KTO KARATAY ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

MİKRO VE MAKRO BOYUTLU DOĞAL KESME TAŞ DUVARLARIN ANSYS İLE ANALİZİNİN YAPILMASI

Erdem ALAN

Yüksek Lisans Tezi

KONYA
Aralık 2022

MİKRO VE MAKRO BOYUTLU DOĞAL KESME TAŞ DUVARLARIN ANSYS İLE ANALİZİNİN YAPILMASI

Erdem ALAN

KTO Karatay Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Tezli Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi. Abdulkerim İLGÜN

Konya
Aralık 2022

BİLDİRİM

Enstitü tarafından onaylanan Yüksek Lisans 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 en fazla 6 ay ertelenmiştir.[2]

☐ Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir.[3][4]

05 Aralık 2022

_____

Erdem ALAN

[1] MADDE 6(1) Lisansüstü tezle 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 internetten 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.

05 Aralık 2022

_____

Erdem ALAN

Aileme,

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim sürecinde her zaman destek olan, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, bir meslektaş ve yeri geldiğinde başarıya ulaşmam için yapıcı eleştirilerle katkıda bulunan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Abdulkerim İLGÜN'e, KTO Karatay Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Öğretim Elemanları Dr. Ahmad Javid ZİA ve Haşmet Çağrı SEZGEN'ye teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca desteklerini, ilgi ve yardımlarını gördüğüm tüm bölüm hocalarıma ayrı ayrı teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, benden her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen başta annem, babam ve kardeşim olmak üzere aileme saygı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2022 Erdem ALAN

ÖZET

Erdem ALAN

Mikro Ve Makro Boyutlu Doğal Kesme Taş Duvarların Ansys İle Analizinin Yapılması

Yüksek Lisans Tezi

Konya, 2022

Bu tez kapsamında, doğal kesme taş ile deneysel olarak mikro ve makro boyutlu numuneler üzerinde yapılan tek ve çok katmanlı duvar deneylerinin sonuçları ile ANSYS modelleme programında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu modelleme kapsamında "AutoCAD" çizim programı ile duvarların katmanlar arasındaki boşluklarla bağlantısını oluşturan doğal kesme taş duvar elemanları ve bağlantı elemanları üç boyutlu olarak modellenmiştir. Bu analiz işlemi için ANSYS programında "Explicit Dynamics" analiz tipi seçilmiştir. Daha sonra bu analiz türüne uygun olarak gerekli malzeme özellikleri seçilmiş ve bu malzeme üzerinde gerekli ayarlar yapılmıştır. AutoCAD çizim programı ile oluşturulan üç boyutlu modeller ANSYS yazılım programına aktarılmıştır. Analiz sürecini daha sonra gerçekleştirecek olan ANSYS yazılım programı ile malzeme tanımlama, elemanlar arası temas ilişkileri, uygun sayıda sonlu elemanlar, sınır koşulları ve yükleme durumu verilmiştir. Bu karşılaştırma işlemini gerçekleştirmek için bireysel elemanların basınç analizleri, mikro boyutlu duvar elemanlarının basınç ve başlangıç kayma analizleri, makro boyutlu duvar elemanlarının basınç analizleri elde edilmiştir. Son olarak üçüncü bölüm başlığı altındaki her grup için deneysel ve ANSYS analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak tabloda verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre "Explicit Dynamics" analiz türü ile yapılan çalışmalar, gelecekteki çalışmalara ışık tutulmuştur.

Anahtar Kelimeler

Ansys, explicit dynamics, makro modelleme, mikro modelleme, taş duvar

ABSTRACT

Erdem ALAN

Analysis of Micro and Macro Dimensional Natural Cut Stone Walls with ANSYS

Master's Thesis

Konya, 2022

Within the scope of this thesis, the results of single and multi-layer wall experiments performed on micro- and macro-sized samples experimentally with natural cut stone and the results obtained in the ANSYS modeling program were compared. Within the scope of this modeling, the natural cut stone wall elements and fasteners that form the connection of the walls with the gaps between the layers with the "AutoCAD" drawing program were modeled in three dimensions. For this analysis process, the "Explicit Dynamics" analysis type was selected in the ANSYS program. Then, the necessary material properties were selected in accordance with this type of analysis and the necessary settings were made on this material. Three-dimensional models created with the AutoCAD drawing program were transferred to the ANSYS software program. With the ANSYS software program, which will perform the analysis process later, material identification, Decontamination relationships, an appropriate number of finite elements, boundary conditions and loading status are given. In order to perform this comparison process, pressure analyses of individual elements, pressure and initial shear analyses of micro-dimensional wall elements, pressure analyses of macro-dimensional wall elements were obtained. Finally, the experimental and ANSYS analysis results for each group under the title of the third section are given in the table comparatively. According to the results obtained, the studies conducted with the "Explicit Dynamics" type of analysis shed light on future studies.

Keywords

Ansys, explicit dynamics, macro modeling, micro modeling, stone wall

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY i
BİLDİRİM ii
ETİK BEYAN iii
TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
TABLOLAR DİZİNİ x
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
KISALTMALAR DİZİNİ xv
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
3. MATERYAL VE YÖNTEM 23
3.1. Ansys Yazılımı Hakkındaki Genel Bilgi 24
3.1.1. Analiz Türünün Belirlenmesi 24
3.1.2. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi 25
3.1.3. Geometrinin Oluşturulması 28
3.1.4. Geometrik Elemanlarda Sertlik Davranışının Belirlenmesi 30
3.1.5. Kontak Türlerinin Belirlenmesi 31
3.1.6. Uygun Sonlu Elemanın Belirlenmesi 38
3.1.7. Analiz Ayarlarının Belirlenmesi 42
3.1.8. Sınır Koşullarının Belirlenmesi ve Yükleme Durumu 43
3.1.9. Mikro ve Makro Modellenen Elemanların Sayısal Analizi 44
3.2. Bireysel Elemanlar için Basınç Analizleri 47
3.2.1. Kenet Olmadan Yapılan Basınç Analizi 48
3.2.2. Tek Taraflı Kenet ile Yapılan Basınç Analizi 50
3.2.3. İki Taraflı Kenet ile Yapılan Basınç Analizi 51
3.3. Mikro Boyutlu Elemanlar için Basınç Analizleri 54
3.3.1. Referans Alınan SWC Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi 56
3.3.2. Referans Alınan SWLC Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi 59
3.3.3. Referans Alınan SWMLC Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi 62
3.3.4. Referans Alınan DWMLC Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi 65

3.3.5. Mikro Boyutlu Basınç Elemanların Deney ve Ansys Sonuçlarının İrdelenmesi 69
3.4. Mikro Boyutlu Elemanlar için Başlangıç Kayma Analizleri 70
3.4.1. Referans Alınan SWIS20, SWIS60 ve SWIS100 Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi 72
3.4.2. Referans Alınan SWLIS20, SWLIS60 ve SWLIS100 Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi 76
3.4.3. Referans Alınan SWMLIS20, SWMLIS60 ve SWMLIS100 Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi 79
3.4.4. Referans Alınan DWMLIS20, DWMLIS60 ve DWMLIS100 Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi 82
3.5. Makro Boyutlu Elemanlar için Basınç Analizleri 86
3.5.1. Referans Alınan MSWC Grubu Makro Boyutlu Elemanın Analizi 89
3.5.2. Referans Alınan MSWLC Grubu Makro Boyutlu Elemanın Analizi 92
3.5.3. Referans Alınan MSWMLC Grubu Makro Boyutlu Elemanın Analizi 95
3.5.4. Makro Boyutlu Basınç Elemanların Deney ve Ansys Sonuçlarının İrdelenmesi 99
4. SONUÇ VE ÖNERİLER 100
KAYNAKLAR 104
ÖZGEÇMİŞ 107

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. Explicit Dynamics varsayılan ve düzenlenmiş malzeme özellikleri 27
Tablo 2. Kenet ve zıvana elemanları için tanımlanan malzeme parametreleri 28
Tablo 3. Sürtünme katsayısı değerleri..... 36
Tablo 4. Bireysel basınç elemanlarda kullanılan zaman aralığı ile sonlu eleman sayıları arasındaki ilişkiye bağlı olarak gerilme kırılması değerleri..... 43
Tablo 5. Kenet olmadan yapılan deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri 50
Tablo 6. Tek taraflı kenet ile yapılan Ansys kırılma gerilmesi..... 51
Tablo 7. Çift taraflı kenet ile yapılan deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri 53
Tablo 8. SWC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri 59
Tablo 9. SWLC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri 62
Tablo 10. SWMLC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri..... 65
Tablo 11. DWMLC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri..... 69
Tablo 12. SWIS grubu deney ve Ansys ortalama başlangıç kayma kuvveti sonuçları... 74
Tablo 13. SWLIS grubu deney ve Ansys ortalama başlangıç kayma kuvveti sonuçları 78
Tablo 14. SWMLIS grubu deney ve Ansys ortalama başlangıç kayma kuvveti sonuçları 81
Tablo 15. DWMLIS grubu deney ve Ansys ortalama başlangıç kayma kuvveti sonuçları 85
Tablo 16. MSWC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri..... 92
Tablo 17. MSWLC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri..... 95
Tablo 18. MSWMLC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri..... 98

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Referans numunelerinin kuvvet-yer değiştirme ilişkileri 3
Şekil 2. Sayısal analizde meydana gelen toplam deformasyon..... 3
Şekil 3. Yığma duvar analizi sonucunda yatay mesnet tepkisi- yatay yer değiştirme grafikleri..... 5
Şekil 4. Makro ve mikro modelde 3 boyutlu ve 2 boyutlu sonlu elemanların, deneysel yatay yük-yer değiştirme eğrileri ile karşılaştırılması..... 7
Şekil 5. Ansys modeli ve dinamik analiz sonucu..... 9
Şekil 6. Kiriş numunelerinin geometrik modeli ve hasar modeli..... 10
Şekil 7. Duvar numunelerinde kullanılan kenet ve zıvana..... 10
Şekil 8. Duvar numunesi, deney düzeneği ve deney sonrasındaki görüntüler..... 11
Şekil 9. Kesici kaya sisteminin sonlu eleman modeli:..... 12
Şekil 10. Kaya kesme işleminde plastik gerilme 12
Şekil 11. Ansys'de toprak, kule, monopil modeli ve doğal frekans modları..... 13
Şekil 12. Takviye ağları ve maksimum elastik gerilme 13
Şekil 13. Ansys kullanarak tek noktalı kesici takımın açık dinamik analizi..... 14
Şekil 14. Kenet elemanının yerleştirilmesi ve kenetli modelin analizde kullanılan düğüm noktası ve düğüm sayısı 15
Şekil 15. Deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarından bazıları 16
Şekil 16. Sac levha şekillendirmenin açık dinamik analizi ve tasarım optimizasyonu... 17
Şekil 17. Kullanılan kenet tipleri 17
Şekil 18. Kullanılan kenet tipi..... 18
Şekil 19. Referans deney numunenin ve kenet ile güçlendirilmiş kubbenin göçme sonucundaki durumları..... 18
Şekil 20. Moloz çekirdekli taş duvar numunesi 19
Şekil 21. Çok eksenli sismik hibrit tekstil malzemesi..... 20
Şekil 22. Numunelerin deney öncesi ve sonrasındaki durumu 21
Şekil 23. Başlangıç kayma deney için hazırlanan numuneler..... 22
Şekil 24. Static Structural analiz esnasında metal bağlantılı elemanlarda verilen hata uyarısı..... 24
Şekil 25. Explicit Dynamics analiz öncesi sınır koşulları ve yüklemeler..... 25
Şekil 26. Statik analiz için tanımlanan malzeme özellikleri 26
Şekil 27. Dinamik analiz için tanımlanan malzeme özellikleri..... 26
Şekil 28. AutoCAD ile modellenen üç boyutlu perspektif görünüm..... 29

Şekil 29. SpaceClaim alt programına aktarılan üç boyutlu model 29
Şekil 30. Geometry bölümüne aktarılan scdoc uzantılı dosya 30
Şekil 31. Sabit ve hareketli mesnetlere tanımlanan sertlik davranışı 31
Şekil 32. Serbestlik derecesi ve kontak çifleri 32
Şekil 33. Ansys temas türleri (Bonded ve No Separation) 33
Şekil 34. Ansys temas türleri (Frictional ve Frictionless) 34
Şekil 35. Ansys temas türü (Rough) 35
Şekil 36. Kenet ile zıvana arasındaki temas ilişkisi perspektif görünüm 37
Şekil 37. Kesme taş ile harç arasındaki temas ilişkisi perspektif görünüm 37
Şekil 38. Kesme taş ile zıvana arasındaki temas ilişkisi perspektif ve ön görünüş 38
Şekil 39. Sınır koşulları ve yükler 39
Şekil 40. Farklı mesh boyutları ile yapılan analizler 39
Şekil 41. Düzenlenmeyen ve düzenlenen sonlu eleman görünümleri 40
Şekil 42. Sonlu elemanlarda kullanılan ağ boyutların genel perspektifi ve görünüşleri 41
Şekil 43. Analiz ayarları 42
Şekil 44. Sınır koşulları ve yükleme durumu 44
Şekil 45. Analiz esnasında deformasyon ve gerilim hakkında görüntüleme 45
Şekil 46. Uygulanan basınç artışı etkisiyle oluşan kırılma şekilleri 46
Şekil 47. Bireysel elemanların perspektif görünüşleri 47
Şekil 48. Kenet olmayan bireysel elemanın basınç deney düzeneği ve modellenen elemanın sınır koşulları ve yükleme durumu 49
Şekil 49. Kenetsiz basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli 49
Şekil 50. Tek taraflı kenetli yükleme durumu ve analiz sonucunda kırılma şekli 51
Şekil 51. İki taraflı kenet ile yapılan bireysel elemanın basınç deney düzeneği ve modellenen elemanın sınır koşulları ve yükleme durumu 52
Şekil 52. İki taraflı kenet ile yapılan basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli 53
Şekil 53. Mikro boyutlu basınç elemanların perspektif görünüşleri 55
Şekil 54. SWC grubu duvar elemanının ön görünüşü ve yan görünüşü 57
Şekil 55. Mikro boyutlu basınç deney düzeneği ve SWC grubuna ait sınır koşulları ve yükleme durumu 58
Şekil 56. SWC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli 58
Şekil 57. SWLC grubu duvar elemanının ön görünüşü ve yan görünüşü 60
Şekil 58. Mikro boyutlu basınç deney düzeneği ve SWLC grubuna ait sınır koşulları ve yükleme durumu 61
Şekil 59. SWLC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli 61

Şekil 60. SWMLC grubu duvar elemanının boyuna ve enine kesiti 63
Şekil 61. Mikro boyutlu basınç deney düzeneği ve SWMLC grubuna ait sınır koşulları ve yükleme durumu 64
Şekil 62. SWMLC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli 65
Şekil 63. DWMLC grubu duvar elemanının boyuna ve enine kesiti 66
Şekil 64. Mikro boyutlu basınç deney düzeneği ve DWMLC grubuna ait sınır koşulları ve yükleme durumu 67
Şekil 65. DWMLC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli 68
Şekil 66. DWMLC grubuna ait kenet ve zıvanaların üstten görünüşü ve eğilme durumu 68
Şekil 67. Mikro boyutlu basınç elemanların deney ve Ansys sonuçları 69
Şekil 68. Deneyde kullanılan başlangıç kayma düzenekleri 71
Şekil 69. SWIS grubu duvar elemanın ön görünüşü ve yan görünüşü 73
Şekil 70. SWIS grubu duvar elemanların sınır koşulları ve yükleme durumları 73
Şekil 71. SWIS grubu analiz sonucunda oluşan başlangıç kayma şekilleri 74
Şekil 72. SWIS grubuna ait deney ve Ansys yatay kuvvet – deplasman grafikleri 75
Şekil 73. SWLIS grubu duvar elemanın ön görünüşü ve yan görünüşü 76
Şekil 74. SWLIS grubu duvar elemanların sınır koşulları ve yükleme durumları 77
Şekil 75. SWLIS grubu analiz sonucunda oluşan başlangıç kayma şekilleri 77
Şekil 76. SWLIS grubuna ait deney ve Ansys yatay kuvvet – deplasman grafikleri 78
Şekil 77. SWMLIS grubu duvar elemanın boyuna ve enine kesiti 80
Şekil 78. SWMLIS grubu duvar elemanların sınır koşulları ve yükleme durumları 80
Şekil 79. SWMLIS grubu analiz sonucunda oluşan başlangıç kayma şekilleri 81
Şekil 80. SWMLIS grubuna ait deney ve Ansys yatay kuvvet – deplasman grafikleri 82
Şekil 81. DWMLIS grubu duvar elemanın boyuna ve enine kesiti 83
Şekil 82. DWMLIS grubu duvar elemanların sınır koşulları ve yükleme durumları 84
Şekil 83. DWMLIS grubu analiz sonucunda oluşan başlangıç kayma şekilleri 84
Şekil 84. DWMLIS grubuna ait deney ve Ansys yatay kuvvet – deplasman grafikleri 86
Şekil 85. Makro boyutlu basınç elemanların perspektif görünüşleri 87
Şekil 86. MSWC grubu duvar elemanının ön görünüşü ve yan görünüşü 90
Şekil 87. MSWC grubuna ait basınç deney düzeneği ve sınır koşulları, yükleme durumu 91
Şekil 88. MSWC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli 91
Şekil 89. MSWLC grubu duvar elemanının ön görünüşü ve yan görünüşü 93

Şekil 90. MSWLC grubuna ait basınç deney düzeneği ve sınır koşulları, yükleme durumu 94
Şekil 91. MSWLC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli 94
Şekil 92. MSWMLC grubu duvar elemanının boyuna ve enine kesiti 96
Şekil 93. MSWMLC grubuna ait basınç deney düzeneği ve sınır koşulları, yükleme durumu 97
Şekil 94. MSWMLC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli 98
Şekil 95. Makro boyutlu basınç elemanların deney ve Ansys sonuçları 99

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltma	Açıklama
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
DOF	Degree Of Freedom (Serbestlik Derecesi)
DWMLC	Mikro boyutlu çift katmanlı kireç harç + metal bağlantılı basınç deney numunesi
DWMLIS	Mikro boyutlu çift katmanlı kireç + metal bağlantı elemanlı başlangıç kayma deney numunesi
h/t	Yükseklik-Genişlik oranı
KTO	Konya Ticaret Odası
MSWC	Makro boyutlu tek katmanlı harçsız basınç deney numunesi
MSWLC	Makro boyutlu tek katmanlı kireç harçlı basınç deney numunesi
MSWMLC	Makro boyutlu tek katmanlı kireç harç + metal bağlantılı basınç deney numunesi
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi
SWC	Mikro boyutlu tek katmanlı harçsız basınç deney numunesi
SWIS	Mikro boyutlu tek katmanlı harçsız başlangıç kayma deney numunesi
SWLC	Mikro boyutlu tek katmanlı kireç harçlı basınç deney numunesi
SWLIS	Mikro boyutlu tek katmanlı kireç harçlı başlangıç kayma deney numunesi
SWMLC	Mikro boyutlu kireç harç + metal bağlantılı basınç deney numunesi
SWMLIS	Mikro boyutlu tek katmanlı kireç + metal bağlantı elemanlı başlangıç kayma deney numunesi

1. GİRİŞ

Yığma yapıların tarihten günümüze kadar gerek dünyada gerek ülkemizde çok tercih edilen yapı tiplerinden biridir. Yığma yapılar, yüklerini duvarlar vasıtası ile taşıyıp döşeme, kiriş veya temele aktaran yapılardır. Yığma yapılar genellikle doğal taş, gaz beton briket, kerpiç ve tuğla gibi malzemelerin harç yardımıyla birbirine bağlanması ile inşaa edilen yapılardır. Mühendislik hizmeti gerektirecek betonarme, çelik, kompozit taşıyıcı sisteme sahip yapılara kıyasla, ekonomik malzeme tercihi, kırsal bölgelerde yerel malzemelerle kolay temin edilmesi, geleneksel yığma yapıların yaygın kullanılmasına sebep olmuştur. Ayrıca bilişim teknolojinin gelişmediği dönemlerde betonarme ve çelik yapıların yerini daha çok yığma yapılar yer almıştır. Buna rağmen eski medeniyetlere ait yığma yapıların bazıları günümüzde halen ayakta durmaktadır. Betonarme yapı ve çelik yapıların mühendislik hesaplamaları günümüzde standart oluştursa da yığma yapıların (kullanılan malzeme açısından) mühendislik hesaplamasının zor olması ve yapılan bazı sayısal analiz çözümlerine yakın sonuçlar elde edilemediği için standartlar tam oluşmamıştır. Hem dünyada hem ülkemizde yığma yapıların standarda en yakın durumuna getirilmesi için araştırma ve geliştirme çalışmaları günümüzde devam etmektedir. Buna bağlı olarak yığma duvarlar için deneysel çalışmalar ve sayısal analiz çalışmalar günümüzde hız kazanmıştır. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile sayısal analiz sonuçları arasındaki farklılıkları da ölçülmeye başlanmıştır. Bu farklılığın ölçme sebeplerinden biri de sayısal analiz çözümlerin, deneysel çalışmalardan daha hızlı sonuç vermesidir. Ancak sayısal analiz çalışmalarında ağ elemanı sayısının artması ile çözüm süresi de artmaktadır. Bu çözüm süresi için günümüz işlemci çekirdek sayıları halen yetersiz kalmaktadır. Örnek verecek olursak ekran kartı gücünün zayıf olduğu dönemlerde üç boyutlu görüntü alma işlemi için işlemci çekirdekler kullanılırken, günümüzde ekran kartı güçleri büyük hız kazanmaya başlamıştır. Buna bağlı olarak günümüzde ekran kartında bulunan işlemci sayıları normal çözücü işlemcilerden yaklaşık 1000 kat fazla olduğundan, günümüzde işlemciler bir dosyayı 1000 saatte çözümü yaparken ekran kartları aynı dosyayı yaklaşık 1saatte bitirebilmektedir. Buna bağlı olarak makro boyutlu gibi büyük yapıların analiz yapılması çok uzun süreceği etkisiyle birlikte düğüm sayıları azaltma yöntemi ile ve zaman adımları kısaltma yöntemiyle çözüm yapılırsa gerçeğe yakın sonuçlar elde edilemeyecektir. Günümüzde hız kazanan görüntü

işleme teknolojilerine ait ekran kartı bellek kapasitelerinin genişlemesi ile çok geniş ve daha fazla düğüm noktalarını rahatlıkla hızlı bir şekilde işleyebilmektedirler. Ancak yığma yapılar için statik ve dinamik analiz yöntemi ile yapılan sayısal analiz çalışmalar işlemci çekirdekleri üzerinde çalıştığından, çözüm süresi açısından görüntü işleme teknolojisine sahip ekran kartlarının çok gerisinde kalmaktadır. Dolayısıyla gelecek yıllarda sayısal analiz çözümleri için donanım açısından ekran kartlarına dahil edilirse günümüze kadar yapılan makro boyutlu yapıların analiz çözümü için de büyük bir katkısı olacaktır.

Yığma duvarlar üzerinde günümüze kadar birçok deney çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar yığma yapılarda kullanılan yapı formlarına ve malzeme türlerine göre farklılıklar göstermektedir. Yığma duvarların taşıma kapasitesini, basınç altında ve kayma etkisinde ne kadar deplasman yaptığını, deprem yükleri etkisini, harçların duvara olan etkisini, nadir görülen çalışmalardan duvarların taşıyıcı elemanlarını birbirlerine bağlayacak olan metal elemanlarından oluşan kenet ve zıvanaların etkisini vb. araştırmak ve ölçmek için buna benzer farklı alanlarda laboratuvar çalışmaları yapılmaktadır.

Günümüzde değişik mühendislik programları mevcuttur. Bu programlar elektrik, elektronik, inşaat, makine, uzay ve havacılık mühendisliği vb. alanlarında kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe bulunan farklı yapı malzemesine ait yapıların analizinin doğrulanması için sayılar çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar iki ve üç boyutlu olarak farklı yöntemler ile çözülmektedir. Bu analiz programlardan bazıları sonlu elemanlar yöntemini (SEY) esas alan Ansys, Abaqus, Lusas, Diana, Sap 2000 vb. birçok yazılım kullanılmaktadır. Çeşitli yazılım mühendislerinden elde edilen sayısal sonuçlar, deneyde elde edilen sonuçlarla kıyaslanması için birçok çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla deneylerde elde edilen sonuçlara ulaşmak için hem zaman açısından uzun sürmekte hem işçilik ve maliyet açısından zor duruma düşürmektedir. Bu deneyde yapılan zorlu koşulların önüne geçmek için çeşitli sayısal analiz programları tercih edilmiştir. Bu çalışmada Ansys yazılımı tercih edilmiş olup, deneyde elde edilen sonuçlar ile Ansys analizi sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

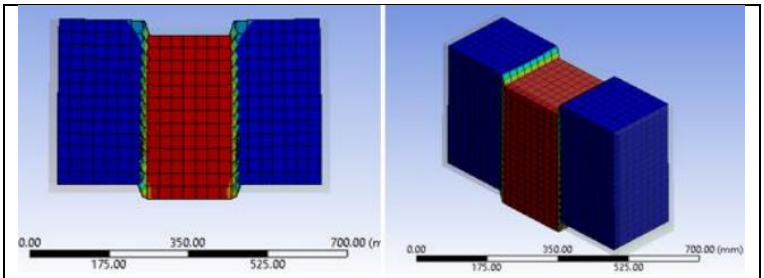
Subaşı, R.O. (2018) yüksek lisans tezinde taşıyıcı duvarların davranışını incelemek için deneysel ve nümerik çalışma yapmıştır. Bu çalışmada bims duvar elemanları iki eksenli çevrimsel yük etkisi altında mekanik davranışını belirlemiştir. Aynı zamanda üç noktalı kesme testi deneylerinden elde edilen veriler ile sayısal model tekniği de kullanılarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Bu nümerik çalışmada ANSYS paket programı ile mikro modelleme yöntemi kullanarak analizini gerçekleştirilmiştir. Duvar elemanları ile harçlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde ortaya çıkan kuvvet-yer değiştirme eğrileri ile matematik modelde kullanılacak olan kuvvet-yer değiştirme eğrileri idealleştirilerek süneklik katsayıları hesaplanmıştır. Bu çalışmada nümerik modelde kullanılan kuvvet-yer değiştirme eğrisi ile referans deneylerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisinin ve süneklik kapasitelerinin yakın olduğu tespit edilmiştir.



a) Genel görünüm b) Yakından bakış

Şekil 1. Referans numunelerinin kuvvet-yer değiştirme ilişkileri

(Kaynak: Subaşı, R.O. 2018)



a) Yan görünüş b) Perspektif görünüş

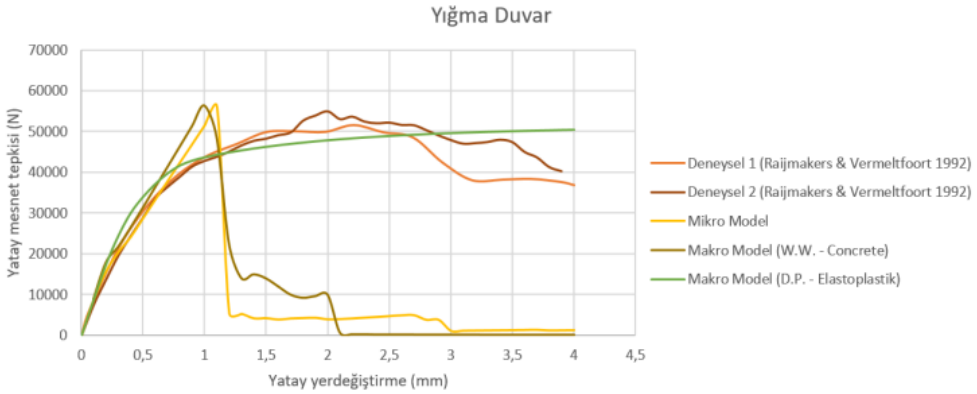
Şekil 2. Sayısal analizde meydana gelen toplam deformasyon

(Kaynak: Subaşı, R.O. 2018)

Oluşturulan sayısal modelde elemanın tipi, malzeme modeli ve akma-kırılma kriterleri belirlenerek doğrusal olmayan analiz ile duvar biriminin kayma, çatlak durumu ve süneklik kapasitesini incelemişlerdir. Bims duvar birimlerinin doğrusal olmayan davranışını yansıtabilmek için Von/Mises akma kriterinden yararlanmışlardır (Subaşı, R.O. 2018).

Kömürcü, S. (2017) yüksek lisans tezinde yığma birimler ve harç kullanılan kompozit bir yapı oluşturan yığma duvarlar, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek kullanılan teknikler araştırmışlardır. Sayısal modellemede kullanılan yığma duvarların düzlem içi yükleme sonucunda kırılma mekanizmaları analiz edilmiştir. Bu çalışmanın üçüncü bölümünde heterojen ve homojen modelleme teknikleri incelenmiştir. Doğrusal davranış ve doğrusal olmayan davranış gösteren malzemeler açıklanmıştır. Basınç ve çekme dayanımları eşit olan malzemeler için Tresca ve Von Mises kırılma hipotezleri incelenmiştir. Ancak basınç ve çekme dayanımları farklı olan malzemeler için Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Brester-Pister ve Willam-Warnke kırılma hipotezleri incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda sonlu eleman analizlerinde Willam-Warnke kırılma hipotezi ve Drucker-Prager hipotezlerinden yararlanılmıştır. Bu çalışmanın dördüncü bölümünde yığma duvarların ANSYS sonlu eleman yazılımında doğrusal olmayan analizlerde Newton-Raphson (N-R) yöntemi hakkında bilgiler verilmiştir ve SOLID 65 elemanı doğrusal olmayan analizlerde kullanılarak analizler sonucunda meydana gelen çatlaklar hakkında bilgiler verilmiştir. Yığma dolu duvarda mikro modelleme tekniği kullanılarak yapılan analizler sonucunda gerilmeler ve şekil değiştirmeler incelenmiştir. Yığma duvarın elestisite modülü, homojenleştirme metoduyla duvar üzerinden alınan elementer parçası incelenerek belirlenmiştir. Yığma duvarlarda birinci makro modelleme tekniği olarak Concrete malzeme ve Willam-Warnke hipotezi kullanılmıştır. İkinci makro modelleme ise elastoplastik malzeme ve Drucker-Prager hipotezi kullanılarak ANSYS yazılımında sonlu eleman yöntemiyle analiz sonuçları test edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda elde edilen yatay mesnet tepkisi-yatay yer değiştirme diyagramları ile deneysel çalışmayla olan uygunluğu incelenmiştir. Aynı çalışmanın beşinci bölümünde geometrik ve malzeme özellikleri literatürden seçilen boşluklu yığma duvar deneysel çalışmaya ait olup makro ve mikro modelleme teknikleri kullanılmış ve analiz edilmiştir. Boşluklu yığma duvarlarda ilk olarak mikro modelleme kullanılmış daha sonra makro modelleme tekniği ile duvar iki

farklı özelliklere ait malzeme ve hipotez kullanılmıştır. Birinci makro modellemede Concrete malzeme ve Willam-Warnke hipotezi kullanılmıştır. İkinci makro modelleme ise elastoplastik malzeme ve Drucker-Prager hipotezi kullanılarak analiz sonuçları ANSYS yazılımında sonlu eleman yöntemiyle test edilmiştir. Düzlem içi yükler altında boşluklu duvarda meydana gelen analiz sonucunda ortaya çıkan şekil değiştirme ve gerilmeler incelenmiştir. Aynı zamanda artırılan düzlem içi yükleme sonucunda oluşan boşluklu duvar çatlakların dağılım aşamaları incelenmiştir. Bu analiz sonucunda oluşan kırılma mekanizması belirlenmiş olup bu duvarın kırılması bir model ile açıklanmıştır. Bulunan analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmış ve bu iki sonucunda uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Yığma duvar analizi sonucunda yatay mesnet tepkisi- yatay yer değiştirme grafikleri

(Kaynak: Kömürcü, S. 2017)

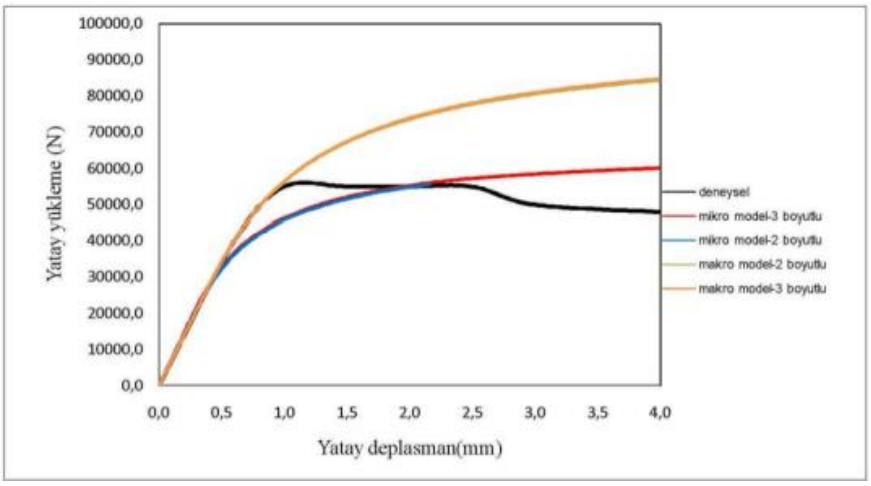
Doğan. U.U. (2019) yüksek lisans tezinde betonarme köprülerde donatının yapısal davranışa olan etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla, laboratuvar ortamında daha önceden başka bir çalışma için oluşturulmuş model bir köprü boyutları göz önüne alınarak ANSYS yazılımında sonlu eleman yöntemiyle sayısal çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, köprü 1/1 ölçekte ilk olarak donatısı olmayan beton malzeme üç boyutlu şeklinde ANSYS sonlu eleman analiz programı kullanılarak modellenmiştir. Bir sonraki aşamada aynı köprü modeline ek olarak donatı yerleştirilerek ANSYS sonlu eleman analiz programı kullanılarak modellenmiştir. İki farklı (donatılı ve donatısız) modele ait dinamik karakteristikler belirlenmiş ve donatısız model ile donatılı model arasındaki fark incelenerek donatının dinamik karakteristik üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

Demirkan. D. S. (2014) yüksek lisans tezi çalışmasında yığma yapılardaki faklı derz kalınlıklarının ve kullanılan taş boyutlarının yapının davranışına etkileri incelemiştir. Derz kalınlığı, taş örme tekniği gibi değişkenlere bağlı olarak yapının izotrop ve anizotrop malzeme tanımıyla analizi yapılmıştır. Farklı iki malzemenin heterojen olarak birleştirilmesi ile oluşturulan heterojen yapı elemanları genel olarak hesap kolaylığı için homojen kabul edilmektedir. Bu çalışmada, izotrop ve anizotrop modelleme ile analiz edilen örnek bir yapının analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca buna ek olarak aynı yapıda derz kalınlığının değişiminin ve taş diziliminde değişik ebatta malzeme kullanımının yapıya etkisi de incelenmiştir. Bir bölümde, örnek taşıyıcı duvar modelleri oluşturulup SAP 2000 programı ile anizotrop malzeme özellikleri bulunmuştur. Bir başka bölümde ise, örnek bir yığma yapıya farklı malzeme bilgileri girilerek yapı davranışındaki değişimler tespit edilmiştir. Bu farklılıklar incelenerek, izotrop veya anizotrop modellemenin sonuca etkisi, derz kalınlığının sonuca etkisi ve kullanılan malzemenin ebatlarındaki değişimin sonuca etkisi birbirleri ile mukayese edilerek, sonuçları yorumlamışlardır.

Doran, B., Aktan, S. (2017). Bu çalışmada, düzlem içi yükler etkisinde kalan tarihi yığma duvarların üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi için bir bünyesel modelleme tekniği önermişlerdir. Tarihi yapılarda kullanılan harcın yığma birimlere nazaran mekanik olarak zayıf olması, bu etkiyi sayısal modelleme çalışmalarına yansıtılmasını gerektirmiştir. Bu kapsamda, modellemede derz bölgelerine yoğunlaşan bir yaklaşım olarak ‘sanal birleşim bölgesi malzemesi’ tanımlanmıştır. Çalışmada önerilen malzeme modeli, yığmanın gerilme birim şekil değiştirme davranışını ifade etmek üzere, geliştirilmiş Von-Mises akma kriteri ile Oliver hasar modeli yaklaşımlarının, ihtiyaç duyduğu malzeme parametreleri dikkate alınarak birleştirildiği elasto-plastik hasar mekaniğinden türetilmiştir. Plastik şekil değiştirme için, kırılma yüzeyindeki çekme ve basınç gerilme değerlerini ayrı ayrı dikkate alan geliştirilmiş von-Mises plastisite modeli ile hasar mekaniğindeki şekil değiştirme artışı Oliver vd. (1990) modeli kullanılarak ifade edilmiştir. Sayısal model sonuçları ve kırılma modları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır.

Kaya. Ç. (2010). Bu çalışmada, donatısız yığma duvarların doğrusal olmayan analizi ile ilgili modelleme tekniklerini araştırmıştır. Ancak literatürde donatısız yığma duvarlarla ilgili çok az sayıda deneysel veri bulunmuştur ve deneysel verilerle uyum gösteren uygun

sayısal modelleme tekniği henüz tam olarak ortaya konamamıştır. Bu çalışmada, elastik-plastik hesapta kırılma kriteri olarak Drucker-Prager modeli kullanılmıştır. Drucker-Prager kırılma kriterinin ihtiyaç duyduğu malzeme parametreleri kohezyon ve içsel sürtünme açısıdır. Bu tez kapsamında aynı zamanda, anılan malzeme parametrelerinden kohezyon değerleri, içsel sürtünme açısı sabit alınmak suretiyle araştırılmıştır. Bu bağlamda, literatürde yer alan donatısız yığma duvarlar farklı sonlu eleman tipleri, mikro ve makro gibi modelleme teknikleri kullanılarak sonlu elemanlar tekniği ile çözümleme yapılmıştır. Analiz sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmış, parametrelerin uygunluğu sınanmıştır.



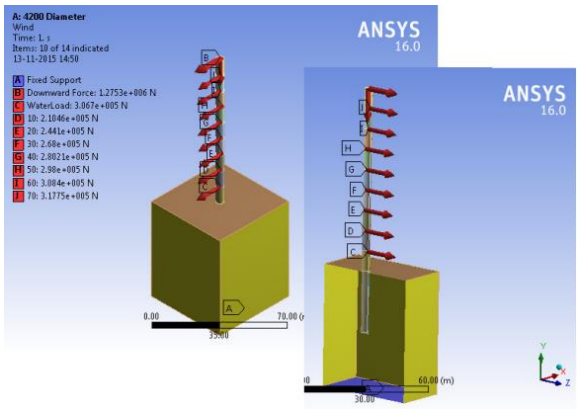
Şekil 4. Makro ve mikro modelde 3 boyutlu ve 2 boyutlu sonlu elemanların, deneysel yatay yük-yer değiştirme eğrileri ile karşılaştırılması

(Kaynak: Kaya. Ç. 2010)

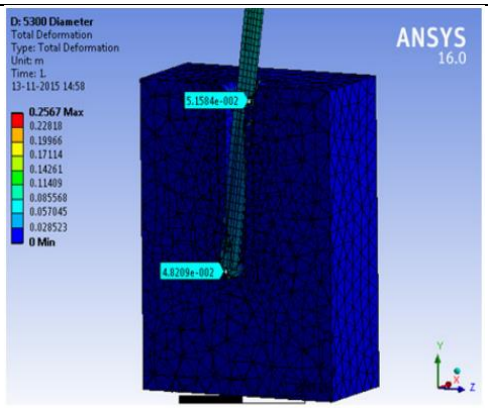
Ural, A., Doğangün, A. (2009). Bu çalışmada, yanal yüklü desteksiz yığma duvar uzunluğunun duvarın kayma davranışındaki etkilerini incelemişlerdir. Pencere boşluklu bir duvarın yığma duvar modellerine ait doğrusal olmayan analizler değerlendirilmiştir. Analizler esnasında, tuğlalar elastik, tuğlalar arasındaki harcın ise elastik ötesi davranış gösterebildiği kabul edilmiştir. Yığma duvar modeli üstte bir yatay hatıl ve ikisi pencere kenarlarında olmak üzere toplam dört düşey hatıllar tanımlanmıştır. Modellemeler basitleştirilmiş mikro modelleme yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar yönetmelik koşullarıyla karşılaştırmalı bir biçimde verilmiştir. Gerçekleştirilen analizler ışığında optimum dolu gövdeli yığma duvar uzunluğu 1,5m ile 1,8m arasında olması ideal bir durum olarak ortaya çıkmaktadır.

Ural. A. (2009). Yığma yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi isimli çalışmanın ilk bölümünde, mevcut literatür özeti, yığma yapı sistemleri, kullanılan malzemeler, ilgili yönetmelik ve standartlar ile yığma yapıların statik ve dinamik yükler altındaki davranışları doğrusal ve doğrusal olmayan yanlarını ele almışlardır. Çalışmanın ikinci bölümünde, geliştirilmiş olan bir adet pratik deprem hesabı programı ile 2 adet sonlu elemanlar programı tanıtılmış ve bunlarla birlikte LUSAS ve DIANA programları yardımıyla çeşitli analizler gerçekleştirmiştir. Ayrıca, yığma duvar dayanımlarını ve yığma yapıların deprem davranışlarını etkileyecek olan bazı parametreler yapısal modeller yardımıyla irdelemiştir. Bu bölümün sonunda depremde hasara uğramış gerçek bir yığma yapının analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, harç ve yığma birimlerin dayanımlarının, örgü biçimlerinin ve hatılların yerleştirilme biçimlerinin duvarın yük taşıma kapasitesine etkilerini ortaya koymuş, bu konuda çalışacak olanlara açık kaynak kodlu bir sonlu elemanlar programının yazılımını sunmuştur.

Jose N. M., Dr. Mathai A. (2015). Açık deniz rüzgâr türbini monopilinin çevresel yükler nedeniyle yanal deformasyonu üzerine yapılan bir çalışmada, kumlu zemin üzerine kurulmuş açık deniz rüzgar türbini monopilinin yer değiştirme davranışını değerlendirmek için analitik bir çalışma yapmışlardır. Sistem, ANSYS'te 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli olarak modellenen kazık, türbin kulesi ve zeminden oluşmaktadır. Toprağın açık bir malzeme olduğu ve rüzgar ve dalga yüklerinin türbin kulesi üzerinde statik yükler olarak etki ettiği düşünülerek bir zaman alanında açık bir dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Monopilin zemindeki davranışı, zemin kazık etkileşimi dikkate alınarak analiz etmişlerdir. Çalışma, kazık yer değiştirmesi ve kazık eğim açısının zemin özelliklerine ve kazık gömülü uzunluğuna ve kazık çapına bağlı olduğunu göstermiştir.



a) Ansys'te monopil, kule ve toprak modeli



b) 5.3 m çaplı kazık ve kazık topuğunun deniz yatağı seviyesinde yer değiştirmesi

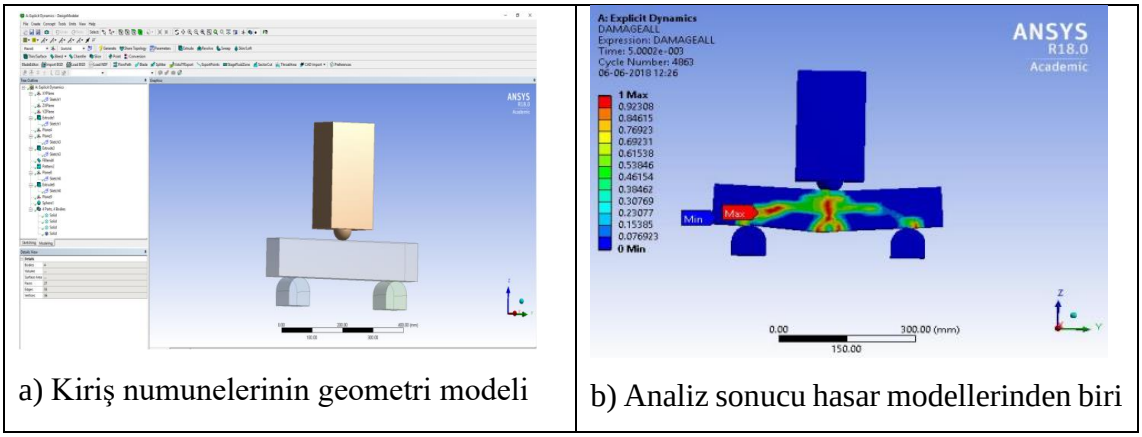
Şekil 5. Ansys modeli ve dinamik analiz sonucu

(Kaynak: Jose N. M., Dr. Mathai A. (2015))

Köksal E., Köksal H. O., Yıldırım H., (2004). Eksenel basınç altında beton briket yığma prizmaların sonlu eleman analizi isimli çalışmada, yığma prizmaların basınç deneyleri, basınç mukavemetini ve basınç mukavemetine bağlı diğer kriterleri elde etmek için yapmışlardır. Standart bir deney yöntemi bulunmamaktadır. Araştırmalar h/t oranı 2 ile 5 arasında olan deney numunelerinin denenmesinin gerçeğe uygun sonuçlar verdiğini göstermektedir. Prizmaların davranışlarını ayrıntılı incelemek için deneylerin doğrusal elastik sonlu eleman analizleri de yapılmıştır. Bu çalışmada; daha önceki çalışmalarda beton için geçerliliği gösterilen Drucker-Prager akma kriteri seçilmiş ve LUSAS programı kullanılarak beton briketlerin doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri başarı ile gerçekleştirilmiştir. Drucker-Prager akma kriterinin parametrelerinden olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri, literatürde yer alan bazı deneylerin üç boyutlu sonlu eleman analizleri gerçekleştirilerek belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar; eksenel basınç altında yığma prizmaların davranışının, gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri ile başarılı bir şekilde tahmin edilebildiğini göstermişlerdir.

Mishra S., Rizwanullah, Gangwar S., Sharma H., K. (2019) çalışmalarında ultra yüksek performanslı fiber takviyeli beton kirişlerin darbe performansları üzerindeki etkisini incelemek için 35 MPa ve 140 MPa basınç değerine sahip beton kirişlerde değişen yüzdelerde lifler üzerinde darbe analizi yapmışlardır. 500 mm uzunluğa sahip 100 mm x 100 mm boyutlarındaki hedef kitlesi incelenmiştir. Kirişler, dikdörtgen darbe veya 50 kg ağırlığında bir darbeye maruz bırakılmıştır. ANSYS V18.0 Design Modular tarafından

500 mm ile 2000 mm arasında düşme yüksekliği aralığı için modellenmiştir. Bu kirişlerin farklı hızlarda ve değişen lif yüzdelerinde darbe dayanımı analitik olarak bulunmuştur. Sonlu elemanlar yazılımı ANSYS'te sayısal incelemeden elde edilen sonuçlar, deformasyon, gerilme, gerinim, enerji emme kapasitesi ve düşme etkisinden kaynaklanan hasar modeli açısından sunmuşlardır.



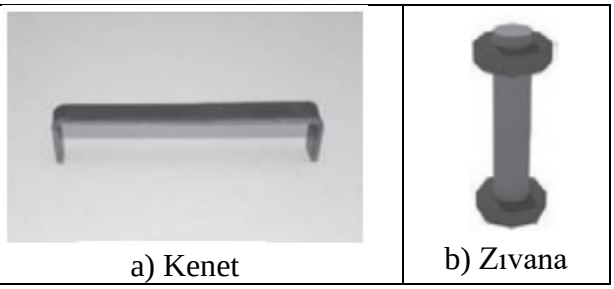
a) Kiriş numunelerinin geometri modeli

b) Analiz sonucu hasar modellerinden biri

Şekil 6. Kiriş numunelerinin geometrik modeli ve hasar modeli

(Kaynak: Mishra, Rizwanullah, Gangwar, Sharma, 2019)

Ural, A., Kara, M. E., (2015). Bu çalışmada, laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalar sunmuşlardır. Farklı Kenet-Zıvana sistemlerine sahip aynı ebattaki yığma duvar numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda sistemlerin yığma duvarların kesme (kayma) kapasitesine ne tür bir etkisi olduğu incelemişler, fotoğraflar yardımıyla çeşitli yorumlarda bulunmuşlardır. Çalışmanın sonunda, günümüzde yapılacak olan restorasyon çalışmalarına ışık tutabilecek önemli bazı sonuçlara ulaşılmıştır.



a) Kenet

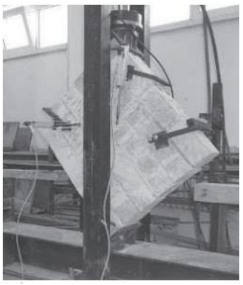
b) Zıvana

Şekil 7. Duvar numunelerinde kullanılan kenet ve zıvana

(Kaynak: Ural, Kara, 2015)



a) Bitmiş bir duvar numunesi



b) Deneylerin yükleme-ölçüm düzeneği

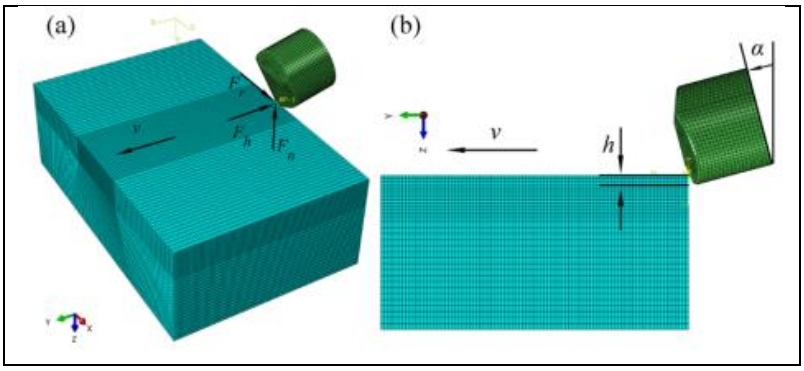


c) Referans duvarı numunesinin deney sonrası görüntülerinden biri

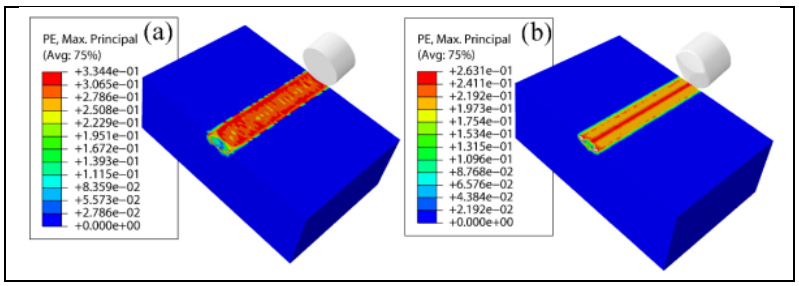
Şekil 8. Duvar numunesi, deney düzeneği ve deney sonrasındaki görüntüler

(Kaynak: Ural, Kara, 2015)

Liu, J., Zheng, H., Kuang, Y., Xie, H., Qin, C. (2019). Bu çalışmada sert aşındırıcı oluşumlarda geleneksel polikristalin elmas kompakt (PDC) uçlarının düşük kaya kırma verimliliği, düzlemsel yapıdan düzlemsel olmayan yapıya doğru PDC kesme elemanlarının gelişimini teşvik eder. Yenilikçi bir düzlemsel olmayan kesici olarak, üç çıkıntılı elmas elemanlı (3-RDE) kesicinin tasarımı ve araştırması henüz emekleme aşamasındadır ve kaya kırma mekanizması ve yasaları henüz net değildir. Bu bildiride, 3-RDE kesici ile dinamik kaya kırmanın üç boyutlu (3B) sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sayısal modelin doğruluğu deneysel verilerle doğrulandı. Daha sonra 3-RDE kesici ile geleneksel kesici arasındaki kaya kırma mekanizmasının farkı incelenmiştir. Geri talaş açısı, kesme derinliği, dönme açısı ve kaya özelliklerinin kaya kırma verimliliği üzerindeki etkileri de analiz edilmiştir. Sonuçlar, geleneksel PDC kesme kaya kırma kesicisinin aksine, 3-RDE kesicinin esas olarak kırma ve kesme yoluyla kayayı kırdığını ve kaya kırma verimliliğinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Küçük bir geri tepme açısı ve makul kesme derinliği, kaya kırma verimliliğini artırmaya katkıda bulunur; dönme açısının varlığı kaya kırılmasına karşı iletken değildir. Saha uygulaması, geleneksel kesici ile karşılaştırıldığında, 3-RDE kesicinin formasyona daha kolay nüfuz ettiğini ve daha az tork gerektirerek daha kararlı olduğunu göstermektedir. Araştırma sonuçları, 3-RDE PDC bitlerinin tasarımı ve üretimi için faydalı olabilir.



Şekil 9. Kesici kaya sisteminin sonlu eleman modeli:
(a) Aksonometrik görünüm; (b) Sağ yan görünüş
(Kaynak: Liu, Zheng, Kuang, Xie, Qin, 2019)

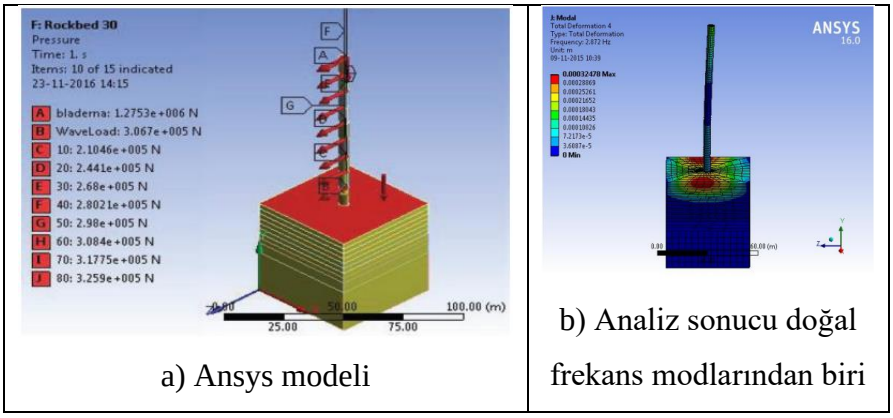


Şekil 10. Kaya kesme işleminde plastik gerilme
(a) Geleneksel kesici; (b) 3-RDE kesici
(Kaynak: Liu, Zheng, Kuang, Xie, Qin, 2019)

Pryhorovska, T. O., Chaplinskiy, S. S., Kudriavtsev, I. O. (2015). PDC matkap uçları için kesiciler tarafından kaya kütlesi kesiminin sonlu eleman modellemesi çalışmasında, kesme kuvvetlerinin makul tahminlerini sağlayabilen ve aynı zamanda parçalanma sürecinin temel özelliklerini yakalayan bir sonlu eleman prosedürü geliştirmeyi amaçladılar. Yayınlanmış laboratuvar kaya kazıma testleri, bu testler kayanın tüm temel özelliklerini kapsadığı için modelleme hedefleri olarak kullanılmıştır. İlk önce dikdörtgen bir kesiciden hem sığ kesimler hem de derin kesimler analiz edildi ve ardından bir disk kesiciden sığ kesimlerin modellenmesi izlenmiş. Kaya kesmenin, uygun bir modelleme parametreleri seçimi ile, enerji salınımı kırılma enerjisine eşit olduğunda bir elementi ortadan kaldıran bir element erozyon şeması olan bir plastisite-hasar modeli kullanılarak makul bir şekilde modellenebileceği sonucuna varılmıştır.

Jose, N., M., Mathai, A. (2018). Bu çalışmada kum üzerinde bir rüzgar kulesi ve türbinin doğal frekansını Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modal Analiz yapmışlardır. ANSYS programında zemin, türbin kulesi ve monopil olmak üzere üç boyutlu katı model olarak

modellenmiştir. Zemin, her katmanda farklı özellik verilerek modellenmiştir. Açık bir malzemeden oluşan türbin üzerindeki rüzgar, dalga vb. çevresel ve statik yükler verilerek açık dinamik analiz yapılmıştır. Dinamik analiz sonucunda, açık deniz rüzgar türbininin doğal frekansının zorunlu frekanstan çok uzakta olduğu sonucuna varmışlardır.



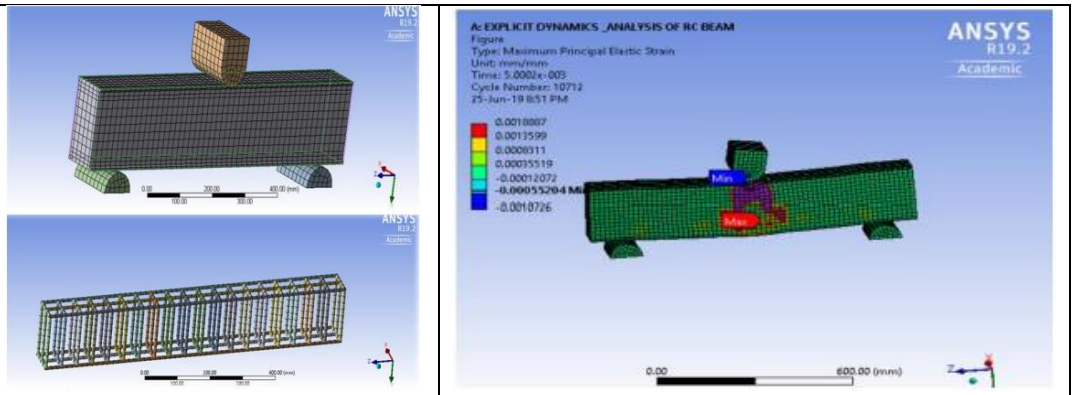
a) Ansys modeli

b) Analiz sonucu doğal frekans modlarından biri

Şekil 11. Ansys'de toprak, kule, monopil modeli ve doğal frekans modları

(Kaynak: Jose, Mathai, 2018)

Islam, M., T., Netula, O., Singh A., E., (2019). Bu makale, ANSYS programında yüksek hızlı analiz çözücüsü ile yapılan dinamik yükler altında RCC betonunun davranışını tartışmışlardır. Bu çalışmada donatı takviyeli beton kiriş üzerinde basınç testi yavaş hızda yapılmamıştır. RCC betonunu analiz etmek için ANSYS programı kullanılmıştır. Bu çalışmasının amacı, analizlerde temel formülasyonlara, malzeme özelliklerine vurgu yapılmıştır. ANSYS'de (hourglass) kum saati enerjisinin etkisiyle oluşan açık bir dinamik yaklaşımı kullanılmış ve donatı takviyeli kiriş üzerinde RCC betonunu analiz ederken Sonlu Elemanlar Yöntemi hakkında kısa bir bilgi vermişlerdir.



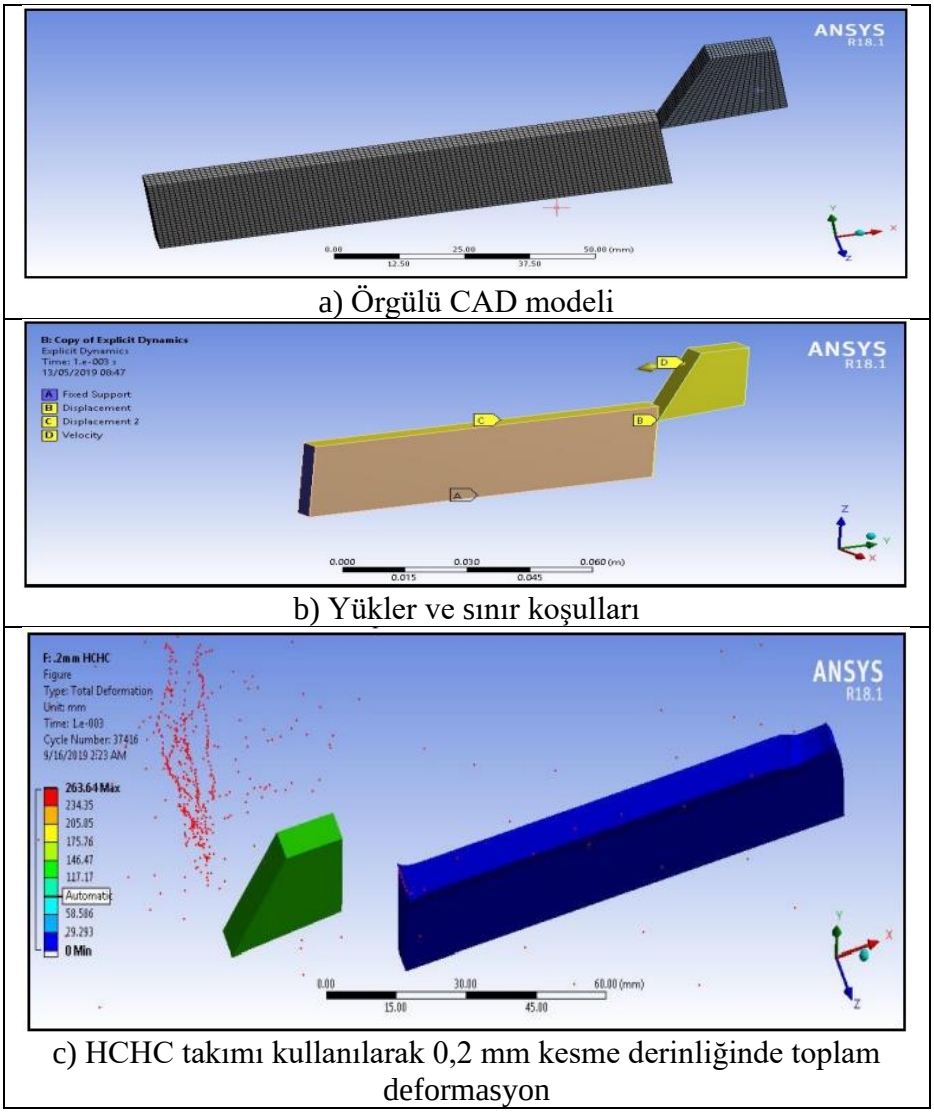
a) Takviye ağları

b) Maksimum elastik gerilme

Şekil 12. Takviye ağları ve maksimum elastik gerilme

(Kaynak: Islam, Netula, Singh, 2019)

Soni, R., Banchhor, R. (2019). Bu çalışmada, bir işleme takımı için istenen özellikler, aşırı sıcaklıklarda kesici takım malzemesinin ısıl iletkenliğine bağlı olarak yüksek kırılma mukavemetine ve sertliğe sahip olup olmadığı araştırılmıştır. Mevcut araştırma, yüksek hız çeliğinden ve yüksek karbonlu kromlu çelikten oluşmaktadır. Buna bağlı olarak tek eksenli kesme takımının termal davranışını araştırılmıştır. Hareketli kesici takım ve sabit duracak olan çelik elemanları CAD tasarım paketi ile modellenmiştir. Daha sonra ".iges" dosya formatına dönüştürülerek ANSYS tasarım modellerine aktarılmıştır. Sonlu Eleman Analizine dayalı ANSYS programında açık dinamik kullanılarak termal analiz yapılmıştır (Şekil 13). Kesici takıma belirli hız ve farklı derinlikler verilerek gerilme deformasyon eğrileri oluşturulmuştur ve bu eğri grafiği üzerinde karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Bulgular, iki malzeme arasında karşılaştırma göstermiştir.



a) Örgülü CAD modeli

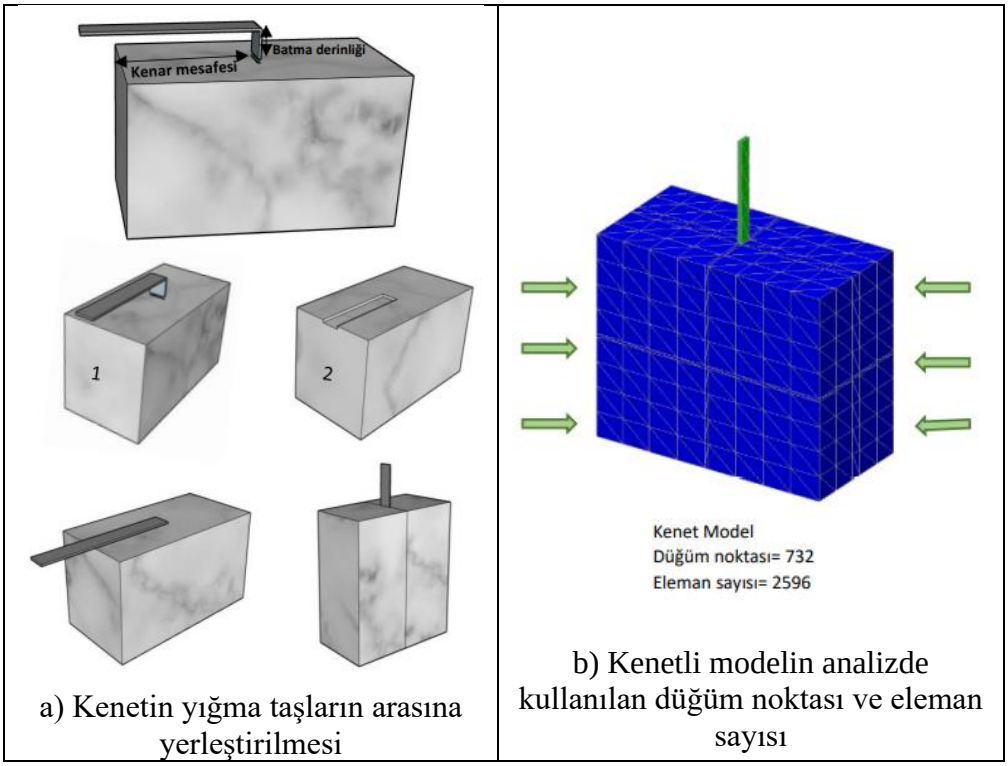
b) Yükler ve sınır koşulları

c) HCHC takımı kullanılarak 0,2 mm kesme derinliğinde toplam deformasyon

Şekil 13. Ansys kullanarak tek noktalı kesici takımın açık dinamik analizi

Lazim, Z., Ismail, A., E., Taib, I. (2020). Stent genişlemesi üzerine sonlu eleman analizi araştırmasının ön incelemesi ile ilgili çalışmasında, Yağ, plak vb. birikimi nedeniyle %70 oranında tıkanan kan damarına stent takılması ile ilgili çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada stent elastik sınırı aşarak genişler ve hedeflenen çapa ulaşana kadar plastik deforme olur. Paslanmaz çelikten oluşan stent elemanı ANSYS programında yer alan SS304 malzemesi kullanılmıştır. Bu stent genişletme simülasyonu için Sonlu elemanlar yöntemi ile Açık dinamik analiz yapmışlardır.

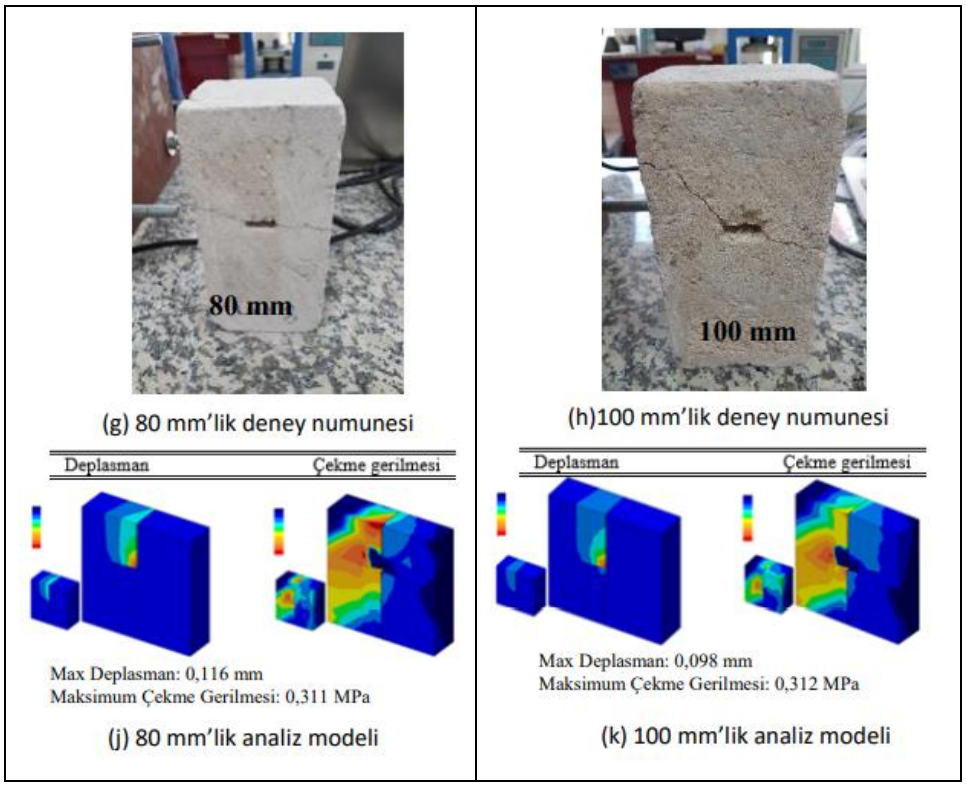
Çelik, T., Tanrıverdi Ş., Ural A., Fırat F., K. (2021). Yığma yapılarda kullanılan kenetlerin yapı davranışına etkilerinin incelenmesi çalışmasında, kenetlerin batma noktasının taşın kenarına olan mesafesi dikkate alınmış ve kenetlerin taşın kayma dayanımı üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar laboratuvarda gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmalar ise üç boyutlu model sonlu elemanlar yöntemini (SEY) esas alan LUSAS yazılımı kullanılmıştır. Taş kenarı ile batma noktası arasındaki mesafe deney ve analiz sonuçlarına göre incelenmiştir. Batma noktasının taşlar üzerindeki etkileri karşılaştırılmış ve incelenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak önerilerde bulunmuşlardır.



a) Kenetin yığma taşların arasına yerleştirilmesi

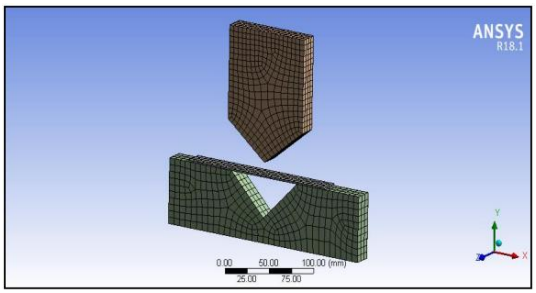
b) Kenetli modelin analizde kullanılan düğüm noktası ve eleman sayısı

Şekil 14. Kenet elemanının yerleştirilmesi ve kenetli modelin analizde kullanılan düğüm noktası ve düğüm sayısı

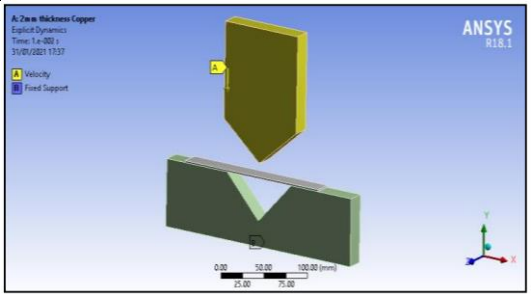


Şekil 15. Deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarından bazıları

Das, S., K., Pani, B., B. (2021). Sac Şekillendirmenin Açık Dinamik Analizi ve Tasarım Optimizasyonu çalışmasında, otomotiv ve havacılık endüstrileri tarafından kullanılan düz sac şekillendirme işlemi sırasında zımba ve kalıp arasında sac levhanın herhangi bir kusur olmadan gerekli şekil ve boyutlu bir parçaya dönüştürmek istenmesi ile ilgili araştırma yapmışlardır. Mevcut araştırma, ANSYS programına ait Açık Dinamik analiz kullanılarak bakır malzemesinden oluşan farklı sac kalınlığına sahip enerji absorpsiyon özelliklerini araştırmışlardır. Uc boyutlu modelleme CAD ve sonlu elemanlar analizi ise ANSYS yazılımı (ANSYS design Modeler) kullanılarak yapılmıştır. Tasarım optimizasyon için kalıp uzunluğu ve kalıp açısı dikkate alınmıştır. Malzeme için eşdeğer Gerilme (Von-misses Gerilme), Toplam Deformasyon, İç Enerji ve Kayma gerilme grafikleri oluşturulmuştur. Son olarak sonuçlar, gerilmenin büyüklüğü ve yerini, iç enerjinin modelini, deformasyonu belirlemek için ortaya çıkarmışlardır (Şekil 16).



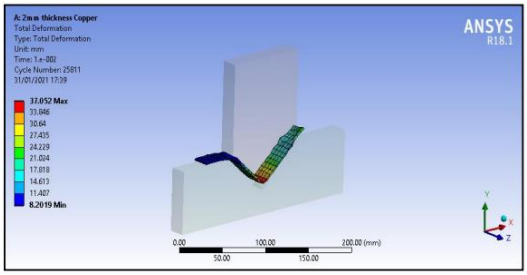
a) Zımba, kalıp ve sac metal örgü modeli



b) Yükler ve sınır koşulu

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	8300	kg m^-3		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young'...			
6	Young's Modulus	1.1E+11	Pa		
7	Poisson's Ratio	0.34			
8	Bulk Modulus	1.1458E+11	Pa		
9	Shear Modulus	4.1045E+10	Pa		
10	Specific Heat	385	J kg^-...		

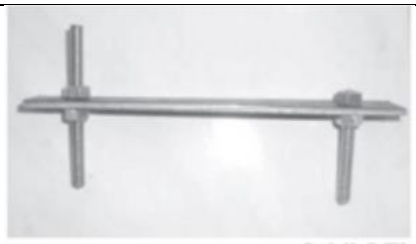
c) Sac levha malzemesinin özellikleri



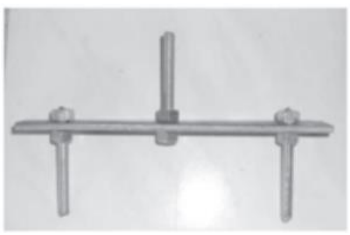
d) 0.01 saniyede oluşan deformasyon

Şekil 16. Sac levha şekillendirmenin açık dinamik analizi ve tasarım optimizasyonu

Karabörk, T., Çelik, T., (2015). Tarihi Taş Yığma Duvarların Kayma Dayanımını Arttırmak Amacıyla Geliştirilen Metal Bağlantı Elemanları konusu olan çalışmada, yığma duvarlarda çeşitli metal bağlantı elemanların kayma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Bağlantı elemanlarından oluşan üç farklı kenet geliştirmişlerdir. 5 adet boyutu 150 x 650 x 730 mm olan taş duvara horasan harcı ve kenet elemanları da eklenerek üretilmiştir. Diyagonal basınç deneyleri yapılırken kenet elemanlarının duvarın kayma etkisi ölçülmüştür. Deneysel çalışmanın sonucunda, geliştirilmiş yeni bağlantı elemanlarından oluşan kenetlerin yığma taş duvarın sünekliğini ve kayma dayanımlarını dikkate değer oranda arttırdığını görmüşlerdir.



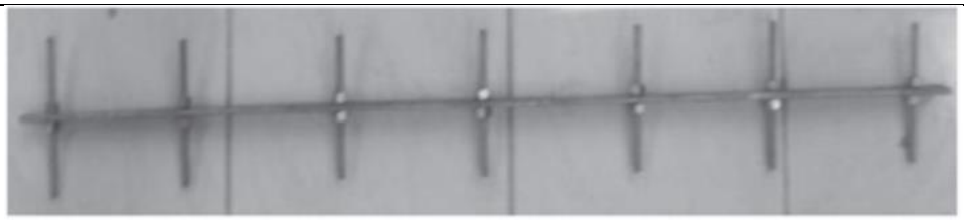
a) Tip I kenet



b) Tip II kenet

Şekil 17. Kullanılan kenet tipleri

(Kaynak: Karabörk, Çelik, 2015)



Tip III kenet

Şekil 18. Kullanılan kenet tipi

(Kaynak: Karabörk, Çelik, 2015)

Fırat, F. K., Tanrıverdi Ş., Ural, A., Kara M. E., (2022). Bu çalışmada, hasar görmüş kubbelerin, kenet ile güçlendirme tekniğini araştırmak için deneysel çalışma yapmışlardır. 1,0 m yüksekliğinde 2,0 m çapında sekizgen kasnaklı kubbenin düşey kuvvet altındaki davranışını incelemişlerdir. Taşıma kapasitesine ulaşan kubbenin üzerinde bazı çatlaklar tespit etmişlerdir. Bu çatlaklar bağlantı elemanlarından oluşan kenet kullanılarak giderilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda güçlendirilen kubbe tekrar düşey kuvvet altında deneysel olarak incelemişlerdir. Güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş referans kubbenin deney sonuçları karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır. Bu çalışmanın sonucunda kenet ile uygulanan güçlendirme yönteminin kubbenin taşıma kapasitesini artırmadığını tespit etmişlerdir.



a) Referans deney numunenin göçme sonucundaki hali



b) Kenet ile güçlendirilmiş kubbe numunesinin deney sonucundaki hali

Şekil 19. Referans deney numunenin ve kenet ile güçlendirilmiş kubbenin göçme sonucundaki durumları

(Kaynak: Fırat, Tanrıverdi, Ural, Kara, 2022)

Demir, C., (2012). Çok katmanlı tarihi taş yığma duvarların deprem yükleri altında davranışı konusu olan deneysel çalışmasında, eksenel basınç deneylerini tek ve çok katmanlı yığma duvar numuneler üzerinde yapmışlardır (Şekil 20). Bu deney sonucunda, kireç taşı olan malzemenin ortalama basınç dayanımını 18.0 MPa olarak elde etmişlerdir. Bununla beraber, taş birimlerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan taş yığma duvar parçasının basınç dayanımı bu değerin yaklaşık yarısı olarak elde edilmiştir. Moloz çekirdek katmanlı duvar parçalarından elde edilen basınç dayanımı da taş blokların yaklaşık %20'si mertebesindedir.



a) Dış katmanların yapımı

b) Moloz çekirdek katmanlı duvar inşaatı

c) Aletli krampların takılması

Şekil 20. Moloz çekirdekli taş duvar numunesi

Başlangıç kayma deneyleri ile kuru olan derzlerin taş numuneler arasındaki kayma davranışı incelenmiştir. Bu deneylerde, kuru derzlerdeki taş yüzeylerin pürüzlülüğünün sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Makine ile kesilen taşların yüzeyleri için sürtünme katsayısı 0.76, pürüzlendirme yapılan taşların yüzeyleri ise 0.74 olarak elde edilmiştir (Demir, 2012).

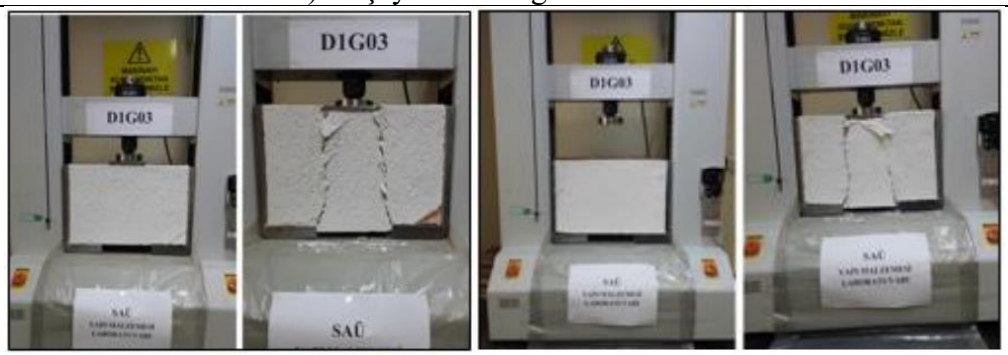
İstegün, B., Subaşı, A., Çelebi, E., (2019). Yapılan çalışmada sismik tekstil ile güçlendirilmiş düşey delikli yığma tuğla ve bims blokların üç noktalı kesme deneyi yapmışlardır (Şekil 22). Bu çalışmanın amacı güçlendirme uygulaması yapılmış yığma yapı birimlerinin kırılma şekli ve kayma kapasitesini ölçmektir. Üç noktalı kesme deneylerde kullanılan bims blokları ve tuğlalardan bazıları sismik tekstil malzemesi ile güçlendirme işlemi yapılmıştır. Güçlendirme işlemi, numunenin tek tarafına uygulanmıştır (Şekil 21). Bu deneysel çalışmanın sonucunda, tüm numuneler için kuvvet-deplasman ilişkileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Güçlendirilmemiş numuneler ile gerçekleştirilen deneylerde, duvar birimi-harç ara yüzeyleri boyunca kayma kırılmasının olduğu tespit edilmiştir. Sismik kumaş ve cam kürecik esaslı yalıtım sıvası ile güçlendirilen yığma elemanlarda süneklik ve dayanım kapasitesinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür.



Şekil 21. Çok eksenli sismik hibrit tekstil malzemesi



a) Düşey delikli tuğla numuneler



b) Bims bloklu numuneler

Şekil 22. Numunelerin deney öncesi ve sonrasındaki durumu

Zia, A., J., (2021) yaptığı doktora çalışmasında tasarlanan bireysel duvar numunelerinin mekanik özellikleri ile dayanımlarını deneysel olarak belirledikten sonra mikro boyutlu duvar numuneler kullanılarak basınç dayanımı, elastisite modülü ve başlangıç kayma dayanımı tespit edilmiştir (Şekil 23). Makro boyutlu duvar numunelerde ise duvarın düzlem içi kayma dayanımı, diyagonal basınç deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalardan sonra tek katmanlı duvarın basınç ve başlangıç kayma dayanımının incelenmesi için Abaqus programı ile analizleri yapılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

<table>
<tr>
<td>
a) Tek katmanlı numuneler (harçlı)</td>
<td>
b) Tek katmanlı numuneler (harç + metal bağlantı elemanları)</td>
<td>
c) Çift katmanlı numuneler (harç + metal bağlantı elemanları)</td>
</tr>
<tr>
<td>
d) Kenetsiz taş numunenin kırılma şekli</td>
<td>
e) SWC-02 numunesinin nihai yükten sonraki kırılma şekli</td>
<td>
f) SWLC-03 numunesinin nihai yükten sonraki kırılma şekli</td>
</tr>
</table>

Şekil 23. Başlangıç kayma deney için hazırlanan numuneler

Çapar, Y., ve arkadaşları, 2020., yaptıkları çalışmada, çok gövdeli analizde, kontakların geometriler üzerinde nasıl tanımlandığını, bir düğüm noktasında 3 öteleme ve 3 dönme hareketi olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahip olduklarını anlatmışlardır. İki yüzey arasında iki kontakların nasıl oluşturulduğunu ve kontak tiplerini anlatmışlardır.

Beer E., Russell Johnston, F. P., Ders Notu, J., & Acar, H., 2002 çalışmalarında, kuru sürtünme kanunları ile ilgili bilgi verilmiştir. Kuru yüzeyler için metal, ahşap, taş, deri, dünya yüzeyi, lastik ve beton vb. malzemeler arasında oluşan sürtünme katsayısının yaklaşık değerlerini tablo halinde sunmuşlardır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, numerik analizlerin gerçekleştirilmesi için, kesme taş ile yapılan katmanlı duvarların deneysel olarak araştırılması çalışmasında elde edilen bireysel ve duvar elemanlarına ait mekanik davranış sonuçları ile Sonlu eleman yöntemi tabanlı ANSYS programı analiz edilerek sonuçlar irdelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerin gerçekleştirilmesi için ANSYS programında yer alan Explicit Dynamics alt modülü üzerinden analiz yapılması uygun görülmüştür. Bu analiz türünün uygun görülmesinin sebeplerinden biri analiz yapılması istenilen elemanların hangi deplasmana, hangi kuvvete ve hangi basınç gerilmesine ulaştığında kırılmaların ve kırılma şekillerinin meydana geldiğini tespit etmektir. Aynı zamanda analizi gerçekleştireceğimiz modellenen elemanların kırılma şekillerinin nasıl oluştuğunu tespit etmek için detaylı çalışmalar yapılmıştır. Ancak literatür araştırmalarında Explicit Dynamics ile ilgili analizler sınırlı sayıda olduğu ve Explicit Dynamics'e uygun malzemelerin mekanik özellikleri ile ilgili çalışmalarının da sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Bu çalışmaların dışında Explicit Dynamics ile ilgili yapılan çalışmalar yüksek hızlarda gerçekleştirilen araba çarpma, merminin duvar panellerine çarpması, merminin duvar panelini delmesi, bazı yapı elemanlarına darbenin uygulanması, ticaret ve sanayi ortamlarında sık kullanılan torna aletleri ile metal, çelik, taş vb. malzemelerinin oyulması gibi çalışmalara yer verilmiştir. Ansys programında hazır verilen Conc35 MPa materyali seçilerek üzerinde parametre değişiklikleri yapılmıştır. Dolayısıyla tüm kesme taş malzemeler Conc35 MPa parametreleri değiştirilerek Conc50 MPa ve harç malzemeler ise Conc35 MPa parametreleri değiştirilerek Conc3 MPa olarak verilmiştir (Riedel et al. 2004, Riedel, et al, 2009). Metal bağlantı elemanlarından oluşan kenet ve zıvana elemanları ise Structural Steel parametresi üzerinde değişiklik yapılmıştır, ayrıntılı bilgiler Tablo 2'de sunulmuştur. Sabit ve hareketli mesnet elemanları ise Stuctural Steel seçilmiştir.

Mühendislik problemleri çözümünde sık tercih edilen mikro ve makro boyutlu olarak modellenen elemanlar "Kesme taş ile yapılan katmanlı duvarların deneysel olarak araştırılması" doktora tezi çalışmasında yer alan ölçülere göre referans alınarak AutoCAD ortamında üç boyutlu olarak modellenmiştir (Zia, A, J, 2021). Bir sonraki aşamada Ansys programına ait Explicit Dynamics modülü içinde yer alan Engineering Data alt modülünde Explicit özelliğine uygun materyal belirlendikten sonra üç boyutlu solid

elemanlar Explicit Dynamics modülü altında Geometry alt modülüne aktarılacaktır. Bir sonraki aşamada Explicit Dynamics alt modülünde yer alan “Model” alt modülü açılarak solid elemanlara sertlik davranışları ve malzeme özellikleri tanımlanacaktır. Bu solid elemanların birbirleriyle temas ilişkisi tanımlanmıştır. Bir sonraki aşamada ağ boyutlarının tanımlanması için “Mesh” sonlu eleman sayıları her eleman birimi için ayrı ayrı verilmiştir. Son aşamada gerekli analiz ayarları yapılarak sınır koşulları ve yükleme biçimleri de tanımlanarak, analiz çözümü yapılmıştır.

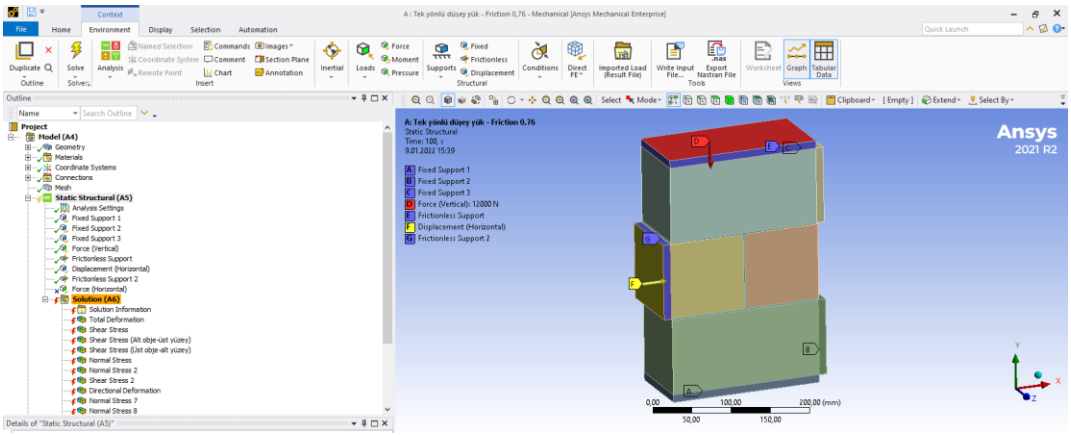
Her bölüm için ayrı ayrı yapılan basınç dayanımları ve kırılma şekilleri incelenerek gerekli sonuç ve önerilerde bulunmuştur.

3.1. Ansys Yazılımı Hakkındaki Genel Bilgi

Ansys yazılım programında çözülecek analiz türüne göre birçok kategori mevcuttur. İnşaat mühendisliği alanlarında Static Structural analiz türü yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu analiz türünün dışında ise Explicit Dynamics, Fluid Flow, Modal, Rigid Dynamics vb. fazlası alt modüller yer almaktadır.

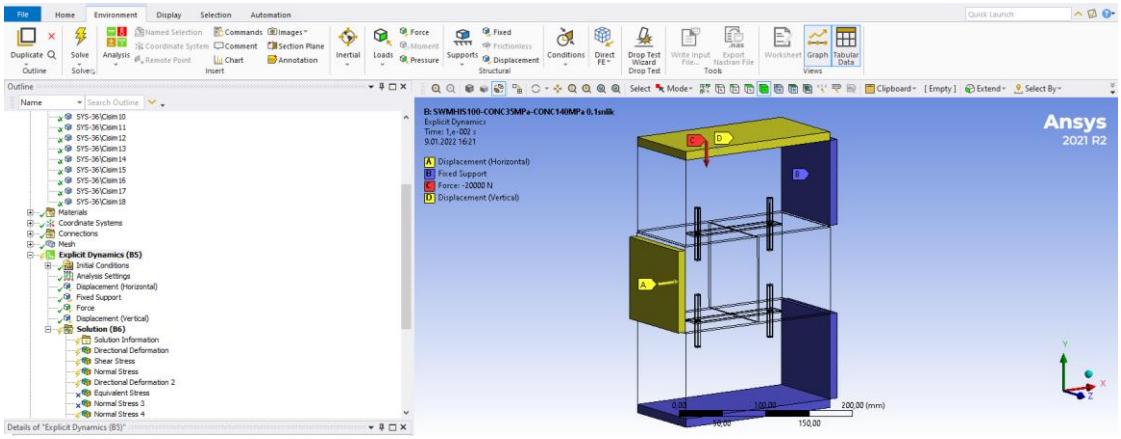
3.1.1. Analiz Türünün Belirlenmesi

Bu çalışmada metal bağlantılı elemanları olan kesme taş elemanların Static Structural analiz türüne göre çözümün yapılmama sebeplerinden biri kenet ve zıvanalardan oluşan metal bağlantı elemanların kopmaması, diğer sebeplerinden biri de kesme taş ile harçların kırılma şekillerinin ortaya çıkmamasıdır (Şekil 24).



Şekil 24. Static Structural analiz esnasında metal bağlantılı elemanlarda verilen hata uyarısı

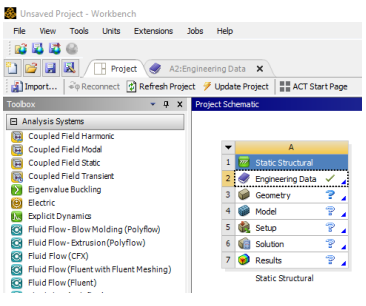
Bu nedenle bağlantı elemanları olan kesme taş ile yapılan tek ve çift katmanlı duvarların hangi deplasmana geldiğinde kırılmanın olduğunu tespit etmek, kırılma etkisi ile basınç dayanımı ve kırılma şekilleri (hasar modelleri) üzerinden yorum yapmak, sonuçları incelemek için en uygun analiz türü Explicit Dynamics tercih edilmiştir (Şekil 25).



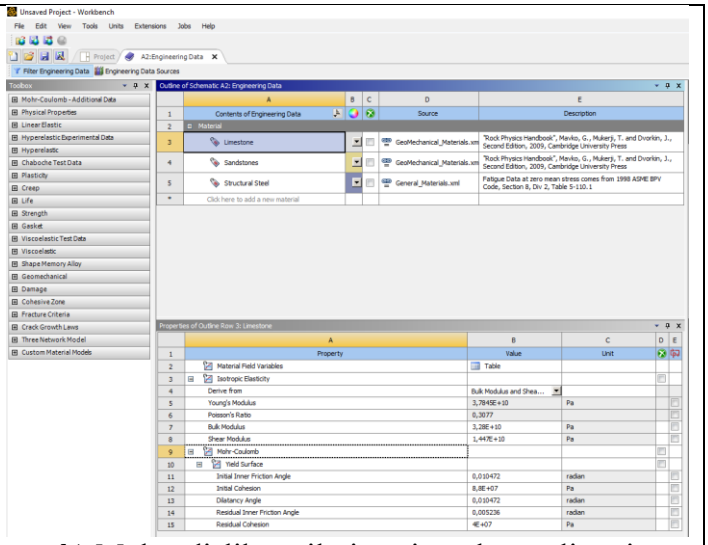
Şekil 25. Explicit Dynamics analiz öncesi sınır koşulları ve yüklemeler

3.1.2. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Ansys programında yer alan "Engineering Data" içinde birçok farklı malzemeler yer almaktadır. Bu malzemeler General Materials, Geomechanical Materials, Composite Materials, General Non-linear Materials, Explicit Materials vb. materyaller yapılacak analiz türüne göre standart olarak gruplara ayrılmıştır. Explicit Dynamics türüne uygun olmayan farklı kategoriden oluşan alt grup materyallerden bazıları Explicit Dynamics içerisine tanımlandığında bu alt materyale ait bazı parametreler Ansys programı tarafından otomatik olarak kaldırılmaktadır (Şekil 26).

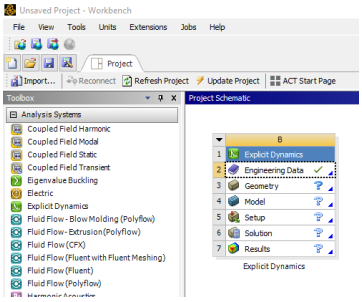


a) Statik yapısal modülünde yer alan mühendislik verileri

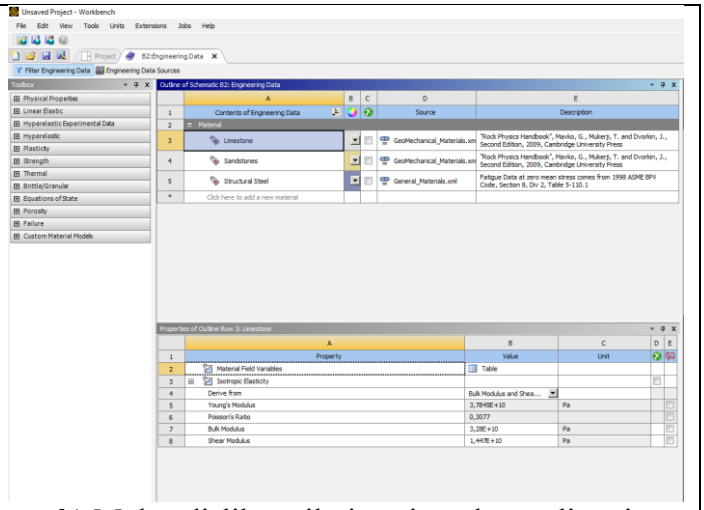


b) Mühendislik verilerine ait malzeme listesi

Şekil 26. Statik analiz için tanımlanan malzeme özellikleri



a) Explicit Dynamics modülünde yer alan mühendislik verileri



b) Mühendislik verilerine ait malzeme listesi

Şekil 27. Dinamik analiz için tanımlanan malzeme özellikleri

Statik analiz türünde taş malzemesi tanımlanırken Mohr-Coulomb malzeme özellikleri korunurken, Explicit Dynamics türünde ise Mohr-Coulomb malzeme özelliği Ansys-Workbench tarafından otomatik olarak kaldırılmaktadır. Bu nedenle Explicit Dynamics analiz çözümünde gerçeğe yakın olmayan çözümler elde edilecektir (Şekil 27). Gerçeğe yakın kırılma şekli ve kırılma dayanımı elde edebilmek için Explicit Materials içinde yer alan harç malzemeleri için varsayılan Conc35 MPa malzeme özellikleri düzenlenerek Conc3 Mpa verilmiştir. Kesme taş malzemeleri için varsayılan Conc35 MPa malzeme özellikleri düzenlenerek Conc50 MPa verilmiştir (Riedel et al. 2004, Riedel, et al, 2009.), (Tablo 1).

Tablo 1. Explicit Dynamics varsayılan ve düzenlenmiş malzeme özellikleri

	ANSYS Explicit Materials		ANSYS Explicit Materials		ANSYS Explicit Materials (Düzenlenmiş)		ANSYS Explicit Materials (Düzenlenmiş)	
	CONC-35MPA		CONC-140MPA		CONC-50MPA		CONC-3MPA	
Density	2,31E-06	kg/mm³	2,52E-06	kg/mm³	2,31E-06	kg/mm³	2,31E-06	kg/mm³
Thermal								
Specific Heat Constant Pressure	6,54E+05	mJ/kg·°C	6,54E+05	mJ/kg·°C	6,54E+05	mJ/kg·°C	6,54E+05	mJ/kg·°C
Other								
P-alpha EOS								
Solid Density	2,75E-06	kg/mm³	2,75E-06	kg/mm³	2,75E-06	kg/mm³	2,75E-06	kg/mm³
Porous Soundspeed	2,92E+06	mm/s	3,24E+06	mm/s	2,92E+06	mm/s	2,92E+06	mm/s
Initial Compaction Pressure Pe	23,3	MPa	93,3	MPa	23,3	MPa	23,3	MPa
Solid Compaction Pressure Ps	6000	MPa	6000	MPa	6000	MPa	6000	MPa
Compaction Exponent n	3		3		3		3	
Polynomial EOS								
Parameter A1	35270	MPa	35270	MPa	35270	MPa	35270	MPa
Parameter A2	39580	MPa	39580	MPa	39580	MPa	39580	MPa
Parameter A3	9040	MPa	9040	MPa	9040	MPa	9040	MPa
Parameter B0	1,22		1,22		1,22		1,22	
Parameter B1	1,22		1,22		1,22		1,22	
Parameter T1	35270	MPa	35270	MPa	35270	MPa	35270	MPa
Parameter T2	0	MPa	0	MPa	0	MPa	0	MPa
RHT Concrete Strength								
Use cap on Elastic Surface	Yes		Yes		Yes		Yes	
Compressive Strength fc	35	MPa	140	MPa	50	MPa	3	MPa
Tensile Strength ft/fc	0,1		0,1		0,1		0,1	
Shear Strength fs/fc	0,18		0,18		0,18		0,18	
Intact Failure Surface Constant A	1,6		1,6		1,6		1,6	
Intact Failure Surface Exponent n	0,61		0,61		0,61		0,61	
Tension/Compression Meridian Ratio Q2.0	0,6805		0,6805		0,6805		0,6805	
Brittle to Ductile Transition BQ	0,0105		0,0105		0,0105		0,0105	
Hardening Slope	2		2		2		2	
Elastic Strength/ft	0,7		0,7		0,7		0,7	
Elastic Strength/fc	0,53		0,53		0,53		0,53	
Fracture Strength Constant B	1,6		1,6		1,6		1,6	
Fracture Strength Exponent m	0,61		0,61		0,61		0,61	
Compressive Strain Rate Exponent α	0,032		0,00909		0,032		0,032	
Tensile Strain Rate Exponent δ	0,036		0,0125		0,036		0,036	
Maximum Fracture Strength Ratio SFMAX	1,00E+20		1,00E+20		1,00E+20		1,00E+20	
Damage Constant D1	0,04		0,04		0,04		0,04	
Damage Constant D2	1		1		1		1	
Minimum Strain to Failure	0,01		0,01		0,01		0,01	
Residual Shear Modulus Fraction	0,13		0,13		0,13		0,13	
Shear Modulus	16700	MPa	22060	MPa	16700	MPa	16700	MPa

(Kaynak: Riedel et al. 2004, Riedel, et al, 2009.)

Metal bağlantı elemanlarından oluşan kenet ve zıvana elemanları ANSYS programına ait malzeme kütüphanesinde yer alan Structural Steel malzeme özellikleri düzenlenerek deneyde verilen Elastisite modülü ve akma dayanımı verileri de tanımlanmıştır (Das ve Pani, 2021), (Zia, A, J, 2021), (Tablo 2). Mesnet elemanları ise rijit olarak tanımlanmış ve Structural Steel malzeme özelliği kullanılmıştır.

Tablo 2. Kenet ve zıvana elemanları için tanımlanan malzeme parametreleri

Properties of Outline Row 11: Structural Steel (Kenet)

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7,85E-09	tonne mm^-3		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modu...			
6	Young's Modulus	1,1383E+05	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,3			
8	Bulk Modulus	94857	MPa		
9	Shear Modulus	43780	MPa		
10	Bilinear Isotropic Hardening				
11	Yield Strength	227,6	MPa		
12	Tangent Modulus	330,82	MPa		
13	Specific Heat Constant Pressure, C_p	3,85E+08	mJ tonne^-1 C^-1		

a) Kenet elemanına ait malzeme özellikleri

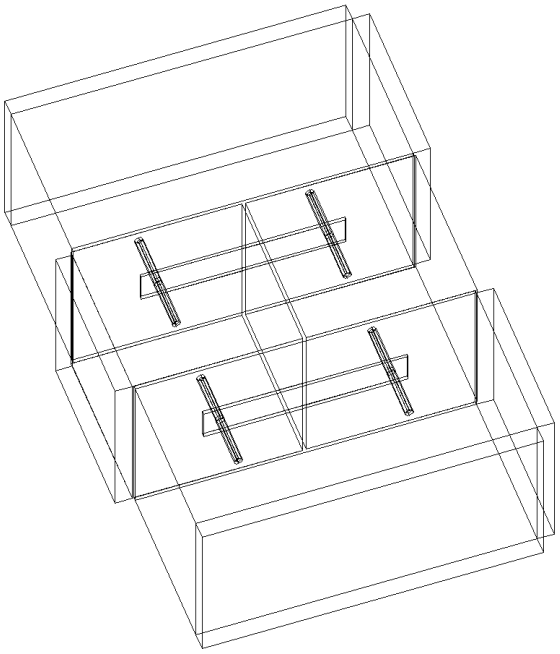
Properties of Outline Row 12: Structural Steel (Zivana)

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7,85E-09	tonne mm^-3		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modu...			
6	Young's Modulus	30572	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,3			
8	Bulk Modulus	25477	MPa		
9	Shear Modulus	11758	MPa		
10	Bilinear Isotropic Hardening				
11	Yield Strength	61,22	MPa		
12	Tangent Modulus	602	MPa		
13	Specific Heat Constant Pressure, C_p	3,85E+08	mJ tonne^-1 C^-1		

b) Zıvana elemanına ait malzeme özellikleri

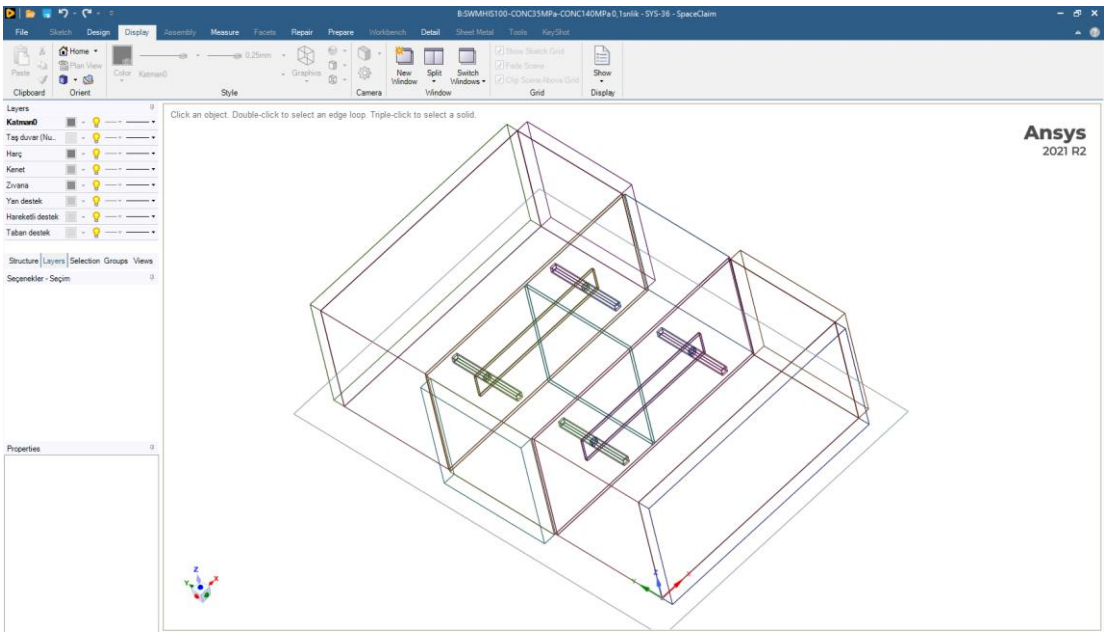
3.1.3. Geometrinin Oluşturulması

Doğal kesme taş duvarların Ansys ile analizinin yapılabilmesi için "Kesme taş ile yapılan katmanlı duvarların deneysel olarak araştırılması" tez çalışmasında yapılan mikro ve makro elemanların boyutları referans alınarak AutoCAD yazılım programı ile üç boyutlu olarak modellenmiştir (Şekil 28). Bölüm 3 başlıkları altında kenetsiz-kenetli bireysel elamanlarda basınç, mikro boyutlu elemanlarda basınç, başlangıç kayma ve makro boyutlu elemanlarda basınç olmak üzere modellenen elemanların üçboyutlu perspektif ve görünüşlere ait ölçüleri de 4 ayrı grup detaylı olarak gösterilmiştir.

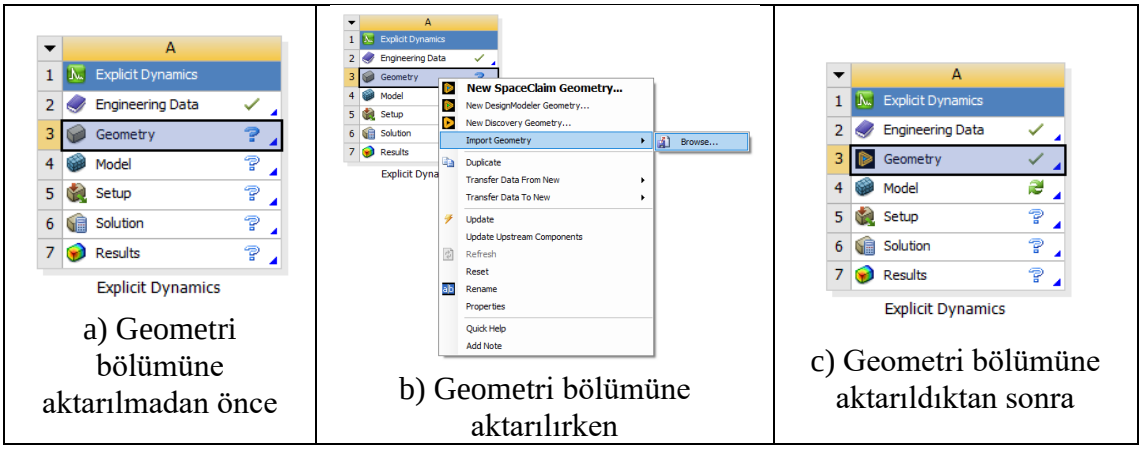


Şekil 28. AutoCAD ile modellenen üç boyutlu perspektif görünüm

Oluşturulan üç boyutlu model Ansys programının "Geometry" bölümüne aktarılabilmesi için, Ansys programına ait "SpaceClaim" isimli alt programına "dwg" uzantılı üç boyutlu model aktarılmıştır (Şekil 29). Bu programa aktarılan modeller "scdoc" uzantılı olarak kaydedilmiştir. "scdoc" uzantılı dosyalar Explicit Dynamics kutusuna ait "Geometry" bölümüne aktarılmıştır (Şekil 30).



Şekil 29. SpaceClaim alt programına aktarılan üç boyutlu model



a) Geometri bölümüne aktarılmadan önce

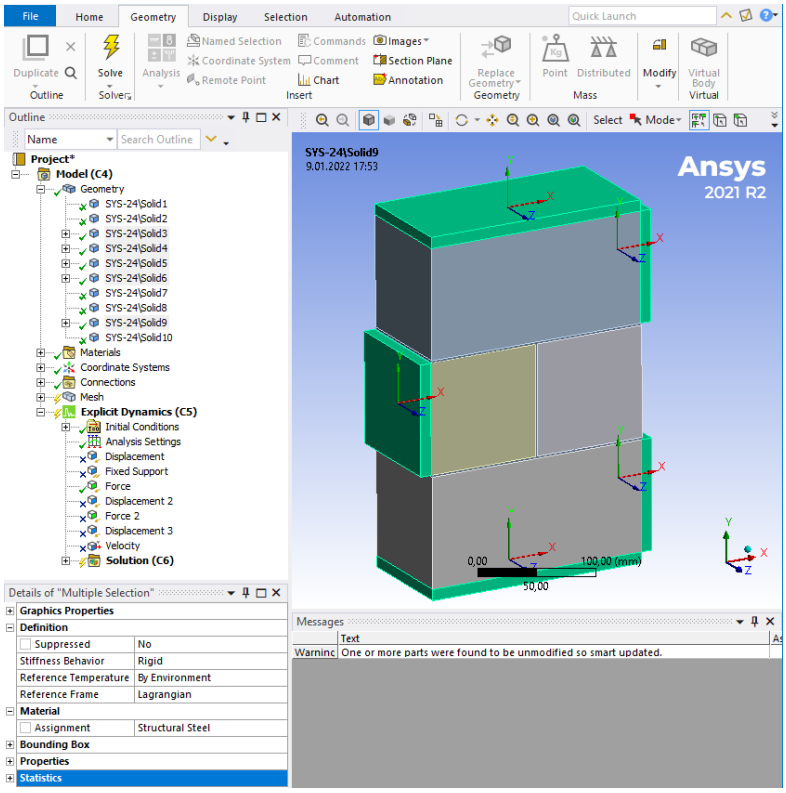
b) Geometri bölümüne aktarılırken

c) Geometri bölümüne aktarıldıktan sonra

Şekil 30. Geometry bölümüne aktarılan scdoc uzantılı dosya

3.1.4. Geometrik Elemanlarda Sertlik Davranışının Belirlenmesi

Referans alınan elemanlara göre sertlik davranışı belirlenirken çözümün uygun zamanda ve doğru çözümü için sabit ve hareketli mesnetler için eğilme, kırılma ve kopma vb. deforme olmayan "Rigid" katı eleman seçilmiştir. Kesme taş, harç ve metal bağlantı elemanları ise "Flexible" esnek eleman olarak seçilmiştir. Ayrıca sabit ve hareketli mesnet elemanları "Flexible" esnek eleman olarak seçilirse düğüm sayıları da hesaba dâhil edileceğinden, fark edilir düzeyde olmasa da çözüm süresini uzatacaktır (Şekil 31).

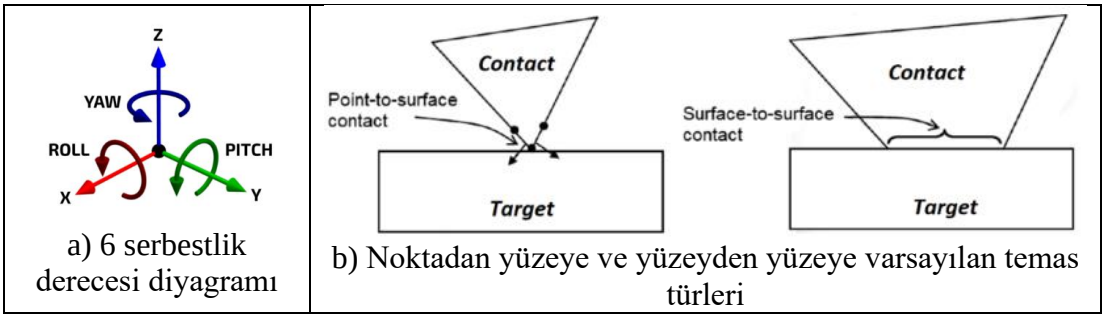


Şekil 31. Sabit ve hareketli mesnetlere tanımlanan sertlik davranışı

3.1.5. Kontak Türlerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada mikro ve makro boyutlu olarak modellenen elemanlar arası temas ilişkileri gerçeğe yakın kırılma dayanımları ve kırılma şekillerini büyük ölçüde etkilemektedir. Referans olarak kullanılan kesme taş, harç, metal bağlantı elemanlarından oluşan kenet ile zıvana ve sınır koşulları ve yükleme elemanları için sabit ve hareketli mesnet elemanlarından oluşmaktadır.

Birden fazla gövdeli analizde, kontaklar geometriler üzerinde tanımlanmalıdır. Temas, sınır ve yük koşullarıyla, doğrusal statik, doğrusal olmayan statik, dinamik vb. gibi parçalara yapısal analiz uygulandığında, geometrik elemanlardaki DOF (serbestlik derecesi) tanımlanması gerekir. Bir düğüm için serbestlik derecesi, yapının muhtemel hareketini temsil eder. Temel olarak, bir ağ elemanı, üç öteleme ve üç dönme hareketini gerçekleştirmek üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir (Şekil 32.a). Ayrıca serbestlik derecesi bir elemandan diğer elemana hangi kuvvetlerin ve momentlerin aktarıldığını da gösterir. Sonlu elemanlar analizinin sonuçları (gerilimler ve sehimler) genellikle düğümlerde ortaya çıkar (Çapar, Y., 2020).



a) 6 serbestlik derecesi diyagramı

b) Noktadan yüzeye ve yüzeyden yüzeye varsayılan temas türleri

Şekil 32. Serbestlik derecesi ve kontak çifleri

(Kaynak: Çapar, Y., 2020)

Yapısal analiz yazılımlarında kontak çift olarak oluşturmaktadır. Bunlar düğümden düğüme (noktadan noktaya), düğümden yüzeye (noktadan yüzeye) ve yüzeyden yüzeye olmak üzere üç farklı temas davranışları mevcuttur. ANSYS programında noktadan yüzeye ve yüzeyden yüzeye temas türleri olmak üzere iki varsayılan olarak kullanılmaktadır. Şekil 32.b'de gösterildiği gibi noktadan yüzeye temas için, "nokta" temastır ve "yüzey" target yani hedeftir. Genellikle dışbükey yüzey temas olarak, içbükey hedef olarak seçilir. Ayrıca, temas halindeki bir cismin boyutu diğerine kıyasla çok küçük olduğunda hedef olarak geniş yüzey seçilir. Noktadan yüzeye temas veya yüzeyden yüzeye temastan bağımsız olarak, beklendiği gibi hemen tanımlanırlar (Çapar, Y., 2020).

Birkaç kontak tipi kullanılır. Bu kontak tipleri yazılımdan yazılıma göre değişmekle birlikte farklı isimlerle anılabilir. ANSYS yazılımında, temas türleri "frictional" sürtünmeli, "frictionless" sürtünmesiz, "rough" kaba, "bonded" bağlı ve "no separation" ayrımsız olmak üzere 5 kategoriye ayrılarak adlandırılır.

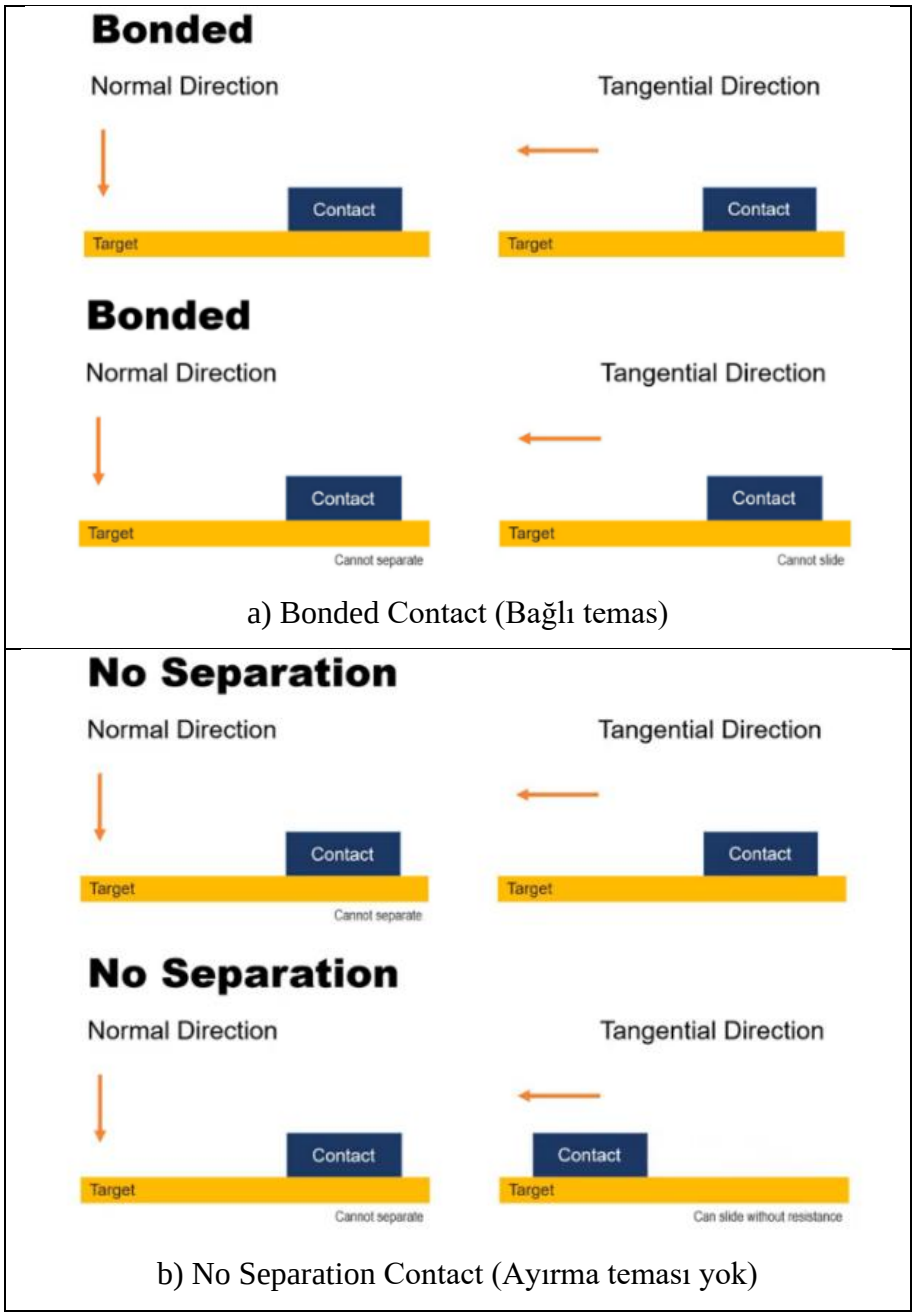
"Bonded Contact" bu temasta tanımlanan geometriler tek bir cisim gibi hareket eder. Cisimler hareket edemez (kaydırmaz ve ayrılmaz) ve birbirleri arasında dönemezler (Şekil 33.a).

"No Separation Contact" temas tespit edildikten sonra, hedef ve temas yüzeyi, analizin geri kalanı için bağlanır. Kayma mümkündür, ancak temas halindeki düğümler hedef yüzeye normal yönde bağlanır (Şekil 33.b).

"Frictional Contact" temas çifti hedef yüzey üzerinde kayabilir ve ayrılabilir. Sürtünme katsayıları teğetsel hareketleri etkiler (Şekil 34.a).

“Frictionless Contact” temas çifti, hedef yüzey üzerinde teğetsel yönde kayabilir ve ayrıca normal yönde de ötelenebilir (Şekil 34.b).

“Rough Contact” sürtünme katsayısı vücutta sonsuz olma eğilimindedir. Temas halindeki düğümler teğet yönde hedef yüzeye yapıştırıldığı için temas çifti teğet yönde hareket edemez (Şekil 35).

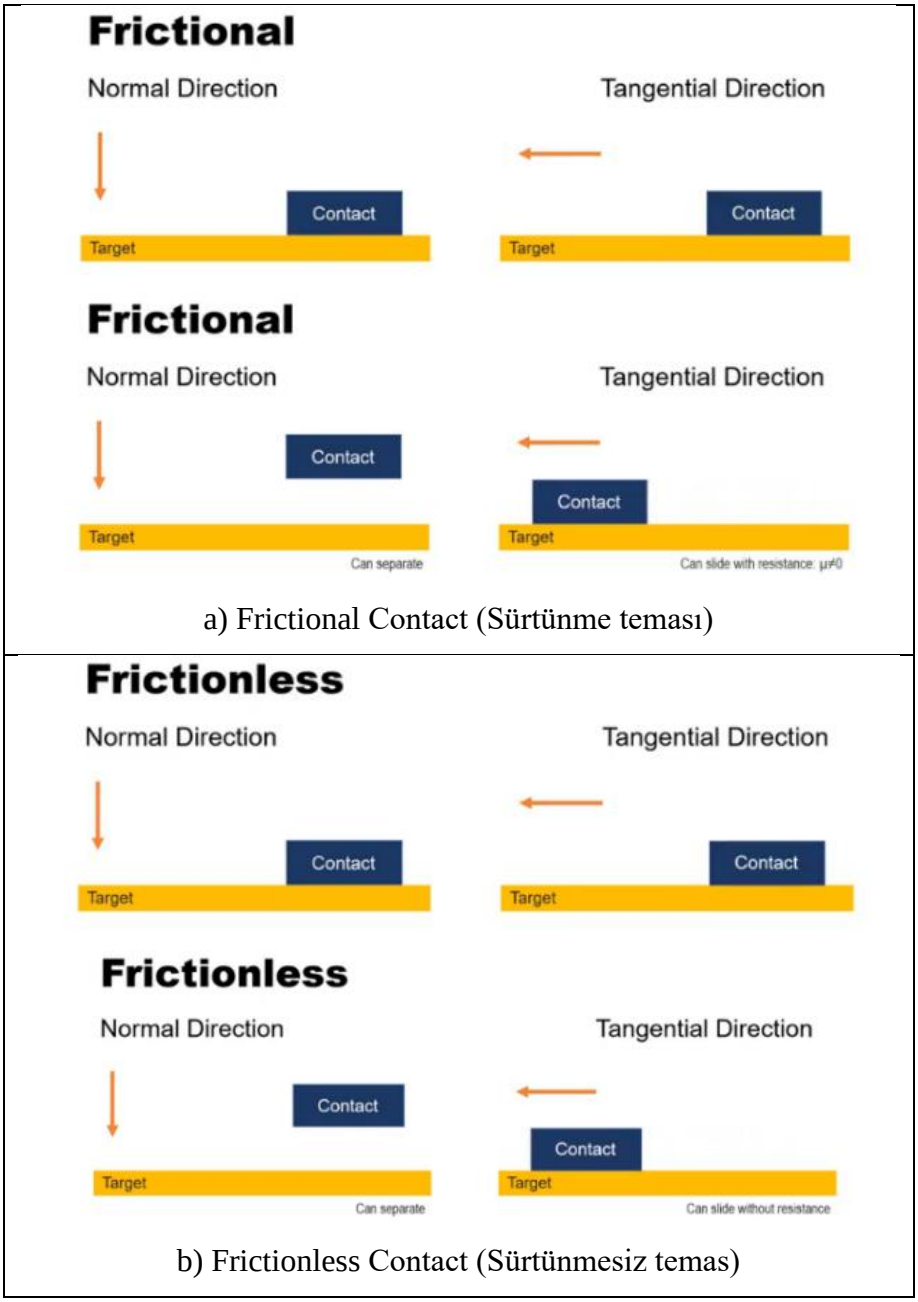


a) Bonded Contact (Bağlı temas)

b) No Separation Contact (Ayırma teması yok)

Şekil 33. Ansys temas türleri (Bonded ve No Separation)

(Kaynak: https://www.mechead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/)

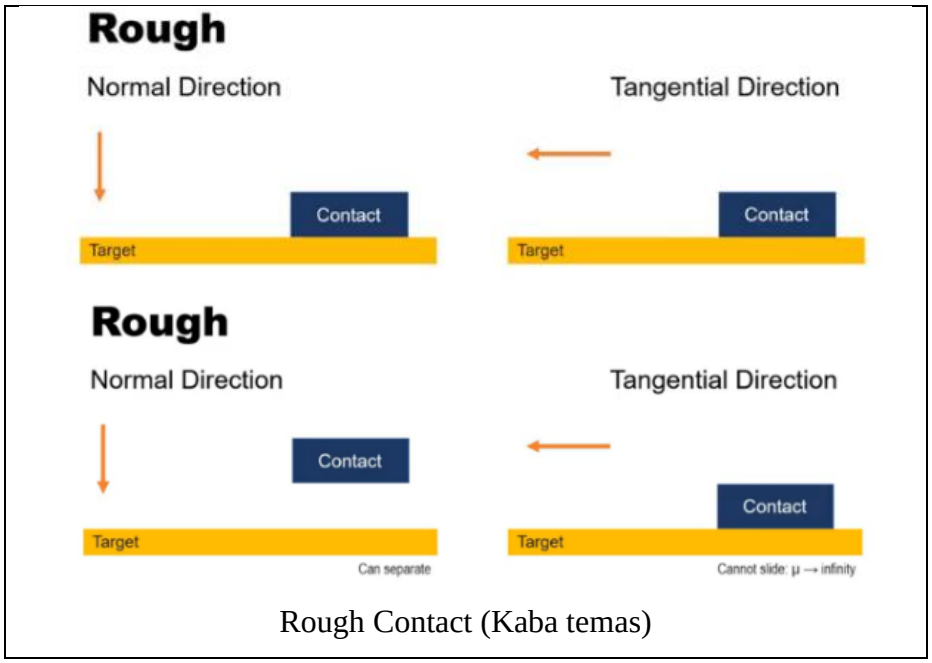


a) Frictional Contact (Sürtünme teması)

b) Frictionless Contact (Sürtünmesiz temas)

Şekil 34. Ansys temas türleri (Frictional ve Frictionless)

(Kaynak: https://www.mechead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/)



Rough Contact (Kaba temas)

Şekil 35. Ansys temas türü (Rough)

(Kaynak: https://www.mechead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/)

Bu çalışmada bonded ve frictional kontak tipleri kullanılmıştır. Frictional kontak türleri için farklı malzeme yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısı değer aralığı için kaynak araştırması yapılmıştır. Farklı yüzeylere ait sürtünme katsayıları Tablo 3.a'da gösterilmiştir (Beer E., Russell Johnston, F. P., Ders Notu, J., & Acar, H., 2002). Ansys programı içinde kontak türleri belirlenirken mesnet ile kesme taş arası için frictional seçilmiştir. Aynı zamanda kesme taş-metal bağlantı elemanları ile harç-metal bağlantı elemanları arasındaki sürtünme katsayısı 0,5 seçilmiştir. Ayrıca metal elemanlardan oluşan zıvanaların kesme taş yuvalarına karşı oluşturacağı kontak elemanı ise frictional ve sürtünme katsayısı ise 0,5 seçilmiştir (Tablo 3.b).

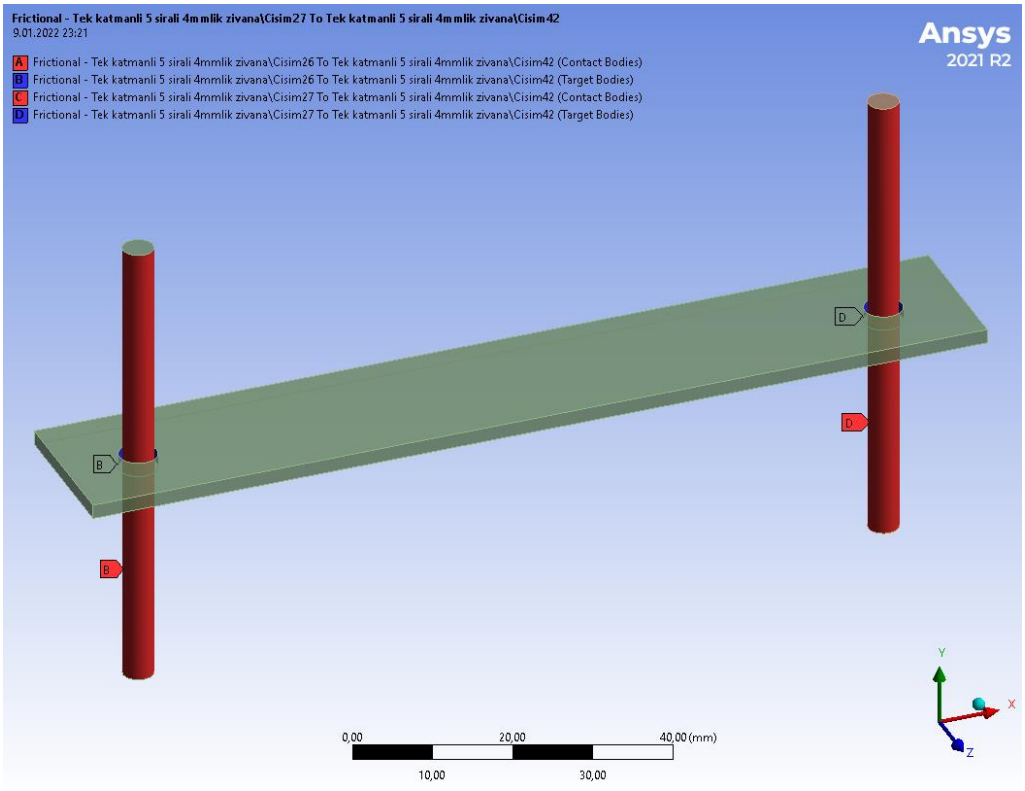
Tablo 3. Sürtünme katsayısı değerleri

Metal on metal : 0,15-0,60	Kesme taş ve kesme taş: 0,6-0,7 "Frictional"
Metal on wood : 0,20-0,60	Kesme taş ve harç : "Bonded"
Metal on stone : 0,30-0,70	Kesme taş ve harç : 0,6-0,7 "Frictional"
Metal on leather : 0,30-0,60	Harç ve harç : "Bonded"
Wood on wood : 0,25-0,50	Kesme taş ve harç : 0,6-0,7 "Frictional"
Wood on leather : 0,25-0,50	Kesme taş ve metal : 0,50 "Frictional"
Stone on stone : 0,40-0,70	Harç ve metal : 0,50 "Frictional"
Earth on earth : 0,20-1,00	Kenet ve zıvana : 0,25 "Frictional"
Rubber on concrete : 0,60-0,90	
a) Kuru yüzeyler için yaklaşık statik sürtünme katsayısı değerleri	b) Ansys programında kullanılan sürtünme katsayısı değerleri

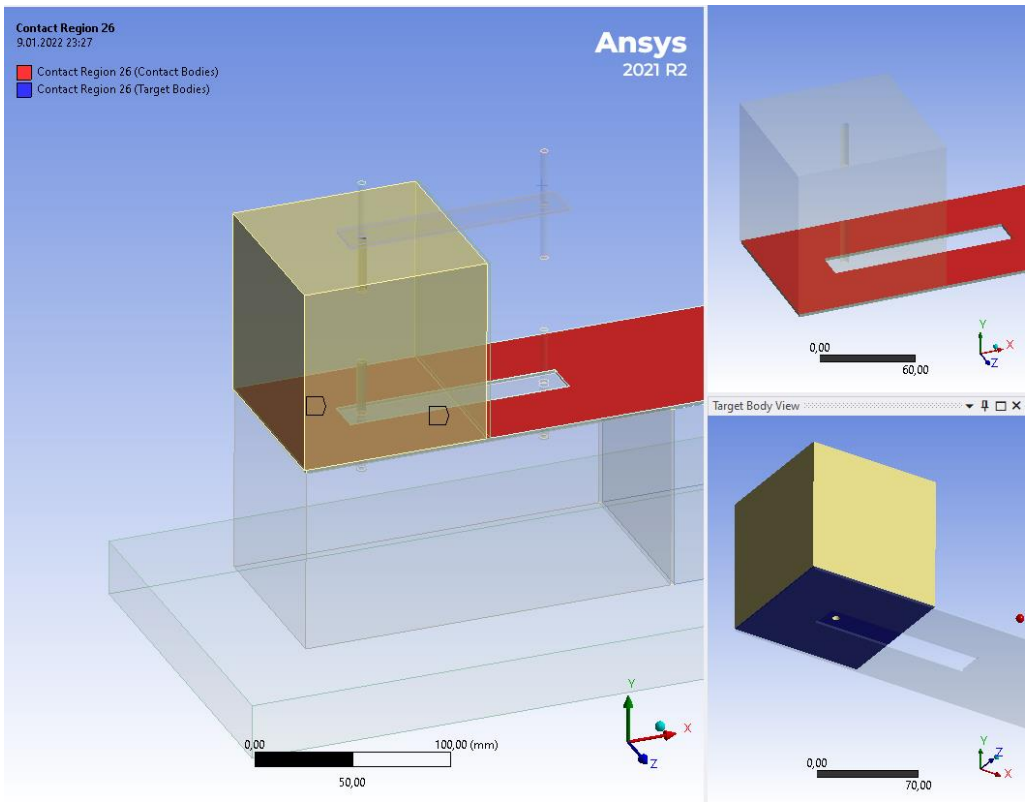
(Kaynak: Beer E., Russell Johnston, F. P., Ders Notu, J., & Acar, H., 2002)

Literatür çalışmalarında betonarme elemanları için beton malzemesi içinde donatılar tanımlanırken "reinforcement" seçilmiştir. Bu işlem için beton elemanlar çelik elemanlar ile güçlendirilerek yapılmaktadır (Tajamul Islam, M., Netula, O., Ashuvendra Singh, E., & Professor, A., 2019).

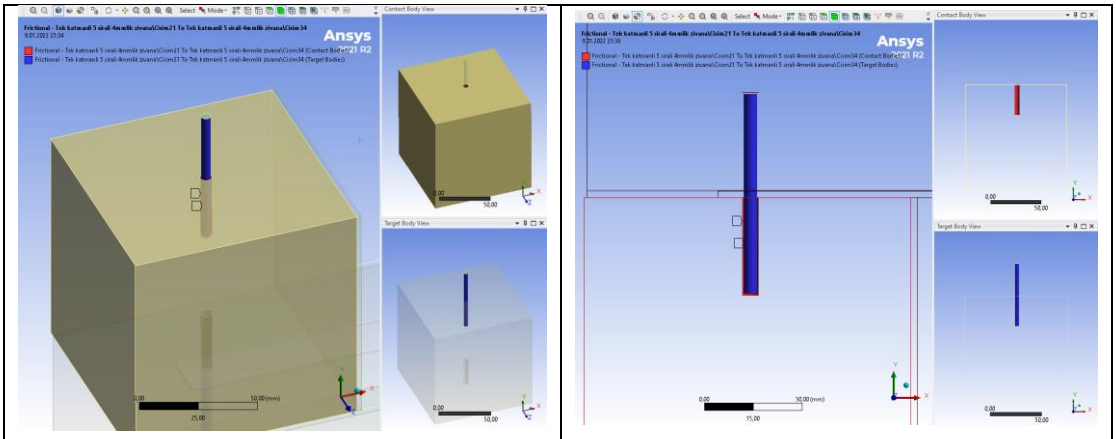
Bu çalışmada metal bağlantı elemanlarından oluşan kenet ve zıvanalar birbirlerine kaynaklı değildirler (Şekil 36). Bu nedenle metal bağlantı elemanları arasında oluşan sürtünme katsayısı ise 0,25 olarak belirlenmiştir (Beer E., Russell Johnston, F. P., Ders Notu, J., & Acar, H., 2002). Referans alınan deneysel çalışmalarda taş ile harç kuruduktan sonra birbirlerine tutunduğu için bu elemanlar arasındaki temas ilişkisi "bonded" seçilmiştir (Şekil 37). Kesme taş elemanı ile zıvana elemanları arasındaki temas ilişkisi "frictional" seçilerek sürtünma katsayısı ise 0,5 olarak tanımlanmıştır (Şekil 38).



Şekil 36. Kenet ile zıvana arasındaki temas ilişkisi perspektif görünüm



Şekil 37. Kesme taş ile harç arasındaki temas ilişkisi perspektif görünüm



a) Perspektif görünüş

b) Z ekseni yönünde görünüş

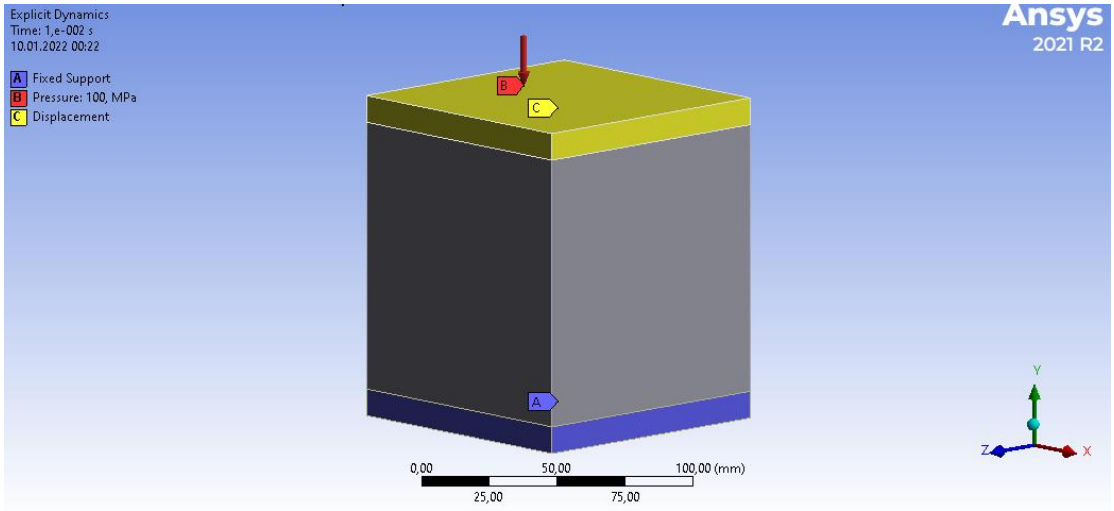
Şekil 38. Kesme taş ile zıvana arasındaki temas ilişkisi perspektif ve ön görünüş

Bu modelleme tekniği analiz çözümü yapılırken elemanların hangi zamanlarda hangi yüzeylere temas edip etmeyeceği, hangi bölgelerde kırılma şekillerinin oluştuğunu tespit edilebilmesi ve kırılma dayanımının incelenebilmesi için "Bonded" ve "Frictional" olmak üzere 2 tür kontak tanımlanmıştır. Mikro boyutlu elemanlarda obje sayıları az olduğundan kontak türleri ayrı ayrı olarak verilmiştir. Ancak makro boyutlu elemanların analizinde modellenen eleman sayısı arttığından buna bağlı olarak aralarındaki yüzeylerin sayısı çok olduğundan, kontak işlemleri yapılması çok zaman alacaktır. Bu nedenle makro boyutlu elemanlarda kontak türleri verilirken harçsız duvar birimlerinde yüzeyler "frictional" tanımlanmıştır. Harçlı, metal elemanlı tek katmanlı ve metal elemanlı çift katmanlı duvar elemanlarına ait tüm yüzeylerde standart olarak "bonded" tanımlanmıştır. Bunun dışında hem mikro hem makro boyutlu elemanlarda kullanılan mesnet elemanları ile kesme taş elemanları arasında kalan yüzeylere "frictional" tanımlanmıştır ve sürtünme değerleri 0,5 verilmiştir (Beer E., Russell Johnston, F. P., Ders Notu, J., & Acar, H., 2002).

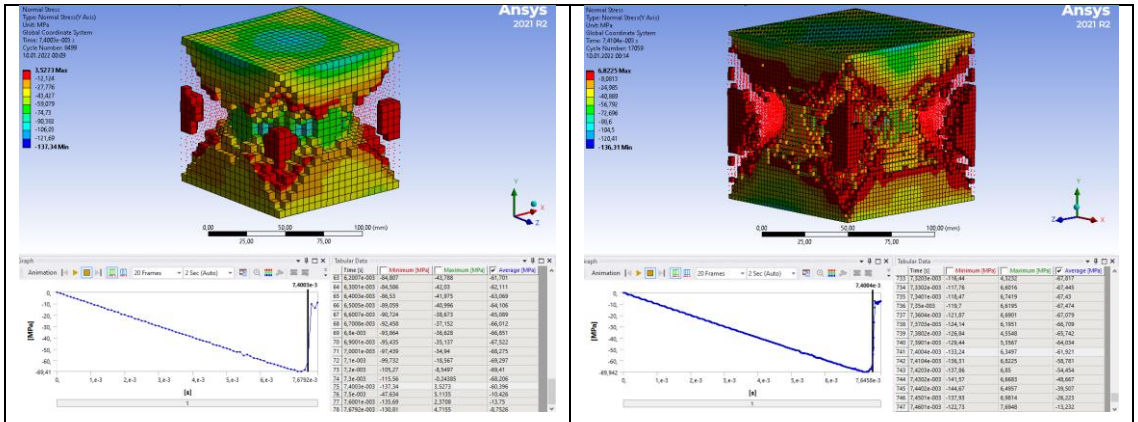
3.1.6. Uygun Sonlu Elemanın Belirlenmesi

Explicit Dynamics analizi diğer analiz türlerinde olduğu gibi sonlu eleman sayısı oldukça önemlidir. Sonlu eleman sayısı arttıkça gerçeğe yakın çözümler elde edilebilir ancak sonlu elemanları sayısı arttıkça denklem sayısı da artmakta bu nedenle çözüm süreci uzamaktadır. Bu çözüm süreci günümüz bilgisayarlar için zaman tasarrufu olmamaktadır. Ancak sonlu eleman sayısı arasındaki farklılıklarını incelemek için basınç analizleri yapılmıştır. Bireysel basınç elemanlarda analizi yapılacak olan sürenin başında sıfır olarak tanımlanan basınç değeri, zamanın sonunda basınç değeri 100 MPa'a ulaşacak

şekilde tanımlanmıştır (Şekil 39) ve (Şekil 40). Makro ve mikro boyutlu elemanların basınç analizlerinde sonlu eleman sayıları için ilgili başlıklar altında verilmiştir.



Şekil 39. Sınır koşulları ve yükler

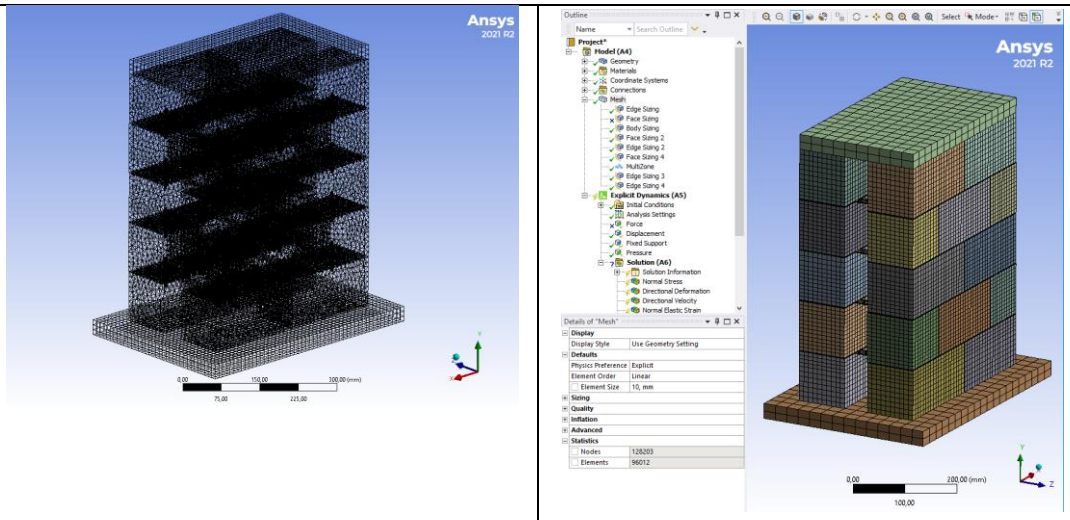


a) 5 mmlik mesh ile yapılan analiz

b) 2,5 mmlik mesh ile yapılan analiz

Şekil 40. Farklı mesh boyutları ile yapılan analizler

Referans deneye göre üç boyutlu olarak modellenen metal bağlantı elemanlardan oluşan duvar elemanları, sonlu eleman sayıları ile ilgili geometrik şekillere müdahale etmeden "General mesh" metodu uygulandığında Şekil 41.a'da gösterildiği gibi daha fazla mesh sayıları elde edilmiştir, ancak buna bağlı olarak düzgün ağ boyutu tanımlaması da yapılmadığından çözüm süresi de artacaktır. Bu artan süreyi azaltmak için Şekil 41.b'de gösterildiği gibi doğal kesme taş ve harçlar için ayrı, kenet için ayrı, zıvana için ayrı, mesnet elemanları için ayrı ayrı ağ boyutu yöntemleri tanımlanmıştır.

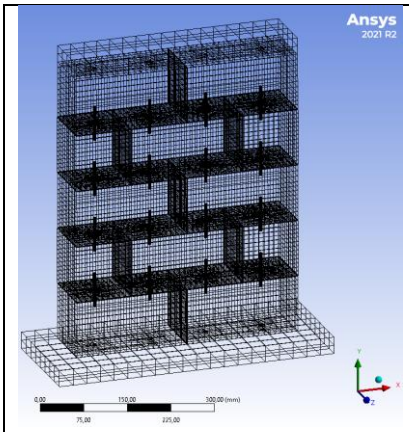


a) Mikro boyutlu duvar elemanın düzenlenmeyen sonlu eleman görünümü

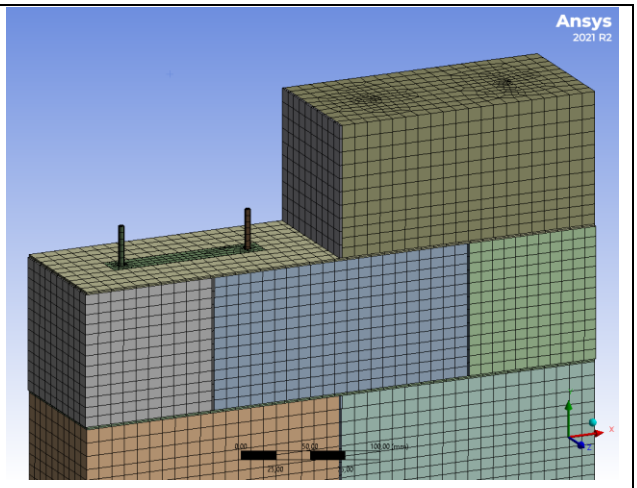
b) Mikro boyutlu duvar elemanın düzenlenen sonlu eleman görünümü

Şekil 41. Düzenlenmeyen ve düzenlenen sonlu eleman görünümleri

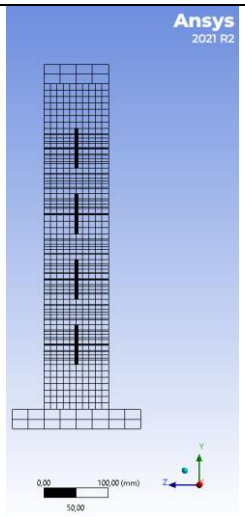
Bu çalışmada ağ boyutu verilirken mikro ve makro boyutlu elemanların durumuna göre farklı metotlar uygulanarak sonlu eleman sayıları düzgün bir şekilde dağıtılmıştır (Şekil 42).



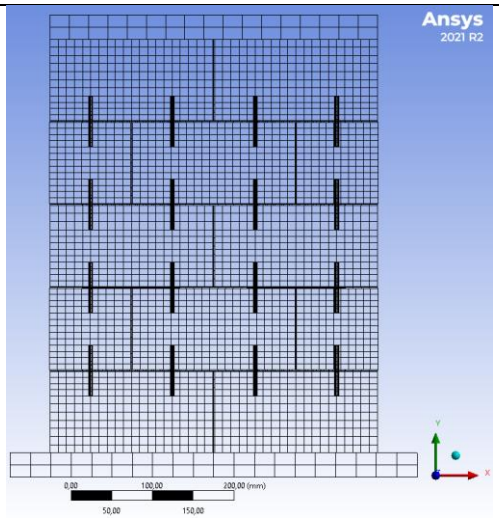
a) Sonlu eleman modeli perspektif görünüm



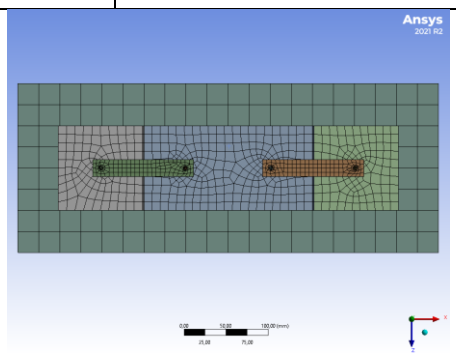
b) Sonlu eleman modeli perspektif görünüm



c) X ekseni yönünde görünüş



d) Z ekseni yönünde görünüş

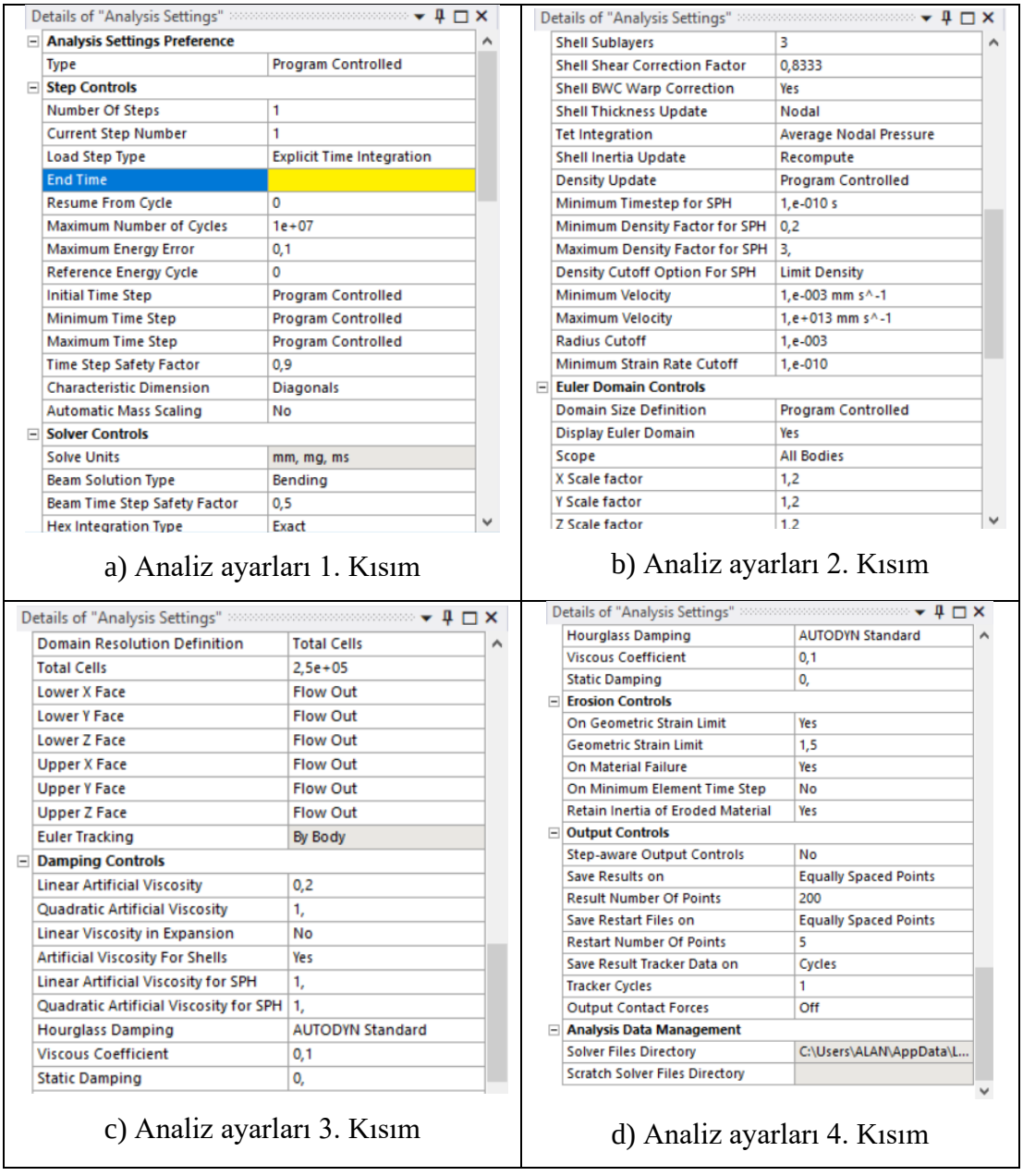


e) Y ekseni yönünde üst görünüş

Şekil 42. Sonlu elemanlarda kullanılan ağ boyutların genel perspektifi ve görünüşleri

3.1.7. Analiz Ayarlarının Belirlenmesi

Mikro ve makro boyutlu elemanların analiz süresini etkileyen en önemli unsur yükleme altında gerçekleştirilen zamandır. Sonlu eleman sayıları optimum düzeyde sabit tutulduğunda analiz çözümü için verilen süreler kısa tutulduğunda gerçek çözümden uzaklaşmaktadır. Aynı sonlu eleman sayıları olan modellerde analizi yapılacak çözüm süreleri artırıldıkça gerçeğe daha yakın çözüm elde edilmektedir. Explicit Dynamics analiz türünde kullanılan analiz ayarları Şekil 43'te gösterilmiştir.



a) Analiz ayarları 1. Kısım

b) Analiz ayarları 2. Kısım

c) Analiz ayarları 3. Kısım

d) Analiz ayarları 4. Kısım

Şekil 43. Analiz ayarları

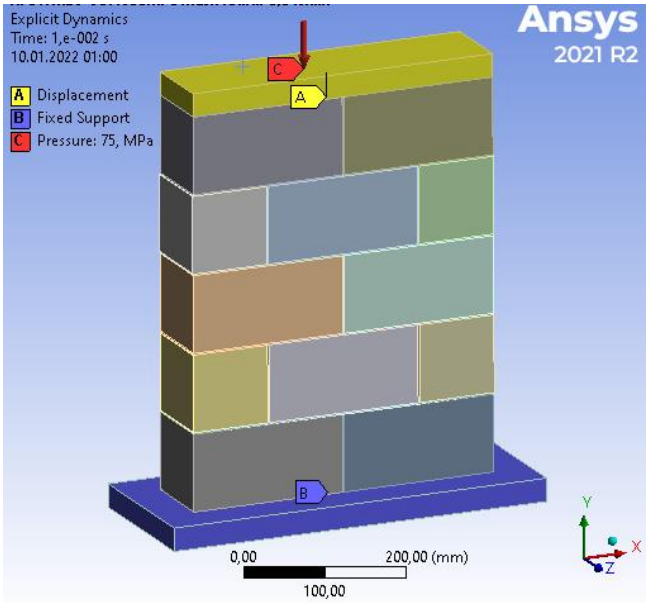
Mikro boyutlu basınç analizi için kullanılan sonlu elemanlar sayısı fazla olursa sonlu eleman boyutu da küçük olacağından Explicit Dynamics analiz çözümü sonucunda ilk çatlama anındaki çatlak kalınlıkları daha ince görülmektedir. Ancak mesh yoğunluğu arttığından çözüm süresi de artmaktadır. Bunun yanısıra mikro boyutlu elemanlarda analiz ayarları yapılırken zaman aralığı geniş tutulduğunda çözüm süresi daha da artmaktadır, aksine zaman aralığı geniş tutulmadığında ise çözüm süresi azalmakla birlikte kırılma dayanımı değerleri deneyde elde edilen kırılma değerlerinden daha yükseklere çıkmaktadır (Tablo 4). Ancak bazı ağ boyutlarında çözüm aralığı arttıkça kırılma değerlerinin de düştüğü gözlenmektedir. Dolayısıyla analiz çözümü için zaman aralığı optimum düzeyde verildiğinde kırılma dayanımı değerleri deneylerde elde edilen kırılma dayanımı değerlere yakın sonuçlar çıkmaktadır.

Tablo 4. Bireysel basınç elemanlarda kullanılan zaman aralığı ile sonlu eleman sayıları arasındaki ilişkiye bağlı olarak gerilme kırılması değerleri

Ağ boyutu 10 mm için		**Ağ boyutu 5 mm için**		**Ağ boyutu 2,5 mm için**	
Zaman aralığı (sn)	**Kırılma gerilmesi (MPa)**	**Zaman aralığı (sn)**	**Kırılma gerilmesi (MPa)**	**Zaman aralığı (sn)**	**Kırılma gerilmesi (MPa)**
0,01	47	0,01	74	0,01	74
0,05	37	0,05	70	0,05	70
0,1	34	0,1	69	0,1	68,5
0,5	37	0,5	66	0,5	64,5
1	32	1	64	1	62,5
2	-	2	62	2	-
3	-	3	39	3	-

3.1.8. Sınır Koşullarının Belirlenmesi ve Yükleme Durumu

Referans deneyinden alınarak modellenen sabit ve hareketli mesnet elemanlarında sertlik davranışları “rigid” katı eleman olarak seçildiğinden sınır koşulları verilirken mesnetin bir yüzeyi seçilememektedir bunun yerine “body” tüm elemanın kendisi olarak seçilebilmiştir. Bu seçim işlemi ile mesnet elemanın kendisi “fixed support” ile sabitlenmiştir. Diğer sabit mesnetlere de aynı işlem uygulanmıştır.



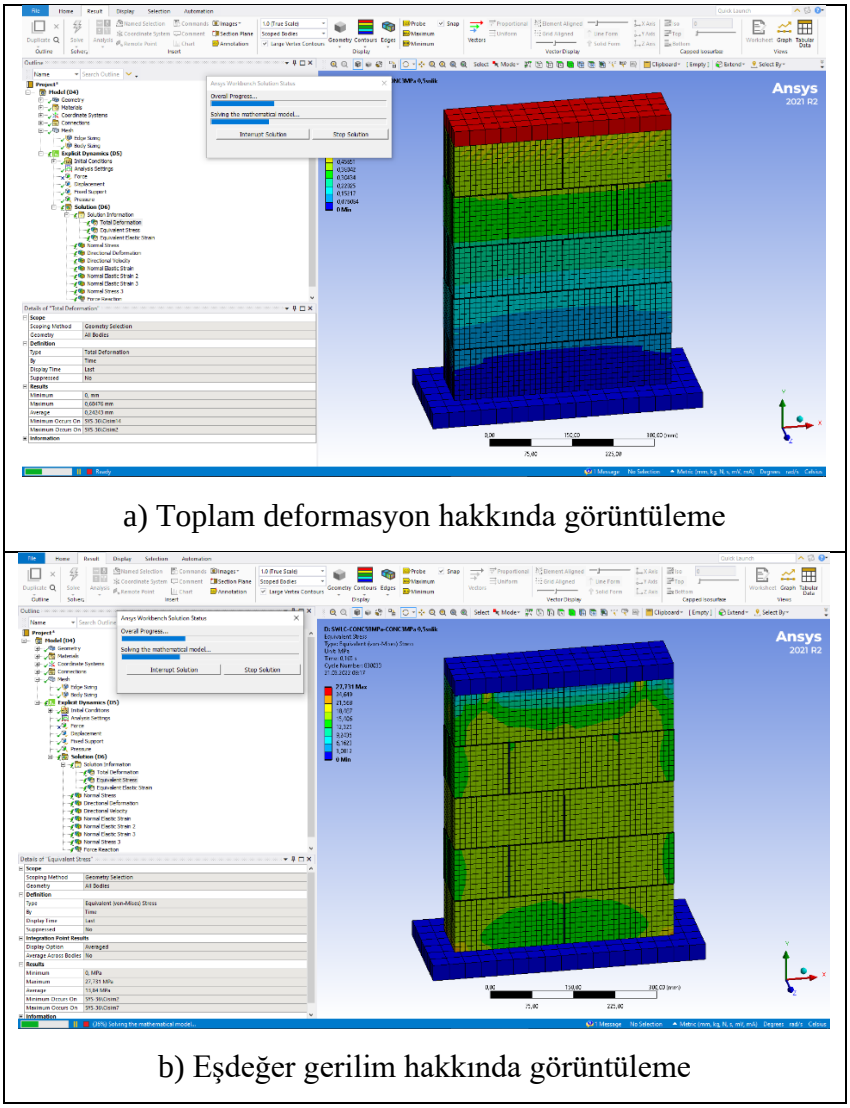
Şekil 44. Sınır koşulları ve yükleme durumu

Hareketli mesnetlere ise x, y ve z doğrultusunda bazı sınırlamalar getirilerek yükleme yönüne göre "force", basınç yönüne göre "pressure" ve yer değiştirme yönüne göre "displacement" vb. yükleme durumları verilebilmektedir. Bu çalışmada duvar basınç analizlerde ve duvar başlangıç kayma analizlerde mesnet elemanlarına uygulanan deplasman sonucunda kesme taş ile harç elemanlarının kırılma şekillerinin incelenmesi ve metal elemanlarda oluşan kopma, eğilme, metal elemanlarının kesme taşlara zarar verme, aynı zamanda metal elemanlarının harçlara zarar verme gibi olayların gerçekleştiğini tespit etmek için hareketli mesnetlere "force", "pressure" ve "displacement" yüklemeleri tanımlanmıştır (Şekil 44).

3.1.9. Mikro ve Makro Modellenen Elemanların Sayısal Analizi

Mikro ve makro boyutlu elemanların sayısal analiz çözümüne hazır hale getirilmesi için Ansys Workbench arayüzünün sol bölümünde yer alan Geometry, Materials, Connections, Mesh, Explicit Dynamics başlığı altında analiz ayarları ve sınır koşulları ile yükleme durumları ve son olarak üçüncü bölüm başlıkları altında elde edilen analiz sonucunda görmek istediğimiz x, y, z yönünde basınç gerilmeleri, kayma gerilmeleri vb. buna bağlı olarak aynı arayüzünün sağ bölümünde görsel olarak kırılma şekilleri hakkında bilgi alabilmek için ayarlar tanımlanmıştır. Ayrıca Ansys programının son yıllarda çıkan yeni özelliklerden biri de analiz çözümü işlemi yaparken bilgisayarın ekran

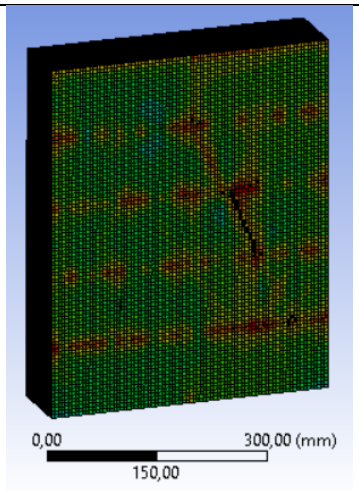
kartı her %0,5 adımında objelerin eğilme, burulma, kopma, gerilme, deformasyon, kırılma hakkında görsel olarak sunmaktadır. Bu çalışmada çözümün herhangi bir zaman aralığında kırılma anı tespit edildikten hemen sonra istenirse geri kalan zamanını boşa harcamadan analiz çözümün ilk kısmı kaydedilerek durdurulmuştur. Analiz çözümlerin bazılarında ise sonuna kadar devam ettirilmiştir. Uzun süreli analiz çözümü yapılırken Şekil 45'te gösterildiği gibi sürekli görsel durum hakkında bilgi veren ekranı açmak bilgisayarın ekran kartını devamlı meşgul edecektir. Bunun önüne geçmek için analiz işlemi esnasında ara sıra birkaç dakikalığına analiz durumu hakkında bilgi alındığında ekran kartını yormayacaktır.



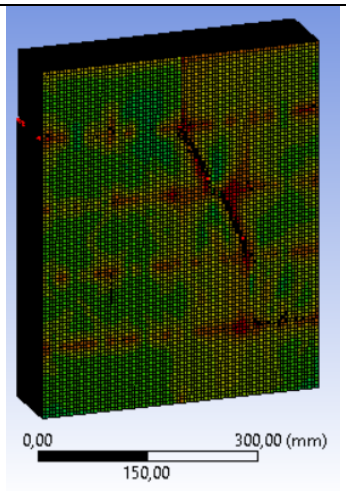
a) Toplam deformasyon hakkında görüntüleme

b) Eşdeğer gerilim hakkında görüntüleme

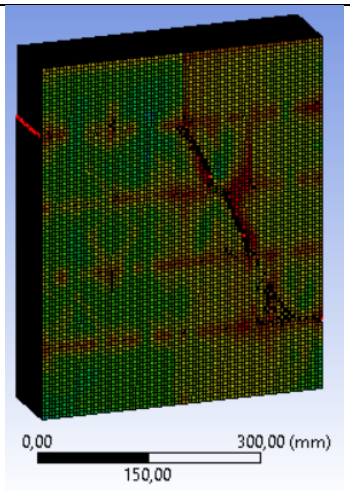
Şekil 45. Analiz esnasında deformasyon ve gerilim hakkında görüntüleme



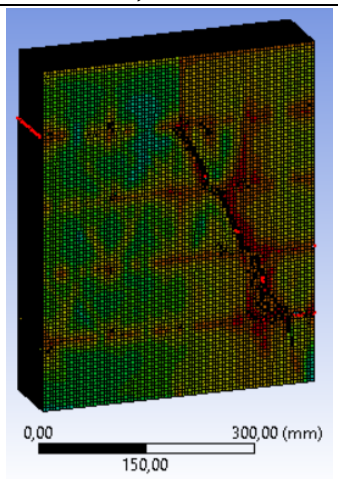
a) Uygulanan deplasman 1,1 mm



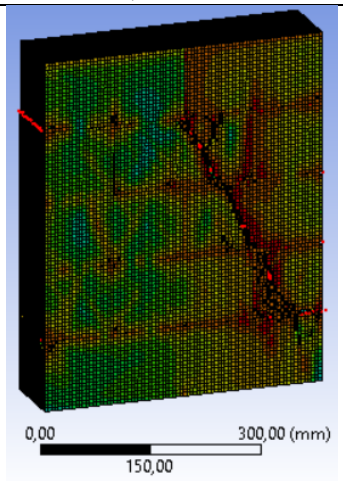
b) Uygulanan deplasman 1,15 mm



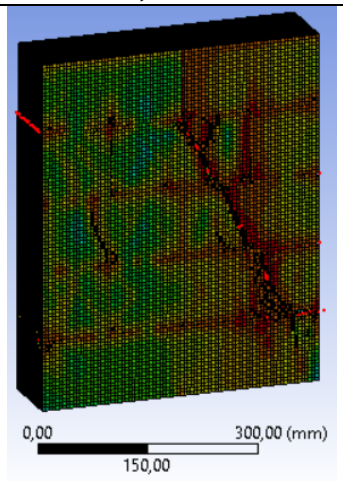
c) Uygulanan deplasman 1,2 mm



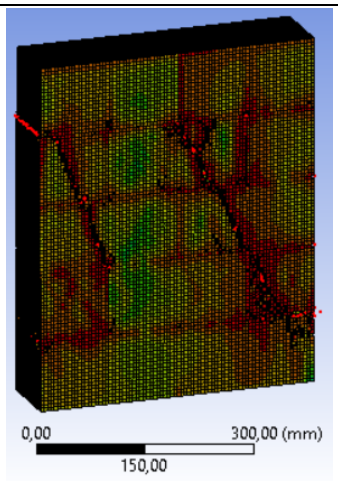
d) Uygulanan deplasman 1,25 mm



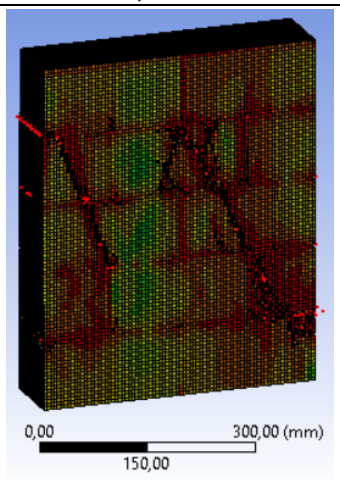
e) Uygulanan deplasman 1,3 mm



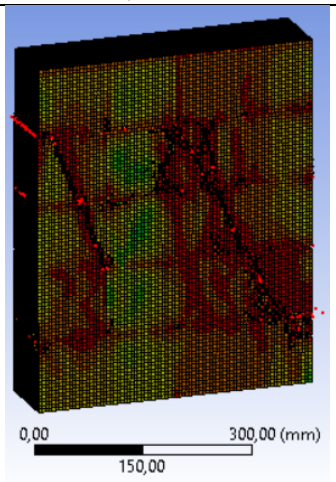
f) Uygulanan deplasman 1,35 mm



g) Uygulanan deplasman 1,4 mm



h) Uygulanan deplasman 1,45 mm



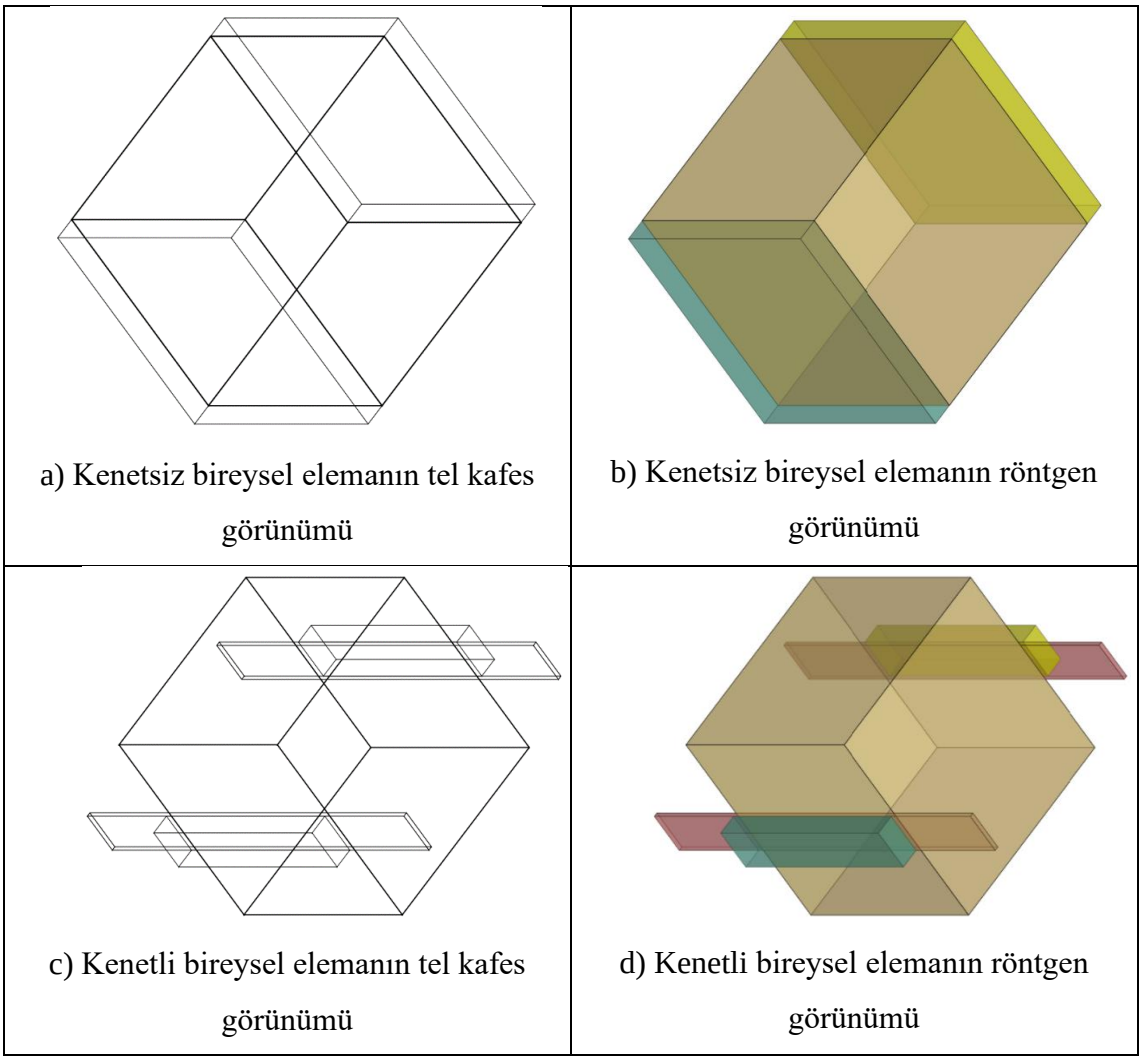
ı) Uygulanan deplasman 1,5 mm

Şekil 46. Uygulanan basınç artışı etkisiyle oluşan kırılma şekilleri

3.2. Bireysel Elemanlar için Basınç Analizleri

Bu bölümde bireysel elemanlar için basınç analizleri yapılmıştır. Her grupta kesme taş için Conc50 MPa malzeme özellikleri tanımlanmıştır (Riedel et al. 2004, Riedel, et al, 2009.). Metal bağlantı elemanlarından oluşan kenet elemanları Structural Steel malzeme özelliği kullanılmıştır. Mesnet elemanları ise rijit olarak tanımlanmış ve Structural Steel malzeme özelliği kullanılmıştır.

Bu başlık altında kenetsiz ve kenet ile yapılan basınç analizi için AutoCAD ortamında modellenen elemanların üçboyutlu perspektif görünüşleri Şekil 47'de gösterilmiştir.



a) Kenetsiz bireysel elemanın tel kafes görünümü

b) Kenetsiz bireysel elemanın röntgen görünümü

c) Kenetli bireysel elemanın tel kafes görünümü

d) Kenetli bireysel elemanın röntgen görünümü

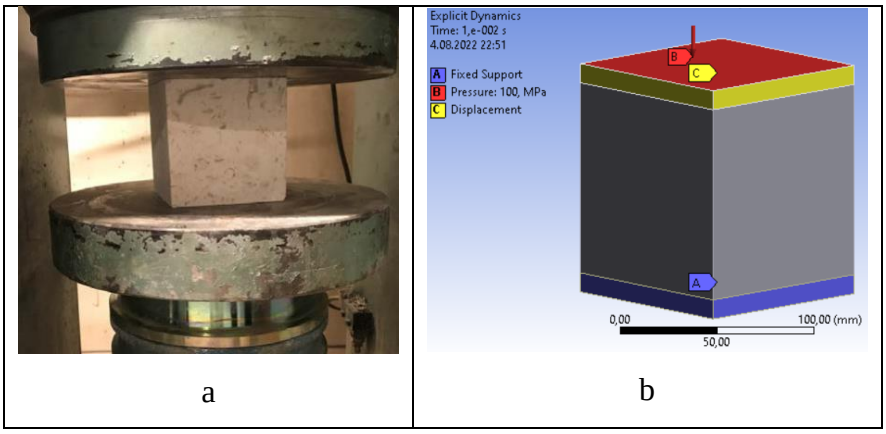
Şekil 47. Bireysel elemanların perspektif görünüşleri

3.2.1. Kenet Olmadan Yapılan Basınç Analizi

Boyutları 100 x 100 x 100 mm olan bireysel taş numunesinin 10000 mm² kesit alanına düşey yük etki edecek şekilde basınç deneyleri yapılmıştır. Basınç deney düzeneği Şekil 48.a'da gösterilmiştir. Bu uygulamaya ait kırılma durumu ise Şekil 49.a'da verilmiştir (Zia, A, J, 2021).

Sonlu eleman sayıları için mesnet elemanları ve ebadı 100x100x100 mm'lik küp şeklinde modellenen doğal kesme taş elemanın ağ boyutları 2,5 mm kullanılmıştır. Ağ boyutu çözümlemesi sonucunda mesnet elemanları dahil 75645 düğüm sayısı, 67200 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,01 sn verilmiştir.

Basınç uygulanacak olan mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde serbest bırakılmıştır. Basınç uygulanacak mesnet elemanın üst yüzeyine basınç gerilmesi tanımlanmıştır. Duvar numunesinin tabanındaki mesnet elemanı sabitlenmiştir. Zaman aralığının başında uygulanan basınç gerilmesi "0" değerinde olup, zaman aralığının sonunda uygulanan basınç gerilmesi 100 MPa olarak tanımlanmıştır. Şekil 48.b'de gösterildiği gibi düşey kuvvet bireysel elemanın kesit alanı olan 10000 mm² alana etki edecek şekilde basınç analizi yapılmıştır. Bu gruba ait kırılma anındaki zaman 0,0079'uncu saniyesinde iken düşey deplasman 1,01 mm'ye ulaştığında bireysel eleman kırılmaya başlamıştır. Analiz esnasında bireysel eleman kırıldıktan sonra zaman aralığının sonuna kadar analiz devam ettirilmiştir. Dolayısıyla kırılma anında uygulanan basınç gerilmesi 79 MPa bulunmuştur. Analiz sonucunda oluşan kırılma durumu Şekil 49.b'de gösterilmiştir.

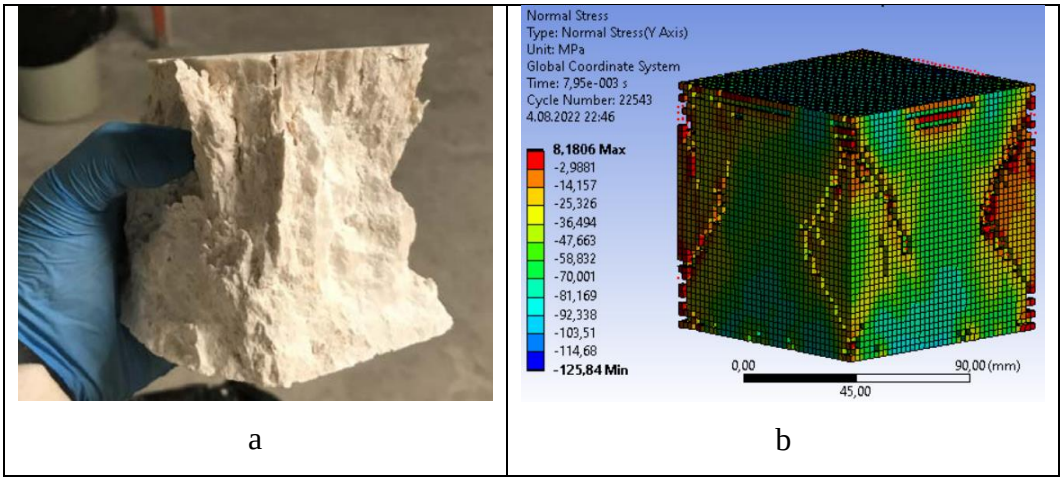


a b

Şekil 48. Kenet olmayan bireysel elemanın basınç deney düzeneği ve modellenen elemanın sınır koşulları ve yükleme durumu

a) 100 x 100 x 100 mm boyutundaki numunenin basınç deney düzeneği (Zia, A, J, 2021)

b) Kenetsiz bireysel elemanın sınır koşulları ve yükleme durumu



a b

Şekil 49. Kenetsiz basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli

a) Kenetsiz taş numunenin kırılma şekli (Zia, A, J, 2021)

b) Kenetsiz taş elemanın analiz sonucunda kırılma şekli

Deneysel olarak yapılan çalışmada kırılma gerilmeleri elde edilmiştir (Zia, A, J, 2021). Bu gruba ait ANSYS kırılma gerilmesi deneyde elde edilen kırılma gerilmesinden %8,77 fazla bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen kırılma gerilmesi ile Ansys programında yapılan analiz sonucunda elde edilen kırılma gerilmesi karşılaştırılmalı olarak Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Kenet olmadan yapılan deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri

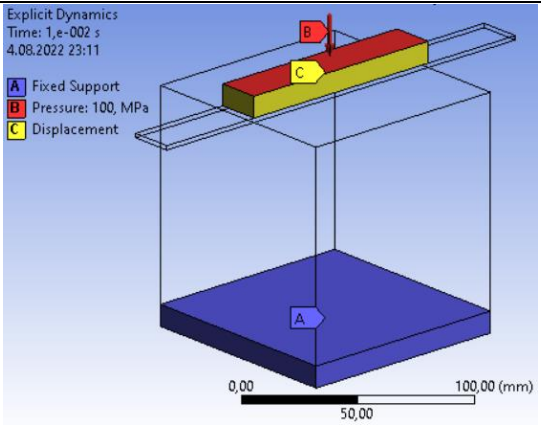
Numune Boyutu (mm)	Deneysel kırılma gerilmesi (MPa)	Ansys eleman boyutu (mm)	Ansys kırılma gerilmesi (MPa)	Rölatif hata (%)
100x100x100 (Zia, A, J, 2021)	72,07 (Zia, A, J, 2021)	100x100x100	79	8,77

3.2.2. Tek Taraflı Kenet ile Yapılan Basınç Analizi

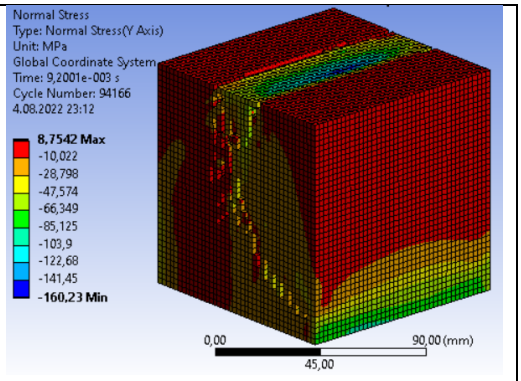
Bu uygulamada modellenen bireysel taş elemanının üstüne boyutu 20 x 200 x 2 mm (genişlik x uzunluk x yükseklik) olarak modellenen kenet elemanı yerleştirilerek, boyutu 100 x 100 x 100 mm olan bireysel taş elemanının 2000 mm² alana düşey yük etki edecek şekilde basınç analizi yapılmıştır.

Sonlu eleman sayıları için mesnet elemanları ve ebadı 100x100x100 mm'lik küp şeklinde modellenen doğal kesme taşların ağ boyutları ise 2,5 mm kullanılmıştır. Ayrıca ebadı 20 x 200 x 2 mm (genişlik x uzunluk x yükseklik) olan kenet elemanının ağ boyutları 1,25 mm ve 0,5 mm tanımlanmıştır. Ağ boyutu çözümlemesi sonucunda mesnet elemanları dahil 86706 düğüm sayısı, 76160 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,01 sn verilmiştir.

Basınç uygulanacak olan mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde serbest bırakılmıştır. Basınç uygulanacak mesnet elemanın üst yüzeyine basınç gerilmesi tanımlanmıştır. Bireysel elemanın tabanındaki mesnet elemanı sabitlenmiştir. Zaman aralığının başında uygulanan basınç gerilmesi "0" değerinde olup, zaman aralığının sonunda uygulanan basınç gerilmesi 100 MPa olarak tanımlanmıştır. Şekil 50.a'da gösterildiği gibi düşey kuvvet bireysel elemanın kesit alanı olan 2000 mm² alana etki edecek şekilde basınç analizi yapılmıştır. Bu gruba ait kırılma anındaki zaman 0,0092'nci saniyesinde iken düşey deplasman 0,45 mm'ye ulaştığında bireysel eleman kırılmaya başlamıştır. Analiz esnasında bireysel eleman kırıldıktan sonra zaman aralığının sonuna kadar analiz devam ettirilmiştir. Dolayısıyla kırılma anında uygulanan basınç gerilmesi 92 MPa bulunmuştur (Şekil 50.b).



a) Sınır koşulları ve yükleme durumu



b) Tek taraflı kenetli taş elemanın analiz sonucunda kırılma şekli

Şekil 50. Tek taraflı kenetli yükleme durumu ve analiz sonucunda kırılma şekli

Bu grupta tek taraflı deneysel çalışma yapılmamıştır. Ansys programında yapılan analiz sonucunda elde edilen kırılma gerilmesi

Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Tek taraflı kenet ile yapılan Ansys kırılma gerilmesi

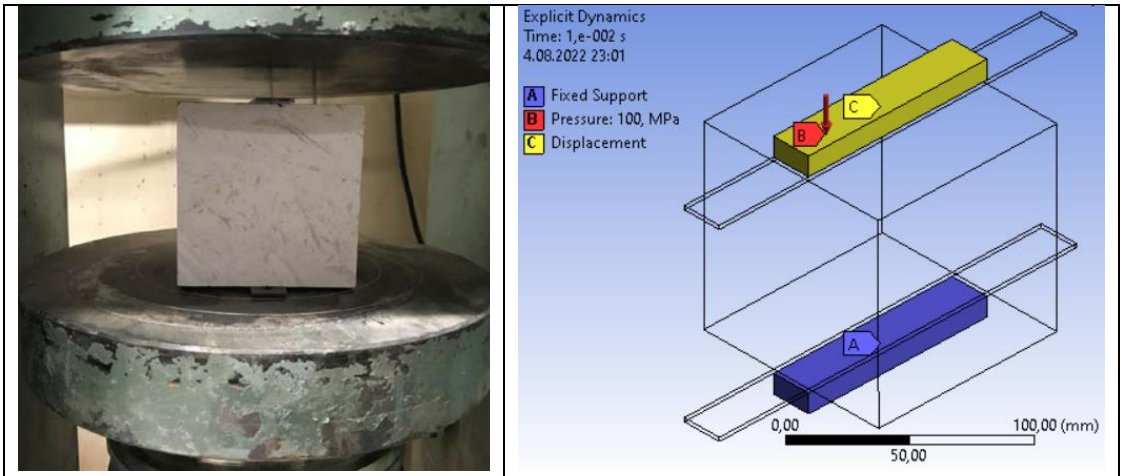
Ansys eleman boyutu (mm)	Ansys kırılma gerilmesi (MPa)
100x100x100	92,00

3.2.3. İki Taraflı Kenet ile Yapılan Basınç Analizi

Bu uygulamada bireysel taş numunesinin altına ve üstüne boyutları 20 x 200 x 2 mm (genişlik x uzunluk x yükseklik) olan kenetler konularak, boyutu 100 x 100 x 100 mm olan bireysel taş numunesinin 2000 mm² alana düşey yük etki edecek şekilde basınç deneyleri yapılmıştır. Basınç deney düzeneği Şekil 51.a'da gösterilmiştir. Bu uygulamaya ait kırılma durumu ise Şekil 52.a'da verilmiştir (Zia, A, J, 2021).

Sonlu eleman sayıları için mesnet elemanları ve ebadı 100x100x100 mm'lik küp şeklinde modellenen doğal kesme taş elemanın ağ boyutları ise 2,5 mm kullanılmıştır. Ayrıca ebatları 20 x 200 x 2 mm (genişlik x uzunluk x yükseklik) olan kenet elemanlarının ağ boyutları 1,25 mm ve 0,5 mm tanımlanmıştır. Ağ boyutu çözümlemesi sonucunda mesnet elemanları dahil 97767 düğüm sayısı, 85120 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,01 sn verilmiştir.

Basınç uygulanacak olan mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde serbest bırakılmıştır. Basınç uygulanacak mesnet elemanın üst yüzeyine basınç gerilmesi tanımlanmıştır. Bireysel elemanın tabanındaki mesnet elemanı sabitlenmiştir. Zaman aralığının başında uygulanan basınç gerilmesi "0" değerinde olup, zaman aralığının sonunda uygulanan basınç gerilmesi 100 MPa olarak tanımlanmıştır (Şekil 51.b). Düşey kuvvet bireysel elemanın kesit alanı olan 2000 mm² alana etki edecek şekilde basınç analizi yapılmıştır. Bu gruba ait kırılma anındaki zaman 0,0052'nci saniyesinde iken düşey deplasman 0,31 mm'ye ulaştığında bireysel eleman kırılmaya başlamıştır. Analiz esnasında bireysel eleman kırıldıktan sonra zaman aralığının sonuna kadar analiz devam ettirilmiştir. Dolayısıyla kırılma anında uygulanan basınç gerilmesi 52 MPa bulunmuştur. Analiz sonucunda oluşan kırılma durumu Şekil 52.b'de gösterilmiştir.

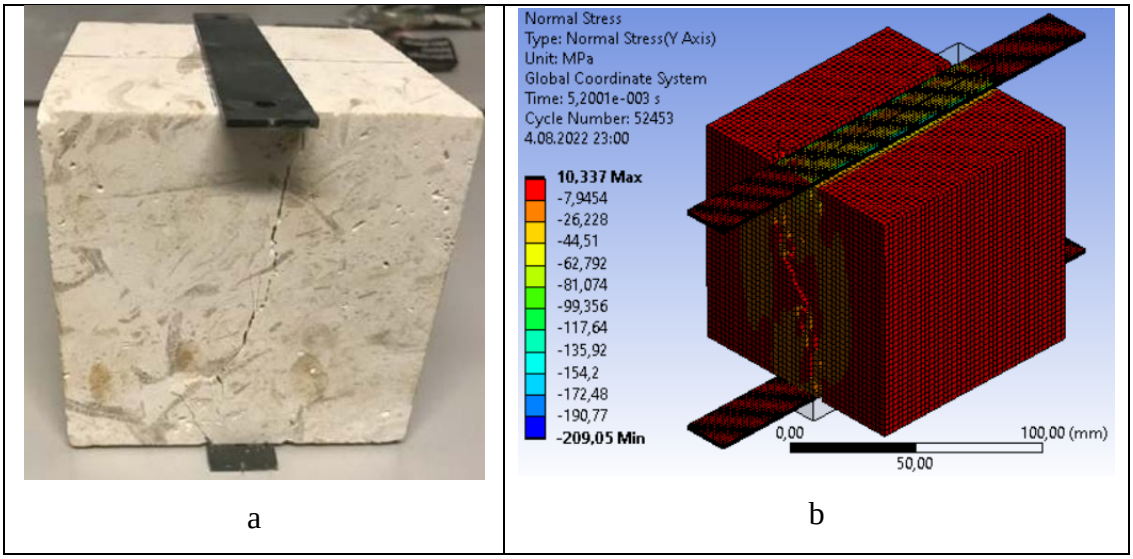


a b

Şekil 51. İki taraflı kenet ile yapılan bireysel elemanın basınç deney düzeneği ve modellenen elemanın sınır koşulları ve yükleme durumu

a) Kenetli taş numunenin basınç deney düzeneği (Zia, A, J, 2021)

b) Çift kenetli bireysel elemanın sınır koşulları ve yükleme durumu



a b

Şekil 52. İki taraflı kenet ile yapılan basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli

a) Kenetli taş numunenin kırılma şekli (Zia, A, J, 2021)

b) Çift kenetli taş elemanın analiz sonucunda kırılma şekli

Deneysel olarak yapılan çalışmada kırılma gerilmeleri elde edilmiştir (Zia, A, J, 2021). Bu gruba ait ANSYS kırılma gerilmesi deneyde elde edilen kırılma gerilmesinden %8,06 az bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen kırılma gerilmesi ile Ansys programında yapılan analiz sonucunda elde edilen kırılma gerilmesi karşılaştırılmalı olarak Tablo 7'de gösterilmiştir.

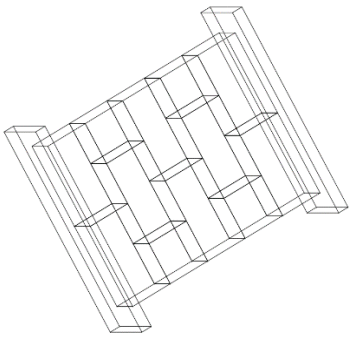
Tablo 7. Çift taraflı kenet ile yapılan deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri

Numune Boyutu (mm)	Deneysel kırılma gerilmesi (MPa)	Ansys eleman boyutu (mm)	Ansys kırılma gerilmesi (MPa)	Rölatif hata (%)
100x100x100 (Zia, A, J, 2021)	56,19 (Zia, A, J, 2021)	100x100x100 (İki taraflı kenet)	52	8,06

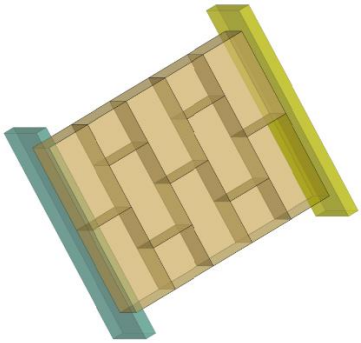
Kenetsiz, tek taraflı ve çift taraflı kenet ile yapılan bireysel basınç deney ve Ansys sonuçları ise Bölüm 4'te değerlendirilmiştir.

3.3. Mikro Boyutlu Elemanlar için Basınç Analizleri

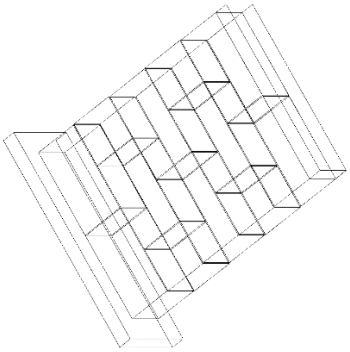
Bu çalışmada toplam dört adet mikro duvar numunesi üretilmiş ve basınç deneyine tabi tutulmuştur. Bunlar SWC grubuna ait numune harç ve metal bağlantı elemanları kullanılmadan üretilmiştir. SWLC isimli numune metal bağlantı elemanları kullanılmadan kireç harcı kullanılarak üretilmiştir. SWMLC kireç harcıyla birlikte metal bağlantı elemanları da kullanılmıştır. Son olarak DWMLC isimli numune ise arası 50 mm boşluğu olan iki katmandan oluşmaktadır. Mikro boyutlu kesme taş duvar elemanların boyutu 400 x 500 x 100 mm (uzunluk x yükseklik x genişlik) olup basınç analizleri yapılmıştır (Zia, A, J, 2021). Bu bölüm başlığı altında mikro boyutlu basınç analizi için AutoCAD çizim programında modellenen elemanların üçboyutlu perspektif görünüşleri Şekil 53'te gösterilmiştir.



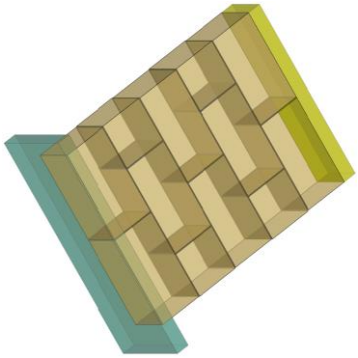
a) SWC grubuna ait elemanın tel kafes görünümü



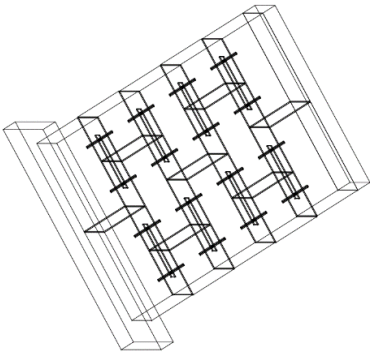
b) SWC grubuna ait elemanın röntgen görünümü



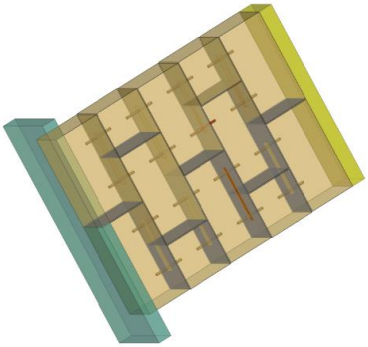
c) SWLC grubuna ait elemanın tel kafes görünümü



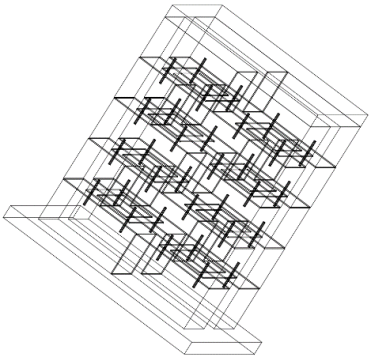
d) SWLC grubuna ait elemanın röntgen görünümü



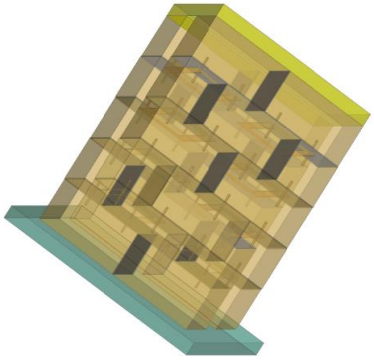
e) SWMLC grubuna ait elemanın tel kafes görünümü



f) SWMLC grubuna ait elemanın röntgen görünümü



g) DWMLC grubuna ait elemanın tel kafes görünümü



h) DWMLC grubuna ait elemanın röntgen görünümü

Şekil 53. Mikro boyutlu basınç elemanların perspektif görünüşleri

Bu bölüm başlıkları altında her grupta kesme taş için Conc50 MPa malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Harç malzemesi için Conc3 MPa kullanılmıştır (Riedel et al. 2004, Riedel, et al, 2009.). Metal bağlantı elemanları için kenet ve zıvana elemanları Structural Steel malzeme özelliği kullanılmıştır. Mesnet elemanları ise rijit olarak tanımlanmış ve Structural Steel malzeme özelliği kullanılmıştır. Mikro boyutlu elemanlarda kontak türleri verilirken mikro boyutlu eleman sayıları makro boyutlu eleman sayılarından çok daha az olduğundan her eleman birimleri arasında kalan yüzeyin malzeme özelliklerine dikkat edilerek "frictional" tipi sürtünme değerleri girilerek ve "bonded" tipine ait tam kaynaklı kontaklar tanımlanmıştır.

SWC grubuna ait duvar elemanında harç ve metal elemanları olmadığından kesme taş modelleri arasındaki sürtünme katsayısı 0,7 verilmiştir (Beer E., Russell Johnston, F. P., Ders Notu, J., & Acar, H., 2002). SWLC grubuna ait duvar elemanı harçlı olduğundan kesme taş ile harç elemanları arası temas ilişkileri bonded tanımlanmıştır. SWMLC ve DWMLC grubuna ait duvar elemanlarında ise hem harç hem metal bağlantı elemanları olduğundan kesme taş ile harç elemanları arası temas ilişkileri bonded, metal bağlantı elemanları ile kesme taş-harç elemanları arası temas ilişkileri frictional tanımlanmış olup, sürtünme katsayısı ise 0,5 verilmiştir (Zia, A, J, 2021). Metal bağlantı elemanları arasındaki temas ilişkileri ise sürtünme katsayısı daha az olacağından 0,25 verilmiştir. Bu bölümde yer alan tüm gruba ait mikro boyutlu duvar elemanları ile mesnet elemanları arasında kalan yüzeylere ise frictional sürtünme katsayısı 0,5 tanımlanmıştır (Beer E., Russell Johnston, F. P., Ders Notu, J., & Acar, H., 2002).

Referans alınan tüm numunelerin deney düzenekleri dikkate alınarak mikro boyutlu duvar elemanın sınır koşulları ve yükleme durumları bu bölüm başlığı altında ayrı ayrı tanımlanmıştır.

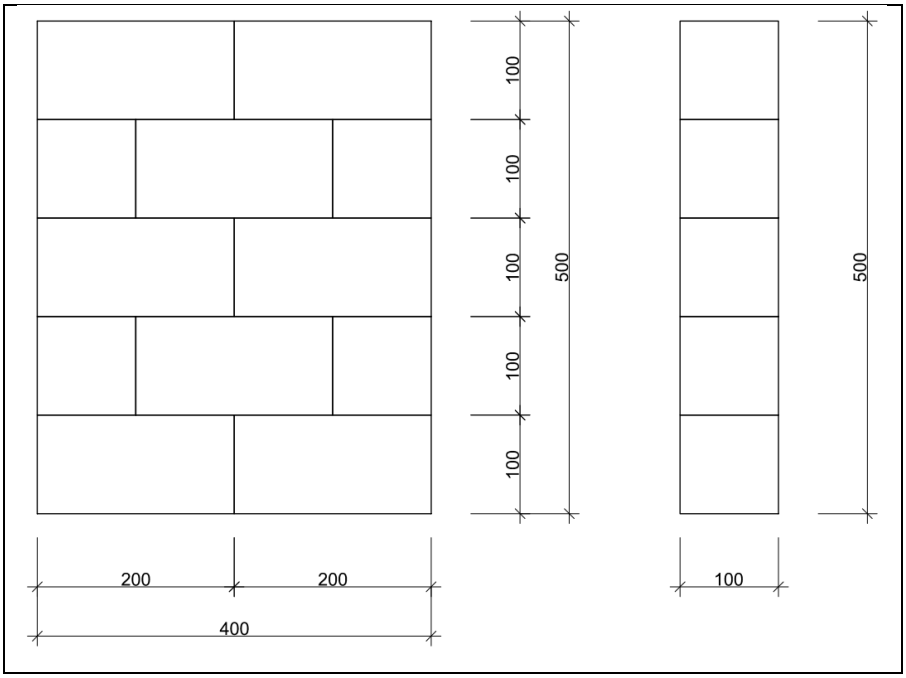
Bu bölüme ait tüm gruplar bu başlıkta anlatıldığı gibi dikkate alınarak ANSYS analiz çözümü için hazır hale getirilmiştir. Bu bölümde yapılan nümerik çalışmalar ilgili başlıklar altında verilmiştir.

3.3.1. Referans Alınan SWC Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi

Bu grupta harç ve metal bağlantı elemanları kullanılmamış, kesme taşların aralarında harç elemanı kullanılmadan sadece kesme taşlar üst üste dizilerek üretilmiştir. Buna bağlı

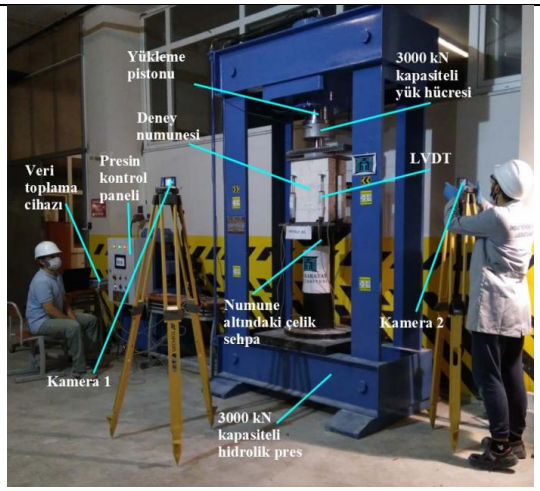
olarak mikro boyutlu duvar elemanının basınç deney düzeneği Şekil 55.a'da ve deney sonucunda oluşan kırılma durumu Şekil 56.a'da gösterilmiştir (Zia, A, J, 2021).

Geometrik cisim sayısı olarak 12 adet kesme taş elemanının üstünde basıncı uygulanacak olan hareketli mesnet ve altında sabit mesnet olmak üzere toplam 14 adet eleman AutoCAD ortamında üçboyutlu olarak modellenmiştir. Bu grupta üç boyutlu olarak modellenen elemanların ölçüleri Şekil 54'te gösterilmiştir.

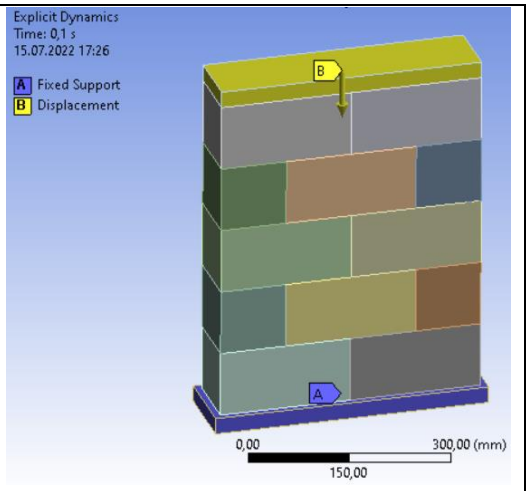


Şekil 54. SWC grubu duvar elemanının ön görünüşü ve yan görünüşü

Sonlu eleman sayıları için kesme taşların eleman boyutları 5 mm kullanılmıştır. Ağ boyutu çözümlemesi sonucunda toplam 183712 düğüm sayısı, 160904 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,1 sn verilmiştir. Basınç uygulanacak olan mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde deplasman hareketi tanımlanmıştır. Basınç uygulanacak mesnet elemanı 5 mm'ye kadar y yönünde deplasman tanımlanmıştır. Duvar numunesinin tabanındaki mesnet elemanı sabitlenmiştir (Şekil 55.b). Bu gruba ait düşey deplasman 1,075 mm'ye ulaştığında maksimum kırılma yükü 798340 N bulunmuştur. Uygulanan basınç alanı 400 mm x 100 mm yani 40000 mm² olduğundan, bulunan kuvvetin kesit alanına bölünmesi sonucunda basınç gerilmesi 19,96 MPa bulunmuştur (Şekil 56.b). Analiz sonucunda oluşan kırılma durumu gösterilmiştir.



a



b

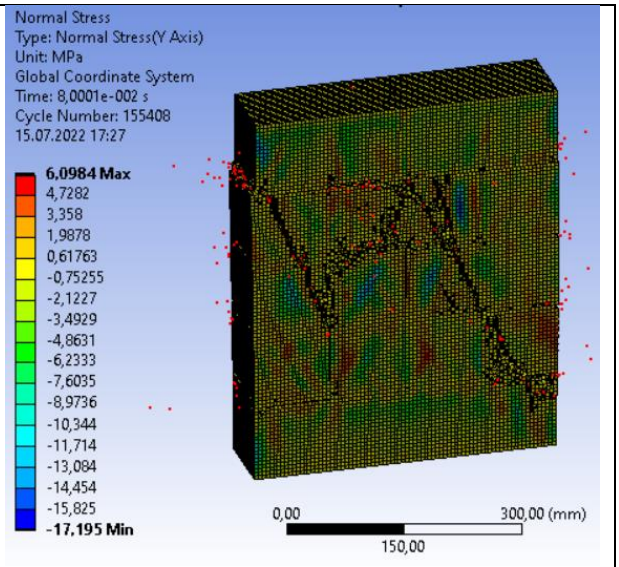
Şekil 55. Mikro boyutlu basınç deney düzeneği ve SWC grubuna ait sınır koşulları ve yükleme durumu

a) Mikro boyutlu basınç deney düzeneği (Zia, A, J, 2021)

b) SWC grubu mikro boyutlu duvar elemanın sınır koşulları ve yükleme şekli



a



b

Şekil 56. SWC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli

a) SWC-03 numunesinin nihai yükten sonraki kırılma şekli (Zia, A, J, 2021)

b) SWC grubu mikro boyutlu elemanın kırılma şekli

Deneysel olarak yapılan çalışmada kırılma gerilmeleri elde edilmiştir (Zia, A, J, 2021). Bu gruba ait ANSYS kırılma gerilmesi deneyde elde edilen kırılma gerilmesinden %4,71 fazla bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen kırılma gerilmesi ile Ansys programında yapılan analiz sonucunda elde edilen kırılma gerilmesi karşılaştırılmalı olarak Tablo 8'de gösterilmiştir.

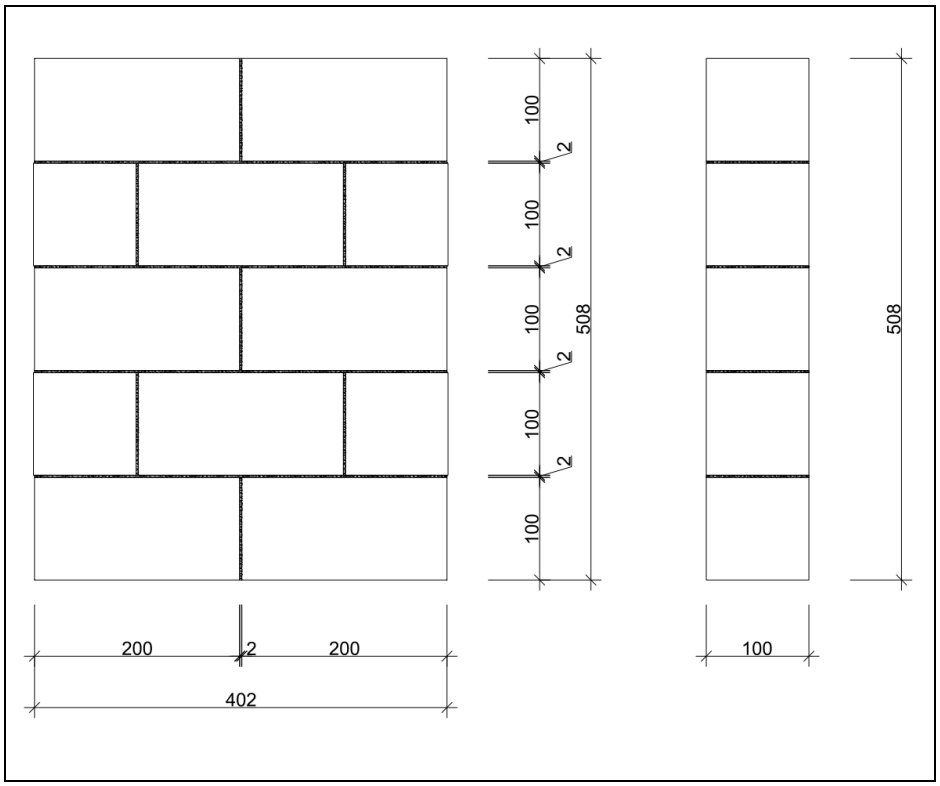
Tablo 8. SWC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri

Numune Boyutu (mm)	Deneysel kırılma gerilmesi (MPa)	Ansys eleman boyutu (mm)	Ansys kırılma gerilmesi (MPa)	Rölatif hata (%)
400x500x100 (Zia, A, J, 2021)	19,02 (Zia, A, J, 2021)	400x500x100	19,96	4,71

3.3.2. Referans Alınan SWLC Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi

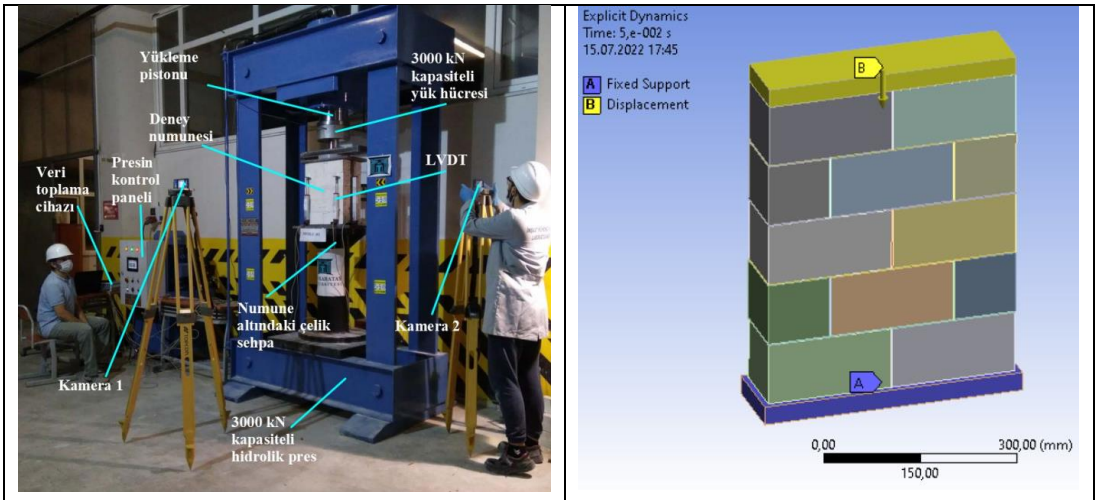
Bu grupta metal bağlantı elemanları kullanılmamış, kesme taşların aralarında 2 mm'lik harç elemanı eklenmiştir. Buna bağlı olarak mikro boyutlu duvar elemanının basınç deney düzeneği Şekil 58.a'da ve deney sonucunda oluşan kırılma durumu Şekil 59.a'da gösterilmiştir (Zia, A, J, 2021).

Geometrik cisim sayısı olarak 4 adet yatay harç elemanı, 7 adet düşey harç elemanı, 12 adet kesme taş elemanından oluşmaktadır. Ayrıca modellenen duvar elemanının üstünde basıncı uygulanacak olan hareketli mesnet ve altında sabit mesnet olmak üzere toplam 25 adet eleman AutoCAD ortamında üçboyutlu olarak modellenmiştir. Bu grupta üç boyutlu olarak modellenen elemanların ölçüleri Şekil 57'de gösterilmiştir.



Şekil 57. SWLC grubu duvar elemanının ön görünüşü ve yan görünüşü

Harç elemanlarında düzgün mesh işleminin yapılması için harç elemanları düşey ve yatay olarak ayrı ayrı modellenmiştir. Sonlu eleman sayıları için kesme taşların eleman boyutu ise 5 mm kullanılmıştır. Yatay ve düşey harç elemanları için eleman boyutu değerleri ise 2 mm'lik kalınlık esas alınarak 1 mm + 1 mm verilmiştir. Ağ boyutu çözümlemesi sonucunda toplam 219017 düğüm sayısı, 182016 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,1 sn verilmiştir. Basınç uygulanacak olan mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde deplasman hareketi tanımlanmıştır. Basınç uygulanacak mesnet elemanı 5 mm'ye kadar y yönünde deplasman tanımlanmıştır. Duvar numunesinin tabanındaki mesnet elemanı sabitlenmiştir (Şekil 58.b). Bu gruba ait düşey deplasman 1,55 mm'ye ulaştığında maksimum kırılma yükü 1068300 N bulunmuştur. Uygulanan basınç alanı 402 mm x 100 mm yani 40200 mm² olduğundan, bulunan kuvvetin kesit alanına bölünmesi sonucunda basınç gerilmesi 26,57 MPa bulunmuştur (Şekil 59.b). Analiz sonucunda oluşan kırılma durumu gösterilmiştir.

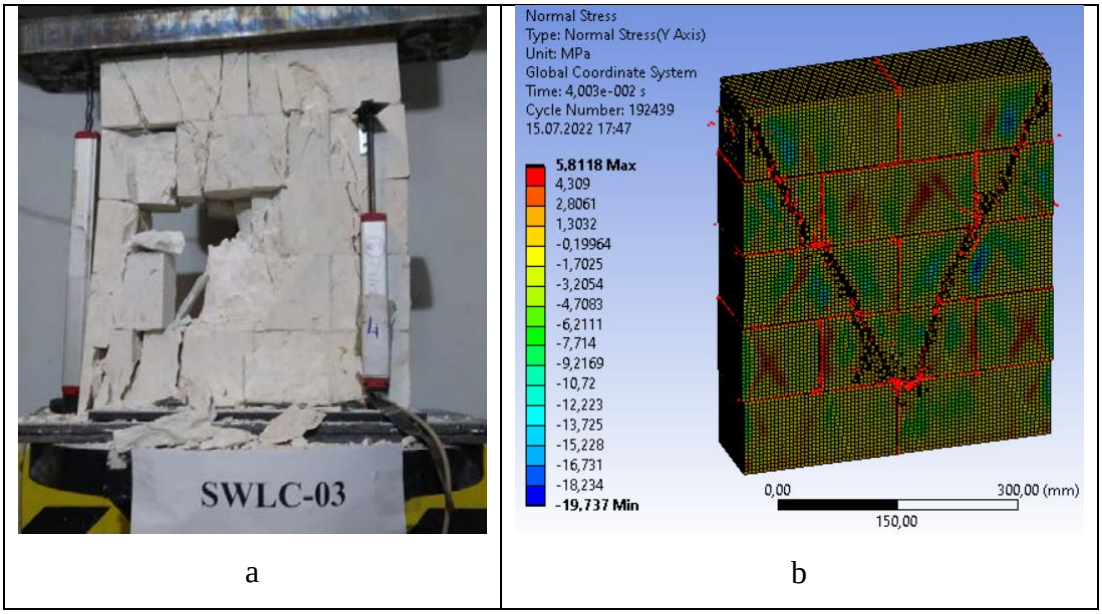


a b

Şekil 58. Mikro boyutlu basınç deney düzeneği ve SWLC grubuna ait sınır koşulları ve yükleme durumu

a) Mikro boyutlu basınç deney düzeneği (Zia, A, J, 2021)

b) SWLC grubu mikro boyutlu duvar elemanın sınır koşulları ve yükleme şekli



a b

Şekil 59. SWLC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli

a) SWLC-03 numunesinin nihai yükten sonraki kırılma şekli (Zia, A, J, 2021)

b) SWLC grubu mikro boyutlu elemanın kırılma şekli

Deneysel olarak yapılan çalışmada kırılma gerilmeleri elde edilmiştir (Zia, A, J, 2021). Bu gruba ait ANSYS kırılma gerilmesi deneyde elde edilen kırılma gerilmesinden %6,10 az bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen kırılma gerilmesi ile Ansys programında yapılan analiz sonucunda elde edilen kırılma gerilmesi karşılaştırılmalı olarak Tablo 9'da gösterilmiştir.

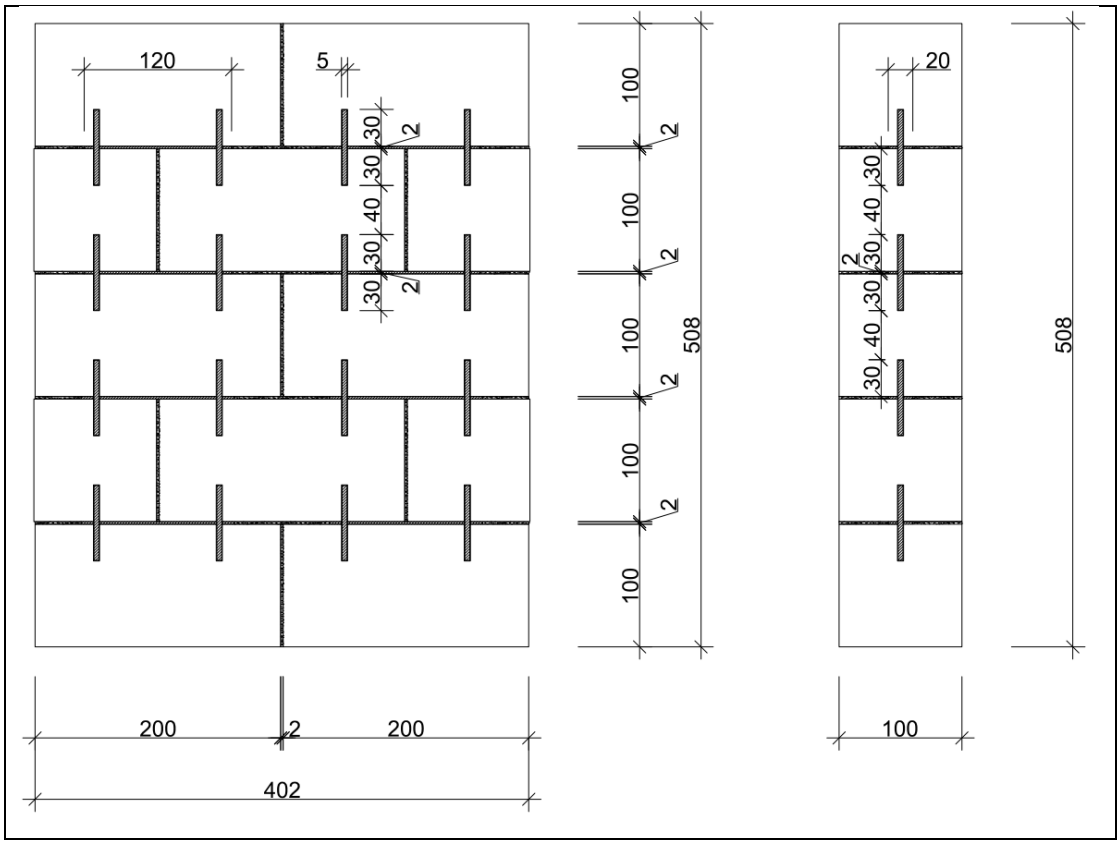
Tablo 9. SWLC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri

Numune Boyutu (mm)	Deneysel kırılma gerilmesi (MPa)	Ansys eleman boyutu (mm)	Ansys kırılma gerilmesi (MPa)	Rölatif hata (%)
400x500x100 (Zia, A, J, 2021)	28,19 (Zia, A, J, 2021)	402x508x100 (Harç dahil)	26,57	6,10

3.3.3. Referans Alınan SWMLC Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi

Bu grupta metal bağlantı elemanlarından oluşan tek katmanlı duvar kullanılmıştır. Kesme taşın aralarında 2 mm'lik harç elemanı eklenmiştir. Metal bağlantı elemanlarından zıvanaların geçebilmesi için 2 adet 5 mm çapında içi boşluklu modellenen kenet elemanı boyutu (uzunluk x yükseklik x genişlik) 120 x 2 x 20 mm dir. Zıvanalar ise 4 mm çapında 62 mm uzunluğunda modellenmiştir. Buna bağlı olarak mikro boyutlu duvar elemanının basınç deney düzeneği Şekil 61.a'da ve deney sonucunda oluşan kırılma durumu Şekil 62.a'da gösterilmiştir (Zia, A, J, 2021).

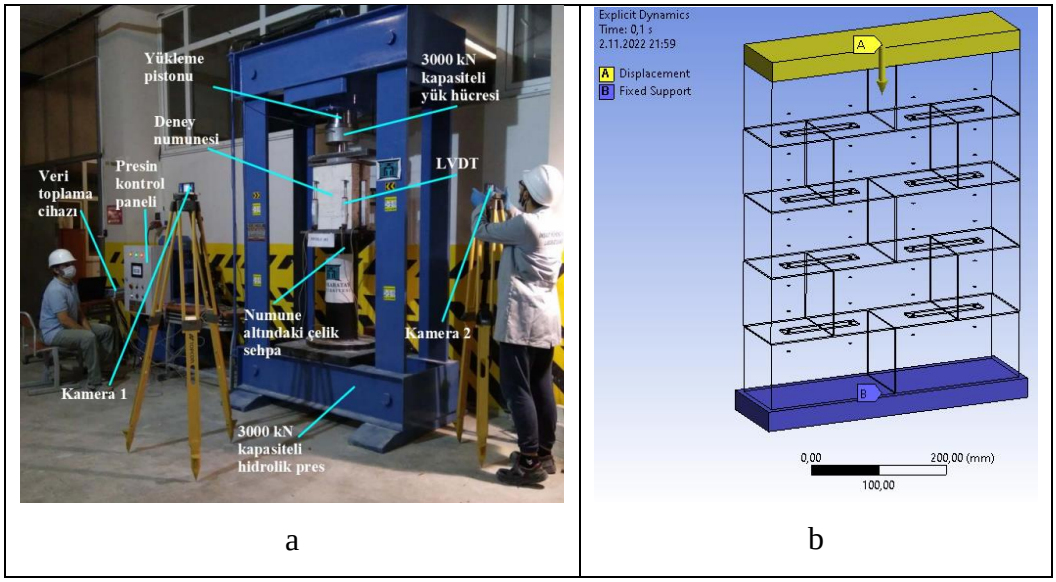
Geometrik cisim sayısı olarak metal bağlantı elemanlarından 8 adet kenet elemanı, 16 adet zıvana elemanı, 4 adet yatay harç elemanı, 7 adet düşey harç elemanı, 12 adet kesme taş elemanından oluşmaktadır. Ayrıca modellenen duvar elemanının üstünde basıncı uygulanacak olan hareketli mesnet ve altında sabit mesnet olmak üzere toplam 49 adet eleman AutoCAD ortamında üçboyutlu olarak modellenmiştir. Bu grupta üç boyutlu olarak modellenen elemanların ölçüleri Şekil 60'ta gösterilmiştir.



Şekil 60. SWMLC grubu duvar elemanının boyuna ve enine kesiti

Harç elemanlarında düzgün ağ boyutu işleminin yapılması için harç elemanları düşey ve yatay olarak ayrı ayrı modellenmiştir. Sonlu eleman sayıları için her elemanın geometrik yapılarına uygun farklı ağ yöntemleri kullanılmıştır. Kesme taşların ağ boyutlarının düzgün dağılması için "MultiZone" metodu kullanılmıştır. Yatay ve düşey harç elemanları için eleman boyutu değerleri ise 2 mm'lik kalınlık esas alınarak 1 mm + 1 mm verilmiştir. Bunun yanısıra yatay harçlarda kenetler yer alacağından düzgün ağ boyutu işlemi yapılabilmesi için harç elemanının üst ile alt yüzeyleri 10 mm eleman boyutlarında tanımlanmıştır. İçi boşluklu kenetlerinde düzgün ağ boyutu işlemi olması için kenetlerin alt ile üst yüzeyleri 5 mm eleman boyutlarında tanımlanmıştır. Zıvana elemanlarında ise eleman boyutu 5,5 mm verilmiştir. Ağ boyutu çözümlemesi sonucunda toplam 74939 düğüm sayısı, 58642 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,1 sn verilmiştir. Basınç uygulanacak olan mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde deplasman hareketi tanımlanmıştır. Basınç uygulanacak mesnet elemanı 5 mm'ye kadar y yönünde deplasman tanımlanmıştır. Duvar numunesinin tabanındaki mesnet elemanı sabitlenmiştir (Şekil 61.b). Bu gruba ait düşey deplasman 1,53 mm'ye ulaştığında maksimum kırılma yükü 961890 N bulunmuştur. Uygulanan basınç alanı 402

mm x 100 mm yani 40200 mm² olduğundan, bulunan kuvvetin kesit alanına bölünmesi sonucunda basınç gerilmesi 23,93 MPa bulunmuştur (Şekil 62.b). Analiz sonucunda oluşan kırılma durumu gösterilmiştir.

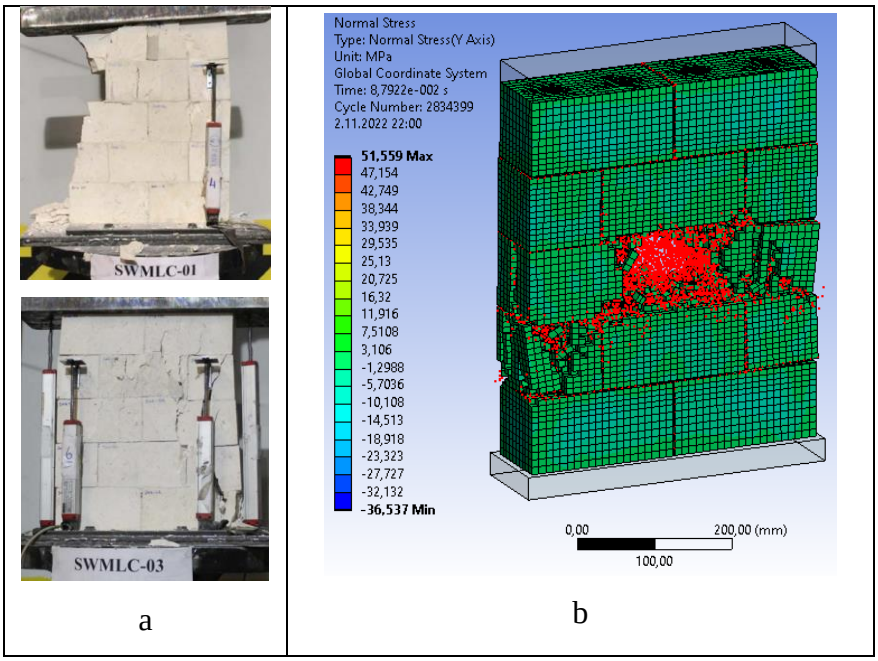


a b

Şekil 61. Mikro boyutlu basınç deney düzeneği ve SWMLC grubuna ait sınır koşulları ve yükleme durumu

a) Mikro boyutlu basınç deney düzeneği (Zia, A, J, 2021)

b) SWMLC grubu mikro boyutlu duvar elemanın sınır koşulları ve yükleme şekli



a b

Şekil 62. SWMLC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli

a) SWMLC-01-03 numunelerinin nihai yükten sonraki kırılma şekli (Zia, A, J, 2021)

b) SWMLC grubu mikro boyutlu elemanın kırılma şekli

Deneysel olarak yapılan çalışmada kırılma gerilmeleri elde edilmiştir (Zia, A, J, 2021). Bu gruba ait ANSYS kırılma gerilmesi deneyde elde edilen kırılma gerilmesinden %1,92 fazla bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen kırılma gerilmesi ile Ansys programında yapılan analiz sonucunda elde edilen kırılma gerilmesi karşılaştırılmalı olarak Tablo 10'da gösterilmiştir.

Tablo 10. SWMLC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri

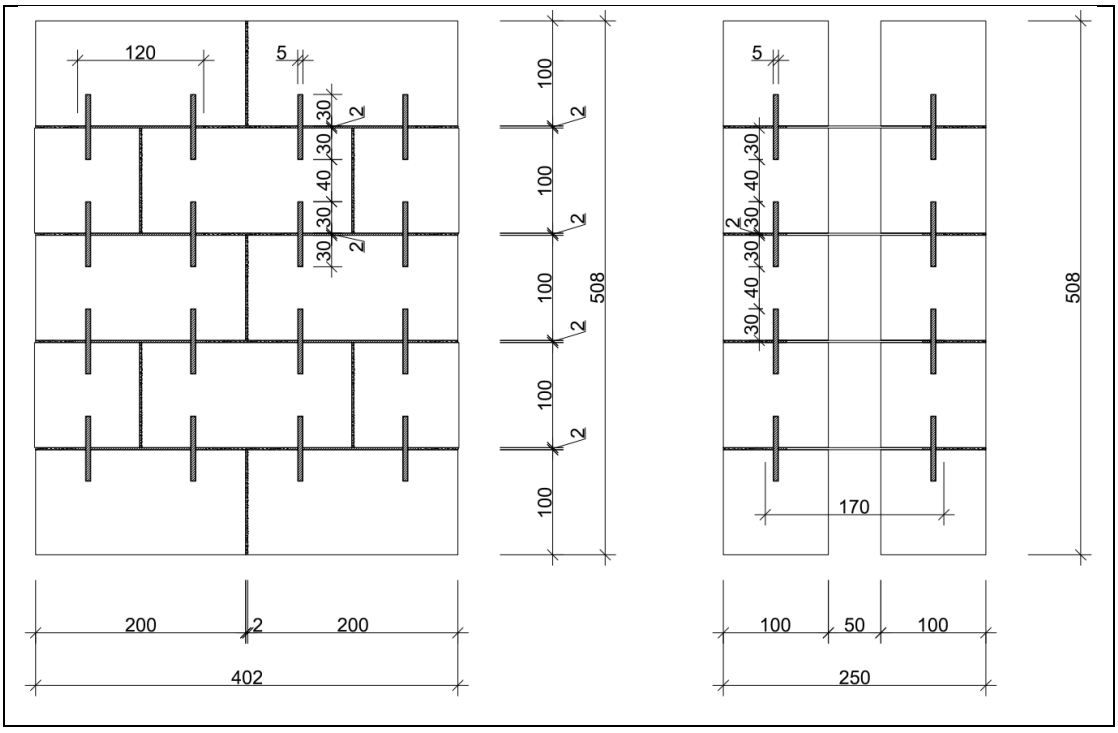
Numune Boyutu (mm)	Deneysel kırılma gerilmesi (MPa)	Ansys eleman boyutu (mm)	Ansys kırılma gerilmesi (MPa)	Rölatif hata (%)
400x500x100 (Zia, A, J, 2021)	23,47 (Zia, A, J, 2021)	402x508x100	23,93	1,92

3.3.4. Referans Alınan DWMLC Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi

Bu grupta metal bağlantı elemanlarından oluşan çift katmanlı duvar kullanılmıştır. İki katman duvar arasındaki boşluk 50 mm'dir. Kesme taşın aralarında 2 mm'lik harç elemanı eklenmiştir. Metal bağlantı elemanlarından zıvanaların geçebilmesi için 4 adet 5 mm çapında içi boşluklu modellenen ve iki duvar katmanını birbirlerine bağlayan kenet

elemanı boyutu (uzunluk x yükseklik x genişlik) 120 x 2 x 170 mm'dir. Zıvanalar ise 4 mm çapında 62 mm uzunluğunda modellenmiştir. Buna bağlı olarak mikro boyutlu duvar elemanının basınç deney düzeneği Şekil 64.a'da ve deney sonucunda oluşan kırılma durumu Şekil 65.a'da gösterilmiştir (Zia, A, J, 2021).

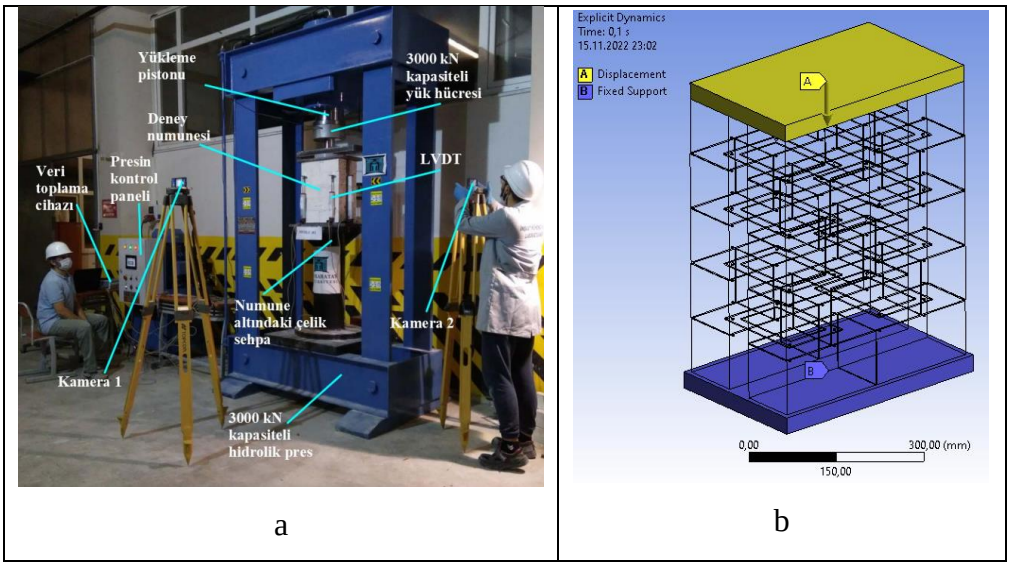
Geometrik cisim sayısı olarak metal bağlantı elemanlarından 8 adet kenet elemanı, 16+16 adet zıvana elemanı, 4+4 adet yatay harç elemanı, 7+7 adet düşey harç elemanı, 12+12 adet kesme taş elemanından oluşmaktadır. Ayrıca modellenen duvar elemanının üstünde basıncı uygulanacak olan hareketli mesnet ve altında sabit mesnet olmak üzere toplam 88 adet eleman AutoCAD ortamında üçboyutlu olarak modellenmiştir. Bu grupta üç boyutlu olarak modellenen elemanların ölçüleri Şekil 63'te gösterilmiştir.



Şekil 63. DWMLC grubu duvar elemanının boyuna ve enine kesiti

2 katmanlı duvar olduğu için 12+12 adet kesme taş elemanı, 4+4 adet yatay harç elemanı ve 7+7 adet düşey harç elemanı kullanılmıştır. Harç elemanlarında düzgün ağ boyutu işleminin yapılması için harç elemanları düşey ve yatay olarak ayrı ayrı modellenmiştir. Metal bağlantı elemanlarından 8+8 adet kenet elemanları ve 16+16 adet zıvana elemanları modellenmiştir. Sonlu eleman sayıları için her elemanın geometrik yapılarına uygun farklı ağ yöntemleri kullanılmıştır. Kesme taşların ağ boyutlarının düzgün dağılması için "MultiZone" metodu kullanılmıştır. Yatay ve düşey harç elemanları için eleman boyutu

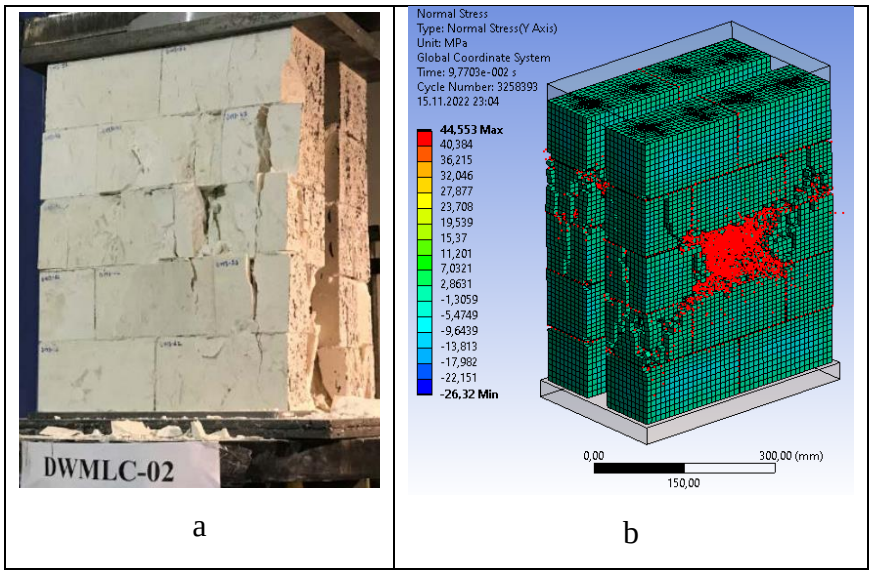
değerleri ise 2 mm'lik kalınlık esas alınarak 1 mm + 1 mm verilmiştir. Bunun yanısıra yatay harçlarda kenetler yer alacağından düzgün ağ boyutu işlemi yapılabilmesi için harç elemanının üst ile alt yüzeyleri 10 mm eleman boyutlarında tanımlanmıştır. İçi boşluklu kenetlerinde düzgün ağ boyutu işlemi olması için kenetlerin alt ile üst yüzeyleri 5 mm eleman boyutlarında tanımlanmıştır. Zıvana elemanlarında ise eleman boyutu 5,5 mm verilmiştir. Ağ boyutu çözümlemesi sonucunda toplam 156338 düğüm sayısı, 120890 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,1 sn verilmiştir. Basınç uygulanacak olan mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde deplasman hareketi tanımlanmıştır. Basınç uygulanacak mesnet elemanı 5 mm'ye kadar y yönünde deplasman tanımlanmıştır. Duvar numunesinin tabanındaki mesnet elemanı sabitlenmiştir (Şekil 64.b). Bu gruba ait düşey deplasman 1,50 mm'ye ulaştığında maksimum kırılma yükü 1939800 N bulunmuştur. Uygulanan basınç alanı 402 mm x 250 mm yani 100500 mm² olduğundan, bulunan kuvvetin kesit alanına bölünmesi sonucunda basınç gerilmesi 19,30 MPa bulunmuştur (Şekil 65.b). Analiz sonucunda oluşan kırılma durumu gösterilmiştir.



Şekil 64. Mikro boyutlu basınç deney düzeneği ve DWMLC grubuna ait sınır koşulları ve yükleme durumu

a) Mikro boyutlu basınç deney düzeneği (Zia, A, J, 2021)

b) DWMLC grubu mikro boyutlu duvar elemanın sınır koşulları ve yükleme şekli

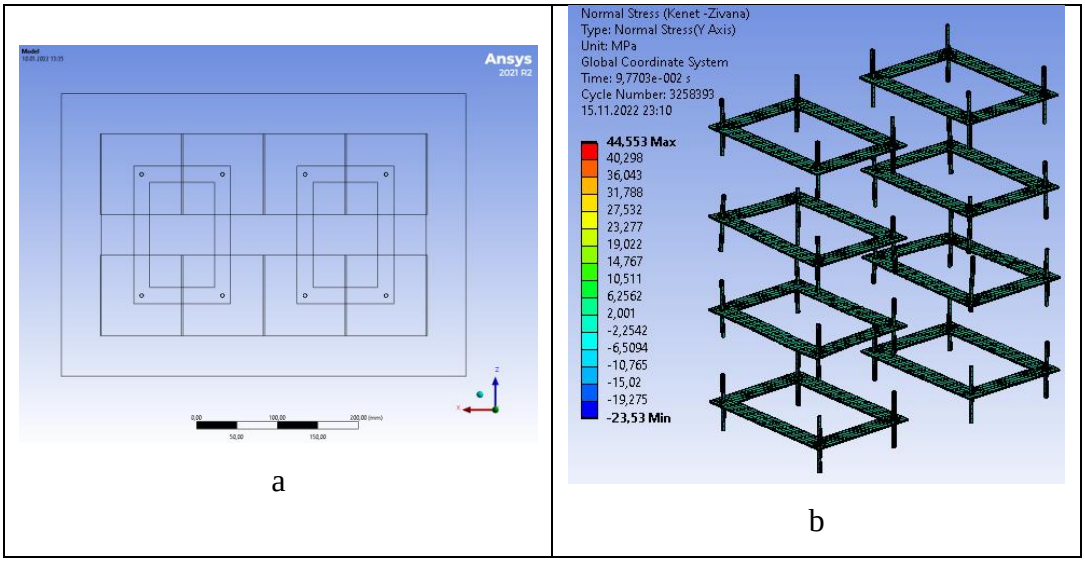


a b

Şekil 65. DWMLC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli

a) DWMLC-02 numunesinin nihai yükten sonraki kırılma şekli (Zia, A, J, 2021)

b) DWMLC grubu mikro boyutlu elemanın kırılma şekli



a b

Şekil 66. DWMLC grubuna ait kenet ve zıvanaların üstten görünüşü ve eğilme durumu

a) DWMLC grubu mikro boyutlu duvar elemanın üstten görünüşü

b) DWMLC grubu mikro boyutlu kenet ve zıvana elemanlarının eğilme şekilleri

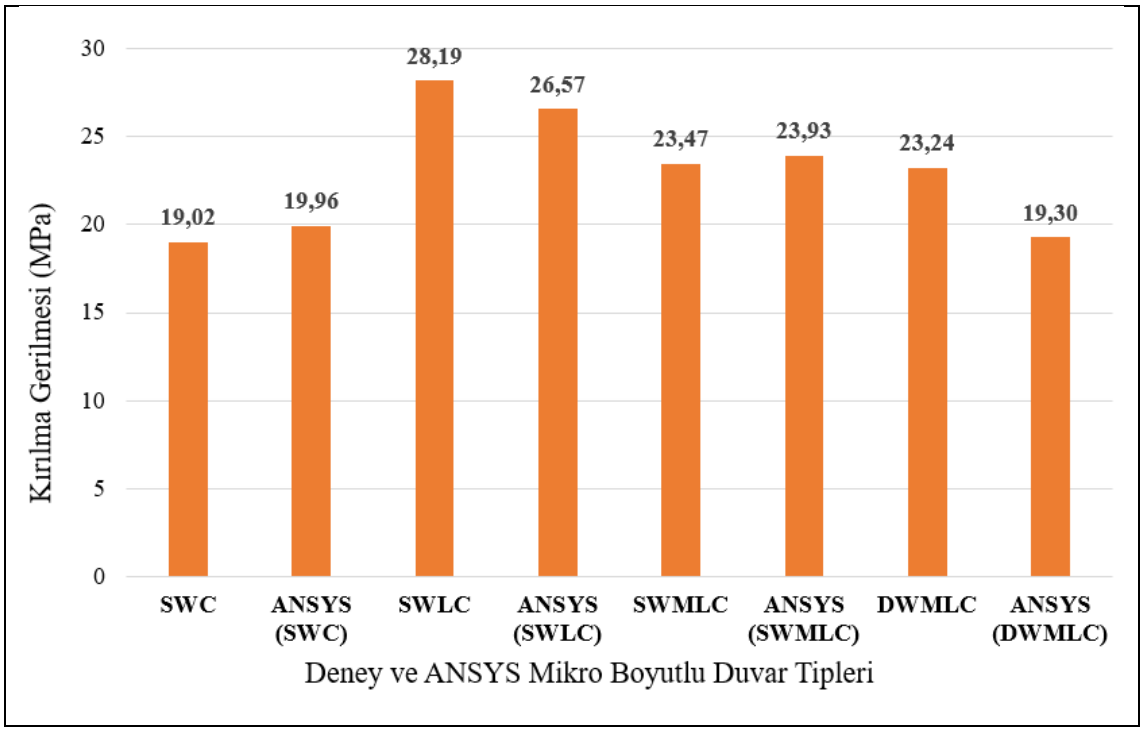
Deneysel olarak yapılan çalışmada kırılma gerilmeleri elde edilmiştir (Zia, A, J, 2021). Bu gruba ait ANSYS kırılma gerilmesi deneyde elde edilen kırılma gerilmesinden %20,41 daha az bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen kırılma gerilmesi ile Ansys programında yapılan analiz sonucunda elde edilen kırılma gerilmesi karşılaştırılmalı olarak Tablo 11'de gösterilmiştir.

Tablo 11. DWMLC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri

Numune Boyutu (mm)	Deneysel kırılma gerilmesi (MPa)	Ansys eleman boyutu (mm)	Ansys kırılma gerilmesi (MPa)	Rölatif hata (%)
400x500x250 (Zia, A, J, 2021)	23,24 (Zia, A, J, 2021)	402x508x250	19,30	20,41

3.3.5. Mikro Boyutlu Basınç Elemanların Deney ve Ansys Sonuçlarının İrdelenmesi

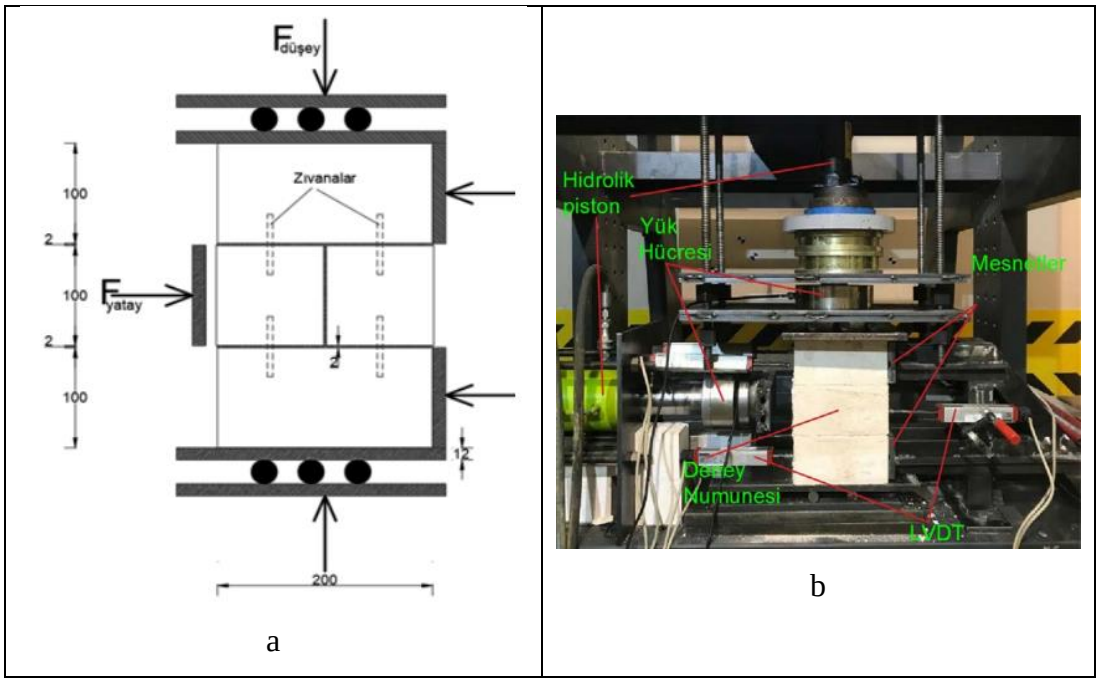
Son olarak mikro boyutlu elemanların basınç deneylerine ait ortalama basınç dayanımı ile ANSYS programıyla çözülen basınç analizine ait kırılma gerilmeleri Şekil 67'de verilmiştir. Bu karşılaştırma sonuçları ise Bölüm 4'te değerlendirilmiştir.



Şekil 67. Mikro boyutlu basınç elemanların deney ve Ansys sonuçları

3.4. Mikro Boyutlu Elemanlar için Başlangıç Kayma Analizleri

Bu bölümde doğal taş duvarların harçlı ve harçsız numunelerin davranışını ele alınmıştır. Yapılacak olan ANSYS analizlerinde kullanılmak üzere; SWIS, SWLIS, SWMLIS ve DWMLIS duvar tipleri kullanılacaktır. Bu duvar tiplerinin deneysel çalışmalarında, SWIS grubu harç kullanılmadan kesme taşların üst üste dizilen numune, SWLIS grubu metal bağlantı elemanları içermeyen harçlı numune, SWMLIS grubu tek katmanlı harçlı ve metal bağlantı elemanlarından oluşan numune ve DWMLIS grubu ise çift katmanlı harçlı ve metal bağlantı elemanlarından oluşan numuneler kullanılmıştır. Bu çalışmaya ait kayma deney düzeneği, taşıma ve yerleştirme esnasında zarar görmesini engellemek için deney düzeneği standardın belirlemiş olduğu dikey konumunda değil yatay olarak konumlandırılmıştır (Şekil 68). Başlangıç kayma deneyi kapsamında, boyutu 100 x 200 x 300 mm tek katmanlı numuneler ve boyutu 250 x 200 x 300 mm çift katmanlı numuneler kullanılmıştır. Bu deney düzeneğinde tek katmanlı numuneler için boyutu 100 x 100 x 200 mm alt (birinci) ve üst (üçüncü) sıradaki bireysel numunelerin düşey hareketi sınırlandırılmış, ortada kalan boyutu 100 x 100 x 100 mm olan iki adet elemana düşey yük verilmiştir. Çift katmanlı numuneler ise arası 50 mm boşluklu boyutu 100 x 100 x 200 mm alt (birinci) ve üst (üçüncü) sıradaki bireysel numunelerin düşey hareketi sınırlandırılmış, ortada kalan boyutu 100 x 100 x 100 mm olan iki adet elemana düşey yük verilmiştir. Tek ve çift katmanlı numunelerdeki normal gerilmeler ise yatay olarak uygulanmıştır. Düşey yük 0,2 MPa, 0,6 MPa ve 1,0 MPa olmak üzere üç farklı deney düzeneği yapılmıştır (Zia, A, J, 2021).



a b

Şekil 68. Deneyde kullanılan başlangıç kayma düzenekleri

a) Deneyde yatay olarak kullanılan başlangıç kayma deney düzeneği

b) Başlangıç kayma deney düzeneği

(Kaynak: Zia, A, J, 2021)

Mikro boyutlu başlangıç kayma çalışmalarında kullanılan kesme taş, harç ve metal bağlantı elemanlarına ait malzeme parametreleri Bölüm 3'te yer alan "Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi" başlığı altında verilen Tablo 1 ve Tablo 2'ye göre tanımlanmıştır. Mesnet elemanları ise rijit olarak tanımlanmış ve Structural Steel malzeme özelliği kullanılmıştır. Bu gruplara ait kontak türleri verilirken her eleman birimleri arasında kalan yüzeyin malzeme özelliklerine dikkat edilerek "frictional" tipi sürtünme değerleri girilerek ve "bonded" tipine ait tam kaynaklı kontaklar tanımlanmıştır.

SWIS grubuna ait duvar elemanında harç ve metal elemanları olmadığından kesme taş modelleri arasındaki sürtünme katsayısı 0,76 verilmiştir (Demir, C., 2012). SWLIS grubuna ait duvar elemanı harçlı olduğundan kesme taş ile harç elemanları arası temas ilişkileri "frictional" sürtünme katsayısı 0,76 tanımlanmıştır. SWMLIS ve DWMLIS grubuna ait duvar elemanlarında ise hem harç hem metal bağlantı elemanları olduğundan kesme taş ile harç elemanları arası temas ilişkileri frictional sürtünme katsayısı da 0,76 (Demir, C., 2012). Metal bağlantı elemanları ile kesme taş-harç elemanları arası temas

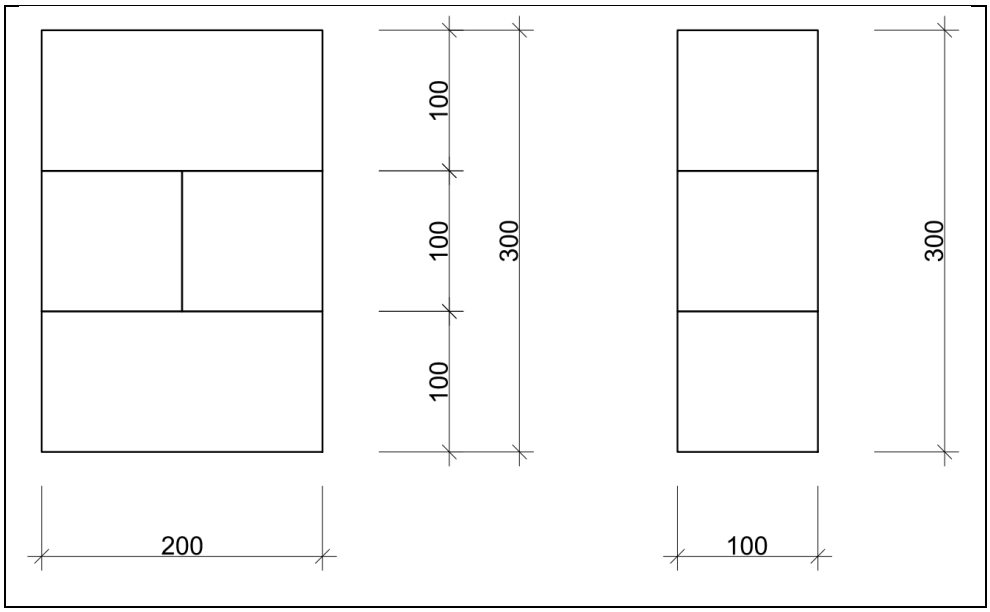
ilişkileri frictional sürtünme katsayısı 0,5 tanımlanmıştır (Zia, A., J., 2021). Metal bağlantı elemanları arasındaki temas ilişkileri ise sürtünme katsayısı daha az olacağından 0,25 verilmiştir. Bu bölümde yer alan tüm gruba ait mikro boyutlu duvar elemanları ile mesnet elemanları arasında kalan yüzeylere ise frictional sürtünme katsayısı 0,5 tanımlanmıştır (Beer E., Russell Johnston, F. P., Ders Notu, J., & Acar, H., 2002).

Bu çalışmada her grup için sınır koşulları ve yük durumları tanımlanırken toplam çözüm aralığında verilen zaman iki kısma ayrılmıştır. Bunlardan birinci kısmı %5'lik pay bırakılıp geri kalan ikinci kısım %95'lik pay bırakılmıştır. Bunun sebebi yatay deplasman için hareketli mesnet ile düşey basınç için hareketli mesnet elemanları aynı anda hareket ettirildiğinde sağlıklı bir sınır koşulu ve yük durumu tanımlanmamış olacaktır. Dolayısıyla çözüm başlangıcından %5'lik kısma kadar yatay deplasman hareketsiz bırakılıp, düşey basınç mesnet elemanı sıfır basınç değerinden sabit basınç değerine kadar duvar elemanın üst yüzeyine basınç uygulanmıştır. Geriye kalan zamanın ikinci kısmı yani %5'inden son zaman aralığına kadar uygulanan düşey basınç için kullanılan mesnet elemanı basınç değeri değişmeyecek şekilde sabit bırakılıp, yatay deplasman için mesnet elemanı yatay olarak hareket ettirilmiştir. Yatay deplasman için kullanılan mesnet elemanları SWIS ve SWLIS grupları x yönünde 15 mm'ye kadar, SWMLIS ve DWMLIS grupları ise 20 mm'ye kadar itme hareketi uygulanmıştır.

3.4.1. Referans Alınan SWIS20, SWIS60 ve SWIS100 Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi

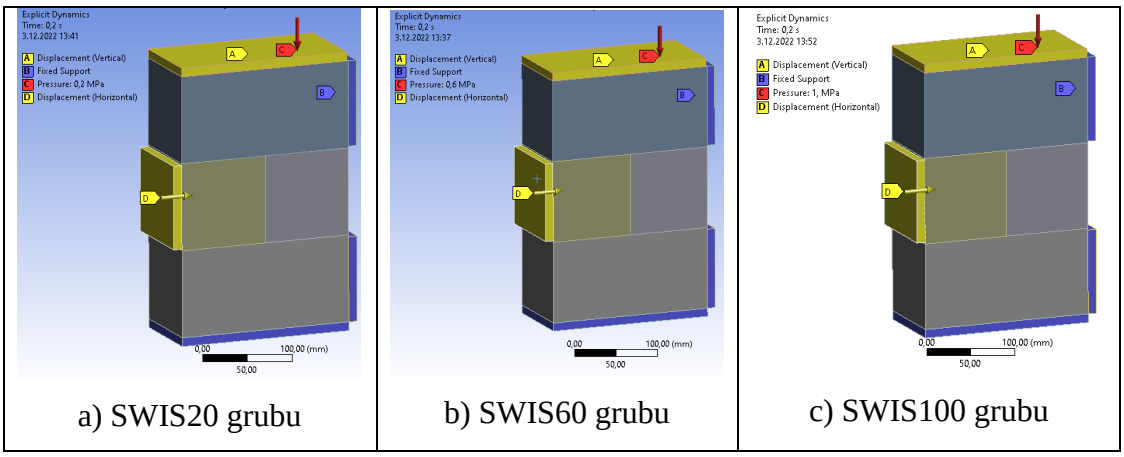
Bu grupta harç ve metal bağlantı elemanları kullanılmadan, sadece kesme taşlar üst üste dizilerek üretilmiştir (Zia, A., J., 2021).

Geometrik cisim sayısı olarak 4 adet kesme taş elemanı, üstünde basıncı uygulanacak olan düşey hareketli mesnet, orta kısmına deplasman uygulanacak olan yatay hareketli mesnet, birinci ve üçüncü sıradaki kesme taşların sağ yanına sabit mesnet ve birinci sıradaki kesme taşın altına da sabit mesnet olmak üzere toplam 9 adet eleman AutoCAD ortamında üçboyutlu olarak modellenmiştir ve ölçüleri Şekil 69'da gösterilmiştir.



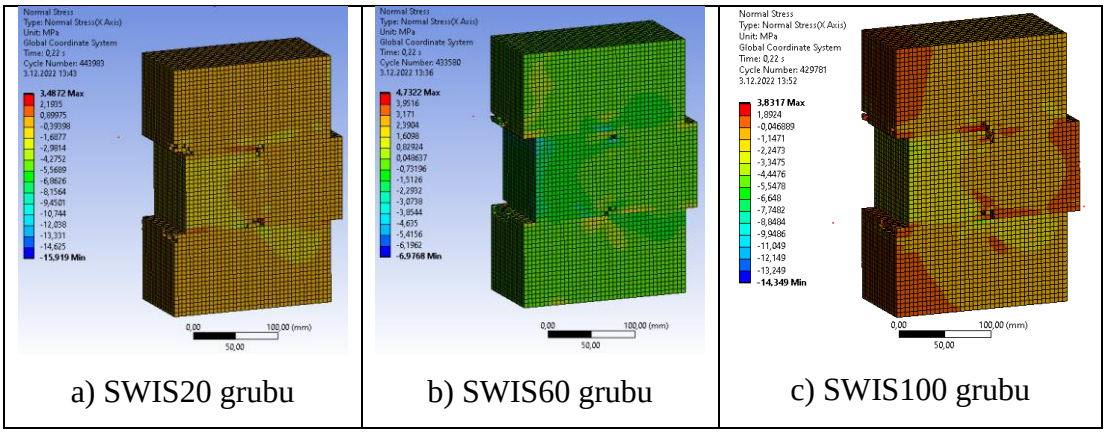
Şekil 69. SWIS grubu duvar elemanın ön görünüşü ve yan görünüşü

Sayısal analiz çözümü öncesi düşey basınç uygulanacak hareketli mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde serbest bırakılmıştır. Bu mesnet elemanlara SWIS20 grubu için 0,2 MPa, SWIS60 grubu için 0,6 MPa, SWIS100 grubu için 1,0 MPa olmak üzere y yönünde düşey yük tanımlanmıştır. Ayrıca her üç grup için sınır koşulları aynı olup orta kısmında kalan iki adet kesme taş elemanlara yatay hareket verecek olan mesnet elemanı ise x yönünde 15 mm deplasman tanımlanmıştır. Yine her üç grupta kullanılan diğer üç adet eleman ise sabit olarak mesnetlenmiştir (Şekil 70).



a) SWIS20 grubu | b) SWIS60 grubu | c) SWIS100 grubu

Şekil 70. SWIS grubu duvar elemanların sınır koşulları ve yükleme durumları



a) SWIS20 grubu | b) SWIS60 grubu | c) SWIS100 grubu

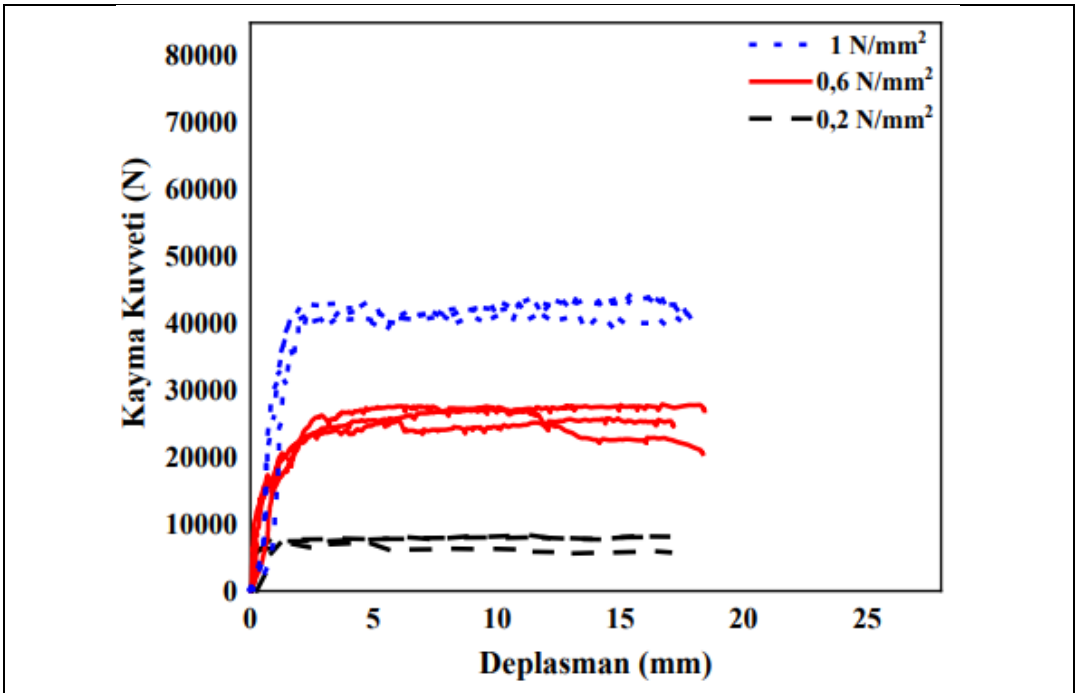
Şekil 71. SWIS grubu analiz sonucunda oluşan başlangıç kayma şekilleri

SWIS gruba ait sonlu eleman sayıları için kesme taşların ağ boyutları 5 mm kullanılmıştır. Ağ boyutu çözümlemesi sonucunda toplam 56334 düğüm sayısı, 48700 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,22 sn verilmiştir. ANSYS programında analizi yapılan SWIS20, SWIS60 ve SWIS100 gruplarına ait yatay deplasman hareketi boyunca bulunan kayma kuvvetlerin en büyüğü esas alınmıştır. Bu gruplara ait deneysel ortalama kayma kuvveti ve ANSYS maksimum kayma kuvveti sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir (Tablo 12).

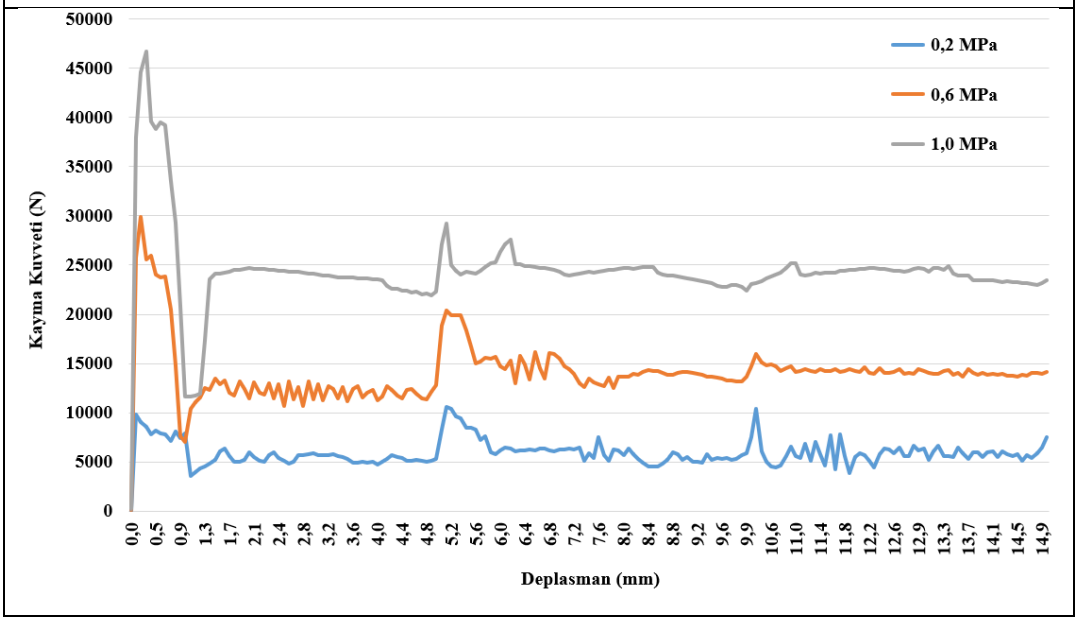
Tablo 12. SWIS grubu deney ve Ansys ortalama başlangıç kayma kuvveti sonuçları

Duvar grup ismi	Deney Ortalama Kayma Kuvveti (N)	ANSYS Maksimum Kayma Kuvveti (N)	Rölatif hata (%)
SWIS20	7840	10541	25,62
SWIS60	26881	29865	9,99
SWIS100	43090	46728	7,79

Şekil 72'de üç gruba ait deney ve ANSYS yatay kuvvet – deplasman grafikleri ise karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



(Zia, A., J., 2021)

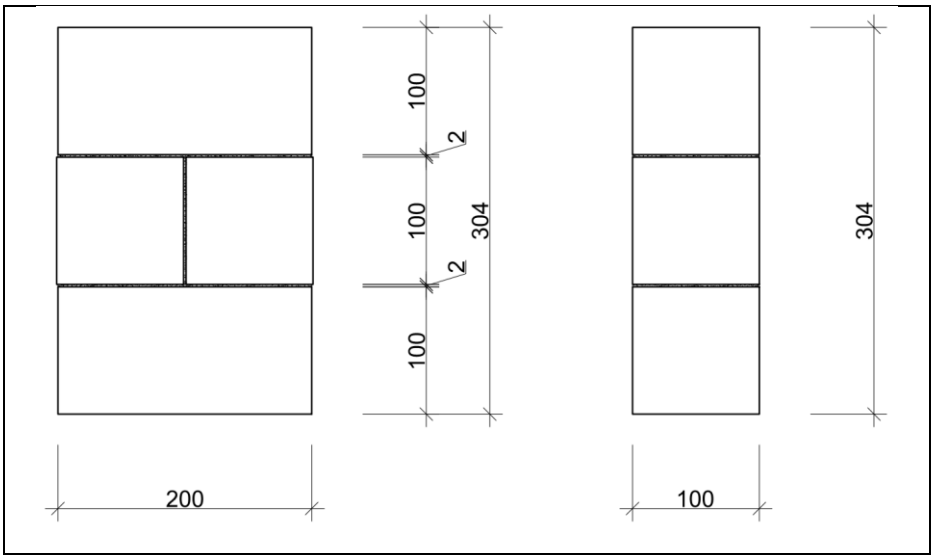


Şekil 72. SWIS grubuna ait deney ve Ansys yatay kuvvet – deplasman grafikleri

3.4.2. Referans Alınan SWLIS20, SWLIS60 ve SWLIS100 Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi

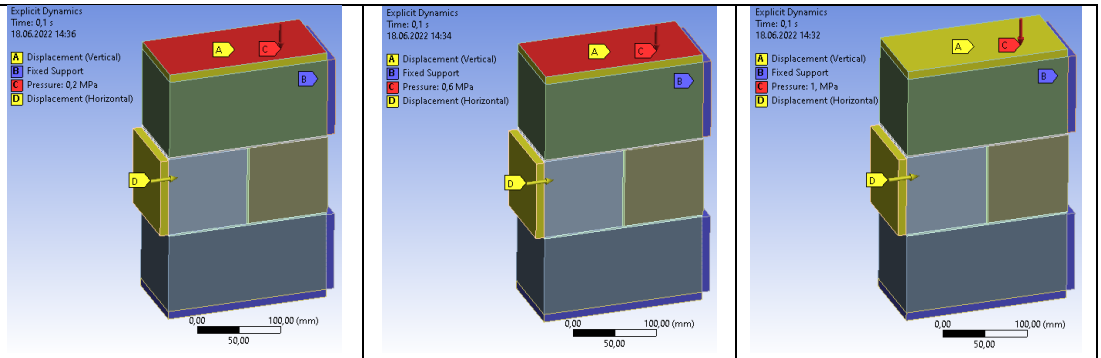
Bu grupta metal bağlantı elemanları kullanılmamış, kesme taşların aralarında 2 mm'lik harç elemanı eklenmiştir (Zia, A, J, 2021).

Geometrik cisim sayısı olarak 4 adet kesme taş elemanı, 1 adet düşey harç elemanı, 2 adet yatay harç elemanı, üstünde basıncı uygulanacak olan düşey hareketli mesnet, orta kısmına deplasman uygulanacak olan yatay hareketli mesnet, birinci ve üçüncü sıradaki kesme taşların sağ yanına sabit mesnet ve birinci sıradaki kesme taşın altına da sabit mesnet olmak üzere toplam 12 adet eleman AutoCAD ortamında üçboyutlu olarak modellenmiştir ve ölçüleri Şekil 73'te gösterilmiştir.



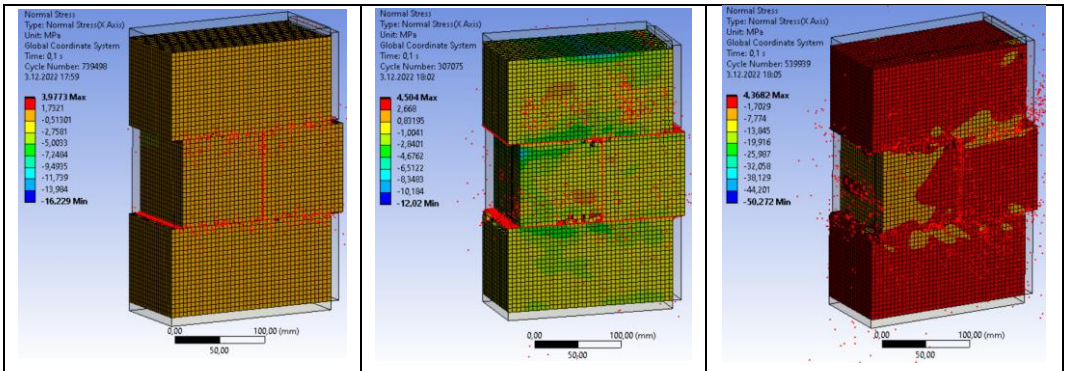
Şekil 73. SWLIS grubu duvar elemanın ön görünüşü ve yan görünüşü

Sayısal analiz çözümü öncesi düşey basınç uygulanacak hareketli mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde serbest bırakılmıştır. Bu mesnet elemanlara SWLIS20 grubu için 0,2 MPa, SWLIS60 grubu için 0,6 MPa, SWLIS100 grubu için 1,0 MPa olmak üzere y yönünde düşey yük tanımlanmıştır. Ayrıca her üç grup için sınır koşulları aynı olup orta kısmında kalan iki adet kesme taş elemanlara yatay hareket verecek olan mesnet elemanı ise x yönünde 15 mm deplasman tanımlanmıştır. Yine her üç grupta kullanılan diğer üç adet eleman ise sabit olarak mesnetlenmiştir (Şekil 74).



a) SWLIS20 grubu | b) SWLIS60 grubu | c) SWLIS100 grubu

Şekil 74. SWLIS grubu duvar elemanların sınır koşulları ve yükleme durumları



a) SWLIS20 grubu | b) SWLIS60 grubu | c) SWLIS100 grubu

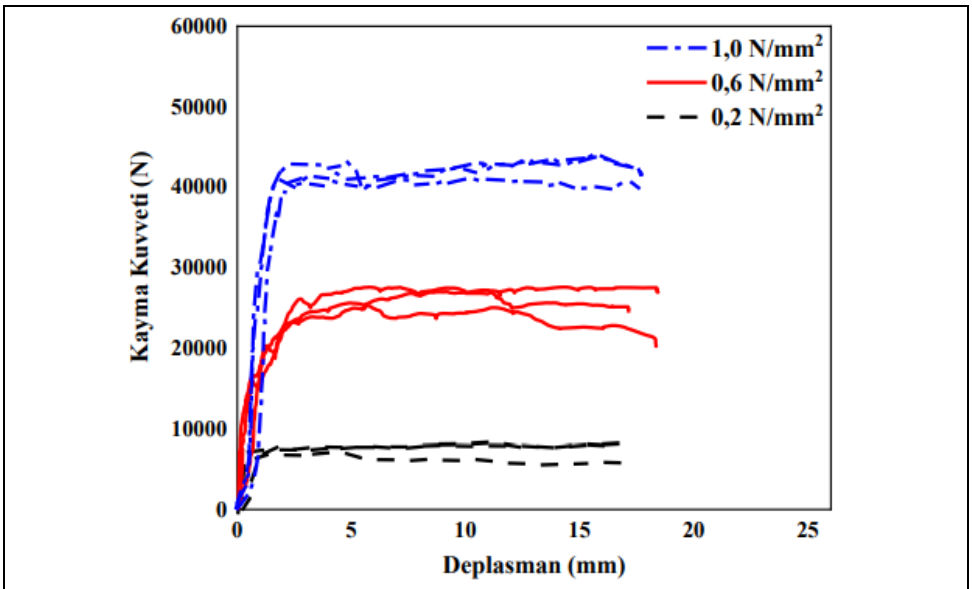
Şekil 75. SWLIS grubu analiz sonucunda oluşan başlangıç kayma şekilleri

SWLIS gruba ait sonlu eleman sayıları için kesme taşların ağ boyutları 5 mm kullanılmıştır. Harç elemanları için ağ boyutları harç kalınlığı doğrultusuna göre 1 mm, harcın eni ve boyuna göre 2 mm tanımlanmıştır. Ağ boyutu çözümlemesi sonucunda toplam 95043 düğüm sayısı, 73700 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,1 sn verilmiştir. ANSYS programında analizi yapılan SWLIS20, SWLIS60 ve SWLIS100 gruplarına ait yatay deplasman hareketi boyunca bulunan kayma kuvvetlerin en büyüğü esas alınmıştır. Bu gruplara ait deneysel ortalama kayma kuvveti ve ANSYS maksimum kayma kuvveti sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir (Tablo 13).

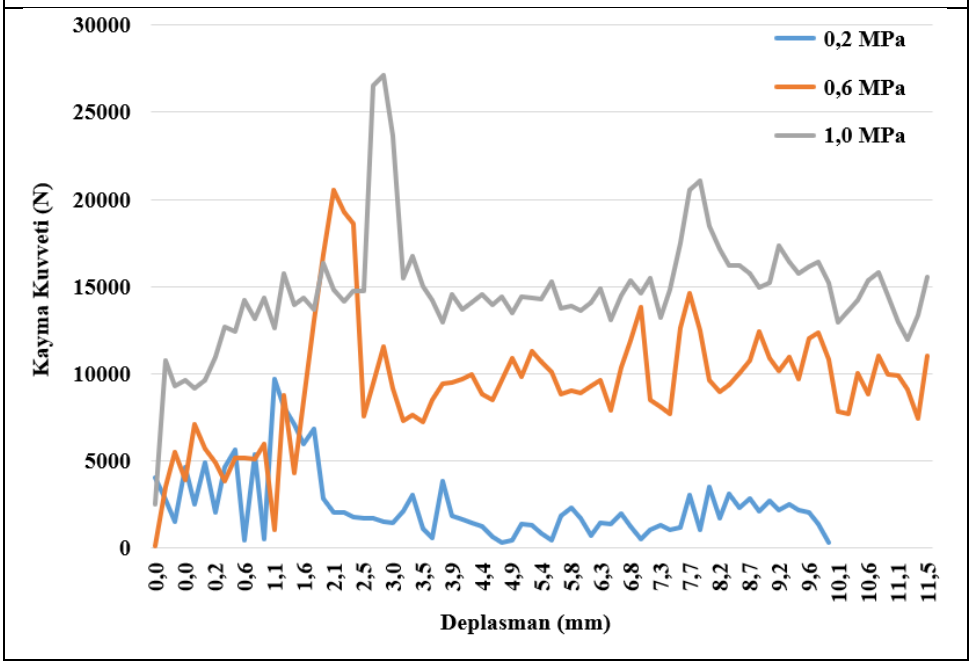
Tablo 13. SWLIS grubu deney ve Ansys ortalama başlangıç kayma kuvveti sonuçları

Duvar grup ismi	Deney Ortalama Kayma Kuvveti (N)	ANSYS Maksimum Kayma Kuvveti (N)	Rölatif hata (%)
SWLIS20	8522	9711	12,24
SWLIS60	21172	20510	3,23
SWLIS100	31664	27122	16,75

Şekil 76'da üç gruba ait deney ve ANSYS yatay kuvvet – deplasman grafikleri ise karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



(Zia, A, J, 2021)

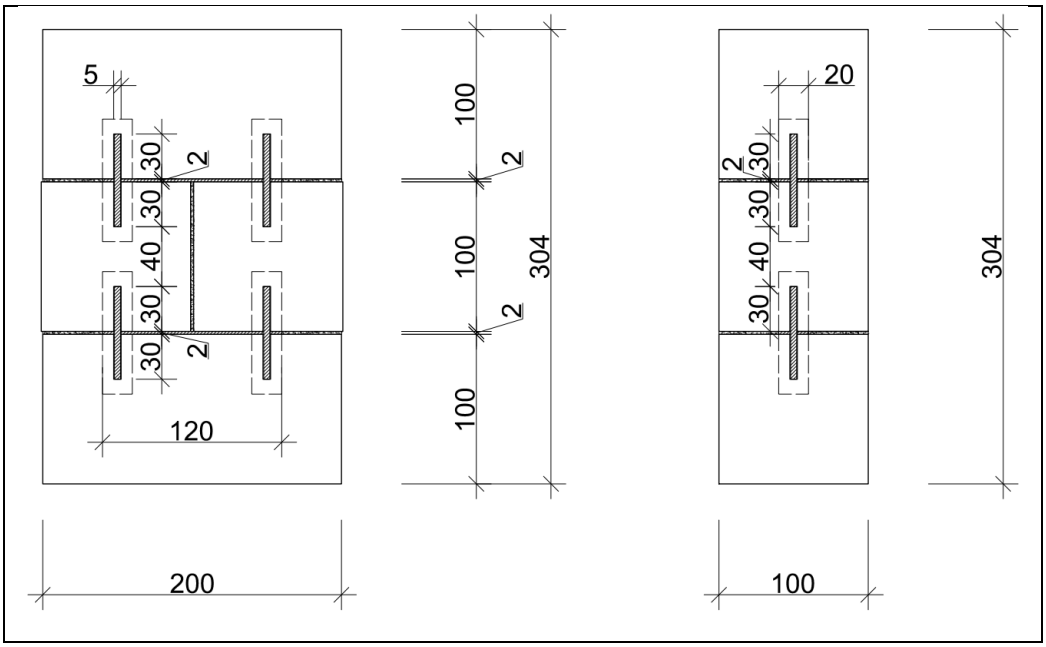


Şekil 76. SWLIS grubuna ait deney ve Ansys yatay kuvvet – deplasman grafikleri

3.4.3. Referans Alınan SWMLIS20, SWMLIS60 ve SWMLIS100 Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi

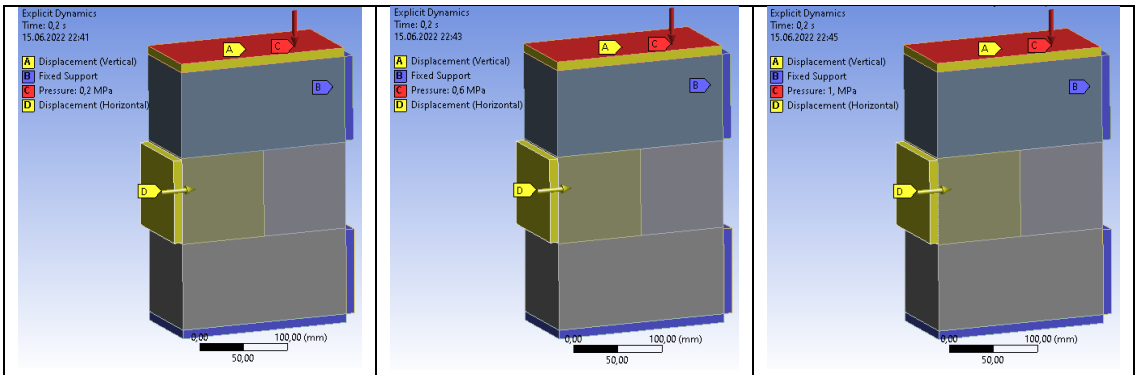
Bu grupta metal bağlantı elemanlarından oluşan tek katmanlı duvar kullanılmıştır. Kesme taşın aralarında 2 mm'lik harç elemanı eklenmiştir. Metal bağlantı elemanlarından zıvanaların geçebilmesi için 2 adet 5 mm çapında içi boşluklu modellenen kenet elemanı boyutu (uzunluk x yükseklik x genişlik) 120 x 2 x 20 mm dir. Zıvanalar ise 4 mm çapında 62 mm uzunluğunda kullanılmıştır (Zia, A, J, 2021).

Geometrik cisim sayısı olarak gerçek görünüşte 4 adet kesme taş elemanı mevcut ancak sayısal analiz için zıvana elemanlarının kopma, eğilme hareketlerini incelemek için her kesme taşların zıvana yuvası bölgelerine yani iç katman geometrik elemanlarına farklı ağ boyutu verilecektir. Buna bağlı olarak kesme taş elemanlara ait dış katman geometrik eleman sayısı 4 olup iç katman geometrik eleman sayısı 8 adet modellenmiştir. Kesme taş elemanları olarak toplam 12 adet modellenmiştir. 1 adet düşey harç elemanı, 2 adet yatay harç elemanı modellenmiştir. Tek katmanlı duvara ait birinci ve ikinci sıradaki kesme taşların arasına birinci kenet elemanı, ikinci ve üçüncü sıradaki kesme taşların arasına ikinci kenet elemanı yerleştirilerek 2 adet kenet elemanı modellenmiştir. Her bir kenetten geçen 2 adet zıvana olacak şeklinde, toplam 4 adet zıvana modellenmiştir. Üçüncü sıradaki kesme taşların üstünde basıncı uygulanacak olan düşey hareketli mesnet, orta kısmına deplasman uygulanacak olan yatay hareketli mesnet, birinci sıradaki ve üçüncü sıradaki kesme taşların sağ yanına sabit mesnet ve birinci sıradaki kesme taşın altına da sabit mesnet olmak üzere son olarak toplam 26 adet eleman AutoCAD ortamında üçboyutlu olarak modellenmiştir ve ölçüleri Şekil 77'de gösterilmiştir.



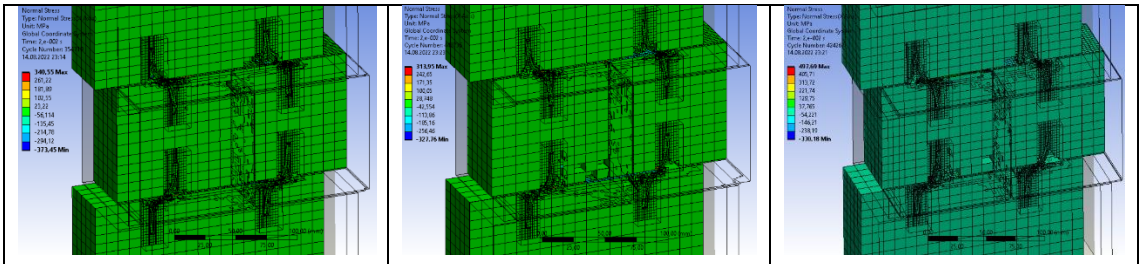
Şekil 77. SWMLIS grubu duvar elemanın boyuna ve enine kesiti

Sayısal analiz çözümü öncesi düşey basınç uygulanacak hareketli mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde serbest bırakılmıştır. Bu mesnet elemanlara SWMLIS20 grubu için 0,2 MPa, SWMLIS60 grubu için 0,6 MPa, SWMLIS100 grubu için 1,0 MPa olmak üzere y yönünde düşey yük tanımlanmıştır. Ayrıca her üç grup için sınır koşulları aynı olup orta kısmında kalan iki adet kesme taş elemanlara yatay hareket verecek olan mesnet elemanı ise x yönünde 20 mm deplasman tanımlanmıştır. Yine her üç grupta kullanılan diğer üç adet eleman ise sabit olarak mesnetlenmiştir (Şekil 78).



a) SWMLIS20 grubu | b) SWMLIS60 grubu | c) SWMLIS100 grubu

Şekil 78. SWMLIS grubu duvar elemanların sınır koşulları ve yükleme durumları



a) SWMLIS20 grubu | b) SWMLIS60 grubu | c) SWMLIS100 grubu

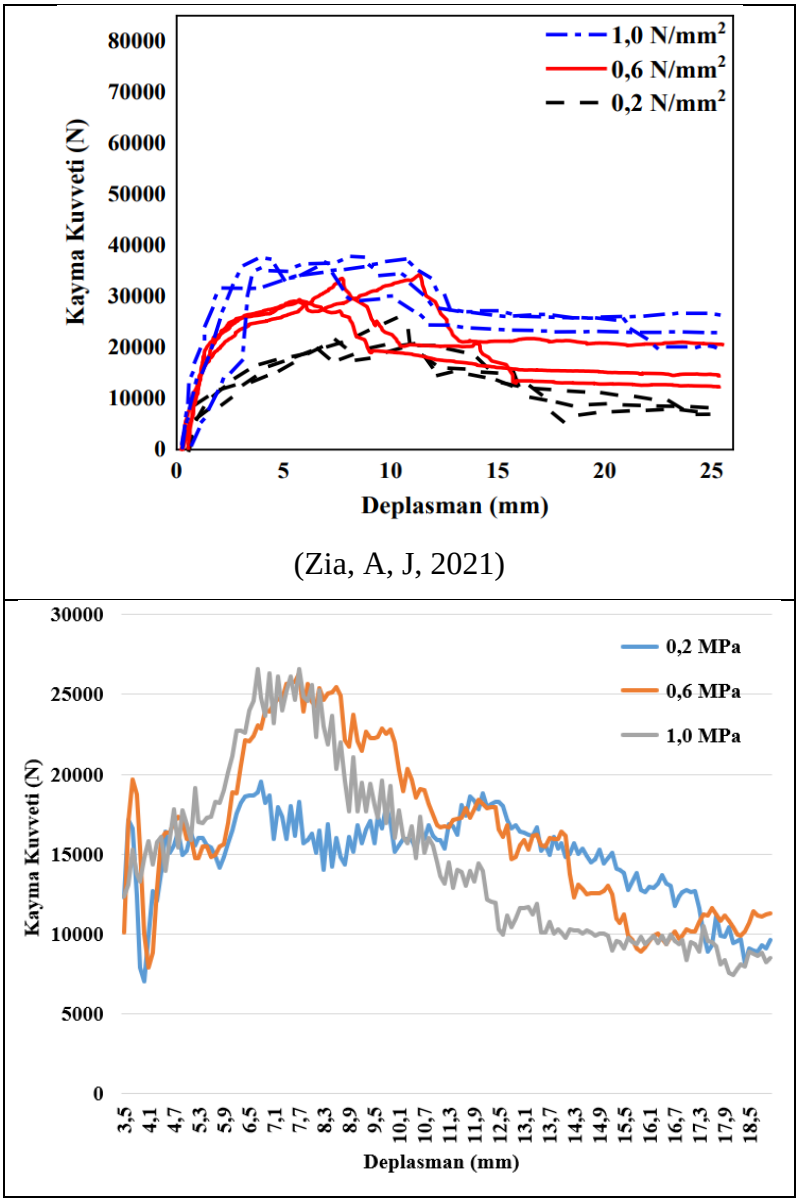
Şekil 79. SWMLIS grubu analiz sonucunda oluşan başlangıç kayma şekilleri

SWMLIS gruba ait sonlu eleman sayıları için kesme taşların ağ boyutları zıvana yuvasına yakın bölgede 5 mm ve diğer bölgelerde 10mm kullanılmıştır. Harç elemanları için ağ boyutları kalınlığa göre 1 mm, eni ve boyuna göre 2,5 mm tanımlanmıştır. Kenet elemanlarının ağ boyutları 2,5 mm tanımlanmıştır. Bu grupta başlangıç kayma analizi gerçekleşeceği için zıvana elemanlarının orta bölgesindeki ağ boyutu diğer alt ve üst bölgelerindeki ağ boyutuna göre daha sık aralıklı dağıtılmıştır. Ağ boyutu çözümlemesi sonucunda toplam 49483 düğüm sayısı, 33436 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,02 sn verilmiştir. ANSYS programında analizi yapılan SWMLIS20, SWMLIS60 ve SWMLIS100 gruplarına ait yatay deplasman hareketi boyunca bulunan kayma kuvvetlerin en büyüğü esas alınmıştır. Bu gruplara ait deneysel ortalama kayma kuvveti ve ANSYS maksimum kayma kuvveti sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir (Tablo 14).

Tablo 14. SWMLIS grubu deney ve Ansys ortalama başlangıç kayma kuvveti sonuçları

Duvar grup ismi	Deney Ortalama Kayma Kuvveti (N)	ANSYS Maksimum Kayma Kuvveti (N)	Rölatif hata (%)
SWMLIS20	22829	19531	16,89
SWMLIS60	32523	26340	23,47
SWMLIS100	37438	26590	40,80

Şekil 80'de üç gruba ait deney ve ANSYS yatay kuvvet – deplasman grafikleri ise karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



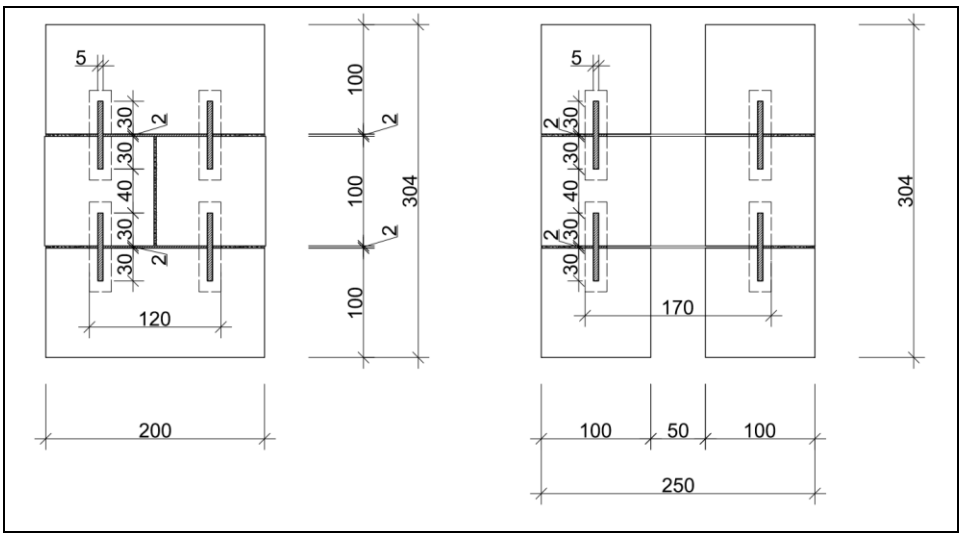
(Zia, A, J, 2021)

Şekil 80. SWMLIS grubuna ait deney ve Ansys yatay kuvvet – deplasman grafikleri

3.4.4. Referans Alınan DWMLIS20, DWMLIS60 ve DWMLIS100 Grubu Mikro Boyutlu Elemanın Analizi

Bu grupta metal bağlantı elemanlarından oluşan çift katmanlı duvar kullanılmıştır. İki katman duvar arasındaki boşluk 50 mm'dir. Kesme taşın aralarında 2 mm'lik harç elemanı eklenmiştir. Metal bağlantı elemanlarından zıvanaların geçebilmesi için 4 adet 5 mm çapında içi boşluklu modellenen ve iki duvar katmanını birbirlerine bağlayan kenet elemanı boyutu (uzunluk x yükseklik x genişlik) 120 x 2 x 170 mm'dir. Zıvanalar ise 4 mm çapında 62 mm uzunluğunda kullanılmıştır (Zia, A, J, 2021).

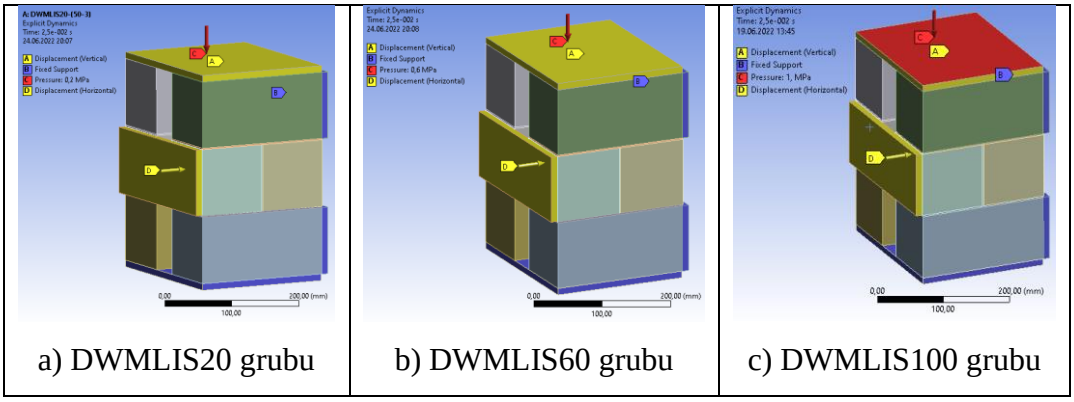
Geometrik cisim sayısı olarak gerçek görünüşte 4 adet kesme taş elemanı mevcut ancak sayısal analiz için zıvana elemanlarının kopma, eğilme hareketlerini incelemek için her kesme taşların zıvana yuvası bölgelerine yani iç katman geometrik elemanlarına farklı ağ boyutu verilecektir. Buna bağlı olarak kesme taş elemanlara ait dış katman geometrik eleman sayısı 4+4 olup iç katman geometrik eleman sayısı 8+8 adet modellenmiştir. Kesme taş elemanları olarak toplam 12+12 adet modellenmiştir. 1+1 adet düşey harç elemanı modellenmiştir. Bu grupta kenet elemanları birinci ve ikinci katman duvarlar arasında geçiş yaptığından, birinci katman duvarda 4 adet ve ikinci katman duvarda 4 adet olmak üzere toplam 4+4 adet yatay harç elemanı modellenmiştir. İki katmanlı duvara ait birinci ve ikinci sıradaki kesme taşların arasına birinci kenet elemanı, ikinci ve üçüncü sıradaki kesme taşların arasına ikinci kenet elemanı yerleştirilerek 2 adet kenet elemanı modellenmiştir. Her bir kenetten geçen 4 adet zıvana olacak şeklinde, toplam 4+4 adet zıvana modellenmiştir. Üçüncü sıradaki kesme taşların üstünde basıncı uygulanacak olan düşey hareketli mesnet, orta kısmına deplasman uygulanacak olan yatay hareketli mesnet, birinci sıradaki ve üçüncü sıradaki kesme taşların sağ yanına sabit mesnet ve birinci sıradaki kesme taşın altına da sabit mesnet olmak üzere son olarak toplam 49 adet eleman AutoCAD ortamında üçboyutlu olarak modellenmiştir ve ölçüleri Şekil 81'de gösterilmiştir.



Şekil 81. DWMLIS grubu duvar elemanın boyuna ve enine kesiti

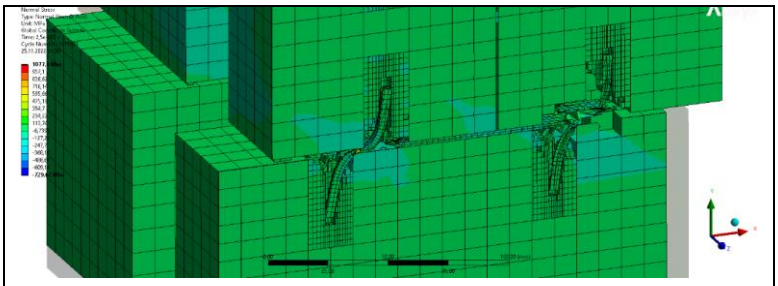
Sayısal analiz çözümü öncesi düşey basınç uygulanacak hareketli mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde serbest bırakılmıştır. Bu mesnet elemanlara DWMLIS20 grubu için 0,2 MPa, DWMLIS60 grubu için 0,6 MPa, DWMLIS100 grubu

için 1,0 MPa olmak üzere y yönünde düşey yük tanımlanmıştır. Ayrıca her üç grup için sınır kuşulları aynı olup orta kısmında kalan iki adet kesme taş elemanlara yatay hareket verecek olan mesnet elemanı ise x yönünde 20 mm deplasman tanımlanmıştır. Yine her üç grupta kullanılan diğer üç adet eleman ise sabit olarak mesnetlenmiştir (Şekil 82).

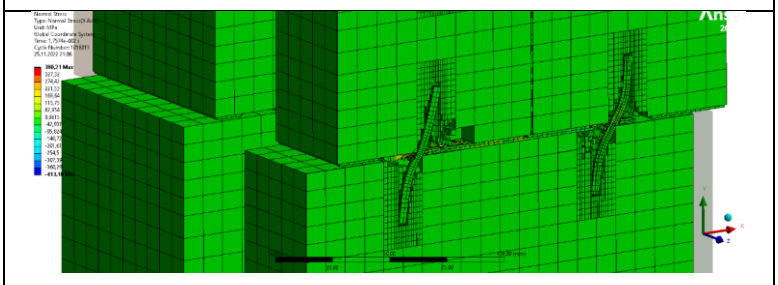


a) DWMLIS20 grubu | b) DWMLIS60 grubu | c) DWMLIS100 grubu

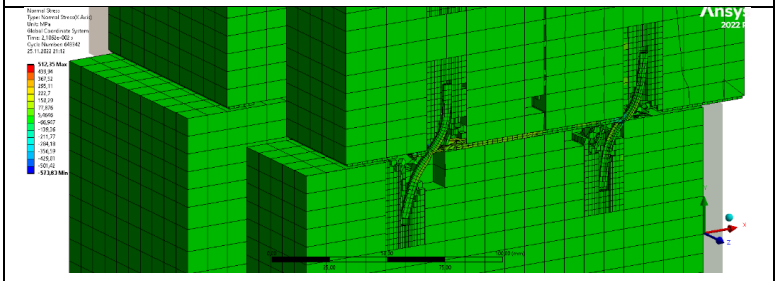
Şekil 82. DWMLIS grubu duvar elemanların sınır koşulları ve yükleme durumları



a) DWMLIS20 grubu



b) DWMLIS60 grubu



c) DWMLIS100 grubu

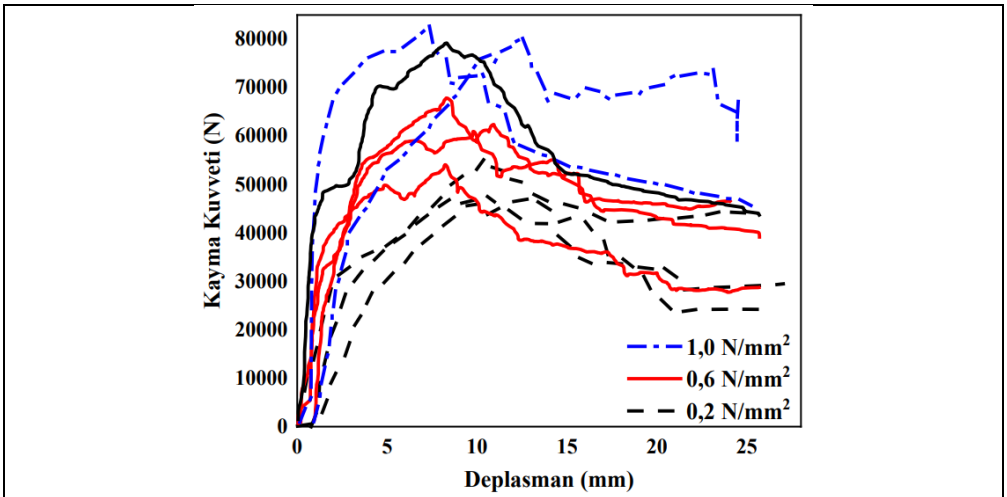
Şekil 83. DWMLIS grubu analiz sonucunda oluşan başlangıç kayma şekilleri

DWMLIS gruba ait sonlu eleman sayıları için kesme taşların ağ boyutları zıvana yuvasına yakın bölgede 5 mm ve diğer bölgelerde 10mm kullanılmıştır. Harç elemanları için ağ boyutları kalınlığa göre 1 mm, eni ve boyuna göre 2,5 mm tanımlanmıştır. Kenet elemanlarının ağ boyutları 2,5 mm tanımlanmıştır. Bu grupta başlangıç kayma analizi gerçekleşeceği için zıvana elemanlarının orta bölgesindeki ağ boyutu diğer alt ve üst bölgelerindeki ağ boyutuna göre daha sık aralıklı dağıtılmıştır. Ağ boyutu çözümlemesi sonucunda toplam 114267 düğüm sayısı, 77924 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,025 sn verilmiştir. ANSYS programında analizi yapılan DWMLIS20, DWMLIS60 ve DWMLIS100 gruplarına ait yatay deplasman hareketi boyunca bulunan kayma kuvvetlerin en büyüğü esas alınmıştır. Bu gruplara ait deneysel ortalama kayma kuvveti ve ANSYS maksimum kayma kuvveti sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir (Tablo 15).

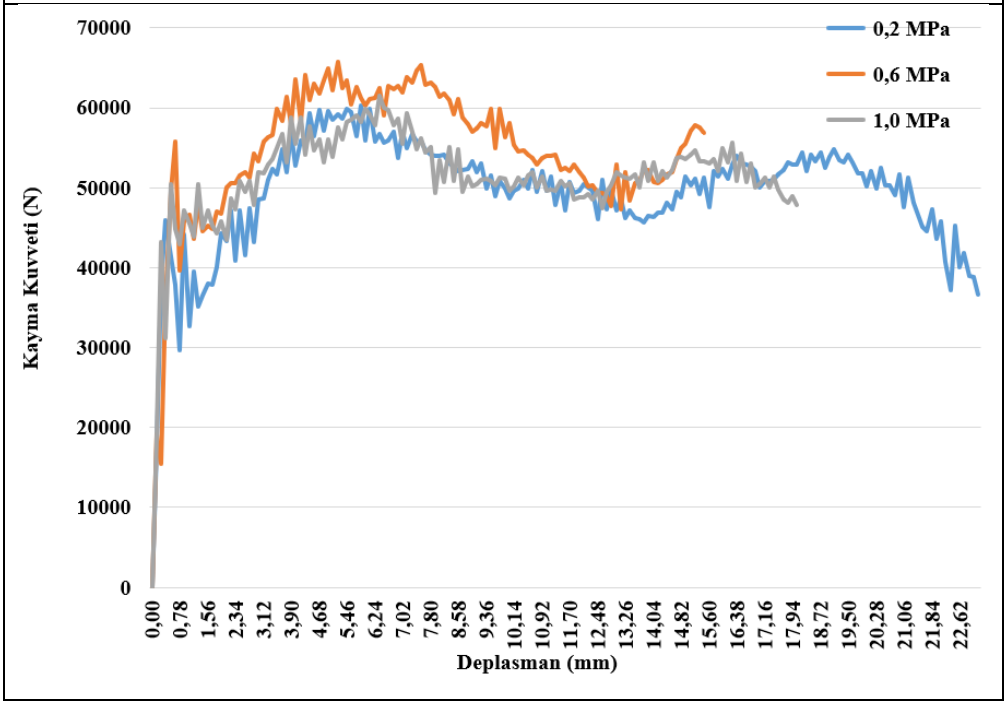
Tablo 15. DWMLIS grubu deney ve Ansys ortalama başlangıç kayma kuvveti sonuçları

Duvar grup ismi	Deney Ortalama Kayma Kuvveti (N)	ANSYS Maksimum Kayma Kuvveti (N)	Rölatif hata (%)
DWMLIS20	50399	60350	16,49
DWMLIS60	61076	65797	7,18
DWMLIS100	81052	61573	31,64

Şekil 84'te üç gruba ait deney ve ANSYS yatay kuvvet – deplasman grafikleri ise karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



(Zia, A, J, 2021)

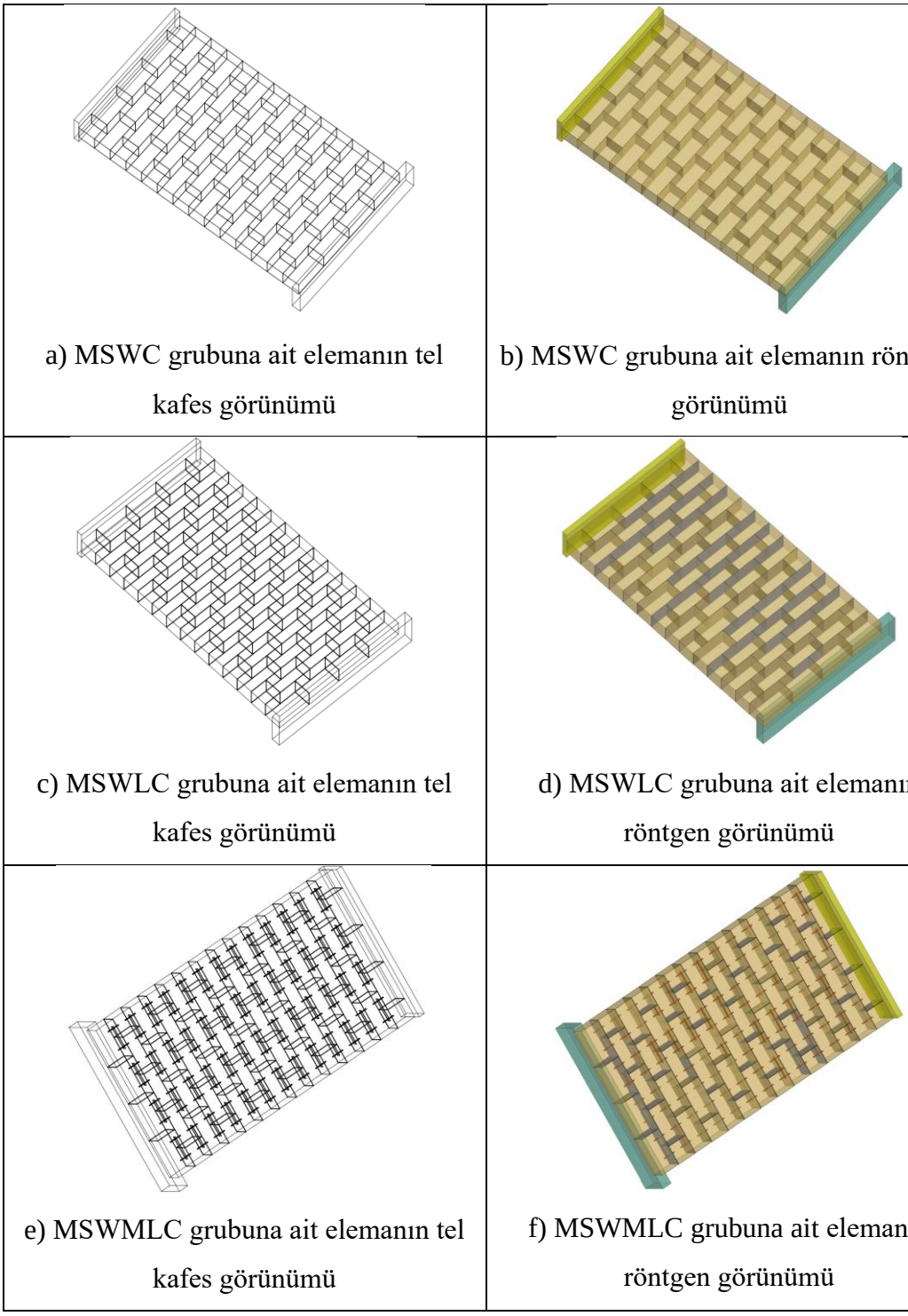


Şekil 84. DWMLIS grubuna ait deney ve Ansys yatay kuvvet – deplasman grafikleri

3.5. Makro Boyutlu Elemanlar için Basınç Analizleri

Bu çalışmada toplam dört adet makro duvar numunesi üretilmiş ve basınç deneyine tabi tutulmuştur. Bunlar MSWC grubuna ait numune harç ve metal bağlantı elemanları kullanılmadan üretilmiştir. MSWLC isimli numune metal bağlantı elemanları kullanılmadan kireç harcı kullanılarak üretilmiştir. Son olarak MSWMLC kireç harcıyla birlikte metal bağlantı elemanlarından oluşan tek katmanlı duvar kullanılmıştır. Makro

boyutlu kesme taş duvar elemanları tek katmanlı olmak üzere boyutları 100 x 800 x 1426 mm (genişlik x uzunluk x yükseklik) olup basınç analizleri yapılmıştır (Zia, A, J, 2021). Bu bölüm başlığı altında makro boyutlu basınç analizi için AutoCAD çizim programında modellenen elemanların üçboyutlu perspektif görünüşleri Şekil 85'te gösterilmiştir.



a) MSWC grubuna ait elemanın tel kafes görünümü

b) MSWC grubuna ait elemanın röntgen görünümü

c) MSWLC grubuna ait elemanın tel kafes görünümü

d) MSWLC grubuna ait elemanın röntgen görünümü

e) MSWMLC grubuna ait elemanın tel kafes görünümü

f) MSWMLC grubuna ait elemanın röntgen görünümü

Şekil 85. Makro boyutlu basınç elemanların perspektif görünüşleri

Makro boyutlu basınç analiz çalışmalarında kullanılan kesme taş, harç ve metal bağlantı elemanlarına ait malzeme parametreleri Tablo 1 ve Tablo 2'ye göre tanımlanmıştır. Mesnet elemanları ise rijit olarak tanımlanmış ve Structural Steel malzeme özelliği kullanılmıştır. Makro boyutlu elemanlarda kontak türleri verilirken makro boyutlu eleman sayıları mikro boyutlu eleman sayılarından çok daha fazla olduğundan her yüzeye ayrı ayrı kontak tanımlaması çok zaman alacaktır. Bu kontak işlemi büyük ölçekli yapılar için uygun değildir. Ancak MSWC grubuna ait duvar elemanında harç ve metal elemanları olmadığından kesme taş modelleri arasındaki sürtünme katsayısı 0,7 verilmiştir (Beer E., Russell Johnston, F. P., Ders Notu, J., & Acar, H., 2002). MSWLC grubuna ait duvar elemanı harçlı olduğundan elemanlar arası temas ilişkileri bonded, MSWMLC grubuna ait duvar elemanı ise hem harç hem metal bağlantı elemanları olduğundan elemanlar arasındaki temas ilişkiler genel olarak bonded olarak kullanılmıştır (Zia, A, J, 2021). Bu bölümde yer alan tüm gruba ait makro boyutlu duvar elemanları ile mesnet elemanları arasında kalan yüzeylere ise frictional sürtünme katsayısı 0,5 tanımlanmıştır (Beer E., Russell Johnston, F. P., Ders Notu, J., & Acar, H., 2002).

Sonlu elemanlar için ağ boyutları ve zaman aralığı ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Geometrik sayısının artması, eleman aralarında oluşan temas yüzey sayılarının artması ve özellikle metal bağlantı elemanları da bir araya gelince analiz çözümü esnasında işlem süresi günler değil birkaç haftayı bulacak kadar çok uzun sürmektedir. Bunun yanısıra makro boyutlu basınç elemanların geometrik sayıları mikro boyutlu basınç elemanların geometrik sayılarından fazladır. Buna bağlı olarak makro boyutlu elemanların zaman aralığı daha dar verilmesi yerine, zaman aralığı geniş tutulup ağ boyutları seyreltilmiştir. Çünkü zaman aralığı geniş tutulmadığında mikro boyutlu basınç analizlerinde olduğu gibi ANSYS kırılma dayanımı değerleri, deneyde elde edilen kırılma dayanımı değerlerinden fazla çıkmaktadır. Dolayısıyla bu bölüme ait çalışmada analiz çözümü için zaman aralığı geniş verildiğinde kırılma dayanımı değerleri, deneylerde elde edilen kırılma dayanımı değerlere yakın sonuçlar çıkmaktadır. Özetle hem iyi bir ağ elemanı hem zaman aralığı geniş tutulduğunda Explicit Dynamics analiz çözümü için çok zaman aldığından makro boyutlu basınç analizi için kullanılan tüm elemanların ağ boyutları seyrek tutulmuştur.

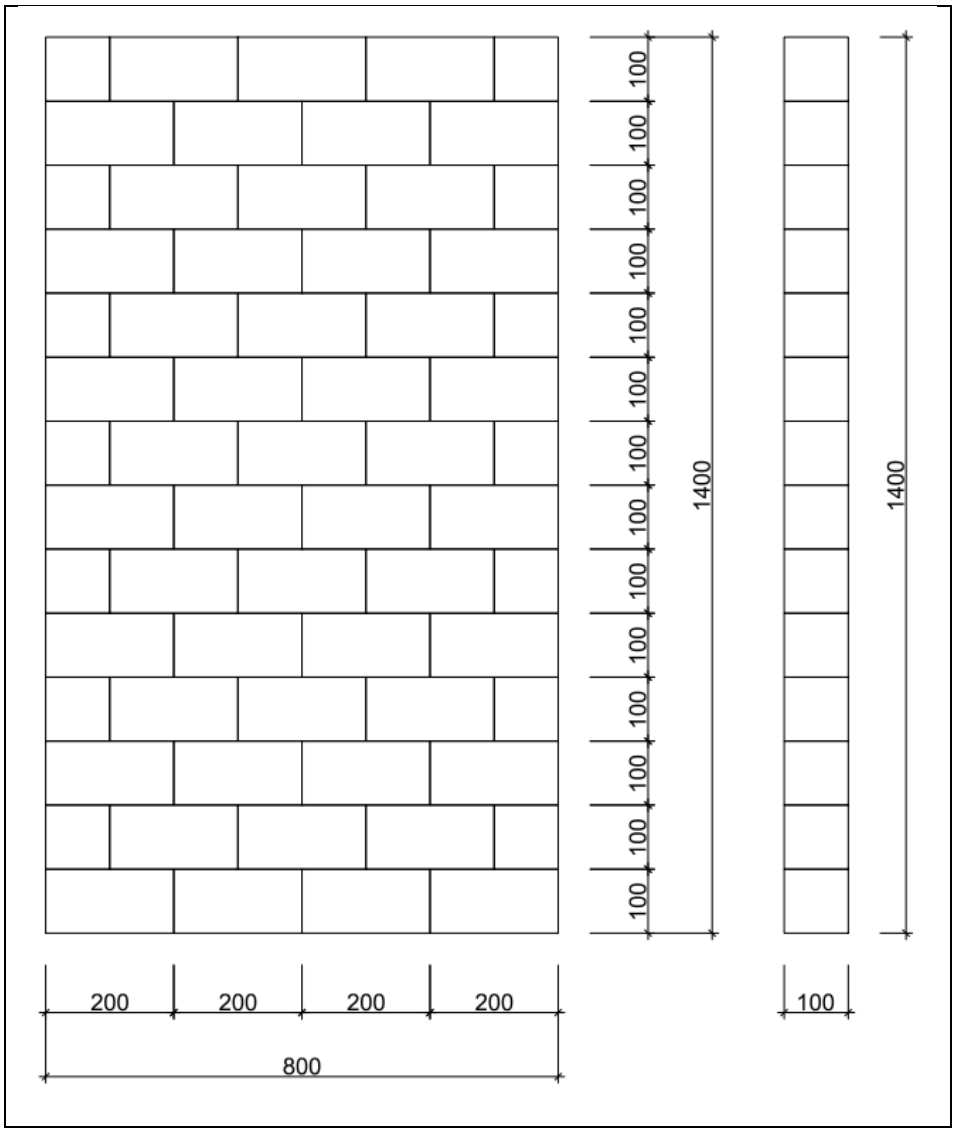
Referans alınan tüm numunelerin deney düzenekleri dikkate alınarak makro boyutlu duvar elemanın sınır koşulları ve yükleme durumları bu bölüm başlığı altında ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Bu bölüme ait tüm gruplar bu başlıkta anlatıldığı gibi dikkate alınarak ANSYS analiz çözümü için hazır hale getirilmiştir. Bu bölümde yapılan nümerik çalışmalar ilgili başlıklar altında verilmiştir.

3.5.1. Referans Alınan MSWC Grubu Makro Boyutlu Elemanın Analizi

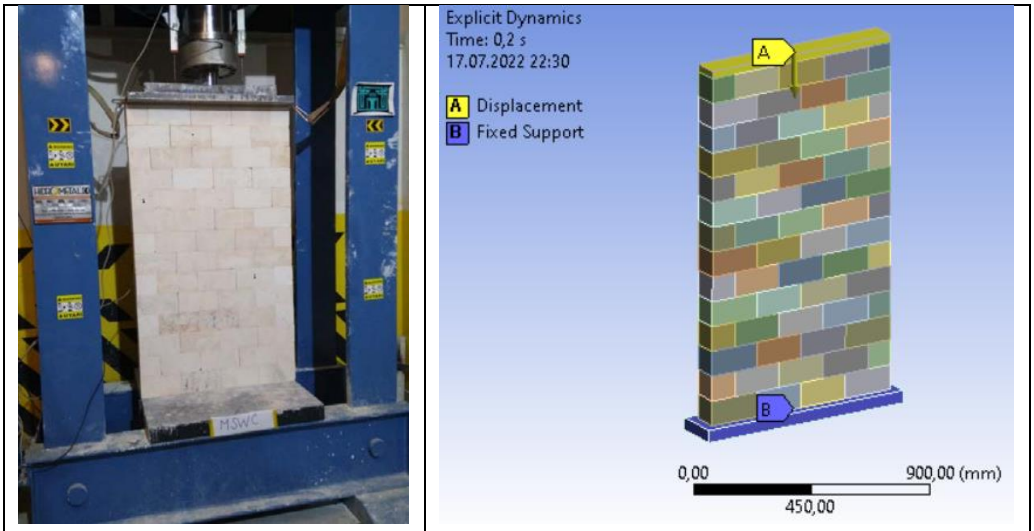
Bu grupta harç ve metal bağlantı elemanları kullanılmamış, kesme taşların aralarında harç elemanı kullanılmadan sadece kesme taşlar üst üste dizilerek üretilmiştir. Buna bağlı olarak mikro boyutlu duvar elemanının basınç deney düzeneği Şekil 87.a'da ve deney sonucunda oluşan kırılma durumu Şekil 88.a'da gösterilmiştir (Zia, A, J, 2021).

Geometrik cisim sayısı olarak 63 adet kesme taş elemanının üstünde basıncı uygulanacak olan hareketli mesnet ve altında sabit mesnet olmak üzere toplam 65 adet eleman AutoCAD ortamında üçboyutlu olarak modellenmiştir. Bu grupta üç boyutlu olarak modellenen elemanların ölçüleri Şekil 86'da gösterilmiştir.



Şekil 86. MSWC grubu duvar elemanının ön görünüşü ve yan görünüşü

Sonlu eleman sayıları için kesme taşların ağ boyutu ise 20 mm kullanılmıştır. Mesh çözümlemesi sonucunda toplam 23820 düğüm sayısı, 14596 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,2 sn verilmiştir. Basınç uygulanacak olan mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde deplasman hareketi tanımlanmıştır. Basınç uygulanacak mesnet elemanı 6 mm'ye kadar y yönünde deplasman tanımlanmıştır. Duvar numunesinin tabanındaki mesnet elemanı sabitlenmiştir (Şekil 87.b). Bu gruba ait düşey deplasman 3,45 mm'ye ulaştığında maksimum kırılma yükü 606710 N bulunmuştur. Uygulanan basınç alanı 800 mm x 100 mm yani 80000 mm² olduğundan, bulunan kuvvetin kesit alanına bölünmesi sonucunda basınç gerilmesi 7,58 MPa bulunmuştur (Şekil 88.b). Analiz sonucunda oluşan kırılma durumu gösterilmiştir.

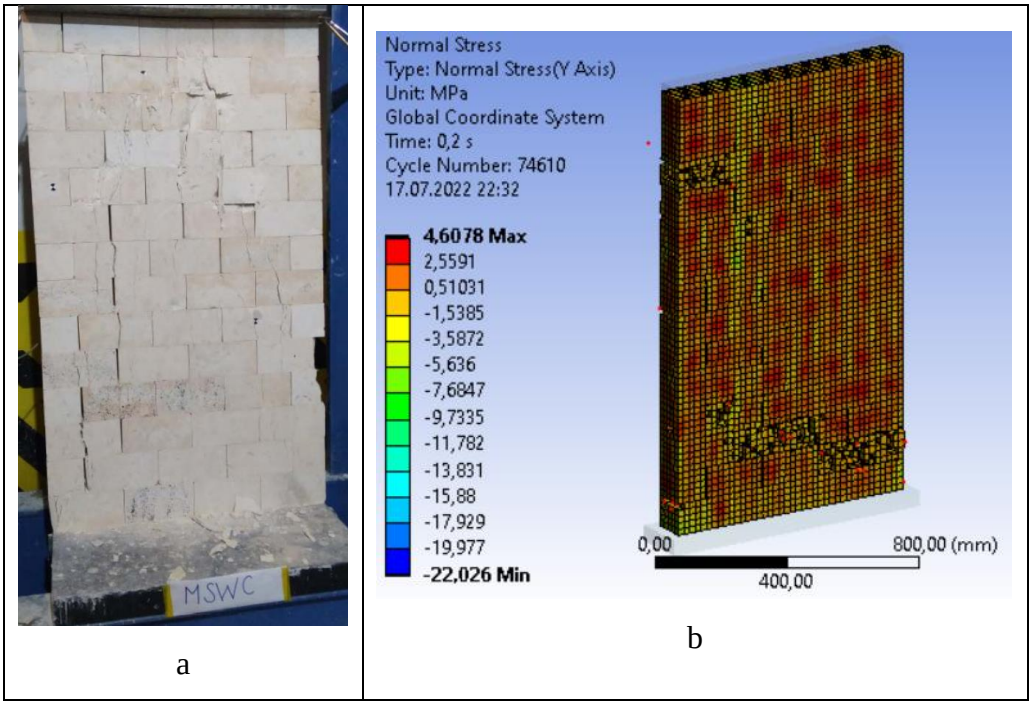


a b

Şekil 87. MSWC grubuna ait basınç deney düzeneği ve sınır koşulları, yükleme durumu

a) MSWC duvar numunesi basınç deney düzeneği (Zia, A, J, 2021)

b) MSWC grubu makro boyutlu duvar elemanın sınır koşulları ve yükleme şekli



a b

Şekil 88. MSWC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli

a) MSWC numunesine ait kırılma şekli (Zia, A, J, 2021)

b) MSWC grubu makro boyutlu elemanın kırılma şekli

Deneysel olarak yapılan çalışmada kırılma gerilmeleri elde edilmiştir (Zia, A, J, 2021). Bu gruba ait ANSYS kırılma gerilmesi deneyde elde edilen kırılma gerilmesinden %5,01 fazla bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen kırılma gerilmesi ile Ansys programında yapılan analiz sonucunda elde edilen kırılma gerilmesi karşılaştırılmalı olarak Tablo 16'da gösterilmiştir.

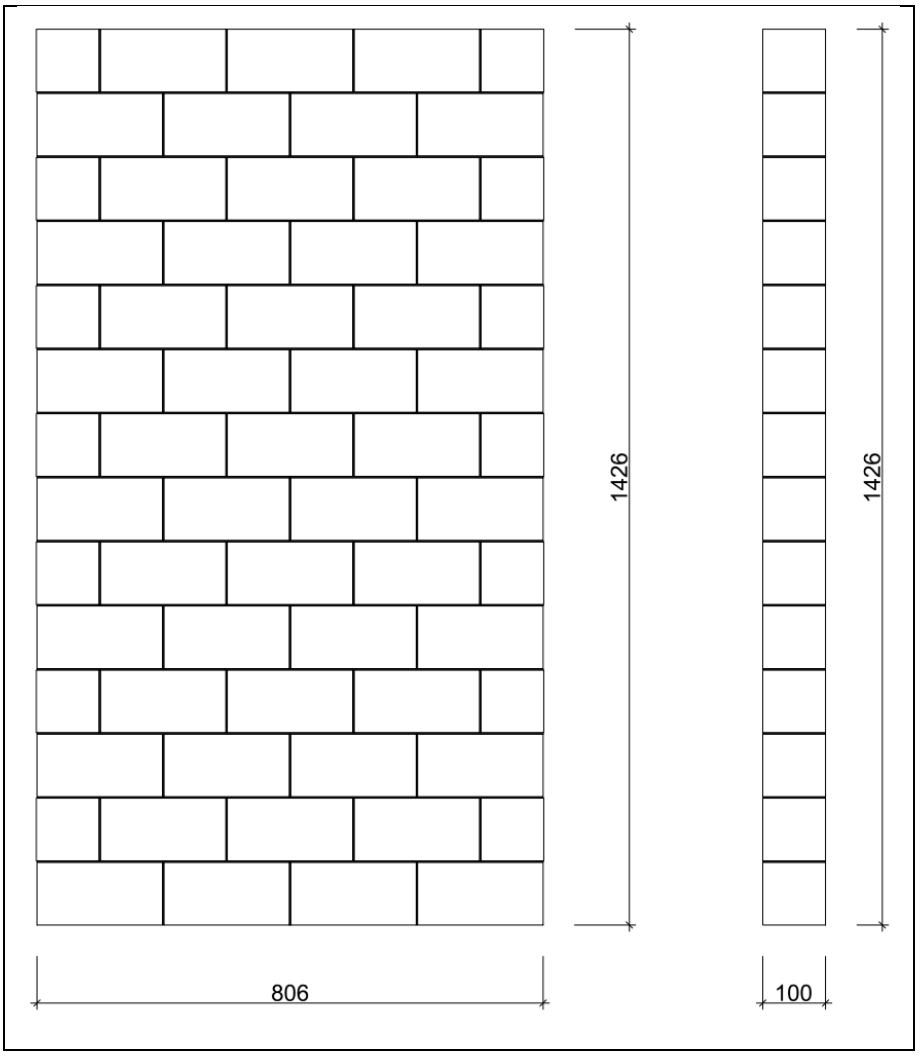
Tablo 16. MSWC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri

Numune Boyutu (mm)	Deneysel kırılma gerilmesi (MPa)	Ansys eleman boyutu (mm)	Ansys kırılma gerilmesi (MPa)	Rölatif hata (%)
100x800x1426 (Zia, A, J, 2021)	7,20 (Zia, A, J, 2021)	100x800x1400	7,58	5,01

3.5.2. Referans Alınan MSWLC Grubu Makro Boyutlu Elemanın Analizi

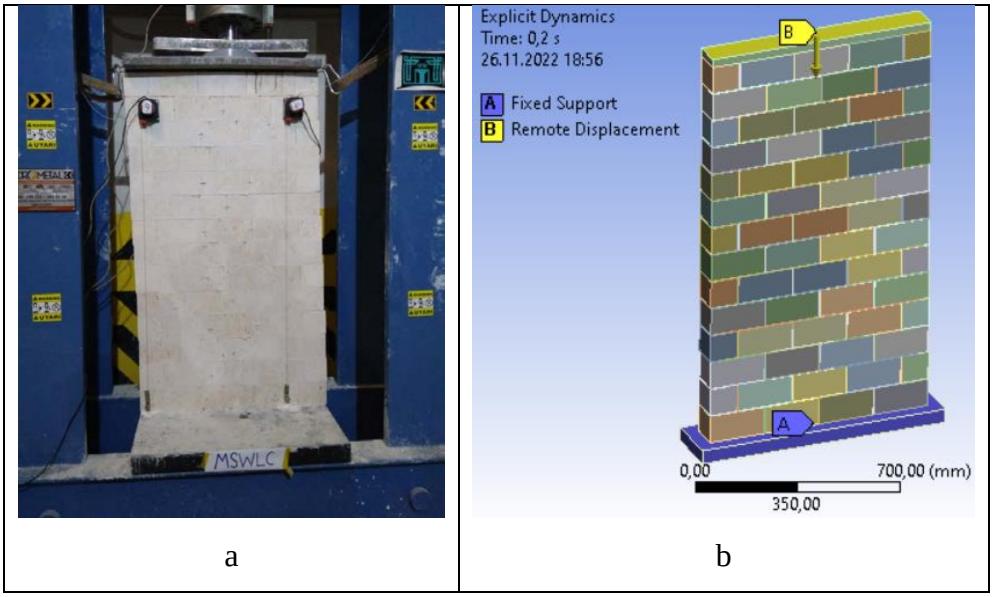
Bu grupta metal bağlantı elemanları kullanılmamış, kesme taşların aralarında 2 mm'lik harç elemanı eklenmiştir. Buna bağlı olarak mikro boyutlu duvar elemanının basınç deney düzeneği Şekil 90.a'da ve deney sonucunda oluşan kırılma durumu Şekil 91.a'da gösterilmiştir (Zia, A, J, 2021).

Geometrik cisim sayısı olarak 13 adet yatay harç elemanı, 49 adet düşey harç elemanı, 63 adet kesme taş elemanından oluşmaktadır. Ayrıca modellenen duvar elemanının üstünde basıncı uygulanacak olan hareketli mesnet ve altında sabit mesnet olmak üzere toplam 127 adet eleman AutoCAD ortamında üçboyutlu olarak modellenmiştir. Bu grupta üç boyutlu olarak modellenen elemanların ölçüleri Şekil 89'da gösterilmiştir.



Şekil 89. MSWLC grubu duvar elemanının ön görünüşü ve yan görünüşü

Sonlu eleman sayıları için kesme taşların ağ boyutu ise 20 mm kullanılmıştır. Harç elemanları için ağ boyutları harç kalınlığı doğrultusuna göre 2 mm, harcın eni ve boyuna göre 20 mm tanımlanmıştır. Mesh çözümlemesi sonucunda toplam 33834 düğüm sayısı, 18465 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,2 sn verilmiştir. Basınç uygulanacak olan mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde deplasman hareketi tanımlanmıştır. Basınç uygulanacak mesnet elemanı 6 mm'ye kadar y yönünde deplasman tanımlanmıştır. Duvar numunesinin tabanındaki mesnet elemanı sabitlenmiştir (Şekil 90.b). Bu gruba ait düşey deplasman 2,52 mm'ye ulaştığında maksimum kırılma yükü 925730 N bulunmuştur. Uygulanan basınç alanı 808 mm x 100 mm yani 80800 mm² olduğundan, bulunan kuvvetin kesit alanına bölünmesi sonucunda basınç gerilmesi 11,46 MPa bulunmuştur. Analiz sonucunda oluşan kırılma durumu gösterilmiştir (Şekil 91.b).

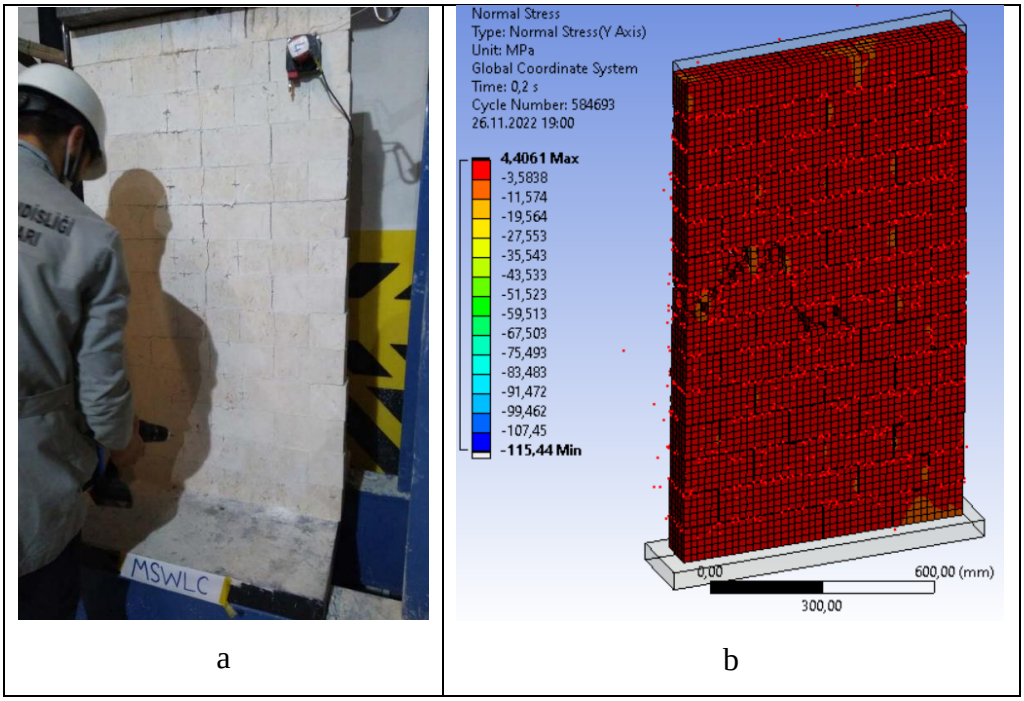


a b

Şekil 90. MSWLC grubuna ait basınç deney düzeneği ve sınır koşulları, yükleme durumu

a) MSWLC duvar numunesi basınç deney düzeneği (Zia, A, J, 2021)

b) MSWLC grubu makro boyutlu duvar elemanın sınır koşulları ve yükleme şekli



a b

Şekil 91. MSWLC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli

a) MSWLC numunesine ait kırılma şekli (Zia, A, J, 2021)

b) MSWLC grubu makro boyutlu elemanın kırılma şekli

Deneysel olarak yapılan çalışmada kırılma gerilmeleri elde edilmiştir (Zia, A, J, 2021). Bu gruba ait ANSYS kırılma gerilmesi deneyde elde edilen kırılma gerilmesinden %8,73 fazla bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen kırılma gerilmesi ile Ansys programında yapılan analiz sonucunda elde edilen kırılma gerilmesi karşılaştırılmalı olarak Tablo 17'de gösterilmiştir.

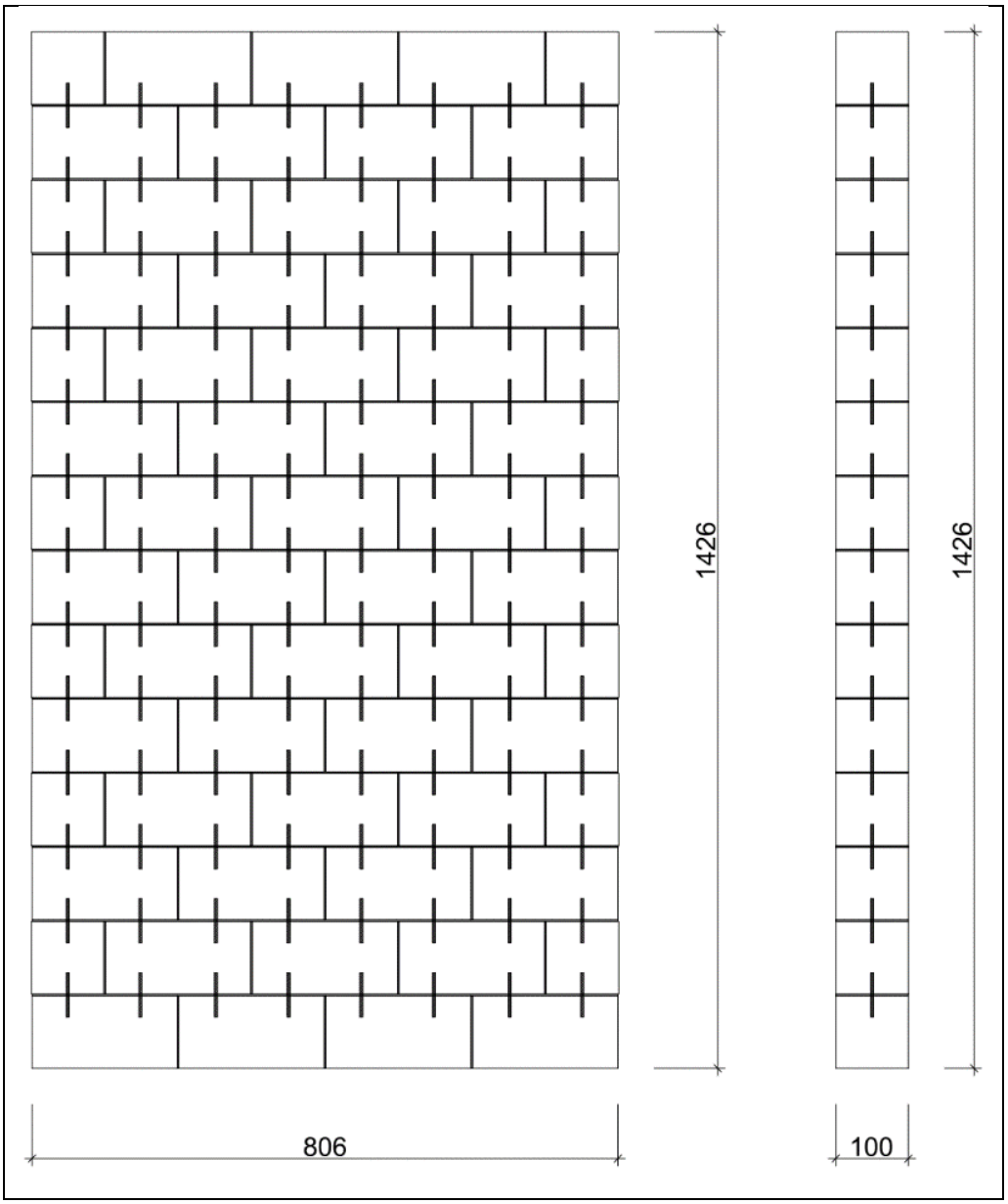
Tablo 17. MSWLC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri

Numune Boyutu (mm)	Deneysel kırılma gerilmesi (MPa)	Ansys eleman boyutu (mm)	Ansys kırılma gerilmesi (MPa)	Rölatif hata (%)
100x800x1426 (Zia, A, J, 2021)	10,46 (Zia, A, J, 2021)	100x808x1426 (Harç dahil)	11,46	8,73

3.5.3. Referans Alınan MSWMLC Grubu Makro Boyutlu Elemanın Analizi

Bu grupta metal bağlantı elemanlarından oluşan tek katmanlı duvar kullanılmıştır. Kesme taşın aralarında 2 mmlik harç elemanı eklenmiştir. Metal bağlantı elemanlarından zıvanaların geçebilmesi için 2 adet 5 mm çapında içi boşluklu modellenen kenet elemanı boyutu (uzunluk x yükseklik x genişlik) 120 x 2 x 20 mm dir. Zıvanalar ise 4 mm çapında 62 mm uzunluğunda modellenmiştir. Buna bağlı olarak mikro boyutlu duvar elemanının basınç deney düzeneği Şekil 93.a'da ve deney sonucunda oluşan kırılma durumu Şekil 94.a'da gösterilmiştir (Zia, A, J, 2021).

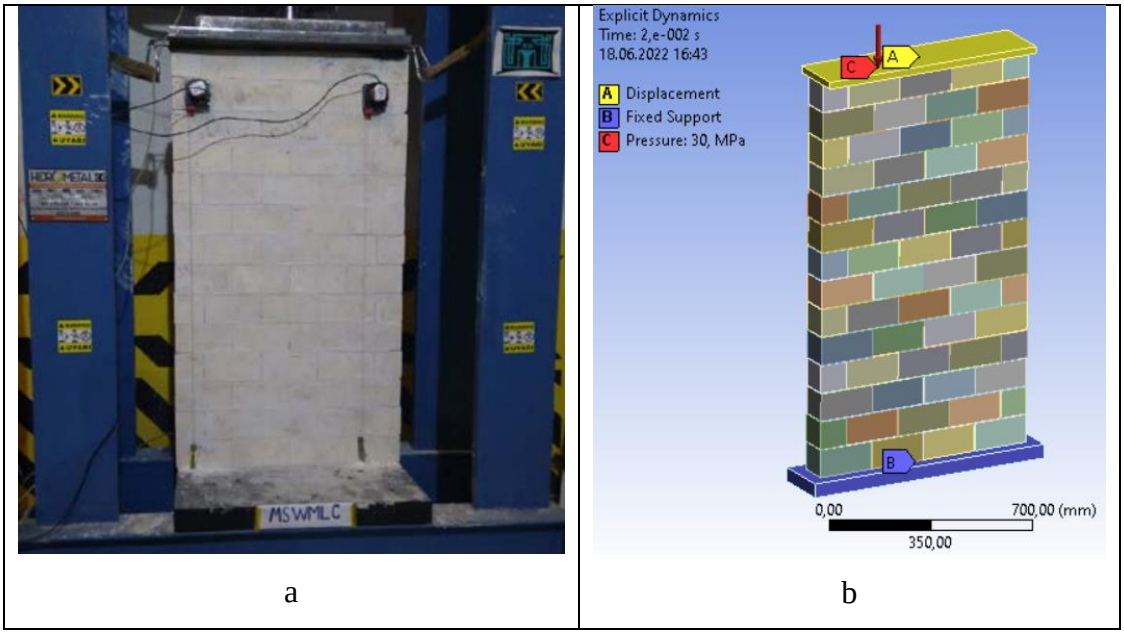
Geometrik cisim sayısı olarak metal bağlantı elemanlarından 52 adet kenet elemanı, 104 adet zıvana elemanı, 13 adet yatay harç elemanı, 49 adet düşey harç elemanı, 63 adet kesme taş elemanından oluşmaktadır. Ayrıca modellenen duvar elemanının üstünde basıncı uygulanacak olan hareketli mesnet ve altında sabit mesnet olmak üzere toplam 283 adet eleman AutoCAD ortamında üçboyutlu olarak modellenmiştir. Bu grupta üç boyutlu olarak modellenen elemanların ölçüleri Şekil 92'de gösterilmiştir.



Şekil 92. MSWMLC grubu duvar elemanının boyuna ve enine kesiti

Harç elemanlarında düzgün ağ işleminin yapılması için harç elemanları düşey ve yatay olarak ayrı ayrı modellenmiştir. Bunun sebebi sonlu elemanlar düzenli dağıtılmadığında düğüm sayıları artmakta ve analiz işlemi uzun sürmektedir. Sonlu eleman sayıları için kesme taş elemanların tamamında içi boşluklu 5 mm çaplı 30 mm uzunluğunda zıvana yuvaları olduğundan ağ boyutlarının düzgün dağılması için "MultiZone" metodu kullanılmıştır. Harç elemanları için ağ boyutları harç kalınlığı doğrultusuna göre 2 mm tanımlanmıştır. Bunun yanısıra yatay harçlarda kenetler yer alacağından düzgün mesh işlemi yapılabilmesi için harç elemanının üst ile alt yüzeyleri 25 mm ağ boyutlarında tanımlanmıştır. İçi boşluklu kenetlerin düzgün mesh işlemi olması için kenetlerin alt ile

üst yüzeyleri 10 mm eleman boyutlarında tanımlanmıştır. Zıvana elemanların ağ boyutu ise zıvana boyu doğrultusuna göre 16 mm verilmiştir. Mesh çözümlemesi sonucunda toplam 47234 düğüm sayısı, 25738 eleman sayısı elde edilmiştir. Analiz ayarları için zaman aralığı 0,02 sn verilmiştir. Basınç uygulanacak olan mesnet elemanı x ve z yönünde kısıtlanmış ve y yönünde serbest bırakılmıştır. Basınç uygulanacak mesnet elemanın üst yüzeyine basınç gerilmesi tanımlanmıştır. Duvar numunesinin tabanındaki mesnet elemanı sabitlenmiştir. Zaman aralığı başında uygulanan basınç gerilmesi "0" değerinde olup, zaman aralığının sonunda uygulanan basınç gerilmesi 30 MPa olarak tanımlanmıştır (Şekil 93.b). Bu gruba ait kırılma anındaki zaman 0,0169'uncu saniyesinde duvar elemanı kırılmaya başlamıştır. Analiz esnasında duvar kırıldıktan sonra zaman aralığının sonuna kadar analiz devam ettirilmiştir. Dolayısıyla kırılma anında uygulanan basınç gerilmesi 25,28 MPa bulunmuştur (Şekil 94.b).

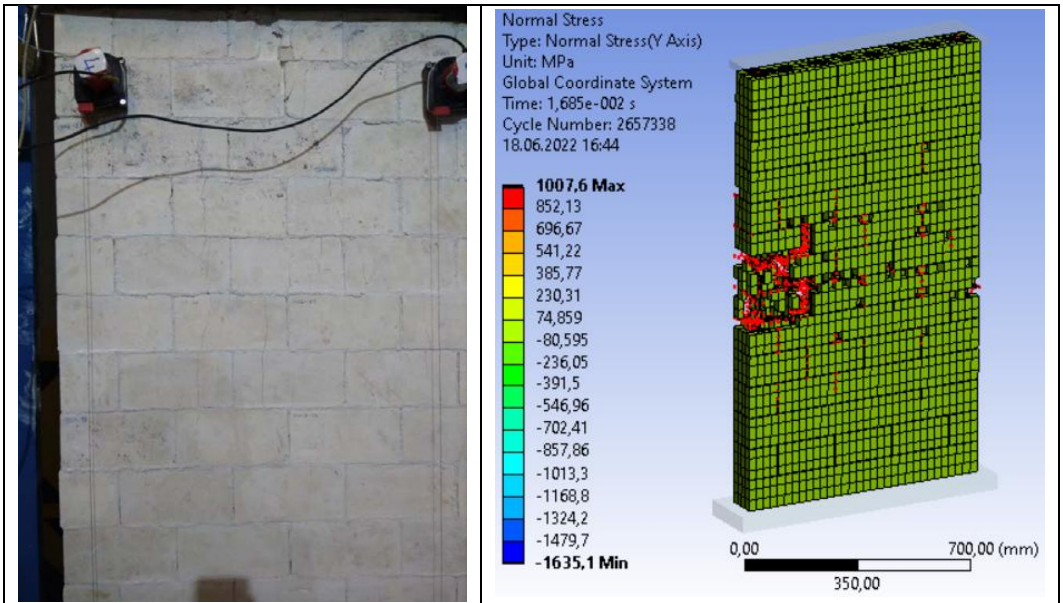


a b

Şekil 93. MSWMLC grubuna ait basınç deney düzeneği ve sınır koşulları, yükleme durumu

a) MSWMLC duvar numunesi basınç deney düzeneği (Zia, A, J, 2021)

b) MSWMLC grubu makro boyutlu duvar elemanın sınır koşulları ve yükleme şekli



a b

Şekil 94. MSWMLC grubuna ait basınç deneyi ve analiz sonucunda kırılma şekli

a) MSWMLC numunesine ait kırılma şekli (Zia, A, J, 2021)

b) MSWMLC grubu makro boyutlu elemanın kırılma şekli

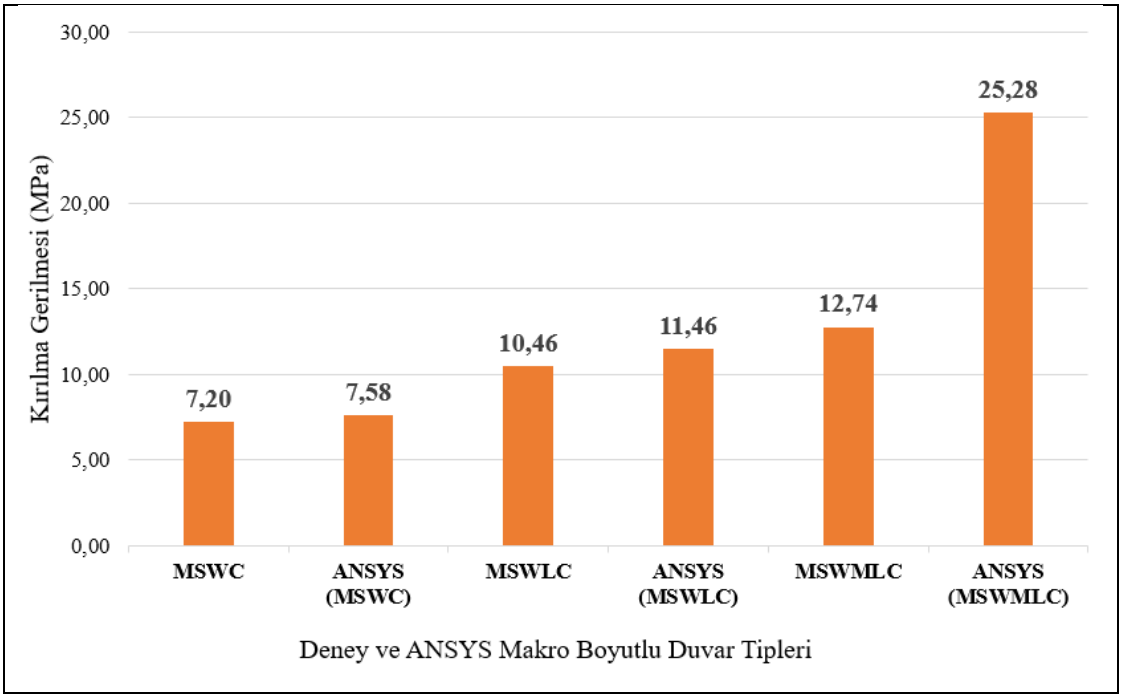
Deneysel olarak yapılan çalışmada kırılma gerilmeleri elde edilmiştir (Zia, A, J, 2021). Bu gruba ait ANSYS kırılma gerilmesi deneyde elde edilen kırılma gerilmesinden %49,60 daha fazla bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen kırılma gerilmesi ile Ansys programında yapılan analiz sonucunda elde edilen kırılma gerilmesi karşılaştırılmalı olarak Tablo 18'de gösterilmiştir.

Tablo 18. MSWMLC grubu deneysel ve Ansys kırılma gerilmeleri

Numune Boyutu (mm)	Deneysel kırılma gerilmesi (MPa)	Ansys eleman boyutu (mm)	Ansys kırılma gerilmesi (MPa)	Rölatif hata (%)
100x800x1426 (Zia, A, J, 2021)	12,74 (Zia, A, J, 2021)	100x806x1426 (Harç+Metal dahil)	25,28	49,60

3.5.4. Makro Boyutlu Basınç Elemanların Deney ve Ansys Sonuçlarının İrdelenmesi

Son olarak makro boyutlu elemanların basınç deneylerine ait ortalama basınç dayanımı ile ANSYS programıyla çözülen basınç analizine ait kırılma gerilmeleri Şekil 95'te verilmiştir. Bu karşılaştırma sonuçları ise Bölüm 4'te değerlendirilmiştir.



Şekil 95. Makro boyutlu basınç elemanların deney ve Ansys sonuçları

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında deneyde elde edilen verilerin referans alınarak sayısal analiz yöntemi ile çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu analiz yöntemlerinden biri ANSYS yazılım analizi olup farklı analiz türlerine sahiptir. Dolayısıyla deneyde elde edilen veriler ile ANSYS analiz çözümünde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, ANSYS yazılımı alt modülünde yer alan Statik Analiz türü günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışması için "Statik Analiz mi? Dinamik Analiz mi? Daha uygun" sorusuna bağlı olarak kapsamlı literatür araştırması yapılmıştır. İnşaat mühendisliği alanında yapılan çalışmalar, ANSYS yazılımı alt modülünde yer alan Dinamik Analiz türü ile duvarlar üzerinde yapılan çalışmalara rastlanmamıştır. Yaygın olarak duvar elemanları dışında beton, çelik ve betonarme yapı elemanları dinamik analizi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada (Zia, A. J. 2021) referans alınan tek katmanlı ve çift katmanlı duvar elemanları içinde metal elemanlarına ait kenet ve zıvana elemanları üç boyutlu olarak AutoCAD ortamında modellenmiştir.

Bireysel eleman olarak modellenen kesme taş elemanlarına, farklı zaman aralığına bağlı olarak ağ boyutu değiştirilerek basınç uygulanmıştır. Buradaki amaç hangi zaman aralıklarında ve hangi ağ boyutlarında verilirse deneyde elde edilen verilere daha yakın sonuçlar elde edileceğini irdelemektir. Kenetsiz ile yapılan bireysel elemanlarda elde edilen basınç sonuçları ile çift taraflı kenet ile yapılan bireysel elemanlarda elde edilen basınç sonuçları birbirlerine yakın çıkmıştır. Tek ve çift taraflı bireysel elemanlarda yapılan basınç analizi sonucunda kırılma çatlak bölgeleri deneyde elde edilen çatlaklara benzemektedir. Tek taraflı kenet ile yapılan bireysel elemanlarda deneysel çalışma yapılmamış olup, bu tez kapsamında tek taraflı kenet ile modellenen bireysel elemanlarda basınç analizi yapılmıştır.

Mikro boyutlu elemanlardan oluşan duvarlar için basınç analizleri yapılmıştır. Dinamik analizde elde edilen basınç değerleri ile deneyde elde edilen basınç değerleri yakın çıkmıştır. Buna ek olarak metal elemanlardan oluşan duvar elemanların analiz süreleri, metal elemanlardan oluşmayan harçsız elemanından oluşan SWC elemanı ve harçlı elemanlardan oluşan SWLC elemanına göre analiz sürelerinin uzun sürdüğü gözlemlenmiştir.

SWC, SWLC, SWMLC ve DWMLC elemanlarında analiz için kullanılan zaman aralıkları 0,1sn tanımlanmıştır. Buna rağmen DWMLC grubu hariç diğer 3 gruba ait değerler yakın çıkmıştır. Bu mikro boyutlu elemanlar için yapılan analiz çalışmasında çatlak yerleri SWC grubu hariç diğer üç gruba ait duvar elemanları genellikle simetrik olarak kırıldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi uygulanan mesnet elemanı ile sabit mesnet elemanları dönmeye izin verilmemiştir. Buna bağlı olarak deneyde kullanılan mesnet elemanlarında boyut ve malzeme farklılıkları sebebiyle çok az da olsa farklı dönme olduğu için deneydeki çatlakların simetrik oluşmadığı gözlemlenmiştir. Ancak deneyde elde edilen simetrik olmayan çatlaklara benzer çatlaklar elde edilebilmesi için basınç uygulanacak mesnet elemanları "Displacement" yerine "Remote displacement" tanımlanarak, önerilen zaman aralığının mikro boyutlu basınç elemanları arasında dengeli ölçüm için aynı zaman aralığının kullanılmasının daha uygun olacağı görülmüştür.

Dört ayrı gruptan oluşan mikro boyutlu elemanlardan oluşan başlangıç kayma dayanımı analizleri yapılmıştır. Analiz sonucunda SWIS20 %25,62 fazla, SWIS60 %9,99 fazla, SWIS100 %7,79 fazla maksimum yatay kuvvet bulunmuştur. Ayrıca, SWIS grubuna ait grafikler incelendiğinde yatay yükün maksimuma ulaşmasıyla kayma gerçekleşerek yatay kuvvet maksimum yükün yaklaşık yarısına düşmüştür. Bu durumun deneydeki gibi kuvvet değişimlerin yatay bir şekilde ilerlediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte SWIS grubuna ait kesme taş elemanların kırılma bölgeleri numunelerin köşelerinde oluşarak birbirlerine benzer şeklinde kırılmışlardır. SWLIS20 %12,24 fazla, SWLIS60 %3,23 az ve SWLIS100 %16,75 az maksimum yatay kuvvet bulunmuştur. SWLIS grubuna ait grafikler incelendiğinde yatay kuvvet değişimlerin fazla olduğu görülmektedir. SWLIS grubunda kullanılan kesme taş elemanlarına ait ağ boyutu 5 mm ve harç elemanlarına ait ağ boyutu 2 mm boyuna 2 mm enine ve yüksekliği 1mm olduğu için kayma esnasında, sürtünmeye bağlı olarak harç elemanları uygulanan düşey basınç etkisiyle kırılmıştır. Bu harç elemanları kayma esnasında 0,2MPa yük altında kırılmanın yavaş, 1,0MPa yük altında ise kırılmanın daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir. SWLIS grubuna ait kesme taş elemanları ise 0,2MPa yük altında iken kırılmadığı, 0,6MPa ve 1,0MPa yük altında iken harçlar kırıldıktan sonra kesme taşların birbirlerine temas ettiği bölgelerde kırıldığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla harç elemanı yüzeylerine temas eden kesme taş elemanın ağ boyutları harç elemanı boyutlarına yakın verilmesi önerilmektedir. Özetle yatay kuvvet değişimlerin daha az olması için birbirlerine temas eden harç elemanı ile kesme

taş elemanın ağ boyutları birbirlerine yakın olması ve bu iki farklı elemanın ağ boyutları ise daha küçük tanımlanması uygun olacağı görülmüştür. SWMLIS ve DWMLIS elemanları için başlangıç kayma analizi sonucunda elde edilen maksimum yatay kuvvet değerler bulunmuştur. Analiz sonucunda SWMLIS20 %16,89 az, SWMLIS60 %23,47 az, SWMLIS100 %40,80 daha az maksimum yatay kuvvet bulunmuştur. SWMLIS grubuna ait grafikler incelendiğinde maksimum yatay kuvvetler 6,5 mm ve 9 mm yatay deplasman aralığında gözlemlenmiştir. Analiz sonucunda DWMLIS20 %16,49 fazla, DWMLIS60 %7,18 fazla, DWMLIS100 %31,64 daha fazla maksimum yatay kuvvet bulunmuştur. DWMLIS grubuna ait grafikler incelendiğinde maksimum yatay kuvvetler 4,5 mm ve 7,5 mm yatay deplasman aralığında gözlemlenmiştir. Bu gruba ait yatay kuvvet değişimleri ise yaklaşık olarak birbirlerini takip ederek ilerlediği gözlemlenmiştir. Özet olarak mikro boyutlu elemanlar için başlangıç kayma analizleri önerisi ile ilgili SWMLIS ve DWMLIS grubuna ait duvar elemanlarının içinde metal ve zıvana elemanları olduğu için grafiklerin deneydeki grafiğe benzer düzgün ilerlediği gözlemlenmiştir. Ancak SWIS ve SWLIS grubuna ait duvar elemanlarında metal elemanları olmadığından deneye benzer grafik elde edilebilmesi için ağ elemanları ve düğüm noktası sayıları artırılarak çözüm yapılmasının daha uygun olduğu görülmüştür.

Makro boyutlu elemanlarda basınç dayanımı analiz çalışmaları ise üç ayrı gruba ayrılmaktadır. Bu tez kapsamında ilk üç gruba ait MSWC, MSWLC ve MSWMLC elemanları üzerinde basınç analizi çalışmaları yapılmıştır. Metal elemanlardan oluşan (MSWMLC) duvar elemanın analiz süreleri, metal elemanlardan oluşmayan yani harçsız MSWC elemanı ve harçlı MSWLC elemanına göre daha uzun sürmektedir. MSWC ve MSWLC gruplarında 0,2 sn zaman aralığı verilerek analiz yapılmıştır. Bu analiz sonucunda çıkan basınç değerleri ile deney basınç sonuçları birbirlerine yakın çıkmıştır. Diğer gruplarda verilen 0,2 sn zaman aralığı metal elemanlarından oluşan tek katmanlı MSWMLC elemanına da uygulanmıştır ancak analiz süresi uzadıkça uzamıştır, bunun sebebi makro elemanlarda kullanılan eleman sayısının fazla olması ve zaman aralığının geniş olmasıdır. Bu nedenle her elemanlar birbirlerinden bağımsız yani heterojen yapıda oldukları için hesaplama çok uzun sürmüştür. Buna bağlı olarak iki hafta olduğunda yani çözümün yaklaşık %20'sine geldiğinde, çözüm esnasında bilgisayarların İşlemci, geçici bellek ve ekran kartı donanımların normal çalıştığı ancak diskler incelendiğinde %100 doluluk oranında ilerlediği ve diskin belli bir zaman sonra donduğu gözlemlenmiştir.

Aylarca sürecek olan bu çalışma iptal edilerek durdurulmuştur. MSWMLC grubuna ait çözümü yapılamayan analiz sonucunda, basıncı uygulanan mesnet elemanının yüzeyine düşey deplasman yerine 0,02 sn zaman aralığında basınç tanımlanmıştır. Deneyde elde edilen basınç değerinden %49,60 daha fazla çıkmıştır. Bu değerin fazla olmasının en büyük etkisi geniş olmayan zaman aralığıdır. Dolayısıyla deneyde elde edilen basınç sonuçlarına yakın değerler elde edilmesi için MSWC ve MSWLC gruplarında olduğu gibi zaman aralığı 0,2 sn ile tanımlanarak çözülmesi önerilmektedir.

Bu araştırmada metal elemanlarından oluşmayan duvar elemanları günümüzde yaygın olarak Statik Analiz ile çözülürken, betonarme, çelik ve kompozit yapılar için metal elemanlarından oluşan duvar elemanları ise Statik ve Dinamik Analiz ile çözülebilmektedir. Ancak kesme taş ve harç elemanlarında kırılma şekilleri ve metal elemanlarda ise kopma, kesme, ezilme ve yırtılma şekilleri Statik Analizde gözlemlenemediğinden, Dinamik Analiz ile çözülmesi daha uygun olacağı görülmüştür.

KAYNAKLAR

Çelik, T., Tanrıverdi, Ş., Ural, A., Fırat, F. K. (2021). *Yığma Yapılarda Kullanılan Kenetlerin Yapı Davranışına Etkilerinin İncelenmesi.* Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. Doi: 10.35414/akufemubid.874494

Das, S. K., Pani, B. B. (2021). *Explicit Dynamic Analysis and Design Optimization of Sheet Metal Forming.* Master of Technology, Department of Mechanical Engineering, VSSUT, Burla.

Demir, C. (2012). *Seismic Behaviour of Historical Stone Masonry Multi-Leaf Walls.*. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Demirkan, D. S. (2014). *Yığma yapılarda derz kalınlığı ve duvar örme tekniğinin yapıya etkisinin anizotrop bir model üzerinde incelenmesi.* Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Dmitry, Yu. Sarkisov, Georgy I. Odnokopylov, Vladimir V. Krylov, Andriy O. Annenkov. (2021). *Numerical and experimental studies of deflections of conventional and strengthened reinforced concrete bendable elements under short-term dynamic loading.* Doi: 10.13111/2066-8201.2021.13.S.17

Doğan, U. U. (2019). *Betonarme yapılarda donatının modal, doğrusal ve doğrusal olmayan davranışa etkisinin belirlenmesi.* Yüksek Lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Doran, B., Aktan, S. (2017). *Hava kireci harcı kullanılarak üretilen tarihi yığma duvarlarda bünyesel modelleme.* Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi. Cilt 19, Sayı 56, Mayıs 2017.

Ferdinand, P., Beer, E., Russell, Johnston, J., Walt, Oler. *Statics Eighth Edition*. (2007).

Fırat, F. K., Tanrıverdi, Ş., Ural, A., Kara, M. E. (2022). *Kubbe yapı formlarının kenet ile güçlendirilmesi.* Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Bilimler Dergisi, Journal of Engineering Sciences, 11(2), 326-334.

Islam, M. T., Netula, O., Singh, A. (2019). *Study of Behavior of RCC Beam under Impact Loading and Effect of Hourglass Energy by Finite Element Analysis using ANSYS.* International Journal of Engineering Research & Technology, 8(7), 2278-0181.

İstegün, B., Subaşı, A., Çelebi, E. (2019). *Sismik tekstil ile güçlendirilmiş düşey delikli yığma tuğla ve bims blokların üç noktalı kesme deneyi.* Academic Platform Journal of Engineering and Science, 7(2), 222-228.

Jose, N. M., Dr. Mathai, A. (2015). *A Study on Lateral Deformation of Monopile of Offshore Wind Turbine due to Environmental Loads.* International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology, 24(2016), 287-294.

Jose, N. M., Mathai, A. (2018). *A study on Lateral Displacement of Monopile of Offshore Wind Turbine in a Layered Soil.* International Research Journal of Engineering and Technology, 5(5), 2395-0056, 2395-0072.

Karabörk, T., Çelik, T. (2015). *Tarihi Taş Yığma Duvarların Kayma Dayanımını Arttırmak Amacıyla Geliştirilen Metal Bağlantı Elemanları.* Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray.

Kaya, Ç. (2010). *Yığma duvarın elastik-plastik hesabı.* Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Köksal, E., Köksal, H. O., Yıldırım, H. (2004). *Eksenel basınç altında beton briket yığma prizmaların sonlu eleman analizi.* İMO Teknik Dergi, 3249-3265, Yazı 218.

Kömürcü, S. (2017). *Yığma duvarların düzlem içi davranışlarının modellenmesi ve analizi.* Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Lazim, Z., Ismail, A. E., Taib, I. (2020). *Preliminary of finite element analysis (FEA) investigation on the stent expansion.* Materials Science and Engineering, 824 (2020) 012005, doi:10.1088/1757-899X/824/1/012005

Liu, J., Zheng, H., Kuang, Y., Xie, H., Qin, C. (2019). *3D Numerical Simulation of Rock Cutting of an Innovative Non-Planar Face PDC Cutter and Experimental Verification.* School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China. Doi:10.3390/app9204372

Mishra, S., Rizwanullah., Gangwar, S., Sharma, H. K. (2019). *Investigation of ultra high performance fiber reinforced concrete under impact loading.*

Pryhorovska, T. O., Chaplinskiy, S. S., Kudriavtsev, I. O. (2015). *Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits*. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine.

Soni, R., Banchhor, R. (2019). *Explicit Dynamic Analysis of Single Point Cutting Tool using ANSYS.* Department of Mechanical Engineering, Chhattisgarh Swami Vivekananda Technical University.

Subaşı, R. O. (2018). *Bims duvar elemanları için üç noktalı kesme deneyinin sayısal modeli.* Yüksek Lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Ural, A. (2009). *Yığma yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi.* Yüksek Lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Ural, A., Doğangün, A. (2009). *Yığma duvarların kayma kapasitelerini etkileyen parametreler: desteksiz duvar uzunluğu.* Engineering Sciences, 4(3), 240-250.

Ural, A., Kara, M. E. (2015). *Kenet ve Zıvanaların Yığma Duvarların Kesme (Kayma) Davranışına Etkisi.* Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray.

Zia, A. J. (2021). *Kesme Taş ile Yapılan Katmanlı Duvarların Deneysel Olarak Araştırılması.* Doktora tezi, KTO Karatay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.

Ansys Contact Types and Explanations. Erişim adresi: https://www.mechead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/. Erişim tarihi: 10 Ocak 2022.

Beer, E., Russell Johnston, F. P., Ders Notu, J., & Acar, H. (2002). *Seventh Edition*, Erişim adres: https://docplayer.biz.tr/7757715-Vector-mechanics-for-engineers-statics.html. Erişim tarihi: 21 Mayıs 2022.

Çapar, Y. (2020). *Contact Types and Behaviours in Structural Analysis.* Erişim adresi: https://yasincapar.com/contact-types-and-behaviours-in-structural-analysis/. Erişim tarihi: 09 Haziran 2022.

Ferdinand, P., Beer E., Russell Johnston, Jr., Lecture Notes: J. Walt Oler. Texas Tech University. (2007). Vector mechanics for engineers: Statics., Friction. Erişim adresi: https://kipdf.com/statics-friction-vector-mechanics-for-engineers-eighth-edition-chapter-ferdinand_5ada45967f8b9a2e7e8b4609.html. Erişim tarihi: 21 Mayıs 2022.

www.ijert.org. Vol. 8 Issue 07, July-2019. *Utlisation of Plastic waste in making Plastic sand Bricks View project Analysis of Rain water and Ground water Management in Doon Valley View project Dr Omprakash Netula JECRC Foundation Study of Behavior of RCC Beam under Impact Loading and Effect of Hourglass Energy by Finite Element Analysis using ANSYS*.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Erdem ALAN

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : 2006, Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Yapı Ressamlığı Öğretmenliği

Lisans Öğrenimi : 2021, Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

İŞ DENEYİMİ

Projeler : 2007-2010, Üç boyutlu tasarım ve Mimari proje çizim uygulamaları, Onsa İnşaat Ltd. Şti.

Çalıştığı Kurumlar : 2010-2021, Öğretmen, Fatih Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Konya

: 2016, Usta Öğretici, Selçuklu Halk Eğitim Merkezi, Konya

: 2022 – devam etmekte, Öğretmen, Ölçme, Değerlendirme ve Sınav Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Ankara

Tarih: 05 Aralık 2022