı ülkemizde oldukça fazladır. Muğla Karapaşa Medresesi, Muğla Yelli Camisi, İzmir Tire Çanakçı Mescidi, Niğde Hüsamettin Camisi, İzmir Tire Hafsa Hatun Camisi, Manisa Yedi Kızlar Türbesi, İzmir Tire Gucur Camisi, Kütahya Küçük Bedesten ve Topkapı Sarayı İkinci Avlusu gibi tarihi yapıları örnek olarak verebiliriz (Doğu, 2010). Şekil 5’te çok katmanlı duvarların kesiti ve uygulaması şematik olarak verilmiştir.

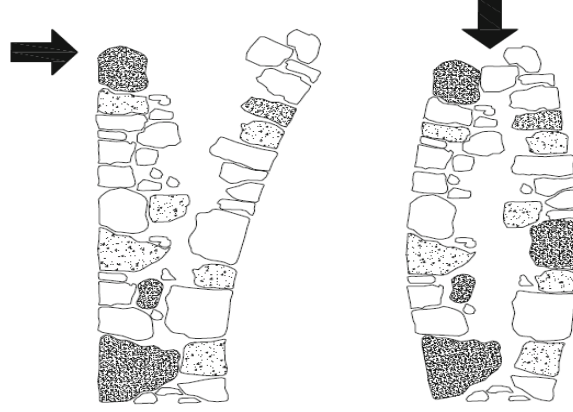


Şekil 5. Geleneksel çok katmanlı doğal taş duvarların kesiti

(Kaynak: (Bothara ve Brzev, 2011; Doğu, 2010; Leasca, 2017))

Çok katmanlı duvarlarda, iki dış katmanı birbirine bağlamak ve duvarın bütünselliğini sağlamak amacı ile kullanılan moloz dolgu tek başına, mekanik özelliğinden dolayı yeterli değildir. Bu sebepten dolayı çok katmanlı duvarların kırılmaları, gevrek kırılma

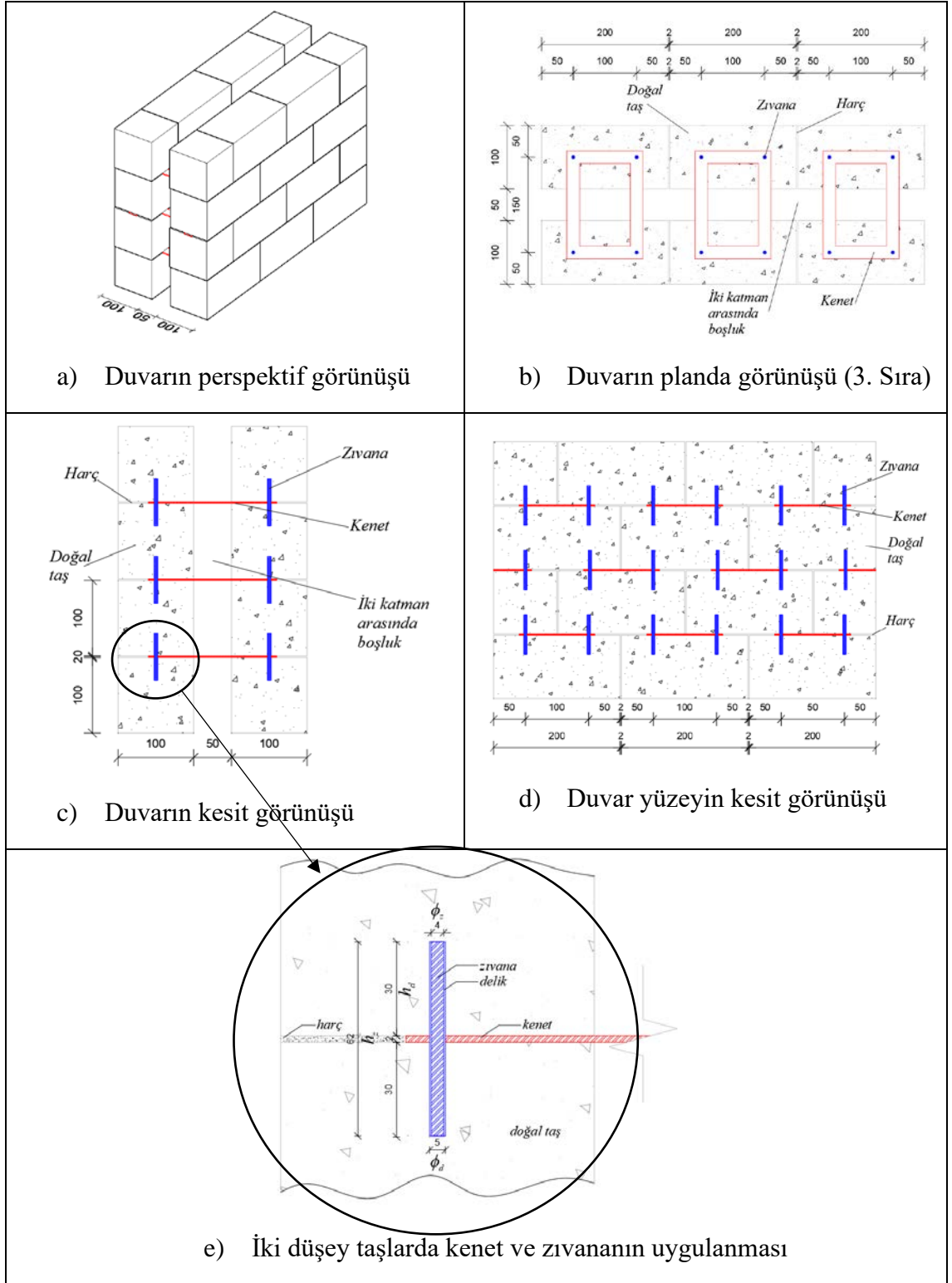
türü ile karakterize edilmektedir. Kırılma sırasında duvarın maruz kaldığı düzlem dışı ve düzlem içi aksenal ve kayma gerilmelerinden ötürü orta katmandaki bağlayıcı malzemenin yetersiz oluşundan, dış katmanlar birbirinden ayrılarak duvarın düzlem dışı patlamasına yol açmaktadır (Silva ve ark. 2008). Şekil 6’da klasik çok katmanlı duvarların yüklemeye altındaki kırılma türleri verilmiştir.



Şekil 6. Çok katmanlı duvarın kırılmaları

(Kaynak:(Corradi ve ark. 2017))

Bu tez çalışmasında, günümüzdeki yapı teknolojisine uygun ve doğal malzemelerden olan kesme taşı kullanılarak şehir kimliği taşıyan, sanatsal ve tarihi nitelik barındıran uzun ömürlü doğal taş binalar için yeni bir taşıyıcı duvar tasarlanmıştır. Bu taşıyıcı duvarlar çok katmanlı duvarlardan esinlenilmiş, güvenli, konforlu ve ekonomik şartları sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarların yük transfer mekanizması geleneksel çok katmanlı duvarlardan farklı olduğundan, tez kapsamında bu duvarların düzlem içi davranışı incelenmiştir. Şekil 7’de detaylı olarak gösterilen bu duvar, arasında boşluk bulunan, iç ve dış olmak üzere, iki katmandan oluşmaktadır. Duvarın bütünselliğini sağlamak amacı ile her taş ve her katman metal kenet ve zıvana bağlantı elemanlarıyla birbirine bağlanmıştır. Kenet ve zıvanalardan oluşan bu metal bağlantı elemanlarının iki görevi vardır. İlk görevi iki katmanı birbirine bağlamak ve duvarın bütünselliğini sağlayarak düzlem içi ve düzlem dışı yüklere karşı stabiliteyi artırmaktır. İkinci görevi ise her katmandaki bireysel taşları düşey ve yatay yönde birbirine bağlamaktır. Böylelikle duvar tek parça çalışarak deprem gibi yatay yüklere karşı daha dayanıklı hale getirilerek ve binadaki yatay deplasmanların sınırlandırılması hedeflenmiştir.



Şekil 7. Tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarın detayları (mm)

Bu çalışma ile tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarların deneysel verilerle uygulanabilirliğinin kanıtlanması amaçlanmıştır. Böylece modern yapılarda Türkiye'nin zengin olduğu doğal taşların kullanılmasının sağlanması ve dolayısıyla ülke ekonomisine

katkıda bulunulması hedeflenmektedir. Buna ek olarak ülkemizdeki mevcut bina yönetmelikleri için bazı revizyon önerilerinin sunulması ve kültürel mirasa uygun binaların inşa edilebilmesinin önünün açılması da hedeflenmektedir. Bu bağlamda tez kapsamında tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarların bazı avantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Orta katmanın boş bırakılması ile binanın ağırlığı azalmakta ve bununla birlikte binaya gelen deprem yükünün azalması sağlanmaktadır.
- Binadaki mekanik ve elektrik tesisat, boş bırakılan orta katmanda yerleştirileceğinden doğal taş duvarların ihtisamlı iç ve dış görünüşleri bozulmamaktadır.
- Boş bırakılan iç katmanda yalıtım uygulaması ile taş binanın ses ve ısı problemi ortadan kaldırılmakta, günümüzdeki modern bir yapının sunduğu konfor sağlanmaktadır.
- Duvar kesitinde kullanılan geometri (içi boş çok katmanlı) ile daha az duvar genişliğiyle daha fazla atalet momenti elde edilmekte böylelikle duvar, düzlem içi ve düzlem dışı yüklere karşı dayanıklı hale getirmektedir.
- Doğal taş yeniden inşaat sektöründe taşıyıcı bir bireysel eleman olarak kazandırılarak ülke ekonomisine katkı sağlamaktadır.

Tez kapsamında ayrıntılı deneysel çalışmalar yürütülmüş, tasarlanan duvarın düzlem içi davranışı araştırılmıştır. Deneysel çalışma sırasında mevcut yönetmelikte uygulanması yasak olan hususlara özellikle dikkat edilmiş ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Bu hususlar aşağıda sıralanmıştır.

- Eurocode 6'da doğal kesme taş duvarlarda ince harç kullanılmasına müsaade edilmiştir. Ancak TBDY, (2018)'de ince harç kullanılamaz ibaresi kullanılmıştır (TBDY 2018, Tablo 11.3). Bu mesele hakkında deneysel olarak bir fikir edinmek ve öneride bulunmak için duvarlarda özellikle TBDY, (2018), Tablo 11.2'de tanımlanan ince harç tercih edilmiş ve tasarlanan duvarın yük transfer mekanizmasındaki etkisi araştırılmıştır.
- TBDY 2018, 11.5 maddesine göre taş binalarda yatay ve düşey betonarme hatıl yapılmadan geniş duvarların projelendirilmesine izin verilmemektedir (TBDY,

2018). Doğal taş gibi bir malzemeden inşa edilen binada betonarme hatılların varlığı binanın estetiğini bozmaktadır. Bu duvarının düzlem içi davranışı deneysel olarak incelendikten sonra gerekli önerilerde bulunulmuştur.

Özetle; tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarlarla inşa edilen yapı sistemi ile doğal kesme taştan inşa edilmiş binaların yeniden canlandırarak, bu ülke ve coğrafyanın geçmişi ile iyi harmanlanmış anıtsal eser kimliğinde, özgün ve ekolojik mimariye sahip binaların inşa edilebilmesinin yolunun açılması bu tezin ana amacıdır. Bu amaca ulaşabilmek için tasarlanan duvarların mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiş ve nümerik analizi yapılmıştır.

Duvarların mekanik özellikleri belirlenmeden önce kapsamlı literatür araştırması yapılmış ve deneysel çalışmalar için planlamalar hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında önce duvarda kullanılan bireysel elemanların (taş, harçlar ve bağlantı elemanları) mekanik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra iki aşamada mikro ve makro boyutta ilgili standartlara uygun duvar numuneleri üretilmiş ve deneye tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmalarla birlikte duvarın nümerik modeli Abaqus paket programında mevcut literatür çalışmaları dikkate alınarak yapılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tez kapsamında tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarın mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için akademik çalışmaların incelenmesi oldukça önem arz etmektedir. Bunun sebebi ise incelenen çalışmalar ışığında yapılacak deney yöntemlerinin, varsa ilgili standartların ve nümerik analiz aşamalarının belirlenmesi, çalışmanın amacına ulaşılmasını sağlamaktadır. Günümüzdeki yapı stoku incelendiğinde yığma yapılar bu stokun önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu yapıların bir çok türü olup bunlar ayrı ayrı kategorilerde incelenebilmektedir. Örneğin, binaları oluşturan malzemeler (taş, tuğla, kerpiç vb.), kat adedi, kat yüksekliği, yapım tekniği gibi bir çok farklı kategori sayılabilir. Günümüzdeki yapı teknolojisi bilimsel ve teknolojik ilerlemelere rağmen bu binalar hala birçok araştırmaya konu olmaktadır. Bunun sebebi ise tarihi nitelik taşıyan çoğu yapı yığma bina kategorisinde girmekte ve bunlar ülkelerin kültürel mirasını simgelediği için korunması ve bakımı devletler için önem taşımaktadır.

Yapılan literatür araştırması sonucunda taşıyıcı olarak kullanılan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların daha önce herhangi bir çalışmaya konu edilmediği görülmüştür. Bu sebeple, araştırılan alanı daraltmak ve amaca uygun bilgileri toplamak için özellikle yığma binalarda taşıyıcı duvarların düzlem içi mekanik davranışlarının belirlenmesini konu alan çalışmalar incelenmiştir.

Literatürün incelenmesine, yayınlandığı tarihten önceki son 20 yılda yığma yapılar üzerine yapılan araştırmaların özetlendiği, 1992 yılında Avrupa Birliği Komisyonu tarafından yayınlanan rapor ile başlanmıştır. Bu raporda, çok eski bir yapı türü olmasına rağmen yığma yapıların davranışı hakkında çok az bilginin olduğu ve bu eksikliğin giderilmesi için 20 yıl içerisinde deneysel, analitik ve nümerik başlıkları altında toplanabilecek çok sayıda araştırmanın gerçekleştirildiği görülmüştür. Rapor, basit harç ve duvar elemanları arasındaki etkileşimi konu alan çalışmalar ile başlayıp, küçük ölçekli bireysel duvarların deprem davranışından, 1/1 ölçekli yığma binaların deprem davranışını inceleyen kompleks çalışmalara kadar bir çok konuyu ihtiva etmektedir. Ayrıca bu çalışmaların bazılarının sonuçları Eurocode 6 ve 8'de de yer almıştır. Raporda ilk olarak yığma duvarların düzlem içi davranışını belirlemek için mevcut deney sistemleri, yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Daha sonra duvarların elastisite modülü, kırılma kriterleri ve gerilme – gerinim (birim şekil değiştirme) ilişkileri ele alınmıştır. Ayrıca yığma yapılarda

kullanılan malzemelerin anizotrop olduğu bir kaç farklı kaynaktan faydalanılarak incelenmiştir. Son olarak deneysel çalışmalara dayalı bir kaç farklı analitik modelin numerik uygulamaları sunulmuştur (Commission, 1992).

Literatür taraması üç ana başlık altında ele alınmış ve tarama sonucunda elde edilen bilgilerden yola çıkılarak materyal ve yöntem bölümünde açıklanan deneysel ve teorik çalışmalar için araştırma konuları belirlenmiştir.

- Taş duvarlarda kullanılan bireysel malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan akademik çalışmaların incelenmesi.
- Taş duvarların düzlem içi mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan akademik çalışmaların incelenmesi.
- Taş duvarların nümerik analizini içeren (sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi) akademik çalışmaların incelenmesi.

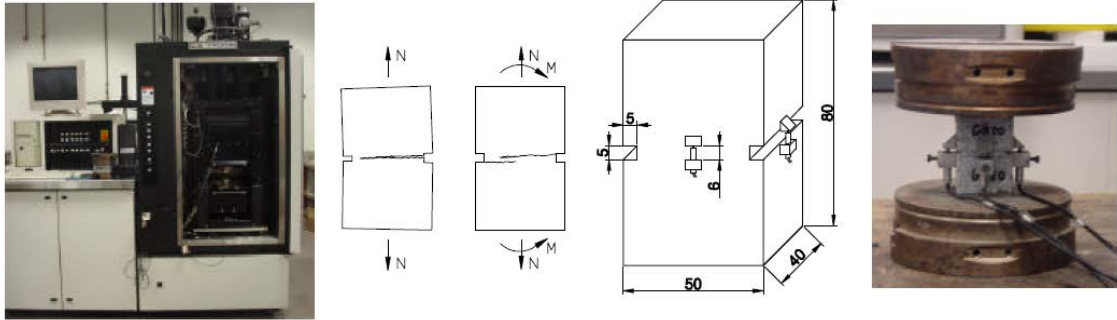
2.1. Bireysel Elemanlar

2.1.1. Doğal Taş (Mayra Bej)

Taşların sadece mekanik özelliklerini inceleyen akademik çalışmalar oldukça nadirdir. Genellikle bu konu kapsamlı çalışmaların küçük bir parçasını teşkil etmektedir. Buna rağmen literatürde bu konu ile ilgili bazı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda taşların mekanik özelliklerinin yanı sıra fiziksel özelliklerinin belirlenmesine de yer verildiği görülmüştür.

Vasconcelos, Graça F.M. (2005) doktora tezinde granit taşların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için deplasman kontrollü çekme ve basınç deneyleri yapmıştır. Deneylerle granit taşların elastisite modülü ve kırılma yükleri elde edilmiş ve bu parametreler arasında istatistiksel korelasyonlar kurulmuştur. Tezdeki çalışmalar bunlarla sınırlı olmayıp gerilme – gerinim grafikleri detaylı olarak irdelenmiştir. Deneysel çalışmada farklı bölgelere ait ve tane çapı değişen bir kaç çeşit granit taşı seçilmiştir. Çekme deneylerinde doğrudan çekme deney (direct tensile tests) yöntemi kullanılmış ve deneyler için 50 x 40 x 80 mm (genişlik x uzunluk x yükseklik) boyutunda numuneler hazırlanmıştır (Şekil 8). Granitlerin basınç dayanımlarının belirlenmesi için ASTM D2938 (1986) standardı ve Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu (ISRM) tarafından

belirlenen şartlar dikkate alınmıştır. Bu deneyler için 75 mm çapında ve boy/çap oranı yaklaşık 2 olan numuneler hazırlanmıştır. Basınç dayanımı belirlendikten sonra gerilme – gerinim diyagramları çizilerek granitlerin elastisite modülü ve poisson oranı da belirlenmiştir (Vasconcelos, 2005).



Şekil 8. Doğrudan çekme deney düzeneği

(Kaynak: (Vasconcelos, 2005))

Civan, M.A. (2006) yüksek lisans tezinde Niğde şehir içi yollarında kullanılan beton bordür yerine andezit bordür taşının kullanılmasını önermiş ve bunun avantajlarını deneylerle göstermiştir. Deneysel çalışma kapsamında laboratuvarında ve arazide Schmidt çekici deneyi, nokta yükü dayanım indeksi deneyi, Brezilya deney yöntemiyle kayaçların çekme dayanımının tayini, tek eksenli basınç dayanımı deneyi, porozite ve boşluk oranı tayini, ağırlıkça ve hacimce su emme deneyi, sodyum sülfat don kaybı deneyi ve los angeles aşınma oranı deneyi gerçekleştirmiştir., Ekonomik açıdan analizler yaparak andezit bordür taşlarının kullanımının daha uygun olduğunu ileri sürmüştür (Civan, 2006).

Binda, L. ve ark. (2006)'nın çalışmalarında çok katmanlı taş duvarların yük transfer mekanizması araştırılmıştır. Çalışmada önce, kullanılan taşların mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Fiziksel özellikler kapsamında taşların özgül ağırlığı ile gözenek yapıları EN 772-4 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Bu deneylerde her taş için 80 mm çapında ve 145 mm yüksekliğinde 6 adet numune hazırlanmıştır. Daha sonra numuneler taşların basınç dayanımının belirlenmesi için de kullanılmıştır. Basınç deneyleri için EN 772-1 standardı referans olarak alınmıştır. Taşların çekme dayanımı RILEM CPC6 yönetmeliğine uygun olarak yapılmıştır (Binda ve ark., 2006).

Oliveira, D. V. ve ark. (2006) çalışmalarında tarihi yapılarda kullanılan taş ve tuğlaların mekanik davranışlarını monotonik ve tersinir tekrarlanır tek eksenli yükleme altında araştırmıştır. Deneylede Barcelona’da kullanımı yaygın olan “Montjuic stone” isimli kum taşından numuneler alınmış ve iki türde hazırlanmıştır. İlki tek parça halinde ve $\text{Ø}50 \times 120$ mm (çap x yükseklik) boyutunda ikincisi ise değişik parçalardan oluşan prizma şeklindedir. Aynı deneyler farklı ölçülere sahip tuğlalar için de yapılmıştır. Sonuç olarak taşların yüksek basınç dayanıma sahip oldukları ve belirgin gevrek kırılma sergiledikleri ve tersinir tekrarlanır yükleme altında rijitlik azalmasının, dayanımın pik noktalarında gerçekleştiği gözlenmiştir. Deneylede deplasmanların ölçülmesi için gerinim ölçer (strain gauge) ve potansiyometre cetvelleri (LVDT) kullanılmış ve elastisite modülünün belirlenmesinde bu iki ölçme cihazından alınan verilerin kullanılabilirliği ortaya konulmuştur. Taş prizma şeklinde kullanılan bireysel taşlar arasında harç olmadığı için silindir numunelere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Taşlar için elastisite modülünün belirlenmesi, silindir ve prizma numunelerinde aynı olup maksimum gerilmenin (%30 - %60) aralığında olduğu ve tuğla için bu oranın (%30 - %70) civarında olduğu görülmüştür (Oliveira ve ark., 2006).

Gökçen, C. (2007) yüksek lisans tezinde tarihi süreçte atmosferik şartların ve hava kirliliğinin taş yapılar üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmanın amacı ise kentlerdeki taş binaları oluşturan duvarların ana bileşeni CaCO_3 (Kalsiyum Karbonat: kireç taşı) olan doğal yapı taşlarında atmosferik kirleticilerin etkisi altında oluşan yıpranmalar incelemiştir. Çalışmada, İstanbul tarihi yarımada sınırları içerisinde bulunan, yapı malzemesi kireç taşı olan Köprülü Medresesi ve Köprülü Kütüphanesi’nin çeşitli cephelerinden dökülen parçalardan örnekler alınarak bir çok deneye tabi tutulmuştur. Hava kirliliği nedeniyle kireç taşında oluşan bozulmayı incelemek için laboratuvar ortamında çeşitli analizler yapılmıştır. Bu kapsamda, nem analizi, organik madde tayini, taş mineralojisini belirlemek amacıyla XRD analizi, yapı taşının majör oksitlerini belirlemek için XRF analizi gibi bir çok analiz yapılmıştır. Analizlerin sonucunda kentlerdeki hava kirliliğinin tarihi yapılarda, özellikle taş yapılar üzerinde olumsuz etkileri olduğu ifade edilmiştir (Gökçen, 2007).

Kaygısız, H. (2010) yüksek lisans tezinde Kayseri yöresindeki bazı tüf ve bazalt kayaçlarının fiziko-mekanik özelliklerini belirlemiş ve bu kayaçlara ait korelasyon katsayılarını hesaplamıştır. Çalışma sonucunda elde edilen değerler, ilgili TS

standartlarındaki sınır değerleriyle karşılaştırılmış ve yapıtaşı olarak kullanılabilirliği ortaya koyulmuştur (Kaygısız, 2010).

Arık, S. (2011) yüksek lisans tezinde Finike (Antalya) bölgesindeki mermerlerin jeolojik, mineralojik-petrografik ve jeokimyasal özelliklerini araştırmıştır. Bölgedeki mermerlerin fiziko-mekanik özelliklerini belirlemek için deneyler yapılmış, ilgili standart ile karşılaştırılmış ve kullanım alanları belirlenmiştir. Bunlara ek olarak, inşaat sektöründe, çeşitli atmosferik koşulların yapı ve kaplama malzemesi olarak kullanılan mermerler üzerindeki etkileri araştırılmıştır (Arık, 2011).

García, D. ve ark. (2012) çalışmalarında kumtaşının mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Çalışmada iki çeşit kumtaşı kullanılmıştır. Taşların basınç dayanım deneyleri UNE EN 1926:2007'ye uygun olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı için numuneler 50 mm çapında ve 115 – 150 mm arasında değişen yüksekliğe sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Çalışmada, elastik modülünden bahsetmenin doğru olmadığı ama buna rağmen gerilme – gerinim grafiğinin ilk kısmının doğrusal olduğu ve bu doğrusal kısımdan elastisite modülünün tahmin edilebilirliği ifade edilmiştir. Taşların çekme dayanımı UNE 22950-2 standardına uygunluğu yarmada çekme dayanım deneyi ile belirlenmiştir. Basınç deneyinde olduğu gibi bu deneyde de aynı numune ölçüleri kullanılmıştır (García ve ark., 2012).

Demir, C. (2012) doktora tezinde deneysel çalışmalarda kullanılan küfeki taşların mekanik özelliklerini belirlemiştir. Çalışmada taşın basınç dayanımı, elastisite modülü, poisson oranı ve eğilmede çekme dayanımı belirlenmiştir. Toplam 5 palet taştan 40 adet numune alınarak ASTM C170-90 standardına uygun olarak basınç dayanımı belirlenmiştir. Basınç numuneleri için 100 x100 mm veya 100 x130 mm kesit alanı ve 1.1 veya 1.6 yükseklik/genişlik oranı seçilmiştir. Basınç dayanımının belirlenebilmesi için yük hücresi, potansiyometrik cetvel ve gerinim ölçer (strain gauge) kullanılarak elastisite modülü ve poisson oranı belirlenmiştir. Küfeki taşın eğilmede çekme dayanımını belirlemek için ASTM C 99-87 standardına uygun olarak 10 adet 130 x 300 x 50 mm boyutunda numuneler hazırlanmış ve hazırlanan numuneler üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Demir, 2012).

Pinto, C. ve Fonseca, J. (2013) çalışmalarında bazı geleneksel teoriler ile gözlemlenen gerçekler arasındaki tutarsızlıklara odaklanarak yüksek dayanıma sahip granit taşların iç

kırılma süreçlerini analiz etmişlerdir. Çalışmada, basınç yükleme altındaki taşlardaki çatlak ilerlemesinin, numune yüzeyindeki düzensizlikten dolayı taş ve yükleme başlıkları arasında gerçekleşen göreceli yer değiştirmelerin bir sonucu olduğu ve bunun da başlık bölgelerinde çekme kuvvetlerinin meydana gelmesine sebep olduğu ifade edilmiştir. Buna ek olarak yapılan modelleme ile (a) granit tabakalarının burkulma süreci olmadan parçalanması; (b) başlık bölgesindeki düzensizliklerin yok edilme sonuçları; (c) tane büyüklüğünün basınç dayanımına etkisi açıklanmıştır. Bu makalede ayrıca granit taşların basınç dayanımındaki yük dağılımı, numunelerin yüklü uçlarındaki enine deformasyonun kısıtlamaları, uzun süreli yükleme ve döngüsel yükleme gibi koşulların etkileri de araştırılmıştır (Pinto ve Fonseca, 2013).

Şahin, S. (2018) yüksek lisans tezinde ignimbiriti taş ocaklarında oluşan atıkları endüstriye geri kazandırmak amaca ile bir çalışma yapmıştır. Çalışmada atık taşlar öğütülerek belirli oranlarda alçı ile karıştırılmış ve 900 – 1200 °C arasındaki bir sıcaklıkta kür edilerek numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri deneysel olarak belirlenmiş ve bazı numunelerin basınç dayanımının doğal ignimbirit taştan daha iyi olduğu görülmüştür (Şahin, 2018).

2.1.2. Harçlar

Bu tezde kireç ve horasan olmak üzere iki geleneksel harç tercih edilmiştir. Literatür araştırması sırasında dikkat edilen en önemli husus bu harçların karışım oranlarıdır.

Mavi, Ö. (2000) yüksek lisans tezinde kireç harcı ve sıvaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için deneysel çalışma yürütmüştür. Tezde geleneksel harçlar ve sıvalar hakkında bilgi verilmiş, avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Kireç harcının tarihi çok eskiye dayandığı, günümüze kadar gelen bir çok binanın ayakta kalmasında önemli rol oynadığı ancak Portland çimentosunun bulunmasıyla yerini daha güçlü ve avantajlı bir harca bıraktığı vurgulanmıştır. Çalışmada özellikle eski yapıların restorasyonunda kullanılmak üzere geleneksel harçların özelliklerinin iyileşmesinin önem arz ettiği ve bu konuda deneysel bir çalışma olarak farklı cins ve miktarlarda katkı kullanılarak dokuz ayrı karışımın fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu karışımlarda kum ve kireç oranları sabit tutulmuş (2,4:1) katkı malzemelerinin cinsi ve miktarı değiştirilmiştir (Mavi, 2000).

Ekşi Akbulut, D. (2006) doktora tezinde tarihi yapıların onarımında kullanılacak harçlar üzerinde kapsamlı bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmada çevresel etkilere karşı dayanıklı olan farklı karışımlarda kireç harçları önerilmiştir. Tarihi binaların korunması ile ilgili Türkiye ve Avrupa'daki yasal düzenlemeler kısaca açıklanmış, bu yapılarda kullanılan malzemeler hakkında bilgi verilerek harçlar üzerinde yapılan deneyler belirtilmiştir. Çalışmada harçlar üzerine kısa ve uzun vadeli bir çok fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra harçlara puzolan ve lif gibi katkı malzemeler eklenerek dayanıklılığı araştırılmıştır. Karışım oranı olarak 3:1 (kum, kireç) ve 3:0,7:0,3 (kum, kireç, puzolan) kullanılmıştır (Ekşi Akbulut, 2006).

Çizer, Ö. ve ark. (2004) çalışmasında İzmir yakınlarında bulunan Osmanlı dönemine ait bazı hamamların kubbe ve duvarlarında kullanılan kireç harçların özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada özellikleri araştırılan kireç harçların bazılarının hidrolik özelliğe sahip olduğu ortaya konulmuştur. Çalışmada hidrolik kireç harçların hidrolik olmayanlara nazaran daha yüksek mukavemete sahip olduğu ifade edilmiştir. Bu iki farklı özelliğe sahip kireç harçlarının, binanın değişik yerlerinde yapısal davranış dikkate alınarak kullanıldığı öne sürülmüştür (Çizer ve ark., 2004).

Bunlara ek olarak (Isabel ve ark., 2020; Milosevic ve ark., 2013; Oliveira ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmalarda bağlayıcı/agrega oranı ağırlıkça veya hacimce 1/3 olarak belirlenmiştir.

2.1.3. Metal bağlantı elemanları

Demirtaş, M.B. (2006)'nın doktora tezinde Helenistik dönemde yaşamış mimar Hermogenes'in en önemli eseri olan Magnesia Artemis Tapınağında kullanılan inşaa teknikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmanın bu tezle olan en önemli ilgisi tapınakta kullanılan bağlantı elemanlarının detaylarının incelenmesidir. Tapınakta, bireysel elemanları birbirine hem yatay hem de dikey olarak bağlamak için çeşitli bağlantı elemanları kullanılmıştır. Bu bağlantı elemanları detaylı olarak incelenmiş ve elemanların binadaki kullanım yerleri ile şekilleri verilmiştir (Demirtaş, 2006).

Demir, C. (2012) doktora tezinde tarihi yapılarda kullanılan metal bağlantı elemanları hakkında bilgi vermiş ve Edirne II. Bayezid camisinden elde edilen iki kenet üzerinde deneyler yapmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların ardından tarihi binalarda kullanılan

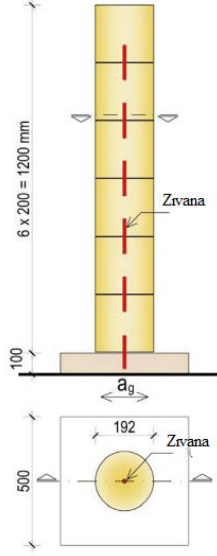
metal bağlantı elemanlarının özelliklerine en yakın metal elemanlar seçilmiştir. Tarihi yapılarda kenetlerin en kesiti genellikle 30 x 9 mm (genişlik x kalınlık) ve zıvanaların 21x21 mm şeklinde olduğu ifade edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan duvar, 1/3 oranında küçültüldüğü için kenet boyutu 10 x 3 mm ve zıvanaların boyutu da 7 x 7 mm olarak kullanılmıştır. Ancak tarihi binalarda kullanılan kenetlerin korozyondan dolayı dayanımının azalması ve yeni metalin yeni teknoloji ile üretimi göz önünde bulundurularak kenetler için 8 x 2.3 mm ve zıvanalar için 7.1 mm çapında metal bağlantı elemanları seçilmiştir (Demir, 2012).

Uslu, S. (2013) yüksek lisans tezinde yığma yapılarda kullanılan kenet sistemini detaylı olarak incelemiştir. Çalışmada biri referans olmak üzere toplamda 13 adet 650 x 730 x 150 mm boyutunda duvar numuneleri üretilmiş ve diyagonal basınç deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin kayma dayanımı, kayma şekil değiştirmesi, kayma modülü ve süneklik düzeyleri incelenmiş ve sonuçları sunulmuştur (Uslu, 2013).

Corradi, M. ve ark. (2017) çalışmalarında, çok katmanlı taş duvarlara düzlem dışı yönünde delikler açıp paslanmaz çelik zıvanalar yerleştirmişler ve duvarın basınç ve kayma dayanımındaki değişimleri incelemiştir. Çalışmada 12, 16 ve 20 mm çelik zıvanalar kumaşa sarılarak duvarda açılan deliklere çimento bazlı enjeksiyon ile yerleştirilmiştir. Sonuç olarak kullanılan güçlendirme tekniği ile duvarın basınç ve kayma kapasitesinin arttığı yazarlar tarafından ifade edilmiştir. Buna ilaveten duvarda burkulmadan dolayı gözlenen kırılma türünün, dikey kırılma türüne değiştiği gözlenmiştir (Corradi ve ark., 2017).

Buzov, A. ve ark.'ın (2019) çalışmasında Şekil 9'da gösterildiği gibi sarsma tablası üzerinde küçük boyutlu serbest duran kolonlarda, farklı parametrelere sahip zıvanaların, kolonun taşıma kapasitesindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada önce beş farklı malzemeden oluşan zıvanalar deneye tabi tutulmuştur. Daha sonra zıvanaların yüksekliği, çapı ve taştaki delik çapının zıvana çapına oranı araştırılmıştır. Deneylerde delik çapının zıvana çapından büyük seçildiği için zıvanaların sadece kayma gerilmelerinde katkı sağladığı ve devrilmede çok etkili olmadıkları anlaşılmıştır. Çalışmanın sonucunda zıvana kullanımının kolonun taşıma kapasitesini artırdığı görülmüştür. Bu artışın zıvananın malzemesi ve deprem düzeyine bağlı olarak %25 – %89 aralığında olduğu ortaya çıkmıştır. Çalışmada zıvana uzunluğunun yatay yük kapasitesinde çok düşük bir

etkisinin olduğu beyan edilmiştir. Zıvana çapının taşıma gücünü artırmaktan ziyade rijitlik artırımına sebep olduğu görülmüştür. Son olarak taşlardaki delik çapının büyüklüğünün taşıma gücünü düşürdüğü ve bunun sebebinin devrilme olduğu ifade edilmiştir (Buzov ve ark., 2019).



Şekil 9. Sarsma tablası üzerinde serbest duran kolon deney düzeneği

(Kaynak: (Buzov ve ark., 2019))

2.2. Duvarların mekanik özellikleri

Yığma yapılardaki taşıyıcı duvarların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, çok eskiden günümüze kadar bir çok akademik çalışmaya konu olmuştur. Bu çalışmalar, yığma yapılardaki taşıyıcı duvarın yük transfer mekanizmasının anlaşılmasına ışık tutarak bazı standartların oluşmasına olanak sağlamıştır. Genel olarak, yapılan bu araştırmaları, teorik ve deneysel olmak üzere iki ana kategoriye bölmek mümkündür. Deneysel çalışmaları duvarların düzlem içi ve düzlem dışı davranışının belirlenmesi olarak iki farklı gruba ayırmak mümkündür. Bu tezin kapsamında sadece duvarların düzlem içi davranışı ele alınmıştır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde taş duvarların düzlem içi mekanik özelliklerinin belirlenmesinde farklı deney yöntemleriyle farklı numune ebatlarının kullanıldığı görülmüştür. Deney yöntemleri için oluşan standartlar referans alınırken numune boyutu mikro ve makro olmak üzere iki ana kategoriye bölünmektedir. Bu bölümde yapılan

çalışmalar, numune boyutuna göre iki farklı başlık altında incelenmiş ve özetleri sunulmuştur.

2.2.1. Mikro boyutlu Numuneler

1992 yılında Avrupa Birliği Komisyonu tarafından yayınlanan rapora göre, yığma yapıların davranışı mikro ve makro numuneler kullanılarak belirlenebilmektedir. Mikro numunelerin kullanıldığı deneyde bir sırada maksimum iki tam bireysel eleman olmalı ve maksimum numune yüksekliği ise bireysel eleman yüksekliğinin beş katı olmalıdır. Makro deney elemanların boyutu ise en büyük mikro boyutlu numunenin düzlemsel alanının en az iki katı olmalıdır (Commission, 1992). Bu deneylerde not edilmesi gereken en önemli hususlardan biri de mikro boyutlu numunelerin duvarın davranışını tam olarak temsil etmediğidir. Bu sebeple makro boyutlu numunelerin deneye tabi tutulması, duvarın mekanik özelliklerinin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Ancak makro numunelerin deneye tabi tutulması pahalı ve külfetli olduğu için genellikle mikro boyutlu elemanlar tercih edilmekte ve elde edilen sonuçlar yorumlanmaktadır.

2.2.1.1. Basınç dayanımı

Zeng, F. ve ark. (2009) çalışmasında RILEM'e uygun olarak granit ve çimento harcından imal edilen prizmatik numuneler basınç deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmada teorik bir alt yapı oluşturmak amacı ile Dijital Görüntü Korelasyonu (Digital Image Correlation) yöntemi kullanılarak çatlak gelişimi incelenmiştir. Deneyde 203 x 178 x 127 mm boyutunda ve 12.7 mm derze sahip numuneler kullanılmıştır. Deney sonucunda prizmatik duvar numunelerin basınç dayanımının bireysel granitlerin ortalama değerinden daha düşük çıktığı gözlenmiştir. DIC yöntemi ile çatlakların başlangıcı ve gelişimi gözlenmiş ve detaylı bilgi verilmiştir (Zeng ve ark., 2009).

Vasconcelos, G. ve Lourenço, P. B. (2009) çalışmasında granit duvarların basınç dayanımında derz malzemesi ve derzlerdeki yüzey pürüzlülüğünün etkisi araştırılmıştır. Çalışmada üç adet 150 mm genişliğine sahip kübik taş ve iki derzden oluşan prizmatik numuneler kullanılmıştır. İki tip numune üretilmiştir. Birincisinde derzler 10 mm harçla doldurulmuş ikincisinde ise derzler harçsız olarak imal edilmiştir. Çalışmada harçsız numunelerde yüzey pürüzlülüğünün basınç davranışını etkilediği, harç malzemesinin

kırılma türünü değiştirdiği ve yığma yapılar için basınç dayanımının irdelenmesinin en az kayma dayanımının irdelenmesi kadar önemli olduğu öne sürülmüştür (Vasconcelos ve Lourenço, 2009).

Augenti, N. ve Parisi, F. (2010) çalışmasında tuf duvarların basınç dayanımını, derzlere dik ve paralel yönde uygulanan tek eksenli yükleme altında incelenmiştir. Deneysel sonuçlara dayanarak, duvarın ortotropisini hesaba katmak ve gerinim yumuşama davranışını açıklamak için her yükleme yönü için farklı doğrusal olmayan gerilme – şekil değiştirme modelleri tanımlanmıştır. Yeni ve mevcut yapıların yapısal analizinde kullanılmak üzere farklı istatistiksel teknikler kullanılarak maksimum, ortalama ve karakteristik gerilme – gerinim diyagramları elde edilmiştir. Deneylerde 610 x 650 x 150 mm boyutunda numuneler kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda mevcut tasarım/değerlendirme prosedürlerinde kullanılmak üzere tuf duvarlar için gerilme – gerinim eğrilerini tanımlayabilmek için doğrusal olmayan regresyon analizi ile iki farklı analitik model elde edilmiştir (Augenti ve Parisi, 2010).

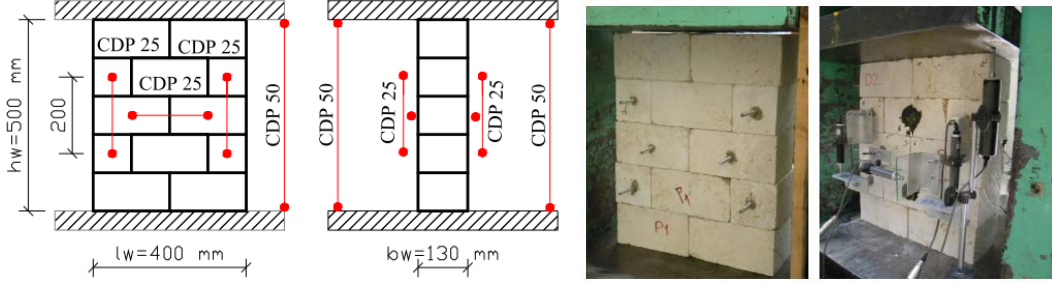
García, D. ve ark. (2012) çalışmasında Romanesk dönemde kullanılan duvarların özelliğini taşıyan doğal taş duvarların basınç davranışı incelenmiştir. Çalışmadan çıkan sonuçlar diğer akademik çalışmalarda önerilen değerlendirmeler ve ilgili standartla kıyaslanmış, farklılıklar irdelenerek uygun formüller belirlenmiştir. Çıkan sonuçlar bu tip malzemelerin daha iyi anlaşılması ve tarihi yapıların doğrulanması için güvenilir kaynak olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada deney teçhizatı kısıtlamalarından dolayı şekil 10'daki prizmatik numuneler üretilmiştir (García ve ark., 2012).



şekil 10. Standarda uygun olmayan deney numuneleri

(Kaynak: (García ve ark., 2012))

Demir, C. (2012) doktora tezinde küfeki taşlardan harçsız ve TS EN 1052-1'e uygun olarak imal edilen tek ve çok katmanlı duvarların basınç dayanımını deneysel olarak belirlemiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Küfeki taşan imal edilen numuneler

(Kaynak: (Demir, 2012))

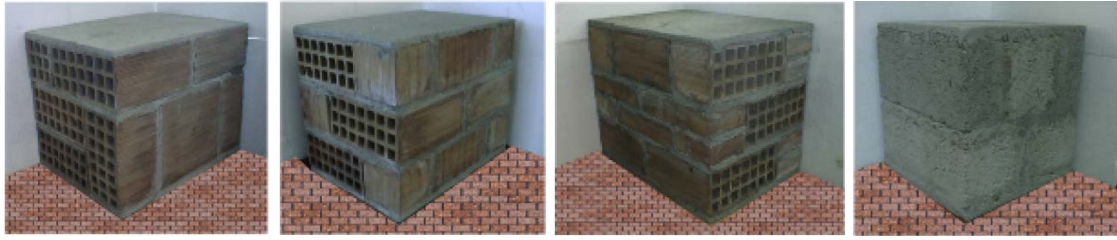
Numuneler basınç dayanıma tabi tutulmadan önce 10 kN ön yükleme ile ultrason testi yapılmıştır. Deney sonucunda numunelerin çatlak başlangıcı ve gelişimi açıklanarak gerilme – gerinim diyagramları verilmiştir. Numunelerin elastisite modülü basınç dayanım eğrisini %20 – %50 arasında belirlenmiş ve ortalama değer hesaplanmıştır. Tek katmanlı duvar numunelerinin basınç dayanımının, bireysel taş numunelerinin basınç dayanımının %44'ü civarında çıktığı ifade edilmiştir. Çift katmanlı duvar numunelerinin dayanımının tek katmanlıya nazaran %50 daha düşük çıktığı sonucuna varılmıştır. Deneysel çalışma sonucu duvarların basınç dayanım deneyi ile başlangıç kayma dayanımı birlikte değerlendirilmiş ve taş duvarların basınç dayanımının hesaplanabilmesi için formüller verilmiştir (Demir, 2012).

Milosevic, J. ve ark. (2013) çalışmasında moloz doğal taş duvarların kayma ve basınç dayanımı deneysel olarak belirlenmiştir. Basınç dayanım deneyinde duvarların elastisite modülü de belirlenmiştir. Deneyde iki farklı kireç harcı ile 400 x 400 x 400 mm boyutunda numuneler üretilmiştir. Numune düzgün yayılı yüke maruz bırakılarak iki palet arasındaki yer değiştirmeler LVDT'ler yardımı ile ölçülmüştür. Basınç dayanımı ve elastisite modülü Denklem 1'de verilen eşitsizlikle hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{F_{maks}}{A} \quad E = \frac{F_{maks}}{3 \times \epsilon \times A} \quad (1)$$

Denklem 1’de $F_{y,maxs}$ maksimum basınç yüklemesini, A numunenin yüke maruz kalan alanını ve ϵ maksimum basınç yüklemesinin 1/3 kısmına tekabül eden gerinimi temsil etmektedir. Çalışmada iki numunenin sonuçları detaylı olarak incelenmiş ve yorumlanmıştır (Milosevic ve ark., 2013).

Porco, F. ve ark. (2013) çalışmasında mühendislik hizmeti almayan yığma binalarda kullanılan duvarların mekanik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada, özellikle deprem riski yüksek olan bölgelerde mevcut binalardaki taşıyıcı duvarların mekanik özelliklerinin belirlenmesinin binaya zarar vermeden yapılamayacağı öne sürülmüştür. Çalışmada önce Kalabriya – İtalya’daki binalarda en çok kullanılan duvar tipi belirlenmiştir. Daha sonra bu duvarları temsil edecek herhangi bir standarda uymayan numuneler üretilmiştir (Şekil 12). Deney sonuçları detaylı olarak irdelenmiş ve yorumlanmıştır (Porco ve ark., 2013).



Şekil 12. Standarta uymayan basınç deney numuneleri

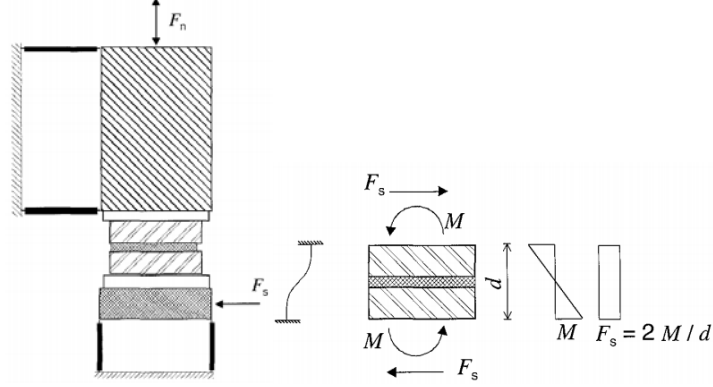
(Kaynak: (Porco ve ark., 2013))

Franzoni, E. ve ark. (2015) çalışmasında üçlü tuğladan oluşan prizmatik numunelerin ıslak ve kuru hallerdeki basınç dayanımı incelenmiştir. Çalışmada numunelerin basınç dayanımı ve elastisite modülü EN 1052-1’e göre belirlenmiştir. Sonuçlar, malzemelerin mikro-yapısal özellikleri, yani toplam boşluk miktarı ve gözenek boyutu dağılımı ışığında yorumlanmıştır (Franzoni ve ark., 2015).

2.2.1.2. Başlangıç kayma dayanımı

Pluijm, Van Der, R. (1999) doktora tezinde yığma duvarlardaki derzlerin kayma dayanımının belirlenebilmesi için Şekil 13’te şematik olarak verilen deney düzeneği önermiştir. Deneyde, önce numunenin alt ve üst yüzeyi çelik plakalara yapıştırılmış, daha sonra derze dik olacak şekilde normal kuvvet uygulanmış ve deney boyunca sabit tutulmuştur. Son aşama olan yatay kuvvetin uygulanması ile deney bitirilmiştir.

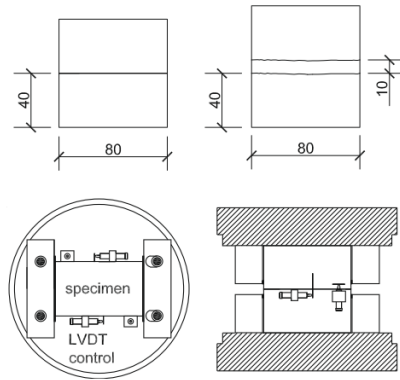
Numunenin kayma dayanımı Coulomb'un sürtünme kırılma kriterine göre hesaplanmıştır. Çalışmada derzlerin kırılma şekilleri verilerek deney verileri detaylı olarak irdelenmiştir (Pluijm, 1999).



Şekil 13. İki eksenli deney düzeneği

(Kaynak: (Pluijm, 1999))

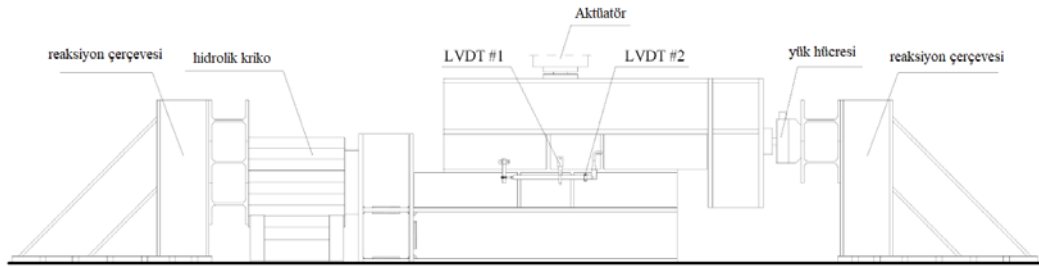
Vasconcelos, G. ve Lourenço, P.B. (2009)'un çalışmasında taş duvarların basınç ve kayma dayanımı deneysel olarak belirlenmiştir. Çalışmada taş duvarlardaki derzlerin kayma dayanımı basit kesme deneyi ile belirlenmiştir (Şekil 14). Deneyde iki bağımsız hidrolik aktüatörden oluşan servo kontrollü bir evrensel test makinesi kullanılmıştır. Böylece deney numunelerine düşey ve yatay yük aynı zamanda uygulanmıştır. Deney numuneleri 40 x 80 mm boyutunda, harçlı ve harçsız olarak imal edilmiştir. Deney monoton ve tersinir tekrarlanır yükleme altında gerçekleşmiş ve iki deney numunesine ait gerilme – gerinim diyagramları detaylı olarak incelenmiştir (Vasconcelos ve Lourenço, 2009).



Şekil 14. Basit kesime deney düzeneği

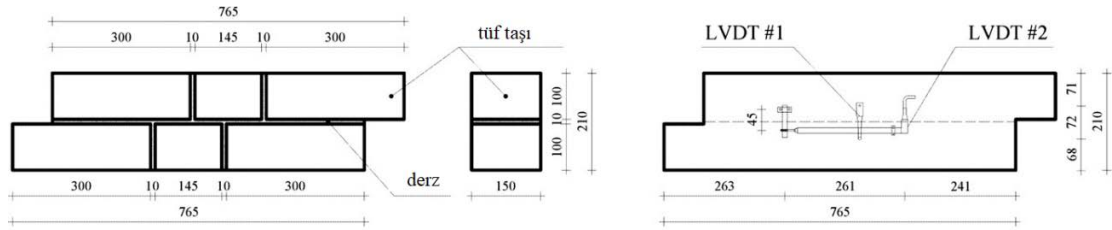
(Kaynak: (Vasconcelos ve Lourenço, 2009))

Augenti, N. ve Parisi, P. (2010)'un çalışmasında İtalya, Türkiye ve Japonya gibi deprem bölgesinde yer alan ülkelerin yapı stokunda oldukça fazla bulunan tuf taşının davranışı incelenmiştir. Çalışmada duvar numunelerinin derzlerinde kullanılan harçların lineer olmayan davranışını belirlemek için iki sıradan oluşan numuneler üzerinde basit kayma deneyleri (doğrudan kayma deneyi) yapılmıştır (Şekil 15). Numunelerin her sırasında iki tam (300 x 150 x 100 mm) ve 1 yarım (145 x 150 x 100 mm) tuf taşı kullanılmıştır (Şekil 16). Taşlar ve iki sıra arasında 10 mm kalınlığında kireç harcı kullanılmıştır. Kayma deneyinde 0.25 MPa, 0.50 MPa ve 0.75 MPa düşey gerilme uygulanmıştır. Deneysel çalışma sonuçları kapsamlı bir şekilde irdelenmiştir (Augenti ve Parisi, 2011).



Şekil 15. Deney düzeneği

(Kaynak: (Augenti ve Parisi, 2011))



Şekil 16. Deney numuneleri (mm)

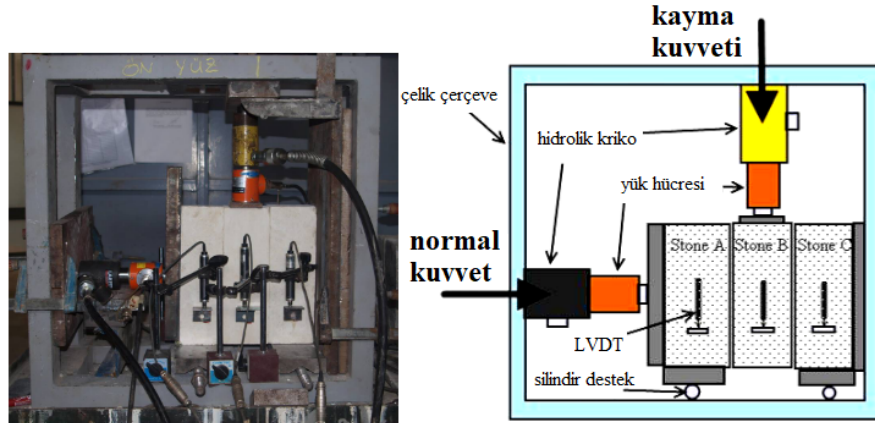
(Kaynak: (Augenti ve Parisi, 2011))

Mohammed, A. ve Hughes, T.G. (2011)'in çalışmasında yığma duvar deneylerinde boyut etkisi çeşitli yüklemeler altında araştırılmıştır. Çalışmada 4 farklı boyutta numune üretilmiştir. Bu numunelerde; 1/1, 1/2, 1/4 ve 1/6 oranları kullanılmış ve numuneler basınç, kayma, diyagonal basınç, eğilme ve bağ gerilmesi olmak üzere 5 farklı yüklemeye tabi tutulmuştur. Başlangıç kayma deneyleri için BS EN 1052-3 standardı referans alınmış ve 4 farklı numune boyut oranı kullanılmıştır. Sonuç olarak

boyut küçüldükçe kayma dayanımı ve sürtünme katsayısında herhangi bir azalma veya artma görülmediği öne sürülmüştür (Mohammed ve Hughes, 2011).

Demir, C. (2012) doktora tezinde küfeki taşlardan harçsız olarak imal edilen numunelerin başlangıç kayma dayanımı belirlenmiştir. Deney TS EN 1052-3 standardına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 17). 3 adet küfeki taş 100 x 100 x 300 mm boyutunda yan yana getirilerek yığma duvarlarda düşey yükü temsil eden kuvvet yatay olarak verilmiştir. 1. ve 3. taşların düşey hareketi kısıtlandıktan sonra orta taşa kayma kuvveti düşey olarak uygulanmıştır. Deneyde normal gerilme 0.25 MPa, 0.75 MPa ve 1.25 MPa olmak üzere 3 düzeyde uygulanmıştır. Sonuçlar detaylı olarak irdelenmiş ve değerlendirilmiştir (Demir, 2012).

Milosevic, J. ve ark. (2013)'ün çalışmasında moloz taş duvarların mekanik özelliklerinin belirlenmesi kapsamında 9 adet numune üzerinde EN 1052-3' standardına uygun olarak başlangıç kayma deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde hava ve hidrolik kireç olmak üzere iki farklı kireç harcı kullanılmıştır. Numuneler 600 x 400 x 400 mm boyutunda imal edilip hava kireci kullanılan numunelerde 0.1 MPa, 0.3 MPa ve 0.5 MPa, hidrolik kireç kullanılan numunelerde ise 0.1 MPa, 0.2 MPa ve 0.3 MPa düşey gerilme uygulanmıştır. Kayma kuvvetleri duvarın alt ve üst kısımlarının hareketi çelik levhalarla kısıtlanıp orta kısım kaydırılarak uygulanmıştır. Deneylerin sonuçları irdelenmiş ve tablo halinde sunulmuştur (Milosevic ve ark., 2013).



Şekil 17. Deney düzeneği

(Kaynak: (Demir, 2012))

Alecci, V. ve ark. (2013)'ün çalışmasında farklı harçlarla örülen tuğla duvarların kayma dayanımları deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında tuğla duvarların kayma dayanımı başlangıç kayma deneyi ve diyagonal basınç deneyi ile belirlenmiştir. Çalışmadaki başlangıç kayma deneyinin, EN 1052-3 standardına uygun yapıldığı belirtilmiştir. Toplamda 18 adet numune imal edilmiştir. Bunlardan 6 adedi kireç, 6 adedi çimento ve kalan diğer 6 adedi çimento – kireç karışımından oluşan harçla üretilmiştir. Deneysel sonuçlar değerlendirildikten sonra literatürdeki formüllerle karşılaştırılmıştır (Alecci ve ark., 2013).

Andreotti, G. ve ark. (2019)'un çalışmasında başlangıç kayma deneylerindeki numunelerin derzlerinde meydana gelen hacimsel genişleme incelenmiştir. Bu hacimsel genişlemenin (dilatancy) harç derzlerinde çatlama yüzeylerinin oluşmasından kaynaklandığı ve bu konu üzerinde yapılan çalışmaların kısıtlı olduğu ileri sürülmüştür. Çalışmadaki deneysel veriler irdelendiğinde başlangıç kayma deneyi sırasında numunelerde önemli miktarda hacimsel genişleme meydana geldiği görülmüştür. EN 1052-3 ve ASTM C1531 standartlarının hacimsel genişlemeyi dikkate almadıklarından dolayı deney sırasında bu olayın varlığından dolayı başlangıç kayma dayanımının gerekenden az ve başlangıç sürtünme katsayısının gerekenden fazla tahmin edildiği öne sürülmüştür. Çalışmada önerilen yeni formüller ile derzlerdeki hacimsel genişlemenin deneysel verilerle karakterize edilebilme imkânı sunulduğu ifade edilmiştir (Andreotti ve ark., 2019).

2.2.2. Makro Boyutlu Numuneler

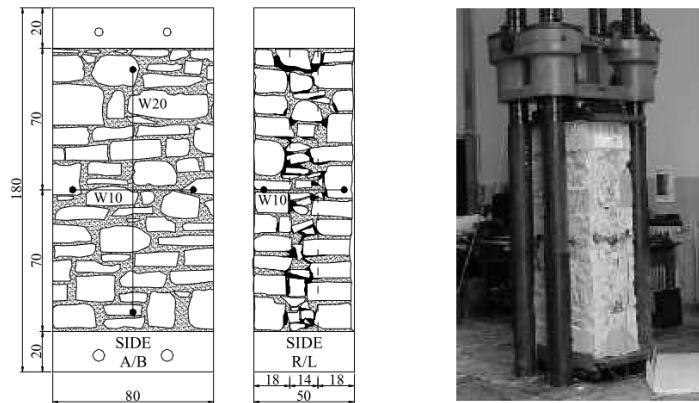
Yığma yapıların mekanik özellikleri makro boyutlu numunelerle de belirlenebilmektedir. Hatta makro boyutlu numuneler yığma binaların davranışı hakkında, numunenin boyutuna bağlı olarak, mikro boyutlu numunelere nazaran daha gerçekçi sonuçları ortaya koymaktadır. Ancak bu numunelerin imalatı, saklama şartları ve deney ortamları mikro boyutlu numunelere göre çok daha külfetli ve pahalıdır. Bu yüzden birçok araştırmacı mikro boyutlu numuneleri tercih etmektedir.

Bu bölümde yığma yapıların düzlem içi davranışını makro boyutlu numuneler kullanarak belirleyen çalışmalar incelenmiş ve özetleri kısaca sunulmuştur.

2.2.2.1. Basınç dayanımı

Faella, G. ve ark. (1991)'in çalışmasında (tuf taş duvarların basınç dayanımı deneysel olarak belirlenmiştir. Çalışmada 1300 x 500 x 1250 mm (uzunluk x genişlik x yükseklik) boyutunda üç tip numune üretilmiş ve basınç deneyine tabi tutulmuştur. Bu üç tip duvar arasındaki en önemli fark, 3. tip duvarlar 1. tip duvarların harç injeksiyonu ile güçlendirilmiş halidir. Deney sonucunda, 3. tip duvarların basınç dayanımının 1. tip duvarlara nazaran daha yüksek çıktığı görülmüştür. Çalışmanın sonucunda tuf taş duvarların basınç dayanımı ile elastisite modülü belirlenmiştir. Çalışmada EC6'da tuf taş duvarların basınç dayanımı ve elastisite modülünün hesaplanması için verilen formüllerin güvenilir olduğu ancak deneysel verilere göre daha yüksek değerler çıkmasına sebep olduğu, düşük yüklerde (özellikle kırılma yükünün %40'ına tekabül eden yüklerde) basınç davranışının değişken olduğu ve bu yük seviyesinde elastik analiz yapılmasının uygun olduğu ve uygulanan güçlendirme ile duvarın basınç ve kayma dayanımının arttığı belirtilmiştir(Faella ve ark., 1991).

Valluzzi, M. R. ve ark. (2001)'in çalışmasında farklı yöntemlerle güçlendirilmiş çok katmanlı duvarların performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmada injeksiyon yolu ile güçlendirme, derzlerin harçla doldurulması ile güçlendirme ve enine bağlama yöntemi gibi üç farklı güçlendirme yöntemi ayrı ayrı ve birleşik olarak uygulanmış ve üretilen numunelerin basınç dayanımı belirlenmiştir. Deney düzeneği ve numune boyutu Şekil 18'de verilmiştir. Çalışmanın sonucunda tekniklerin fizibilite sorunları, uygulama yönleri ve etkinlik değerlendirmeleri yapılmıştır (Valluzzi ve ark., 2001).



Şekil 18. Deney düzeneği ve numune ebadı (birim: cm)

(Kaynak: (Valluzzi ve ark., 2001))

Vintzileou, E. ve Fezans, A.M. (2008)'in çalışmasında çok katmanlı duvarların güçlendirmesinde kullanılan üçlü harç (%30 çimento, puzzolan ve sönmüş kireç) ile hidrolik kireç harcın basınç ve kayma mukavemeti üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada basınç dayanımının belirlenmesi için üç adet numune, 450 x 1000 x 1200 mm (genişlik x uzunluk x yükseklik) boyutunda üretilmiş ve deneye tabi tutulmuştur. Yazarlara göre basınç deneyinde kullanılan numunelerde boyut etkisini bertaraf edebilmek için 2:3 oranı seçilmiştir. Çalışmanın amacı ise tarihi yapılarda kullanılan seramik kaplamaların korunması amacı ile duvarın durabilitesini sağlamaktır. Bu çalışmada kullanılan harçların dayanımının genel olarak çok katmanlı duvarların güçlendirilmesinde kullanılan harçlardan düşük olmasına rağmen, yazarlara göre duvarın mekanik özelliklerinde önemli iyileşme gözlemlenmiştir (Vintzileou ve Miltiadou-Fezans, 2008).

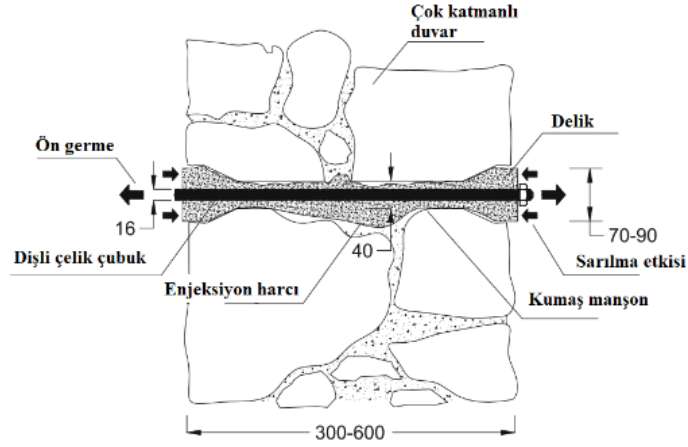
Mohammed, A. ve ark. (2011)'in çalışmasında basınç deneyinde tabi tutulan yığma duvar numunelerde boyut etkisi araştırılmıştır. Çalışmada dört farklı ölçekte numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üç bireysel elemanın üst üste koyulmasından meydana gelmektedir. Numunelerde kullanılan bireysel elemanlar, üretim aşamasında prototip olup, 1/2, 1/4 ve 1/6 olmak üzere dört farklı ölçekte üretilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda boyut küçüldükçe basınç dayanımının arttığı ama rijitlik konusunda belirgin değişimin olmadığı gözlemlenmiştir (Mohammed ve ark., 2011).

Almeida, C. ve ark. (2012)'nin çalışmasında 20. yüz yılın başlarında Portekiz'de inşa edilen taş binaların taşıyıcı duvarlardaki taş şekli, boşluklar ve kullanılan harçların, taşıyıcı davranış üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada mevcut binaya ait 30 m uzunluğunda olan yığma duvardan 1200 x 2500 x 400 mm (uzunluk x yükseklik x genişlik) boyutunda duvar numuneler, elmas uçlu testere ile kesilmiş ve laboratuvara taşınmıştır. Taşınan numuneler basınç deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Mevcut binadan alınan numunelerde boşluk oranının fazla olması ve taşların düzgün olmaması sebebiyle rijitlik değerlerinin çok düşük çıktığı gözlemlenmiştir. Alınan duvar numuneler, enjeksiyon yöntemi ile mekanik özellikleri düşük olan kireç harç kullanılarak güçlendirilmiştir. Böylece rijitlik artışı gözlemlenmiştir (Almeida ve ark., 2012).

Silva, B. ve ark. (2014) tarafından yılında yapılan çalışmada, çok katmanlı duvarların basınç dayanımını hesaplayan analitik modellerle deneysel verilerin kalibrasyonu sunulmuştur. Deneysel veri olarak, çalışma kapsamında yapılan deneylere ek olarak literatürdeki bazı çalışmaların verileri kullanılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında (500 x 1000 x 1200 mm) 1:1 ve (330 x 800 x 1000 mm) 2:3 oranında duvarlar örülmüştür. Hazırlanan numuneler güçlendirme işleminin öncesinde ve sonrasında monotonik ve tersinir tekrarlanır yükleme altında basınç deneyine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda yapılan deneysel verilerin yorumlanmasına ek olarak hangi analitik modelin ne derece tatmin edici sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Silva ve ark., 2014).

Marcari, G., ve ark. (2017)'nin çalışmasında bazalt tekstil takviyeli harç ile güçlendirilmiş tuf taş duvarların düzlem içi davranışı belirlenmiştir. Bu kapsamda üretilen numuneler basınç ve diyagonal basınç deneyine tabi tutulmuştur. Basınç deneyi için üretilen numunelerin boyutu 250 x 1000 x 1000 mm (genişlik x uzunluk x yükseklik) olup kırılma düzeni, gerilme – gerinim davranışı, dayanım, rijitlik ve deplasman yapma kapasitesi belirlenmiştir. Sonuçlar irdelendikten sonra mevcut literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır (Marcari ve ark., 2017).

Corradi, M., ve ark. (2017)'nin çalışmasında çok katmanlı duvarların güçlendirilmesinde paslanmaz çelik çubukların uygulanması araştırılmıştır. Araştırmada çok katmanlı duvarda açılan deliğe kumaş manşon yerleştirildikten sonra içi harçla doldurulmuş ve çelik çubuklar yerleştirilmiştir (Şekil 19). Kullanılan yöntemin ne kadar etkili olduğu deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda basınç ve kayma deneyleri, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş duvarlar üzerinde uygulanmıştır. Basınç deneyi kapsamında laboratuvarında 220 x 710 x 1450 mm (genişlik x uzunluk x yükseklik) boyutunda numuneler üretilmiştir. Deney sonucunda, kullanılan yöntem ile duvarın düzlem içi davranışının iyileştiği gözlemlenmiştir (Corradi ve ark., 2017).

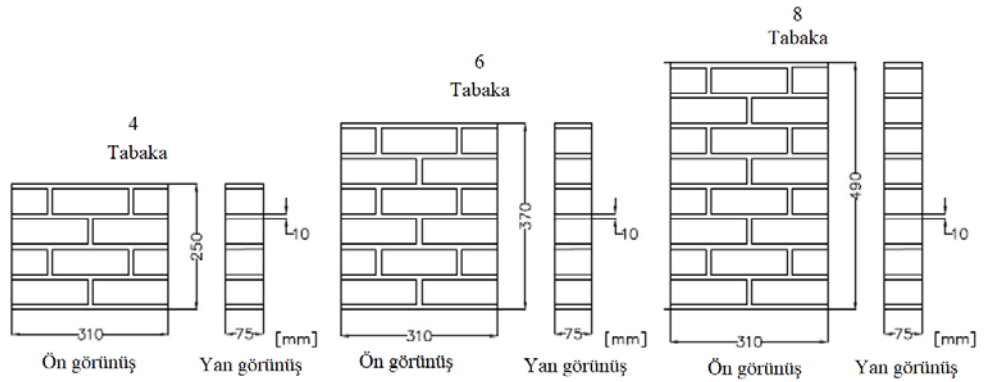


Şekil 19. Çok katmanlı duvarların güçlendirilmesinde kullanılan paslanmaz çelik

(Kaynak: (Corradi ve ark., 2017))

Guadagnuolo, M., ve ark. (2020)'nin çalışmasında tüf yığma yapıların basınç dayanımı ile elastisite modülünü değerlendirmek için, 635 adet yassı kriko (flat-jack) deneyi yapılmış ve elde edilen sonuçlar İtalya bina yönetmeliği ile karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel çalışmalarla da karşılaştırılmıştır (Guadagnuolo ve ark., 2020).

Verissimo-Anacleto, J., ve ark. (2020)'nin çalışmasında kireç-taş duvarların basınç dayanım hesabında tabaka veya sıra adedini dikkate alan bir ampirik model önerilmiştir. Önerilen model deneysel çalışma ile kıyaslanmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Bu kapsamda Şekil 20'de gösterilen üç farklı tabaka sayısına sahip numune üretilmiştir. Yazarlara göre önerilen model mevcut diğer modellerle kıyaslandığında tatmin edici sonuçlar vermektedir (Verissimo-Anacleto ve ark., 2020).



Şekil 20. Farklı tabaka sayısına sahip numuneler

(Kaynak: (Verissimo-Anacleto ve ark., 2020))

2.2.2.2. Diyagonal kayma mukavemeti

Literatür incelendiğinde makro boyutlu yığma duvar numunelerin kayma dayanımının, diyagonal basınç yükleme veya düzlem içi tersinir tekrarlanır yükleme altında belirlendiği görülmüştür. Deneyler başlanmadan önce bu konu üzerinde yapılan çalışmalar incelenmiş ve bazı çalışmaların özeti aşağıda verilmiştir.

Ghanem, G. ve ark. (1994)'ün çalışmasında diyagonal basınç deneyinde kullanılan numune boyutunun ASTM E519-88 standardında belirtilenden farklı olması durumunda hesaplama formüllerinin yeni katsayılarla düzeltilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmada, yığma duvarların deprem sırasında düzlem içi kayma veya diyagonal kayma gerilmelerine maruz kaldıkları öne sürülmüş ve bir çok deneysel çalışmada yığma duvarların kayma davranışının ASTM E519-88 standardına uygun olarak belirlendiği öne sürülmüştür. Yazarlar, deney numunelerinin ilgili standartta belirtildiği üzere 1200 x 1200 mm'den daha küçük olması durumunda verilen hesap yöntemi ile elde edilen sonucun yaklaşık %50 oranda güvenli olmayan bölgede kaldığını ifade etmiş ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlara dayanarak numunenin boyutu ve anizotrop özelliği dikkate alınarak (E1/E2) oranı içeren yeni formüller önerilmiştir (Ghanem ve ark., 1994).

Valluzzi, M. R. ve ark. (2002)'nin çalışmasında tuğla duvarların kayma dayanımının artırılması için alternatif bir yol olarak Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) laminat denenmiştir. Çalışmada duvarların kayma dayanımını belirlemek için 33 adet duvar numunesi hazırlanmıştır. 33 adet duvar numunesinden 9 adedi referans numune (güçlendirilmemiş) ve kalan 24 adedi ise FRP kullanılarak farklı güçlendirme konfigürasyonları ile güçlendirilmiş numunelerdir. Duvarların kabaca boyutu 515 x 510 x 120 mm olup diyagonal olarak hazırlanmıştır. Numune ebatlarının küçük olmasından ve kullanılan tuğla birimlerinin kolaylıkla kırılabilmesinden dolayı, numunelerin yüklenme uçları kesilmiş ve 12 x 12 mm² bir alan oluşturulmuştur. Farklı güçlendirme konfigürasyonlarının performansları, dayanım ve kırılma mekanizması açısından karşılaştırılmış ve nihai kayma dayanımının tahmini için kullanılan mevcut analitik formüllerle deneysel sonuçlar kalibre edilmiştir (Valluzzi ve ark., 2002).

Long, L. ve ark. (2005)'in çalışmasında fiziksel ve ekonomik kısıtlamalardan dolayı, özellikle dinamik testlerde tam ölçekli numune kullanılmasının imkânsız olduğu beyan

edilmiştir. Bu sebepten yığma duvarların düzlem içi davranışının belirlenebilmesi için 1/2 ölçekli numuneler üzerinde ön çalışma yapılmıştır. Deneysel programda kullanılmak üzere tam ölçekli ve 1/2 ölçekli içi boş beton briket birimleri üretilmiştir. Önce üretilen birimlerin özellikleri belirlenmiş ve daha sonra her iki birimden üretilen ölçekli duvar numunelerin davranışları belirlenmiştir. Numunelerin dayanımı, karakteristik gerilme – gerinimi ve kırılma modları basınç ve diyagonal kayma deneyleri yapılmıştır. Araştırma sonucunda özellikle harçla doldurulan 1/2 ölçekli numunelerin tam ölçekli numuneler yerine kullanılabilirliği araştırılmış ve sonuçlar arasındaki farkların boyuttan kaynaklandığı ifade edilmiştir (Long ve ark., 2005).

Bosiljkov, V. ve ark. (2005)'in çalışmasında yığma binalarda kullanılan taşıyıcı duvarların, homojen olmayan kompozit yapısal elemanlar olduğu ifade edilerek bu elemanların mekanik özelliklerinin kullanılan bireysel elemanların mekanik özelliklerine, hacim oranlarına, birleşim özelliklerine ve oluşan çatlaklara bağlı olduğu belirtilmiştir. Duvarın mekanik özelliklerinin duvardaki bireysel elemanların birleşim durumuna, gerilme dağılımına bağlı olması sebebiyle duvarın kayma modülü ve rijitliğinin bir çok parametreye bağlı olduğu öne sürülmüştür. Çalışmada, duvarların rijitliğini belirlemek için deney yöntemlerinin (tek eksenli ve çift eksenli), yükleme koşullarının (monoton ve tersinir – tekrarlanır), harç tipinin ve güçlendirme yöntemlerinin etkisi nedeniyle ortaya çıkan problemlerin çeşitli ülkelerde yapılan kapsamlı deneylerde belirlendiği vurgulanmıştır. Bu çalışmada, duvarların kayma modülü ve rijitliğini belirlemek için kullanılan ölçüm aletlerinin etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda neredeyse tüm standartlarda kayma modülü ve rijitlik için verilen hesapların değişmesi gerektiği belirtilmiştir (Bosiljkov ve ark., 2005).

Vintzileou, E. N. ve ark. (2006)'nın çalışmasında yatay ahşap bağları olan tarihi yapılar incelenmiştir. Çalışma, basınç ve diyagonal deneyleri içermekte ve toplamda 8 adet numune 700 x 900 x 500 mm boyutunda üretilmiştir. Bu numunelerden 3 adedi basınç ve kalan 5 adedi diyagonal basınç deneylerinde kullanılmıştır. Diyagonal kayma deneyinde kullanılan 5 adet numuneden 1 adedi referans numune olup, kalan 4 adedinde değişik pozisyonlarda yatay ahşap bağları kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda ahşap elemanların basınçtan daha ziyade duvarın kayma dayanımının artmasında faydalı olduğu görülmüştür (Vintzileou ve ark., 2006)

Gabor, A. ve ark. (2006)'nın çalışmasında içi boş tuğladan yapılmış yığma duvarların düzlem içi davranışı analiz edilmiş ve modellenmiştir. Çalışmada duvarın doğrusal olmayan davranışı, derzlerdeki harcın elastik-mükemmel plastik davranışı dikkate alınarak modellenmiştir. Nümerik çalışmadan önce küçük boyutlu duvar numuneler üzerinde RILEM'e uygun basınç ve başlangıç kayma deneyleri yapılmıştır. Daha sonra nümerik modelleme yapılmış ve diyagonal kayma deneyi ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Diyagonal kayma deneyi RILEM'e uygun olarak yapılmıştır. Deneyde 870 x 840 x 100 mm boyutunda numune üretilmiş ve diyagonal basınca maruz bırakılmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada içi boş tuğladan yapılmış duvarlar için sonlu elemanlar modelleme yaklaşımı sunulmuştur. Modellemenin doğrusal olmayan davranış sağlanmasındaki başarısının, tanımlanan mekanik parametrelerin doğru seçimine bağlı olduğu bildirilmiştir (Gabor ve ark., 2006).

Corradi, M. ve ark. (2008)'in çalışmasında yığma taş duvarların güçlendirilmesi için harç (grout) enjeksiyon yöntemi önerilmiş ve sahada yapılan deneylerle güçlendirilmiş duvarların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu duvarlar gerçek bir binaya ait olup önce hasara uğratılmış daha sonra önerilen yöntemle güçlendirilmiş ve yöntemin etkinliği araştırılmıştır. Mekanik deneyler kapsamında duvarlar üzerinde basınç deneyi, basınç çekme deneyi ve diyagonal basınç deneyi yapılmıştır. Diyagonal basınç deneyinde ASTM standardına uygun olarak farklı kalınlıklara sahip 1200 x 1200 mm ölçülerinde numuneler, mevcut duvardan elmas uçlu testere ile kesilmiştir. Deney sonucunda numunelerin kayma dayanımı ve kayma rijitliği hesaplanmıştır (Corradi ve ark., 2008).

Brignola, A. ve ark. (2008)'in çalışmasında yığma duvarlar üzerinde sahada yapılan diyagonal basınç deneyinin lineer olmayan nümerik modelleme yardımı ile yorumlanması ve yığma duvarların kayma dayanımı ile kayma modülünün değerlendirilmesi için yeni metot önerilmiştir. Çalışmada 24 numune üzerinde yapılan deney sonuçları verilmiş ve ASTM E 519-02 ile RILEM TC-76 LUM standartların yanlışları ve eksiklerini göstermek için eleştirel bir inceleme yapılmıştır. Deneyde kullanılan numunelerin 3 tarafı duvardan elmas uçlu kesici ile ayrılmış sadece alt taraftan bir miktar duvara bağlı bırakılmıştır. Tüm numunelerin boyutu yaklaşık olarak 1200 x 1200 mm olarak hazırlanmıştır. Çalışmada kısaca ASTM ve RILEM standartların arasındaki fark araştırılmış ve RILEM sadece duvarın kayma dayanımı ile ilgilenirken ASTM'nin kayma dayanımının yanı sıra kayma modülünün hesaplanmasını da kapsadığı

belirtilmiştir. Sonuç olarak elastik lineer modele dayanan RILEM standardın yorumlamasının ASTM'den daha doğru olduğu; ancak, bu değerlendirmenin düzensiz duvarlar için güvenli tarafta olmadığı ve kayma modülünün değerlendirilmesi için doğru yaklaşımın eksik olduğu ve duvar tipine bağlı olarak düzeltme katsayısının kullanılması ile problemin çözülebileceği sonucuna varılmıştır (Brignola ve ark., 2008).

Faella, C. ve ark. (2010)'un çalışmasında tuf duvarlar, çimento esaslı kompozit bir malzeme ile güçlendirilmiş ve deneysel verileri sunulmuştur. Duvarda meydana gelen kırılmalar, güçlendirme tabaka ile duvar arasındaki bağ koştuktan sonra gerçekleşmiştir. Deneysel çalışma kapsamında diyagonal kayma deneyleri ASTM'ye uygun olarak yapılmıştır. Dokuz adet numune 1200 x 1200 x 400 mm boyutunda hazırlanmış ve güçlendirme malzemesi duvar yüzeyine sıva ile uygulanmıştır. Deney numuneleri yatay olarak örülmüş ve diyagonal olarak basınca maruz bırakılmıştır. Deney sonuçları, yük – deplasman grafikleri halinde verilmiştir. Güçlendirme yapılan duvarların kayma dayanımının referans numunelere göre yaklaşık 6 – 7 kat arttığı yazarlar tarafından ifade edilmiştir (Faella ve ark., 2010).

Milosevic, J. ve ark. (2013)'ün çalışmasında Akdeniz ülkelerinde geleneksel yığma taş binalarda kullanılan moloz taş duvarların mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile 15 adet duvar numunesi eski teknik ve geleneksel malzeme kullanılarak hazırlanmıştır. Numunelerde hava ve hidrolik kireç harçları olmak üzere iki tip harç kullanılmıştır. Deneysel çalışmada moloz duvarların basınç dayanımı, elastisite modülü, başlangıç kayma dayanımı ve diyagonal kayma dayanımı belirlenmiştir. Böylelikle moloz duvarların nümerik modellemede kullanılacak alt temel olan mekanik özellikleri belirlenmiştir. Diyagonal kayma deneyleri için 1200 x 1200 x 700 mm boyutunda 4 adet numune laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. 4 numuneden 2'si hava kireç harcı ve diğer 2'si ise hidrolik kireç harcı ile örülmüştür. Hidrolik kireç harcı ile örülen numunelerin dayanımının hava kireç harcı ile örülen numunelere oranla daha yüksek çıktığı gözlenmiştir. Tüm numunelerin kırılmasında taşlar zarar görmemiş, kırılma harçta oluşmuştur. Son olarak daha önce yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak deney sonuçları değerlendirilmiştir (Milosevic ve ark., 2013).

Dizhur, D. ve ark. (2013)'ün çalışmasında kil tuğladan inşa edilmiş çok katmanlı yığma duvarların düzlem içi kayma dayanımı ve deplasman kapasitelerinin artırılması için elyaf

takviyeli polimer (CFRP) şeritlerin yüzeye yakın (NSM) uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada 10 adet duvar numunesi yaklaşık 1200 x 1200 mm boyutunda geri dönüştürülmüş eski kil tuğlalardan inşaa edilmiş ve değişik takviye oranlarına sahip NSM CFRP ile güçlendirilmiştir. Üretilen numuneler diyagonal kayma deneyine tabi tutulmuş ve sonuçlar aynı malzemeden oluşan takviyesiz referans duvarlarla karşılaştırılmıştır. Ek olarak 4 adet numune mevcut yapı duvarlardan kesilmiş, önce hasara uğratılmış daha sonra yukarıda sözü edilen güçlendirme tekniği kullanılarak güçlendirilmiş ve deneye tabi tutulmuştur. Çalışmanın sonucunda önerilen metodun, bu tip duvarların kayma dayanımı ve deplasman kapasitesini artırmak için basit ve uygun maliyetli bir yöntem olduğu tespit edilmiştir (Dizhur ve ark., 2013) .

Pringle, S. A. (2016) yüksek lisans tezinde sıkıştırılmış kilitli toprak bloklardan inşaa edilen çok katmanlı yığma duvarların kayma dayanımını etkileyen faktörleri araştırmıştır. Önce iki farklı ebada sahip numune (24 x 24 inç ve 36 x 36 inç) hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. Yapılan ön çalışmada duvarların kırılma şekillerine göre deneysel programda kullanılacak numune boyutuna karar verilmiştir. Kırılma şekillerinin ön çalışmada kıyaslanacak düzeyde olmamasına rağmen yazar tarafından numunenin 24 x 24 inç (609 x 609 mm) boyutunda olmasına karar verilmiştir. Deneysel çalışmanın ardından görüntüleme analizi sonuçları da verilmiştir (Pringle, 2016).

Marcari, G. ve ark. (2017) çalışmasında Bazalt tekstil takviyeli harç (BTRM) karışımlarının, yığma duvarların düzlem içi güçlendirmelerindeki kullanımları araştırılmıştır. Deneyde volkanik tüf taşı kullanılmış ve BTRM güçlendirme malzemesi olarak duvarın yüzeyine uygulanmıştır. Deneysel çalışma kapsamında basınç ve diyagonal kayma deneyi gerçekleştirilmiştir. Diyagonal kayma deneyinde referans numuneler iki adet yalın, üç adet tek yüzey güçlendirmeli ve iki adet çift yüzey güçlendirilmeli duvar olacak şekilde üretilmiştir. Tüm numune ebatları 1000 x 1000 x 250 mm olarak inşaa edilmiştir. Çalışmada çatlak deseni, gerilme – şekil değiştirme davranışı, dayanım, sertlik ve deformasyon kapasitesini içeren yapısal tepki özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar, kumaş takviyeli matris sistemleri ile güçlendirilmiş tüf kâgir paneller ile ilgili sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır (Marcari ve ark., 2017).

2.2.3. Nümerik Analiz (Sonlu Elemanlar Metodu)

Günümüzdeki tarihi yapı stoku incelendiğinde genellikle yığma yapılardan oluştuğunu görmekteyiz. Bu binalar her ne kadar çağdaş mühendislik hizmetlerinden yoksun olarak inşa edilmiş olsa da asırlar boyunca deneme yanılma yöntemi ile edinilen tecrübelerin sonucunda oluşan eserlerdir. Bu sebepten birçok yığma yapı geçmişten günümüze kadar çok zor şartlara rağmen ayakta ve ülkelerin kültürel miraslarını temsil etmektedir. Bu mirasların restorasyonu ve korunması ülkelerin en önemli görevlerinden birini teşkil etmektedir. Bu yüzden, son zamanlarda yığma yapıların davranışı bir çok araştırmacı tarafından detaylı olarak araştırılmıştır. Bu araştırmalar kapsamında bu tip binaların analiz ve tasarımında, sonlu elemanlar metodu çokça kullanılmıştır. Aşağıda bu konu ile ilgili bazı değerli çalışmaların özetleri verilmiştir.

Page, A. (1978) çalışmasında yığma duvarların lineer olmayan davranışını dikkate alan ilk sonlu elemanlar modelini önermiştir. Bu modelde yığma duvarlar tuğla ve harç olmak üzere iki ayrı malzemeden oluşmaktadır ve derzler lineer olmayan deformasyon özelliğine sahiptir. Tuğlalar, dört kenarlı düzlemsel gerilme elemanları olarak tanımlanmış ve mekanik özellikleri deneysel verilerden elde edilmiştir. Harç, bağlantı elemanı olarak tanımlanmıştır. Bu elemanlar sadece normal ve kayma doğrultusunda deformasyon yapabilmektedir. Derzlerde kullanılan elemanların kırılma kriterleri deneysel verilerle belirlenmiş olup bu elemanlar yüksek basınç ve düşük kayma dayanımına sahiptir. Bu model çalışmanın yapıldığı zamanında en gerçekçi davranışı sergilediği için önemli bir adım olarak bilinmektedir (Campbell ve Durán, 2017; Page, 1978).

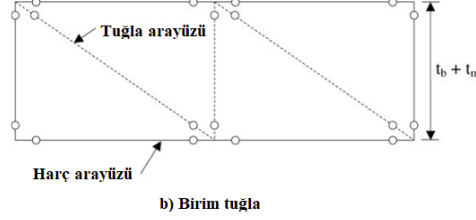
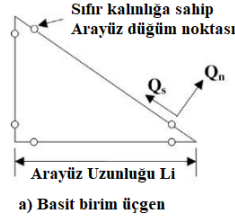
Lourenço, P.B. (1996)'nın doktora tezinde yığma yapıların doğrusal olmayan davranışı ele alınmıştır. Bu çalışmanın temel amacı, mikro ve makro seviyedeki yığma yapılar için güçlü ve güvenilir sayısal araçların geliştirilmesi ve değerlendirilmesi olarak belirlenmiştir. Mikro modellemede kullanılan derzlerin elastik olmayan davranışı üzerinde odaklanılmıştır. Böylece modellenen derzler, çekmede kesme, Coulomb sürtünme modeli ve birleştirilmiş kesme-sıkıştırma kırılmalarını temsil edebilmektedir. Yazara göre önerilen model ile deneysel veriler uyumakta ama model çok detaylı olduğundan uzun zaman ve efora ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden yazar tarafından makro ve basitleştirilmiş mikro modelleme önerilmiş ve homojenizasyon tekniği

değerlendirilmiştir. Son olarak geliştirilen modellerin mühendislik alanında kullanımları değerlendirilmiştir (Lourenço, 1996).

Giordano, A. ve ark. (2002) çalışmasında yığma yapıların analizinde kullanılan farklı sayısal tekniklerin uygulanabilirliği araştırılmış ve 1/1 ölçekli deneysel çalışma verileri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada 3 farklı teknik ele alınmıştır. Bu teknikler sırasıyla ABAQUS paket programı tarafından uygulanan standart FEM modelleme stratejisi, Visual CASTEM 2000 programı tarafından uygulanan süreksiz eleman içeren sonlu elemanlar metodu ve UDEC programı tarafından uygulanan ayrik eleman modellemesi şeklindedir. Birinci teknik homojenleştirilmiş malzeme ve bulaşmış çatlama (smeared cracking) kuralına dayanırken ikinci teknikte düşey ve yatay derzlerin varlığı dikkate alınmaktadır (Giordano ve ark., 2002).

Gabor, A. ve ark. (2006)'nın çalışmasında içi boş tuğla duvarların düzlem içi davranışı numerik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmada duvarların basınç dayanımı, başlangıç kayma dayanımı ve düzlem içi kayma kapasitesi deneysel olarak tasarlanmış ve geliştirilen numerik model ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen modelde tuğla birimleri elastik olarak ve harç ise elastik-tam plastik olarak tasarlanmıştır. Bu modelde duvarın lineer olmayan davranışı derzlerde kullanılan harç tarafından simgelenmektedir. Modelleme Ansys paket programında yapılmış ve elastik-tam plastik formülasyonu için Drucker-Prager kullanılmıştır. Son olarak, geliştirilen modelin lineer olmayan davranışı öngörebilmesindeki en önemli etkenin, uygulanan parametrelerin doğru seçimine bağlı olduğu ifade edilmiştir (Gabor ve ark., 2006).

Chaimoon, K. ve Attard, M.M. (2007)'nin çalışmasında yığma duvarların kesme-basınç kırılması altındaki analizi için numerik bir formülasyon sunulmuştur. Bu formülasyon daha önce Attard and Tin-Loi tarafından betondaki gevrek kırılmayı temsil edebilmek için geliştirilmiştir. Bu çalışmada aynı numerik formülasyon genişletilerek yığma duvarların analizinde de kullanılmıştır. Bu sonlu eleman formülasyonu Şekil 21'de gösterilen üçgenlerden oluşmaktadır. Birim üçgenler sabit gerinimlerden oluşmakta ve düğüm noktaları, kenar doğrultularında yer almaktadır. Köşe ve ortada herhangi bir düğüm noktası yer almamaktadır.



Şekil 21. Önerilen birim üçgen ve oluşturdukları tuğla birimleri

(Kaynak: (Chaimoon ve Attard, 2007))

Yığıma birimler, bu bireysel üçgenlerin birleşiminden meydana gelmektedir. Kırılmalar sınır düğümlerde tanımlanan esas yumuşatma-kırılma yasası ile modellenmiştir. Üçgenin içerisindeki malzeme lineer elastik olarak tanımlanmıştır. Buna karşın lineer olmayan davranış, çekme kesilmesi ve lineer basınç başlığı olan bir Mohr-Coulomb kırılma yüzeyi kullanılarak modellenmiştir. Bahsedilen formülasyon mevcut deneysel ve diğer numerik modellerle karşılaştırılmıştır (Chaimoon ve Attard, 2007).

Senthivel, R. ve Lourenço, P.B. (2009)'un çalışmasında aksenal ve yanal yüklemeye maruz kalan tarihi duvarların yük-deplasman zarfı ve göçme durumları gibi deplasman özelliği, deneysel test verilerine dayalı iki boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir. Çalışmada 3 farklı duvar tipi kullanılmıştır. 1. tip düzgün kesme taştan oluşan harçsız duvarlar, 2. tip düzgün olmayan kesme taşlardan oluşan harçlı duvarlar ve 3. tip ise moloz taştan örülmüş harçlı duvarlardır. Nümerik analizlerde plastisite teorisine dayalı mikro modelleme kullanılmıştır. Taş birimleri, tam Gauss entegrasyonlu, sekiz düğümlü sürekli düzlem gerilme elemanları kullanılarak modellenmiştir. Harç ise Lobatto entegrasyonlu altı düğümlü sıfır kalınlığa sahip çizgisel ara yüz elemanları kullanılarak modellenmiştir. Çalışmada deneysel sonuçlar, nümerik analiz ayrıntıları ve elde edilen yük – deplasman zarfları ile göçme durumları verilmiştir. Çalışmada nümerik analizinde kullanılan yöntemin, deneysel verilerle örtüştüğü sonucuna varılmıştır (Senthivel ve Lourenço, 2009).

Wang, J. (2014) çalışmasında deneysel verilere dayalı üç boyutlu sonlu elemanlar analizinin detaylarını sunmuştur. Çalışmada birleşik eksenel düşey ve yatay kayma yüklere maruz kalan yığma duvarların deplasman özelliğini modellemek amacı ile yeni bir model önerilmiştir. Bu model sonlu-ayrık modelleme tekniğini içermektedir. Modelleme kapsamında bireysel tuğlalar elastik, harç ise kohezif bölge (cohesive zone material) olarak tanımlanmıştır. Nümerik analizden elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmış ve önerilen modelin sonuçlarının başarılı olduğu görülmüştür (Wang, 2014).

Abdulla, K. F., ve ark. (2017)'nin çalışmasında plastisiteye dayalı kurucu modeller ve genişletilmiş sonlu elemanlar yönteminin (XFEM) bir kombinasyonunu kullanan basitleştirilmiş bir mikro model yaklaşımı önerilmiştir. Yaklaşımın, monotonik düzlem içi, düzlem dışı ve tersinir tekrarlanır yükler altında duvarın üç boyutlu doğrusal olmayan davranışını simüle etmenin etkili bir yol olduğu gösterilmiştir. Bu yapısal model, duvar derzlerinin elastik ve plastik davranışını yakalamak için yüzey bazlı birleşik davranış (surface-based cohesive behaviour) ve basınç altında duvarın ezilmesini simüle etmek için bir Drucker Prager (DP) plastisite modelini içermektedir. XFEM'nin özgün tarafı ise duvar birimlerinde çatlak konumunun ilk tanımı olmadan çatlak yayılmasını simüle etmesidir. Son olarak çalışmada modelin, düşey ve yatay yükler altında duvarın doğrusal olmayan davranışını ve göçme modlarını yakalayabilme yeteneği, literatürdeki bir dizi deneysel çalışma ile karşılaştırılarak gösterilmiştir (Abdulla ve ark., 2017).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarların mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve ardından nümerik analizlerin gerçekleştirilmesi için yapılan deneyler, deney yöntemleri, kullanılan standartlar, deney sırasında toplanan veriler ve sonlu elemanlar yöntemi ile nümerik analizlerin yapılması hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında önce bireysel elemanların mekanik özellikleri belirlenmiş daha sonra tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların mekanik özellikleri mikro ve makro boyutlu numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmanın ardından tasarlanan duvarlar, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiş ve analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırılıp değerlendirilmiştir.

3.1. Bireysel Elemanların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Yığma yapılarda kullanılan taşıyıcı duvarlar, genellikle birden fazla bireysel elemandan oluşmaktadır. Bu bireysel elemanlar, ana malzemeler (taş, tuğla, kerpiç vb.) ve bağlayıcı malzemeler (harçlar) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Buna bağlı olarak yığma duvarlarda yük transfer mekanizması sürekli olmayıp bu iki malzemenin birleşim yerlerinde süreksizlikler meydana gelmektedir. Bunun sebebi duvarlarda kullanılan bireysel elemanların mekanik özellikleri birbirinden farklı olması ve yük transfer sırasında farklı davranış gösterebilmeleridir. Yığma yapıların statik hesaplamalarının doğru bir şekilde yapılabilmesi için kullanılan bireysel elemanların mekanik özellikleri belirlenmeli ve buna ek olarak bu malzemelerin birlikte nasıl bir davranış sergiledikleri uygun deneylerle gözlenmelidir. TBDY 2018 – 11. bölümünde, yığma duvarların tasarım aşamasına geçmeden önce, duvarın hangi mekanik özelliklere sahip olduğunun belirlenmesi ve bunun için yapılabilecek deneyler ve ilgili standartlara yer verilmiştir (TBDY, 2018).

Tez kapsamında tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarlarda, doğal taş, harç ve metal bağlantı elemanları olmak üzere üç farklı bireysel malzeme kullanılmıştır. Doğal taş olarak Mayra bej, harç olarak kireç ve horasan harçları ve bağlantı elemanları olarak metal kenet ve zıvana tercih edilmiştir. Aşağıda bu üç malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi detaylı olarak açıklanmıştır.

3.1.1. Taş

Deneysel çalışma kapsamında duvar numunelerinde kullanılan doğal taş, Antalya ve civarındaki taş ocaklardan blok halinde temin edilen kireçtaşının bir çeşididir. Bu taş piyasada Mayra bej mermeri olarak bilinmekte ve ocaktan kesilip işlendikten sonra inşaat sektörünün farklı alanlarında kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan Mayra bej taşının sadece mekanik özellikleri belirlenmiştir. Mekanik özellikler kapsamında taşın *basınç dayanımı*, *elastisite modülü* ve *kesme dayanımı* ilgili standartlara uygun olarak belirlenmiştir.

3.1.1.1. Taşın basınç dayanımının belirlenmesi

Myra bej taşının basınç dayanımı TS EN 1926 (2006)'ya göre belirlenmiştir. Taşın homojen bir malzeme olmadığı ve aynı ocaktan alınmış olsa bile farklı davranış gösterdiği bilinmektedir (Demir, 2012). Bu sebepten dolayı deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere gelen her paletten numuneler alınarak toplamda 30 adet numune 50 x 50 x 50 mm boyutunda taş kesme makinesi ile kesilip basınç deneyi için hazırlanmıştır (Şekil 22).



Şekil 22. Taşların kesilmesi ve basınç deneyi için hazırlanması

Basınç deneyi için 2000 kN yükleme kapasitesine sahip beton pres, yük hücresi (loadcell) ve potansiyometre cetvel olarak LVDT'ler kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 23'te verilmiştir. Deney sırasında düşey yük ile numunedeki boy değişimi, sırasıyla yük hücresi ve LVDT'ler ile bilgisayara aktarılmıştır. Numunelerin basınç dayanımı Denklem 2'de verildiği gibi maksimum düşey yükün, numunenin deney öncesi en kesit alanına oranı olarak hesaplanmıştır. Her numunede oluşan gerinim ise iki LVDT'den alınan boy

değişimin ortalaması alınarak numunenin ilk yüksekliğine oranlanarak hesaplanmıştır. Daha sonra her bir numunenin gerilme – gerinim (şekil değiştirme) diyagramı çizilerek taşların ortalama basınç dayanımı belirlenmiştir.

$$f_c = \frac{F_{maks}}{A} \quad (2)$$

Basınç deneyi sırasında numunelerdeki boy değişimleri gerinim ölçerlerle (strain gauge) de ölçülebilmektedir ancak literatürde sözü edilen tecrübelerle göre, özellikle basınç dayanımı yüksek olan taşlarda, basınç deneyi sırasında taşın yüzeyinde patlamalar ve dökülmeler olabilmektedir. Bu dökülmeler bazen taşın nihai dayanımına ulaşmadan önce meydana gelebilmektedir. Böylece yüzeydeki patlamalarla birlikte gerinim ölçerlerin işlevi tamamen ortadan kalkmaktadır Bundan dolayı ölçümlerin daha sağlıklı olabilmesi için taşın altına ve üstüne koyulan iki çelik levha arasındaki deplasmanlar potansiyometrik cetveller (LVDT) vasıtası ile ölçülmüştür. Yapılan akademik araştırmalara bakıldığında numunenin boy değişimlerinin ölçümünde her iki cihazın da kullanılabilceği deneysel olarak gösterilmiştir (Oliveira ve ark., 2006).



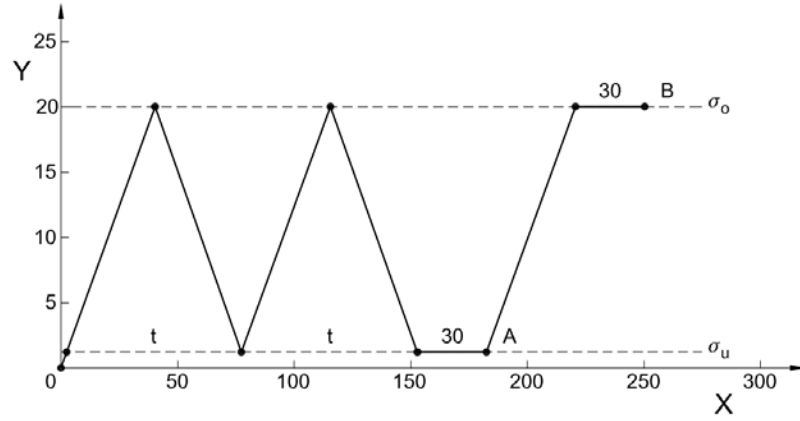
Şekil 23. Taşların basınç deney düzeneği

3.1.1.2. Elastisite modülü

Deneysel çalışmalarda kullanılan taşların elastisite modülü, TS EN 14580 (2006) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere laboratuvara getirilen taşlardan, 6 adet numune 50 x 100 x 200 mm boyutunda ve rastgele

seçilmiştir. Deney başlamadan önce numuneler etüvde (70 ± 5) °C sabit ağırlığa ulaşınca kadar kurutulmuş ve daha sonra TS EN 14580 (2006) standardına uygun olarak deneye tabi tutulmuştur. Deneyde 2000 kN yük basma kapasitesine sahip hidrolik pres, iki adet potansiyometre cetvel (LVDT) ve bir adet yük hücresi kullanılmıştır.

Taşların elastisite modülünün TS EN 14580 (2006) standardına uygun olarak belirlenebilmesi için Şekil 24'te verilen yükleme yöntemi uygulanmıştır. Şekil 24'te verilen grafikte x eksenini zamanı (saniye), y eksenini ise taşların ortalama basınç dayanımının yüzdesini temsil etmektedir. Bu bağlamda önce taşların basınç dayanımı TS EN 1926 (2006)'ye göre belirlenmiş, daha sonra Şekil 24'te verilen yükleme uygulanmıştır.



Şekil 24. Elastisite modülü deneyinde yükleme düzeni

Numuneler Şekil 25'te gösterilen düzeneğe yerleştirildikten sonra ortalama basınç dayanımının %20'sine denk gelecek yüklerle yüklenmiştir. Daha sonra yük %1 seviyelerine kadar indirilmiş ve tekrar %20 seviyesine çıkarılmıştır. İkinci kez yük %1 seviyesine indirildiğinde 30 saniye bekletilerek oluşan d_u deformasyonu ölçülmüştür. Son aşamada numuneler ortalama basınç dayanımının %20'si kadar tekrar yüklenmiş, 30 saniye bekletilmiş ve oluşan d_o deformasyonu ölçülmüştür. Bu aşamadan sonra numune tamamen kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilmiştir. Ölçülen yükler numunenin kesit alanına oranlanarak gerilme elde edilmiştir.



Şekil 25. Elastisite modülü deney düzeneği

ε_o , ε_u gerinimleri ölçülen deplasmanlar (d_u , d_o), numunenin ilk yüksekliğine ($l_o = 200$ mm) oranlanarak birim deformasyon şeklinde hesaplanmıştır. Numunenin elastisite modülü ise Denklem 3'te verilen eşitlik kullanılarak belirlenmiştir.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} \quad (3)$$

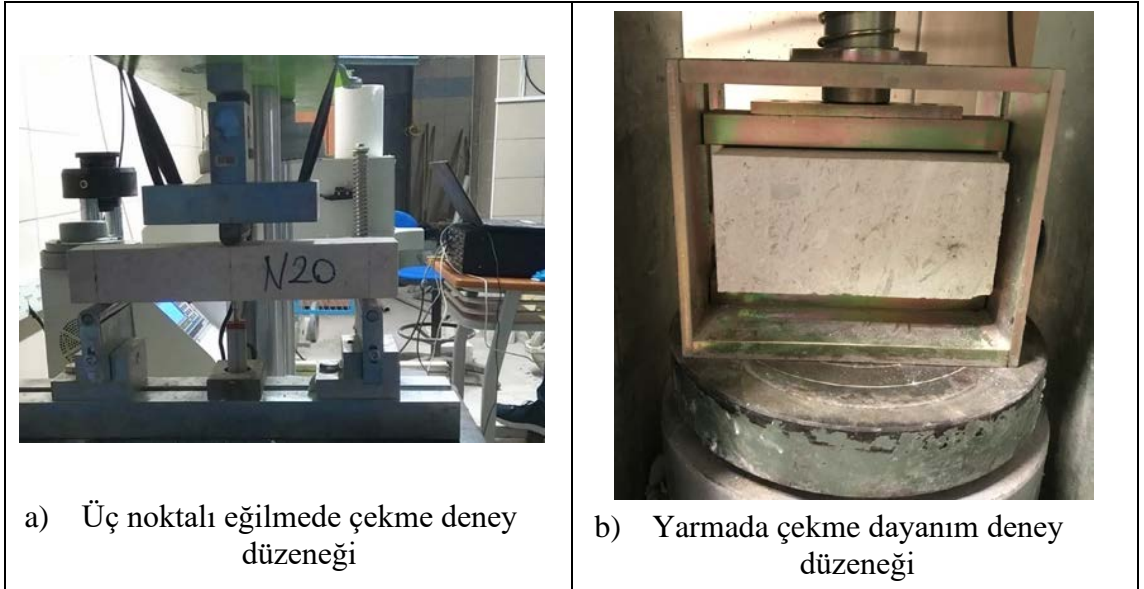
3.1.1.3. Kesme dayanımı

DeneySEL çalışmalarında kullanılacak taşların kesme dayanımı iki yöntemle belirlenmiştir. Bu yöntemlerden birincisi TS EN 12372 (2006) standardına uygun olan üç noktalı eğilmede çekme dayanım deneyi (Şekil 26.a) ve ikincisi ise TS EN 12390-6 (2010) standardına uygun olan yarmada çekme dayanım deneyidir (Şekil 26.b). Üç noktalı eğilmede çekme deneyi için toplamda 20 adet numune ilgili standarda uygun olarak 50 x 50 x 300 mm boyutunda hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. Yarmada çekme dayanım deneyi için ise 6 adet 100 x 100 x 200 mm boyutunda numuneler farklı taş paletlerden rastgele seçilmiştir. Her iki yöntem için numuneler, deneyden önce etüvde (70 ± 5) °C sabit ağırlığa ulaşınca kadar kurutulmuştur. Eğilmede çekme deneyinde mesnetler arasındaki mesafe 250 mm olup yükleme hızı deney boyunca ($0,25 \pm 0,05$) MPa olarak uygulanmıştır. Yarmada çekme deneyinde ise yükleme hızı 0,04 – 0,06 MPa/s arasında kalacak şekilde ayarlanmıştır. Taşların kesme dayanımları, TS EN 12372 (2006) ve TS EN 12390-6 (2010) standartlarının belirttiği formüllere uygun olarak

sırasıyla Denklem 4 ve 5'te verilen eşitliklerle hesaplanmıştır. Denklem 4'deki R_{tf} numunenin eğilme dayanımını (MPa), F_e nihai kırılma yükünü (N), l iki mesnet arasındaki mesafeyi (mm) ve bh numune genişliği ve yüksekliğini (mm) temsil etmektedir. Buna karşın Denklem 5'teki f_{ct} numunenin yarmada çekme dayanımını (MPa), F nihai kırılma yükünü (N), L dikdörtgen numunenin uzunluğunu (mm) ve d aynı numunenin yüksekliğini (mm) simgelemektedir.

$$R_{tf} = \frac{3F_e l}{2bh^2} \quad (4)$$

$$f_{ct} = \frac{2F_y}{\pi Ld} \quad (5)$$



Şekil 26. Taşların eğilme deney düzeneği

3.1.2. Harçlar

İçi boş çok katmanlı doğal taş duvarlarda, harcın etkisini araştırmak için kireç ve horasan olmak üzere iki farklı geleneksel harç kullanılmıştır. Her iki harç için önce harçların karışım oranları daha sonra mekanik özellikleri uygun deneylerle belirlenmiştir. Kireç harcı için karışım oranları, Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan *Birim Fiyat, Analiz ve Yapım Şartlarındaki* (Vakıflar Gen. Müd., 2020) *V.0108/C pozu*, literatür araştırmaları ve bu konuda tecrübeli araştırmacıların fikirleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Kireç harcında bağlayıcı/agrega oranı 1:3 olarak belirlenmiştir (Vakıflar Gen. Müd., 2020). Bağlayıcı olarak kireç kaymağı ve agrega olarak da 3:2:1 oranı ile dere

kumu (siyah kum), beyaz kum ve taş tozu kullanılmıştır. Duvarlardaki derz kalınlıklarının 2 mm olmasından dolayı tüm agrega bileşenleri yıkanmış ve 2 mm'lik elekten elendikten sonra kullanılmıştır.

Horasan harcı için bağlayıcı/agrega oranı kireç harcında olduğu gibi 1:3 olarak belirlenmiştir. Bağlayıcı olarak kireç kaymağı ve agrega olarak da 2:2:1:1 oranla dere kumu (siyah kum), beyaz kum, taş tozu ve kiremit tozu kullanılmıştır.

Tez kapsamında hazırlanan harçların sadece mekanik özellikleri belirlenmiştir. Harçların mekanik özelliklerinin belirlenmesi kapsamında, iki harcın basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı TS EN 1015-11 (2000)'e göre belirlenmiştir. Harçların zamanla dayanım kazanmalarını izleyebilmek için belli aralıklarla mekanik özellikleri belirlenmiş ve kaydedilmiştir. Başlangıçta harçların 7 ve 28 günlük dayanımı belirlenmiş, sonrasında birer ay ara ile 10 ay boyunca dayanımları ölçülmüştür. Harçların basınç ve eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi için üçer adet numune kullanılmıştır. Eğilmede 40 x 40 x 160 mm boyutlarındaki numuneler, basınç deneyinde ise eğilme deneyi sonucunda kırılan numunelerden elde edilen 40 x 40 x 40 mm boyutlarındaki numuneler kullanılmıştır. Bu deneyler KTO Karatay Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuvarı bünyesinde bulunan bilgisayar kontrollü tam otomatik 200 kN basma ve 10 kN eğilme kapasiteli çimento test pres cihazı kullanılarak yapılmıştır.

3.1.3. Bağlantı elemanları

Doğal taş binalarda metal bağlantı elemanlarının uygulamaları çok eski tarihlere dayanmaktadır. Yaklaşık MÖ 2500 yıllarında Gizeh'deki Sfenks Tapınağı'nın büyük bloklarında kullanılan bakır kenetler, muhtemelen metal bağlantı elemanlarının ilk yapısal kullanımınıdır. Metal bağlantı elemanlarının taş binalarda kullanım amacı; taşıyıcı duvarların taşıma gücünü artırmaktan ziyade deprem gibi yatay yüklere karşı rijitliği artırmak ve yatay deplasmanları sınırlandırmaktır (Wright, 2005). Doğal kesme taş binalardaki bağlantı elemanlarının uygulamalarına bakıldığında, bu bağlantı elemanları sadece metal olmayıp ahşap, bakır ve bronz gibi birçok malzemeden olabildiği görülmektedir. Taş yığma duvarlarda kullanılan bu bağlantı elemanları üzerinde yapılan akademik çalışmalar sınırlı olsa da literatürde bazı değerli çalışmalar mevcuttur (Demir,

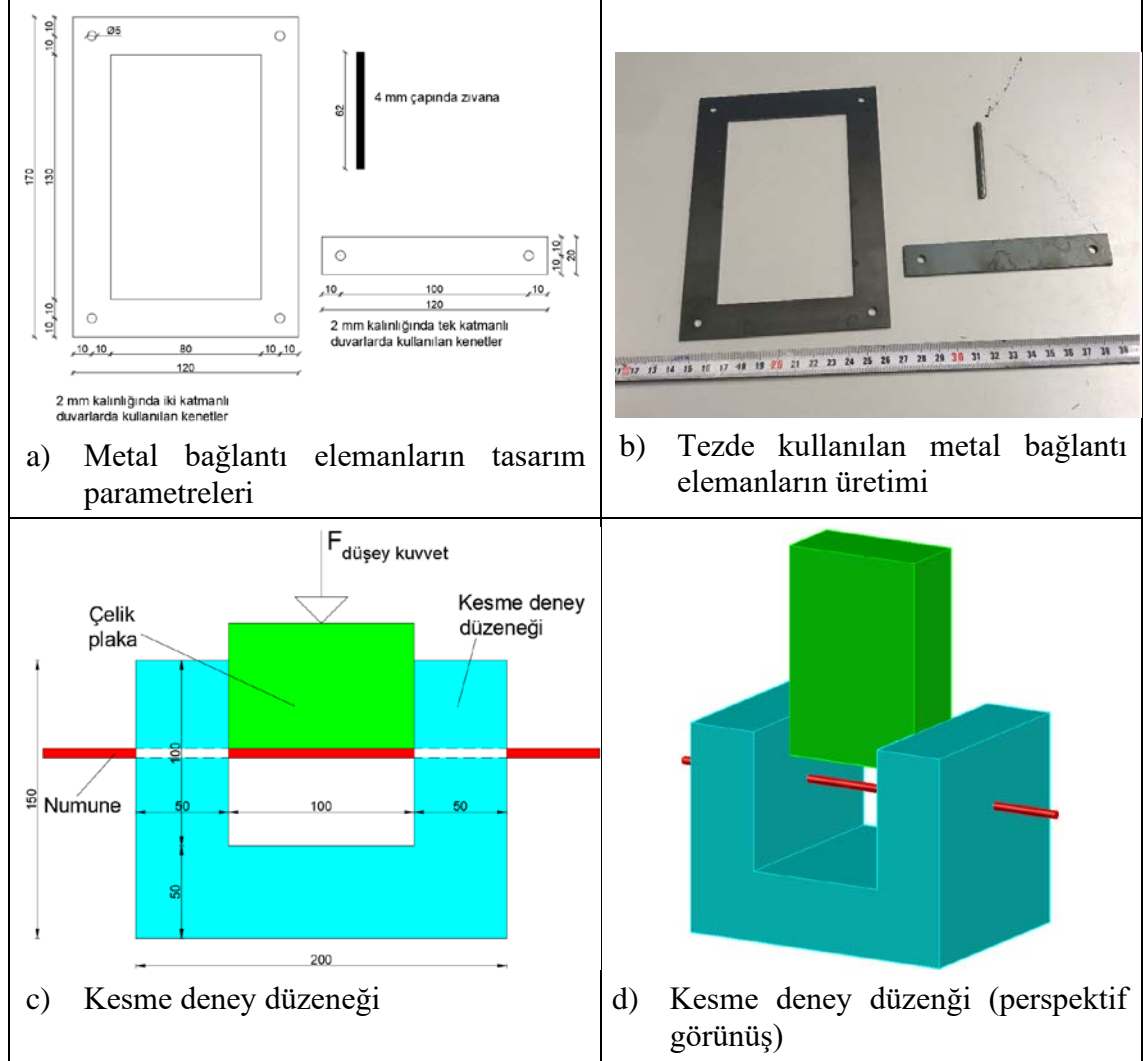
2012). Bu çalışmada içi boş çok katmanlı doğal taş duvarlarda kullanılmak üzere Şekil 27'de verilen kenet ve zıvana tipleri kullanılmıştır.

Kenet ve zıvanalar bu tez kapsamında tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarlara özgün olarak imal ettirilmiştir. Kenet ve zıvanaların özgün tarafı, arasında boşluk bulunan iki katmanı birbirine bağlayarak, içi boş çok katmanlı doğal taş duvarın düzlem içi ve düzlem dışı stabilitesini sağlamasıdır. Ek olarak katmanlardaki her bireysel taş, zıvanalar aracılığı ile birbirine bağlanmıştır. Yapılan literatür araştırmalarında böyle bir kenet ve zıvananın uygulamasına hiç rastlanmadığı için tasarım parametrelerinin belirlenmesi oldukça önem kazanmıştır. Bu kapsamda önce kenet ve zıvanalarda kullanılan çeliğin çekme dayanımı, daha sonra kenetlerin genişlikleri ile kalınlıkları, zıvanaların ise çapı, boyu ve kesme dayanımı belirlenmiştir (Şekil 27.c ve d).

Kenetler S235JR çeliğinden imal edilmiş ve mekanik özellikleri KTO Karatay Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuvarında bulunan 600 kN kapasiteli çelik çekme cihazı ile belirlenmiştir. Kenetlerin genişliği daha önce yapılan çalışmalar dikkate alınarak 20 mm olarak seçilmiştir (Demir, 2012). Kenetlerin boyu ise duvarlardaki derz yüksekliğine eşit olacak şekilde 2 mm olarak seçilmiştir.

Zıvanalar duvarın düzlem içi davranışını etkilediği için, tasarım parametrelerinin belirlenmesi önem kazanmıştır. Bundan dolayı zıvanaların mekanik özelliklerinin belirlenmesinin yanı sıra optimum çap ve boyu gibi parametreler ön çalışma ile belirlenmiş, daha sonra belirlenen boyutlardaki zıvanalar deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Tez kapsamında kullanılan zıvanaların çapı küçük olduğundan (3 – 6 mm) ve normal inşaat donatısı (S420) bu çaplarda bulunmadığından zıvanaların üretimi için hasır çeliği kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan her zıvana çapından üçer adet numune alınmış ve çelik çekme deneyine tabi tutularak çekme dayanımı belirlenmiştir. Optimum çapını belirleyebilmek için 3, 4, 5 ve 6 mm çaplarındaki zıvanalar bir seri başlangıç kayma deneyleri yapılmıştır. Deney numuneleri TS EN 1052-1 (2000) standardına uygun ebatla üretilmiş ve standarda uygun olarak deneye tabi tutulmuştur. Bu deney için hazırlanan numunelerde sadece kenet ve zıvana kullanılmış, harç kullanılmamıştır. Uygun zıvana çapının bulunması için başlangıç kayma deneylerinde ana kriter, taşın kırılmaması ancak zıvanaların kesilmesi olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan her bir çap için 9 adet deney numunesi hazırlanmış ve üç farklı düşey yükleme

altında deneye tabi tutulmuştur. Zıvanaların boy detayları Şekil 27.a’de gösterildiği gibi 62 mm olarak seçilmiştir. Bunun sebebi zıvanaların boyunun kesme dayanım kapasitesinin artışıyla çok az etkili olmasıdır (Buzov ve ark., 2019).



Şekil 27. Kenet ve zıvana detayları (ölçüler mm ölçeğindedir) ve kesme deney düzeneği

3.2. Duvarların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu bölümde tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların düzlem içi davranışının belirlenmesi için yürütülen deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Deneyler mikro ve makro boyutlu numunelerle iki farklı kategoride yapılmıştır. Her iki kategorideki duvar numunelerinde bireysel taş birimlerin boyutu 100 x 100 x 100 mm ve 100 x 200 x 100 mm olarak seçilmiştir. Bunun sebebi doğal taş duvarların basınç ve kayma dayanımı gibi düzlem içi davranışı belirlenirken, gelen maksimum kuvvetlerin etkiyen yüzey alana oranı olarak hesaplanmasıdır Böylece duvarın genişliğinin değişmesi, duvarın narinlik

oranının sabit kalması şartı ile sadece etkiyen yüklerin değişmesine sebep olmakta ve nihai dayanıma ciddi bir etkisi olmamaktadır. Yani kısaca seçilen bireysel elemanların ebatları duvar numunelerin davranışını etkilememektedir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan 100 x 100 x 100 mm ve 100 x 200 x 100 mm ebatlarındaki taşlarda zıvana delikleri, Şekil 28’de gösterildiği gibi laboratuvarında bulunan sütunlu matkapla 90° olacak şekilde açılmıştır. Taşlardaki zıvana delikleri, zıvana çapı + 1 mm olacak şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 28. Taşlarda zıvana deliklerin açılması

3.2.1. Mikro boyutlu numuneler

Bu bölümde mikro boyutlu numunelerin düzlem içi davranışının belirlenebilmesi için yürütülen deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Yapılan deneyler, TBDY (2018) , 11.2. maddesinde belirtilen standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda duvarların *basınç dayanımı*, *Elastisite modülü* ve *başlangıç kayma dayanımının* belirlenme yöntemi detaylı olarak açıklanmıştır. Numune boyutları ilgili standartlara uygun olarak belirlenmiş ve deneysel çalışma tek ve çift katmanlı duvarlar üzerinde yürütülmüştür.

3.2.1.1. Basınç dayanımı

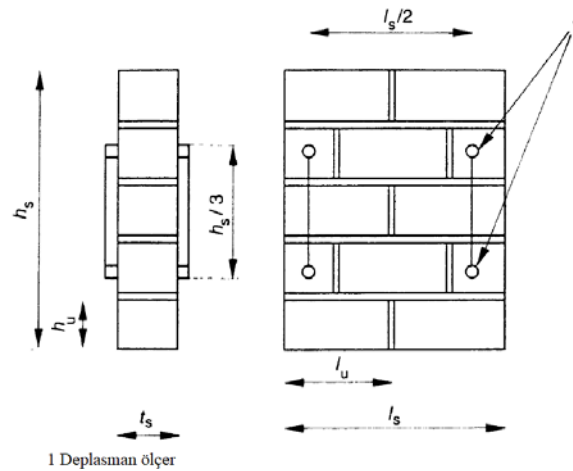
Yığma yapılarda duvarların basınç dayanımının belirlenmesi en önemli hususlardan biridir. Bunun iki sebebi vardır. Birincisi proje tasarım aşamasında taşıyıcı duvarların kesitinin belirlenebilmesi için duvarın basınç dayanımının bilinmesi gerekir, ikincisi ise

taşıyıcı duvarlarda kullanılan bireysel elemanların mekanik özellikleri, eleman bazında bilinse de duvar içerisinde bu elemanların birlikte nasıl bir davranış sergileyecekleri ön görülemeyebilir. Özellikle tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların derzlerinde kullanılan kenetlerin, duvar basınç dayanımındaki etkisi bilinmemektedir. Deneyleerde kullanılan bu duvarların basınç dayanımı TS EN 1052-1 (2000) standardına uygun olarak belirlenmiştir.

Basınç deneyi için üretilen mikro boyutlu numunelerin boyutu, TS EN 1052-1 (2000) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Standartta numunelerin boyutu, kullanılan bireysel elemanların (taş, tuğla vb.) boyutuna bağlı verilmiştir. (Tablo 1) (Şekil 29). Buana göre tez kapsamında mikro boyutlu numunelerin boyutu 400 x 500 x 100 mm (uzunluk x yükseklik x genişlik) şeklinde belirlenmiştir.

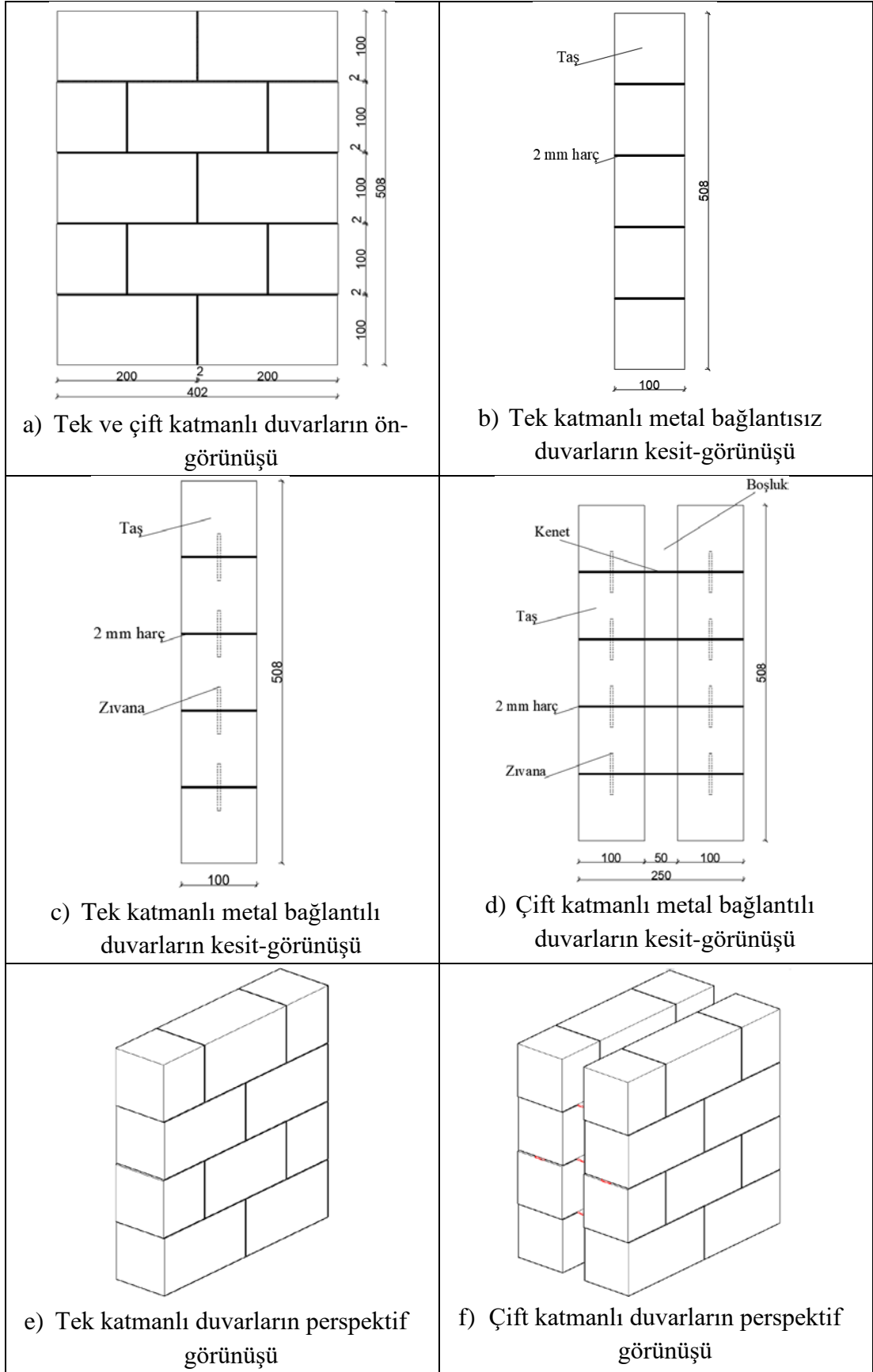
Tablo 1. Basınç deney numuneleri için TS EN 1052-1 standardın kuralları

Bireysel eleman boyutu		Basınç deneyin numune boyutu		
l_u (mm)	h_u (mm)	Uzunluk l_s (mm)	Yükseklik h_s (mm)	Genişlik t_s (mm)
≤ 300	≤ 150	$\geq (2 \times l_u)$	$\geq 5h_u$	$\geq t_u$
	> 150		$\geq 3h_u$ $\geq 3t_s$ ve $\leq 15t_s$ ve	
> 300	≤ 150	$\geq (1,5 \times l_u)$	$\geq 5h_u$ $\geq l_s$	
	> 150		$\geq 3h_u$	



Şekil 29. TS EN 1052-1 standardın önerdiği numune boyutu

(Kaynak: (TS EN 1052-1, 2000))



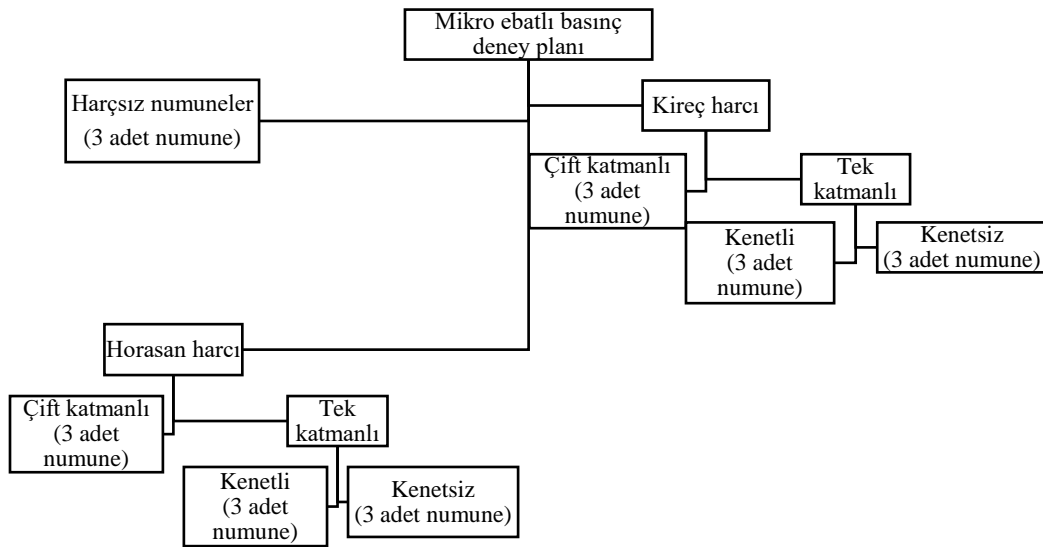
Şekil 30. TS EN 1052-1 standardına uygun hazırlanan basınç deney numuneleri

Numunelerin boyutu belirlendikten sonra toplamda 21 adet tek ve çift katmanlı duvar numunesi hazırlanmıştır. Bu numunelerden 3 adedi harçsız ve metal bağlantı elemanlar kullanılmadan sadece taşların üst üste konulmasından oluşmaktadır. Kalan 18 adet duvar numunenin yarısı (9 adedi) kireç harcı ve diğer yarısı (9 adedi) horasan harcı ile örülmüştür (Şekil 30).







Tablo 2. Mikro basınç deney numunelerin kodlama düzeni

Duvar tipi	Kenet durumu	Kullanılan harç	Kod adı	Numune sayısı
Tek katmanlı	Kenetsiz	Harçsız	SWC	3
Tek katmanlı	Kenetsiz		SWLC	3
Tek katmanlı	Kenetli	Kireç harcı	SWMLC	3
Çift katmanlı	Kenetli		DWMLC	3
Tek katmanlı	Kenetsiz	Horasan harcı	SWHC	3
Tek katmanlı	Kenetli		SWMHC	3
Çift katmanlı	Kenetli		DWMHC	3

Her harç grubu için 3 adet çift katmanlı ve 6 adet tek katmanlı numune hazırlanmıştır. 6 adet numune içerisinde 3 adedi bağlantı elemanı içermekte ve diğerleri içermemektedir. Hazırlanan çift ve tek katmanlı numunelerin boyut ve görünüşleri Şekil 30'da verilmiştir. Numune dağılımının kolayca anlaşılabilmesi için Şekil 31'de şematik olarak gösterilmiştir. Basınç deneyi kapsamında üretilen numunelerin tipleri ve kodlama düzeni Tablo 2'de ve örülen duvar numunelerinin imalat aşamaları ile son halleri ise Şekil 32'de verilmiştir.

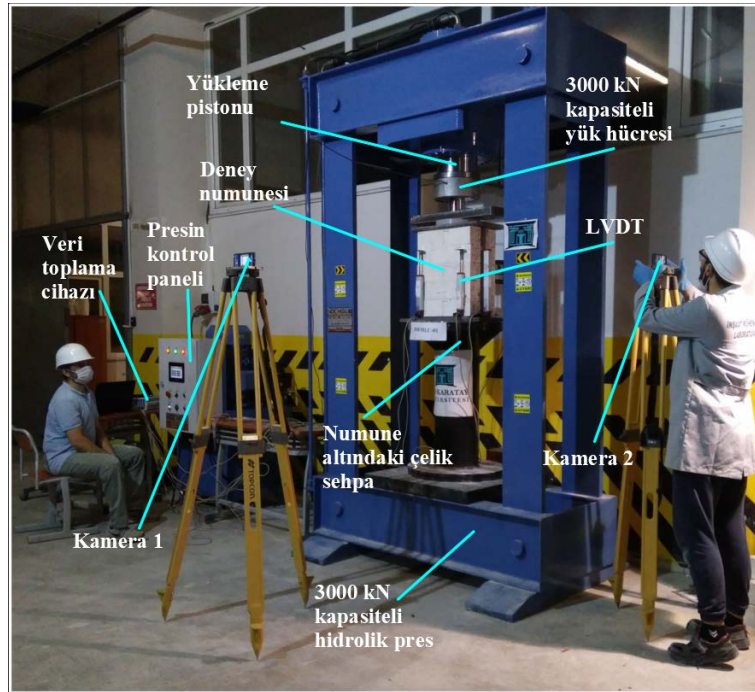


Şekil 31. Mikro boyutlu basınç deneyi için numune dağılımı

 <p>a) Tek katmanlı duvarın imalat aşaması (Kenetsiz)</p>	 <p>b) Tek katmanlı duvarın son hali (Kenetsiz)</p>
 <p>c) Tek katmanlı duvarın imalat aşaması (Kenetli)</p>	 <p>d) Tek katmanlı duvarın son hali (Kenetli)</p>
 <p>e) Çift katmanlı duvarın imalat aşaması</p>	 <p>f) Çift katmanlı duvarın son hali</p>

Şekil 32. Basınc deney numunelerinin imalat aşamaları

Deneyde 3000 kN kapasiteye sahip hidrolik pres kullanılmıştır. Numuneler prese yerleştirildikten sonra üzerine 30 mm kalınlığında çelik bir plaka yerleştirilmiştir. Bunun amacı presin noktasal yük uygulanmasını önlemek ve yükü numuneye düzgün olarak yayılmasını sağlamaktır. Şekil 33'te verilen basınç deney düzeneğinde görüldüğü gibi düşey yükü ölçebilmek için bir adet 3000 kN kapasiteli yük hücresi ve deplasmanları ölçebilmek için potansiyometre cetveli (LVDT) kullanılmıştır. LVDT'lerin yerleşimi TS EN 1052-1 (2000) standardına uygun olarak, iki adet LVDT numunenin ön tarafında, iki adet LVDT numunenin arka tarafında yerleştirilmiştir. Ek olarak iki adet LVDT alt ve üst çelik plaka arasında ve bir adet de duvarın düzlemine dik olacak şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 33. Mikro boyutlu basınç deney düzeneği

Duvar numunelerinin *basınç dayanımı* Denklem 6'da verilen eşitlikle hesaplanmıştır. Numunelerin *Elastisite Modülü'nün* hesaplanabilmesi için öncelikle LVDT'lerle ölçülen deplasmanlar duvar numunelerin ilk boyuna bölünerek ϵ (birim şekil değiştirme) elde edilmiştir. Daha sonra maksimum kırılma yükünün 1/3'üne karşılık gelen eden gerilme aynı seviyedeki birim şekil değiştirmeye oranlanarak hesaplanmıştır. Denklem 7 duvar numunelerin Elastisite Modülünün hesabı için kullanılan eşitliği göstermektedir.

$$f_{md} = \frac{F_{md,maks}}{A_{md}} \quad (6)$$

$$E_{md} = \frac{F_{md,maks}}{3 \times \varepsilon_{md} \times A_i} \quad (7)$$

3.2.1.2. Başlangıç kayma dayanımı

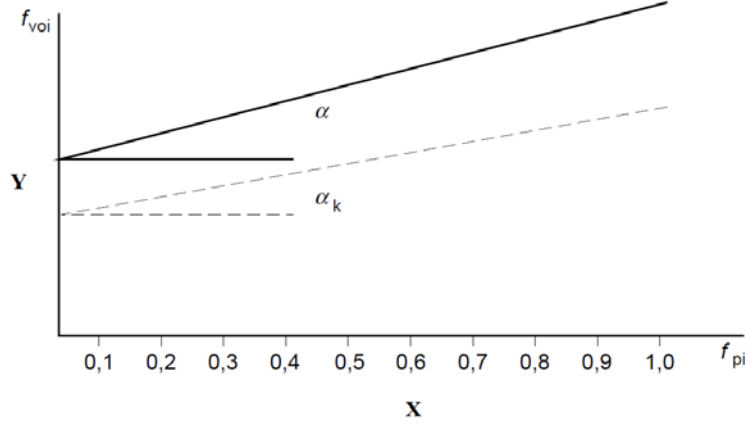
Doğal taş duvarların bölgesel kayma gerilmeleri birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve bu çalışmaların bazıları Bölüm 2.2.1.2.'de özetlenmiştir. Yapılan araştırmalarda genel olarak harçlı ve harçsız numunelerin davranışını ele alınmıştır. Ancak bilindiği kadarıyla kenetli ve zıvanalı sistemlerin bölgesel kayma gerilmeleri, herhangi bir çalışmanın konusu olmamıştır. Bundan dolayı tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarların bölgesel kayma gerilmeleri önce deneysel olarak belirlenmiş daha sonra nümerik analizlerden elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

Yığma duvarların kayma dayanımlarında, normal ve kayma gerilmeleri arasındaki ilişki oldukça önemlidir. Bu ilişki, yığma duvarların derzlerindeki kayma kırılmalarını yönlendirecek bir role sahiptir. Normal gerilmeler belli bir seviyeyi aşınca kayma gerilmelerinde düşüş gözlenmektedir. Bu, kaymanın yanı sıra bireysel elemanlarda (taş, tuğla vb.) basınçtan dolayı kırılmaların meydana gelmesindedir. Buna karşın normal gerilmelerin yukarıda sözü edilen seviyeden daha düşük olduğu durumlarda derzdeki kaymalar sadece bireysel eleman ve harç yüzeyinde gerçekleşmektedir. Böyle bir durumda normal gerilmelerdeki artış kayma gerilmelerin de artışına sebep olmaktadır. Bundan yola çıkarak orta dereceli normal gerilmelerde harcın lineer olmayan davranışı ihmal edildiği ve sürtünmenin egemen olduğu durumda yığma duvarların kayma dayanımları Coulomb kriteri (Denklem 8) ile belirlenebilmektedir (Vasconcelos, 2005).

$$\tau_b = c + \mu \sigma_b \quad (8)$$

Denklem 8'deki c , kohezyon olarak bilinen sıfır normal gerilmeye karşılık gelen kayma dayanımını, μ sürtünme katsayısını ve σ normal (basınç) gerilmeyi temsil etmektedir. c 'nin hesabı, TS EN 1052-3 (2002) standardına göre yapılmaktadır. Bu standarda göre her duvar tipi için üretilen 9 adet numune, üç farklı normal gerilme altında başlangıç kayma deneyine tabi tutulmakta ve kayma dayanımları belirlenmektedir. Daha sonra

Şekil 34'te gösterildiği gibi her kayma gerilmesine karşı gelen normal gerilmelerin grafiği çizilmektedir. Çizilen grafiğe lineer regresyon analizi uygulandıktan sonra normal gerilmenin sıfır olduğu değere karşılık gelen kayma dayanımı (y düzlemindeki kesişim noktası) duvar tipine ait başlangıç kayma dayanımını vermektedir.



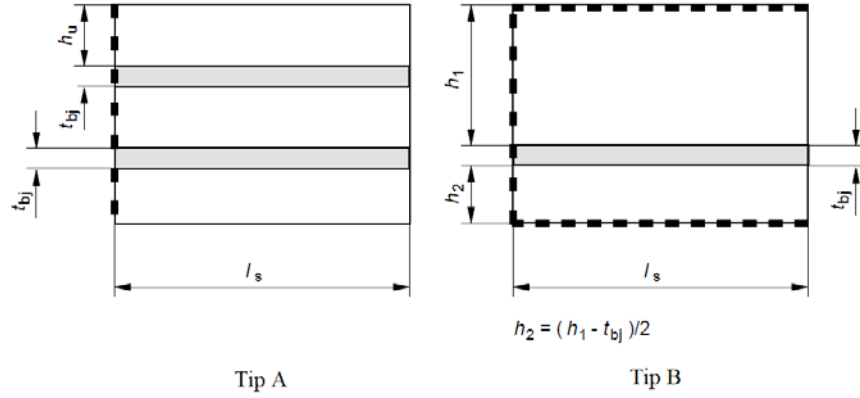
Şekil 34. Kayma dayanımı ve iç sürtünme açısı

(Kaynak: (TS EN 1052-3, 2002))

TS EN 1052-3 (2002) standardına göre elde edilen kayma gerilmenin %80'nine karşı gelen gerilme, karakteristik başlangıç kayma dayanımını ve doğrunun eğimi içsel sürtünme açısını temsil etmektedir. Bilinmesi gereken en önemli husus, Denklem 8'de verilen τ (kayma gerilmesi) sadece bölgesel kayma kırılmasını temsil etmektedir. Duvarın düzlem içi yüklemelere karşı kayma dayanımı ile doğrudan ilişkilendirilemez (Vasconcelos, 2005). Yapılan çalışmalarda c ve π değerleri harcın mevcudiyeti, cinsi ve kalınlığı ile doğrudan ilişkilendirilmiştir. Ancak bu çalışmada harcın yanı sıra bağlantı elemanlarının, özellikle zıvanaların kayma dayanımına belirgin etkisi araştırılmıştır.

Bölüm 2.2.1.2'de verildiği gibi bölgesel kayma kırılmaları birkaç farklı deney yöntemi ile belirlenebilmektedir. Bu yöntemlerin tümünde, normal ve kayma kuvvetlerini düzgün yayılı olacak şekilde uygulamak mümkün değildir ancak TS EN 1052-3 (2002) standardının önerdiği yöntemin, uygulanabilirlik ve doğru değerlendirme açısından birçok araştırmacı ve TBDY (2018) tarafından tercih edildiği görülmüştür. Bu sebepten tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların başlangıç kayma dayanımı TS EN 1052-3 (2002) standardına uygun olarak belirlenmiştir.

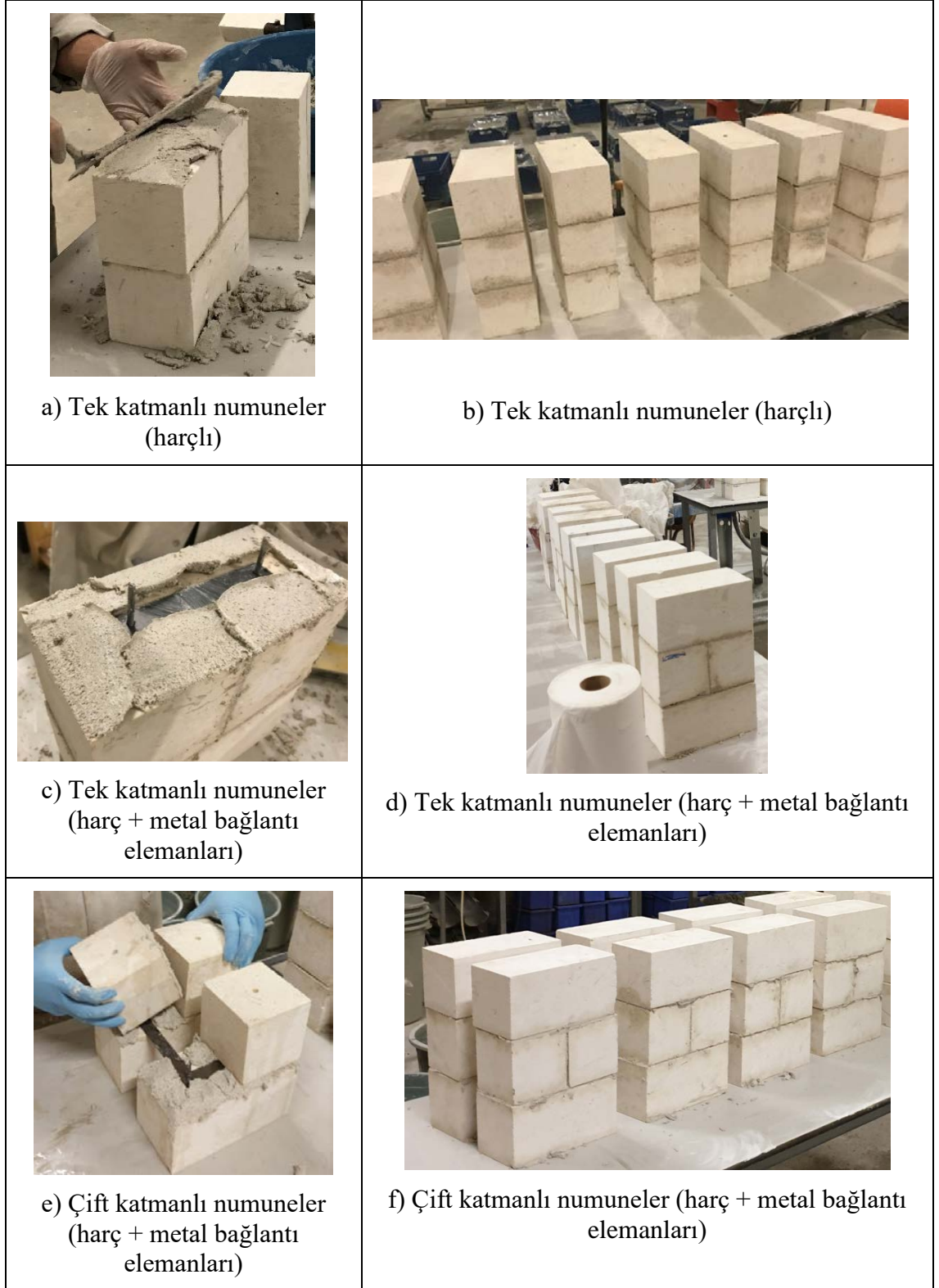
Başlangıç kayma deneyi için gereken numune boyutu ve adedi TS EN 1052-3 (2002) standardında verilen talimata uygun olarak belirlenmiştir. TS EN 1052-3 (2002) standardına göre deney numunelerinin boyutu ve tipi bireysel taşların boyutu dikkate alınarak belirlenmektedir (Şekil 35). Bireysel taşların boyutu dikkate alınarak Şekil 35'te verilen Tip A seçilmiştir. Başlangıç kayma dayanım deneyi kapsamında her iki harç grubu için üç çeşit duvar numunesi üretilmiştir. Bunlar; tek katmanlı (harçlı), tek katmanlı (harç + metal bağlantı elemanları) ve çift katmanlı (harç + metal bağlantı elemanları) şeklindedir. Tek katmanlı numuneler 100 x 200 x 300 mm ve çift katmanlı numuneler ise 250 x 200 x 300 mm boyutunda üretilmiştir. Numunelerin alt ve üst sırasında 100 x 100 x 200 mm, orta sırada ise 2 adet 100 x 100 x 100 mm boyutunda bireysel taş kullanılmıştır. Bunun sebebi ise numunelerde metal bağlantı elemanlarının etkisini dahil etmektir.



Şekil 35. Bireysel elemana bağlı olarak numune tipi

(Kaynak: (TS EN 1052-3, 2002))

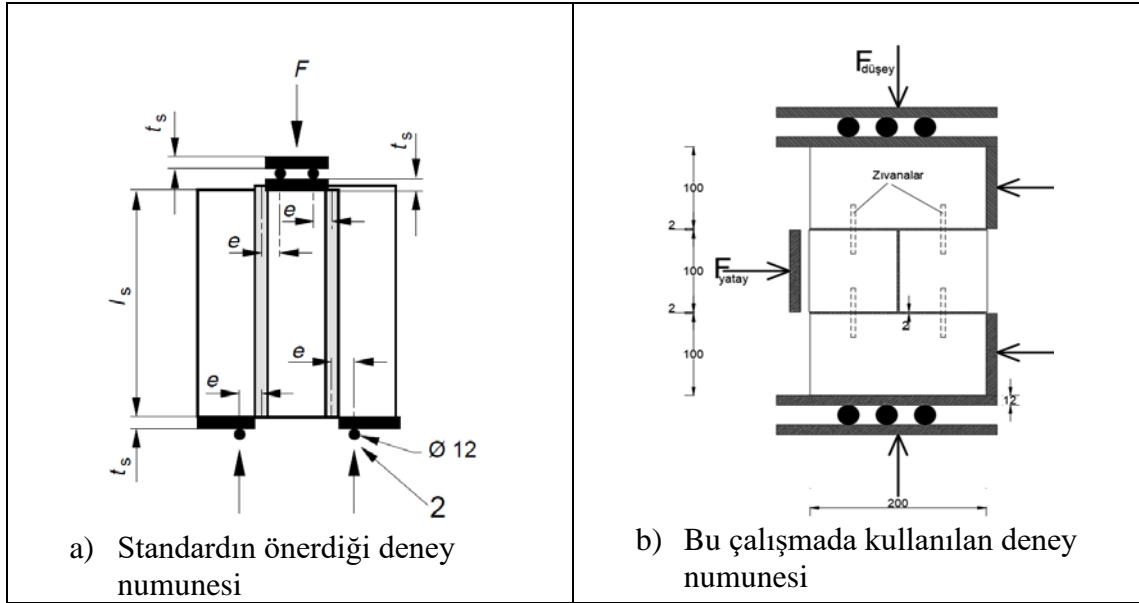
Böylece her duvar çeşidi için 9 adet numune olmak üzere toplamda 63 adet numune üretilmiştir. Bu numunelerden 9 adedi sadece taşların üst üste konulmasından oluşmaktadır. Geri kalan 54 adet numunenin 27 adedi horasan harcı ve kalan diğer 27 adedi ise kireç harcı ile örülmüştür. Her harç grubunda 9 adet tek katmanlı (harçlı), 9 adet tek katmanlı (harç + metal bağlantı elemanı) ve 9 adet çift katmanlı numune yer almaktadır (Şekil 36).



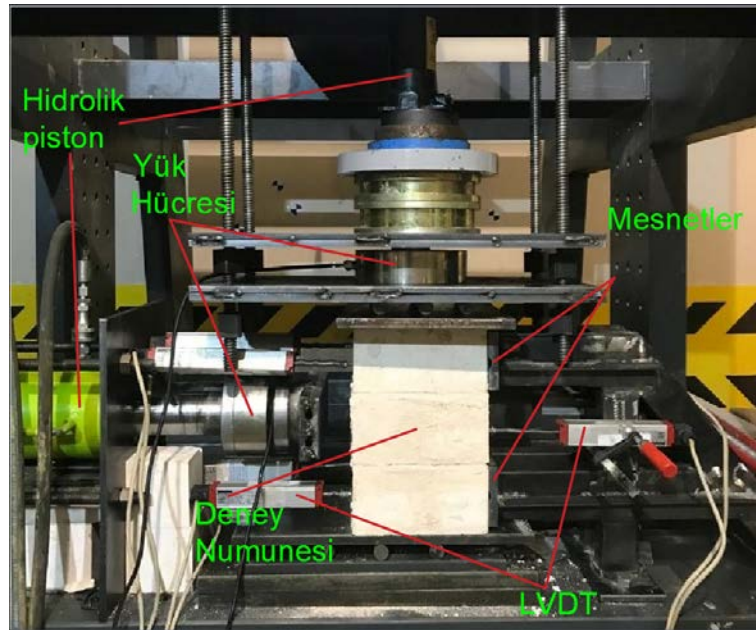
Şekil 36. Başlangıç kayma deney için hazırlanan numuneler

TS EN 1052-3 (2002) standardın belirttiği deney düzeneği Şekil 37.a'da verilmiştir. Bu düzende ilk ve üçüncü sıradaki bireysel elemanların düşey hareketi sınırlandırılarak,

orta elemana düşey yük aktarılmaktadır. Numunelerdeki normal gerilme ise yatay olarak uygulanmaktadır. Tez kapsamında yapılan başlangıç kayma deney düzeneği ise Şekil 37.b'de verilmiştir. Deney düzeneği standardın önerdiği ile aynı olup, deney numunelerinin tamamında harç kullanıldığı için numunelerin taşıma ve yerleştirme sırasında zarar görmemesi için normal ve kayma kuvvetlerinin yerleri değiştirilmiştir ve numune dikey değil yatay olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 37. TS EN 1052-3 Standardı ve deneysel çalışmada kullanılan deney düzenekleri



Şekil 38. Başlangıç kayma deney düzeneğindeki

Başlangıç kayma deney düzeneğinde düşey ve yatay kuvvetlerin uygulanabilmesi için iki adet hidrolik kriko, yükleme değerlerinin okunması ve bilgisayara aktarılması için iki adet yük hücresi (düşey 100 kN, yatay 300 kN) ve deplasmanların ölçülebilmesi için, tek katmanlı numunelerde 3, çift katmanlı numunelerde ise 6 adet LVDT kullanılmıştır (Şekil 38)

Numuneler imalattan 28 gün sonra deneye tabi tutulmuştur. Her deneyde numune deney düzeneğine yerleştirildikten sonra LVDT'ler belirlenen yerlere iliştirilmiş ve sıfırlanmıştır. Sonra düşey yük gereken düzeyde uygulanmış ve sabit tutulmuştur. Son aşama olarak yatay yük sıfırdan başlayıp numune kırılıncaya kadar sabit hızla artırılmıştır. Yatay yük artarken düşey yükte de artışlar gözlemlenmiştir. Düşey yükteki değişimleri minimum seviyeye indirebilmek için numunenin altında ve üstünde Şekil 38'de görüldüğü gibi çelik silindir çubuklar yerleştirilmiştir.

$$\tau_b = \frac{F_{b,maks}}{2b_b(l_b - \Delta l_b)} \quad (9)$$

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_b} \quad (10)$$

Düşey yük **0,2, 0,6 ve 1 MPa** olmak üzere üç farklı düzeyde uygulanmıştır. Yükleme değerleri ve deplasmanlar veri toplama cihazı ile bilgisayara aktarılmış ve standardın belirttiği gibi kayma ve basınç gerilmesi sırası ile Denklem 9 ve 10 ile hesaplanmıştır. Denklemde 9'da τ_b kayma gerilmesi, $F_{b,maks}$ maksimum yatay kuvveti, b_b numunenin genişliğini, l_b numunenin uzunluğunu ve Δl_b net deplasmanı temsil etmektedir. Denklem 10'daki σ_b ise basınç gerilmesini, F_b basınç kuvvetini ve A_b basınç alanını ($b_b \times l_b$) temsil etmektedir.

3.2.2. Makro boyutlu numuneler

Tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların düzlem içi davranışını daha gerçekçi koşullar altında belirleyebilmek için, makro boyutlu duvar numuneler kullanılarak, basınç ve diyagonal basınç deneyi yürütülmüştür. Basınç deneyi kapsamında duvarın basınç dayanımı, Elastisite modülü ve en önemlisi h_{ef}/t_{ef} oranının, duvarların basınç dayanımının

üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu bölümde iki deneyin yapılışı detaylı olarak açıklanmıştır.

3.2.2.1. Basınç dayanımı

Bölüm 3.2.1.1.'de açıklandığı gibi mikro boyutlu numunelerin basınç dayanımının belirlenmesi için standartlar mevcuttur. Ancak makro boyutlu numunelerin basınç dayanımının belirlenebilmesi için herhangi bir standarda rastlanılamamıştır. Buna rağmen, Bölüm 2.2.2'de özetleri sunulan birçok akademik çalışmada olduğu gibi, değişik malzemelerden oluşan duvarların düzlem içi davranışı veya güçlendirme tekniklerinin uygulanabilirliği makro boyutlu numuneler kullanılarak araştırılmıştır. Bu deneylerde duvarların tek eksenli basınç yükleme altında, basınç dayanımı ile Elastisite Modülü belirlenmiştir.

Bu çalışmada toplamda dört adet makro duvar numunesi üretilmiş ve basınç deneyine tabi tutulmuştur. İlk numune MSWC olarak isimlendirilerek, taşların üst üste konulması ve harç ile bağlantı elemanlarının kullanılmaması şeklinde üretilmiştir (Şekil 39.a ve c). İkinci numune MSWLC ise taşlar sadece kireç harcı ile birbirine bağlanmış (Şekil 39.b ve d) ve üçüncü numunede (MSWMLC) kireç harcın yanı sıra metal bağlantı elemanları da kullanılmıştır (Şekil 39.e ve g). Dördüncü numune ise tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarları temsil etmektedir. MDWMLC isimli bu numune iki katmandan oluşmakta ve katmanlar arasında 50 mm boşluk bulunmaktadır (Şekil 39.f ve h). Numuneler tek ve çift katmanlı olmak üzere, 100 x 800 x 1426 ve 250 x 800 x 1426 mm boyutunda üretilmiştir.

$$\sigma_m = \frac{F_{d,maks}}{A_d} \quad (11)$$

$$E_m = \frac{F_{d,maks}}{3 \times \varepsilon_d \times A_d} \quad (12)$$



a) MSWC duvarın detayı



b) MSWLC duvarın detayı



c) MSWC duvar numunesi



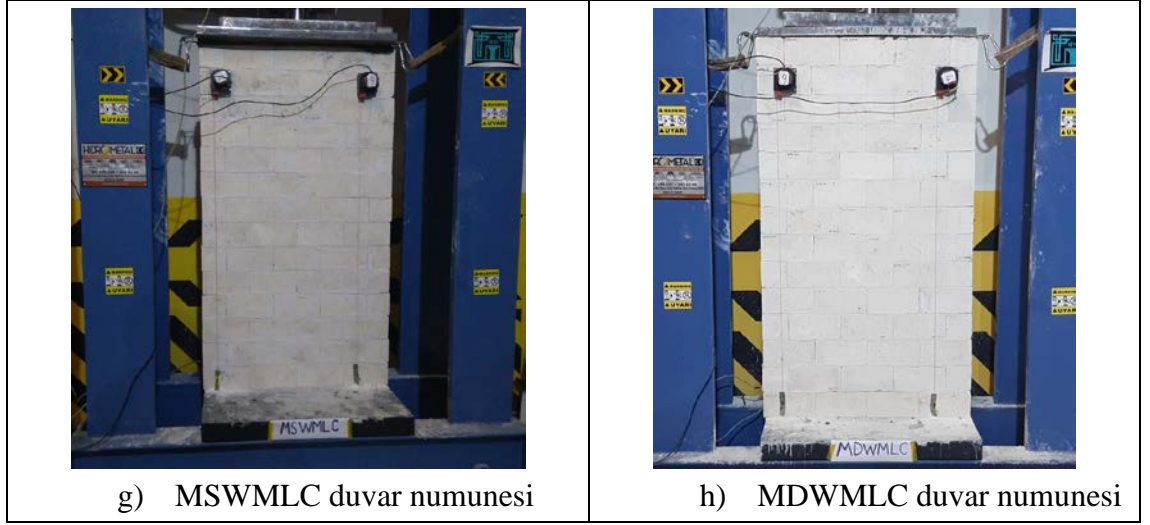
d) MSWLC duvar numunesi



e) MSWMLC duvar detayı



f) MDWMLC duvar detayı



Şekil 39. Deney düzeneğindeki araçların yerleşimi



Şekil 40. Makro boyutlu basınç deney düzeneği

Makro boyutlu duvar numunelerin basınç deney düzeneği Şekil 40'ta verilmiştir. Deneylerde yükün uygulanabilmesi için 3000 kN kapasiteli hidrolik pres, yükü ölçmek

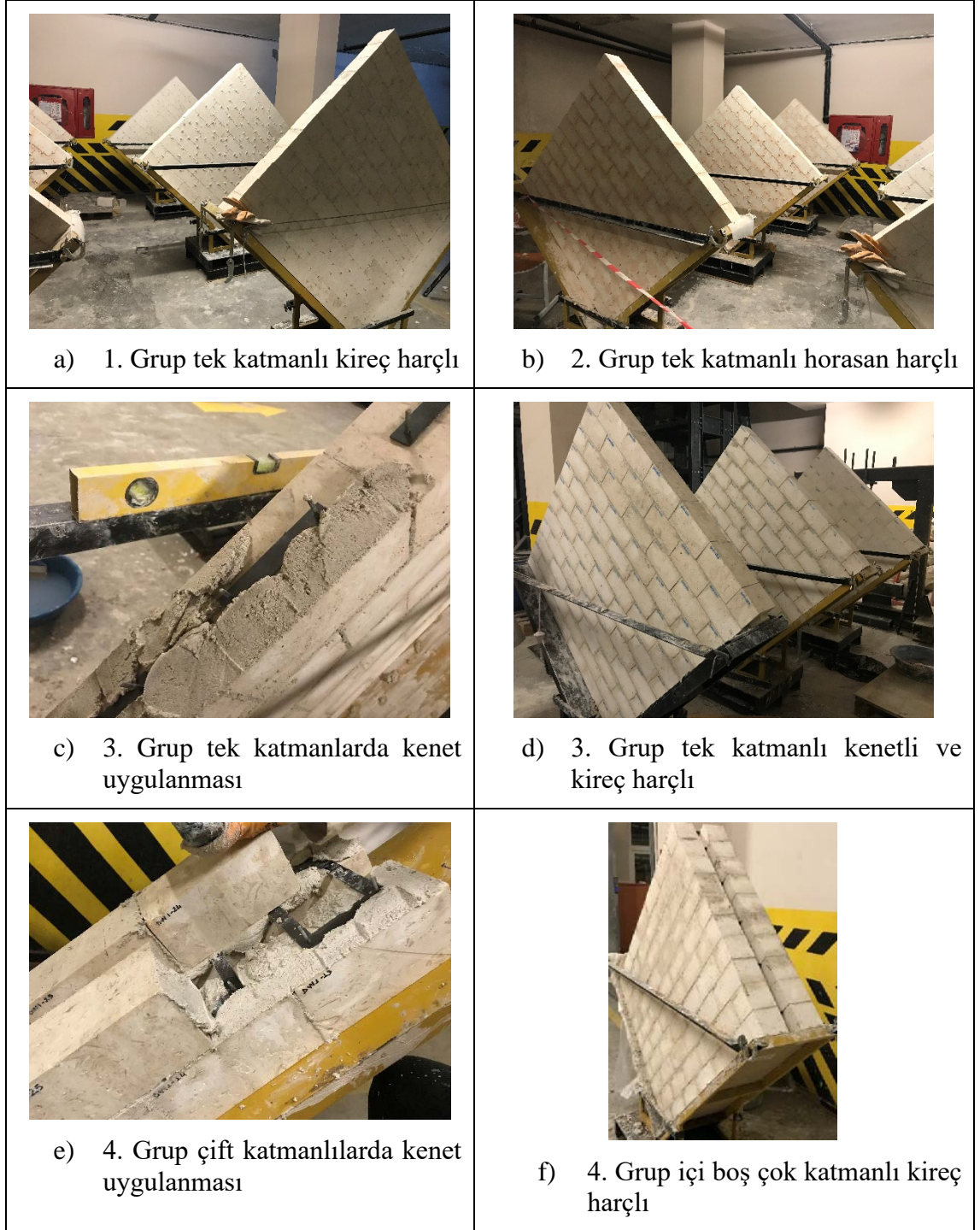
için bir adet 3000 kN kapasiteli yük hücresi ve düşey deplasmanları ölçmek için 4 adet ipli ölçer kullanılmıştır. Deneysel veriler, veri toplama cihazı ile bilgisayara aktarılmış ve gerilme – gerinim grafikleri çizilmiştir. Duvarın basınç dayanımı Denklem 11’de ve Elastisite Modülü ise Denklem 12’de verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

3.2.2.2. Diyagonal kayma dayanımı

Bu bölümde taş duvarların düzlem içi kayma dayanımının belirlenmesi için yürütülen deneysel çalışmanın detayları verilmiştir. Yığma binalar deprem gibi yatay kuvvetlere maruz kalınca, kuvvet yönüne paralel olan duvarlarda diyagonal kayma gerilmeleri oluşmakta ve bu da genellikle duvarlarda çapraz kırılmalara sebep olmaktadır. Bu zorluklara karşı koyan duvarın mekanik davranışına düzlem içi kayma dayanımı denmektedir. Bu davranış doğal taş duvarlarda saha veya laboratuvar ortamında bir kaç yöntemle belirlenebilmektedir (Bosiljkov ve ark., 2005). Bunlardan biri, ASTM E 519M-15 (2015) standardının önerdiği diyagonal basınç deneyidir. Standarda göre duvar numunesi örüldükten sonra laboratuvar ortamında diyagonal olarak deney düzeneğine yerleştirilmekte ve basınç uygulanarak duvarın kayma mukavemeti belirlenmektedir. ASTM E 519M-15 (2015)’e göre bu yöntem yığma duvarların kayma dayanımının belirlenmesi için diğer yöntemlere nazaran daha sağlıklı sonuçlar vermektedir. Buna rağmen duvarların kayma dayanımını belirleyen bir çok farklı yöntem araştırmacılar tarafından kullanılmış, kıyaslanmış ve değerlendirilerek bu yöntemlerin artı ve eksi yönleri akademik çalışmalarda sunulmuştur (Bosiljkov ve ark., 2005; Brignola ve ark., 2008; Dizhur ve ark., 2013; Milosevic ve ark., 2013; Pringle, 2016).

Bu çalışmada tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların düzlem içi kayma dayanımı ASTM E 519M-15 (2015) standardının önerdiği diyagonal basınç deney yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

Diyagonal basınç deneyi kapsamında toplamda 12 adet deney numunesi üretilmiş ve en az 28 gün bekletilerek deneye tabi tutulmuştur. Bu 12 adet numune 4 gruba ayrılmış ve Şekil 41 ile Tablo 3’te detayları gösterilmiştir. Her grupta üç adet numuneye yer verilmiş olup, grubun içindeki duvar tipinin davranışı, bu üç adet numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 41. Diyagonal basınç deneyi için üretilen numune detayları

1. grup, tek katmanlı numunelerden oluşmaktadır. Bu gruptaki numunelerde metal bağlantı elemanı olarak kenet ve zıvana kullanılmamıştır. Numunelerde sadece kireç harcı kullanılmış ve 2 mm'lik derz tercih edilmiştir (Şekil 41.a). 2. gruptaki numuneler ise 1. gruba benzer şekilde üretilmiştir. Tek farkı kireç harcı yerine horasan harcı kullanılmıştır (Şekil 41.b). 3. gruptaki numuneler de yine tek katmanlı numuneler yer

almıştır fakat numunelerdeki taş, bireyler kireç harcın yanı sıra metal bağlantı elemanlarla da birbirine bağlanmıştır (Şekil 41.c ve d). 4. gruptaki numuneler ise tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarları temsil etmiştir. Bu numunelerde harç olarak kireç harcı kullanılmış ve duvarın bütünselliğini sağlamak için bu tez kapsamında geliştirilen kenet ve zıvanalar kullanılmıştır (Şekil 41.e ve f). Tüm numunelerde 100 x 200 x 100 ve 100 x 100 x 100 mm boyutunda bireysel doğal taş elemanlar kullanılmıştır. Tek katmanlı duvarların boyutu 100 x 1200 x 1200 mm ve çift katmanlı duvarların boyutu ise aradaki boşlukla beraber 250 x 1200 x 1200 mm şeklindedir.

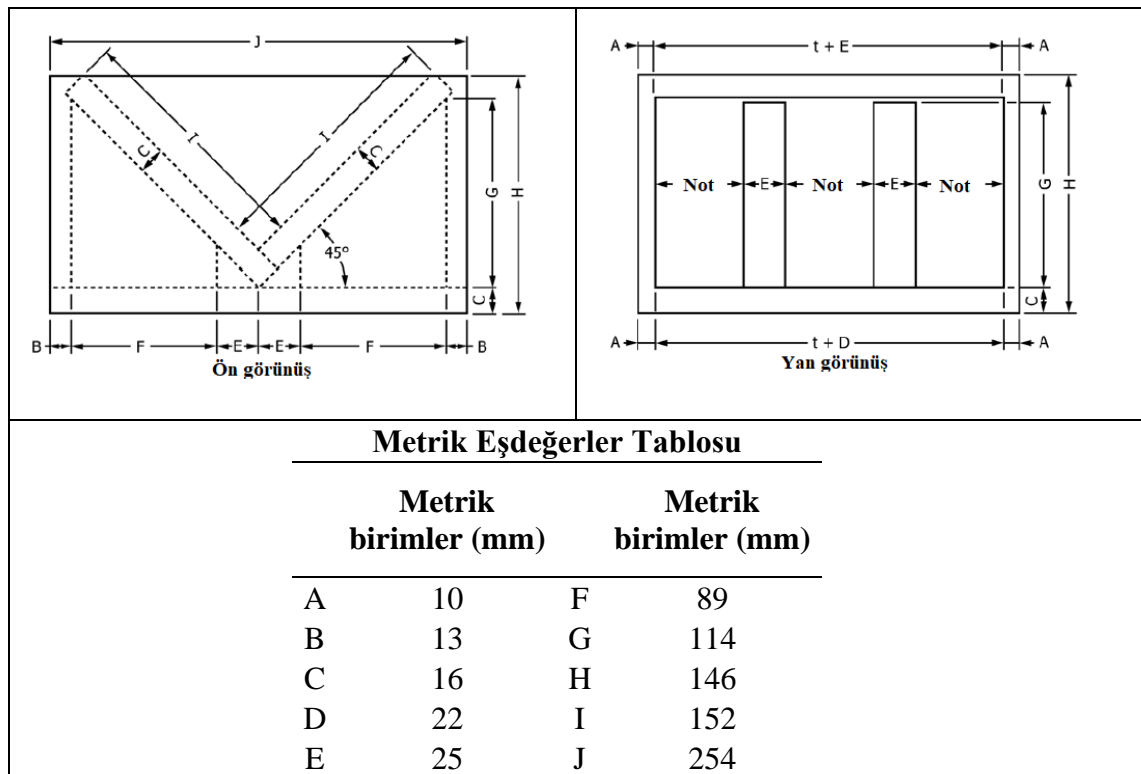
Tablo 3. Diyagonal kayma deneyinde kullanılan numunelerin detayı

No	Gruplar	Numune Kodu	Katman	Kenet Durumu	Harç Tipi	Numune Boyutu (mm)
1	1. Grup	SWDT-01	Tek Katman	Kenetsiz	Kireç Harcı	100x1200x1200
2		SWDT-02				
3		SWDT-03				
4	2. Grup	SWHDT-01	Tek Katman	Kenetsiz	Horasan Harcı	100x1200x1200
5		SWHDT-02				
6		SWHDT-03				
7	3. Grup	SWMDT-01	Tek Katman	Kenetli	Kireç Harcı	100x1200x1200
8		SWMDT-02				
9		SWMDT-03				
10	4. Grup	DWMDT-01	Çift Katman	Kenetli	Kireç Harcı	250x1200x1200
11		DWMDT-02				
12		DWMDT-03				

Numune ebatları ASTM E 519M-15 (2015)'e göre yapılmış ve aynı standarda göre bu ebatlar 1/1 ölçekli duvarların davranışını temsil edecek en küçük ebat olarak kabul edilmiştir. Ghanem ve ark. (1994) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, ASTM E 519M-15 (2015) standardı tarafından diyagonal basınç deneyi için belirlenen numune boyutundan farklı numune boyutu tercih edildiğinden, aynı standartta verilen hesap yöntemlerinin de değiştirilmesi önerilmiştir. Bu değişimlerde, değişik ortotropik (E_1/E_2) etkilerin dikkate alınması gerekliliği yazarlar tarafından ifade edilmiştir. Yazarların bu önerisi, doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan bir parametrik çalışmaya dayanmaktadır. Bu tezde diyagonal basınç deneyi için standardın önerdiği numune ebatları (1200 x 1200 mm) tercih edildiğinden sonuçların değerlendirilmesinde standardın önerdiği hesap yöntemleri olduğu gibi kullanılmıştır.

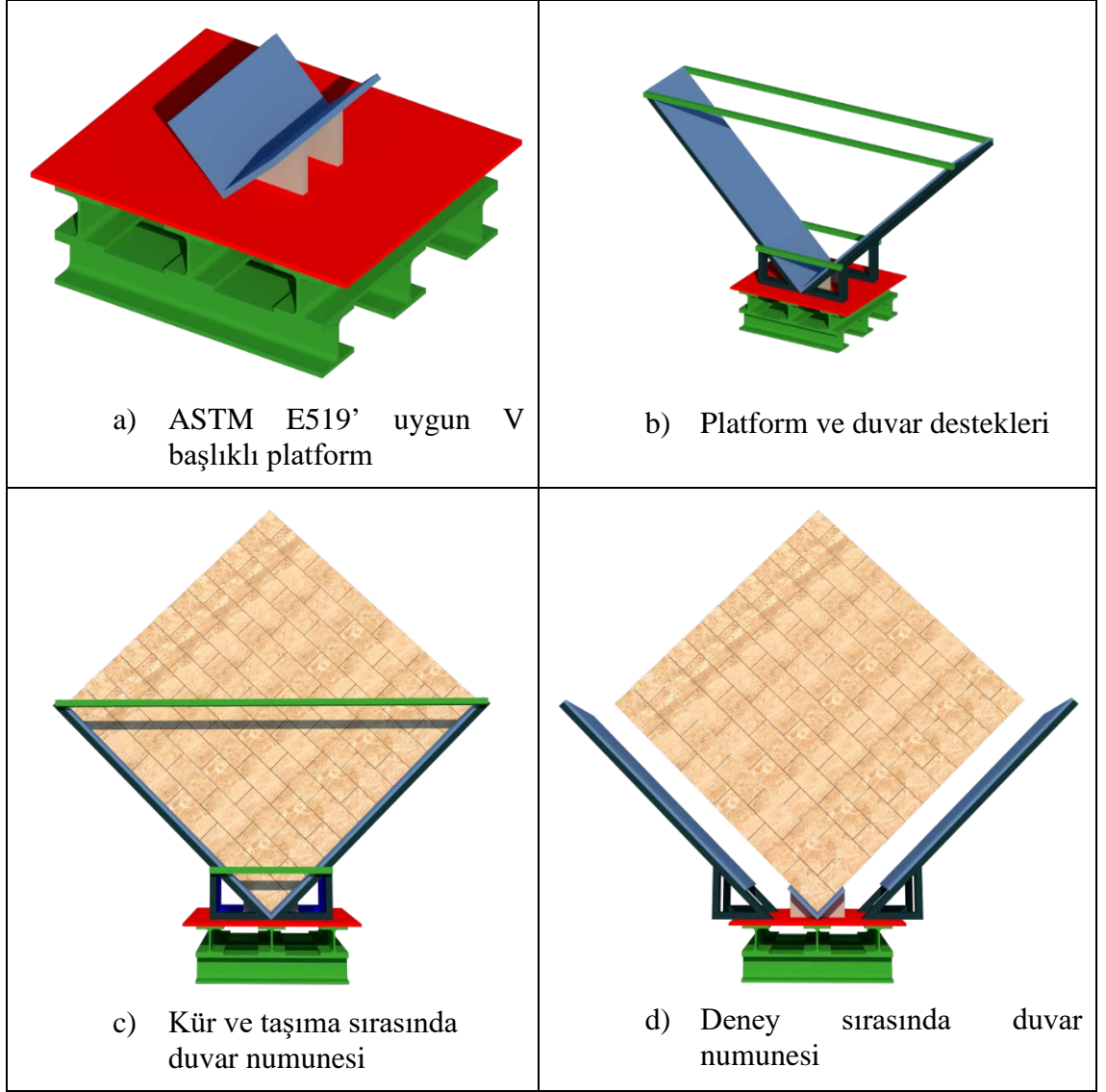
Doğal taş duvar numuneleri için ASTM E 519M-15 (2015)'in önerdiği ebatlar oldukça büyüktür. Özellikle bu çalışmada kullanılan taşın yoğunluğu 2710 kg/m^3 olduğundan numunelerin düz bir zemin üzerinde örülüp diyagonal pozisyonuna dönüştürülmesi oldukça güçtür. Bu işlem sırasında özellikle metal bağlantı elemanı içermeyen duvar numunelere zarar verme ihtimali çok yüksek olduğundan zaman ve maliyet açısından büyük bir probleme yol açmaktadır.

Bundan dolayı tüm deney numuneleri Şekil 41'de görüldüğü gibi diyagonal olarak örülmüştür. Duvar numunelerinin diyagonal olarak örülebilmesi ve zarar verilmeden deney düzeneğine taşınıp yerleştirilebilmesi için Şekil 4.b'de gösterilen özel düzenek tasarlanmıştır. Bu düzenek V yükleme başlığı içeren bir platform ve iki kanattan oluşmaktadır. Platform üzerindeki V yükleme başlığı ASTM E 519M-15 (2015)'e (Şekil 42) uygun olarak hazırlanmıştır (Şekil 43.a). Kanatlar ise kür ve taşıma sırasında L profillerle birbirine bağlanmış ve deney başlamadan önce sökülmüştür.



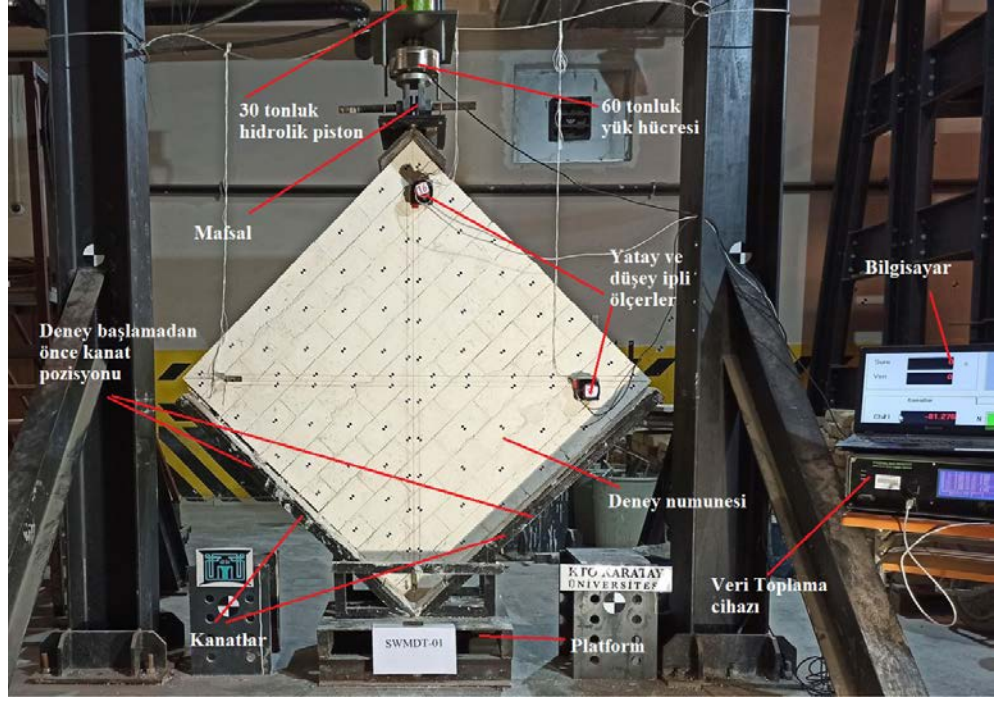
Şekil 42. ASTM E519'de önerilen V başlık ebatları

(Kaynak: (ASTM E 519M-15, 2015))

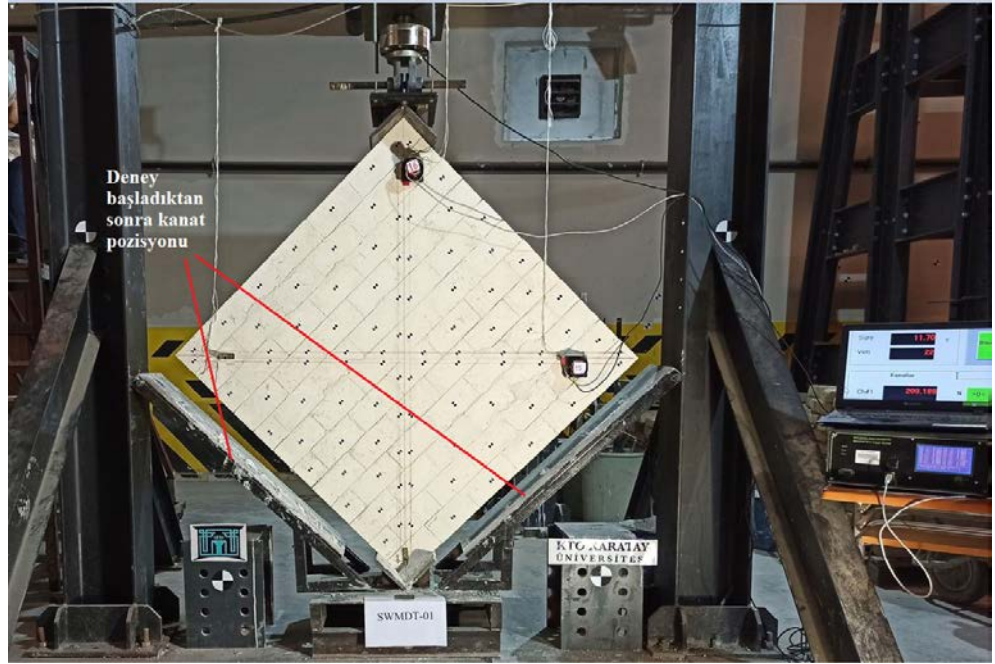


Şekil 43. ASTM E519'a uygun diyagonal numune platformu

Platformun altında 6 adet IPE100 profil kullanılmıştır. IPE100 profiller üçer adet ve birbirine dik olacak şekilde üst üste konumlandırılmış ve kaynak yapılmıştır. Platformun üstünde duvarın diyagonal olarak örülmesi sırasında duvara destek verecek kanatlar kullanılmıştır (Şekil 43.b). Duvar örüldükten sonra en az 28 gün bekletilmiş ve Şekil 43.c'de gösterildiği gibi deney düzeneğine desteklerle birlikte taşınıp yerleştirilmiştir. Yerleştirildikten sonra numune üzerinde ipli ölçerler, yükleme yönüne paralel ve dik olacak şekilde konumlandırılmış ve duvarın diyagonal yükleme düzleminin dik olup olmadığı çekül ile kontrol edilmiştir.



a) Diyagonal basınç deney düzeneği (deney başlamadan önce)



b) Diyagonal basınç deney düzeneği (deney başladıktan sonra)

Şekil 44. ASTM E519'a uygun diyagonal basınç deney düzeneği

Düzlemdeki çekül sapmaları platform ayakları altına 2 mm kalınlığında çelik levhalar koyularak düzeltilmiştir. Şekil 44.a'da gösterildiği gibi duvarın üst ucunda V başlıklı

yükleme aparatı yerleştirilmiş ve 300 kN kapasiteli hidrolik pres yardımı ile yaklaşık 250 – 300 N ön yüklem yaparak kanatlar sökülüş ve deney başlatılmıştır. Kanatlar önce duvardan uzaklaştırılmış (Şekil 43.d) ve Şekil 44.b gösterildiği gibi duvar kırıldıktan sonra dağılıp üzerine monte edilen ölçüm aletlerine zarar vermesini engellemek için deney süresince çelik çerçeveye yaslanmış bir vaziyette bırakılmıştır.

Şekil 44.a'da gösterildiği gibi deney düzeneğinde; yüklem için 300 kN kapasiteli hidrolik pres, uygulanan yükü veri toplama cihazına aktarmak için 600 kN kapasiteli yük hücresi, deplasmanları ölçmek için ipli potansiyometre ölçerler ve deneysel verileri bilgisayara aktarmak için veri toplama cihazı kullanılmıştır. Kullanılan veri toplama cihazı saniyede iki veri alma kapasitesine sahiptir. Yüklemeler el kriko yardımı ile ve olabildiğince sabit hızla yapılmıştır. Deplasmanlar ise yüke paralel ve dik olmak üzere iki yönde ölçülmüştür. Bu ölçümler tek katmanlı duvarlarda iki ve çift katmanlı duvarlarda dört adet ipli potansiyometre ile yapılmıştır. Alınan deneysel verilerle her duvar için Bölüm 4.4.2.'de verilen hesaplamalar yapılmıştır.

3.3. Sonlu Elemanlar Metodu ile Duvarın Modellenmesi ve Analizi

Daha önce de söz edildiği üzere yığma yapılar, günümüzdeki yapı stokunun önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu yapıların bazıları tarihi bina statüsünde olduğundan korunmaları ve restorasyonları büyük önem taşımaktadır. Bu sebepten dolayı yığma yapıların davranışını belirlemek ve olası durumları değerlendirip önlemler almak için dünya genelinde birçok araştırmacı tarafından deneysel ve nümerik olmak üzere bir çok çalışmalar yürütölmektedir. Yapılan deneyler, yöntemleri, ilgili standartlar ve gelinen son durum yukarıdaki bölümlerde detaylı olarak verilmiştir. Bu bölümde ise tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarların bir katmanının düzlem içi davranışının, sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ve analizlerinin yapılması açıklanmıştır.

Son yıllarda yığma yapıların yapısal davranışının incelenmesinde, nümerik araçların kullanımı ve bu araçların geliştirilmesi oldukça yaygın hale gelmiştir. Bu geliştirmeler sayesinde, özellikle yığma yapıların düzensizliği ve parametrelerin belirsizliği de dikkate alındığında, nümerik çözümler analitik çözümlere üstünlük kazanmış ve daha çok tercih edilir hale gelmiştir. Hatta bazı durumlarda fiziksel deneylere bile bir alternatif olarak sunulmaktadır. Buradaki ana fikir şudur; eğer bir model yığma yapının yapısal davranışını simüle edebiliyorsa, bu demektir ki binanın güvenliği değerlendirilirken

öngörülen yüklere karşı binanın yapısal tepkisini de tahmin edebilmektedir (Ghiassi ve Milani, 2019).

Günümüzde nümerik yöntemlerin birden fazla çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan sonlu elemanlar yöntemi (FEM), ayrık elemanlar yöntemi (DEM), limit analizi ve uygulanan elemanlar yöntemi (AEM) ilk akla gelenlerdir. Bu yöntemlerin seçimi tamamen problemi çözen kişilere ve bu problemin nasıl çözüleceğine bağlıdır. Problemlerin çözümünde kullanılan farklı modeller farklı sonuçlar verebilir bu sebepten dolayı hiçbir modele en doğru model denilemez (Abdulla ve ark., 2017; Demir, 2012). Örneğin Lourenço (1996)'ya göre, en uygun model, bir çok faktörün yanı sıra analiz edilen yapıya, kullanılan verilere ve analiz yapanın deneyim ve becerilerine bağlıdır. Oliveira (2003) ise en uygun modeli, aranan sonucu, en düşük maliyetle, kabul edilebilir bir hata dahilinde ve en önemlisi güvenilir bir şekilde sağlayan model olarak tanımlamaktadır (Demir, 2012).

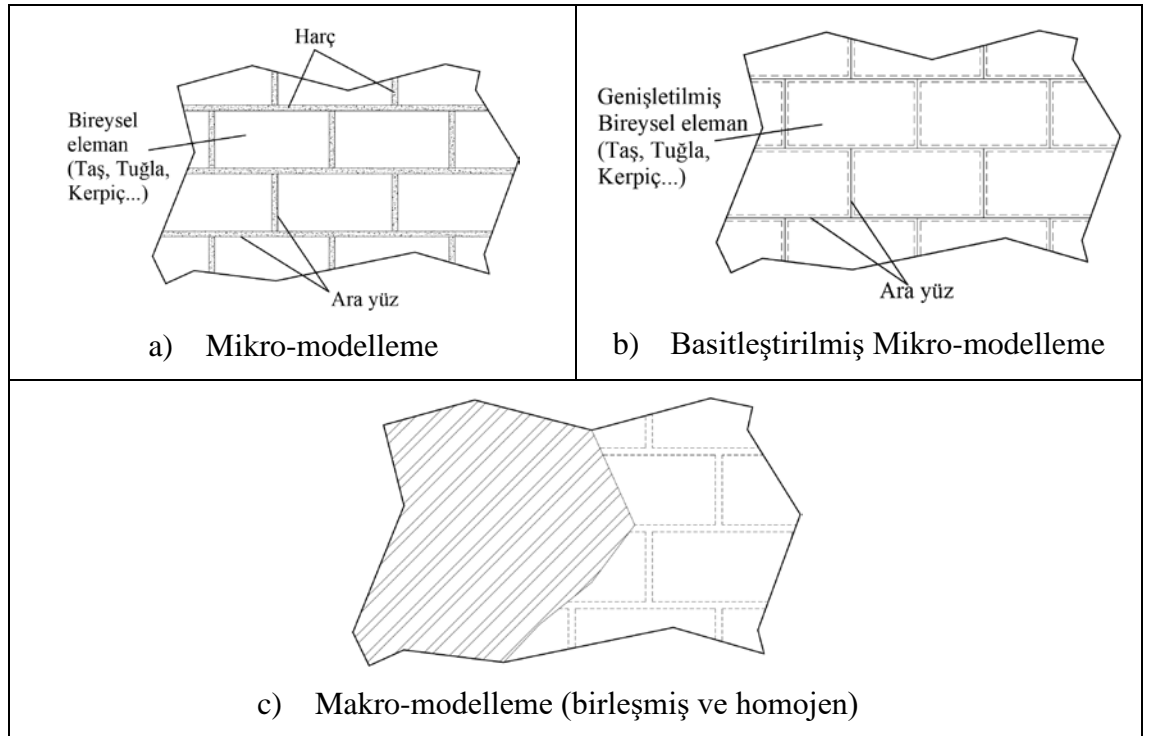
Bu tezdeki nümerik çalışmanın amacı ise deneysel veriler kullanılarak, tasarlanan nümerik modelin kalibrasyonudur. Bu kapsamda üretiminde sadece kireç harcı kullanılan tek katmanlı ve mikro boyutlu numunenin modeli Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak nümerik analizleri yapılmış ve düzlem içi davranışı incelenmiştir. Yapılan nümerik çalışma kapsamında önce sonlu elemanlar yöntemi hakkında kısa bilgi verilerek nümerik modelin oluşumunun aşamaları açıklanmıştır.

3.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Mühendislikteki Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), başlangıçta fiziksel temellere dayandırılarak yapısal mekanikteki problemlerin analizi için geliştirilmiştir. Ancak, daha sonraları bu tekniğin diğer sınıflardaki problemlerin çözümünde de başarılı bir şekilde uygulanabileceği keşfedilmiştir (Bathe, 2014). Böylece yığma yapıların analizi gibi çok karmaşık problemlerde bile bu yöntem kullanılmış ve bilgisayarların gelişimi ile bu tekniğin bu alanda kullanımı daha da yaygın hale gelmiştir. Buna rağmen yığma yapıların analizinde Sonlu Elemanlar Yönteminin kullanımının, geçerliliği kabul edilmiş temel ilişkilere ve analiz konusunu belirleyen duvarların sürekliliğine ve uygun bir ayrıklaştırılmaya bağlı olduğu belirtilmiştir (Demir, 2012).

Sonlu Elemanlar Yönteminin temel mantığı, ele alınan yapıyı sonlu eleman adı verilen küçük parçalara bölmektir. Bu parçalar düğüm adı verilen noktalarda birbirine bağlıdır. Bölünen her küçük parçaya ait gerilmeler ve deplasmanlar ayrı ayrı hesaplanır ve sonuçlar ele alınan yapının tümüne aktarılır. Kısacası sonlu elemanlar, yapısal problemi sınırlı serbestlik derecesine dönüştürmektedir (Özen, 2006).

Yığma yapılarda kullanılan taşıyıcı duvarlar, bireysel elemanlar ve harç olmak üzere, mekanik özellikleri birbirinden farklı bazı malzemelerin birleşiminden meydana gelmektedir. Böylece duvardaki birleşim yerleri, duvarın yük transfer mekanizmasında süreksizliğe neden olmaktadır ve zayıf bölgelerini teşkil etmektedir. Bu zayıf bölgeler aynı zamanda duvarın düzlem içi ve düzlem dışı davranışında büyük rol oynamaktadır. Hatta duvarın doğrusal olmayan davranışından genellikle derzlerde oluşan bu zayıf bölgeler sorumludur. Bu sebepten dolayı nümerik modellemelerde derzlerin önemi oldukça büyüktür. Yapılan akademik çalışmalarla nümerik çalışmalar için istenilen basitlik ve doğruluk derecesine bağlı olarak temel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller temel olarak mikro-modelleme, basitleştirilmiş mikro-modelleme ve makro modelleme olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Şekil 45) (Demir, 2012; Lourenço, 1996).



Şekil 45. Yığma yapılar için nümerik modelleme yöntemleri

Mikro-modellemede bireysel elemanlar (taş, tuğla, kerpiç...) ve bu elemanları birbirine bağlayan harç tabakası ayrı ayrı modellenmektedir. Bu modelde her bir eleman sürekli olarak tasarlanır ve mekanik özellikleri deneysel verilerden alınarak tanımlanır. İki eleman arasındaki ara yüz ise, bireysel eleman ve harç arasındaki etkileşim dikkate alınarak, süreksiz ve ebatsız eleman olarak tanımlanmaktadır (Şekil 45.a).

Basitleştirilmiş mikro-modellemede ise bireysel elemanlar mikro-modellemede olduğu gibi deneysel veriler kullanılarak tanımlanırken, derzlerdeki harçlar tanımlanmamıştır. Derz tabakası kaldırılır ve duvar numunesinin boyutunu korumak için bireysel elemanların boyutu harç kalınlığı kadar artırılır. Bireysel elemanlar ise süreksiz ve boyutsuz elemanlarla birbirine bağlanır. Harç tabakası yerine kullanılan bu süreksiz ve boyutsuz elemanların mekanik özellikleri ise deneysel yöntemlerle belirlenir. Böylece duvarın doğrusal olmayan davranışı analiz içerisine dahil edilmiş olmaktadır (Şekil 45.b).

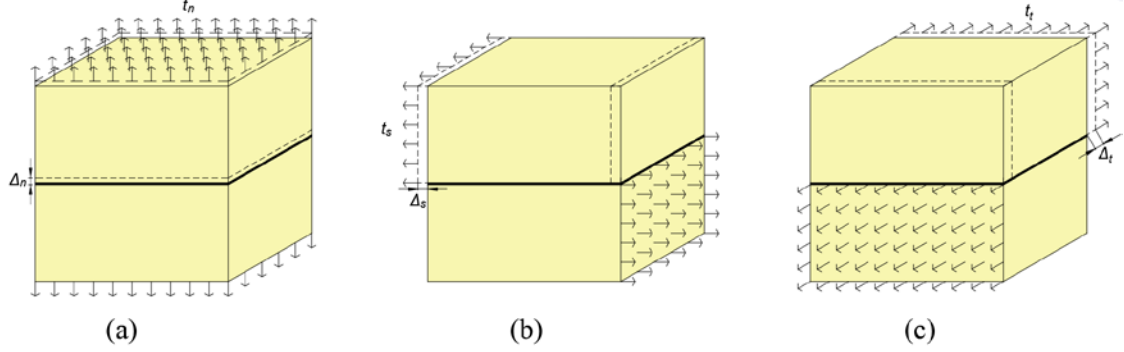
Makro modellemede yığma duvarın tamamı sürekli bir eleman olarak modellenmektedir. Duvarın mekanik özellikleri deneylerle belirlenmekte ve modelleme esnasında temel veri olarak kullanılmaktadır (Şekil 45.c).

Nümerik modellemenin temel amacı, gerçek yapıyı temsil edecek en doğru matematiksel modelin tasarımı ve analizidir. Bundan dolayı her şeyden önce gerçek yapının davranışlarını sergileyecek modelin oluşturulması son derece önemlidir (Özen, 2006). Bu çalışmada nümerik analizler kapsamında kullanılan üç boyutlu modelde, basitleştirilmiş mikro-modelleme yaklaşımı tercih edilmiştir. Modelde taşlar sürekli eleman olarak tasarlanmış ve mekanik özellikleri, deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle tanımlanmıştır. Duvarda kullanılan 2 mm'lik harç tasarlanmayıp onun yerine literatürde **surface-based cohesive zone** (yüzey-bazlı kohezif bölge) olarak tanımlanan süreksiz ve ebatsız elemanlar kullanılmıştır. Harcın elastik ve plastik davranışı, taşları birbirine bağlayan bu süreksiz ve ebatsız elemanlar yardımı ile modele dahil edilmiştir. Böylece tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların derzlerine ait elastik ve plastik davranışlar modelde dikkate alınmıştır.

3.3.1.1. Derzlerin elastik davranışı

Derzlerin elastik davranışı temel olarak, harç malzemesinin Hook kanununa uyduğu varsayımına dayanmaktadır. Yani malzemenin şekil değişimindeki artış ve azalış

doğrudan gerilmenin artış ve azalışına bağlıdır. Gerilme artınca malzemedeki şekil değişimleri artmakta, gerilme kaldırılınca oluşan şekil değiştirmeleri tamamen sıfırlanmaktadır (Özen, 2006).



Şekil 46. Derzlerin kırılma şekilleri (a) çekme kırılması, (b) ve (c) kayma kırılması

Tez kapsamında oluşturulan modelde ise, derzin elastik davranışı kırılma öncesi bir doğrusal çekme ayrışmasına bağlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu doğrusal davranış bir elastik rijitlik matrisi ile gösterilebilmektedir. Şekil 46’de verilen derzlerin elastik rijitliği k , nominal çekme vektörü t ve karşılık gelen ayırma vektörü Δ arasındaki ilişki Denklem 13’te verilmiştir.

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_n \\ \Delta_s \\ \Delta_t \end{Bmatrix} = k\Delta \quad (13)$$

Buradaki en önemli konu basitleştirilmiş modelde kullanılan ara yüzün k rijitlik matrisinin bileşenleri gerçek duvara ait derzin rijitliğine eşit olmak zorundadır. Bu durumda eşdeğer rijitlik, taş ve harcın elastisite modülünün ve harcın kalınlığının bir fonksiyonu olarak yazılabilir (Denklem 14 ve 15) (Abdulla ve ark., 2017; Lourenço, 1996).

$$K_{nn} = \frac{E_t E_h}{h_h (E_t - E_h)} \quad (14)$$

$$K_{ss} \text{ ve } K_{tt} = \frac{G_t G_h}{h_h (G_t - G_h)} \quad (15)$$

3.3.1.2. Derzlerin plastik davranışı

Derzlerin elastik davranışından sonra plastik davranışı devreye girmektedir. Plastik davranış üç aşamayı kapsamaktadır. Birinci aşama elastik bölgeden sonra derzlerde kırılmaların meydana gelmesidir. Bu aşamada çatlağın başlangıcı incelenmektedir. İkinci aşamada, çatlaklar derz boyunca gelişmekte ve duvarın kırılmasına sebep olmaktadır. Üçüncü aşamada ise kırılmadan sonra duvarın yükleme altında sadece sürtünme kuvvetinin izin verdiği kadar hareket etmesidir. Bu bölümde tez kapsamında kullanılan nümerik modelin plastik davranışının tasarımı açıklanmıştır.

Derzlerde çatlağın başlama kriterine bağlı olarak çatlağın başlangıcının tahmin edilmesi oldukça önem arz etmektedir. Çünkü çatlak oluşuktan sonra gelişmekte ve duvarın kırılmasına sebep olmaktadır. Aksi takdirde farklı yükler altında duvardaki kırılmalara ulaşmak mümkün değildir. Bu anlamda, kullanılan modelde kırılmaların başlangıcının tahmin edilmesi için Denklem 16'da verilen ikinci dereceden gerilme kriteri kullanılmıştır. Bu kriter, duvardaki derzler yerine kullanılan ara yüzdeki gerilme oranları 1'e eşit olduğunda karşılanmış olmaktadır. Kullanılan kriter, daha önce literatürde farklı yüklemelere maruz kalan derzlerdeki kırılma başlangıcının tahmininde başarılı bir şekilde kullanılmıştır (Abdulla ve ark., 2017; Campilho ve Domingues, 2008).

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^{maks}}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^{maks}}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^{maks}}\right)^2 = 1 \quad (16)$$

Duvarların çekme kırılması, deneysel verilerden elde edilen ve nümerik modelde tanımlanan çekme dayanımı tarafından belirlenir. Buna bağlı olarak derzlerin kırılma öncesi, kritik kayma gerilmesi olarak bilinen büyüklük Denklem 17'de verilen Mohr-Coulomb kırılma eşitliği ile belirlenmektedir.

$$\tau_{kritik} = c + \mu\sigma_n \quad (17)$$

Yığıma duvarların derzindeki kayma gerilmesi, kohezyon, sürtünme katsayısı ve normal gerilmeler dikkate alınarak Denklem 16 ile hesaplanmakta ve böylece nümerik modelde τ_{kritik} tanımlanmaktadır. Derzlerdeki harcın kırılmasından sonra duvarın kaymasında büyük rol oynayan sürtünme katsayısı ise, düşey gerilmelere bağlı olarak Denklem 17'de

verilen formülle hesaplanmaktadır. Denklem 17 duvarın kayma dayanımı aşıldıktan sonraki duvarın kaymasını temsil etmektedir.

$$\tau_{kayma} = \mu\sigma_n \quad (18)$$

Yığma duvarların derzlerinde çatlağın başlangıç kriteri karşılandığında ve çatlağın genişlemesi ile rijitlik değerinde düşüş başlamakta ve derzin kırılması ile son bulmaktadır. Böylece Denklem 13, Denklem 19 şeklinde yazılabilmektedir. Denklem 19'deki D , hasar gelişim değişkenini göstermektedir ve çatlağın başlangıç kriteri karşılandıktan sonra 0'dan 1'e doğru artmaktadır.

$$t = (1 - D)k\Delta \quad (19)$$

Bu değer Abaqus paket programında iki şekilde tanımlanmaktadır. Birincisi, hasar sürecinin bir sonucu olarak harcanan enerjinin hesaplanması ile, ikincisi ise kırılmanın meydana gelmesindeki deplasmanın belirlenmesi ile. Tez kapsamında birinci yöntem kullanılmış ve uygun değerlerin bulunması için denemeler yapılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, deneysel çalışmaların sonuçları ilgili başlıklar altında sunulmuştur. Sonuçların değerlendirmesi ise Bölüm 6'da yer almaktadır.

4.1. Bireysel Elemanların Mekanik Özellikleri

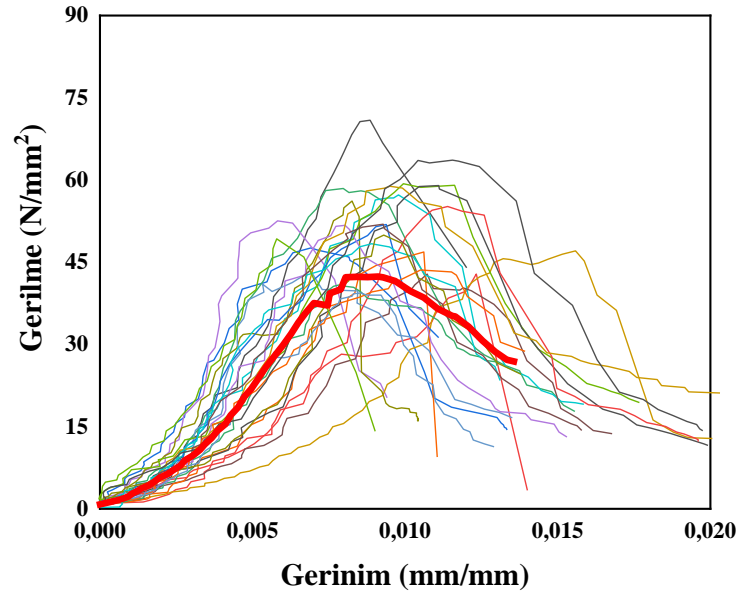
Bireysel elemanların mekanik özelliklerinin belirlenmesi kapsamında, duvar numunelerinde kullanılan doğal taş, harç ve metal bağlantı elemanlarının mekanik özellikleri deneylerle belirlenmiş ve sonuçlar ilgili başlıklar altında sunulmuştur.

4.1.1. Taşın Mekanik Özelliği

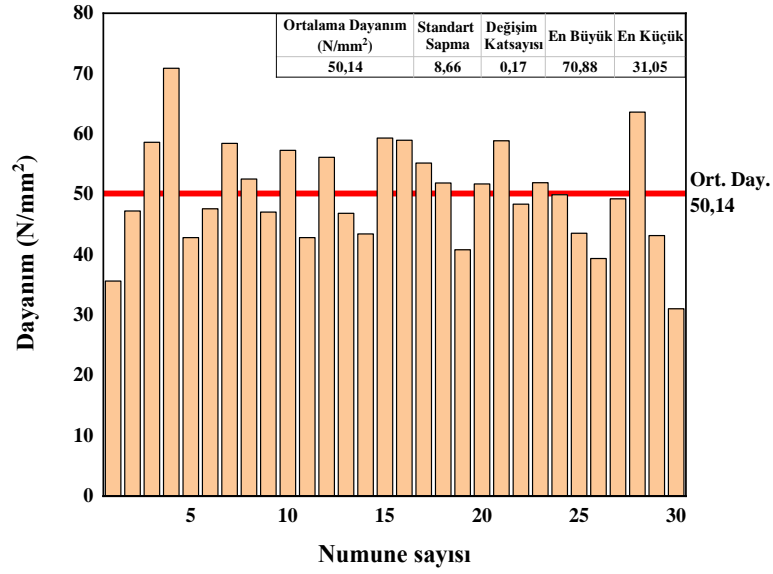
Çalışmalarda kullanılan taşların mekanik özelliklerinin belirlenmesi kapsamında, Mayra bej taşının *basınç dayanımı*, *elastisite modülü* ve *kesme dayanımı* belirlenmiştir. Bu amaçla her bir deney için belli sayıda numune, gelen tüm taşları temsil edecek şekilde farklı paletlerden alınarak, ilgili standarda uygun olarak hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur.

4.1.1.1. Basınç dayanımı

Taşın mekanik özelliklerinden biri olan basınç dayanımı TS EN 1926 (2006)'ya göre belirlenmiştir. Bu amaçla 30 adet numune hazırlanmış ve basınç deneyine tabi tutulduktan sonra gerilme – gerinim grafiği çizilmiştir (Şekil 47). Bu numunelere ait ortalama dayanım, standart sapma değeri, değişim katsayısı, en büyük değer ve en küçük değerler ise Şekil 48'de verilmiştir. Basınç deneyine tabi tutulan 30 adet numunenin ortalama basınç gerilme – gerinim grafiği ise Şekil 47'de kalın kırmızı çizgi ile gösterilmiştir.



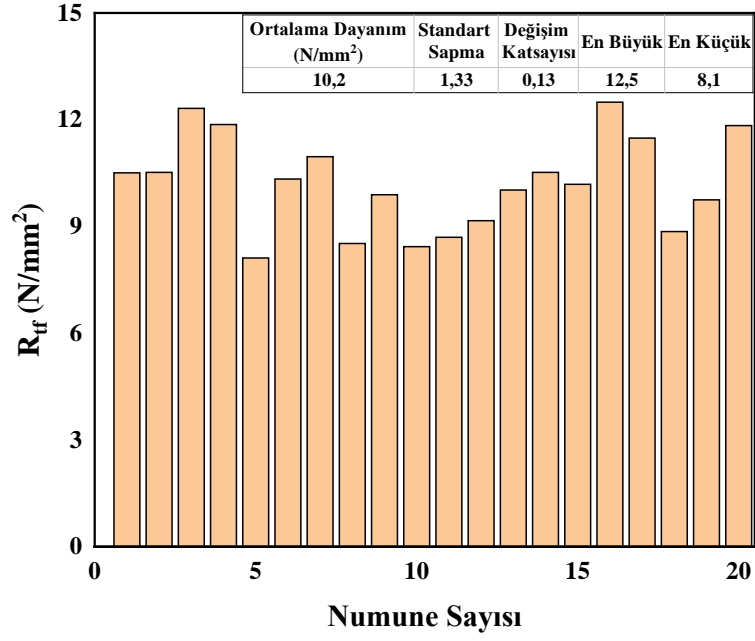
Şekil 47. Taşların basınç dayanımına ait gerilme – gerinim grafiği



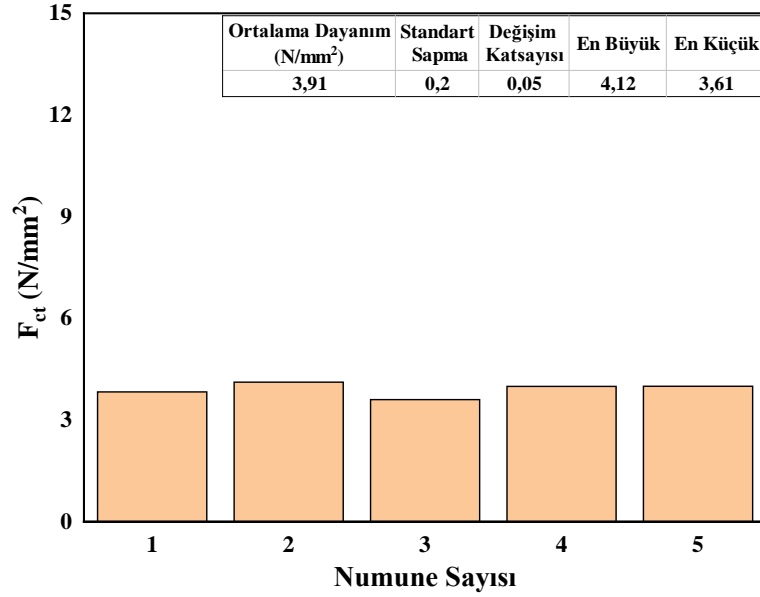
Şekil 48. Taşların basınç dayanımı

4.1.1.2. Kesme dayanımı

Duvarlarda kullanılan Mayra bej taşının kesme dayanımı iki farklı yöntemle belirlenmiştir. Bunlardan ilki üç noktalı eğilme deneyidir. Eğilme deneyinde 20 adet numune deneye tabi tutulmuş ve sonuçları Şekil 49'da verilmiştir. İkinci yöntemde ise taşların kesme dayanımı yarmada çekme deneyi ile belirlenmiştir (Şekil 50).



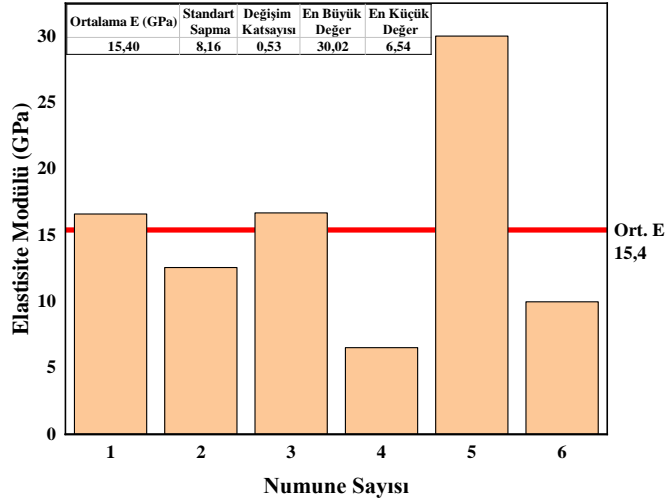
Şekil 49. Taşların eğilmede çekme dayanımı



Şekil 50. Taşların yarmada çekme dayanımı

4.1.1.3. Elastisite modülü

Deneysel çalışmalarda kullanılan doğal kesme taşın elastisite modülü TS EN 14580 (2006) standardına göre belirlenmiştir. 6 adet numuneye ait elastisite modülü Şekil 24’te verilen yükleme adımlarına tabi tutulduktan sonra Denklem 3 yardımı ile hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 51’de gösterilmiştir.



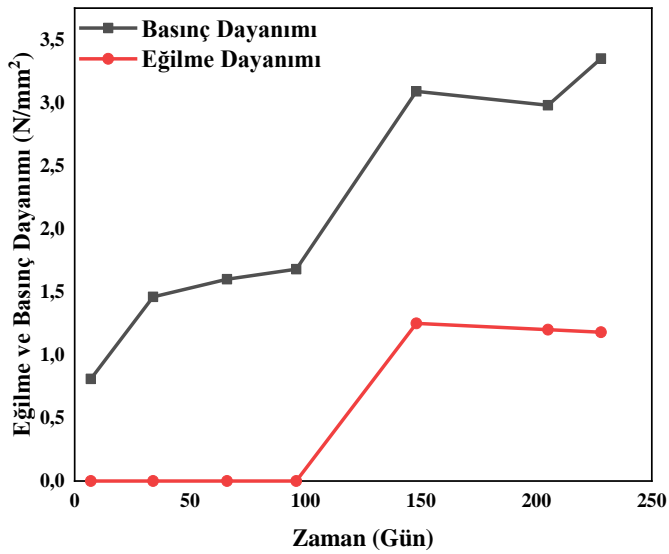
Şekil 51. Taşların elastisite modülü

4.1.2. Harçlar

Bu bölümde tez kapsamında kullanılan (kireç ve horasan) harçların mekanik özellikleri sunulmuştur.

4.1.2.1. Kireç harcı

Kireç harcının mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için üretilen numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra laboratuvar ortamında açık havada kür edilerek deneylere tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar Şekil 52 ve Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 52. Kireç harcın basınç ve eğilmede çekme dayanımı

Tablo 4. Kireç harcına ait basınç ve eğilmede çekme dayanımı

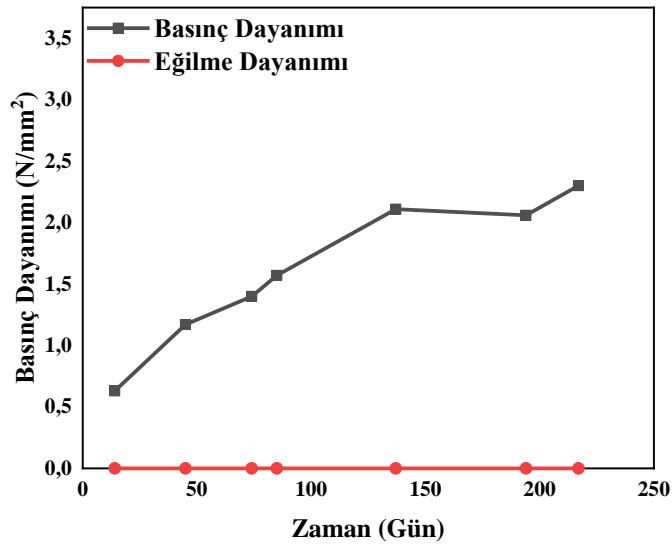
Deney Tarihi	Ebatlar			Eğilme Dayanımı (MPa)		Basınç Dayanımı (MPa)	
	En (mm)	Boy (mm)	Yüksek (mm)	Numune	Ortalama	Numune	Ortalama
17.07.18 (7 gün)	40	160	40	0		0,79	
	40	160	40	0	0	0,85	0,81
	40	160	40	0		0,80	
20.08.18 (34 gün)	40	160	40	0		1,38	
	40	160	40	0	0	1,49	1,46
	40	160	40	0		1,53	
21.09.18 (66 gün)	40	160	40	0		1,65	
	40	160	40	0	0	1,60	1,60
	40	160	40	0		1,56	
16.10.18 (96 gün)	40	160	40	0		1,56	
	40	160	40	0	0	1,75	1,68
	40	160	40	0		1,74	
07.12.18 (148 gün)	40	160	40	1,31		3,34	
	40	160	40	1,13	1,25	3,24	3,09
	40	160	40	1,33		2,71	
15.01.2019 (205 gün)	40	160	40	1,20		2,93	
	40	160	40	1,25	1,20	3,18	2,98
	40	160	40	1,17		2,84	
07.02.2019 (228 gün)	40	160	40	1,25		3,44	
	40	160	40	1,21	1,18	3,45	3,35
	40	160	40	1,09		3,17	
28.04.2019 (308 gün)	40	160	40	1,13		2,79	
	40	160	40	1,09	1,09	2,86	2,76
	40	160	40	1,04		2,64	

4.1.2.2. Horasan harcı

Kireç harcında olduğu gibi horasan hancından da numuneler üretilerek üç noktalı eğilme ve basınç deneyine tabi tutulmuştur. Farklı zaman aralıklarında belirlenen basınç ve eğilmede çekme dayanımları Tablo 5 ve Şekil 53'te verilmiştir. Kür şartları ve horasan harcının mekanik özelliklerinden dolayı horasan harcının eğilme dayanımı sıfır olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi ise numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra ve açık havada kür edildiği için, numunelerde kılcal çatlakların oluşmasıdır.

Tablo 5. Horasan harcına ait basınç ve eğilmede çekme dayanımı

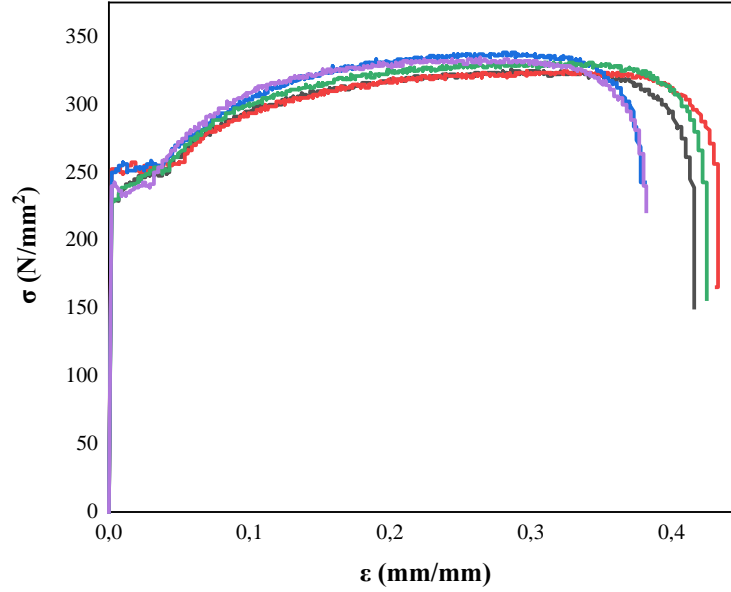
Deney Tarihi	Ebatlar			Eğilme Dayanımı (MPa)		Basınç Dayanımı (MPa)	
	En (mm)	Boy (mm)	Yüksek (mm)	Numune	Ortalama	Numune	Ortalama
26.07.18 (14 gün)	40	160	40	0		0,64	
	40	160	40	0	0	0,63	0,63
	40	160	40	0		0,62	
20.08.18 (45 gün)	40	160	40	0		1,23	
	40	160	40	0	0	1,10	1,17
	40	160	40	0		1,18	
21.09.18 (74 gün)	40	160	40	0		1,41	
	40	160	40	0	0	1,43	1,40
	40	160	40	0		1,36	
16.10.18 (85 gün)	40	160	40	0		1,64	
	40	160	40	0	0	1,71	1,57
	40	160	40	0		1,37	
07.12.18 (137gün)	40	160	40	0		2,10	
	40	160	40	0	0	2,21	2,11
	40	160	40	0		2,02	
15.01.2019 (194 gün)	40	160	40	0		2,19	
	40	160	40	0	0	2,27	2,06
	40	160	40	0		1,73	
07.02.2019 (217 gün)	40	160	40	0		1,92	
	40	160	40	0	0	2,39	2,30
	40	160	40	0		2,59	
28.04.2019 (297 gün)	40	160	40	0		1,85	
	40	160	40	0	0	1,84	1,90
	40	160	40	0		2,01	



Şekil 53. Horasan harcın basınç ve eğilmede çekme dayanımı

4.1.3. Bağlantı Elemanları

Kenetlerin çekme dayanımının belirlenebilmesi için 5 adet numune hazırlanmış, deneye tabi tutulmuş ve numunelere ait gerilme – gerinim grafikleri Şekil 54’te verilmiştir. Gerilme – gerinim grafiklerinden yola çıkarak kenetlere ait detaylı bilgiler Tablo 6’da sunulmuştur.

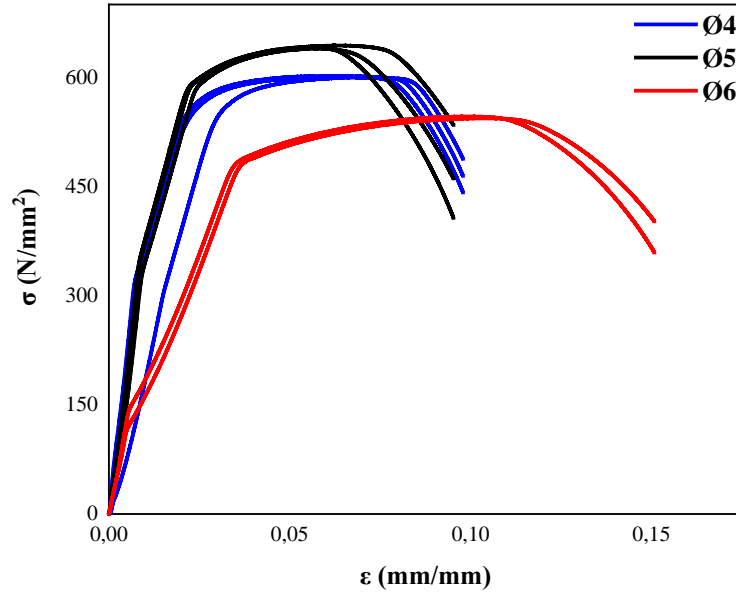


Şekil 54. Kenetlerde kullanılan S235JR çeliğine ait gerilme – gerinim diyagramı

Tablo 6. Kenetlerde kullanılan çeliğin mekanik özellikleri

No	F _{yd} (N/mm ²)	ε _{yd}	E (N/mm ²)	F _u (N/mm ²)
1	230,08	0,0019995	115066	325,85
2	246,25	0,0019995	123156	327,10
3	252,48	0,0019995	126269	324,62
4	266,15	0,0019995	133108	325,00
5	248,75	0,0020025	124220	338,30
Ortalama	227,60	0,0019995	113828	330,82

Zıvanaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi kapsamında farklı çaplardan numuneler hazırlanarak çekme deneyine tabi tutulmuştur. Numuneler ait gerilme – gerinim diyagramı Şekil 55’te verilmiştir.



Şekil 55. Zıvanalarda kullanılan hasır çeliğine ait gerilme – gerinim diyagramı

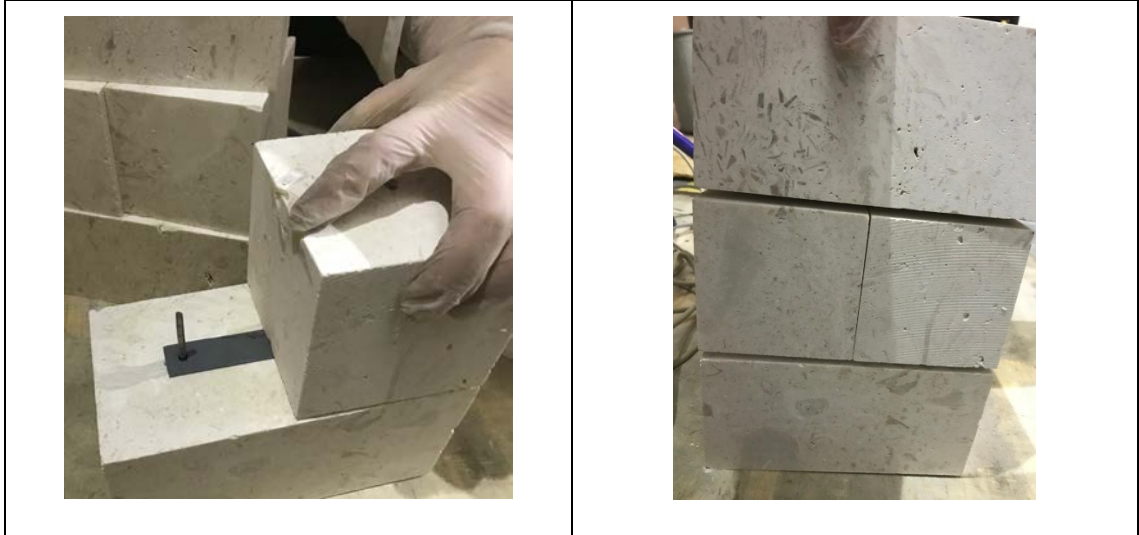
Gerilme – gerinim grafiği incelendiğinde kenetlerde kullanılan S235JR çeliğin gevrek malzeme davranışı gösterdiği için akma dayanımının belirgin olmadığı görülmektedir. Bu bağlamda zıvanalarda kullanılan hasır çeliğin elastisite modülü, 0,002 gerinimine karşılık gelen gerilme dikkate alınmış ve detaylar Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Zıvanalarda kullanılan çeliğin mekanik özellikleri

No	Numune Çapı (mm)	F_{yd} (N/mm ²)	ϵ_{yd}	E (N/mm ²)	F_u (N/mm ²)	F_k (N/mm ²)
1		83,31	0,0020051	41551	601	32,90
2	4	27,20	0,0020025	13583	600	33,01
3		94,61	0,0020024	47250	602	33,32
4		50,31	0,0020023	25126	639	36,94
5	5	70,42	0,0020000	35209	642	35,96
6		72,33	0,0020023	36125	644	36,50
7		45,09	0,0020026	22516	546	-
8	6	46,49	0,0020024	23216	544	-
Ortalama		61,22	0,0020024	30572	602	34,77

4.2. Metal Bağlantı Elemanlarının Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

Tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarlarda kullanılan metal bağlantı elemanlarının tasarım parametrelerinin belirlenmesi kapsamında, deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere zıvanaların optimum çapı belirlenmiştir. Bu kapsamda yatay yüklere karşı zıvanaların çapının etkisi, bir seri başlangıç kayma deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Bu ön çalışma kapsamında dört farklı zıvana çapı (3, 4, 5 ve 6 mm) kullanılarak 36 adet numune TS EN 1052-3 (2002) standardına uygun olarak hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. Bu numuneler, dört gruba ayrılmış ve her grupta 9 adet numune, belli bir zıvana çapı ile, yer almaktadır. Hazırlanan numunelerin üretiminde Şekil 56’te gösterildiği gibi, bireysel taşlar sadece metal bağlantı elemanları kullanılarak birbirine bağlanmış ve üç farklı düşey gerilme (0,2 – 0,6 – 1 MPa) altında başlangıç kayma deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 56. Optimum zıvana çapının belirlenmesi için hazırlanan numuneler

Zıvanaların optimum çaplarının belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmada ana kriter, zıvanaların çapı ve mekanik özelliklerine bağlı kesme dayanımının, bireysel taş elemanların kesme dayanımını aşmaması şeklinde belirlenmiştir. Bu da Şekil 57.b’de gösterildiği gibi bireysel taş birimleri kırılmadan, zıvanaların kesilmesi anlamına gelmektedir. Aksi halde Şekil 57.a’da olduğu gibi zıvanalar kesilmeden taşlar kırılmakta ve duvarların stabilitesi düşey yüklere karşı tehlikeye girmektedir.

Yapılan deney sonucunda 3 ve 4 mm çapında olan zıvanalar kullanılarak üretilen numunelerin tamamında, her üç düşey gerilme (0,2 – 0,6 – 1 MPa) altında, zıvanaların

kesildiği ve bireysel taşların zarar görmediği gözlenmiştir. 5 mm olan zıvana çapı ile üretilen numunelerde ise 0,2 ve 0,6 MPa düşey gerilme altında zıvanaların kesildiği, buna karşın 1 MPa düşey gerilme altında taşların kırıldığı görülmüştür.

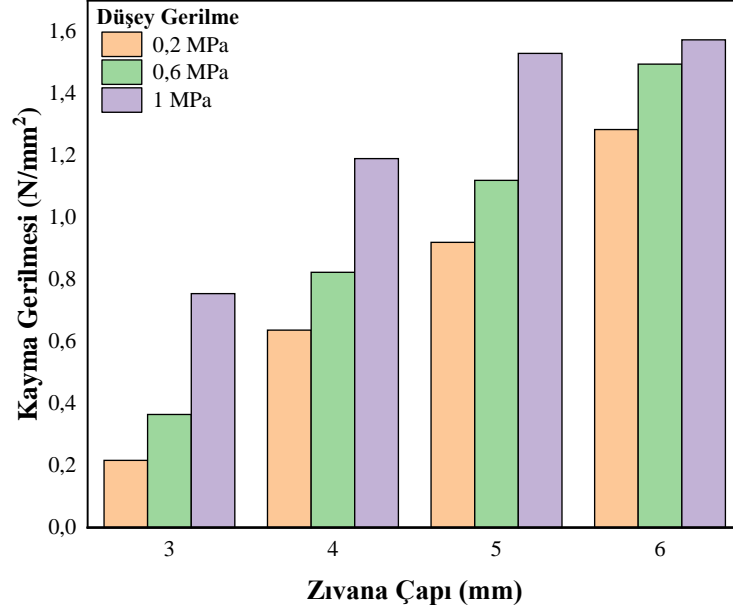


Şekil 57. Zıvana çapının yatay yüklere karşı davranışı

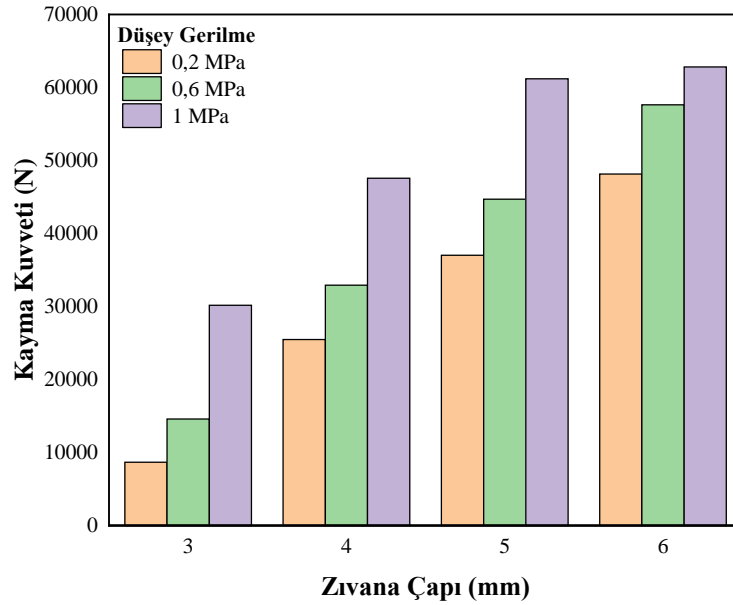
Tablo 8. Farklı zıvana çaplarına ait kayma gerilmeleri

No	Numune Adı	Zıvana Çapı	Uygulanan Maks. Basınç Dayanım	Maks. Kayma Kuvveti	Maks. Kayma Gerilmesi
		mm	N/mm ²	N	N/mm ²
1	SW3IS20	3	0,27	8665	0,22
2	SW3IS60		0,71	14594	0,37
3	SW3IS100		1,30	30179	0,75
4	SW4IS20	4	0,44	25474	0,64
5	SW4IS60		0,86	32924	0,82
6	SW4IS100		1,41	47580	1,19
7	SW5IS20	5	0,58	37027	0,92
8	SW5IS60		0,99	44698	1,12
9	SW5IS100		1,55	61191	1,53
10	SW6IS20	6	0,82	48137	1,28
11	SW6IS60		1,17	57625	1,50
12	SW6IS100		1,51	62808	1,57

6 mm çapına sahip zıvanalarla üretilen numunelerin tamamında bireysel taşların kırıldığı gözlenmiş ve deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 8’de özetlenmiştir. Farklı zıvanalara ait kayma gerilmeleri ile kayma kuvvetleri Şekil 58 ve 59’de verilmiştir.



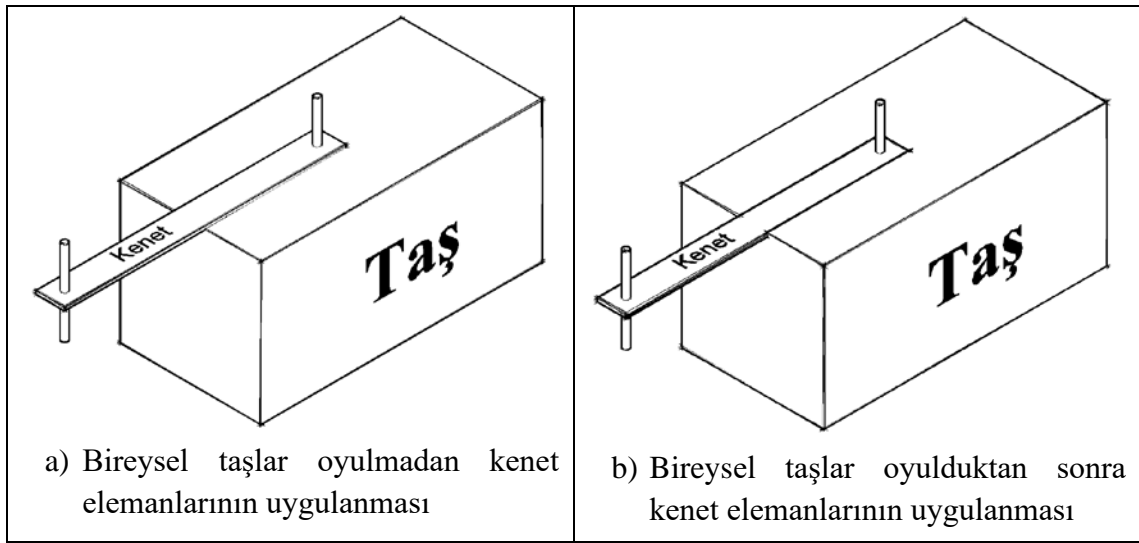
Şekil 58. Farklı zıvanalara ait maksimum kayma gerilmesi



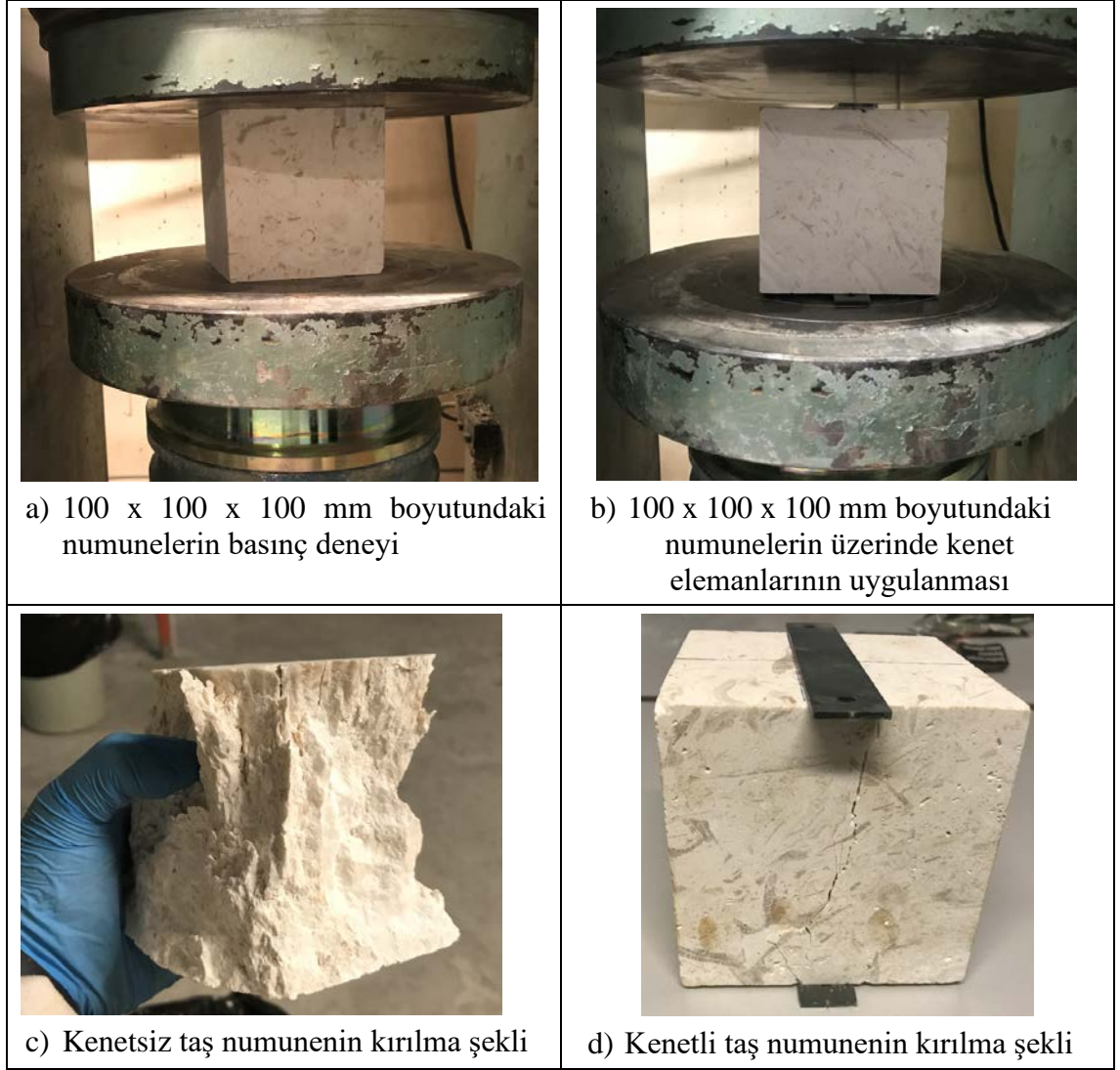
Şekil 59. Farklı zıvanalara ait maksimum kayma kuvveti

Farklı zıvana çapları kullanılarak yapılan başlangıç kayma deneyi sonucunda, optimum zıvana çapı 4 mm olarak belirlenmiştir. Bu açıdan tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal

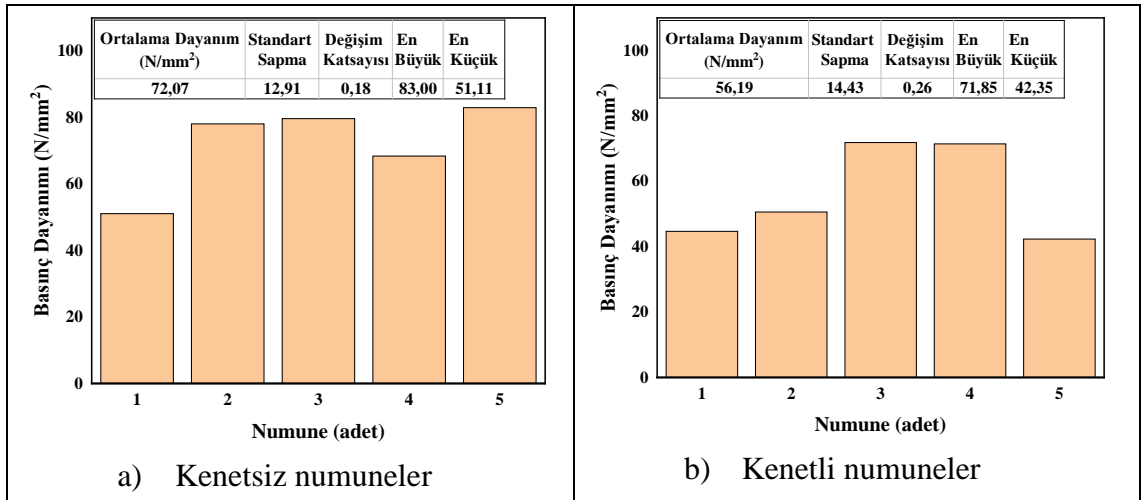
taş duvar numunelerin düzlem içi mekanik özelliklerinin belirlenmesi kapsamında, metal bağlantı elemanları içeren tüm numunelerin üretiminde, 4 mm çaplı zıvana kullanılmıştır. Bu ön çalışma kapsamındaki bir diğer husus ise kenet elemanların uygulama biçimidir. Şekil 60'ta gösterildiği gibi kenet elemanları iki şekilde uygulanabilmektedir. İlki, kenetlerin doğrudan bireysel taşların üzerine konulması (Şekil 60.a), ikincisi ise kenet elemanların uygulanacak yerlerde kanalların açılması ve kenetlerin bu kanallar içerisinde yerleştirilmesi şeklindedir (Şekil 60.b). Birinci uygulama biçiminde kenet üzerine gelen yükler kenet kesit alanında yığılmakta ve duvarların basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Buna karşın uygulanma biçimi basit olduğundan ek işçilik ve maliyete sebep olmamaktadır. İkinci uygulama biçimi ise gerilme yığılmasını önlenmekte ancak fazladan işçilik ve maliyete sebep olmaktadır. Tez kapsamında uygulanan kenet elemanların biçimi, Şekil 60.a'da gösterildiği gibi kanallar açılmadan uygulandığından, bir ön çalışma ile olumsuz etkinin boyutu araştırılmıştır. Bu bağlamda, 100 x 100 x 100 mm boyutunda 10 adet taş numune basınç deneyine tabi tutulmuştur. 10 adet numunedan 5 adedi, Şekil 61.a'da gösterildiği gibi, düşey yük taş numunenin kesit alanı olan 10000 mm² alana etki edecek şekilde basınç deneyine tabi tutulmuştur. Kalan diğer 5 adette ise taşın altına ve üstüne kenet konularak düşey yük kenet alanı olan 2000 mm² alana etki ettirilmiştir. Her iki uygulamaya ait kırılma şekilleri sırasıyla Şekil 61.c ve 61.d'de verilmiştir. Numunelerin basınç dayanımları karşılaştırılmalı olarak Şekil 62'de gösterilmiştir.



Şekil 60. Kenet elemanlarının uygulanma biçimleri



Şekil 61. Kenetli ve kenetsiz basınç deneyleri



Şekil 62. Kenet elemanlarının basınç dayanımındaki etkisi

4.3. Mikro Boyutlu Duvar Numunelerin Mekanik Özellikleri

İçi boş çok katmanlı doğal taş duvarların düzlem içi mekanik özellikleri, mikro boyutlu duvar numunelerin deneylere tabi tutulmasıyla belirlenmiştir. Bu bölümde mikro boyutlu numunelerin deneysel sonuçları sunulmuştur.

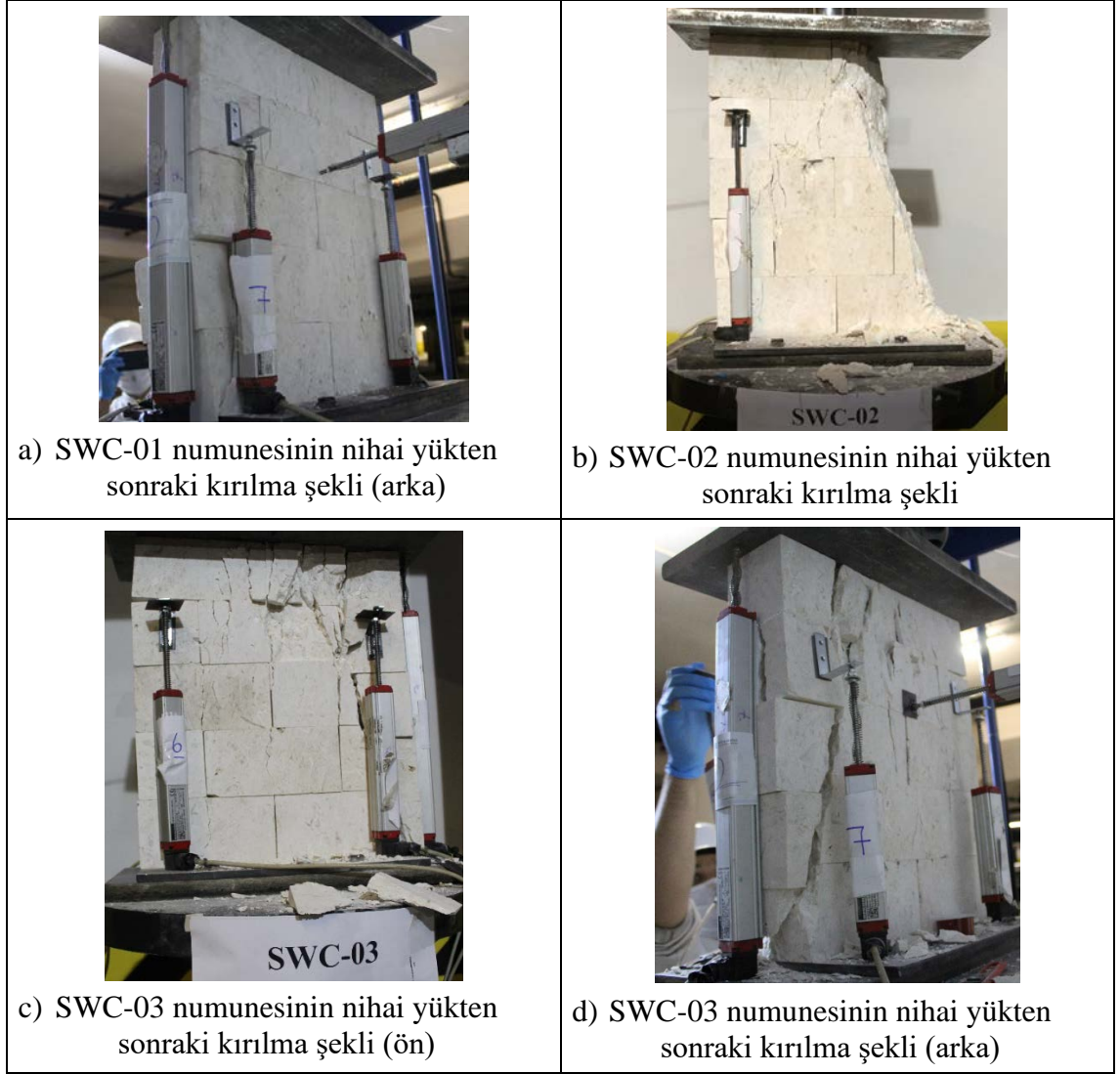
4.3.1. Basınç dayanımı

Basınç deneyleri kapsamında, tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarların, tek eksenli düşey yükler altındaki davranışı detaylı olarak incelenmiştir. Bu amaçla duvarlara ait gerilme – gerinim diyagramları, elde edilen deneysel veriler kullanılarak çizilmiş ve duvarların basınç dayanımı ile Elastisite Modülleri belirlenmiştir. Üretilen numunelere ait deneysel sonuçlar ayrı başlıklar altında sunulmuş ve bölümün sonunda özetlenmiştir.

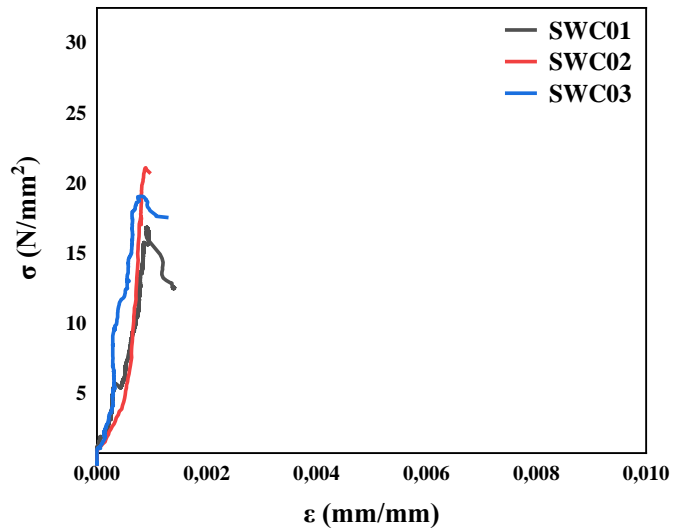
4.3.1.1. Harçsız numuneler

Harçsız numuneler grubunda 3 adet numune yer almaktadır. Bu gruptaki numunelerde harç ve metal bağlantı elemanları kullanılmamış, sadece taşların üst üste konulması ile üretilmiştir. Harçsız numunelerin üretimi ve basınç deneyine tabi tutulmasının en önemli sebebi, kullanılan taşların üst üste konulması ile duvarlarda TBDY (2018) , 11. maddesinde tanımlanan ince harcın kullanılması arasındaki farkı araştırmaktır.

Deney sonucunda SWC (harçsız) grubundaki numunelerin kırılma türü ani olmuş ve gevrek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir. Çatlakların gözle görülebilir hale gelmesi ile numune nihai basınç dayanımına ulaşmış ve düşey yük altında ani bir şekilde kırılarak deney son bulmuştur. Numunelere ait kırılma şekilleri Şekil 63'te, gerilme – gerinim diyagramları ise Şekil 64'te verilmiştir. Bunlara ek olarak SWC grubuna ait diğer detaylı bilgiler (kırılma yükü, basınç dayanımı ve elastisite modülü) bölüm sonunda verilmiştir.



Şekil 63. SWC grubuna ait basınç kırılma şekilleri



Şekil 64. SWC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı

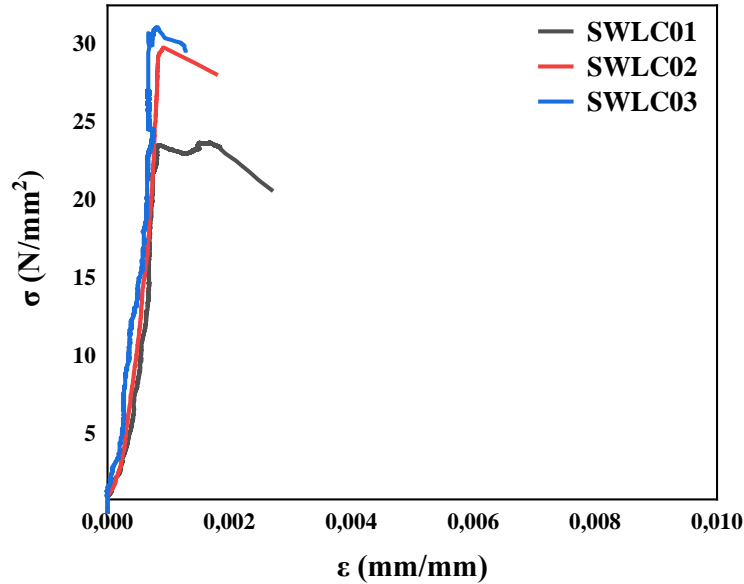
4.3.1.2. Kireç harçlı numuneler

Kireç harçlı numuneler kategorisinde 9 adet numune yer almaktadır. Bunlar SWLC, SWMLC ve DWMLC olmak üzere üç farklı alt gruba ayrılmış ve deney sonuçları ilgili başlıklar altında verilmiştir.

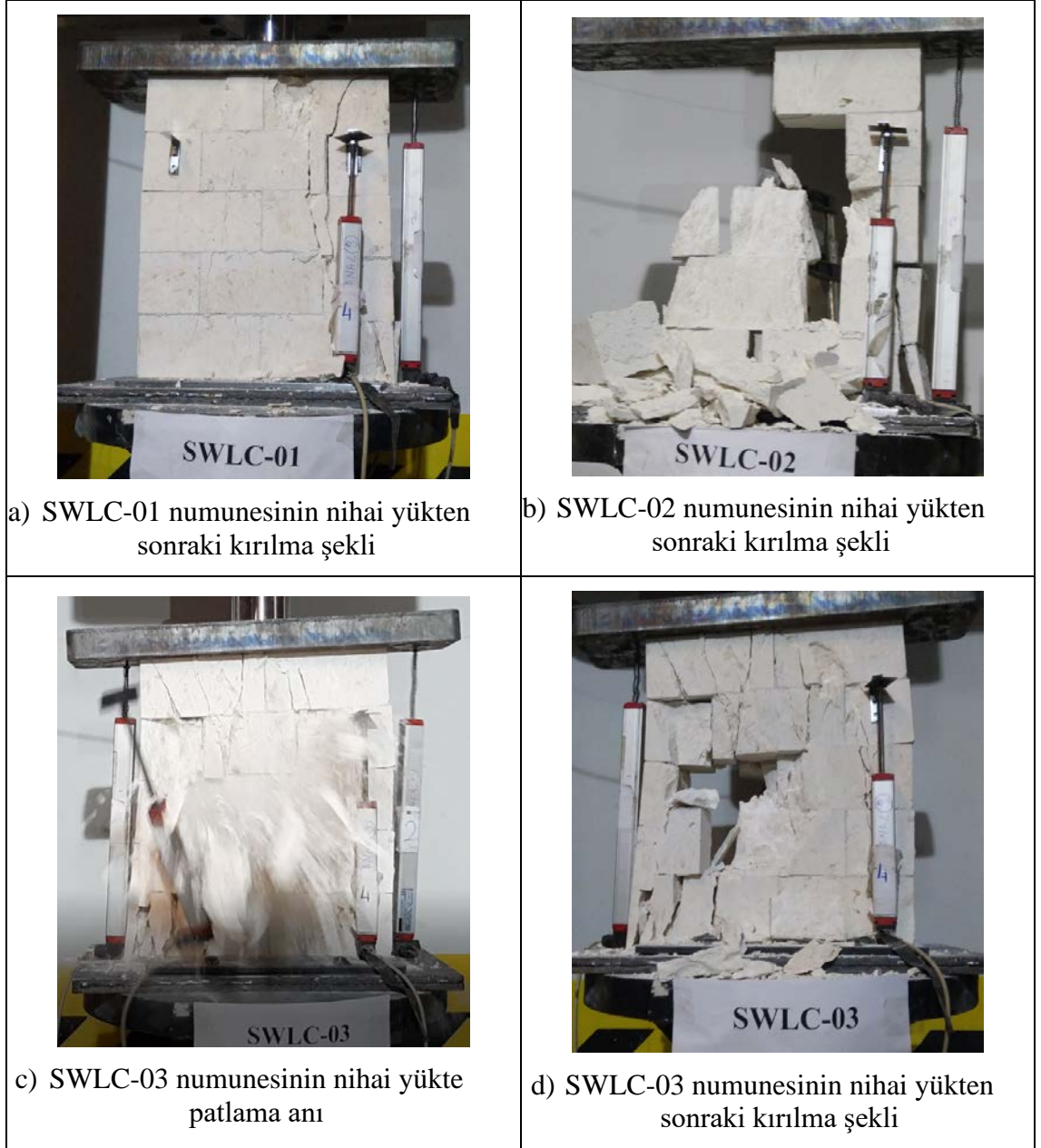
a. SWLC grubu

SWLC grubundaki numuneler tek katmanlıdır ve bireysel taşlar sadece 2 mm kalınlığındaki kireç harcı ile birbirine bağlanmıştır. Bu gruptaki numunelerin üretilmesinin ve basınç deneyine tabi tutulmasının iki sebebi vardır. Birincisi geleneksel harçlı taş duvarlar ile tasarlanan kenetli duvarlar arasındaki farkı araştırmak, diğeri ise yukarıda bahsedilen harçsız ve ince harçlı duvarların basınç dayanımlarının arasındaki farkı saptamaktır. Numuneler deneye tabi tutulduktan sonra aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

SWLC grubuna ait numunelerin düşey yük altındaki kırılmalarının çok ani gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Nihai yüke yakın seviyelerde çatlakların ortaya çıkması ve ardından hemen duvarın kırılması veya patlaması ile deney son bulmuştur. SWLC grubuna ait kırılmalar Şekil 66'da, gerilme – gerinim diyagramları Şekil 65'te verilmiştir.



Şekil 65. SWLC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı

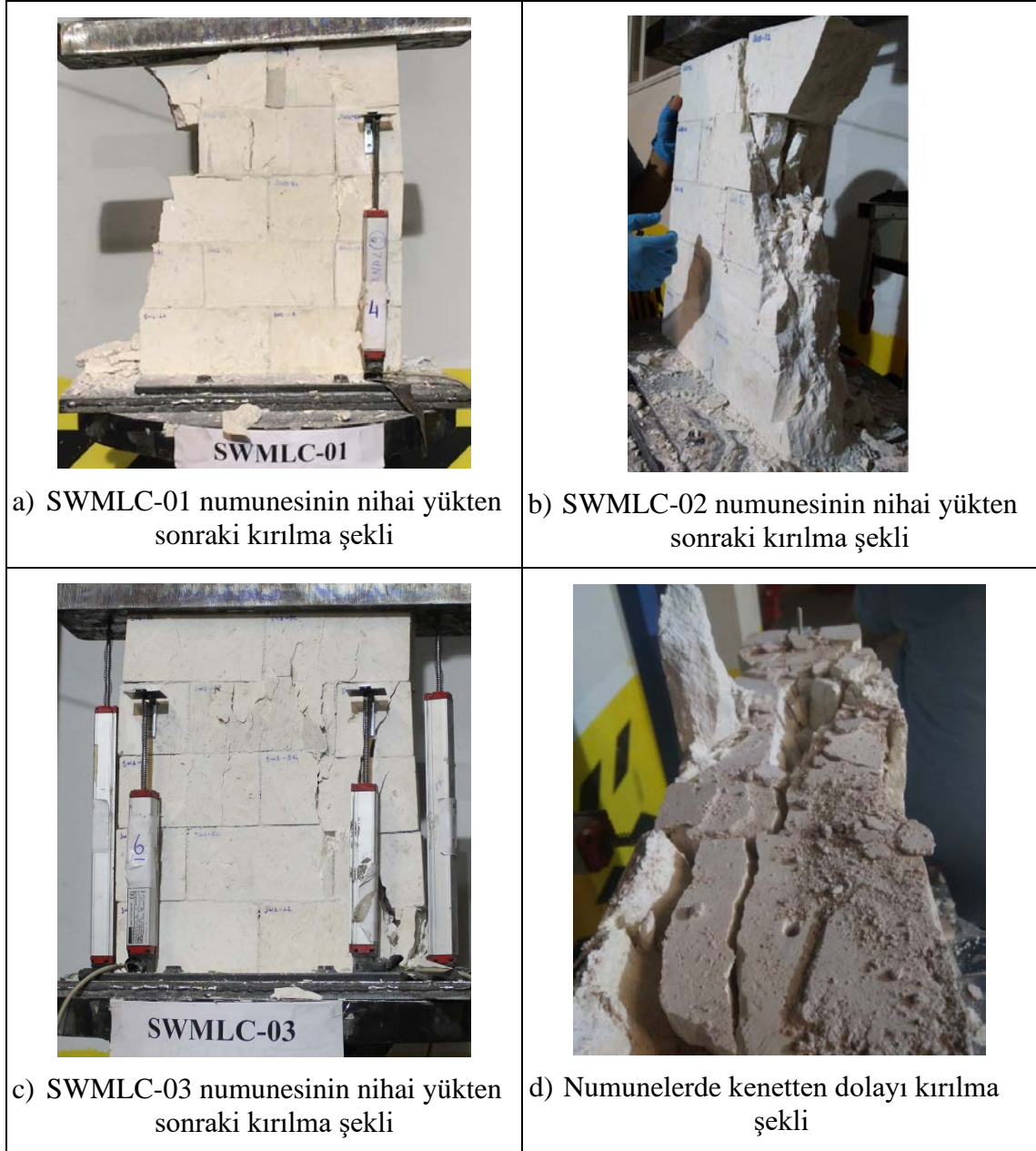


Şekil 66. SWLC grubuna ait basınç kırılma şekilleri

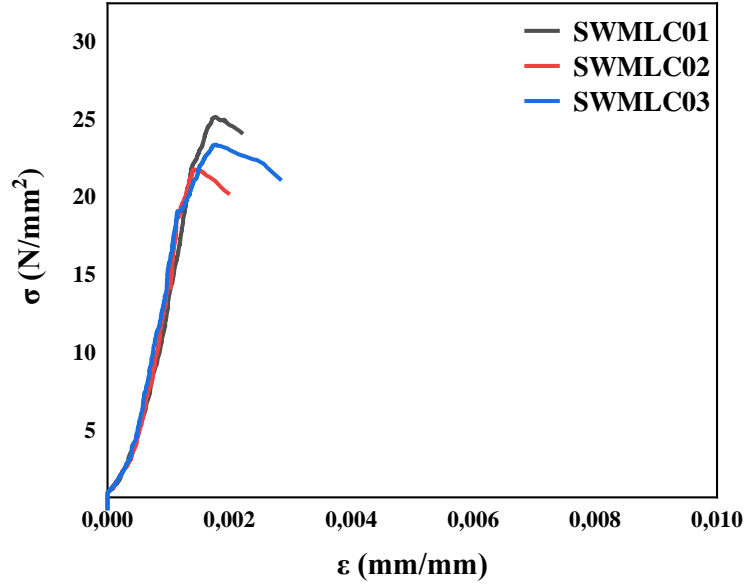
b. SWMLC grubu

SWMLC grubundaki numuneler tek katmandan oluşmakta ve bireysel taşlar 2 mm kireç harcın yanı sıra çelik bağlantı elemanlarla da (kenet ve zıvana) birbirine bağlanmıştır. Bu numuneler tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarın tek katmanını temsil etmektedir. Üretim ve basınç deneyine tabi tutulma amaçları ise çelik bağlantı elemanlarının özellikle kenetlerin basınç dayanımına olan etkisini araştırmaktır. 3 adet numune basınç deneyine tabi tutulmuş ve sonuçları aşağıda verilmiştir.

Numunelerde kırılma şeklinin bir önceki gruplara benzer olarak ani bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Çatlakların oluşumu ile numunenin patlayarak nihai dayanımına ulaştığı gözlenmiştir. Bu gruptaki numunelere ait kırılmalar Şekil 67’de ve gerilme – gerinim diyagramı Şekil 68’de verilmiştir.



Şekil 67. SWMLC grubuna ait basınç kırılma şekilleri

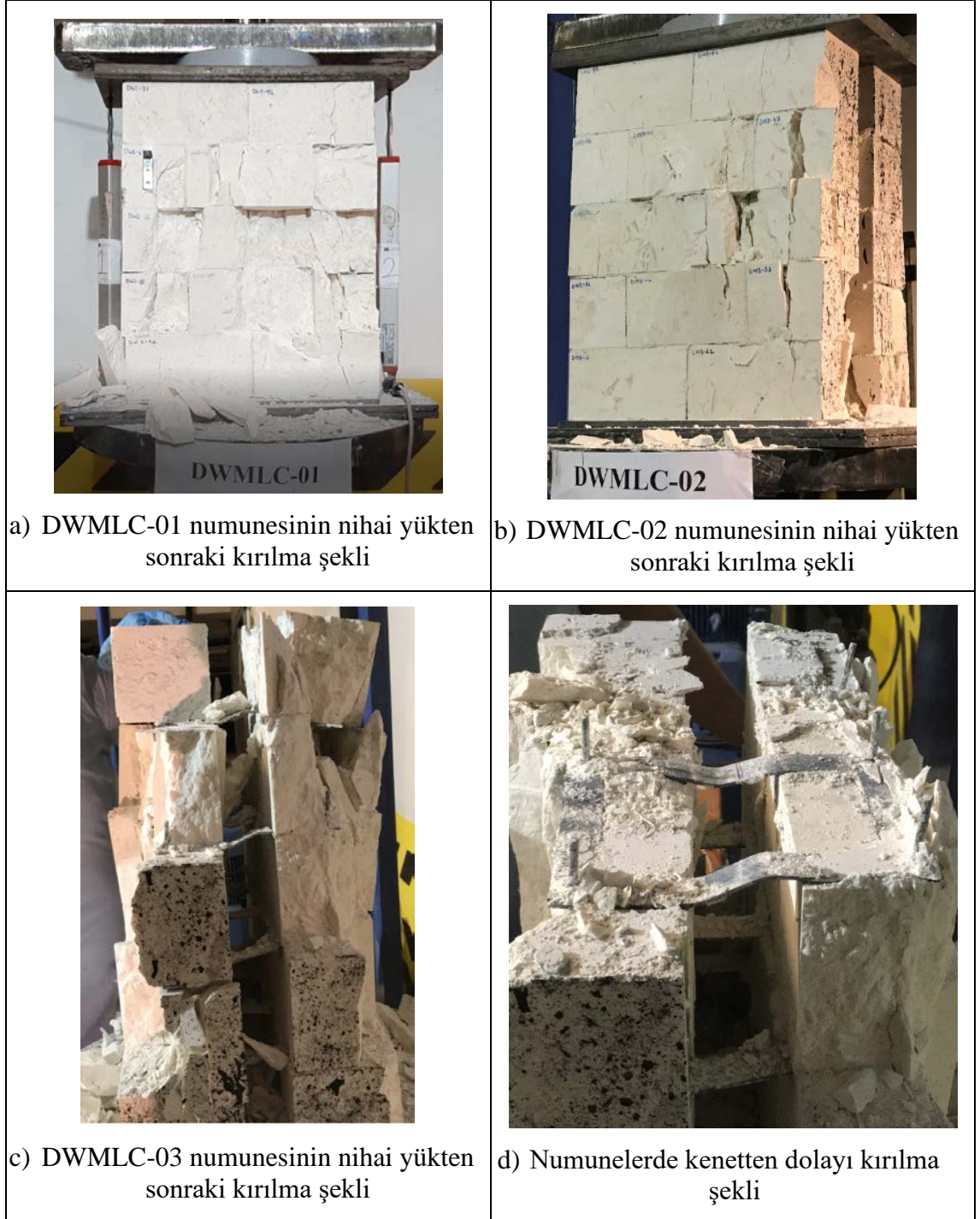


Şekil 68. SWMLC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı

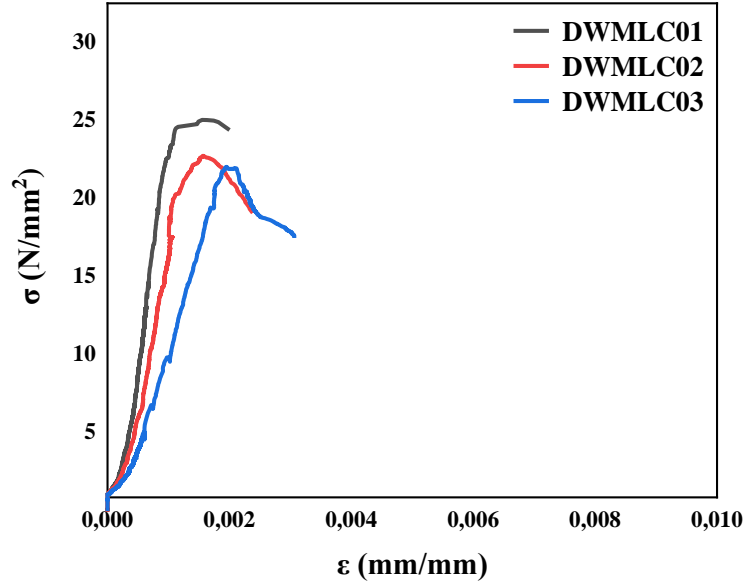
c. DWMLC grubu

DWMLC grubundaki numuneler içi boş çok katmanlı duvarları temsil etmektedir. Bu numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesi tezin ana amaçlarında biridir. DWMLC grubundaki numuneler iki katmandan oluşmakta ve katmanlar arasında 50 mm boşluk bulunmaktadır. Duvarın stabilitesinin sağlanması için katmanlar kenet ve zıvanalarla birbirine bağlanmıştır. Deneysel çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Düşey yükler altında numunelerdeki kırılmalar tek katmanlı numunelerde olduğu gibi çok ani meydana gelmiştir. Çatlaklar nihai yüke ulaşmadan hemen önce oluşarak geliştiği gözlenmiştir. Bu gelişim çok kısa bir süre zarfında numunenin nihai dayanımına ulaşması ve düşey yük altında kırılmasına sebep olmuştur. Numunelerde oluşan kırılmalar Şekil 69’da gösterilmiştir. DWMLC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramları Şekil 70’te yer almaktadır.



Şekil 69. DWMLC grubuna ait basınç kırılma şekilleri



Şekil 70. DWMLC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı

4.3.1.3. Horasan harçlı numuneler

Horasan harçlı numuneler kategorisinde 9 adet numune bulunmaktadır. Bu numuneler SWHC, SWMHC ve DWMHC olmak üzere 3 alt gruplara ayrılmış ve deney sonuçları ilgili başlıklar altında verilmiştir.

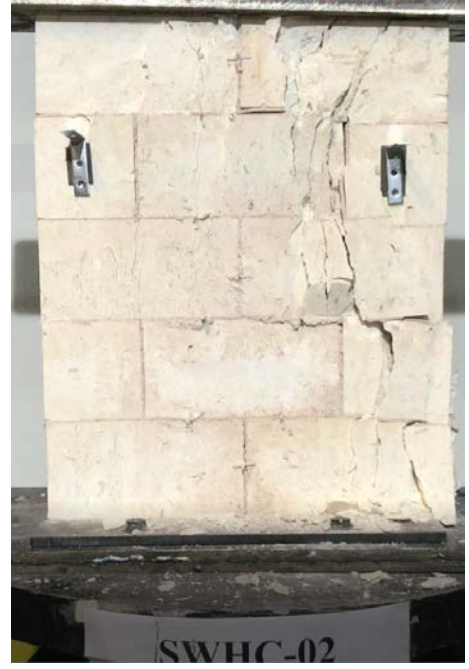
a. SWHC grubu

SWHC grubundaki numuneler, SWLC grubundaki numunelere benzer olarak tek katmanlı ve metal bağlantı elemanları kullanılmadan üretilmiştir. İki grup arasındaki fark SWHC grubunda horasan harcı, SWLC grubunda ise kireç harcı kullanılmıştır. SWHC grubundaki numunelerin üretimi ve basınç deneyine tabi tutulmasının amacı ise iki geleneksel harcın basınç dayanımındaki etkilerinin araştırılmasıdır.

Gruptaki 3 numunenin kırılma şekline bakıldığında, çatlakların nihai yüke yakın olduğu gözlenmiştir. Numunelerin kırılmaları aşırı gevrek olmayıp, nihai dayanıma ulaşmaları çatlakların oluşumu ve gelişimi ile gerçekleşmiştir. Duvarlarda patlamalar nihai dayanımdan sonra taşların sıkışması ile gerçekleşmiştir. Numunelerin kırılmaları Şekil 71’de ve gerilme – gerinim diyagramları Şekil 72’de verilmiştir.



a) SWHC-01 numunesinin nihai yükten sonraki kırılma şekli



b) SWHC-02 numunesinin nihai yükten sonraki kırılma şekli

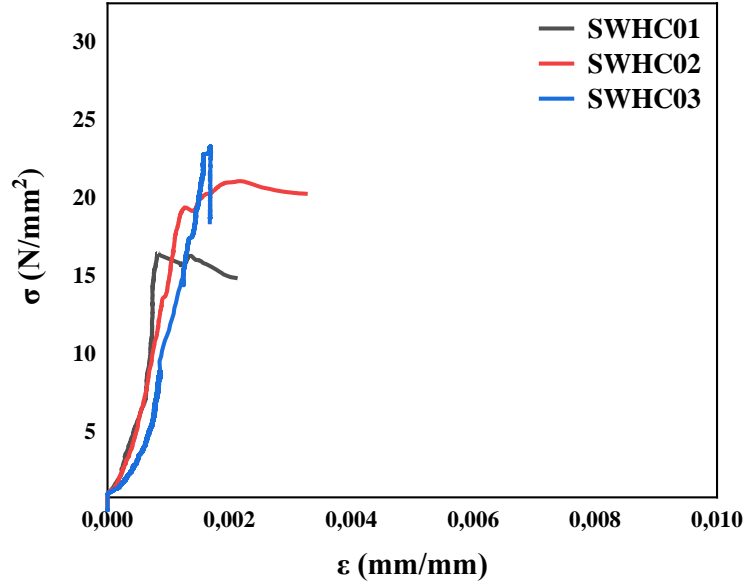


c) SWHC-03 numunesinin nihai yükteki patlama anı



d) SWHC-03 numunesinin nihai yükten sonraki kırılma şekli

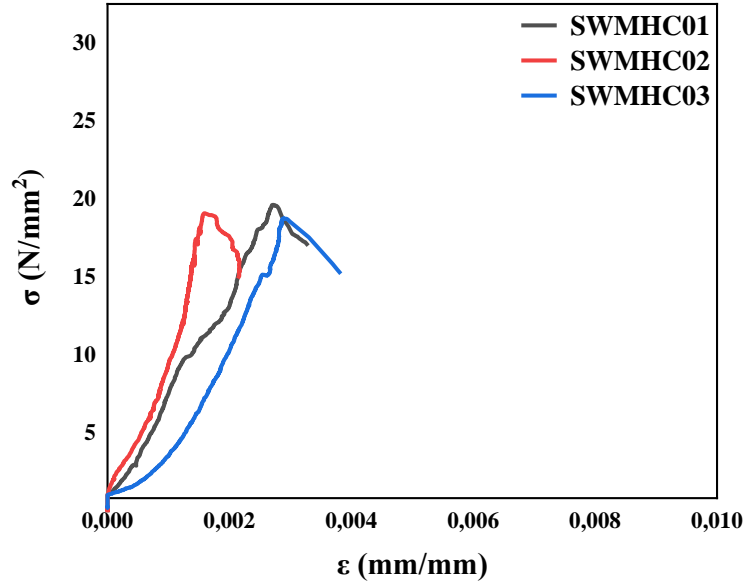
Şekil 71. SWHC grubuna ait basınç kırılma şekilleri



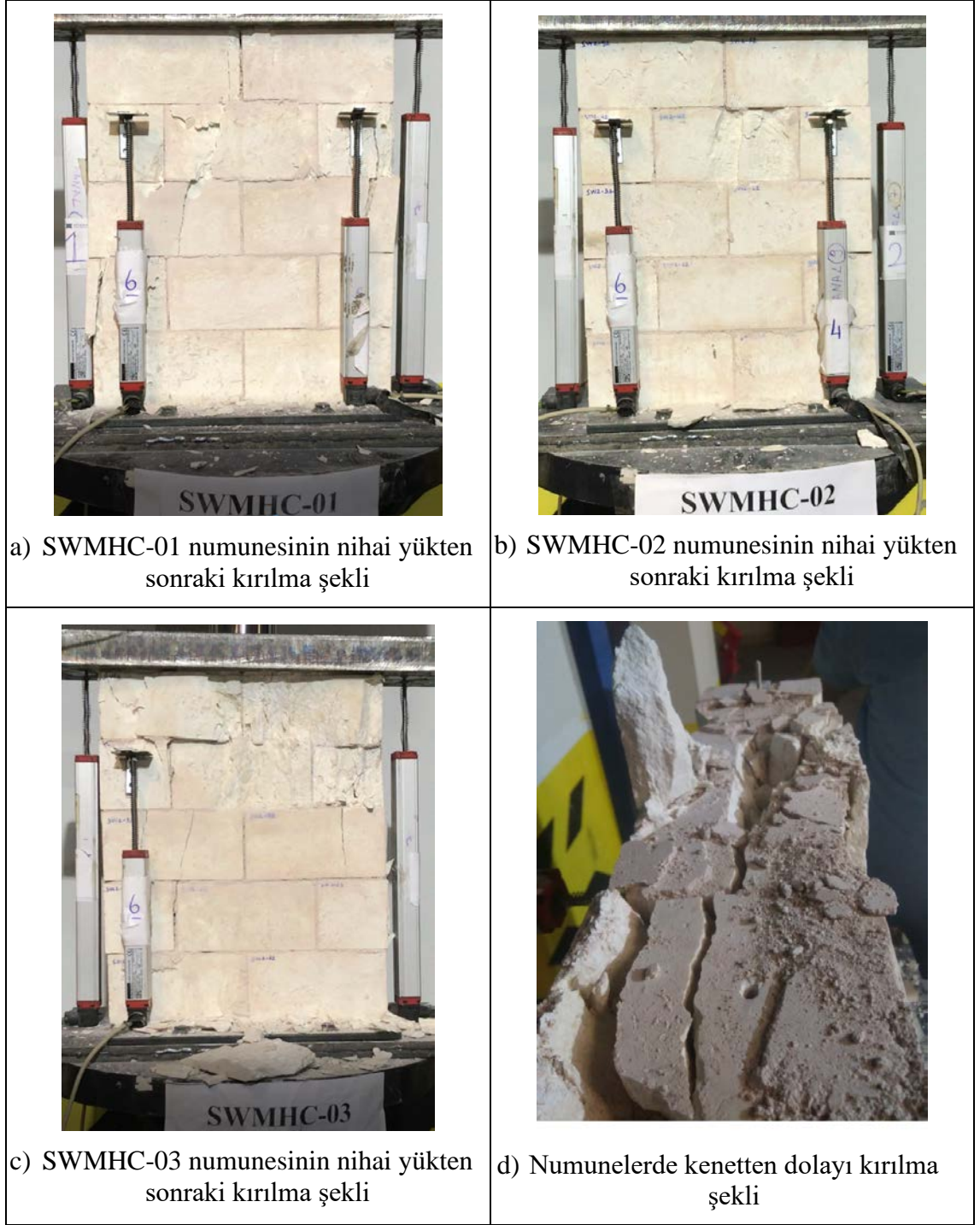
Şekil 72. SWHC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı

b. SWMHC grubu

Bu gruptaki numuneler SWMLC gruba benzer şekilde tek katmandan oluşmuş ve harcın yanı sıra bireysel elemanlar metal bağlantı elemanları ile bağlanmış, harç olarak horasan harcı kullanılmıştır. Numunelere ait gerilme – gerinim diyagramı ve kırılmalar sırası ile Şekil 73 ve 74’te verilmiştir.



Şekil 73. SWMHC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı



Şekil 74. SWMHC grubuna ait basınç kırılma şekilleri

c. DWMHC grubu

Bu gruptaki numuneler içi boş çok katmanlı duvarları temsil etmektedir. Harç olarak horasan harcı kullanılmış ve katmanlar arasında 50 mm boşluk bırakılmıştır. Numunelere ait kırılmalar ve gerilme – gerinim diyagramları Şekil 75 ve Şekil 76’de verilmiştir.



a) DWMHC-01 numunesinin nihai yükten sonraki kırılma şekli



b) DWMHC-02 numunesinin nihai yükten sonraki kırılma şekli

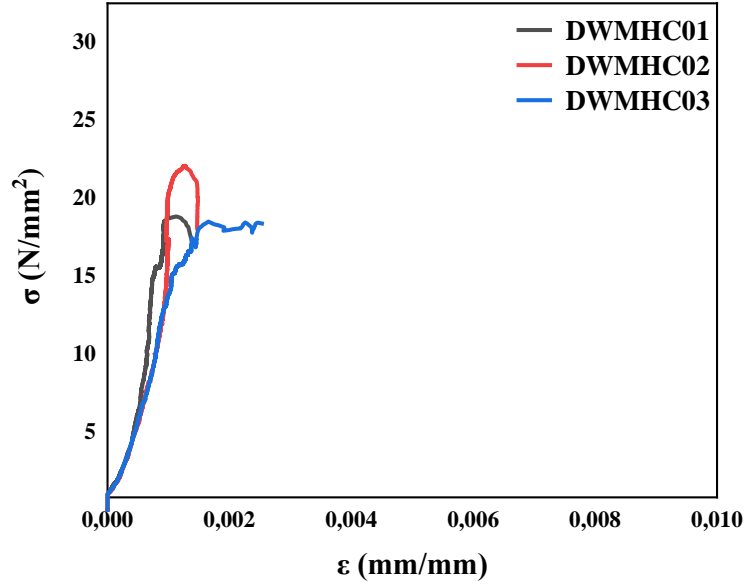


c) DWMHC-03 numunesinin nihai yükten sonraki kırılma şekli



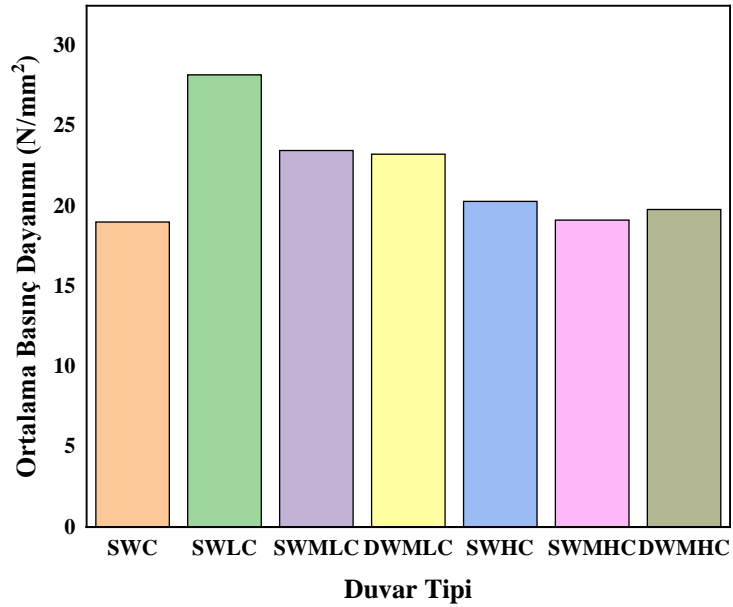
d) Numunelerde kenetten dolayı kırılma şekli

Şekil 75. DWMHC grubuna ait basınç kırılma şekilleri

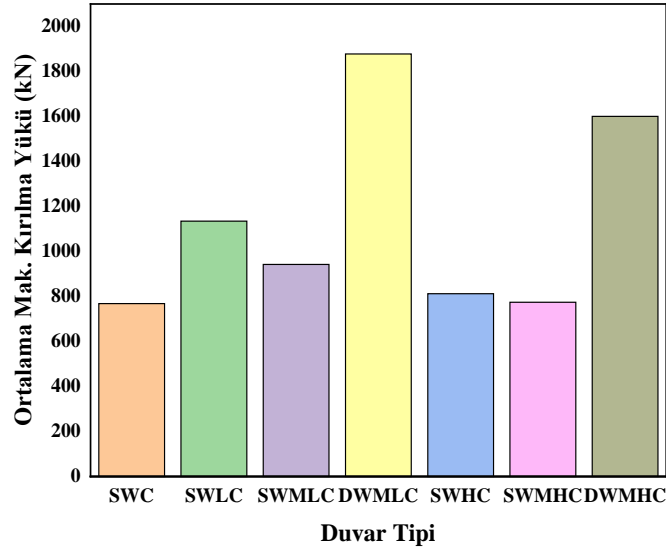


Şekil 76. DWMHC grubuna ait gerilme – gerinim diyagramı

Son olarak mikro boyutlu numunelerin basınç deneylerinden elde edilen veriler Tablo 9’da özetlenmiş ve her duvar tipine ait ortalama gerilme ile ortalama maksimum kırılma yükleri sırasıyla Şekil 77 ve 78’de verilmiştir. Mikro boyutlu numunelerin basınç deney sonuçları ise Bölüm 6’da değerlendirilmiştir.



Şekil 77. Mikro boyutlu duvar tiplerine ait ortalama basınç dayanımı



Şekil 78. Mikro boyutlu duvar tiplerine ait ortalama maksimum kırılma yükü

Tablo 9. Mikro basınç deneyine ait özet tablo

No	Numune Adı	Kırılma yükü	Ort. Kırılma yükü	Basınç dayanımı	Ort. basınç dayanımı	E	Ort. E
		kN	kN	N/mm ²	N/mm ²		N/mm ²
1	SWC-01	680,99		16,86		7615,63	
2	SWC-02	853,06	768,31	21,12	19,02	7353,58	7368,92
3	SWC-03	770,89		19,08		7137,55	
4	SWLC-01	954,42	1135,21	23,68	28,19	7776,37	7489,67
5	SWLC-02	1194,86		29,80		7319,49	
6	SWLC-03	1256,35		31,10		7373,15	
7	SWMLC-01	1012,41	942,58	25,18	23,47	5421,63	5558,07
8	SWMLC-02	876,87		21,81		5284,92	
9	SWMLC-03	938,46		23,40		5967,65	
10	DWMLC-01	2021,45		25,02		5084,73	
11	DWMLC-02	1834,91	1878,03	22,71	23,24	4499,50	5394,45
12	DWMLC-03	1777,72		22,00		6599,10	
13	SWHC-01	662,21	812,70	16,51	20,30	5233,13	5327,31
14	SWHC-02	843,67		21,09		5621,47	
15	SWHC-03	932,22		23,31		5127,32	
16	SWMHC-01	794,36	774,69	19,61	19,14	4052,86	3791,34
17	SWMHC-02	772,90		19,08		4083,87	
18	SWMHC-03	756,81		18,73		3237,30	
19	DWMHC-01	1524,21	1600,26	18,82	19,80	4340,04	4753,47
20	DWMHC-02	1792,08		22,07		4345,53	
21	DWMHC-03	1484,49		18,51		5574,84	

4.3.2. Başlangıç kayma dayanımı

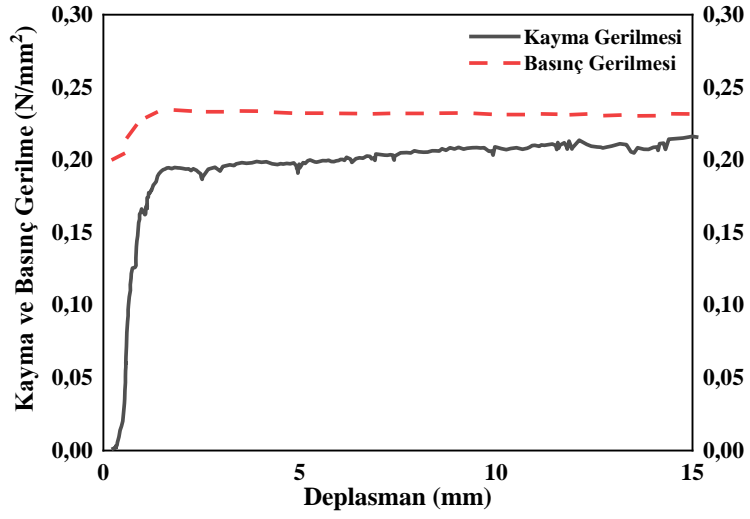
Bu bölümde içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların başlangıç kayma dayanımının belirlenebilmesi için yürütülmüş deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Üretilen numuneler farklı alt gruplara bölündüğünden deney sonuçları da ayrı ayrı alt başlıklar altında verilmiştir.

4.3.2.1. Harçsız numunelerin başlangıç kayma dayanım deneyleri

İçi boş çok katmanlı doğal taş duvar numunelerin başlangıç kayma dayanımı belirlenmeden önce, sadece taşların üst üste koyulmasından oluşan 9 adet numune başlangıç kayma deneyine tabi tutulmuştur. Bunun amacı tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarlarda ince harcın kayma dayanımı üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. SWIS olarak adlandırılan bu gruba ait deneysel sonuçlar Tablo 10'da özetlenmiştir. Şekil 79'de de kayma ve basınç gerilmeleri grafik olarak gösterilmiştir.

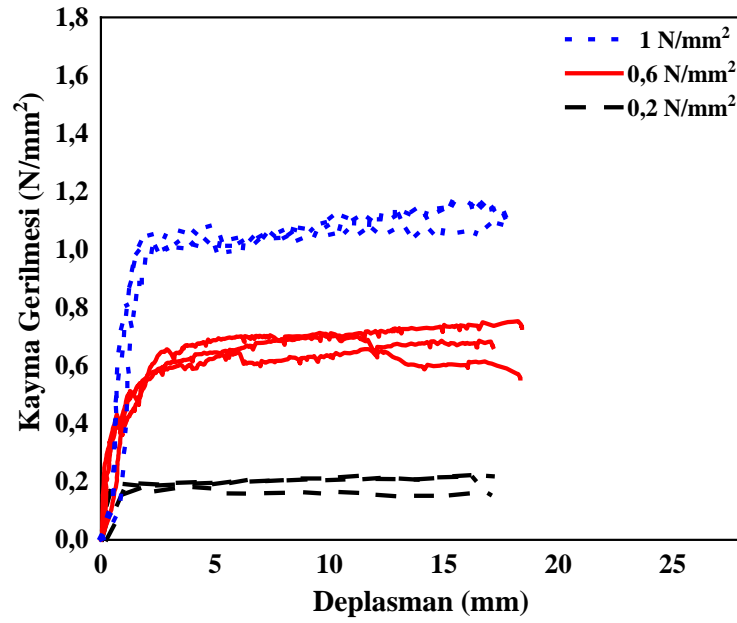
Tablo 10. SWIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri

No	Numune Adı	Stan.	Uyg.	Ort.	Kayma Kuvveti	Ort.	Kayma Gerilmesi	Ort.
		Bas. Ger.	Bas. Ger.	Bas. Ger.		Kay. Kuv.		Kay. Ger.
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N	N	N/mm ²	N/mm ²
1	SWIS20-01		0,23		8089		0,28	
2	SWIS20-02	0,2	0,24	0,24	7185	7840	0,18	0,23
3	SWIS20-03		0,24		8245		0,22	
4	SWIS60-01		0,87		27831		0,75	
5	SWIS60-02	0,6	0,93	0,88	27622	26881	0,71	0,71
6	SWIS60-03		0,85		25190		0,66	
7	SWIS100-01		1,38		40785		1,09	
8	SWIS100-02	1,00	1,47	1,43	44252	43090	1,17	1,14
9	SWIS100-03		1,43		44234		1,17	

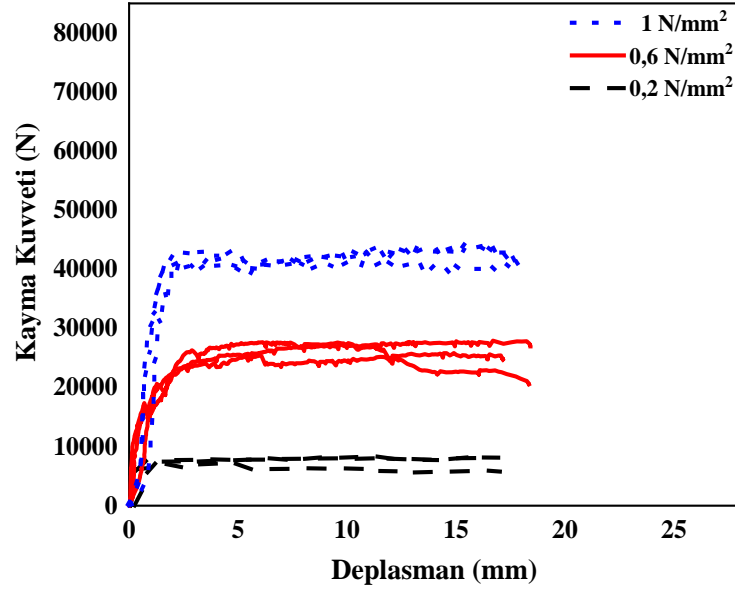


Şekil 79. SWIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri

SWIS grubuna ait farklı basınç düzeylerindeki kayma gerilme – deplasman eğrileri Şekil 80’de ve yatay kuvvet – deplasman eğrileri ise Şekil 81’de verilmiştir.

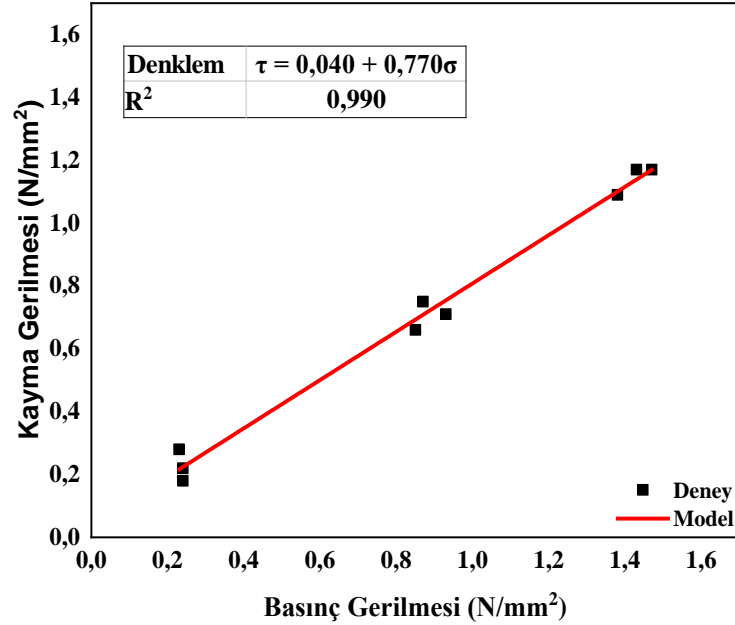


Şekil 80. SWIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi

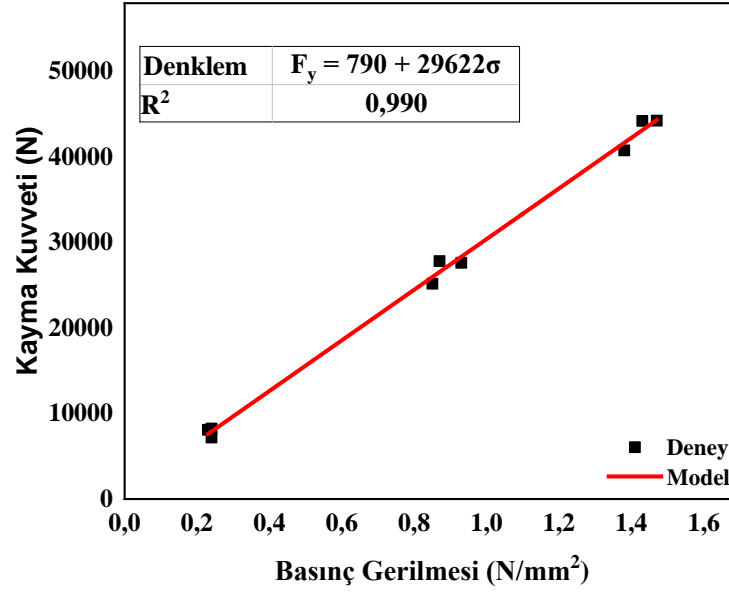


Şekil 81. SWIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi

SWIS grubuna ait duvar tipinin karakteristik başlangıç kayma dayanımının belirlenebilmesi için, bu gruptaki her numuneye ait maksimum kayma gerilmelerine karşı basınç gerilmelerin dağılımı belirlenmiş ve lineer regresyon analizi yapılmıştır (Şekil 82). Ek olarak karakteristik başlangıç kayma dayanımını oluşturan yatay yük 790 N olup, basınç gerilmesi ile ilişkisi Şekil 83'te gösterilmiştir.



Şekil 82. SWIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi)



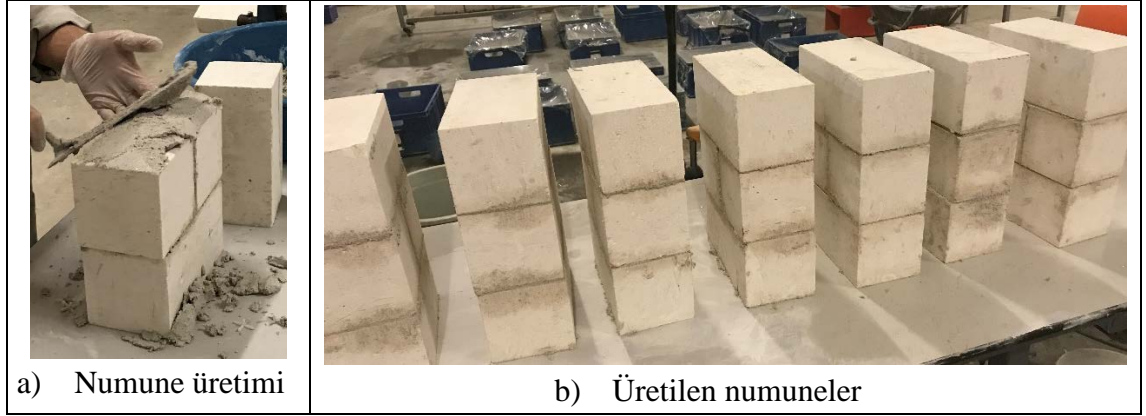
Şekil 83. SWIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti)

4.3.2.2. Kireç harçlı numunelerin başlangıç kayma dayanım deneyleri

Bu kategoride toplamda 27 adet numune, SWLIS, SWMLIS ve DWMLIS olmak üzere üç farklı gruba ayrılmış, başlangıç kayma deneyine tabi tutulmuş ve sonuçları ilgili başlıklar altında sunulmuştur.

a. SWLIS grubu

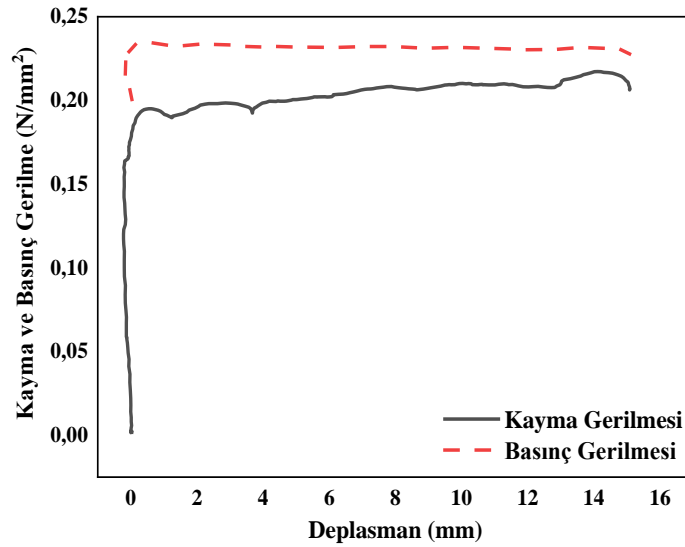
Bu grupta toplamda 9 adet tek katmanlı numune yer almaktadır. Numunelerin hepsi Şekil 84'te gösterildiği gibi kireç harcı ile üretilmiş, metal bağlantı elemanı kullanılmamış ve 28 gün bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuştur. Bu numuneler tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarlarda bağlantı elemanlarının yatay yüklere karşı olan etkisini irdelemek için referans olarak kullanılmıştır. Deney sırasında basınç kuvveti olabildiğince sabit tutulmaya çalışılmıştır. Buna rağmen basınç gerilmelerinde bir miktar artışlar gözlenmiştir (Şekil 85). Bu artışlar kayma gerilme hesabında dikkate alınmış ve Tablo 11'de maksimum kayma gerilmelerinin hangi basınç gerilmesinde meydana geldiği belirtilmiştir. Tablo 11'de SWLIS grubuna ait deney sonuçları verilmiştir.



Şekil 84. SWLIS deney numuneleri

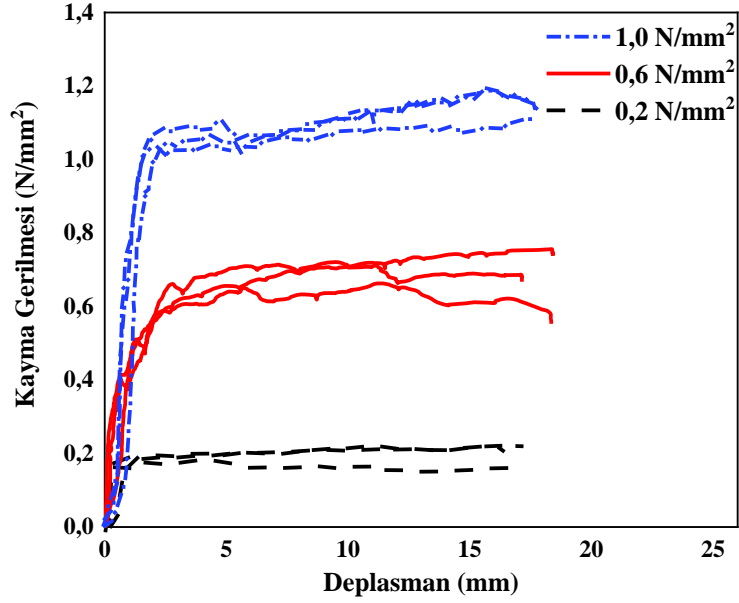
Tablo 11. SWIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri

No	Numune Adı	Stan.	Uyg.	Ort.	Kayma Kuvveti	Ort.	Kayma Gerilmesi	Ort.
		Bas. Ger.	Bas. Ger.	Bas. Ger.		Kay. Kuv.		Kay. Ger.
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N	N	N/mm ²	N/mm ²
1	SWLIS20-01		0,23		8089		0,22	
2	SWLIS20-02	0,2	0,24	0,23	7186	7840	0,18	0,21
3	SWLIS20-03		0,24		8245		0,23	
4	SWLIS60-01		0,87		27831		0,77	
5	SWLIS60-02	0,6	0,93	0,88	27622	26881	0,73	0,72
6	SWLIS60-03		0,85		25190		0,67	
7	SWLIS100-01		1,38		40786		1,12	
8	SWLIS100-02	1	1,47	1,43	44253	43091	1,20	1,17
9	SWLIS100-03		1,43		44234		1,20	

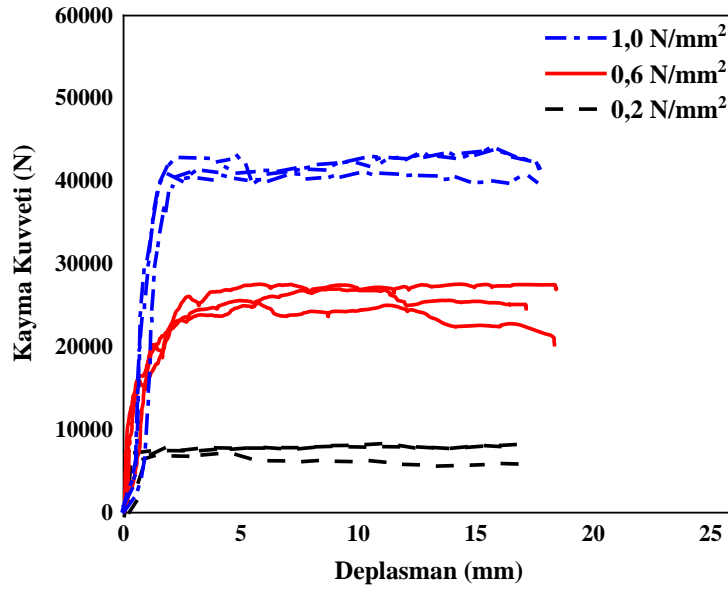


Şekil 85. SWLIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri

SWLIS grubuna ait farklı basınç düzeylerdeki kayma gerilme – deplasman eğrileri Şekil 86’te ve yatay kuvvet – deplasman eğrileri ise Şekil 87’te verilmiştir.

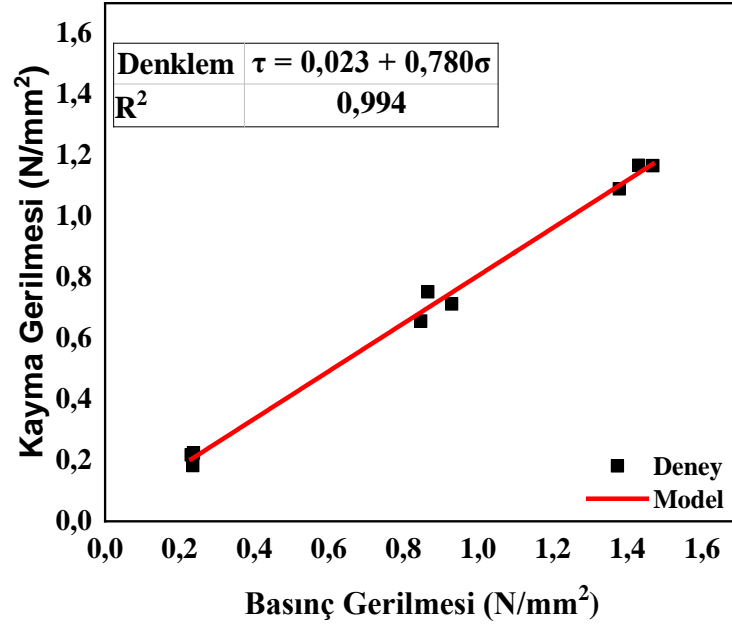


Şekil 86. SWLIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi

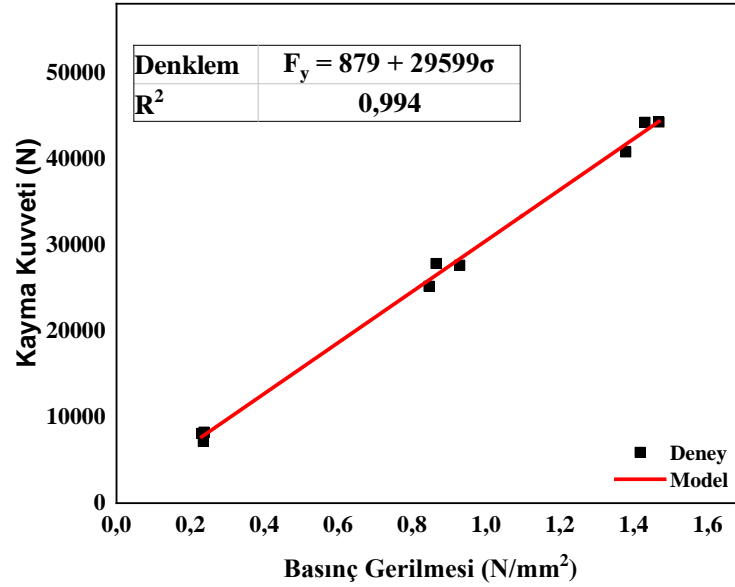


Şekil 87. SWLIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi

Yapılan lineer analizden sonra SWLIS grubuna ait karakteristik başlangıç kayma dayanımı ile karakteristik iç sürtünme açısı Şekil 88’de verilmiştir. Karakteristik başlangıç kayma dayanımını oluşturan yatay kuvvet 879 N seviyesinde olduğu belirlenmiştir (Şekil 89).



Şekil 88. SWLIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi)

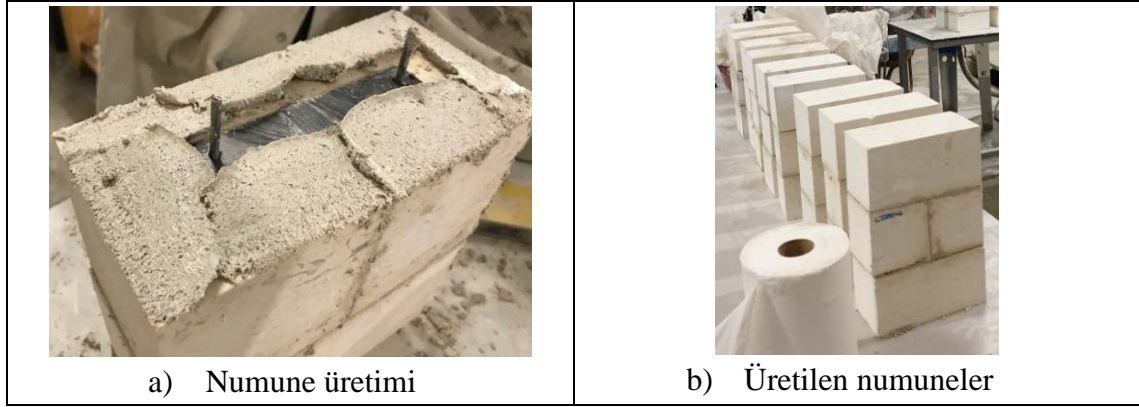


Şekil 89. SWLIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti)

b. SWMLIS grubu

Bu gruptaki 9 adet numune, kireç harcı ve metal bağlantı elemanları (kenet ve zıvana) kullanılarak üretilmiş (Şekil 90) ve 28 gün bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuştur. Bu numuneler içi boş çok katmanlı duvarların sadece bir katmanının davranışını görmek için üretilmiştir. Şekil 91’de tek numuneye ait basınç ve kayma gerilmesi şematik olarak

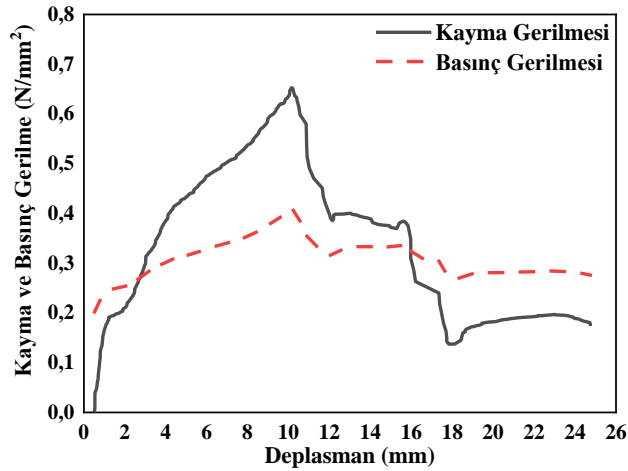
gösterilmiştir. SWMLIS grubundaki tüm numunelere ait detaylı bilgiler ise Tablo 12’de verilmiştir.



Şekil 90. SWMLIS deney numuneleri

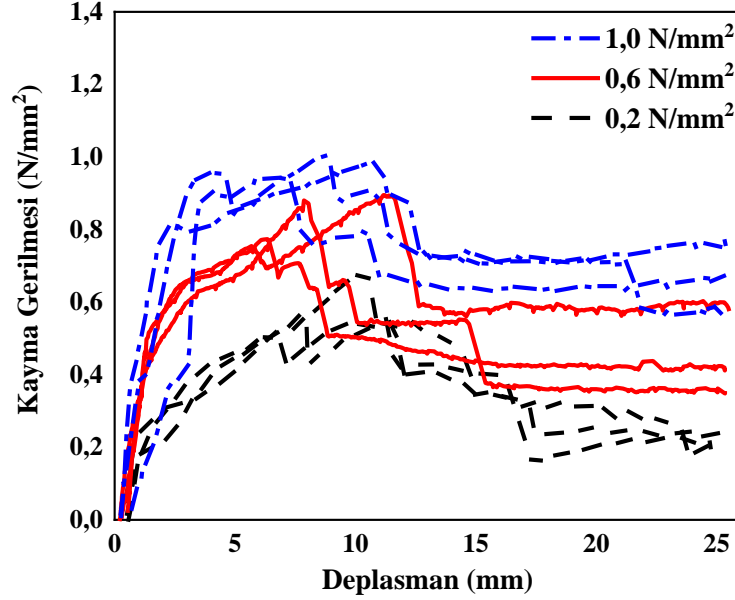
Tablo 12. SWMLIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri

No	Numune Adı	Stan.	Uyg.	Ort.	Kayma Kuvveti	Ort.	Kayma Gerilmesi	Ort.
		Bas.	Bas.	Bas.		Kay.		Kay.
		Ger.	Ger.	Ger.	N	N	N/mm ²	N/mm ²
1	SWMLIS20-01		0,41		25926		0,68	
2	SWMLIS20-02	0,2	0,38	0,38	21892	22829	0,57	0,60
3	SWMLIS20-03		0,35		20670		0,55	
4	SWMLIS60-01		0,92		33826		0,88	
5	SWMLIS60-02	0,6	0,87	0,90	29960	32523	0,77	0,85
6	SWMLIS60-03		0,90		33784		0,90	
7	SWMLIS100-01		1,23		37410		0,99	
8	SWMLIS100-02	1	1,25	1,26	36491	37438	0,95	0,98
9	SWMLIS100-03		1,31		38413		1,00	

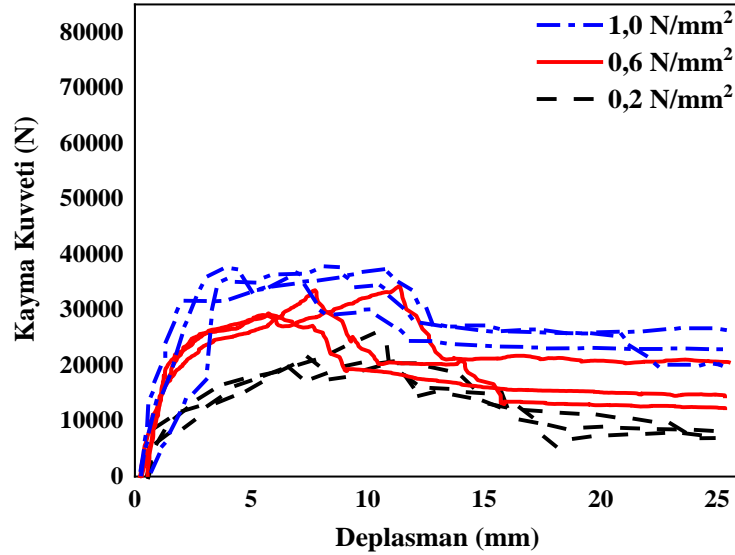


Şekil 91. SWMLIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri

SWMIS grubuna ait farklı basınç düzeylerindeki kayma gerilme – deplasman eğrileri Şekil 92’de verilmiştir. Şekil 93’de de aynı grup için yatay kuvvet – deplasman eğrileri gösterilmektedir.

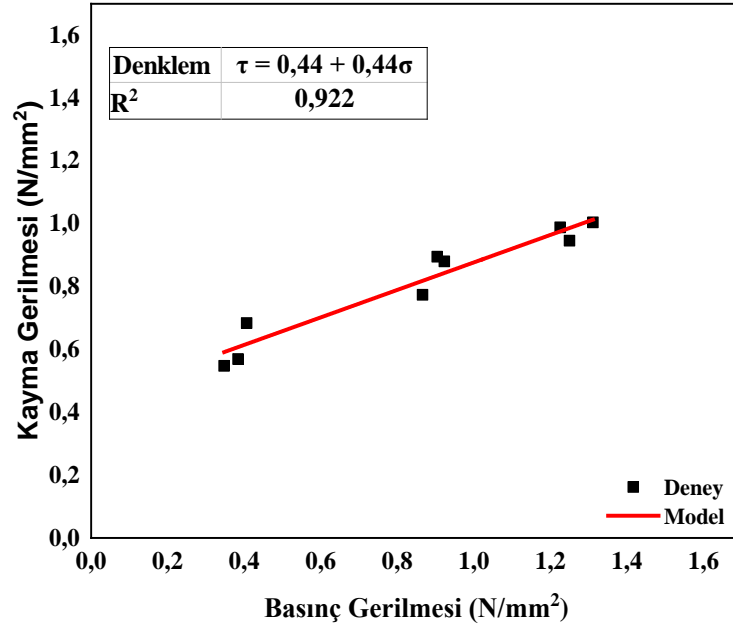


Şekil 92. SWMIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi

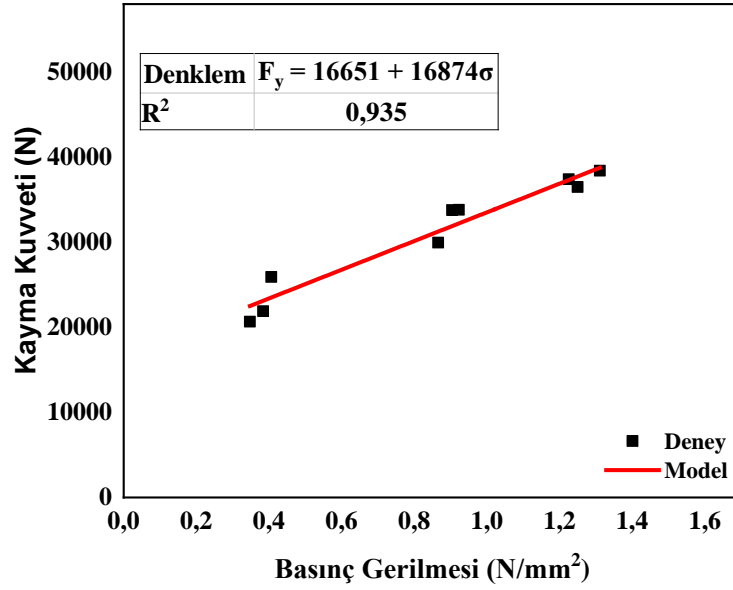


Şekil 93. SWMIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi

SWMIS grubuna ait tek katmanlı, kireç harçlı ve metal bağlantılı duvarın karakteristik başlangıç kayma dayanımı, karakteristik iç sürtünme açısı ve yatay kuvvetinin düzeyi Şekil 94 ve 95’te verilmiştir.



Şekil 94. SWMLIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi)

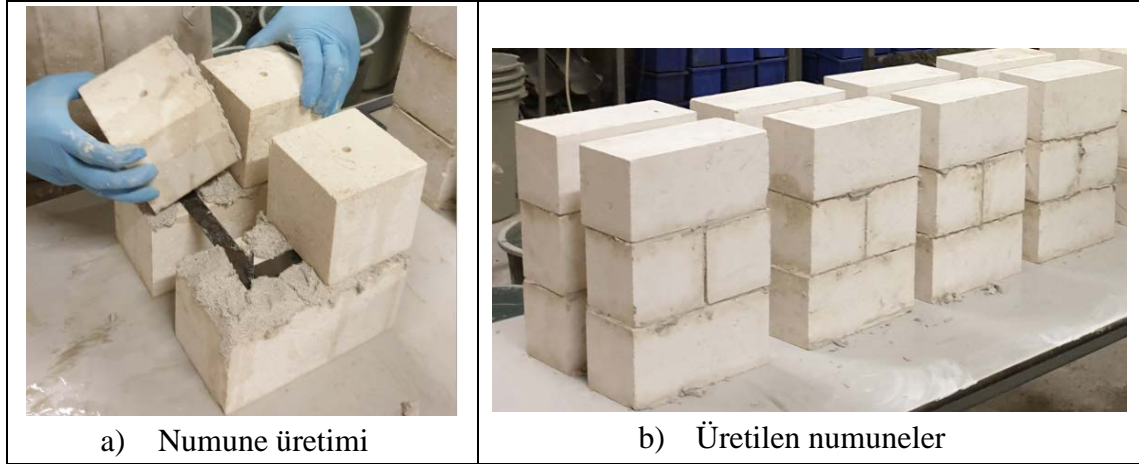


Şekil 95. SWMLIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti)

c. DWMLIS grubu

Bu grupta toplamda 9 adet çift katmanlı numune yer almaktadır. Numunelerin hepsi Şekil 96'da gösterildiği gibi kireç harcı ve iki katmanı birbirine bağlamak için dikdörtgen kenet ve zıvanaların kullanılması ile üretilmiş ve 28 gün laboratuvar ortamında açık havada

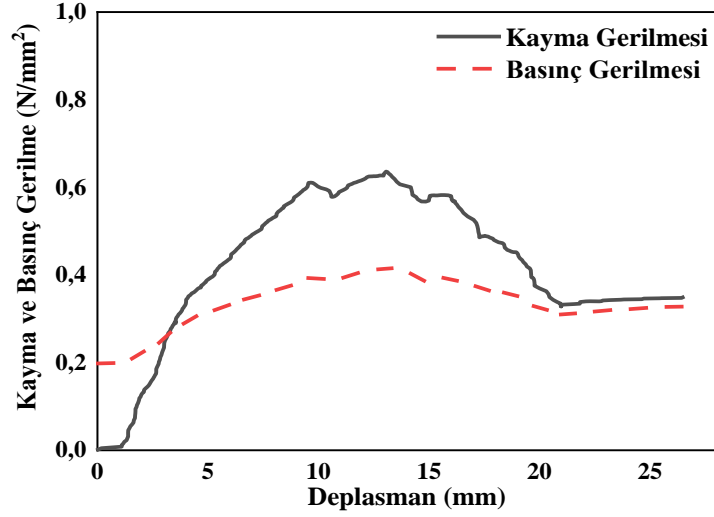
bekletilerek deneye tabi tutulmuştur. Bu numuneler içi boş çok katmanlı doğal taş duvarları temsil etmektedir. Şekil 97’de bu duvarlara ait uygulanan basınç ve kayma gerilmeleri şematik olarak gösterilmiş ve DWMLIS grubundaki tüm numunelere ait detaylı bilgiler ise Tablo 13’te verilmiştir.



Şekil 96. DWMLIS deney numuneleri

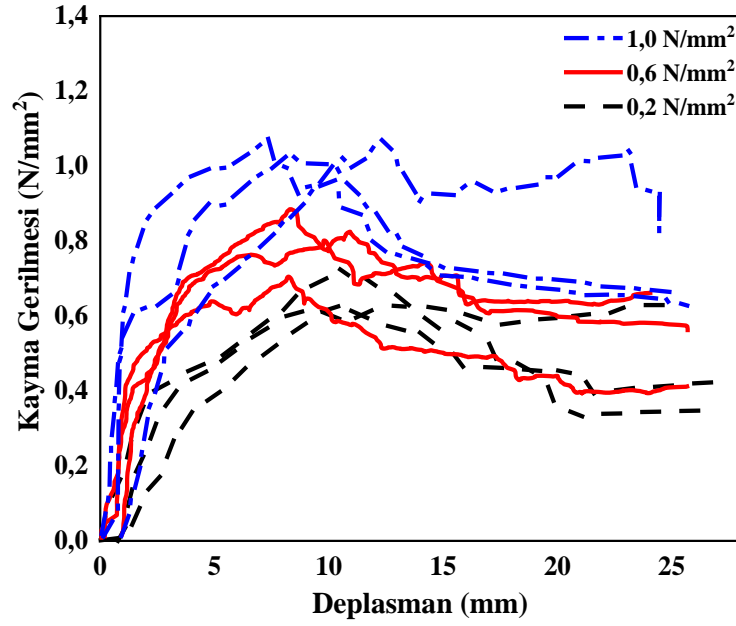
Tablo 13. DWMLIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri

No	Numune Adı	Stan.	Uyg.	Ort.	Kayma Kuvveti	Ort.	Kayma Gerilmesi	Ort.
		Bas. Ger.	Bas. Ger.	Bas. Ger.		Kay. Kuv.		Kay. Ger.
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N	N	N/mm ²	N/mm ²
1	DWMLIS20-01		0,42		47609		0,64	
2	DWMLIS20-02	0,2	0,42	0,44	47787	50399	0,63	0,67
3	DWMLIS20-03		0,47		55802		0,74	
4	DWMLIS60-01		0,73		53984		0,71	
5	DWMLIS60-02	0,6	0,86	0,81	68143	61076	0,89	0,80
6	DWMLIS60-03		0,84		61100		0,81	
7	DWMLIS100-01		1,28		82585		1,07	
8	DWMLIS100-02	1	1,32	1,28	80840	81052	1,08	1,06
9	DWMLIS100-03		1,24		79732		1,04	

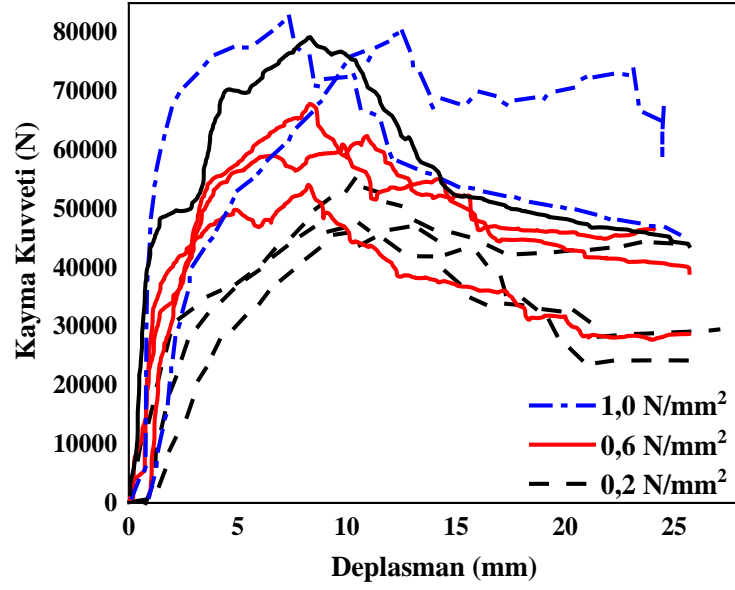


Şekil 97. DWMLIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri

DWMLIS grubuna ait farklı basınç düzeylerindeki kayma gerilme – deplasman eğrisi Şekil 98’de verilmiştir. Şekil 99’da de aynı grup için yatay kuvvet – deplasman eğrileri gösterilmektedir.

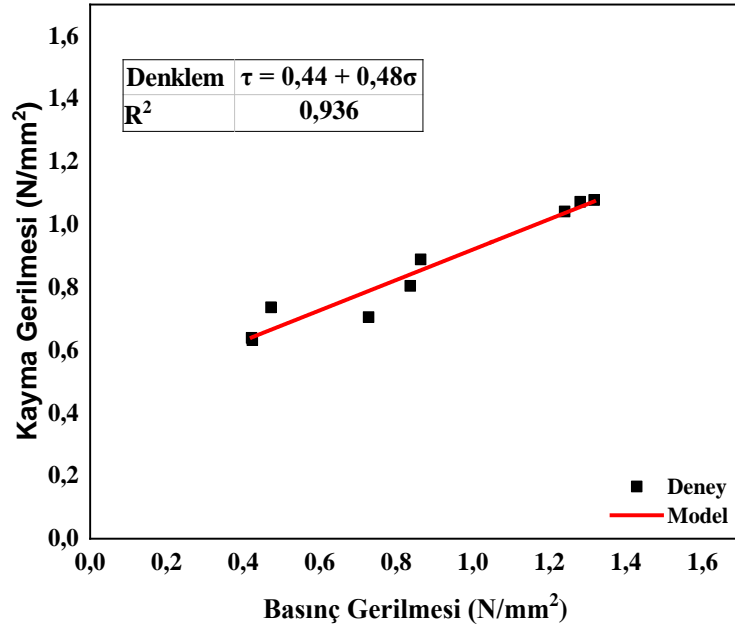


Şekil 98. DWMLIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi

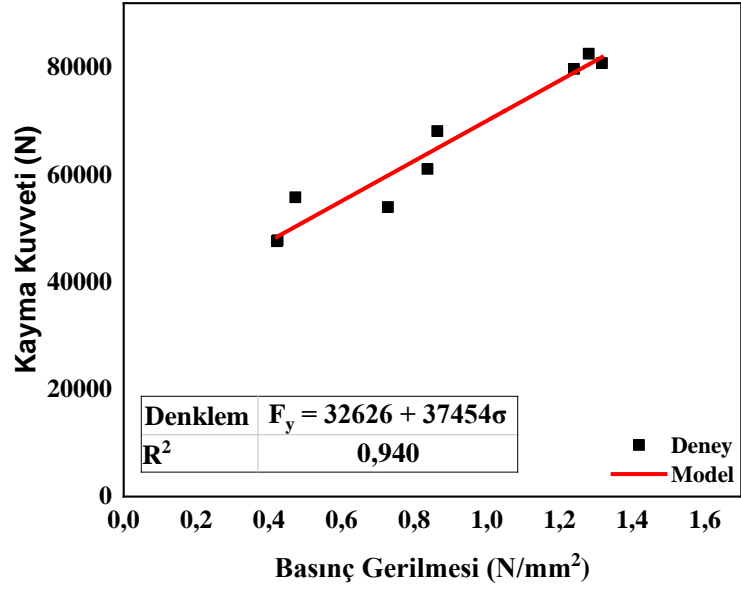


Şekil 99. DWMLIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi

DWMLIS grubuna ait çift katmanlı duvarlara uygulanan lineer regresyon analizinden sonra ortaya çıkan karakteristik başlangıç kayma dayanımı, karakteristik iç sürtünme açısı ve maksimum yatay kuvveti Şekil 100 ve 101’de verilmiştir.



Şekil 100. DWMLIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi)



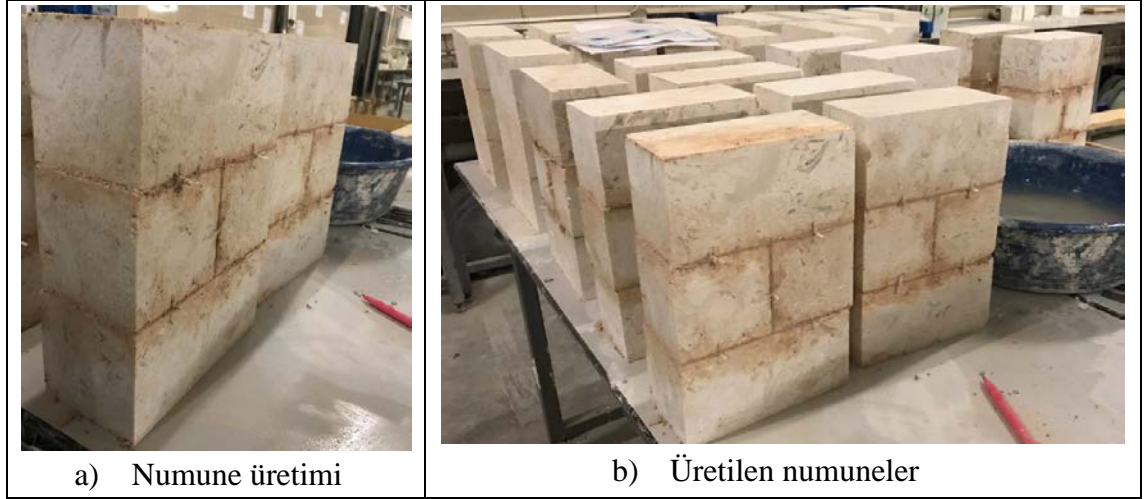
Şekil 101. DWMLIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti)

4.3.2.3. Horasan harçlı numunelerin başlangıç kayma dayanım deneyleri

Bu kategoride 27 adet numune yer almaktadır. Numunelerin üretiminde bağlayıcı olarak horasan harcı kullanılmıştır. Bir önceki kireç harçlı numunelerin kategorisinde olduğu gibi, üretilen numuneler üç farklı alt gruba bölünmüş ve başlangıç kayma deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları ise ilgili başlıklar altında ayrı ayrı verilmiştir.

a. SWHIS grubu

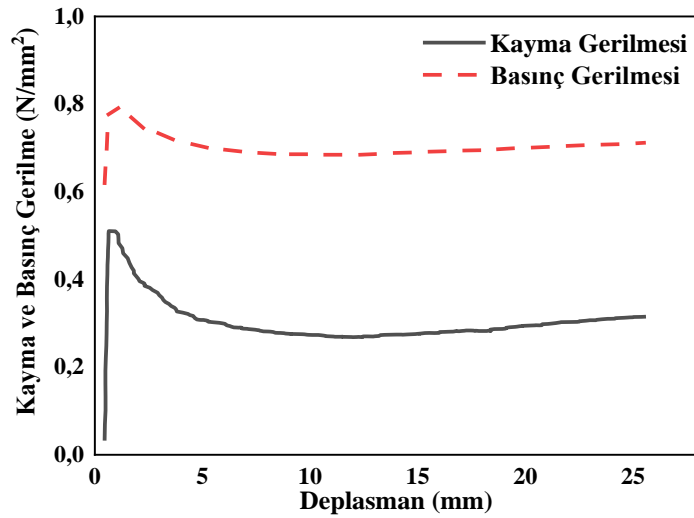
Bu grupta toplamda 9 adet tek katmanlı numune yer almaktadır. Numunelerin hepsi Şekil 102’de gösterildiği gibi horasan harcı ile üretilmiş ve 28 gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuştur. Bu numuneler sadece horasan harcı ile üretilmiş ve metal bağlantı elemanı içeren numuneler için referans olarak kullanılmıştır. Deney sırasında kireç harçlı numunelerde olduğu gibi bu gruptaki numuneler de belli düzeylerde basınç kuvveti ile sıkıştırıldıktan sonra kayma kuvveti uygulanmıştır. Uygulanan basınç gerilmeleri ile kayma gerilmeleri şematik olarak Şekil 103’de gösterilmiştir. Tablo 14’te ise SWHIS grubundaki tüm numunelerin maksimum kayma ve basınç gerilmeleri hakkında bilgi verilmiştir.



Şekil 102. SWHIS deney numuneleri

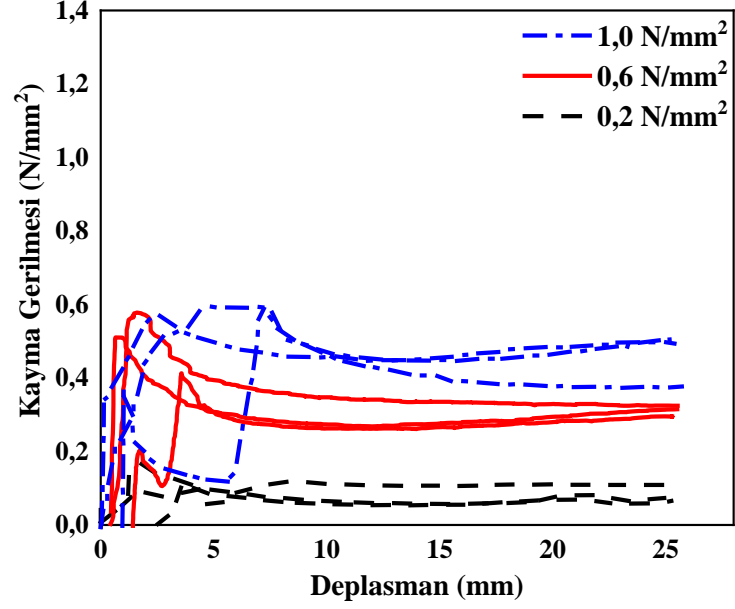
Tablo 14. SWHIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri

No	Numune Adı	Stan. Bas. Ger.	Uyg. Bas. Ger.	Ort. Bas. Ger.	Kayma Kuvveti	Ort. Kay. Kuv.	Kayma Gerilmesi	Ort. Kay. Ger.
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N	N	N/mm ²	N/mm ²
1	SWHIS20-01		0,23		4514		0,12	
2	SWHIS20-02	0,2	0,29	0,26	7722	5765	0,19	0,67
3	SWHIS20-03		0,26		5058		0,13	
4	SWHIS60-01		0,79		20722		0,52	
5	SWHIS60-02	0,6	0,76	0,84	17441	20551	0,44	0,80
6	SWHIS60-03		0,98		23491		0,59	
7	SWHIS100-01		1,23		23460		0,61	
8	SWHIS100-02	1	1,29	1,27	22592	23359	0,57	1,06
9	SWHIS100-03		1,29		24024		0,60	

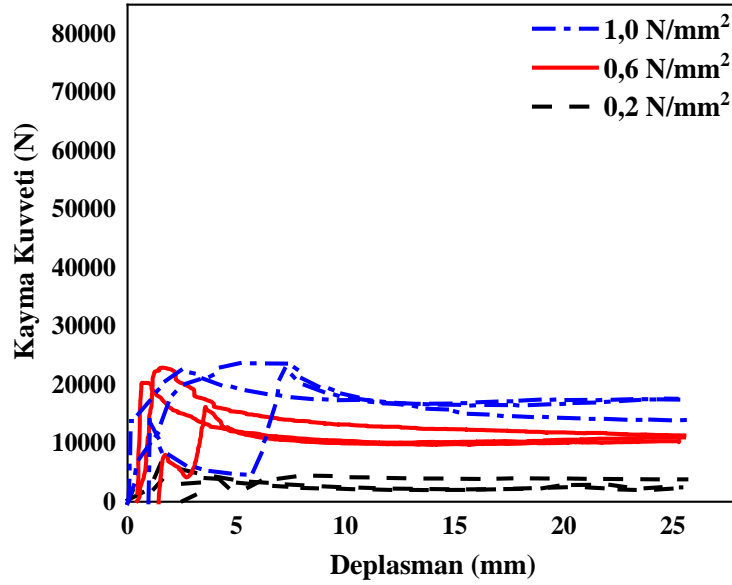


Şekil 103. SWHIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri

SWHIS grubuna ait farklı basınç düzeylerindeki kayma gerilme – deplasman eğrisi Şekil 104'te verilmiştir. Şekil 105'te da aynı grup için yatay kuvvet – deplasman eğrileri gösterilmektedir.

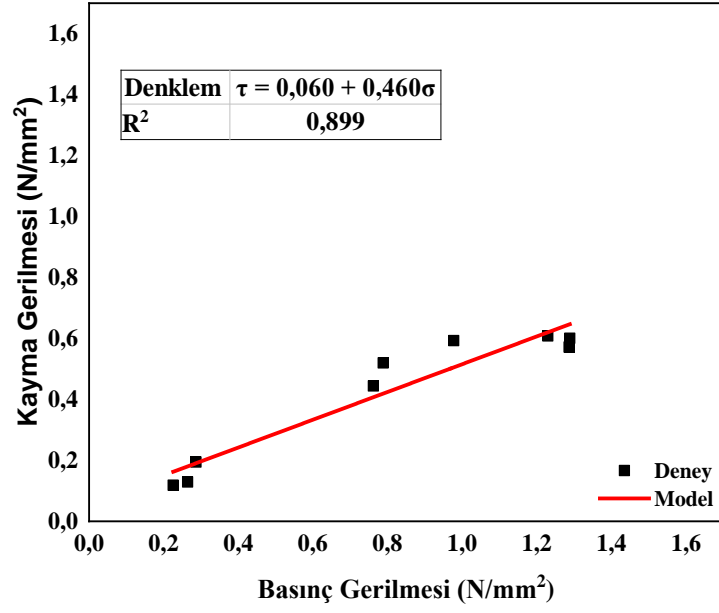


Şekil 104. SWHIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi

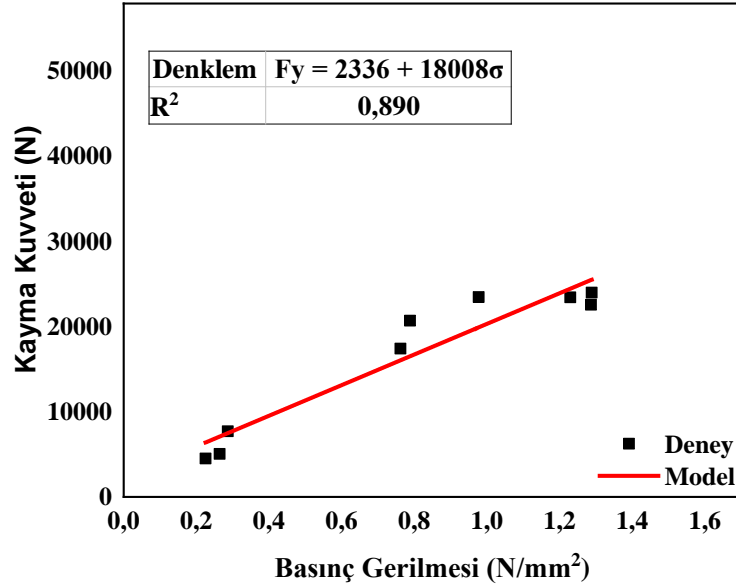


Şekil 105. SWHIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi

SWHIS grubuna ait karakteristik başlangıç kayma dayanımları Şekil 106 ve 107'de verilmiştir.



Şekil 106. SWHIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi)

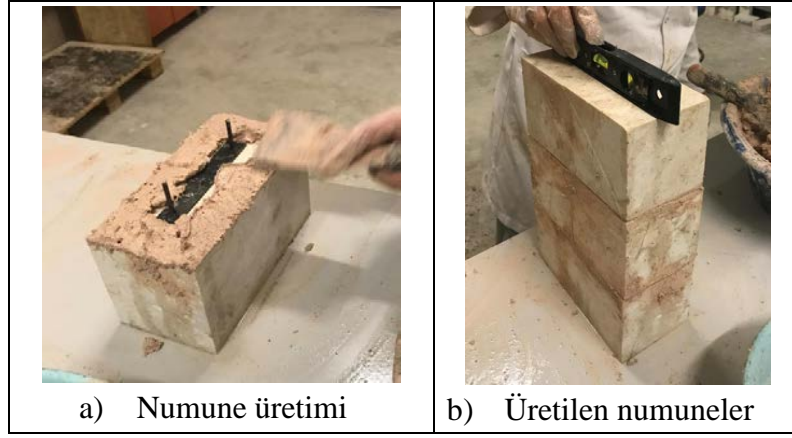


Şekil 107. SWHIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti)

b. SWMHIS grubu

Bu grupta toplamda 9 adet tek katmanlı numune yer almaktadır. Numunelerin hepsi Şekil 108'de gösterildiği gibi horasan harcı ve taşları birbirine bağlayan metal bağlantı elemanları (kenet, zıvana) ile üretilmiş ve 28 gün sonra deneye tabi tutulmuştur. Bu numuneler horasan harcı ile üretilen çift katmanlı duvarların tek katmanının davranışını belirlemek için üretilmiştir. Uygulanan basınç gerilmeleri ile kayma gerilmeleri şematik

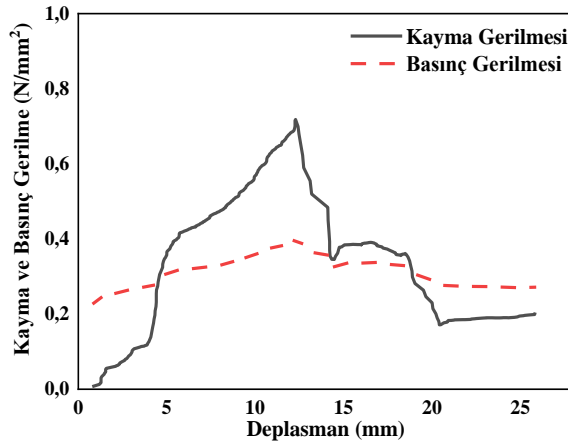
olarak Şekil 109’de gösterilmiştir. Tablo 15 ise SWMHIS grubundaki tüm numunelerin maksimum kayma ve basınç gerilmeleri hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 108. SWMHIS deney numuneleri

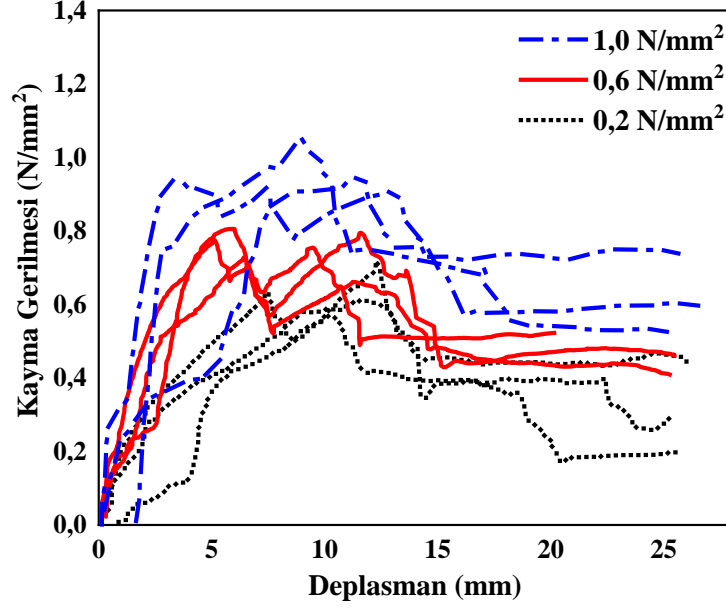
Tablo 15. SWMHIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri

No	Numune Adı	Stan.	Uyg.	Ort.	Kayma Kuvveti	Ort.	Kayma Gerilmesi	Ort.
		Bas. Ger.	Bas. Ger.	Bas. Ger.		Kay. Kuv.		Kay. Ger.
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N	N	N/mm ²	N/mm ²
1	SWMHIS20-01		0,40		26417		0,70	
2	SWMHIS20-02	0,2	0,46	0,45	23178	24616	0,62	0,65
3	SWMHIS20-03		0,49		24254		0,63	
4	SWMHIS60-01		0,84		28821		0,76	
5	SWMHIS60-02	0,6	0,94	0,90	31391	30071	0,81	0,78
6	SWMHIS60-03		0,91		30001		0,77	
7	SWMHIS100-01		1,33		40242		1,05	
8	SWMHIS100-02	1	1,35	1,32	37013	37727	0,94	0,98
9	SWMHIS100-03		1,30		35926		0,95	

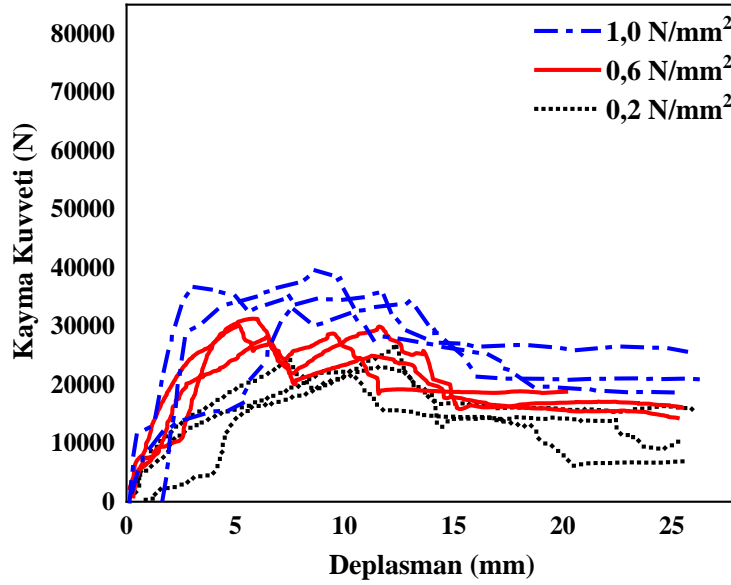


Şekil 109. SWMHIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri

SWMHIS grubuna ait farklı basınç düzeylerindeki kayma gerilme – deplasman eğrisi Şekil 110’da verilmiştir. Şekil 111’de de aynı grup için yatay kuvvet – deplasman eğrilerini göstermektedir.

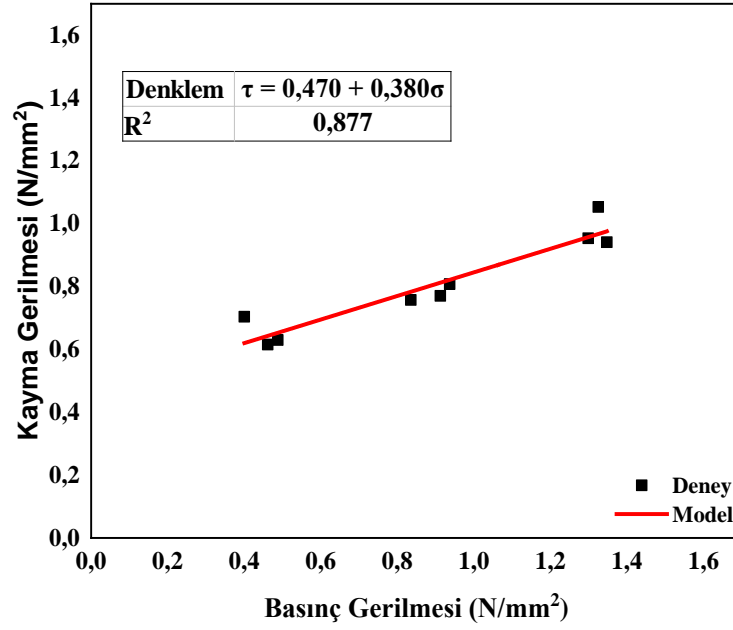


Şekil 110. SWMHIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi

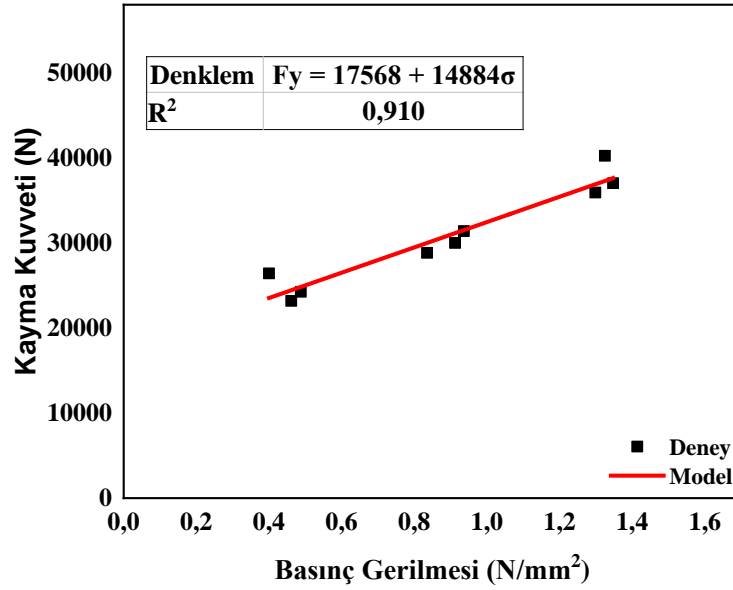


Şekil 111. SWMHIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi

SWMHIS grubuna ait karakteristik başlangıç kayma dayanımı, karakteristik iç sürtünme açısı ve maksimum yatay yükü Şekil 112 ve 113'te verilmiştir.



Şekil 112. SWMHIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi)



Şekil 113. SWMHIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti)

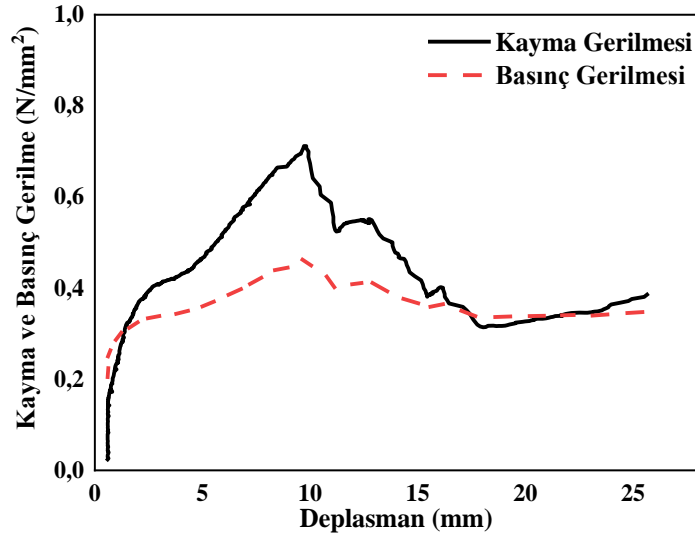
c. DWMHIS grubu

Bu grupta, katmanları arasında 50 mm boşluk olan 9 adet çift katmanlı numune yer almaktadır. Numunelerin tamamı Şekil 96'de gösterildiği gibi horasan harcı ve iki katmanı birbirine bağlayan kenet ve zıvana ile üretilmiş ve 28 gün sonra deneye tabi tutulmuştur. Bu numuneler tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarlarda horasan harcının etkisini irdelemek amacı ile üretilmiştir. Uygulanan basınç gerilmeleri ile kayma

gerilmeleri şematik olarak Şekil 114’te gösterilmiştir. Tablo16 ise DWMHIS grubundaki tüm numunelerin maksimum kayma ve basınç gerilmeleri hakkında bilgi vermektedir.

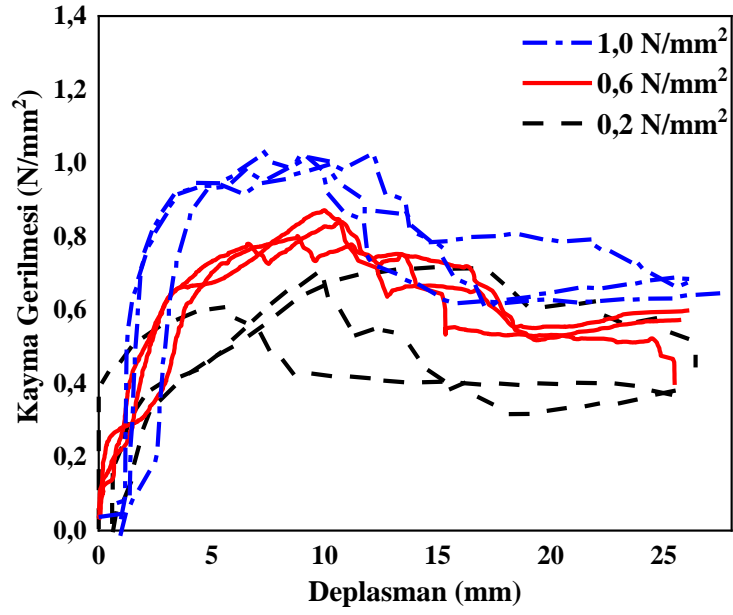
Tablo 16. DWMHIS gurubuna ait kayma ve basınç gerilmeleri

No	Numune Adı	Stan.	Uyg.	Ort.	Kayma Kuvveti	Ort.	Kayma Gerilmesi	Ort.
		Bas. Ger.	Bas. Ger.	Bas. Ger.		Kay. Kuv.		Kay. Ger.
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N	N	N/mm ²	N/mm ²
1	DWMHIS20-01		0,46		53524		0,70	
2	DWMHIS20-02	0,2	0,54	0,49	52886	51430	0,72	0,68
3	DWMHIS20-03		0,46		47881		0,62	
4	DWMHIS60-01		0,85		66419		0,88	
5	DWMHIS60-02	0,6	0,87	0,86	63451	63664	0,84	0,84
6	DWMHIS60-03		0,86		61121		0,80	
7	DWMHIS100-01		1,34		75709		1,00	
8	DWMHIS100-02	1	1,33	1,31	78520	77955	1,03	1,02
9	DWMHIS100-03		1,27		79638		1,03	

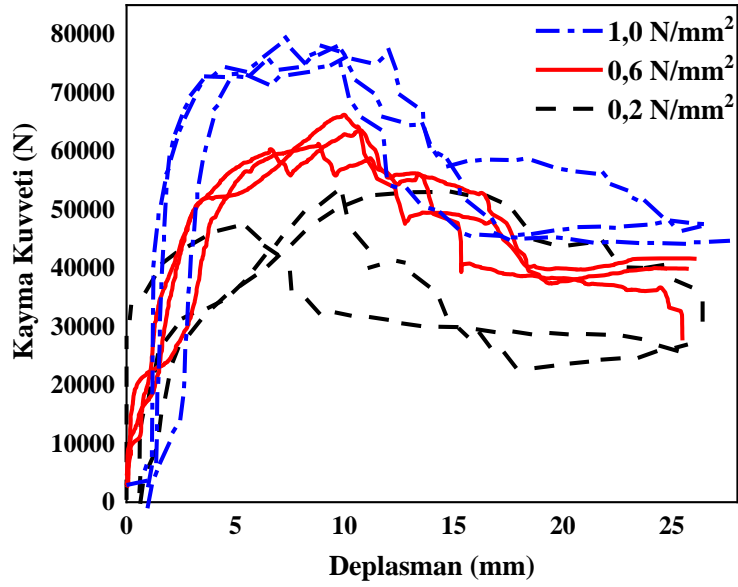


Şekil 114. DWMHIS grubuna ait kayma ve uygulanan basınç gerilmeleri

DWMHIS grubuna ait farklı basınç düzeylerindeki kayma gerilme – deplasman eğrisi Şekil 115’te verilmiştir. Şekil 116’da da aynı grup için yatay kuvvet – deplasman eğrilerini gösterilmektedir.

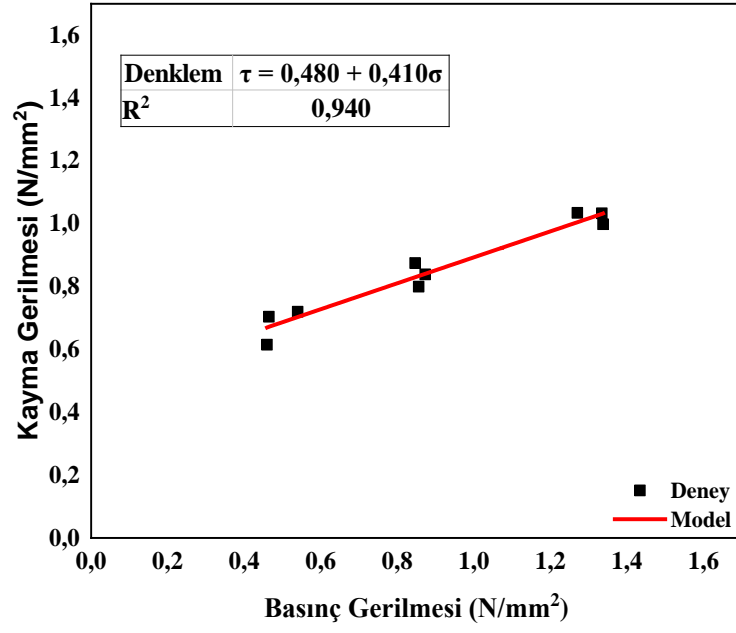


Şekil 115. DWMHIS grubuna ait kayma gerilme – deplasman eğrisi

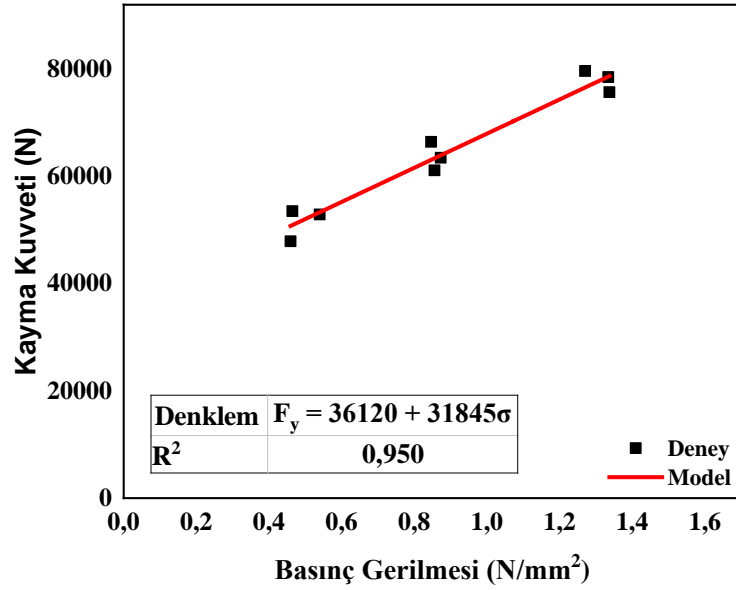


Şekil 116. DWMHIS grubuna ait kayma kuvvet – deplasman eğrisi

DWMHIS grubuna ait karakteristik başlangıç kayma dayanım, iç sürtünme açısı ve maksimum yatay yük Şekil 117 ve 118'de verilmiştir.

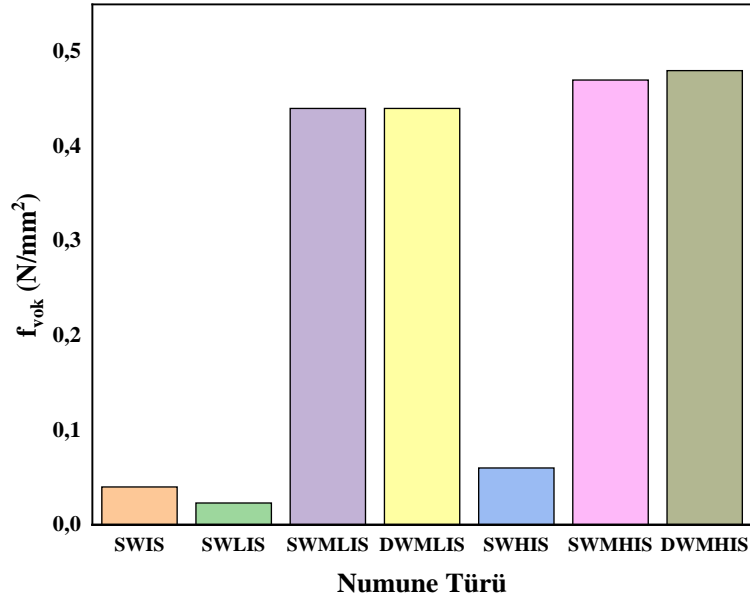


Şekil 117. DWMHIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma gerilmesi)

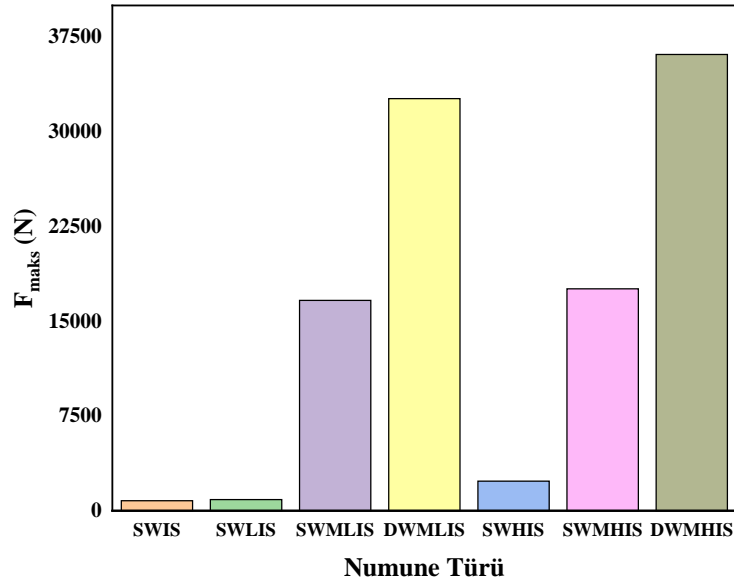


Şekil 118. DWMHIS grubuna ait lineer regresyon eğrisi (kayma kuvveti)

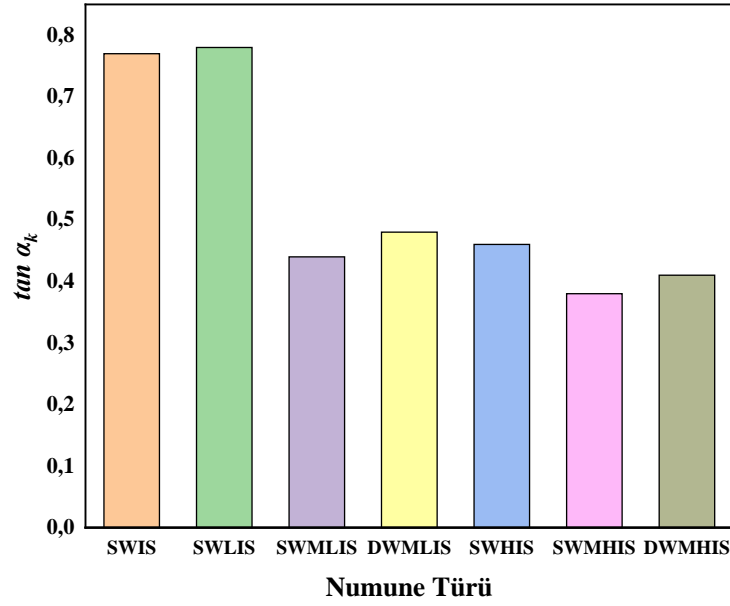
Başlangıç kayma deney sonucunda her duvar tipine ait karakteristik başlangıç kayma dayanımı (f_{vok}), karakteristik başlangıç kayma dayanımına karşı gelen kayma yükü (f_{maks}) ve karakteristik iç sürtünme açısı ($\tan \alpha_k$) sırasıyla Şekil 119, 120 ve 121’de verilmiştir.



Şekil 119. Farklı duvar tiplerine ait karakteristik başlangıç kayma dayanımı



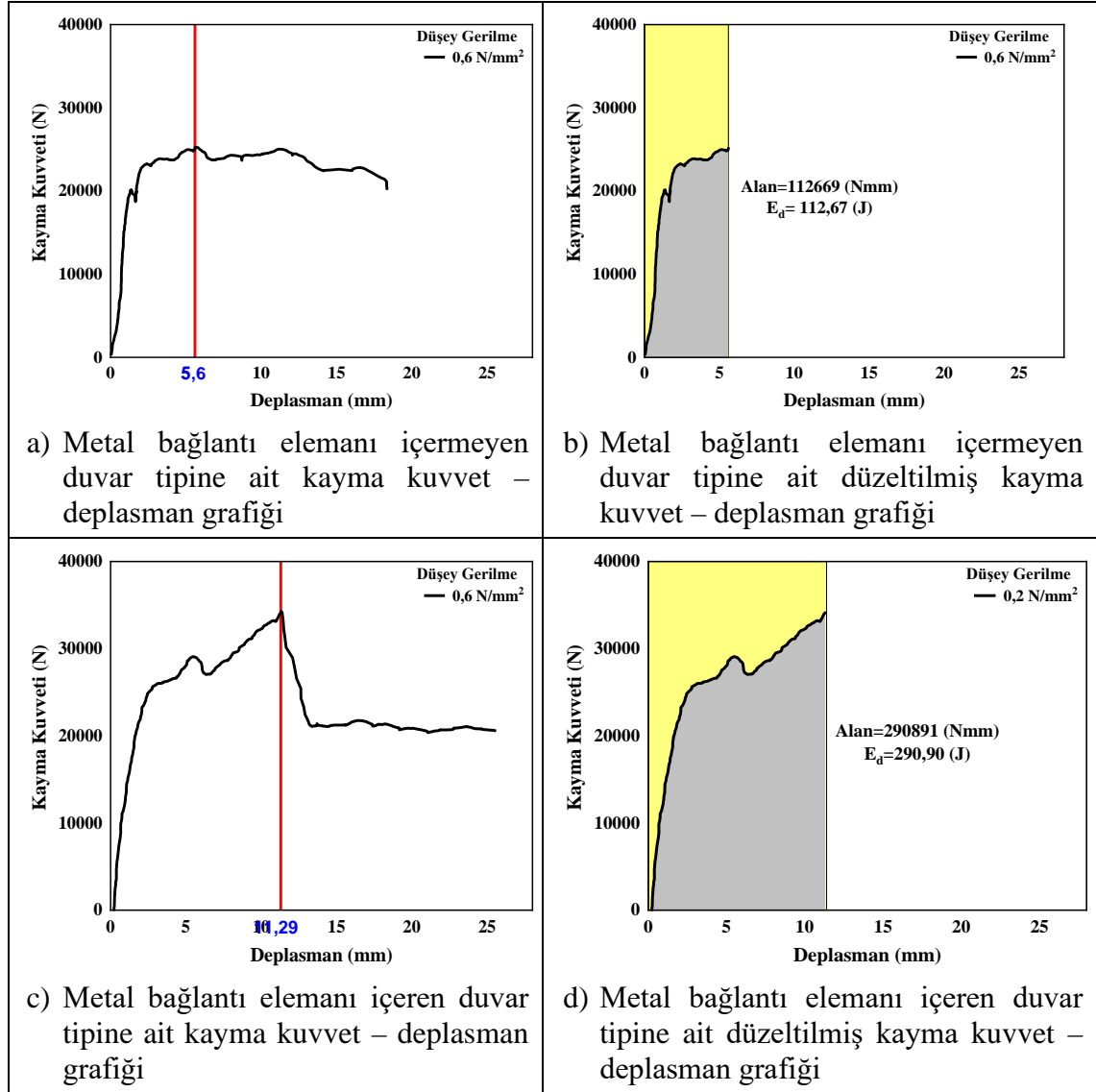
Şekil 120. Karakteristik başlangıç kayma dayanımına karşı gelen kayma kuvveti



Şekil 121. Farklı duvar tiplerine ait iç sürtünme açısı

Bunlara ek olarak başlangıç kayma deneyi kapsamında, deneye tabi tutulmuş numunelerin enerji tüketme kapasiteleri tez kapsamında yapılan kabul çerçevesinde belirlenmiş ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. Numunelerin kayma kuvvet – deplasman grafikleri incelendiğinde, genellikle elastik bölgesinde, kuvvetin hızla arttığı ve buna karşın deplasmanların düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Daha sonra bireysel taş elemanları birbirine bağlayan malzeme veya malzemeler (harç veya harç + metal bağlantı elemanları) kırıldıktan sonra bu durum değişmektedir. Bu aşamada kuvvet – deplasman eğrisi eğim değiştirerek, kayma kuvveti yaklaşık sabit seviyelerdeyken deplasmanların hızla arttığı görülmektedir. Bireysel taşları bağlayan malzemenin kırılmasından sonraki yatay kuvvetin yaklaşık sabit seviyedeki hareket düzeyi ise, düşey yükün ve sürtünme katsayısının düzeyi belirlenmektedir. Bu husus dikkate alınarak bireysel taşları bağlayan elemanların enerji tüketme kapasitelerinin hesabı, malzemenin kırılması anındaki kuvvet – deplasman grafiği dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu bağlamda duvar numunelere ait kuvvet – deplasman grafikleri Şekil 122’de gösterildiği gibi metal bağlantı elemanı içeren ve içermeyen numunelerde yeniden düzenlenmiş ve düzenlenen grafik dikkate alınmıştır. Düzenlenen grafiklerde maksimum deplasman, bireysel taşları birbirine bağlayan malzemenin kırıldığı ana denk gelecek şekilde belirlenmiştir. Metal bağlantı elemanları içermeyen numunelerde, bu değer grafikteki eğimin değiştiği ve yatay kuvvetin sabit hareketi başladığı seviye olarak belirlenirken (Şekil 122.a ve b) metal bağlantı elemanlı

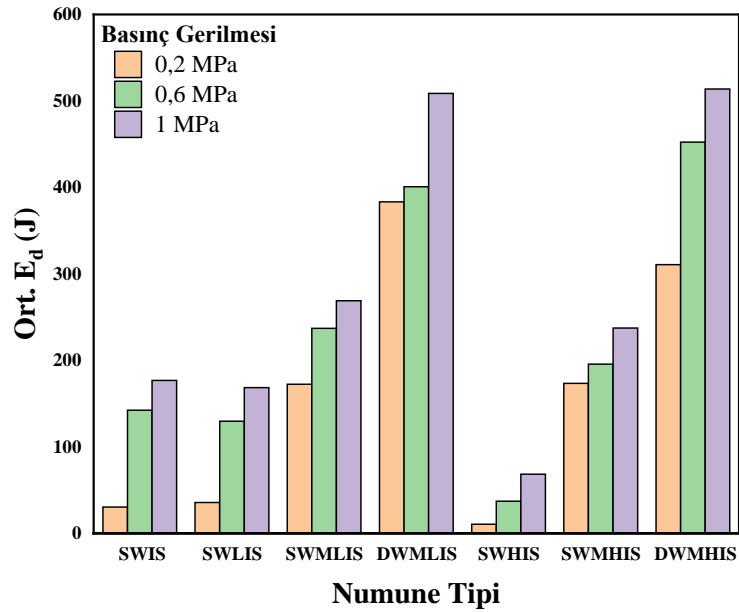
numunelerde kayma kuvvetinin sabit hareketi başladığı yer olarak kabul edilerek (Şekil 122.c ve d) numunelere ait enerji tüketme kapasiteleri yeniden düzenlenen kuvvet – deplasman grafiğinin altında kalan alan olarak hesaplanmıştır. Numunelere ait hesaplanan enerji tüketme kapasitesi Tablo 17’de ve her duvar tipine ait ortalama enerji tüketme kapasitesi ise Şekil 123’de verilmiştir.



Şekil 122. Enerji tüketme kapasitesi için düzenlenen gerilme – deplasman grafikleri

Tablo 17. Duvar numunelere ait enerji tüketme kapasiteleri

Numune Grubu	Ort. E_d (J)	Kullanılan harç tipi	Bağlantı elemanı
SWIS20	30.29		
SWIS60	142.37	Harçsız	Yok
SWIS100	176.8		
SWLIS20	35.63		
SWLIS60	129.71	Kireç harcı	Yok
SWLIS100	168.43		
SWMLIS20	172.46		
SWMLIS60	237.03	Kireç harcı	Var
SWMLIS100	268.9		
DWMLIS20	383.26		
DWMLIS60	400.81	Kireç harcı	Var
DWMLIS100	508.77		
SWHIS20	10.46		
SWHIS60	37.13	Horasan harcı	Yok
SWHIS100	68.46		
SWMHIS20	173.45		
SWMHIS60	195.72	Horasan harcı	Var
SWMHIS100	237.44		
DWMHIS20	310.61		
DWMHIS60	452.34	Horasan harcı	Var
DWMHIS100	513.78		

**Şekil 123. Duvar tiplerine ait ortalama enerji tüketme kapasitesi**

4.4. Makro Boyutlu Duvar Numunelerin Mekanik Özellikleri

Tez kapsamında içi boş çok katmanlı duvarların düzlem içi mekanik davranışı, önce mikro boyutlu numunelerle daha sonra makro boyutlu numuneler üzerinde yapılan deneylerle belirlenmiştir. Bu bölümde makro boyutlu numunelere ait deneysel sonuçlar sunulmuştur.

4.4.1. Basınç dayanımı

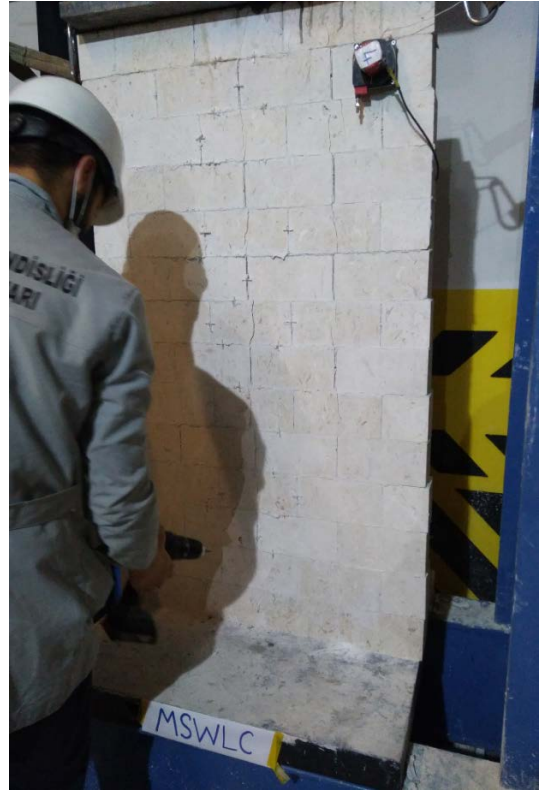
Yığma duvarların tasarımında h_{ef}/t_{ef} oranı oldukça önemli rol oynamaktadır. Tez kapsamında tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların basınç dayanımı ile Elastisite Modülü ilk önce, TBDY (2018)'in önerdiği mikro boyutlu numuneler kullanılarak, TS EN 1052-1 (2000) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Daha sonra h_{ef}/t_{ef} oranının etkisini araştırmak amacı ile tek ve çift katmanlı olmak üzere 4 adet makro boyutlu numune üretilmiş ve tek eksenli basınç deneyine tabi tutularak basınç dayanımı ile Elastisite Modülü belirlenmiş ve sonuçları bu bölümde verilmiştir.

Makro ebatlı numunelerde kırılmaların, mikro boyutlu numunelere benzer olarak gevrek bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 124). Bütün numunelerde çatlakların nihai yüke çok yakın bir yükleme seviyesinde oluştuğu görülmüştür. Çatlaklar, düşey yüke paralel olarak oluşmuş ve duvarın düşey yük altında göçmesine sebep olduğu gözlemlenmiştir.

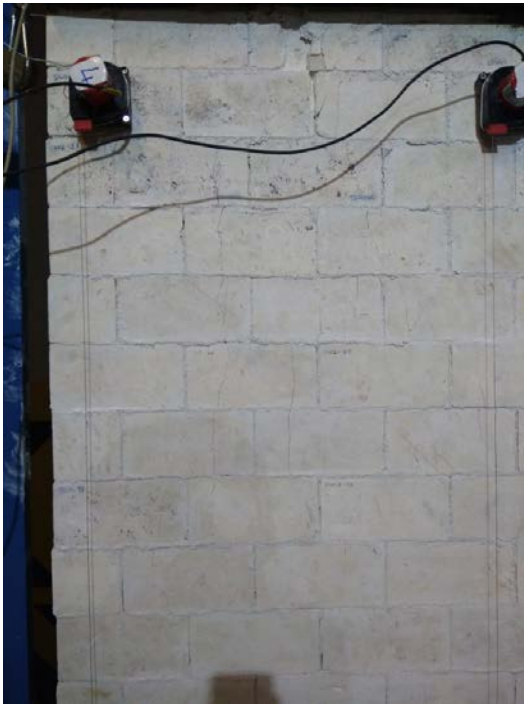
Makro boyutlu basınç deneyi sırasında düşey yük ve duvardaki boy değişimi sırası ile yük hücresi ve potansiyometre cetveller (ipli ölçerler) ile ölçülmüş ve bilgisayara aktarılarak gerilme – gerinim diyagramları çizilmiştir. 4 adet numuneye ait gerilme – gerinim diyagramları Şekil 125'te ve düşey yük – deplasman grafiği ise Şekil 126'da verilmiştir.



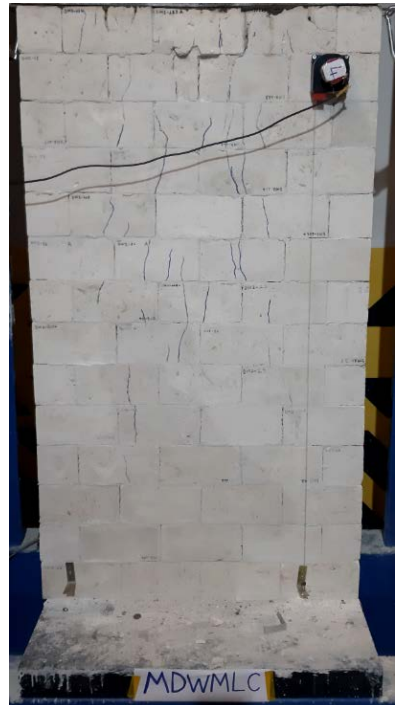
a) MSWC numunesine ait kırılma şekli



b) MSWLC numunesine ait kırılma şekli

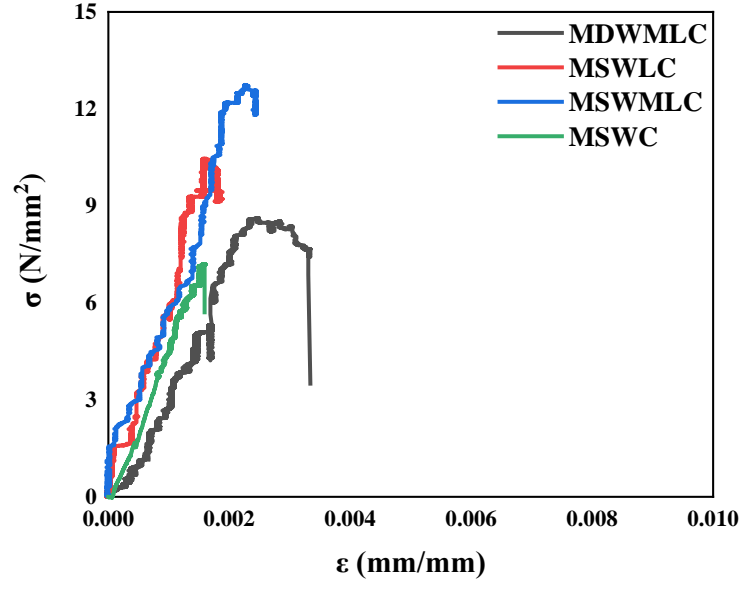


c) MSWMLC numunesine ait kırılma şekli

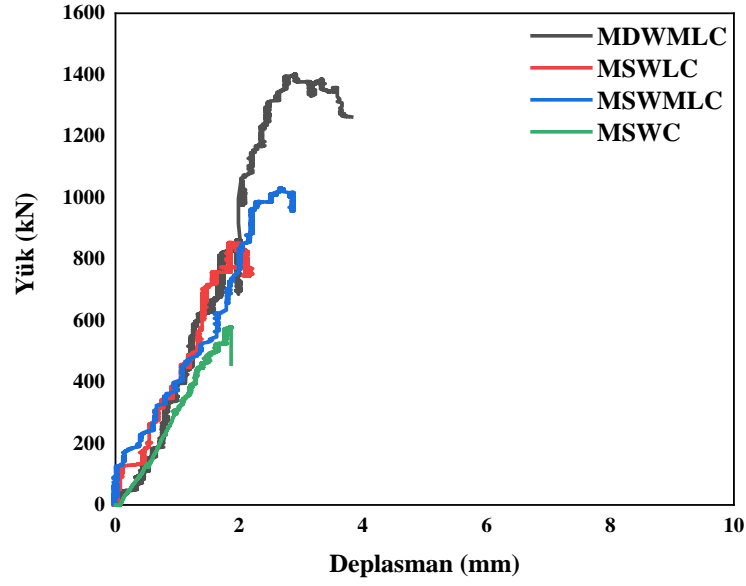


d) MDWMLC numunesine ait kırılma şekli

Şekil 124. Makro boyutlu numunelerin düşey yük altında kırılma şekilleri

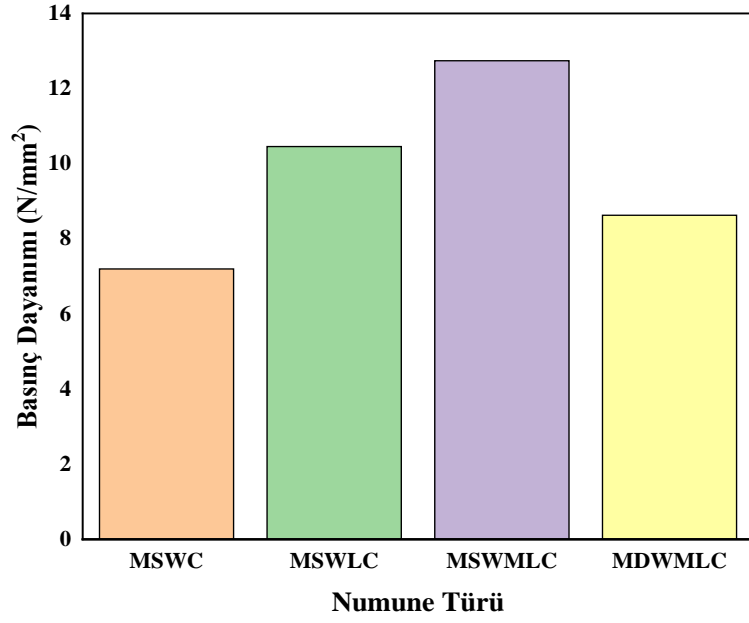


Şekil 125. Makro boyutlu numunelere ait gerilme – gerinim grafikleri

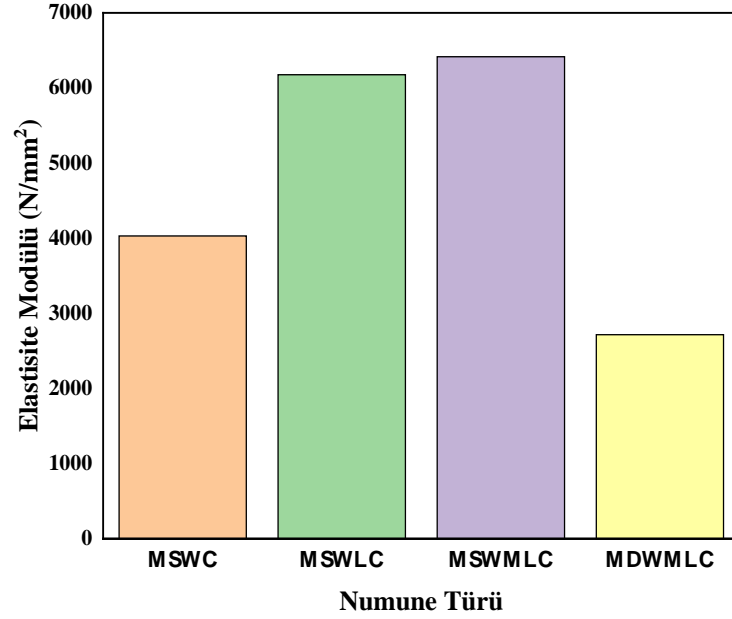


Şekil 126. Makro boyutlu numunelere ait düşey yük – deplasman grafikleri

Numunelere ait maksimum basınç dayanımı Şekil 127 ve gerilme – gerinim grafiklerinden hesaplanan elastisite modülü Şekil 128’de verilmiştir.



Şekil 127. Makro boyutlu numunelere ait basınç dayanım



Şekil 128. Makro boyutlu numunelere ait elastisite modülü

4.4.2. Diyagonal kayma dayanımı

İçi boş çok katmanlı duvarların düzlem içi kayma dayanımı, makro boyutlu numuneler kullanılarak diyagonal basınç deneyi ile belirlenmiştir. Bu deneyin yapılmasının amacı, içi boş çok katmanlı duvarlarda tasarlanan kenet ve zıvanaların kullanılmasıyla duvarların düzlem içi kayma dayanımı, deplasman kapasitesi ve enerji tüketme kapasitesindeki

değişimin araştırılmasıdır. Bu amaçla tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarların düzlem içi davranışını kıyaslayabilmek için referans duvar numuneler de üretilmiştir. Referans numuneler, geleneksel taş duvarları temsil edecek şekilde tek katman olarak üretilmiş ve duvardaki bireysel taşlar, tasarlanan metal bağlantı elemanları kullanılmadan, sadece geleneksel harçlarla birbirine bağlanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken husus tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların mekanik özelliklerinin, referans numunelerin mekanik özellikleriyle kıyaslanmasının sağlıklı olmayacağıdır. Çünkü referans numuneler tek katmandan oluşmakta, tasarlanan duvarlar ise arasında 50 mm boşluk bulunan çift katman şeklindedir. Bu problemi bertaraf etmek için, deneysel çalışmalar kapsamında tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarların yük transfer mekanizmasına sahip tek katmanlı bireysel taşlardan, harcın yanı sıra metal bağlantı elemanları ile de birbirine bağlanan numuneler üretilmiş ve referans numunelerle karşılaştırılmıştır. Böylelikle doğal taş duvarlarda kenet ve zıvanaların etkisi irdelenmiştir. Daha sonra tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarlar bu numunelerle kıyaslanmış ve tek katmanlı duvar numunelere nazaran duvarların performansındaki değişim incelenmiştir.

Tablo 18. Diyagonal basınç deney numunelerinin boyutları

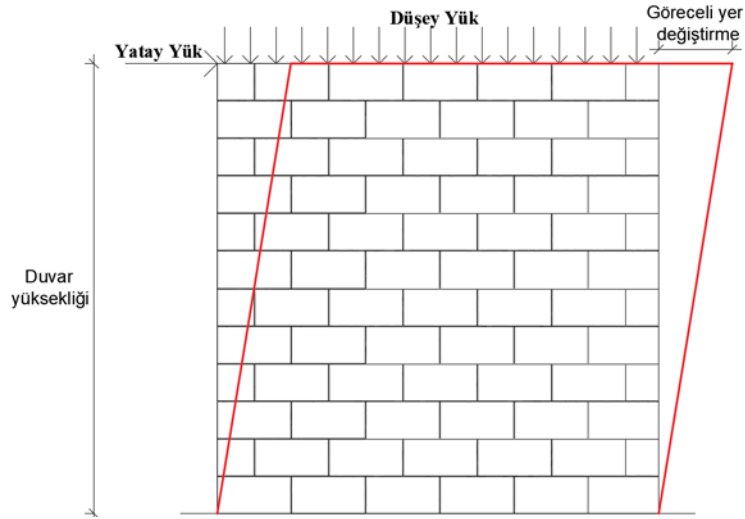
Grup	N. Kodu	Numune boyutu			Ken. D.	K. S.	α°	g _{yatay} (mm)	g _{düşey} (mm)
		H (mm)	W (mm)	t (mm)					
1. Grup	SWDT-01	1212	1210	100			45,05	1195	1201
	SWDT-02	1240	1210	100	Yok	1	45,70	1183	1178
	SWDT-03	1226	1215	100			45,26	1224	1211
2. Grup	SWHDT-01	1225	1209	100			45,38	1209	1327
	SWHDT-02	1225	1206	100	Yok	1	45,45	1221	1346
	SWHDT-03	1224	1210	100			45,33	1251	1333
3. Grup	SWMDT-01	1241	1214	100			45,63	1251	1387
	SWMDT-02	1237	1217	100	Var	1	45,47	1228	1360
	SWMDT-03	1234	1205	100			45,68	1240	1344
4. Grup	DWMDT-01	1236	1211	200			45,59	1192	1236
	DWMDT-02	1244	1206	200	Var	2	45,88	1207	1406
	DWMDT-03	1253	1215	200			45,88	1225	1512

Deneysel çalışmadan sonra duvar tipleri arasındaki karşılaştırma kriterleri; *Kırılma türü*, *Öteleme oranı*, *Kayma dayanımı*, *Deplasman kapasitesi*, *Rijitlik ve Enerji tüketim kapasitesi* olarak belirlenmiştir. Bu bölümde öncelikle diyagonal basınç deneyi

kapsamında deneye tabi tutulan bütün numunelerin deney sırasında ölçülen boyut değerlerine yer verilmiştir (Tablo 18). Daha sonra karşılaştırma kriterleri detaylı olarak açıklanmış ve her bir gruba ait deney sonuçları ayrı ayrı başlıklar altında sunulmuştur. Bölümün sonunda ise diyagonal basınç deneyine ait bilgiler Tablo 19’da özetlenmiş ve sunulmuştur. Numuneler deneysel verileri olan basınç yükü ve deplasmanlar, sırasıyla veri toplama cihazı ve potansiyometrik cetveller (ipli ölçer) ile bilgisayara aktarılmıştır. Bu veriler yardımı ile karşılaştırma kriterleri olarak belirlenen değerler hesaplanmıştır. Kriterlerin hesaplanmasında kullanılan yöntem ve formüller aşağıda verilmiştir.

Kırılma türü: Her numune deney sırasında yükleme başlangıcından duvar numunenin kırılma anına kadar sürekli gözlenmiş ve oluşan çatlakların gelişimi takip edilmiştir. Deney sırasında numunelerde gelişen çatlaklar her grupta ayrı ayrı ele alınmıştır.

Öteleme oranı: Yığma yapıların yapısal çözümlerinde kullanılan performansa dayalı değerlendirme yöntemleri kapsamında, duvarların bir veya bir kaç sınır durumu için öteleme kapasitelerinin hesaplanması gerekmektedir. Buradaki öteleme oranı kavramı, Şekil 129’da gösterildiği gibi duvarın üst köşesinin alt köşesine göre ölçülen göreceli yer değiştirmesinin, duvarın yüksekliğine oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Öteleme kapasite modelleri, yığma binalar ve özellikle taş binalar için hala geliştirilmektedir (Rezaie ve ark., 2020).



Şekil 129. Yığma duvarların düşey ve yatay yüklerdeki ötelemeleri

Karşılaştırma kriteri olarak öteleme oranı duvarın düzlem içi kayma dayanımı, Şekil 129’da gösterilen tersinir tekrarlanır (quasi-static) deney yöntemi ile belirlenirken

kullanılmaktadır (Vanin ve ark., 2017). Ancak literatür incelendiğinde bu oranın, bir karşılaştırma kriteri olarak ASTM E519 standardına uygun yapılan diyagonal basınç deneyi yönteminde de kullanıldığı görülmektedir (Dizhur ve ark., 2013; Ismail ve ark., 2011; Uslu, 2013).

Öteleme oranı birkaç limit durumu için (δ_{cr} , δ_y , δ_{SD} , $\delta_{maks.}$, δ_u ve δ_c) hesaplanabilmektedir. δ_{cr} ilk çatlağın oluştuğu seviyedeki öteleme oranıdır. Akma öteleme oranı olarak adlandırılan δ_y , yük – deplasman tepkisinin bilineer yaklaşımından elde edilmektedir ve ileride δ_y 'nın elde edilişi daha detaylı bir şekilde açıklanmıştır. δ_{SD} en az $3\delta_{cr}$ veya $\delta_{maks.}$ şeklinde hesaplanmaktadır. $\delta_{maks.}$ ise kuvvetin maksimum olduğu seviyedeki öteleme oranı olarak bilinmektedir. δ_u nihai öteleme oranı olarak bilinen ve araştırmacılar tarafından en çok kullanılan sınır durumudur. Bu oran genellikle gerilme – gerinim (Ismail ve ark., 2011) veya kuvvet – gerinim (Dizhur ve ark., 2013) grafiğinden elde edilmektedir. Diyagonal basınç deneylerinde numunenin kayma alanı (A_n) ASTM E519'e göre hesaplandığı ve sabit olduğundan bu iki grafikten hangisi kullanılırsa kullanılсын sonucun aynı olacağı bilinmektedir. Nihai öteleme oranı, maksimum kuvvet veya gerilme aşıldıktan sonra, yük veya gerilmede %20 düşüşün gerçekleştiği seviyeye denk gelecek öteleme oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Böylelikle δ_u , $0,8F_{maks}$ veya $0,8S_{maks}$ şeklinde hesaplanmaktadır. δ_c , δ_u 'ya benzer şekilde hesaplanmakta ancak maksimum yük veya gerilmeden sonra düşüşün %50 seviyesinde gerçekleştiği seviye dikkate alınmaktadır (Vanin ve ark., 2017). Bu çalışmada öteleme oranı Denklem 19'da verilen eşitlikle hesaplanmıştır.

$$\delta = \frac{\Delta x + \Delta y}{2g} (\cot\alpha + \tan\alpha) \quad (19)$$

Burada Δx yüklemeye dik yöndeki uzamayı, Δy yüklemeye paralel yöndeki kısalmayı, g yüklemeye paralel olan ipli potansiyometrenin ilk boyu ve α duvarın alt tarafı ile yükleme düzlemi arasındaki açıyı temsil etmektedir.

Kayma dayanımı: Deney sırasında uygulanan basınç kuvveti, yük hücresiyle ölçülmüş ve veri toplama cihazı ile bilgisayara aktarılmıştır. Duvarın düzlem içi kayma dayanımı (S_s) ise ölçülen basınç kuvveti ve Denklem 20'de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S_s = \frac{0,707P_{maks}}{A_n} \quad (20)$$

Burada; P_{maks} ölçülen maksimum basınç yükünü ve A_n Denklem 21'den hesaplanan duvar numunesinin kayma enkesit alanını temsil etmektedir.

$$A_n = \left(\frac{w + h}{2} \right) tn \quad (21)$$

Denklemdaki w duvar numunesinin genişliğini, h yüksekliğini, t kalınlığını ve n bireysel elemanın, yani kullanılan doğal taşların, katı olan brüt alanını temsil etmektedir. Kullanılan taşlar masif olduğundan bu oran 1 olarak kabul edilmiştir.

Deplasman kapasitesi: Deprem sırasında binanın sünek davranması, o binanın yıkılmadan ayakta kalabilmesi ve içerisinde bulunan can ve mal kaybını en aza indirilebilmesi açısından hayati derecede önemlidir. Süneklik; dayanımda önemli düşüş olmadan deformasyon yapabilme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Sünek malzemelerin gerilme – gerinim ($\sigma - \epsilon$) grafikleri incelendiğinde, elastik bölgeyi takip eden bir akma bölgesinin olduğu görülmektedir. Bu bölgede, gerilmede önemli değişim olmaksızın, gerinimde artışlar gözlenebilmektedir. Gevrek malzemeler ise böyle bir davranışa sahip olmadıkları için deplasman kapasiteleri ve buna bağlı olarak enerji tüketim kapasiteleri sünek malzemelere oranla çok daha düşüktür.

Günümüzde yönetmelikler ve modern tasarım yaklaşımları, yapısal çözümlerinde sadece dayanımı dikkate almamaktadır. Bunun yanında binada oluşan deplasmanlara da büyük ölçüde önem vermektedir. Geleneksel yığma binaların depreme karşı gevrek davranış sergiledikleri bilinen bir husus olsa da yönetmeliklere göre bu binalar göçmeden önce önemli derecede deformasyon yapabilme kabiliyetine sahiplerdir. Bu da binada oluşan çatlaklarla beraber elastik sınırın ötesinde deformasyonun gerçekleştiği varsayımı ile açıklanabilmektedir. Böylelikle düşey yüklere karşı dayanım kaybı yaşanmadan, oluşan enerji yapı tarafından dağıtılmaktadır. Bu yaklaşım taş, tuğla ve harç gibi gevrek bireysel elemanlardan meydana gelen yığma duvarlara elastik bölgenin ötesinde önemli ölçüde sahte süneklik (Pseudo-ductile) davranışı kazandırmaktadır (Bricks ve Materials, 2016; Demir, 2012). Bir çok deneysel çalışmada numunelerin deplasman kapasitesi yukarıda anlatılan yaklaşımla hesaplanmış ve bir karşılaştırma kriteri olarak

kullanılmıştır (Demir, 2012; Ismail ve ark., 2011; Shabdin ve ark., 2018; Uslu, 2013). Bunun sebebi ise duvarın deplasman kapasitesinin belirlenmesi demek, aynı zamanda o duvarın deprem performansı hakkında da bilgi edinmek demektir. Bu tezdeki diyagonal basınç deneyi kapsamında üretilen doğal taş duvar numunelerin sünekliği, Denklem 22’de verilen eşitlikle hesaplanmıştır.

$$\mu_d = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (22)$$

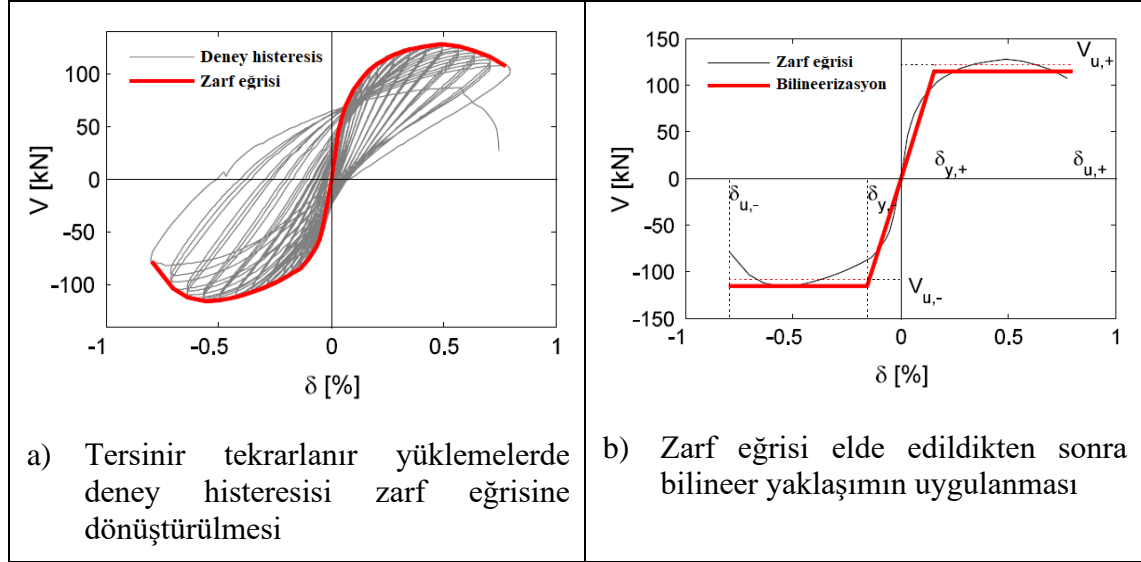
Denklem 22’de μ_d süneklik katsayısını, δ_u nihai öteleme oranını ve δ_y akma öteleme oranını temsil etmektedir ve bu değerler deneysel çalışma sonucunda elde edilen kuvvet – deplasman grafiğinden elde edilmiştir.

Yığma duvarların düzlem içi kayma dayanımı belirlenirken kuvvet – deplasman eğrileri gevrek malzemelerin sergilediği performansı sergilemektedir. Böylece δ_u nihai öteleme oranı maksimum yükün %80’i olarak alınsa da δ_y akma öteleme oranının değeri belirgin değildir. Bu sebepten dolayı deneysel çalışmalardan elde edilen kuvvet – deplasman grafiği veya gerilme – deplasman grafiği daha kolay irdelenebilmesi için bilineer yaklaşımı ile idealize edilmektedir. Böylelikle efektif rijitlik, dayanım ve şekil değiştirebilirlik kolaylıkla hesaplanabilmektedir (Demir, 2012).

Kuvvet – deplasman eğrisi farklı deneylerde farklı yükleme yöntemleriyle elde edilebilir. Bu yöntemlerde yükleme monotonik veya tersinir tekrarlanır şeklinde olabilmektedir. Monotonik yüklemelerde deney histeresisi direk bilineer yaklaşımı için kullanılabilir. Ama tersinir tekrarlanır kuvvet uygulamasında önce zarf eğrisi çizilmekte daha sonra bilineer yaklaşımı uygulanmaktadır (Şekil 130) (Vanin ve ark., 2017).

Yığma duvarların düzlem içi kayma dayanımı deneysel olarak belirlenirken ilk çatlağı oluşturan kuvvete F_{cr} ve bu kuvvete karşı gelen öteleme oranına δ_{cr} denilmektedir (Demir, 2012; Vanin ve ark., 2017). Bu iki değer vasıtası ile bilineer grafikteki ilk lineer çizginin eğimi ile K_e belirlenmektedir. δ_{cr} birçok araştırmacı tarafından maksimum kuvvetin %70’ine ($0,7F_{maks}$) denk gelen öteleme oranı olarak kabul edilmiştir (Bricks ve Materials, 2016; Demir, 2012; Dizhur ve ark., 2013; Ismail ve ark., 2011; Shabdin ve ark., 2018; Vanin ve ark., 2017). Bunun sebebi ise deney sırasında ilk çatlaklar her zaman tam olarak görülemediğinden δ_{cr} ’nin belirgin bir şekilde ortaya çıkmamasıdır Örneğin

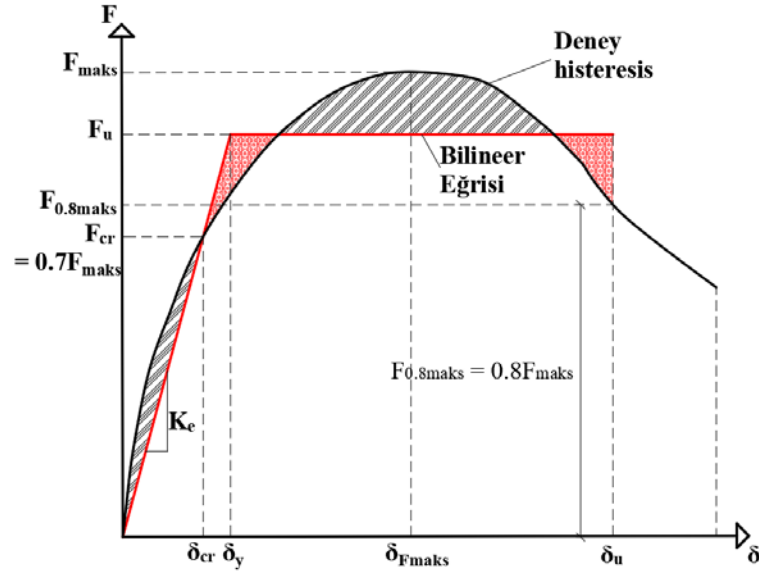
Demir (2012) çalışmasında, ilk çatlak maksimum kuvvetin %83'ü civarında meydana geldiğini gözlemiştir. Yazara göre bu çatlak gözle görülebilir büyüklükte olduğundan, olması gerekenden daha büyük bir kuvvete karşı gelmektedir. Bu sebepten dolayı hesaplamalarda maksimum kuvvetin %70'ine denk gelen seviye dikkate alınmıştır.



Şekil 130. Bilineer yaklaşımın uygulama aşamaları

(Kaynak: (Vanin ve ark., 2017))

Bilineer yaklaşımında deney histeresinin idealize etme işlemi şu sıralama ile yapılmaktadır. Önce maksimum kuvvet kaydedilir. Sonra δ_{cr} , kuvvet – deplasman grafiğindeki maksimum kuvvetten önce, F_{maks} 'ın %70'ine denk gelecek şekilde hesaplanır. Böylece K_e belirlenmiş olur ve bununla birlikte bilineer yaklaşımındaki ilk lineer çizginin eğimi ortaya çıkmış olur. Daha sonra δ_u maksimum kuvvetten sonra, F_{maks} 'ta %20 düşüş gerçekleştiği seviye dikkate alınarak hesaplanır (Vanin ve ark., 2017). Bu da bilineer yaklaşımındaki yatay çizginin son kısmını belirlemektedir. Son olarak F_u hesaplanır ve iki doğrudan oluşan bilineer eğrisi çizilir. Deney histeresinin bilineer yaklaşımı ile idealize yöntemi Şekil 131'de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 131. Deney histeresisine bilinear yaklaşımının uygulanması

Bu çalışmada deney histeresisli olan kuvvet – deplasman eğrisi deneysel verilerden elde edildiği gibi kullanılmıştır. Bilinear uygulamasında F_u bilinear eğrisinin yatay çizgisine denk gelmektedir. Bu değer, deney ve bilinear grafiğin enerji tüketme kapasitelerinin eşit olacağı şekilde seçilmektedir. Bu da ancak iki grafiğin altında kalan alanların eşit olması ile (Şekil 131) gerçekleştirilebilmektedir (Demir, 2012; İsmail ve ark., 2011). Böylelikle Şekil 131’de farklı taramalarla gösterilen iki alanın birbirine eşit olması anlamına gelmektedir. Bilinear grafiğin altındaki alan Denklem 23 ile kolayca hesaplanabilmektedir. Bilinear grafiğin altındaki alan $A_{bilinear}$, deney histeresisin altında kalan alana ($A_{histeresis}$) eşitlendiğinde Denklem 24 vasıtası ile F_u hesaplanmaktadır (Vasconcelos, 2005).

$$A_{bilinear} = F_u \delta_u - \frac{F_u^2}{2K_e} \quad (23)$$

$$F_u = K_e \left[\delta_u - \sqrt{\delta_u^2 - \frac{2A_{histeresis}}{K_e}} \right] \quad (24)$$

Rijitlik: Bu parametre binanın yapısal davranış mekanizmasında büyük rol oynamaktadır. Bunun sebebi binaya etkiyen yüklere karşı oluşacak deplasmanların binadaki taşıyıcı elemanların rijitliklerine bağlı olmasıdır. Böylece taşıyıcı elemanların rijitlikleri, binanın

dinamik özelliği ve kuvvet – deplasman tepkisi hakkında bilgi vermektedir. Bunların sonucu olarak; deprem sırasında binaya etkiyen yatay yükler, binadaki taşıyıcı elemanların rijitlikleri oranında karşılandığından, elemanların rijitliklerinin belirlenmesi tasarım açısından büyük öneme sahiptir. Böylelikle rijitlik, belirli bir deplasmandaki (δ_i) sekant değeri olarak tanımlanabilmektedir. Yani kısaca o belirlenen deplasmandaki kuvvetin (F_i), deplasmana (δ_i) oranı şeklinde hesaplanmaktadır (Denklem 25) (Demir, 2012; Vanin ve ark., 2017).

$$K = \frac{F_i}{\delta_i} \quad (25)$$

ASTM E 519M-15 (2015)'da ise duvar numunelerin kayma modülünü temsil eden G , malzemenin rijitlik ölçütü olarak tanımlanmakta ve gerilmenin gerinime oranı şeklinde hesaplanmaktadır. Bu değer genellikle maksimum gerilmenin %5'i ($0,05S_{maks}$) ile %70'ine ($0,7S_{maks}$) karşılık gelen öteleme oranının sekant değeri olarak hesaplanmaktadır (Demir, 2012; Dizhur ve ark., 2013; Ismail ve ark., 2011; Rezaie ve ark., 2020; Vanin ve ark., 2017). Duvarların poisson oranı ν iki şekilde kabul edilebilmektedir. Ismail ve ark. (2011) yaptığı çalışmada bu değeri (ν) direk olarak **0,25** kabul edilmiştir. Ancak Dizhur ve ark. (2013) yaptığı çalışmada bu oranı, beton basınç deneyinde statik elastisite ve poisson oranının belirlenme standardı olan ASTM C469-02'ye bağlı olarak maksimum kuvvetin %40'ına karşılık gelen Δx 'in Δy 'ye oranı olarak belirlemiştir. Bu tezde duvarların poisson oranı **0,25** olarak kabul edilmiştir. Böylece her bir duvar numunesinin rijitliği olan E , Denklem 26'da verilen eşitlik vasıtasıyla hesaplanmıştır.

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (26)$$

Enerji tüketim kapasitesi: Yığma yapılarıdaki taşıyıcı elemanların değerlendirilmesinde, bir başka önemli parametre ise enerji tüketim kapasitesidir. Katı cisimler, belirli bir enerji girişi ile ($E_{d,giriş}$) şekil değiştirmektedir. Bu enerji elastik sınırlar içerisinde, malzeme üzerinden yük kaldırılınca bir iş yaparak malzemeyi eski haline getirir. Elastik sınırın ötesinde bu enerji, malzemelerde kalıcı şekil değiştirmeye sebep olmaktadır. Yığma

yapılarda taşıyıcı elemanların enerji tüketim kapasitesi kuvvet – deplasman veya gerilme – gerinim grafiğinin altında kalan alan olarak hesaplanmaktadır (Demir, 2012; Dizhur ve ark., 2013; Vasconcelos, 2005).

Üretilen 12 adet makro boyutlu diyagonal basınç deneyi numunesine ait deneysel sonuçlar ilgili başlıklar altında verilmiştir. Sonuçların irdelenmesi ise Bölüm 6’da sunulmuştur.

4.4.2.1. Referans numunelerin diyagonal basınç deney sonuçları

Referans olarak 6 adet numune diyagonal basınç deneyine tabi tutulmuştur. 6 adet numuneden 3 adedi kireç harcıyla kalan 3 adedi ise horasan harcı ile örülmüştür. Bu grupların üretimi ve deneye tabi tutulma amacı geleneksel taş duvarlarla tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların bir katmanı olan metal bağlantı elemanlı duvarlar arasındaki farkı araştırmaktır.

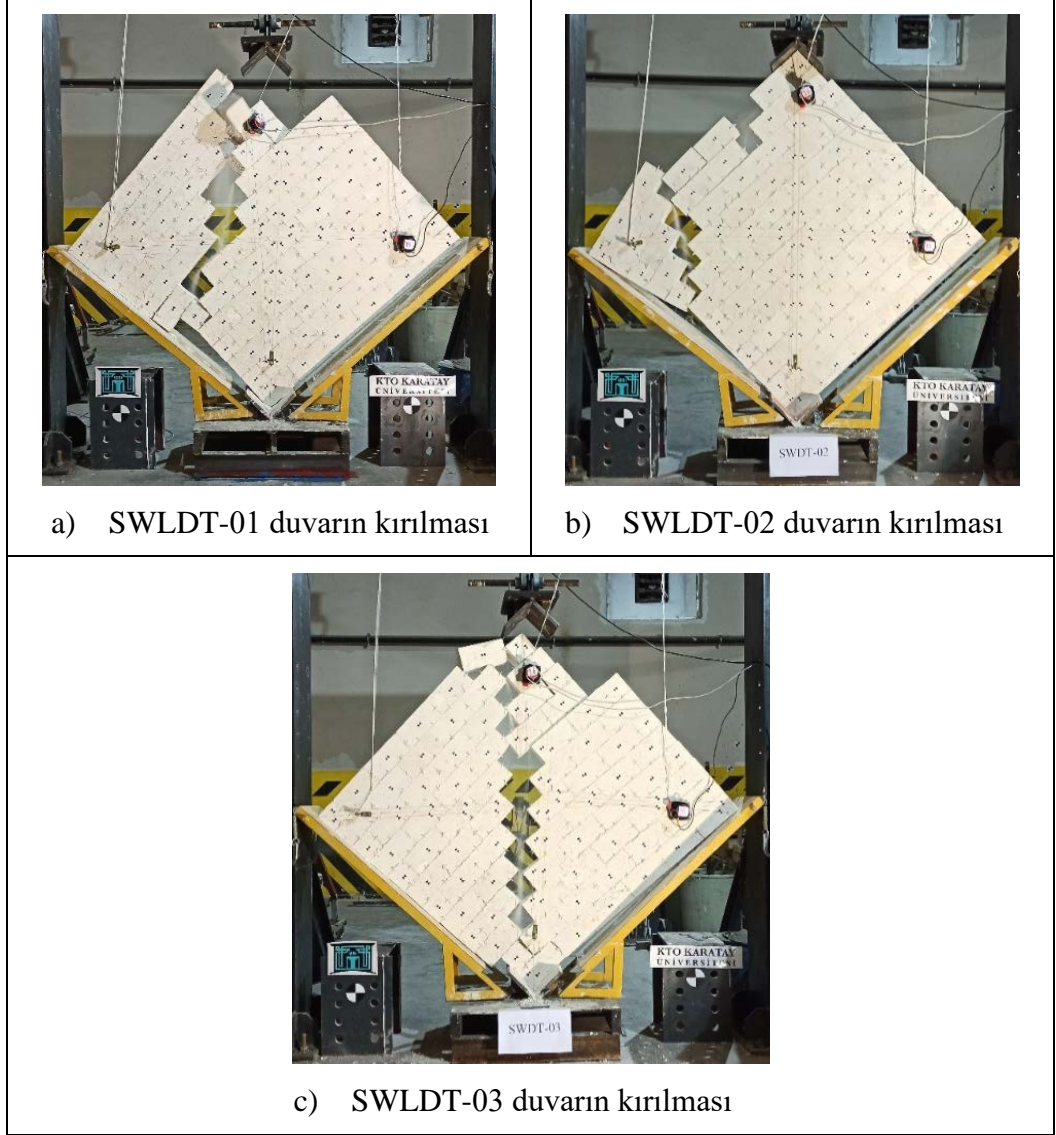
a. Kireç harçlı (SWLDT) numunelerin diyagonal basınç dayanımı

Bu grup, Bölüm 3.2.2.2.’de 1. grup olarak tanımlanmış ve 3 adet kireç harçlı numuneden oluşmaktadır. Numunelerde metal bağlantı elemanları kullanılmamış ve derz kalınlığı 2 mm olacak şekilde ayarlanmıştır.

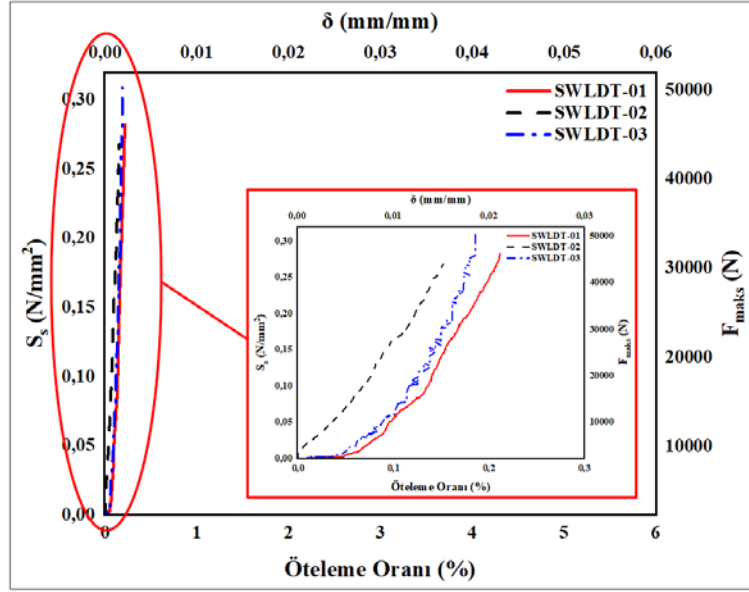
Numuneler deney düzeneğine yerleştirildikten sonra basınç yüklemesine maruz bırakılmış ve numune kırılıncaya kadar sabit yükleme hızı ile yüklenmiştir. Yükleme devam ederken numunelerde çatlakların oluşup oluşmadığı sürekli izlenmiş ve kırılma anına kadar hiç bir çatlağa rastlanmamıştır. Numunelerdeki kırılmalar Şekil 132’de gösterildiği gibi son derece ani gerçekleşmiş ve veri toplama cihazı ile kaydedilen yük ve deplasmanlar da bu durumu desteklemiştir. Kırılmalar derzlerde oluşmuş, bireysel taş elemanlarda hasar görülmemiştir.

1. gruptaki numunelerin düzlem içi kayma davranışı incelendiğinde son derece gevrek bir davranış sergilediği gözlenmiştir. Bu gruba ait gerilme – gerinim grafiği Şekil 133’te verilmiştir. Grafik incelendiğinde bu gruba ait numunelerin ortalama kayma dayanımının (S_{maks}) $0,287 \text{ N/mm}^2$ civarında olduğu ve buna karşı gelen öteleme oranlarının ihmal edilecek kadar düşük olduğu görülmektedir. Grafikte öteleme oranının %6’ya kadar çizilmesinin sebebi, diğer duvar tiplerine ait gerilme – gerinim grafikleri ile aynı olması

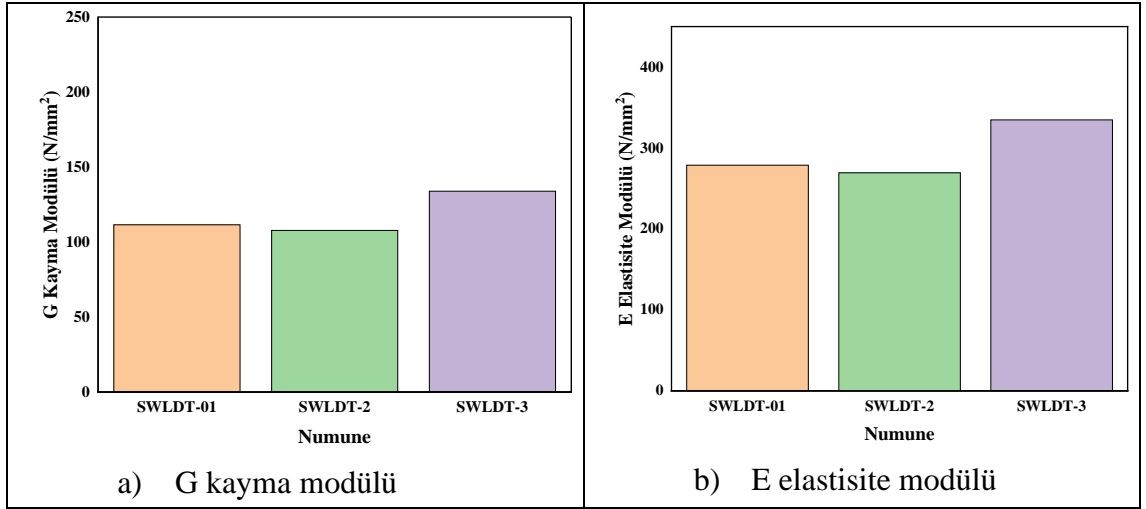
ve kıyaslanma açısından kolaylık sağlanmasıdır. Ek olarak Şekil 133'te 1. gruba ait öteleme oranları daha büyük ölçekli olarak da gösterilmiştir.



Şekil 132. SWLDT grubuna ait kırılma şekilleri



Şekil 133. SWLDT grubuna ait gerilme – gerinim grafiği

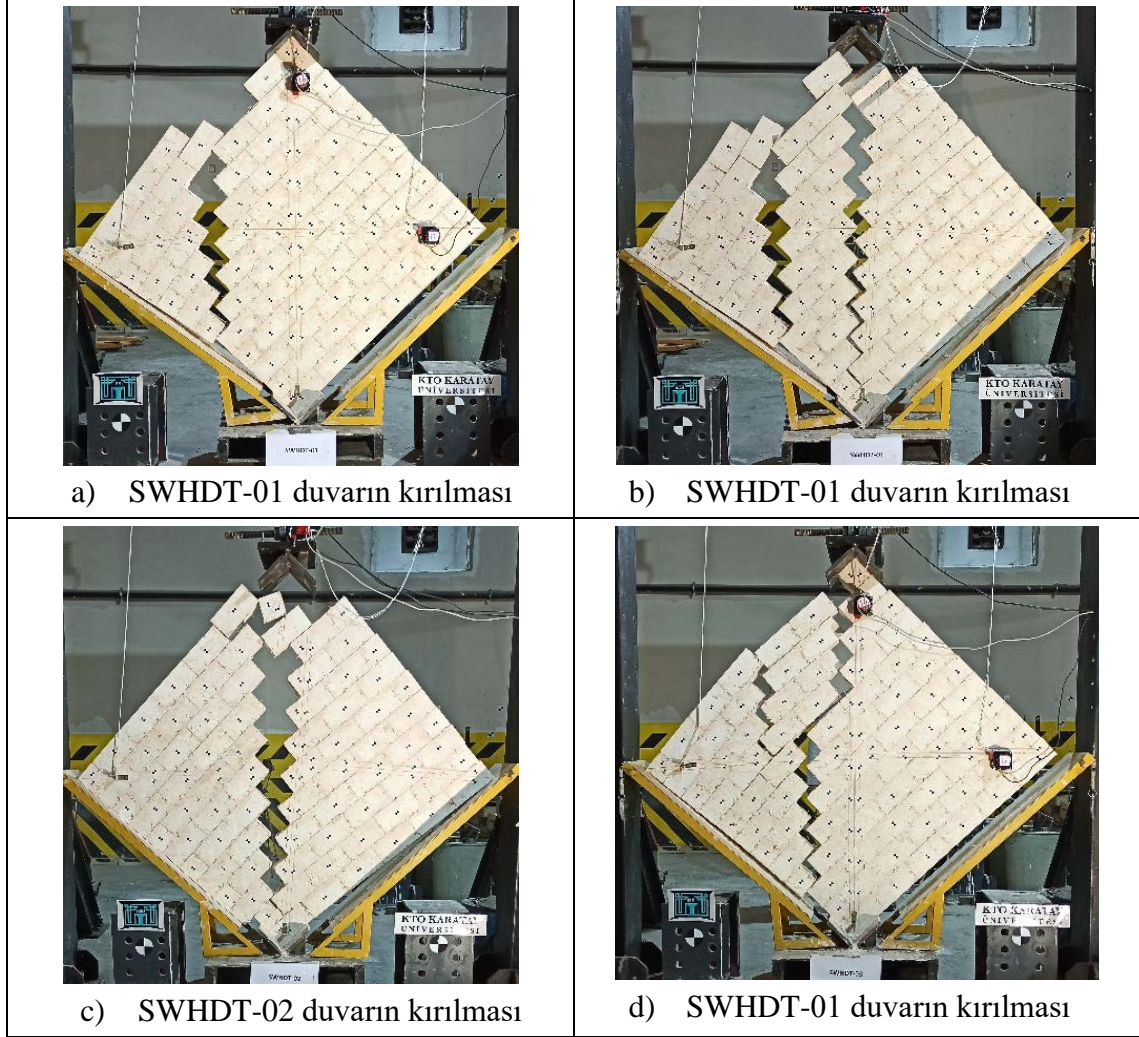


Şekil 134. SWLDT grubuna ait rijitlik ölçütleri

Yukarıda yığma duvarlar için rijitlik kavramı tanımlanmıştır. İlk aşama olarak ASTM E519’da rijitlik ölçütü olarak verilen G kayma modülü, maksimum gerilmenin %70’i ($0,7S_{maks}$) dikkate alınarak hesaplanmıştır. İkinci aşamada deneysel çalışma kapsamında kullanılan doğal taş duvarlar için poisson oranı $\nu = 0,25$ olarak kabul edilmiştir. Üçüncü ve son aşama olarak Denklem 26 kullanılarak numunelerin Elastisite modülü E hesaplanmıştır. Şekil 133’te verilen gerilme – gerinim grafiği incelendiğinde 1. gruba ait numunelerin öteleme oranlarının çok düşük olduğu görülmektedir. Bu sebepten dolayı 1. gruba ait numunelerin rijitlikleri çok yüksek olup Şekil 134’te şematik olarak verilmiştir. Bu gruba ait diğer özellikler bu bölümün sonunda sunulan Tablo 19’da verilmiştir.

b. Horasan harçlı (SWHDT) numunelerin diyagonal basınç dayanımı

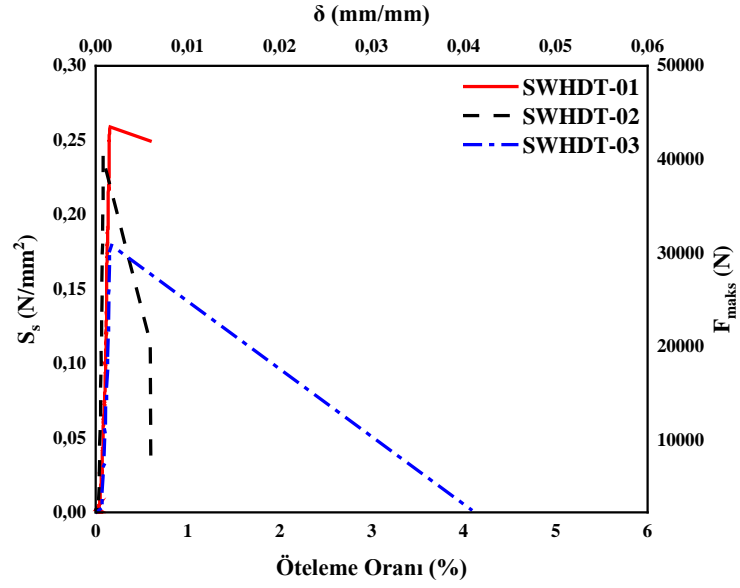
Bu grup Bölüm 3.2.2.2.'de 2. grup olarak tanımlanmış olup 3 adet horasan harçlı numuneden oluşmaktadır. 1. grupta olduğu gibi duvar numunelerinde metal bağlantı elemanları kullanılmamış ve derz aralıkları 2 mm olarak bırakılmıştır.



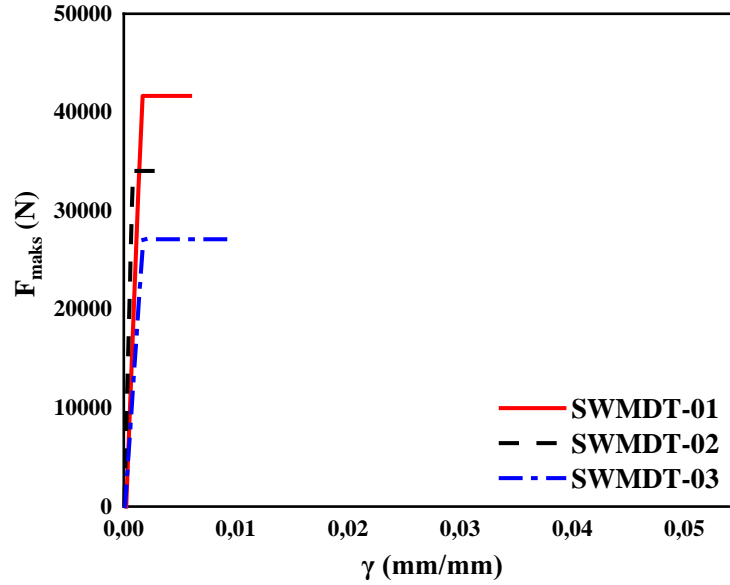
Şekil 135. SWHDT grubuna ait kırılma şekilleri

Horasan harcı ile örülen numunelerde kırılmaların, kireç harcı ile örülen numunelerde olduğu gibi aniden gerçekleştiği gözlenmiştir (Şekil 135). SWHDT-01 kodlu birinci numunedeki kırılma incelendiğinde, önce Şekil 135.a'da gösterildiği gibi duvarın sol üst kısmında bir kırılmanın meydana geldiği görülmüştür. Bu aşamaya kadar yük ve deplasmanları kaydedilmiş ve ölçüm aletlerine zarar gelmemesi için deney durdurularak ölçüm aletleri numuneden sökülmüştür. Daha sonra tekrar yükleme devam ettirilerek

Şekil 135.b’de gösterilen kırılmanın gerçekleştiği gözlenmiştir. Gerilme – gerinim grafiğinde ilk aşamada gerçekleşen kırılma dikkate alınmıştır.



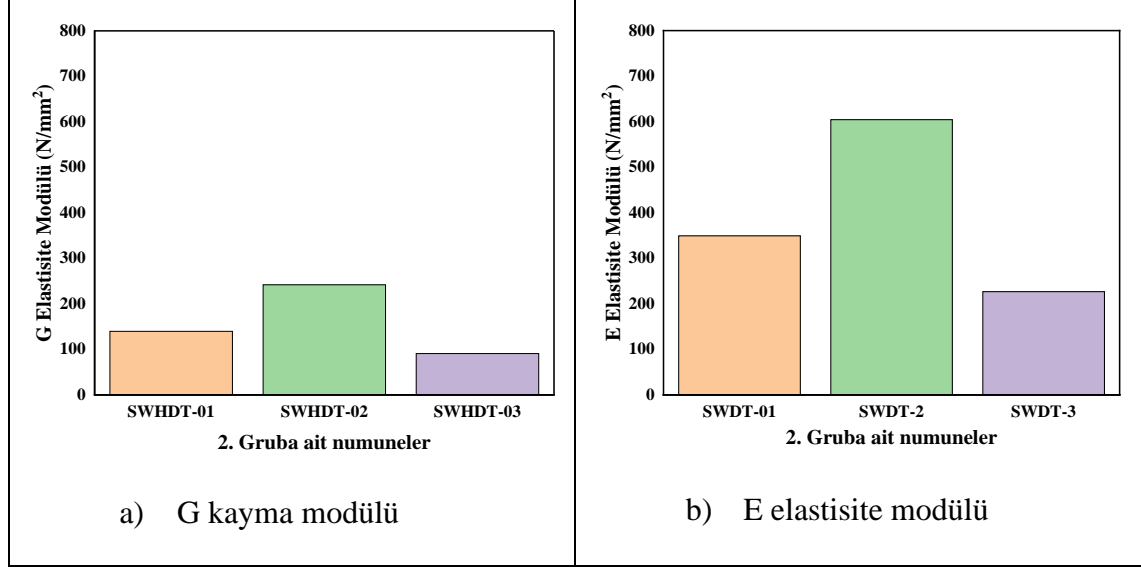
Şekil 136. SWHDT grubuna ait gerilme – gerinim grafiği



Şekil 137. SWHDT grubuna ait bilineer grafiği

SWHDT grubuna ait gerilme – gerinim grafiği Şekil 136’de verilmiş ve ortalama kayma dayanımının (S_{smaks}) 0,227 N/mm² civarında olduğu gözlemlenmiştir. Bu gruba ait numunelerin diyagonal basınç deneyi sırasında, SWLDT grubunda olduğu gibi herhangi bir problemle karşılaşmadı. Böylece numunelerin düzlem içi davranışları imkanlar dahilinde en doğru şekilde ölçülerek sonuçlar ortaya konulmuştur.

Şekil 136’da verilen gerilme – gerinim grafiği Şekil 137’de verilen bilineer grafiği şeklinde idealize edilmiş ve numunelere ait δ_{cr} , δ_u ve δ_y gibi değerler hesaplanarak Tablo 19’da verilen parametreler belirlenmiştir. Son olarak numunelere ait kayma modülü ile elastisite modülü Şekil 138’de verilmiştir.

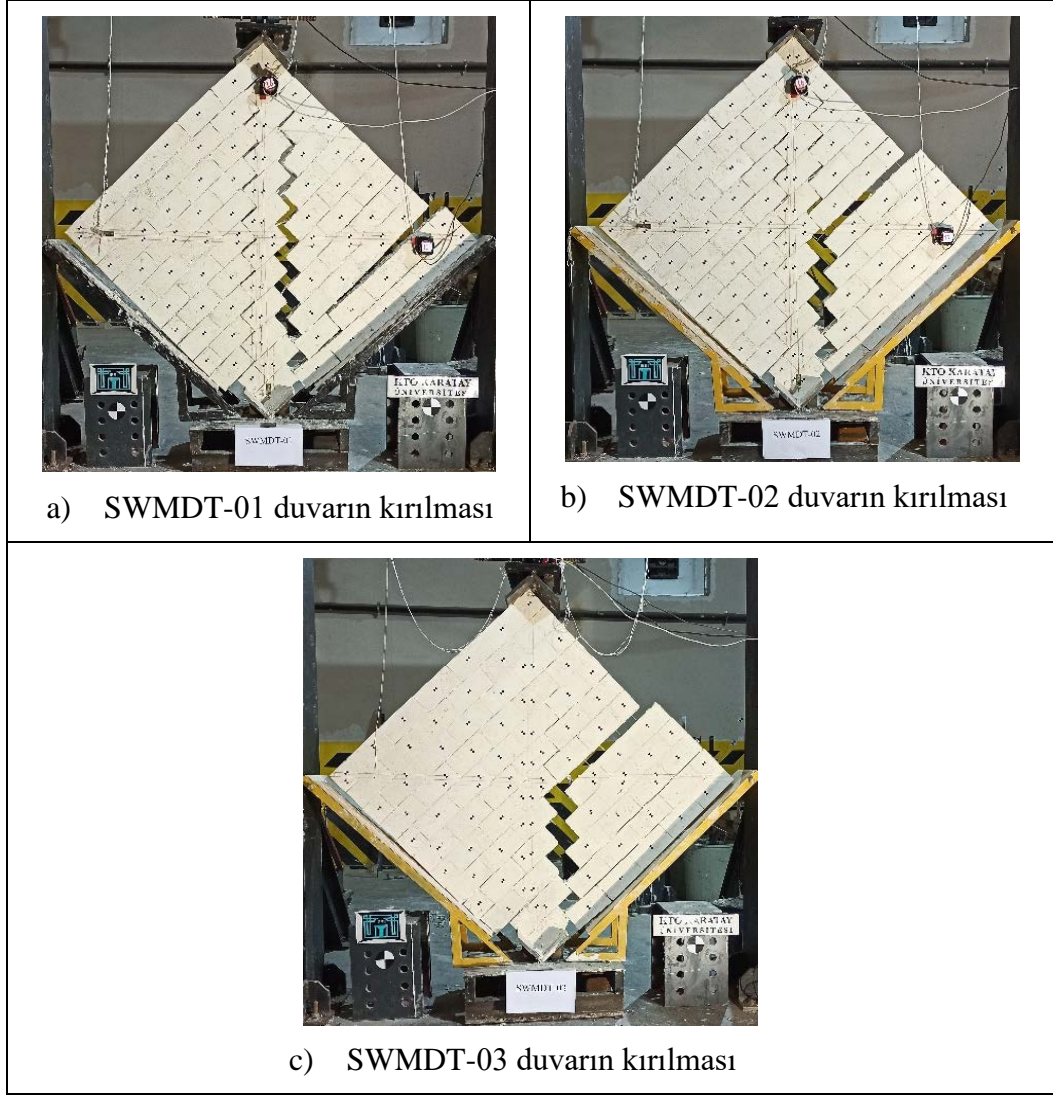


Şekil 138. SWHDT grubuna ait rijitlik ölçütleri

4.4.2.2. Tek katmanlı metal bağlantı elemanlı numunelerin diyagonal basınç deney sonuçları

Bu grupta, detayları bölüm 3.2.2.2.’de verilen, 3 adet tek katmanlı numune yer almaktadır. Numunelerde bireysel elemanlar (taşlar), kireç harcın yanı sıra detayları Şekil 41.c ve d’de verilen kenet ve zıvanalarla da birbirine bağlanmıştır.

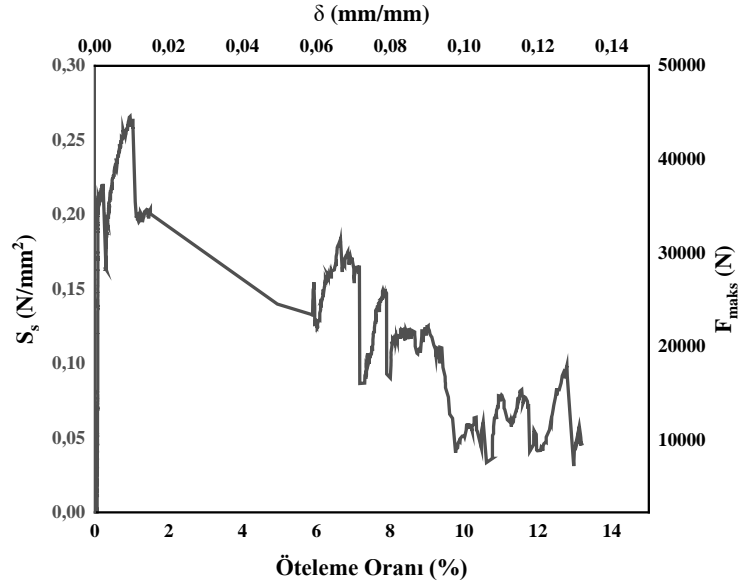
Deney sırasında numunelerde oluşan çatlaklar izlenmiş ve referans numunelerde olduğu gibi çatlaklar ve bununla birlikte duvarların kırılmasının aniden gerçekleştiği görülmüştür. Numunelerde oluşan çatlakların, yük artışı ile genişlediği görülmüştür. Böylece diyagonal basınç yüklemeye karşı duvarlar beklendiği gibi sünek bir davranış sergilemiştir. Çatlaklar diyagonal kayma alanı boyunca derzlerde oluşmuş ve bireysel elemanlarda kırılma olmadığı gibi zıvana ve kenetlerde de kesilme gözlenmemiştir. Şekil 139’da, bu gruptaki numunelerin kırılma şekilleri verilmiştir.



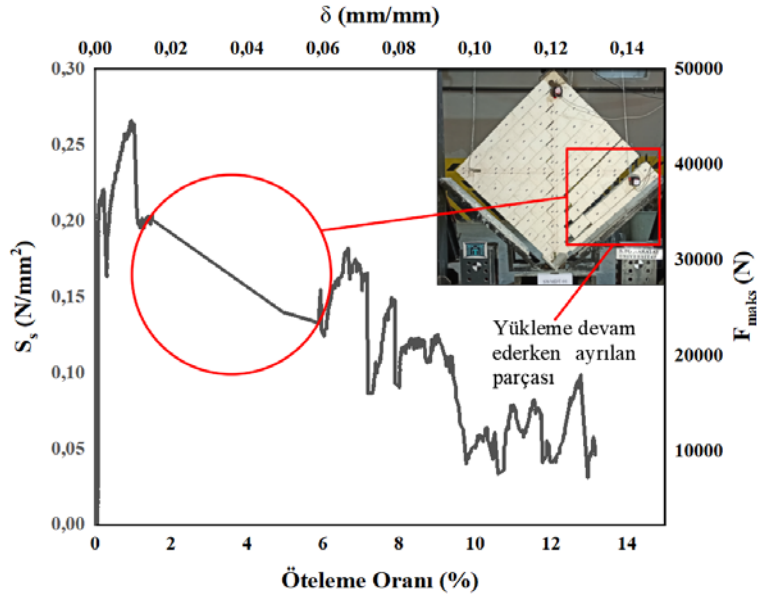
Şekil 139. SWMDT grubuna ait kırılma şekilleri

Deneyin başlangıcından sonuna kadar kaydedilen veriler kullanılarak çizilen gerilme – gerinim grafikleri Şekil 140’ta sunulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde maksimum gerilme aşıldıktan sonra grafiğin belli bir kısmında dayanımların yavaşça düşüşlerine rağmen deplasmanların ani olarak arttığı gözlenmektedir. Bu davranışa neden olan olay ise deney devam ederken duvar numunesinin bir parçasının koparak düşmesidir. Bu olayın detayları Şekil 141’de verilmiştir. Kopan duvar parçaları numunenin sağ tarafında yer almaktadır ve başlangıç noktası, diyagonal kayma düzlemin dışında olup daha sonra aynı düzlemlle birleşmektedir. Bu durumun gerçekleşmesinin iki sebebi vardır. Birincisi diyagonal basınç deneyinde yığma duvarlarda düşey yükü temsil eden normal kuvvet düzeyinin çok düşük olması ve ikincisi ise zıvanalar için hazırlanan deliklerin çapının, zıvana çapından 1 mm büyük olması ve zıvana ile delik arasında herhangi bir bağlayıcı

malzemenin kullanılmamasıdır. Böylece duvarın bir kısmı, belirli sayıdaki zıvanadan çıkarak devrilmektedir.



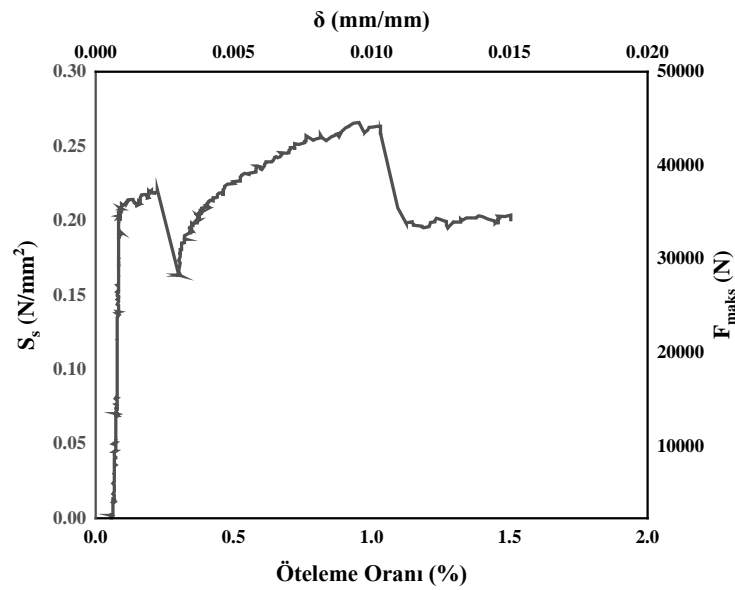
Şekil 140. SWMDT grubuna ait şematik gerilme – gerinim grafiği



Şekil 141. SWMDT grubuna ait şematik gerilme – gerinim grafiği

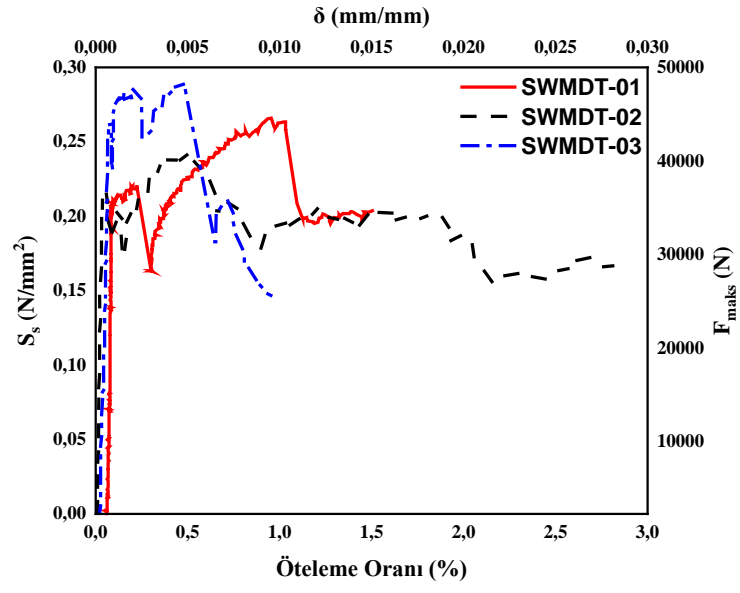
Şekil 141’de görülen davranış, 3. gruptaki tüm numunelerde gözlenmiştir. Grafik incelendiğinde, ilk bakışta, öteleme oranlarının çok büyük olduğu görülmektedir. Aslında bu gerçekçi bir davranış olmayıp tamamen kopan parçanın düşüşüne bağlıdır. Bundan SWMDT grubuna ait deneyler numunelerden parça kopması ile sonlandırılmış ve Şekil 142’de gösterilen gerilme – gerinim grafiği dikkate alınmıştır. Böyle bir kabulün sağlıklı

olabileceği ve duvarların düzlem içi davranışı hakkında herhangi bir negatif etkisinin olmayacağı iki kriter ile ispatlanabilmektedir. Birincisi 3 numunede de bu olay maksimum gerilme aşıldıktan sonra gerçekleşmiştir. Böylece Şekil 141’de verilen grafikteki işaretlenen kısım ve sağ tarafta kalan kısım dikkate alınmadığında duvarların dayanım kapasitelerinde herhangi bir değişimin söz konusu olmayacağı görülmektedir. İkinci kriter ise duvarlar için optimum öteleme oranı (δ_u), maksimum kayma dayanımından sonra, maksimum dayanımın %80’ine karşı geldiği için işaretlenen yerin sol tarafında kalmaktadır. Böylece bu numunelerin *deplasman kapasiteleri ile enerji tüketme kapasiteleri* sağlıklı bir şekilde hesaplanabilmektedir.

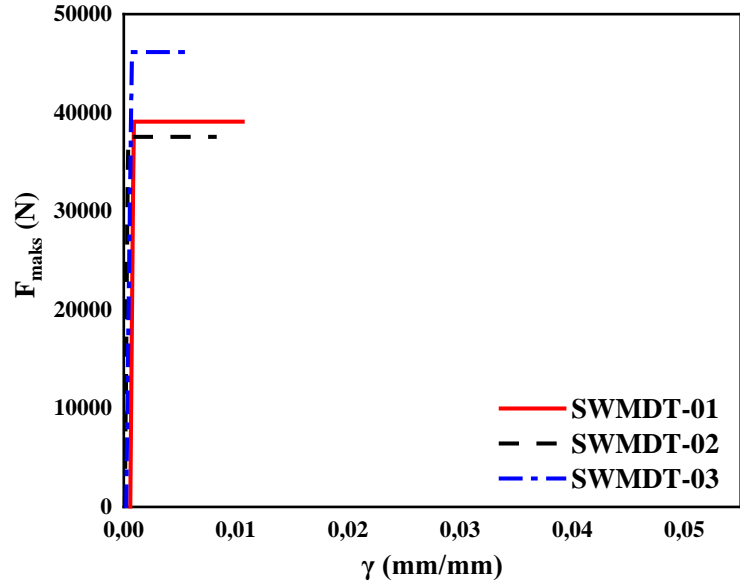


Şekil 142. SWMDT grubuna ait düzeltilmiş gerilme – gerinim grafiği

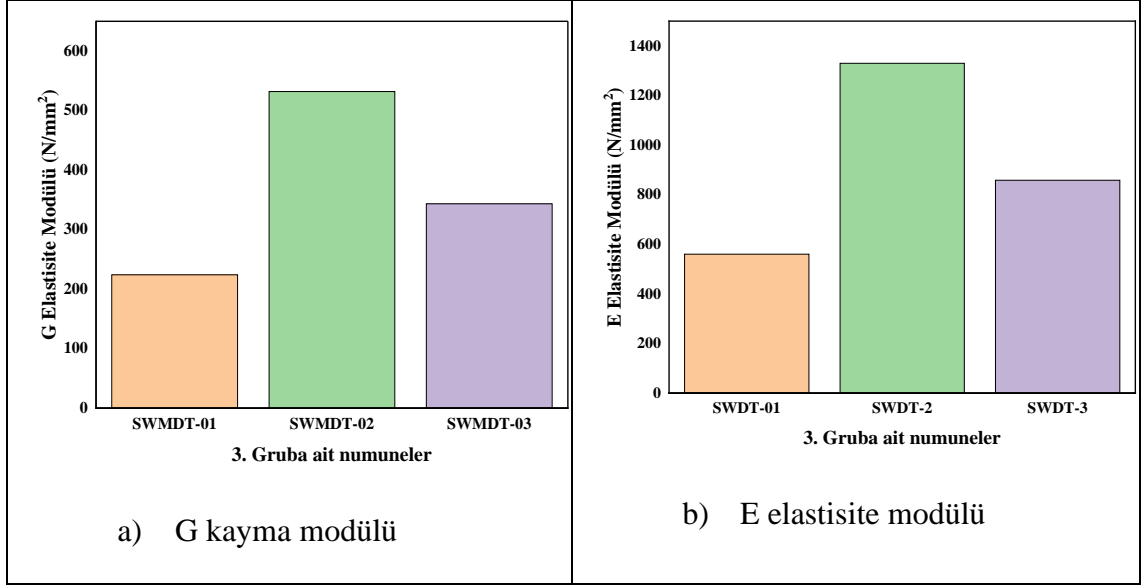
Bu kabul çerçevesinde SWMDT grubuna ait numunelerin düzeltilmiş gerilme – gerinim grafikleri Şekil 143’te ve buna ek olarak bilineer grafikleri de Şekil 144’te verilmiştir. SWMDT grubuna ait Kayma Modülü (**G**) ve Elastisite Modülü (**E**) Şekil 145’te ve düzlem içi tüm parametreler ise Tablo 19’da verilmiştir.



Şekil 143. SWMDT grubuna numunelere ait düzeltilmiş gerilme – gerinim grafikleri



Şekil 144. SWMDT grubuna ait bilineer grafiği



Şekil 145. SWMDT grubuna ait rijitlik ölçütleri

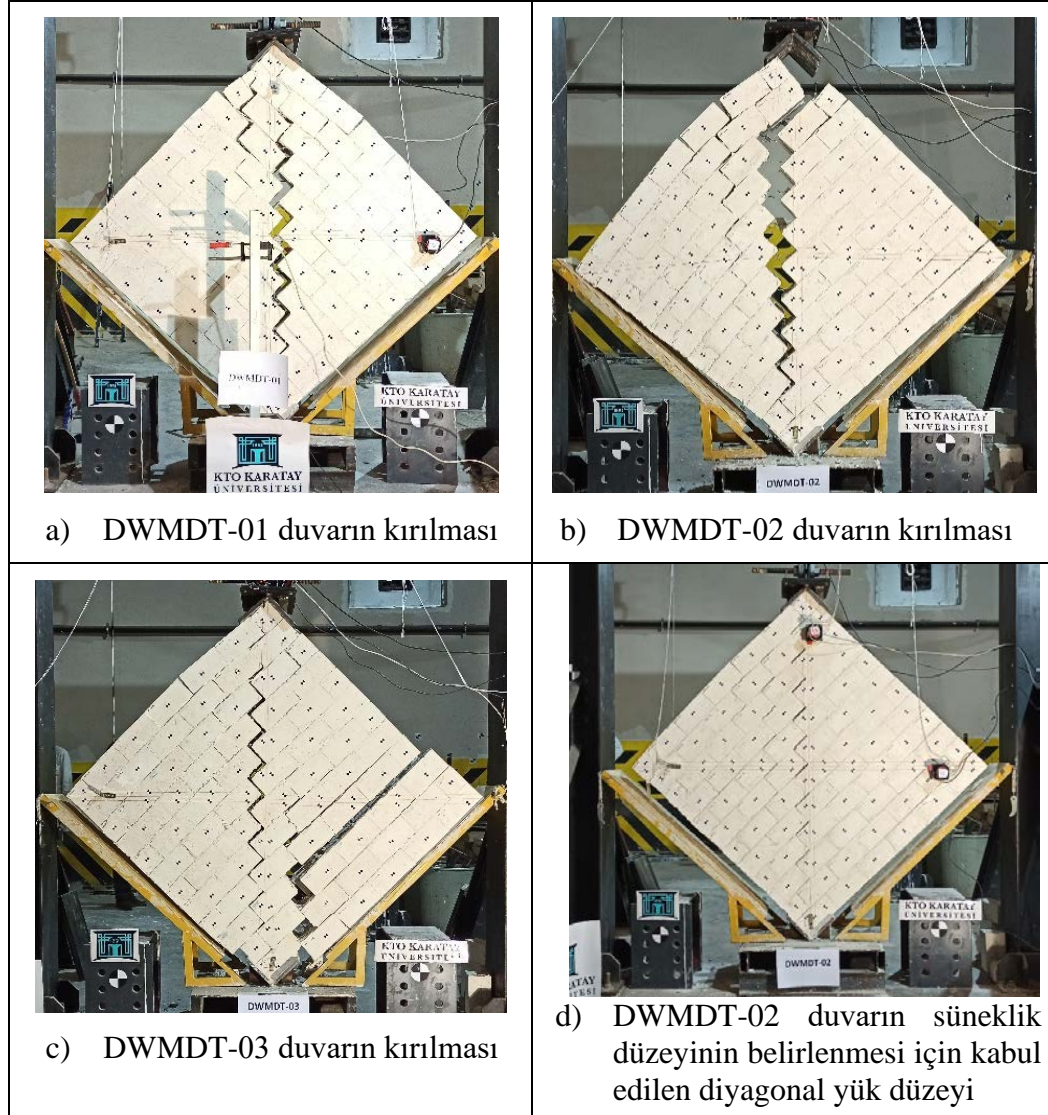
4.4.2.3. İçi boş çok katmanlı (DWMDT) numunelerin diyagonal basınç dayanımı

Bu grup (4. grup), 3 adet içi boş çok katmanlı duvar numuneden oluşmaktadır. Detayları Bölüm 3.2.2.2.'de verilen bu numuneler, aralarında 50 mm boşluk bulunan iki katmandan oluşmakta ve duvarın stabilitesi özellikle bu duvarlar için tasarlanan kenet ve zıvanalarla sağlanmaktadır. 4. gruptaki numunelerin düzlem içi davranışı tezin ana konusunu oluşturmaktadır. Bu sebepten dolayı diyagonal basınç deneyi kapsamında bu numunelerin düzlem içi davranışlarının sunulması ve irdelenmesi büyük öneme sahiptir.

Deney sırasında tek katmanlı duvarların aksine çift katmanlı duvarlarda dört adet potansiyometre cetveli olan ipli ölçer kullanılmıştır. Bunlar, ikişer olarak numunenin her katmanında ASTM E519'a uygun olarak yerleştirilmiş ve alınan veriler her iki katman için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Son olarak katmanlara ait verilerin ortalaması alınarak içi boş çok katmanlı duvar numunelerinin düzlem içi kayma davranışı belirlenmiştir.

Bu gruba ait numunelerdeki çatlaklar incelendiğinde, 3. gruptaki numunelere (tek katmanlı numuneler) benzer olarak ani oluşmayıp yüklemenin artışı ile gelişmiştir. Deney sırasında maksimum dayanım aşıldıktan sonra, yükleme devam ederken, sadece bir numunenin parçası kayma düzlemindeki çatlağın genişlemesinin ardından kopmuş, diğer iki numunede ise herhangi bir parça kopuşu söz konusu olmamıştır. Numunelerin üçünde de çatlaklar kayma düzleminde oluşmuş ve bir miktar genişledikten sonra duvarın sol kısmı kayarak deney son bulmuştur. Duvar numunelerindeki kırılmalar derzlerde

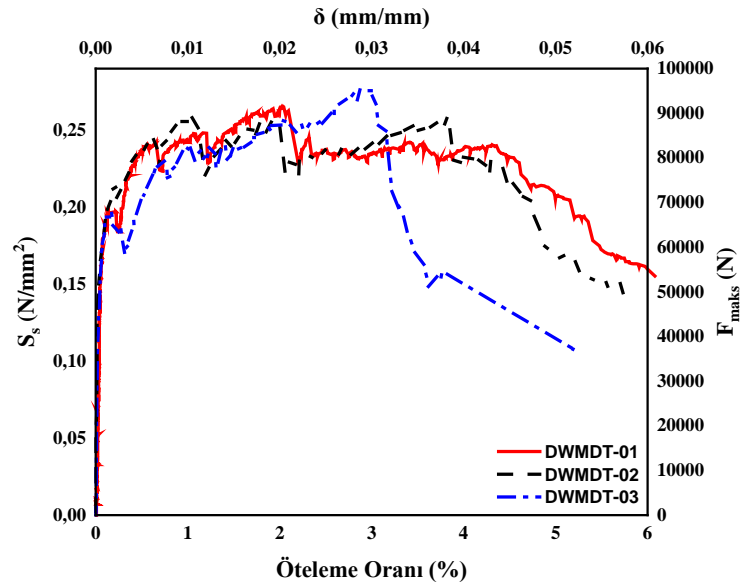
gerçekleşmiş ve bireysel elemanlarda kırılma veya kesilme görülmemiştir. Numunelerin kırılma şekilleri Şekil 146’da verilmiştir.



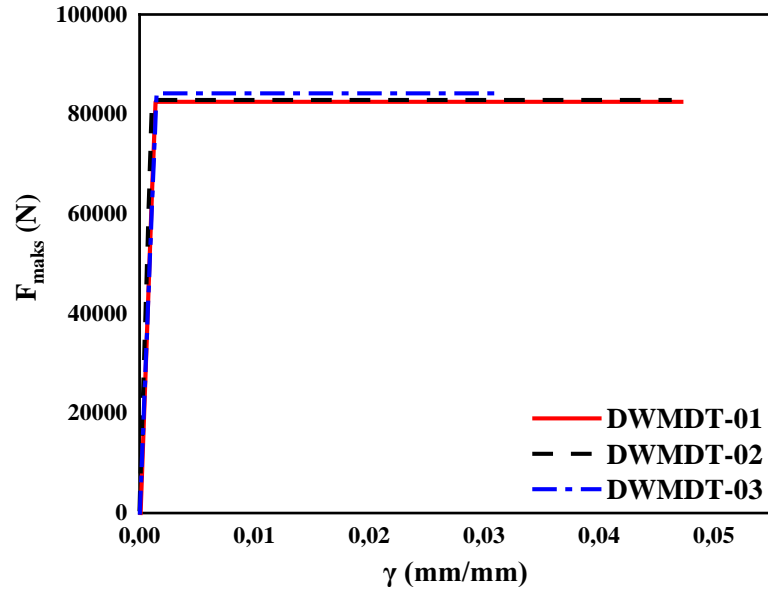
Şekil 146. DWMDT grubuna ait kırılma türleri

İçi boş çok katmanlı duvarların düzlem içi kayma dayanımlarının ortalamasının (S_{smaks}) $0,267 \text{ N/mm}^2$ civarında olduğu görülmüştür. Bu değer, içi boş çok katmanlı duvarların maksimum kapasitesini tam olarak temsil etmemektedir. Bunun sebebi ise diyagonal basınç deney düzeneğinde düşey yükleri temsil eden normal yük düzeyinin çok düşük olması ile numunenin ikiye ayrılması ve metal bağlantı elemanları (kenet ve zıvanaların) devreye girmeden önce zıvanaların deliklerden çıkmasıyla deneyin son buluşudur. Bu durum içi boş çok katmanlı duvarların süneklik düzeyi hakkında görüş belirtmeyi oldukça zorlaştırmıştır. Eğer bu numunelere ait süneklik yukarıda belirtildiği gibi idealize edilmiş

biliner grafiğindeki nihai öteleme oranının ($0.8F_{maks}$ 'e karşı gelen öteleme oranı) akma oranına, oranlanarak hesaplanırsa duvarın süneklik düzeyi çok yüksek çıkmakta ve kabul edilmesi mümkün olmamaktadır. Buna karşın deney sırasında duvar numunelerde kayma düzleminde çatlakların oluştuğu ve genişlediği ancak yük taşımaya devam ettiği görülmüştür. Böylece Tablo 19'de bu duvarlarla ilgili iki süneklik düzeyi hesaplanmıştır. Parantez dışında olan sayı idealize edilmiş biliner grafiğindeki nihai ve akma öteleme oranlarının, oranıdır. Parantez içindeki sayı ise deney sırasında çatlakların meydana geldiği diyagonal yüke (Şekil 146.d) karşı gelen öteleme oranının akma öteleme oranına olan oranıdır. Bu gruba ait gerilme – gerinim grafiği Şekil 147'de ve biliner yaklaşımı ile idealize edilmiş grafiği de Şekil 148'de verilmiştir.

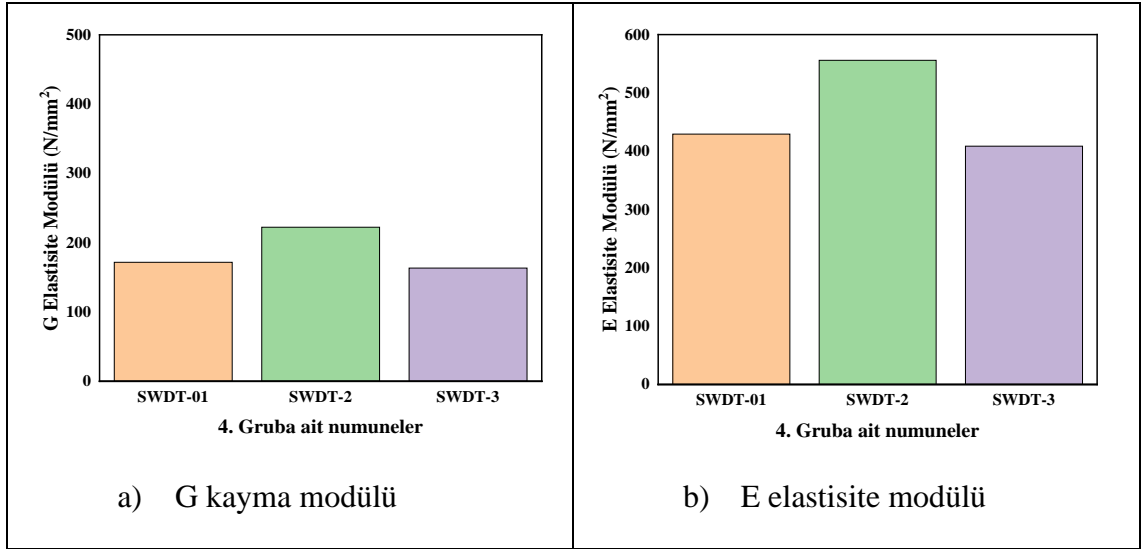


Şekil 147. 4. gruptaki numunelere ait düzeltilmiş gerilme – gerinim grafikleri



Şekil 148. 4. gruba ait bilineer grafiği

İçi boş çok katmanlı duvar numunelerinin Kayma Modülü (**G**) ile Elastisite Modülü (**E**) Şekil 148’de verilen bilineer grafiğinden hesaplanmış ve Şekil 149’te gösterilmiştir.



Şekil 149. 4. gruba ait rijitlik ölçütleri

Tablo 19. Diyagonal basınç deney sonuçları

No	Numune adı	F_{maks} (N)	Ort. F_{mkas} (N/mm ²)	S_{smaks} (N/mm ²)	Ort. S_{smaks} (N/mm ²)	S_{scr} (N/mm ²)	F_{cr} (N)	d_{cr}	F_u (N)	d_y	$0,8F_{maks}$ (N)	d_u	μ	Ort. μ	G (N/mm ²)	Ort. G (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Ort. E (N/mm ²)	E_d (J)	Ort. E_d (J)
1	SWLDT-01	47953		0,28		0,1978	33567	0,00177	-	0,00190	38362	0,00190	1		112		279		31	
2	SWLDT-02	46449	48955	0,27	0,29	0,1877	32514	0,00174	-	0,00188	37159	0,00188	1	1	108	118	269	294	32	30
3	SWLDT-03	52463		0,31		0,2164	36724	0,00162	-	0,00090	41971	0,00090	1		134		335		27	
4	SWHDT-01	46043		0,26		0,1813	32230	0,00130	41669	0,00168	36834	0,00591	4		140		349		211	
5	SWHDT-02	41247	39514	0,24	0,23	0,1679	28873	0,00069	34060	0,00082	32998	0,00270	3	4	242	157	604	393	78	172
6	SWHDT-03	31251		0,18		0,1271	21875	0,00140	27123	0,00174	25000	0,00924	5		91		227		227	
7	SWMDT-01	46165		0,27		0,1861	32316	0,00083	39087	0,00100	36932	0,01060	11		224		560		406	
8	SWMDT-02	41898	45975	0,24	0,27	0,1690	29328	0,00032	37552	0,00041	33518	0,00811	20	13	532	366	1330	916	297	316
9	SWMDT-03	49863		0,29		0,2024	34904	0,00059	46157	0,00078	39890	0,00571	7		343		858		246	
10	DWMDT-01	91760		0,27		0,1858	64232	0,00108	82479	0,00139	73408	0,04715	34(14)		172		429		3832	
11	DWMDT-02	89850	92709	0,26	0,27	0,1815	62895	0,00082	82858	0,00108	71880	0,04615	43(18)	33(15)	222	186	556	465	3779	3408
12	DWMDT-03	96515		0,28		0,1936	67560	0,00118	84170	0,00148	77212	0,03180	22(14)		163		409		2614	

5. TAŞ DUVARLARIN NÜMERİK OLARAK MODELLENMESİ

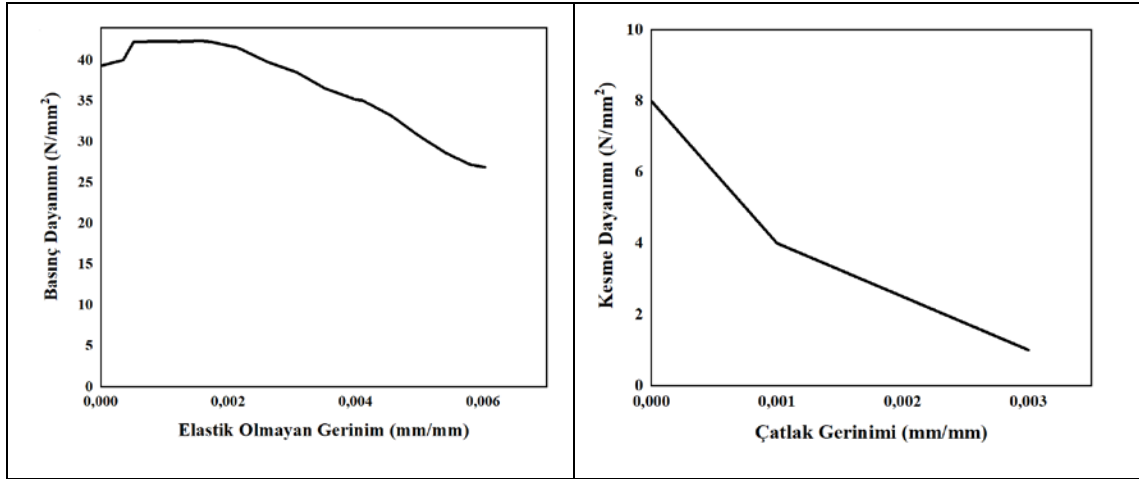
Nümerik çalışmalar kapsamında sadece harçla örülen ve metal bağlantı elemanları içermeyen numunelerin başlangıç kayma dayanımı ile basınç dayanımı ele alınmıştır. Metal bağlantı elemanlarının modellenmesinde ve nümerik analizlerinde kapsamlı bir çalışmaya ihtiyaç duyulduğundan, tez kapsamında değerlendirilmemiştir. Bu kapsamda mikro boyutlu numunelerden SWLIS ve SWLC numuneleri, Abaqus paket programında modellenmiş ve nümerik analizleri yapılmıştır. Analizlerde numunelerin başlangıç kayma dayanımı ile basınç dayanımı, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

5.1. Başlangıç Kayma Deneyinin Nümerik Modellenmesi

SWLIS numunesine ait başlangıç kayma dayanımının belirlenebilmesi için Bölüm 3.2.1.2.'de detayları verilen başlangıç kayma deney düzeneği, Abaqus paket programı kullanılarak modellenmiş ve analizleri yapılmıştır. Modelde, basitleştirilmiş mikro-modelleme yaklaşımı kullanılmış ve aşamaları detaylı olarak sırasıyla verilmiştir.

- 1. aşamada duvar numunelerde kullanılan bireysel elemanların tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda iki adet bireysel eleman, 100 x 100 x 100 ve 100 x 200 x 100 mm ebatlarında ve C3D8R eleman tipi olarak tanımlanmıştır. Abaqus paket programında hazır bulunan bu eleman tipi, sürekli (continuum), üç boyutlu (3D), 8 düğüme sahip ve azaltılmış entegrasyon noktaları içeren bir elemandır.
- 2. aşamada taşın mekanik özellikleri tanımlanmıştır. Bunun için önce taşın elastik davranışı daha sonra plastik davranışı deneysel ve literatürdeki veriler kullanılarak belirlenmiştir. Taşın elastik davranışı, deneysel çalışmalardan elde edilen elastisite modülü ile poisson oranının girilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Plastik davranışı ise CDP (Concrete Damaged Plasticity) modeli ile tanımlanmıştır. Şekil 150 ve Tablo 20'de nümerik çalışmalarda kullanılan malzeme özellikleri detaylı olarak verilmiştir.
- 3. aşamada, başlangıç kayma deney düzeneğinde kullanılan numune, 1. aşamada üretilen bireysel elemanların birleşiminden oluşturulmuştur (Şekil 151.a).

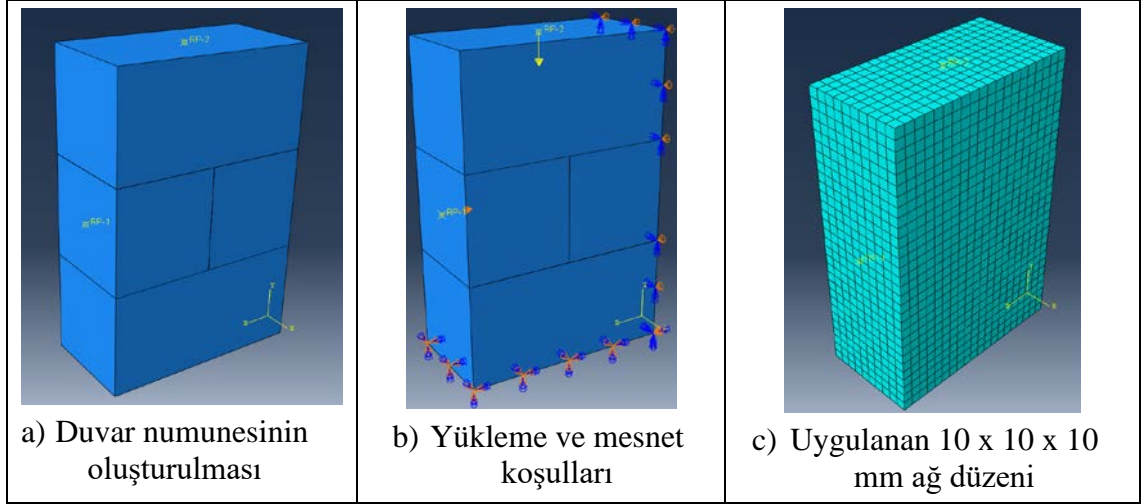
- 4. aşamada nümerik analizlerin gerçekleştirilebilmesi için, eylemleri modele yük veya deplasman kontrolü olarak dayatan adımlar tanımlanmıştır. Her iki durumda da eylemler aşamalı olarak empoze edilmiştir. Modelde büyük deplasmanlar ve geometrinin doğrusal olmayan etkileri de dikkate alınarak, her artımda dengeyi yeniden hesaplayan Newton-Raphson algoritmasını takip eden doğrusal olmayan genel statik (general non-linear static) prosedürü benimsenmiştir. Buna ek olarak derzlerdeki rijitliğin azalmasından kaynaklanan nümerik istikrarsızlıkları yok etmek için, duvar derzlerindeki kırılmayı tam olarak simüle eden hasar dengeleyici parametresi kullanılmıştır. Bu parametre, viskoz düzenlilik olarak bilinmektedir ve 0,002 olarak alınmıştır (Abdulla ve ark., 2017).



Şekil 150. Nümerik analizlerde kullanılan taşın basınç ve kesme davranışı

Tablo 20. Nümerik modelde taşın elastik ve plastik davranışı

Elastik davranış	Elastisite Modülü (MPa)	15400
	Poisson Oranı	0,2
Plastik davranış	Genişleme açısı (Dilation angle)	35°
	Eksantriklik (Eccentricity)	0,1
	f_{bo}/f_{co}	1,16
	K	0,67
	Viskozite parametresi (viscosity parameter)	0,002

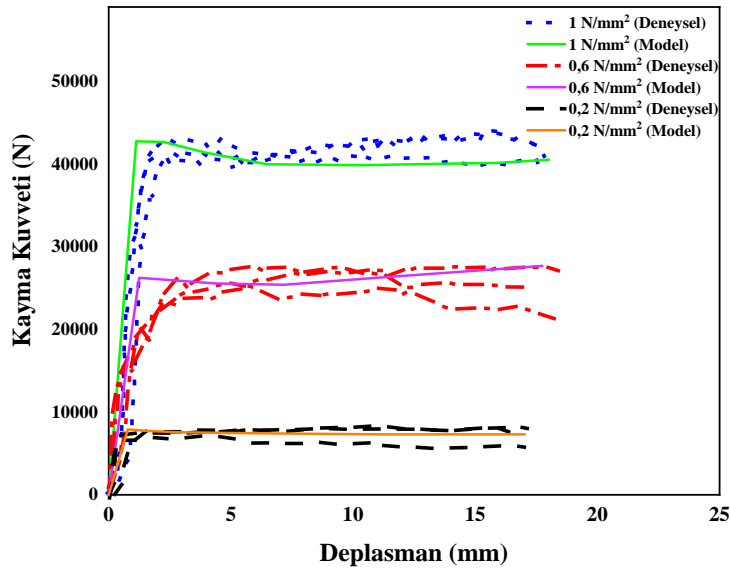


Şekil 151. Başlangıç kayma modelin oluşumu, mesnet, yük koşulları ve ağ düzeni

- 5. aşamada bireysel taş bloklar arasında kullanılan harç için yüzey bazlı kohezif arayüzü tanımlanmıştır. Bu arayüzün tanımında dört parametre kullanılmıştır. Birincisi; teğetsel davranış (tangential behavior) parametresi olup bu parametrede sürtünme formülasyonu (friction formulation) penaltı (penalty) olarak seçilmiş ve sürtünme katsayısı deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak 0,65 olarak belirlenmiştir. İkincisi; normal davranış parametresidir. Normal davranışta, sert temas davranışı, yani duvar birimlerinin bitişik yüzeyleri arasında teması, basıncı-aşırı kapama (pressure-overclosure) ilişkisi ile tanımlanmıştır. Bunun sebebi duvardaki bireysel taş birimlerinin birbirleriyle teması sırasında, karşılıklı basınç uygulamalarıdır Ek olarak sert temas seçildiğinde bireysel birimlerin birbirine penetrasyonu ve çekme gerilmelerinin transferleri de engellenmiş olmaktadır. Üçüncü parametre kohezif davranıştır. Bu parametre kapsamında K_{nn} , K_{ss} ve K_{tt} tanımlanmıştır. Dördüncü ve son parametre ise çatlakın başlangıcı ve gelişimi tanımlanmıştır (damage). Çatlakın başlangıcı deneysel verilerden elde edilen duvar numunesinin kayma dayanımıyla ve çatlakın gelişimi ise kırılma enerjisiyle tanımlanmıştır.
- 6. aşamada, modellenen başlangıç kayma numunesindeki mesnet koşulları, deneysel çalışmalara benzer şekilde tanımlanmıştır. Bu kapsamda ilk önce numunesinin tabanı ankastre olarak bağlanmıştır. İkinci olarak Şekil 151.a'da gösterilen numunesinin ilk ve üçüncü sırasının x düzlemindeki hareketi kısıtlanmış ve TS EN 1052-3 (2002) standardına uygun olarak 0,2, 0,6 ve 1 MPa

düşey gerilmeye tekabül eden 4000, 12000 ve 20000 N yük uygulanmıştır. Son aşamada, yatay kuvveti elde etmek için orta sıraya, x düzlemi doğrultusunda 15 mm deplasman uygulanmıştır (Şekil 151.b).

- 7. Aşamada, tasarlanan numuneye uygun sonlu elemanlar bölünmüştür. Bu amaçla bireysel elemanlar, 10 x 10 x 10 mm ölçülerinde bölünmüştür (Şekil 151.c).
- 8. aşamada ise nümerik modelin analizi yapılmış ve sonuçları deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır (Şekil 152).



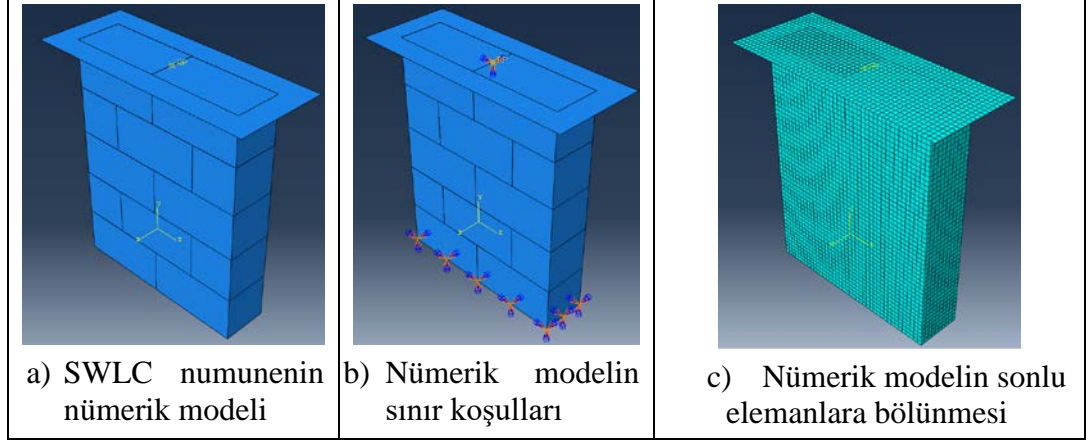
Şekil 152. Başlangıç kayma deneyi ile nümerik analizin kıyaslanması

5.2. Tek Eksenli Basınç Deneyinin Nümerik Modellenmesi

Tek eksenli basınç deneyin nümerik modellenmesi kapsamında SWLC numunesi modellenmiş ve nümerik analizleri yapılmıştır. Bu numunenin nümerik modellenmesinde, başlangıç kayma deneyin modelinde olduğu gibi basitleştirilmiş mikro-modelleme yaklaşımı kullanılmış ve her iki nümerik modelin modelleme aşamaları birbirine benzediği için, bu bölümde ortak işlemler dışında yapılan işlemler açıklanmıştır.

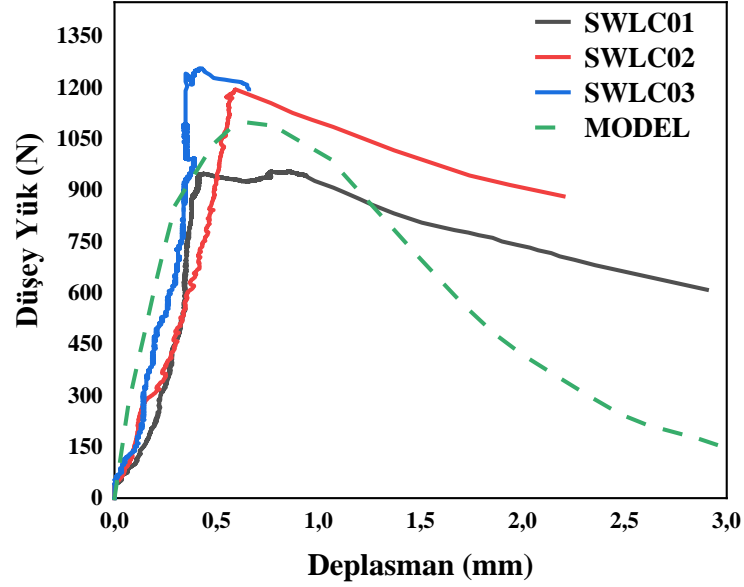
SWLC numunesi Şekil 153.a'de gösterildiği gibi her sırada iki bireysel eleman olmak üzere toplamda beş sıradan oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan modele ait basınç kuvvet – deplasman eğrisinin elde edilebilmesi için modelin üst kısmında rijit bir eleman tanımlanmış ve bu elemana 3 mm düşey deplasman uygulanmıştır. Numuneye ait sınır

koşulları Şekil 153.b’de gösterilmiştir. Sınır koşulu olarak numunenin tabanı ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Model, 10 x 10 x 10 mm boyutundaki sonlu elemanlara bölünerek nümerik analizleri yapılmıştır (Şekil 153.c).



Şekil 153. Tek eksenli basınç modelin oluşumu, mesnet, yük koşulları ve ağ düzeni

Nümerik analiz sonucunda elde edilen düşey yük – deplasman eğrisi, deneysel çalışmalarda elde edilen eğrilerle karşılaştırılmıştır (Şekil 154).



Şekil 154. Basınç deneyi ile nümerik analizin kıyaslanması

6. SONUÇLARIN İRDELENMESİ

Yığma yapılar günümüzdeki yapı stokunun büyük bir kısmını oluştursa da artık yapı teknolojilerinin gelişimi ile bu yapıların inşası gün gittikçe azalmaktadır. Bunun bir çok sebebi vardır. En önemli sebeplerden bazıları sayılacak olursa; yığma yapıların inşasında kullanılan malzemelerin homojen olmaması, bu malzemeler birlikte kullanıldıklarında nasıl bir davranış sergilediklerinin tam olarak kestirilememesi ve bölgesel yönetmeliklerin güvenilir binaların yapımı için getirdiği katı kurallar ile yığma yapıların günümüzdeki lüks ve konfor ihtiyaçlarını karşılayamaması sayılabilir. Ancak Türkiye gibi tarih boyunca farklı medeniyetlere ev sahipliği yapan ve bu medeniyetlerin kültürel zenginliklerini temsil eden tarihi binalar bakımından zengin olan bir ülkede, kültürel zenginlikleri temsil edecek yığma yapıların yapılmaması ve günümüzdeki yapı teknolojisinin gelişmesine rağmen mühendislik hizmetlerinden yoksun ve çok sıradan yığma yapıların yapılması, bu konuya yeterince önem verilmediği anlamına gelmektedir.

Tez kapsamında ekolojik mimari ile anıtsal kimliğe sahip, günümüzdeki modern, lüks ve konforlu binalarda taşıyıcı duvar olarak kullanılacak, yeni tip metal bağlantı elemanların uygulanmasıyla güçlendirilmiş içi boş çok katmanlı doğal taş duvarlar tasarlanmış ve düzlem içi davranışı deneysel ve nümerik olmak üzere kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu kapsamda ilk aşamada duvar numunelerinde kullanılan bireysel elemanların mekanik özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların düzlem iç davranışı önce mikro boyutlu sonra makro boyutlu numuneler kullanılarak deneylerle belirlenmiştir. Üçüncü aşamada Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak, mikro boyutlu numuneler, basitleştirilmiş mikro-modelleme yaklaşımı ile modellenmiştir. Nümerik analizler kapsamında kireç harçlı (metal bağlantı elemanlar içermeyen) numuneler değerlendirilmiştir. Bu bölümde yapılan deneysel ve nümerik çalışmaların sonuçları ilgili başlıklar altında değerlendirilmiştir.

6.1. Bireysel Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarlarda doğal taş olarak Mayra bej, harç olarak kireç ve horasan harcı ve metal bağlantı elemanı olarak kenet ve zıvana kullanılmıştır. Taşların deneysel olarak belirlenen mekanik özellikleri ile ilgili aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin basınç dayanımları arasındaki fark büyük olup en düşük basınç dayanımı 31,05 MPa ve en yüksek basınç dayanımı ise 70,88 MPa seviyesinde bulunmuştur. Taşın ortalama basınç dayanımı 30 adet numunenin ortalamamasına ait olup 50,14 MPa olarak hesaplanmıştır Verilere ait standart sapma ile değişim katsayısı sırasıyla 8,66 ve 0,17 şeklinde bulunmuştur.
- Taşın ortalama Elastisite modülü 15400 MPa, standart sapması 8,16 ve değişim katsayısı ise 0,53 civarında hesaplanmıştır. En küçük elastisite modülü 6540 ve en büyüğü 30020 MPa olduğu bulunmuştur.
- Taşın kesme dayanımı üç noktalı eğilme deneyi ve yarmada çekme deneyi olmak üzere iki yöntemle belirlenmiştir. Üç noktalı eğilme deney sonucunda taşın ortalama kesme dayanımı 10,2 MPa, standart sapması 1,33 ve değişim katsayısı ise 0,13 olarak belirlenmiştir. Yarmada çekme deney sonucunda ise ortalama kesme dayanımı 3,91 MPa, standart sapma 0,2 ve değişim katsayısı 0,05 olarak bulunmuştur. Üç noktalı eğilme deney sonucunda en büyük kesme dayanımı 12,5 MPa ve en küçük kesme dayanımı 8,1 MPa civarındayken bu değerler yarmada çekme deneyinde, 4,12 MPa ve 3,61 MPa seviyesinde belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalarda üretilen duvar numunelerde harç olarak, geleneksel harçlardan kireç ve horasan harcı tercih edilmiştir. Kireç harcında maksimum basınç dayanımı 3,35 MPa ve maksimum eğilme dayanımı 1,25 MPa civarında belirlenmişken horasan harcında, bu değerler sırasıyla 2,30 MPa ve 0 olarak belirlenmiştir. Horasan harcına ait eğilme dayanımının 0 çıkmasının sebebi ise numunelerin kür sürecinde kireç harcına ait numunelere nazaran daha fazla su kaybına uğraması ve kılcal çatlakların oluşmasından kaynaklandığı gözlemlenmiştir.

Tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarlarda kullanılan bir başka bireysel eleman ise metal bağlantı elemanlarıdır. Kenet olarak S235JR çeliği kullanılmış ve mekanik özellikleri çekme deneyi ile belirlenmiştir. Bu kapsamda çeliğin ortalama akma dayanımı 227.60 MPa, elastisite modülü 113828 MPa ve ortalama maksimum çekme dayanımı ise 330.82 MPa olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan zıvanaların çapı küçük olduğundan dolayı hasır çeliği kullanılmış ve mekanik özellikleri, çekme deneyi ile belirlenmiştir. Zıvana olarak kullanılan çeliğin akma dayanımı belirgin olmadığından

dolayı 0,002 birim şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilme, 0,002'ye bölünerek hesaplanmıştır. Böylelikle ortalama akma dayanımı 61,22 MPa, ortalama elastisite modülü 30572 MPa ve ortalama maksimum çekme dayanımı ise 602 MPa şeklinde bulunmuştur.

6.2. Metal Bağlantı Elemanların Parametrik Tasarımı

Kullanılan kenet ve zıvanaların tasarım parametreleri belirlenirken yapılan deneysel çalışmaların yanı sıra mevcut akademik çalışmalardan da faydalanmıştır. Bu bağlamda kenetlerin genişliği ve zıvanaların yüksekliği akademik çalışmalardan faydalanarak belirlenmiştir. Kenetlerin kalınlığı ise, duvarlarda kullanılan derz kalınlığı kadar ve zıvanaların optimum çapı ise başlangıç kayma deneyi ile belirlenmiştir. Yapılan ön çalışma ile zıvanalar için 4 mm çapı belirlenmiş ve deneysel çalışmalarda optimum zıvana olarak kullanılmıştır.

6.3. Duvarların Mekanik Özellikleri

Tezin temel amacı, tez kapsamında tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların düzlem içi davranışının deneysel olarak belirlenmesidir. Bu bağlamda tasarlanan duvarların düzlem içi davranışı mikro ve makro boyutlu numuneler kullanılarak kapsamlı olarak araştırılmıştır.

6.3.1. Mikro Boyutlu Duvar Numunelerin Düzlem İçi Davranışı

Deneysel çalışmalar kapsamında mikro boyutlu numuneler kullanılarak tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların tek eksenli basınç dayanımı ile başlangıç kayma dayanımı belirlenmiştir.

Mikro boyutlu numunelerin *basınç deneyi* için, tek ve çift katman olmak üzere toplamda 21 adet numune üretilmiştir. Bu numunelere ait deneysel sonuçlar detaylı olarak Bölüm 4.3.1'de verilmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde;

- Tek katmanlı ve sadece taşların üst üstte konulmasından oluşan numunelerin ortalama düşey kırılma yükü 768,31 kN, ortalama basınç dayanımı 19,02 MPa ve ortalama elastisite modülü 7368,92 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler kireç harcı ile örülen duvarlarda sırasıyla 1135,21 kN, 28,19 MPa ve 7489,67

MPa iken horasan harcı ile örülen duvarlarda 812,70 kN, 20,30 MPa ve 5327,31 MPa seviyesinde belirlenmiştir. Böylece üretiminde 2 mm kalınlığında harç kullanılan duvarların basınç dayanımları harçsız duvar numunelerden daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Basınç dayanımındaki bu fark, kireç harçlı duvarlarda %48 civarındayken horasan harçlı duvarlarda %7 civarında tespit edilmiştir. Numunelerin elastisite modülü incelendiğinde, kireç harçlı numunelerin elastisite modülü, sadece taştan oluşan numunelerin elastisite modülüyle hemen hemen aynı seviyelerdeyken horasan harçlı numunelerin elastisite modülünün %28 daha az olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise horasan harcının mekanik davranışının, kireç harca nazaran daha düşük olmasındandır.

- Üretiminde harç ve metal bağlantı elemanları kullanılmış tek katmanlı duvar numuneleri incelendiğinde, kireç harcı ile örülen duvarlara ait ortalama kırılma yükü 942,58 kN, ortalama basınç dayanımı 23,47 MPa ve ortalama elastisite modülü 5558,07 MPa seviyesindeyken horasan harcı ile örülen duvar numunelerde, bu değerler sırasıyla 774,69 kN, 19,14 MPa ve 3791,34 MPa olarak belirlenmiştir. Her iki harçla örülen duvar numunelerinde bağlantı elemanları aynı iken kullanılan harcın mekanik özelliklerinden dolayı nihai dayanımda farklılıklar gözlenmiştir. Bu fark kireç harçlı numunelerin üstünlüğü ile, ortalama kırılma yükü ve basınç dayanımında %22, elastisite modülünde ise %47 civarında olduğu gözlenmiştir.

Tek katmanlı duvar numunelerde metal bağlantı elemanlarının etkisi incelendiğinde, ortalama basınç dayanımı ve elastisite modülünde düşüşlerin olduğu görülmüştür. Kireç harcıyla örülen duvarlarda, ortalama basınç dayanımındaki düşüş %20 civarındayken elastisite modülündeki düşüşün %35 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın horasan harcıyla örülen duvarlardaki düşüşler sırasıyla %5 ve %41 civarında olmuştur

- Tez kapsamında tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarlar incelendiğinde, tek katmanlı metal bağlantı elemanlı numunelerden pek farklı olmadığı görülmüştür. Kireç harçlı numunelerde basınç dayanımı 23,24 MPa iken, kırılma yükü tek katmanlı numunelerin iki katı olarak, 1878,03 kN

seviyesinde tespit edilmiştir. Çok katmanlı duvarların elastisite modülü de aynı şekilde 5394,45 MPa civarında olmuştur Horasan harçlı numunelerde basınç dayanımı 19,80 MPa iken elastisite modülü 4753,47 MPa seviyesinde tespit edilmiştir.

Tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların düzlem içi **başlangıç kayma dayanımı**, deneysel olarak araştırılmıştır. Gruplara ait deneysel sonuçlara lineer regresyon analizi uygulanmış ve o gruba ait duvarın karakteristik kayma gerilmesi elde edilmiştir. Aşağıda her duvar tipine ait karakteristik kayma gerilmesi (f_{vok}), karakteristik iç sürtünme açısı ($\tan \alpha_k$) ve yatay kuvvet kapasitesi (f_{maks}) değerlendirilerek farklı tip duvarlarla karşılaştırılmıştır.

- SWIS grubundaki numunelere ait karakteristik başlangıç kayma dayanımı 0,032 MPa, karakteristik iç sürtünme açısı 0,62 ve karakteristik kayma dayanımını oluşturan yatay yük ise 632 N olarak belirlenmiştir. Bu değerler kireç harcı ile örülen (SWLIS) numunelerde sırasıyla 0,018 MPa, 0,62 ve 703 N iken horasan harcı ile örülen duvar numunelerinde (SWHIS) 0,048 MPa, 0,35 ve 1869 N değerlerini almıştır. Sonuçlara bakıldığında üç farklı duvar tipine ait karakteristik başlangıç kayma dayanımları arasında ciddi fark olmasına rağmen, duvarların kayma dayanımları çok düşük seviyelerdedir. Böylece duvarlarda 2 mm kalınlığında kullanılan ince harcın, duvarın kayma gerilmesinde neredeyse hiç bir katkısı olmadığı görülmüştür
- Tek katmanlı ve kireç harcın yanı sıra metal bağlantı elemanların (kenet ve zıvana) kullanıldığı numuneler incelendiğinde; karakteristik başlangıç kayma dayanımı 0,35 MPa, karakteristik iç sürtünme açısı 0,38 ve maksimum yatay yük 13321 N olarak belirlenmiştir. Bu değerler horasan harcı ile üretilen numunelerde sırasıyla 0,38 MPa, 0,30 ve 14054 N olmuştur. Sonuçlara bakıldığında metal bağlantı elemanların yatay kayma gerilmesindeki katkısının çok büyük olduğu görülmektedir. Bu katkı kireç harcı ile örülen numunelerden yaklaşık 19 kat daha fazla iken horasan harcında 8 kat olduğu görülmüştür.
- Tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarların başlangıç kayma dayanımı incelendiğinde; kireç harçlı numunelere ait karakteristik başlangıç kayma dayanımının 0,35 MPa, karakteristik iç sürtünme açısının 0,38 ve maksimum

yatay yükün 26101 N seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Horasan harcında ise bu değerler sırasıyla 0,38 MPa, 0,33 ve 28896 N seviyesinde bulunmuştur. Böylece içi boş çok katmanlı duvarların karakteristik başlangıç kayma dayanımı tek katmanlı metal bağlantı elemanları içeren numunelerle aynı olup yatay yük kapasitesinin %100 artığı görülmüştür

Deneysel çalışmalar ardından bireysel elemanların mekanik özellikleri ve mikro boyutlu duvar numunelerin basınç ve başlangıç kayma dayanımları, TBDY (2018) yönetmeliği ile karşılaştırıldığında;

- TBDY (2018) yönetmeliğin 11.2.6. maddesine göre duvarlarda kullanılması gereken harcın dayanımı 5 MPa'dan az olmamalıdır. Tasarlanan içi boş çok katmanlı duvarlarda ise geleneksel harçlardan kireç ve horasan harçları kullanılmış ve bu iki harca ait maksimum basınç dayanımı 3,35 MPa tespit edilmiştir.
- TBDY (2018) yönetmeliğinin Tablo 11.2'de bireysel elemanların basınç dayanımı bilinmesi durumunda, yığma duvarın karakteristik basınç dayanımı tahmin edilebilmektedir. Bu bağlamda içi boş çok katmanlı duvarlarda kullanılan taşın ortalama basınç dayanımı 50,14 MPa ve harcın dayanımı ise 3,35 MPa olduğuna göre Tablo 11.2 kullanılarak duvarın basınç dayanımı yaklaşık 9 MPa olarak tahmin edilmektedir. Deneysel çalışmalardan elde edilen verilere göre içi boş çok katmanlı duvarların basınç dayanımı kireç harcı kullanıldığında 23,24 MPa, horasan harcı kullanıldığında 19,80 MPa olarak tespit edilmiştir.
- Yığma duvarların karakteristik başlangıç kayma dayanımı, TBDY (2018) yönetmeliğine göre deneysel veya Tablo 11.3 kullanılarak belirlenmektedir. Tablo 11.3'te yığma duvarlarda doğal veya yapay taş kullanıldığında ince harç (0,5 mm – 3 mm) kullanılamaz ibaresi yer almaktadır. Tez kapsamında içi boş çok katmanlı doğal taş duvarlarda 2 mm kalınlığında harç kullanılmıştır. Buna rağmen tasarlanan duvarlar kireç harcı ile örüldüğünde, karakteristik başlangıç kayma dayanımı 0,35 MPa, horasan harcı ile örüldüğünde bu değer 0,38 MPa olarak tespit edilmiştir.

6.3.2. Makro boyutlu duvar numunelerin düzlem içi davranışı

Deneysel çalışmalar kapsamında tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların düzlem içi davranışı makro boyutlu numuneler kullanılarak araştırılmıştır. Bu kapsamda duvarların **basınç dayanımı**, tek eksenli basınç deneyiyle ve **kayma dayanımı** ise diyagonal basınç deneyiyle belirlenmiştir.

Basınç deneyi kapsamında, tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarlarda ince harcın, metal bağlantı elemanlarının ve h_{ef}/t_{ef} oranının etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda 4 adet makro boyutlu numune hazırlanmış ve tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde;

- MSWC kodlu numune taşların üst üste konulmasından meydana gelmektedir. Bu numunede harç ve bağlantı elemanları kullanılmamıştır. Numunenin basınç dayanımı 7,20 MPa, elastisite modülü ise 4030 MPa olarak belirlenmiştir.
- MSWLC adlı numunenin üretiminde bireysel taşların birbirine bağlamak için kireç harcı kullanılmıştır. Bu numune metal bağlantı elemanları (kenet ve zıvana) içermemektedir. Numunenin basınç dayanımı 10,46 MPa ve elastisite modülü ise 6177 MPa seviyesinde belirlenmiştir.
- MSWMLC kod adlı numune tek katmandan oluşmakta ve bireysel taşlar birbirine kireç harcın yanı sıra metal bağlantı elemanlarla da (kenet ve zıvana) bağlanmıştır. Numuneye ait basınç dayanımı, 12,74 MPa seviyesindeyken elastisite modülü 6416 MPa olarak belirlenmiştir.
- MDWMLC kod adlı numune ise tez kapsamında tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarı temsil etmektedir. Bu numune iki katmandan oluşmakta ve katmanlar arasında 50 mm boşluk bulunmaktadır. Numunedeki bireysel taşlar ve katmanlar, kireç harcı ve metal bağlantı elemanları ile birbirine bağlanmıştır. Numuneye ait basınç dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla 8,63 MPa ve 2716 MPa civarında tespit edilmiştir.

Yukarıda tek eksenli basınç deneyinde kullanılan tüm makro boyutlu numunelerde kırılmalar, gevrek kırılma olarak adlandırılan, ani bir şekilde oluştuğu gözlenmiştir. Kırılmaların oluşumu düşey yüke paralel olarak gerçekleşmiş olup genellikle nihai yüke yakın bir seviyede oluştuğu görülmüştür.

Makro boyutlu numunelerin basınç dayanımında, 2 mm'lik harcın etkisi, MSWC ve MSWLC numunelerin basınç dayanımlarının kıyaslanması ile anlaşılmaktadır. Harçlı numune olan MSWLC'nin basınç dayanımı, harçsız numune olan MSWC'ye oranla %45 oranında daha fazladır. Böylece ince harcın, duvarın basınç dayanımında pozitif bir etkisinin olduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebi harcın kullanımı ile taştaki pürüzlerin etkisinin ortadan kalkması ve duvarın basınç alanına etkiyen yükün düzgün yayılı olarak etkimesidir. Ek olarak ince harcın kullanımı ile harçsız duvarda oluşan stabilite problemi de ortadan kalkmaktadır.

Tez kapsamında makro boyutlu numunelerde kullanılan metal bağlantı elemanların etkisi de araştırılmıştır. Bunun için MSWLC (kireç harçlı) ve MSWMLC (kireç harç + metal bağlantı elemanları) numunelerin basınç dayanımı karşılaştırılmıştır. Buna göre; MSWMLC numunesine ait basınç dayanımının, MSWLC numunesine göre %22 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlara göre metal bağlantı elemanları, basınç dayanımında bir azalmaya sebep olmamaktadır.

Tasarlanan içi boş çok katmanlı duvar numunelerin sonuçları incelendiğinde; basınç dayanımının tek katmanlı ve metal bağlantı elemanları içeren numuneye nazaran %48 civarında düştüğü gözlenmiştir. Bunun sebebi çift katmanlı duvarların her bir katmanı ne kadar özenle yapılırsa yapılsın yine de duvarın kotları arasında farklar olacaktır. Bu sebeple, duvara gelen yük her iki katmana düzgün olarak yayılmadığından basınç dayanımında düşüşler meydana gelmiştir.

Tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların kayma dayanımının belirlenebilmesi için yapılan diyagonal basınç deney sonuçları incelendiğinde;

- Sadece geleneksel harçlarla örülmüş duvarlardaki kırılmalar, çatlakların başlaması ile ani olarak gerçekleşmiştir. Ancak metal bağlantı elemanları içeren numunelerde bu kırılmalar ani olmayıp, derzlerde oluşan ilk çatlaklar belli bir miktar genişledikten sonra, zıvanaların deliklerinden çıkması ile meydana gelmiştir.
- Diyagonal basınç deneyinde, yatay yüklere oranla düşey yüklerin düzeyi çok düşük olduğundan metal bağlantı elemanların, duvar numunelerin kayma dayanımlarına olan etkisi tam olarak anlaşılmamıştır. Bu durum özellikle tek katmanlı ve bireysel taşların, kireç harcın yanı sıra metal bağlantı elemanlarla

bağlanan numunelerde açık bir şekilde görülmüştür. Bu numunelerdeki kırılmalar, duvarın bir parçasının kayma düzlemine yaklaşık dik yönde duvardan ayrılması ile meydana gelmiştir. Böylece metal bağlantı elemanlarda özellikle zıvanalarda kaymadan ötürü kesilmelerin meydana gelmediği ve deliklerinden çıkıp duvarın ayrılmasına sebep olduğu gözlenmiştir.

- 4 farklı duvar tipi içeren, 12 adet numunenin kayma dayanımı incelendiğinde, hemen hemen tüm numunelere ait kayma dayanımının aynı seviyelerde olduğu görülmektedir. 2. maddede açıklanan kırılma şekillerinden ötürü bağlantı elemanların, kayma dayanımına herhangi bir katkısının olmadığı görülmüştür. Ancak süneklik ve enerji tüketme açısından bağlantı elemanların katkısı oldukça büyüktür. Süneklik ölçütü olarak belirlenen μ , 3 numunenin ortalaması alınarak hesaplanmış ve tek katmanlı olarak üretilen; kireç harçlı numunelerde 1, horasan harçlı numunelerde 4 ve metal bağlantı elemanı içeren numunelerde bu değer 13 seviyesinde tespit edilmiştir. Çift katmanlı numunelerde ise ortalama μ değeri 33 seviyesinde belirlenmiştir. Bu sonuca bakıldığında metal bağlantı elemanı içeren tek katmanlı numuneye ait sünekliğin tek katmanlı geleneksel harçlarla örülen numunelerin ortalama süneklik düzeyinden yaklaşık 5 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Aynı şekilde metal bağlantı elemanları içeren tek ve çift katmanlı numuneler karşılaştırıldığında, çift katmanlı numunelerin süneklik düzeyinin tek katmanlı numuneye oranla 2,5 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Duvar numunelerin enerji tüketme kapasitesi süneklik düzeylerine bağlı olduğundan, aynı durumun enerji tüketme kapasitesi için de geçerli olduğu görülmüştür.

Makro boyutlu duvarların deneysel sonuçları TBDY (2018) yönetmeliği ile karşılaştırıldığında;

- İçi boş çok katmanlı duvarların h_{ef} / t_{ef} oranı CEN EN-1996-1-1 (2005) yönetmeliğine göre hesaplanmış ve narinliğe bağlı λ kapasite azaltma katsayısı belirlenmiştir. Bu bağlamda CEN EN-1996-1-1 (2005) yönetmeliğinde duvarın h_{ef} yüksekliği, duvara bağlanan yapısal elemanın göreceli rijitliğine bağlı olduğu belirtilmiştir. Deneysel sırasında duvar numuneleri herhangi bir yapısal elemana bağlı olmadıklarından ve yapıda kullanıldığında, duvarın konumuna bağlı olarak

hangi elemanlara nasıl bağlandığı bilinmediğinden h_{ef} 1400 mm (makro ebatlı numunenin yüksekliği) olarak alınmıştır. İçi boş çok katmanlı duvarın t_{ef} kalınlığı ise CEN EN-1996-1-1 (2005) yönetmeliğinin denklem 5.11' göre hesap yapılmış ve 126 mm olarak belirlenmiştir. Bunun sonucunda h_{ef}/t_{ef} oranı 11,11 olarak hesaplanmış ve buna bağlı olarak λ katsayısı TBDY (2018) yönetmeliğinin 11.4.2. maddesine göre 0,7 olarak belirlenmiştir.

- Mikro boyutlu basınç deney sonucunda içi boş çok katmanlı kireç harçlı numunenin dayanımı 23,24 MPa olduğu belirlenmiştir. TS EN 1052-1 (2000) standardına göre bu numunenin karakteristik basınç dayanımı 19,37 MPa olarak hesaplanmaktadır. Böylece narınlığe bağlı dayanım azaltma katsayısı ile bu değer 13,56 MPa olarak hesaplanmaktadır. Makro boyutlu duvarın basınç deney sonucunda ise dayanımın 8,63 MPa seviyesinde olduğu görülmüştür.

Deneyisel çalışmaların ardından tek katmanlı ve kireç harçlı mikro boyutlu duvar numunenin nümerik modellenmesi, Abaqus paket programında gerçekleştirilmiş ve analizleri yapılmıştır. Yapılan nümerik analizlerde basitleştirilmiş mikro-modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Böylece duvarlardaki bireysel taşlar tasarlanmış ve taşlar arasındaki harç ise ebatsız ara yüz olarak tanımlanmıştır. Literatürde kohezif bölge olarak bilinen bu ara yüzde kireç harcın mekanik özellikleri tanımlanmıştır. Yapılan nümerik analizler sonucunda modelin sonuçlarının deneysel sonuçlarla örtüştüğü görülmüştür.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışması kapsamında günümüzün ihtiyaçlarını karşılayacak modern yığma doğal taş binalar için, geleneksel çok katmanlı duvarlardan esinlenerek yeni bir taşıyıcı duvar tasarlanmıştır. Çalışmanın temel amacı bu duvarın düzlem içi davranışının deneysel olarak araştırmaktır. Buna ek olarak Türkiye'nin ve bulunduğu bu coğrafyanın geçmişi ile iyi harmanlanmış, anıtsal eser kimliğinde, modern ve ekolojik mimariye sahip yığma doğal taş binaların yeninden inşa edilebilmesi ve ulusal yönetmeliklerde bu binalarla ilgili bazı maddelerin eklenmesi veya revizyonların yapılabilmesi için başlangıç düzeyde deneysel veri sağlamaktır. Bu bağlamda kapsamlı literatür araştırmasının ardından deneysel çalışmalar planlanmış ve uygulanmıştır. Elde edilen veriler irdelenmiş ve sonuçları ilgili başlıklar altında detaylı olarak verilmiştir.

Tasarlanan içi boş çok katmanlı doğal taş duvar, aralarında boşluk bulunan iki katmandan oluşmaktadır. Katmanlar, bu tez kapsamında, tasarlanan kenet ve zıvana ile birbirine bağlanmakta ve duvarın düzlem içi ve düzlem dışı stabilitesi sağlanmaktadır. Böylece orta katmanın boş bırakılması ile taşıyıcı duvarın ağırlığı azaltılarak binanın toplam ağırlığı azaltılmaktadır. Binaya gelen deprem yükü binanın ağırlığı ile doğru orantılı olduğundan, binanın ağırlığı azaldığı için binaya etkiyen yatay yük te azalmaktadır. Ayrıca modern bir binanın vazgeçilmez ihtiyaçlarından biri olan yalıtım, katmanlar arasındaki boşlukta uygulanarak doğal taş duvarın görüntüsüne zarar vermemektedir. Buna ek olarak binada kullanılan temiz ve pis su tesisatı ile elektrik tesisatı katmanlar arasındaki boşlukta yer alarak taşın ihtişamlı görünüşü kusursuz bir şekilde ortaya konulmaktadır.

Tasarlanan duvarın düzlem içi davranışının deneysel olarak belirlenmesi kapsamında, önce duvarda kullanılan bireysel elemanların mekanik özellikleri ve ardından duvarın basınç dayanımı, başlangıç kayma dayanımı ve diyagonal kayma dayanımı belirlenmiştir. Basınç ve başlangıç kayma deneylerinde kullanılan yöntemlerin başarılı bir şekilde uygulandığı gözlemlenmiştir. Ancak kayma deneyinde kullanılan diyagonal basınç yöntemi özellikle metal bağlantı elemanları içeren duvar numunelerde beklenen sonuçların alınmadığı görülmüştür. Sebebi ise kullanılan yöntemde binalarda ölü yükü temsil eden ve deney numunelerinde düşey yük olarak uygulanan normal yük düzeyi çok düşük olduğundan zıvanaların deliklerinden çıktığı ve kayma dayanımında olan etkisi

incelenemediği gözlemlenmiştir. Buna rağmen tasarlanan duvarın modern yığma binalarda uygulanabilirliği önerilmektedir.

Ancak bu çalışmaya ek olarak,

- Önerilen içi boş çok katmanlı duvarın düzlem içi kayma dayanımının 0,2, 0,6 ve 1 MPa düşey gerilme altında tersinir tekrarlanır deneylerinin yapılarak süneklik açısından sonuçlarının irdelenmesi gerekmektedir.
- Tersinir tekrarlanır deney kapsamında zıvanaların, içi boş çok katmanlı doğal taş duvarların kayma dayanımında olan etkisi araştırılmalıdır.
- Önerilen içi boş çok katmanlı duvarın düzlem dışı davranışının sarsma tablası üzerinde veya farklı deney yönetmeleri ile araştırılmalıdır.
- Önerilen içi boş çok katmanlı duvarların kapsamlı nümerik analizlerinin metal bağlantı elemanları ile modellenerek ve analizlerin yapılması gerekmektedir. Bu duvarların yönetmeliklere göre güvenli olarak kullanılması ve her türlü risk faktörünün ortadan kaldırılması açısından önemlidir.

KAYNAKLAR

- Abdulla, K. F., Cunningham, L. S. ve Gillie, M. (2017). Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. *Engineering Structures*, 151, 349–365.
- Alecci, V., Fagone, M., Rotunno, T. ve De Stefano, M. (2013). Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar. *Construction and Building Materials*, 40, 1038–1045.
- Almeida, C., Guedes, J. P., Arêde, A., Costa, C. Q. ve Costa, A. (2012). Physical characterization and compression tests of one leaf stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 30, 188–197.
- Andreotti, G., Graziotti, F. ve Magenes, G. (2019). Expansion of mortar joints in direct shear tests of masonry samples: implications on shear strength and experimental characterization of dilatancy. *Materials and Structures*, 52(4), 64.
- Arık, S. (2011). *Finike (Antalya) beydağları formasyonu'nun mermer olarak kullanılabilirliği ve ekonomik önemi*. Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Isparta.
- ASTM E 519M-15. (2015). Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages. ASTM International.
- Augenti, N. ve Parisi, F. (2010). Constitutive models for tuff masonry under uniaxial compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(11), 1102–1111.
- Augenti, Nicola ve Parisi, F. (2011). Constitutive modelling of tuff masonry in direct shear. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1612–1620.
- Bathe, K.-J. (2014). *Finite Element Procedures* (2. Baskı.). Watertown, Massachusetts: Klaus-Jürgen Bathe.
- Binda, L., Pina-Henriques, J., Anzani, A., Fontana, A. ve Lourenço, P. B. (2006). A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modelling. *Engineering Structures*, 28(8), 1132–1148.
- Bosiljkov, V. Z., Totoev, Y. Z. ve Nichols, J. M. (2005). Shear modulus and stiffness of brickwork masonry: An experimental perspective. *Structural Engineering and Mechanics*, 20(1), 21–43.
- Bothara, J. ve Brzev, S. (2011). *A tutorial: improving the seismic performance of stone masonry buildings*. (A. Charleson, Ed.) (First Edit.). U.S.A., Oakland, California: Earthquake Engineering Research Institute.
- Bricks, E. M. ve Materials, B. (2016). *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*. *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*. doi:10.1016/c2014-0-00842-8
- Brignola, A., Frumento, S., Lagomarsino, S. ve Podestà, S. (2008). Identification of shear parameters of masonry panels through the in-situ diagonal compression test. *International Journal of Architectural Heritage*, 3(1), 52–73.
- Buzov, A., Radnić, J. ve Grgić, N. (2019). Effects of several bolt parameters on the

- bearing capacity of a composite multi-drum stone column under an earthquake. *Composites Part B: Engineering*, 162(November 2018), 250–258.
- Campbell, J. ve Durán, M. (2017). Numerical model for nonlinear analysis of masonry walls. *Revista de la Construcción*, 16(2), 189–201.
- Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F. ve Domingues, J. J. M. S. (2008). Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs. *International Journal of Solids and Structures*, 45(5), 1497–1512.
- Çelikkollu, A. (2015). *Kemerlerde en önemli husus*. Erişim adresi: <https://www.insaathaber.org/kemerlerde-en-onemli-husus/>. Erişim tarihi: 06 Ocak 2020.
- CEN EN-1996-1-1. (2005). EN 1996-1-1:1995 Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. European Committee for Standardization.
- Chaimoon, K. ve Attard, M. M. (2007). Modeling of unreinforced masonry walls under shear and compression. *Engineering Structures*, 29(9), 2056–2068.
- Civan, M. A. (2006). *Niğde yöresi andezitlerinin bordür taşı olarak kullanılabilirliği ve beton bordür taşlarıyla dayanım yönünden karşılaştırılması*. Yüksek Lisans tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Çizer, Ö., Böke, H. ve İpekoğlu, B. (2004). Bazı osmanlı dönemi hamam yapılarının kubbe ve duvarlarında kullanılan kireç harçların özellikleri. 2. *Ulusal yapı malzemesi kongresi ve sergisi [2nd national congress and exhibition on building materials]*, date: 2004/10/06 - 2004/10/08, location: İstanbul içinde (ss. 1–13). İstanbul: TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükşehir Şubesi; İstanbul, Turkey.
- Commission, E. (1992). *In-plane behaviour of masonry: a literature review*. Report EUR 13840 EN, commission of the European communities, Technical report, Luxembourg.
- Como, M. (2015). *Statics of historic masonry constructions* (Second Edi.). Solid and Structural Mechanics, Rome, Italy: Springer Switzerland.
- Corradi, M., Tedeschi, C., Binda, L. ve Borri, A. (2008). Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: Deep repointing. *Construction and Building Materials*, 22(4), 463–472.
- Corradi, Marco, Borri, A., Poverello, E. ve Castori, G. (2017). The use of transverse connectors as reinforcement of multi-leaf walls. *Materials and Structures*, 50(2), 114.
- Demir, C. (2012). *Seismic Behaviour of Historical Stone Masonry Multi-Leaf Walls*. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demirtaş, M. B. (2006). *Magnesia artemis tapınağı'nın teknik ve işçilik özellikleri*. Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dizhur, D., Griffith, M. ve Ingham, J. (2013). In-plane shear improvement of unreinforced masonry wall panels using NSM CFRP strips. *Journal of Composites for Construction*, 17(6), 04013010-1-04013010–12.
- Doğu, E. (2010). *Çift cidarlı moloz dolgulu tarihi taş duvarların yatay yükler altındaki*

davranışının deneysel olarak incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Ekşi Akbulut, D. (2006). *Tarihi yapıların onarımında kullanılacak harçların seçimine yönelik bir öneri*. Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G. (2001). *Betonarme: temel ilkeler, TS-500-2000 ve Türk deprem yönetmeliğine (1998) göre hesap* (II. Baskı.). İstanbul: Evrim Yayınevi.
- Faella, C., Martinelli, E., Nigro, E. ve Paciello, S. (2010). Shear capacity of masonry walls externally strengthened by a cement-based composite material: An experimental campaign. *Construction and Building Materials*, 24(1), 84–93.
- Faella, G., Manfredi, G. ve Realfonzo, R. (1991). Experimental evaluation of mechanical properties of old tuff masonry subjected to axial loading. *9th Int. Brick and Block Masonry Conf* içinde (ss. 172–179).
- Franzoni, E., Gentilini, C., Graziani, G. ve Bandini, S. (2015). Compressive behaviour of brick masonry triplets in wet and dry conditions. *Construction and Building Materials*, 82, 45–52.
- Gabor, A., Ferrier, E., Jacquelin, E. ve Hamelin, P. (2006). Analysis and modelling of the in-plane shear behaviour of hollow brick masonry panels. *Construction and Building Materials*, 20(5), 308–321.
- García, D., San-José, J. T., Garmendia, L. ve Larrinaga, P. (2012). Comparison between experimental values and standards on natural stone masonry mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 28(1), 444–449.
- Ghanem, G., Sheirf, A. ve Honsy, H. (1994). Suggested modifications to the diagonal tension test calculation for masonry assemblages. *10th International Brick/Block Masonry Conference* içinde (ss. 1325–1334). Calgary, Canada.
- Ghiassi, B. ve Milani, G. (2019). *Numerical modeling of masonry and historical structures*. (B. Ghiassi ve M. Gabriele, Ed.) (1. Baskı.). Woodhead Publishing.
- Giordano, A., Mele, E. ve De Luca, A. (2002). Modelling of historical masonry structures: Comparison of different approaches through a case study. *Engineering Structures*, 24(8), 1057–1069.
- Gökçen, C. (2007). *Tarihi süreçlerde atmosferik şartların ve hava kirliliğinin taş yapılar üzerindeki etkileri; köprülü medresesi ve kütüphanesi örneği*. Yüksek Lisans tezi, Gebze yüksek teknoloji enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Guadagnuolo, M., Aurilio, M., Basile, A. ve Faella, G. (2020). Modulus of elasticity and compressive strength of tuff masonry: Results of a wide set of flat-jack tests. *Buildings*, 10(5).
- Isabel, A., Morais, J., Morais, P., Veiga, R., Santos, C., Candeias, P. ve Gomes, J. (2020). Modulus of elasticity of mortars : Static and dynamic analyses. *Construction and Building Materials*, 232, 117216.
- Ismail, N., Petersen, R. B., Masia, M. J. ve Ingham, J. M. (2011). Diagonal shear behaviour of unreinforced masonry wallettes strengthened using twisted steel bars. *Construction and Building Materials*, 25(12), 4386–4393.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.063

- Kaygısız, H. (2010). *Kayseri yöresindeki yapıtaşlarının fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi*. Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Leasca, S. (2017). *How to experience the world's most popular tourist destinations like you're the only one there*. Erişim adresi: <https://www.travelandleisure.com/travel-tips/machu-picchu-without-the-crowds>. Erişim tarihi: 06 Ocak 2020.
- Long, L., Hamid, A. A. ve Drysdale, R. G. (2005). Small-scale modelling of concrete masonry using ½ scale units: a preliminary study. *10th Canadian Masonry Symposium* içinde (ss. 1–10). Banff, Alberta.
- Lourenço, P. B. (1996). *Computational strategies for masonry structures*. Doktora tezi, Porto Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Portekiz.
- Marcari, G., Basili, M. ve Vestroni, F. (2017). Experimental investigation of tuff masonry panels reinforced with surface bonded basalt textile-reinforced mortar. *Composites Part B: Engineering*, 108, 131–142.
- Mavi, Ö. (2000). *Kireç harç ve sıvaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Medley, E. ve Zekkos, D. (2007). Seismic performance of rock block structures with observations from the october 2006 hawaii earthquake. *4th international Conference on Earthquake geotechnical Engineering* içinde (ss. 1–12). Thessaloniki, Greece.
- Milosevic, J., Gago, A. S., Lopes, M. ve Bento, R. (2013). Experimental assessment of shear strength parameters on rubble stone masonry specimens. *Construction and Building Materials*, 47, 1372–1380.
- Minollari, K. (2017). *Temple of athena nike on the athenian acropolis*. Erişim adresi: <https://www.khanacademy.org/humanities/ancient-art-civilizations/greek-art/classical/a/temple-of-athena-nike>. Erişim tarihi: 02 Ocak 2020.
- Mohammed, A. ve Hughes, T. G. (2011). Prototype and model masonry behaviour under different loading conditions. *Materials and Structures*, 44(1), 53–65.
- Mohammed, A., Hughes, T. G. ve Mustapha, A. (2011). The effect of scale on the structural behaviour of masonry under compression. *Construction and Building Materials*, 25(1), 303–307.
- Noyce, P. ve Grevello, G. (2016). Durability of reinforced concrete. *Structure magazine*, (January), 10–13.
- Oliveira, D. V. de C. (2003). *Experimental and Numerical Analysis of Blocky Masonry Structures Under Cyclic Loading*. Doktora tezi, Minho Üniversitesi, Mühendislik Okulu, Portekiz.
- Oliveira, D. V., Lourenço, P. B. ve Roca, P. (2006). Cyclic behaviour of stone and brick masonry under uniaxial compressive loading. *Materials and Structures*, 39(2), 247–257.
- Oliveira, Daniel V., Silva, R. A., Garbin, E. ve Lourenço, P. B. (2012). Strengthening of three-leaf stone masonry walls: an experimental research. *Materials and Structures*, 45(8), 1259–1276.

- Özen, G. Ö. (2006). *Comparison of elastic and inelastic behavior of historic masonry structures at the low load levels*. Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Page, A. (1978). Finite element model for masonry. *Journal of the structural division ASCE*.
- Pinto, C. ve Fonseca, J. (2013). Mechanical behavior of high strength granite for new prestressed stone structures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, 452–460.
- Pluijm, R. van der. (1999). *Out-of-plane bending of masonry : behaviour and strength*. Doktora tezi, Eindhoven Teknoloji Üniversitesi, Eindhoven.
- Porco, F., Porco, G., Uva, G. ve Sangirardi, M. (2013). Experimental characterization of “non-engineered” masonry systems in a highly seismic prone area. *Construction and Building Materials*, 48, 406–416.
- Pringle, S. A. (2016). *Diagonal tension testing of interlocking compressed earth block panels*. Yüksek lisans tezi, California Politeknik Devlet Üniversitesi, İnşaat ve Çevre Mühendisliği, San Luis Obispo, California.
- Ranogajec, P. A. (2015). *The Pantheon (Rome)*. Erişim adresi: <https://smarthistory.org/the-pantheon/>. Erişim tarihi: 07 Ocak 2020.
- Rezaie, A., Godio, M. ve Beyer, K. (2020). Experimental investigation of strength, stiffness and drift capacity of rubble stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 251.
- Şahin, S. (2018). *İgnimbirit taş ocağı atıklarından ısıtma işlemi yoluyla elde edilen yapay taşların fiziksel ve mekanik özellikleri*. Yüksek lisans tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Senthivel, R. ve Lourenço, P. B. (2009). Finite element modelling of deformation characteristics of historical stone masonry shear walls. *Engineering Structures*, 31(9), 1930–1943.
- Sepehr, R. (2014). *Megalithic cyclopean masonry*. Erişim adresi: <http://atlanteangardens.blogspot.com/2014/04/cyclopean.html>. Erişim tarihi: 01 Ocak 2020.
- Shabdin, M., Zargarani, M. ve Attari, N. K. A. (2018). Experimental diagonal tension (shear) test of Un-Reinforced Masonry (URM) walls strengthened with textile reinforced mortar (TRM). *Construction and Building Materials*, 164, 704–715. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.234
- Silva, B., Pigouni, A. E., Valluzzi, M. R. ve Modena, C. (2014). Calibration of analytical formulations predicting compressive strength in consolidated three-leaf masonry walls. *Construction and Building Materials*, 64, 28–38.
- Silva, R. A., Oliveira, D. V. ve Lourenço, P. B. (2008). On the strengthening of three-leaf stone masonry walls. *Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance* içinde (ss. 739–746). London: Taylor & Francis Group.
- TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

- TS EN 1015-11. (2000). Kâğıt harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1052-1. (2000). Kâğıt - Deney metotları -Bölüm 1: Basınç dayanımı tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1052-3. (2002). Kâğıt - Deney metotları - Bölüm 3 : Başlangıç kayma dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12372. (2006). Doğal taşlar - Deney metotları - Yoğun yük altında bükülme dayanımı tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-6. (2010). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14580. (2006). Doğal taşlar - Deney yöntemleri - Statik elastik modülün tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1926. (2006). Doğal taşlar- Deney metotları- Basınç dayanımı tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Uslu, S. (2013). *Tarihi yapılar da kullanılan metal bağlantı elemanlarının deneysel metotlarla incelenmesi*. Yüksek lisans tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Vakıflar Genel, M. (2020). *V.0108/C Pozuna ait birim fiyat, analiz ve yapım şartları*. Erişim adresi: [https://www.birimfiyat.com/poz/vakiflar/v.0108-c-s%C3%B6nm%C3%BCs-kire%C3%A7-harci-\(kire%C3%A7-kum=1-3;-kalin-kum-ile\)-\(%C3%B6rg%C3%BC-ve-kaba-siva-harci\)](https://www.birimfiyat.com/poz/vakiflar/v.0108-c-s%C3%B6nm%C3%BCs-kire%C3%A7-harci-(kire%C3%A7-kum=1-3;-kalin-kum-ile)-(%C3%B6rg%C3%BC-ve-kaba-siva-harci)) Erişim tarihi: 29 Ocak 2020.
- Valluzzi, M. R., Porto, F. ve Modena, C. (2001). Behaviour of multi-leaf stone masonry walls strengthened by different intervention techniques. *Historical Constructions*, (July 2016), 1023–1032.
- Valluzzi, M. R., Tinazzi, D. ve Modena, C. (2002). Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Construction and Building Materials*, 16(7), 409–416.
- Vanin, F., Zaganelli, D., Penna, A. ve Beyer, K. (2017). Estimates for the stiffness, strength and drift capacity of stone masonry walls based on 123 quasi-static cyclic tests reported in the literature. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(12), 5435–5479.
- Vasconcelos, G. F. M. (2005). *Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls*. Doktora tezi, Minho Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Portekiz.
- Vasconcelos, G. ve Lourenço, P. B. (2009). Experimental characterization of stone masonry in shear and compression. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3337–3345.
- Veríssimo-Anacleto, J., Ludovico-Marques, M. ve Neto, P. (2020). An empirical model for compressive strength of the limestone masonry based on number of courses – An experimental study. *Construction and Building Materials*, 258, 119508.
- Vintzileou, E. ve Miltiadou-Fezans, A. (2008). Mechanical properties of three-leaf stone

masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts. *Engineering Structures*, 30(8), 2265–2276.

Vintzileou, E. N., Papadopoulou, D. A. ve Palieraki, V. A. (2006). Mechanical Properties of Masonry Reinforced with Timber Ties. *Structural Analysis of Historical Constructions* içinde (C. 2, ss. 685–692). New Delhi, India.

Wang, J. (2014). Numerical Simulation of Masonry Structures Based on ANSYS Contact Analysis. *Industrial Technology Innovation*, 01(01), 116–128.

Wright, G. R. . (2005). *Ancient building technology*. 2. Cilt, Leiden, Boston: Brill.

Zeng, F., Lin, F.-B. ve Subramaniam, K. V. (2009). Experimental Investigation on Granite Masonry Behavior under Compression. *Structures Congress 2009* içinde (ss. 1–9). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmad Javid ZIA
Doğum Yeri – Tarihi : Faryab – Afganistan – 1985

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : 2011, Selçuk Üniversitesi, Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl.
Yüksek Lisans Öğrenimi : 2014, Selçuk Üniversitesi, Fen Bil. Ens. İnşaat Müh. Böl.
Bildiği Yabancı Diller : Türkçe, İngilizce, Urduca
Bilimsel Faaliyetleri :İlgün Abdulkerim, Zia Ahmad Javid (2020). Determination of Sound Transmission Coefficient Of Gypsum Partition Walls Insulated By Cellubor™. Turkish Journal of Engineering, 4, 70-76., Doi: 10.31127/Tuje.596158
İlgün Abdulkerim, Zia Ahmad Javid, Arıbaş Semih, Bayram Berna (2019). Farklı Ses Yalıtımlı Bölme Duvarları Olan 17 Katlı Çelik ve Betonarme Binaların Deprem Etkisi Altında Karşılaştırılması. 2nd International Congress On Engineering and Architecture, 583-594. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

İŞ DENEYİMİ

Stajlar : 2009, Onyx Co., stajyer
Projeler :2016-2018, Bursiyer, Çimento Bağlayıcılı Kompozitlerde Kendiliğinden İyileşme Kabiliyetini Geliştirmek İçin Nano Boyutta Modifiye Edilmiş Yeni Nesil Kür Uygulamaları, Arife AKIN, TÜBİTAK 3001
Çalıştığı Kurumlar :2014 – devam etmekte, Araştırma Görevlisi, KTO Karatay Üniversitesi

Tarih: 18 Aralık 2020