

YIĞMA DUVAR ELASTİK DAVRANIŞININ
DÜZLEM ÇUBUK ELEMANLARLA MİKRO MODELLEMESİ

Uğur KAFKAS

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım – 2015

YIĞMA DUVAR ELASTİK DAVRANIŞININ
DÜZLEM ÇUBUK ELEMANLARLA MİKRO MODELLEMESİ

Uğur KAFKAS

Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. M. Sami DÖVEN

Kasım - 2015

KABUL VE ONAY SAYFASI

Uğur KAFKAS'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı Yığma Duvar Elastik Davranışının Düzlem Çubuk Elemanlarla Mikro Modellemesi başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

04 / 11 /2015

Üye : Prof. Dr. Mehmet Tefvik BAYER

Üye : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mahmud Sami DÖVEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hasan GÖÇMEZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının % 6 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Danışman Adı Soyadı

Öğrenci Adı Soyadı

Yrd. Doç. Dr. Mahmud Sami DÖVEN

Uğur KAFKAS

YIĞMA DUVAR ELASTİK DAVRANIŞININ DÜZLEM ÇUBUK ELEMANLARLA MİKRO MODELLEMESİ

Uğur KAFKAS

İnşaat Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2015

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. M. Sami DÖVEN

ÖZET

Bu çalışmada yığma yapıların en önemli taşıyıcı elemanı olan yığma duvarların elastik davranışlarının tespiti için düzlem çubuk elemanlarla duvarın mikro modellemesi yapılmıştır. Tarif edilen mesnet şartlarına sahip duvarların ve duvarı oluşturan tuğla birimlerin boyutları girilerek modelin sistematik olarak oluşturulduğu ve matris deplasman metodu ile analizinin yapıldığı bir bilgisayar programı geliştirilmiş ve geliştirilen program ile literatürden örnek çözümler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu çerçevede çalışmada birinci bölümde çalışmanın amacı, kapsamı ve konu ile ilgili literatür irdelenmiştir. Mevcut literatürde yığma duvarların modellenmesi ile ilgili çalışmalara değinilmiş, ikinci bölümde ise yığma yapılar ve yığma duvarlarda kullanılan malzemeler ve yığma yapılarda modelleme teknikleri ele alınmıştır. Üçüncü bölümde ise çalışma çerçevesinde sistemin analizinde kullanılan matris deplasman metodu irdelenmiştir. Dördüncü bölümde ise yığma duvarların düzlem çerçeve ve kafes elemanlarla mikro modellenmesi için önerilen modelleme tekniği tarif edilmiştir. Beşinci bölümde ise geliştirilen bilgisayar programı tanıtılarak literatürdeki bazı örneklerin önerilen modelleme yöntemi ile elastik analizi yapılmış ve literatürle uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Matris Deplasman, Mikro Modelleme, Modelleme Teknikleri, Yığma Yapılar, Yığma Duvar.

**MICRO MODELING THE ELASTIC BEHAVIOUR OF MASONRY WALLS
BY PLANE BAR MEMBERS**

Uğur KAFKAS

Civil Engineering, Master Thesis, 2015

Thesis Advisor: Asst. Prof. Dr. M. Sami DÖVEN

SUMMARY

In this study, for determining the elastic behavior of masonry walls that are the most important structural elements of the masonry structures, micro modeling by plane bar elements is proposed. The model was created systematically by entering the walls support conditions and the dimensions of the brick units master thickness and the modulus of elasticity. The analysis of the model was carried out by the developed computer program by using the matrix displacement method. The results were then compared with the sample solutions taken from the literature.

In this context, the existing literature review has been made in the first part of the study. In the existing literature, the studies related to the modeling of masonry walls had been addressed. Then, in the second chapter, in addition to the masonry structures and the materials used in masonry walls, the modeling techniques in masonry structures have been discussed. In the third part, the matrix displacement method used in the analysis of the system in the context of the study was examined. In the fourth chapter, the modeling technique that was proposed for micro modeling of the masonry walls with plane frame and truss elements has been described. In the fifth chapter, introducing the computer program developed, elastic analysis of some examples in the literature have been made with the modelling method proposed, and the compatible results with the literature have been achieved.

Keywords : Masonry Buildings, Masonry Walls, Micro Modeling, Modeling Techniques, Matrix Displacement.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana yardımcı olan başta danışman hocam Yrd. Doç. Dr. M. Sami Döven'e, elastik analiz konusunda "Yapı Statiğinde Matris Metotlar" ders notlarından ve her zaman tavsiyelerinden yararlandığım kıymetli hocam Prof. Dr. Mehmet Tevfik Bayer'e, desteğini hep yanımda hissettiğim eşim Ayfer Kafkas'a, babama ve çocuklarıma, üstümde emeği olan bütün hocalarıma ve dostlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
1.2 Literatürdeki Bazı Çalışmalar	2
2- YIĞMA YAPILAR	8
2.1. Yığma Yapı Sınıfları	8
2.2. Yığma Duvarlarda Kullanılan Malzemeler	11
2.2.1. Doğal taş malzeme	12
2.2.2. Pişmiş toprak (kil) tuğla malzeme	13
2.2.3. Kerpiç	16
2.2.4. Harç.....	17
2.3. Yığma Yapılarda Kullanılan Modelleme Teknikleri	19
2.3.1. Makro modelleme	21
2.3.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme	22
2.3.3. Detaylı mikro modelleme	23
2.3.4. Yığma duvarların analiz yöntemleri	25
3. MATRİS DEPLASMAN METODU İLE İKİ BOYUTLU ÇUBUK SİSTEMLERİN ANALİZİ.....	27
3.1. Eksen Takımları	27
3.1.1. Global eksen takımı	28
3.1.2. Çubuk eksen takımı	28
3.2. Düğüm Noktası	29
3.3. Serbestlikler	29
3.4. Hiperstatiklik Derecesi.....	31
3.5. Düğüm Noktası Yükleri	32

İÇİNDEKİLER(devam)

3.6. Çubuk Ucu Kuvvetleri	32
3.7. Bağımsız Çubuk Ucu Kuvvetleri	33
3.8. Bağımsız Çubuk Deformasyonları	36
3.9. Rijitlik (Stifnes) Matrisi	39
3.9.1. Toplama yöntemi	40
3.9.2. Rijitlik matrisinin oluşturulması ve sistemin çözümü.....	41
4. DUVARLARIN ÇUBUK ELEMANLARLA MODELLENMESİ	43
4.1 Yığma Duvarın Modellenmesi.....	43
5. GELİŞTİRİLEN BİLGİSAYAR PROGRAMI VE UYGULAMA	51
5.1. Geliştirilen Bilgisayar Programı	51
5.2. Mikro Modelleme Tekniği İle Sayısal Çözümler.....	56
5.2.1. Eindhoven duvarları.....	56
5.2.2. ETHZ duvarları.....	65
5.2.3. Lourenço yığma duvar modeli.....	69
5.2.4. Franklin yığma duvar deneyi modeli	74
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR DİZİNİ	78
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Rijit Bloğun Salınımı (Housner, 1963)	2
1.2. Makro elemanlarla yığma yapı modellemesi	3
1.3. Eşdeğer çerçeve modeli. a) Örnek duvar b) Eşdeğer çerçeve modeli c) Makro modelleme (Sabatino ve Rizzano, 2010)	4
1.4. Kafes elemanlarla yatay derzlerin modellenmesi (Mandilora vd., 2012)	5
1.5. Kafes elemanlar ve katı elemanlarla mikro modelleme (Sattar, 2013).....	6
2.1. Çeşitli donatılı yığma duvar örülme örnekleri (Tomažević, 1999)	10
2.2. Sarılmış yığma yapılar (Bayülke,1992)	10
2.3. Öngerilmeli yığma yapılar (Arıcan,2010)	11
2.4. Harman tuğlası (TS 704, 1979)	13
2.5. İki gövde katmanlı tuğla duvar (Gür vd., 2012)	16
2.6. Çeşitli donatılı yığma duvar örülme örnekleri (Tomažević, 1999)	17
2.7. Yığma duvar modellemeleri, a- Detaylı Mikro Modelleme, b- Basitleştirilmiş Mikro Modelleme, c- Makro Modelleme (Lourenço, 1996)	21
2.8. Yığma Duvarın Makro Model Analizi a) Kuvvet-Yer değiştirme Diyagramı b) Nihai Yükte Deformasyon Şekli (Lourenço, 1996)	22
2.9. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme Tekniği (Ural, 2009)	23
2.10. Yığma Duvarın Mikro Modelleme Yöntemiyle Analizi a) Kuvvet-Deplasman Diyagramı b,c) Maksimum ve Nihai Yüklerdeki Deformasyonlar (Lourenço, 1996)	24
3.1. Global eksen takımı	28
3.2. Global eksen takımı (x,y,z) ve çubuk eksen takımı (x', y', z')	28
3.3. Serbestliklerin grafik gösterimi (Döven, 2004)	30
3.4. Çubuk eksen takımına göre çubuk ucu serbestlikleri	30
3.5. Global eksen takımına göre çubuk ucu serbestlikleri	31
3.6. j çubuğu serbest cisim diyagramı (Döven, 2004)	33
3.7. Bağımsız çubuk ucu kuvvetleri ve vektör olarak gösterimi	34
3.8. Çubuk moment dengesi (Döven, 2004).....	35
3.9. Bağımsız çubuk deformasyonları ($\Delta_j, \theta'_j, \theta''_j$)	37
3.10. (Bj) Matrisi	40
3.11. (B) Matrisi	41
4.1. Yığma duvar yükleri	43
4.2. Tuğlanın çubuk eleman ile (çerçeve eleman) mikro modellenmesi	44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.3. Harç birimlerin çerçeve ve kafes elemanlarla modellenmesi	45
4.4. Eksenel yükleme halinde örnek bir çubuk eleman	46
4.5. Yatay yükleme halinde örnek bir çubuk eleman	47
4.6. Tuğla ve harcın çerçeve ve kafes elemanlarla mikro modellenmesi	47
4.7. Mikro modelin temsili gösterimi	48
4.8. 329 x 290 cm. boyutlarındaki duvarın modelinin temsili gösterimi	50
5.1. YDPro giriş ekranı	51
5.2. Deformasyon öncesi duvarın şematik gösterimi	52
5.3. Deformasyon yapmış duvarın şematik gösterimi	52
5.4. Programın veri giriş ekranı	53
5.5. Modeldeki düğüm sayısı, çubuk sayısı ve serbestlik derecesi	54
5.6. Çerçeve ve kafes elemanlarla modellenen duvarın temsili gösterimi	55
5.7. Analiz sonu	55
5.8. Şekil değişikliği gösterimi	56
5.9. Eindhoven duvarının geometrisi ve yükleme şekilleri; a) Düşey yükleme b) Yatay yükleme (Kuruşcu, 2012)	57
5.10. J4D ve J5D Duvarlarının yükleme ve oluşan çatlak şekli (Kuruşcu, 2012)	57
5.11. J6D Duvarının yükleme ve oluşan çatlak şekli (Kuruşcu, 2012)	58
5.12. J7D Duvarının yükleme ve oluşan çatlak şekli (Kuruşcu, 2012)	59
5.13. Mikro modelin oluşturulması	59
5.14. Mikro modelleme ile oluşan temsili sonlu eleman modeli	60
5.15. 0,30 N/mm ² yayılı yük için yatay yüklemeler sonucu yük-deplasman eğrisi (Kuruşcu, 2012)	61
5.16. 0,30 N/mm ² yayılı yük için en fazla yatay yükleme sonucu şekil değişikliği	62
5.17. 1,21 N/mm ² yayılı yük için yatay yüklemeler sonucu yük-deplasman eğrisi (Kuruşcu, 2012)	62
5.18. 1,21 N/mm ² yayılı yük için en fazla yatay yükleme sonucu şekil değişikliği	63
5.19. 2,12 N/mm ² yayılı yük için ardışık yatay yüklemeler sonucu yük-deplasman eğrisi (Kuruşcu, 2012)	64
5.20. 2,12 N/mm ² yayılı yük için en fazla yatay yükleme sonucu şekil değişikliği	64
5.21. (ETHZ duvarları geometrik özellikleri (ölçüler mm.) ve yükleme biçimi. (Kuruşcu, 2012)	65
5.22. ETHZ duvarları için mikro modelin oluşturulması	66

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.23. W1 duvarı ardışık yatay yüklemeler sonucu yük-deplasman eğrisi (Kuruşcu, 2012)	67
5.24. W1 duvarı yükleme sonucu şekil değişikliği	67
5.25. W2 duvarı ardışık yatay yüklemeler sonucu yük-deplasman eğrisi (Kuruşcu, 2012)	68
5.26. W2 duvarı yükleme sonucu şekil değişikliği	68
5.27. Modele ait yükleme şekilleri (Lourenço, 1996;Ural, 2009)	69
5.28. Model veri giriş ekran görüntüsü	70
5.29. 1. ve 2. yükleme sonucu oluşan model	70
5.30. 3. ve 4. yükleme sonucu oluşan model	71
5.31. 1. yükleme sonucu şekil değişikliği	72
5.32. 2. yükleme sonucu şekil değişikliği	72
5.33. 3. yükleme sonucu şekil değişikliği	73
5.34. 4. yükleme sonucu şekil değişikliği	73
5.35. 1F Duvarı geometrik özellikleri (Franklin vd., 2001)	74
5.36. 1F Duvarı modeli	75
5.37. 1F duvarı ardışık yatay yüklemeler sonucu yük-deplasman eğrisi (Franklin vd. 2001)	75
5.38. 1F duvarı şekil değişikliği	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Doğal Yapı Taşlarının Ortalama Fiziksel Özellikleri (Ünay, 2002)	13
2.2. Harman tuğlası sınıfları (TS 704, 1979)	14
2.3. Harman tuğlası boyutları (TS 704, 1979)	15
2.4. Fabrika tuğlası birim hacim ağırlık ve basınç dayanımları (TS 705, 1985)	15
2.5. Kerpiç boyutları ve sınıflandırılması (TS 2515, 1985)	17
2.6. Yığma Duvar Emniyet Gerilmeleri (DBYBHY, 2007)	18
2.7. Harç Sınıfları (Hacimsel) (TS-2510, 1977)	19
5.1. ETHZ duvarları özellikleri (Kuruşcu, 2012)	65
5.2. Karşılaştırmalı deplasman değerleri	71

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A_j	j. çubuğun kesit alanı
A_t	Tuğlanın modellendiği çubuk kesit alanı
A_h	Harcın modellendiği çubuk kesit alanı
A_{hy}	Harcın modellendiği yatay derz çubuk kesit alanı
A_{hd}	Harcın modellendiği düşey derz çubuk kesit alanı
a_j	Çubuk üzerine etki eden kuvvetlerinin etkidikleri noktanın referans noktasına olan uzaklığı
$(\bar{B}_j)$	j çubuğu için çubuk eksen takımına göre çubuk ucu kuvvetleri ile bağımsız çubuk ucu kuvvetleri arasında kurulacak bağıntı için gerekli yardımcı matris
$(\bar{B}_j^T)$	$(\bar{B}_j)$ Matrisi transpozu
b_t	Tuğlanın derinliği
b_j	Çubuk üzerine etki eden kuvvetlerinin etkidikleri yerlerin referans olmayan noktaya uzaklığı,
cs	Çubuk sayısı
$\tilde{d}_j'$	Çubuk eksen takımına göre çubuk ucu deplasmanları
$\tilde{d}_j$	Global eksen takımına göre çubuk ucu deplasmanları
ds	Düğüm sayısı
E_j	j. çubuğun elastisite modülü
E_h	harcın elastisite modülü
E_t	tuğlanın elastisite modülü
E_e	eşdeğer elastisite modülü
$\tilde{F}$	Çubuk ucu kuvvetleri vektörü
$\tilde{f}_j$	Bağımsız çubuk ucu kuvvetleri vektörü
h_t	Tuğlanın yüksekliği
I_j	j. çubuğun atalet momenti
I_t	Tuğlanın modellendiği çubuk atalet momenti
I_h	Harcın modellendiği çubuk atalet momenti
I_e	eşdeğer atalet momenti
i	Sistemi oluşturan her bir çubuk elemanın referans düğüm noktası

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
j	Sistemi oluşturan her bir çubuk eleman
k	Sistemi oluşturan her bir çubuk elemanın referans olmayan düğüm noktası
(K_j)	j çubuk eleman için bağımsız çubuk ucu kuvvetleri ile bağımsız çubuk deformasyonları arasında bağıntı kurabilmek için gerekli matris
L_j	j . çubuğun boyu
L_t	Tuğlanın genişliği
$\tilde{P}$	Düğüm noktası yük vektörü
$\tilde{Q}$	Yüklerden kaynaklanan dış yük vektörü
(R_j)	Rotasyon matrisi
(R_j^T)	Rotasyon matrisinin transpozu
sd	Serbestlik derecesi
(S)	Yapının rijitlik matrisi
x	Global yatay eksen
y	Global düşey eksen
z	Global XY düzlemine dik eksen
x'	Çubuk yatay eksen
y'	Çubuk düşey eksen
z'	Çubuk XY düzlemine dik eksen
$\tilde{x}$	Çubuk ucu deplasmanları
θ_j'	j çubuğunun referans düğümündeki bağımsız dönme
θ_j''	j çubuğunun referans olmayan düğümündeki bağımsız dönme
Δ_j	j çubuğunun boy uzaması
$\tilde{\beta}_j$	j çubuğuna ait bağımsız çubuk ucu deformasyonları vektörü
$(-\delta_j)$	j çubuğuna ait rölatif çökme
$\tilde{q}_j$	Global eksen takımına göre deplasmanlardan kaynaklanan çubuk ucu kuvvetleri
$\tilde{q}_j'$	Çubuk eksen takımına göre deplasmanlardan kaynaklanan çubuk ucu kuvvetleri
$\tilde{\tilde{q}}_j$	Global eksen takımına göre çubuk üzerindeki yüklerden kaynaklanan çubuk ucu kuvvetleri
α_j	j . çubuğun referans açısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ(devam)**Kısaltmalar****Açıklama**

DOHT

Dolu Harman Tuğlası

DEHT

Delikli Harman Tuğlası

DBYBHY

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yığma binalar tarihte önemli yer tutan en eski binalardır. Tarihsel süreç içinde değerlendirildiğinde yaşanacak mekânların yığma duvarlar ile oluşturulması en genel inşaat yöntemlerinden biridir. Yığma duvarlarla düzenlenen bu tür geleneksel yapılar, dış etkilere dayanıklı malzemelerle üretildiği için, günümüze kadar ayakta kalabilmiş ve teknolojileri hakkında bilgi edinmemizi kolaylaştırmıştır. Ülkemizde özellikle kırsal kesimlerde yığma türü yapılar çoğunluktadır ve halen inşa edilmektedir. Bundan dolayı nüfusumuzun önemli bir kısmı halen yığma yapılarda yaşamaktadır. Devlet İstatistik Enstitü'nün 2000 yılında yapmış olduğu bina sayımına göre (DİE, 2000) ülkemizdeki binaların %51,05'ini yığma yapılar oluşturmaktadır. Nicelik olarak bu kadar fazla olmasına rağmen bu yapıların büyük çoğunluğu herhangi bir mühendislik bilgisi olmadan ve yönetmelik koşulları göz önüne alınmadan inşa edilmiş ve edilmektedir (Ural, 2009).

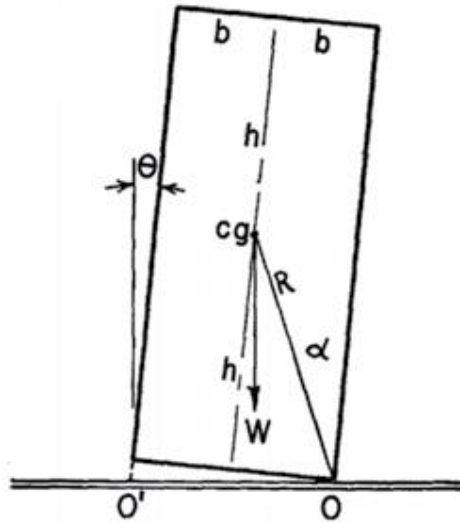
Yapı tasarımı önceden, büyük bir kısmı tecrübeye dayanan, ampirik kurallara bağlı bir çizgiye sahipken, ilerleyen zamanlarda matematik temellere oturtulmuş ve yöntemleri büyük oranda düzenli bir hale gelmiştir. Teknolojinin ve özellikle bilgisayar teknolojisinin son yıllardaki gelişmesiyle yığma yapıların sayısal modellerle incelenmesinde önemli gelişmeler olmuştur. Bu çerçevede yığma yapılar için detaylı modelleme teknikleri, analizinde de farklı yaklaşımlar ve metotlar ortaya çıkmıştır (Dabanlı,2008). Yapıdaki bir elemanın tek başına davranışını incelemek için kullanılacak model çok detaylı olarak hazırlanabilirken, yapının tamamında bu şekilde bir detaya girilmesi zorlaşmaktadır. Bilgisayar teknolojisinin ilerleme hızı dikkate alındığında sonlu elemanlar metodu diğer sistemlerin hesabında olduğu gibi yığma yapıların analizi konusunda da ön plana çıkmaktadır (Ural, 2009).

Yığma yapılar ile ilgili yapılan çalışmaların büyük kısmını, yığma yapıların en önemli yapısal elemanlarından biri olan taşıyıcı duvarların incelendiği çalışmalar oluşturmaktadır. Literatürde yığma duvarların modellenmesi için makro ve mikro modelleme teknikleri verilmiştir. Daha hassas çözüm yapan mikro modelleme tekniği ile tuğla ve harç birimleri üç boyutlu olarak bloklar halinde veya iki boyutlu kabuk elemanlar ile modellenmektedir. Bu modellerde düğüm ve denklem (serbestlik) sayısı oldukça fazla olmaktadır. Bu durumda mevcut mikro modelleme teknikleri ile bir eleman davranışının incelenmesi uygulanabilir bir işlem iken, birçok elemandan oluşan tüm yapının analizi çok uygulanabilir olmamaktadır. Ve daha yaklaşık sonuçlar veren makro modelleme teknikleri tercih edilmektedir. Bu çalışmada, yığma yapıların modellenmesi hakkında mevcut literatür ve yönetmeliklerden faydalanarak mevcut

modelleme tekniklerini ortaya koymak ve yığma yapıların en önemli yapısal elemanı olan yığma duvarların çerçeve ve kafes elemanlarla mikro modellenmesi ile yığma yapıların taşıyıcı elemanlarının elastik davranışlarının modellenmesi hedeflenmiştir. Bunun için tuğla ve harç birimleri iki boyutlu çubuk elemanlar olarak modellenmiştir. Bu da tüm yapının analizini mümkün kılmak adına daha az düğüm ve denklem sayısı manasına gelmektedir. Tuğla birimlerinin ve yatay derzlerin düzlem çerçeve ve düşey derzlerin ise düzlem kafes olarak mikro modellenmesi ile yapılan duvarın, elastik davranışını tespit etmek üzere ortaya konulan modelin statik analizini gerçekleştirmek için bir bilgisayar programı (YDPro) geliştirilmiştir.

1.2 Literatürdeki Bazı Çalışmalar

Yığma yapıların modellenmesi üzerinde uzun yıllardır çalışılan bir konudur. Modelleme çalışmalarının başlarında yapısal elemanların rijit bloklar olarak modellenmesi mühendisler tarafından kabul görmüştür. Tabanın yatay ve sismografik ivmesine maruz kalan rijit bloğun yatay yüzeyde devrilmesinin analizinde dinamik kuralları ilk kullanan Housner (1963) olmuştur. Blok ve taban arasında hiçbir kayma olmayacağı, bloğun tabandan ayrılmayacağı, bloğun yeterince ince olduğu, α (Şekil 1.1.) açısının 20° 'yi aşmayacağını ve salınım sırasında θ açısının küçük olacağı varsayımlarını benimseyerek, bloğun yıkılması için gerekli olan kuvvetin uygulanma süresini analiz etmiştir (Housner, 1963).



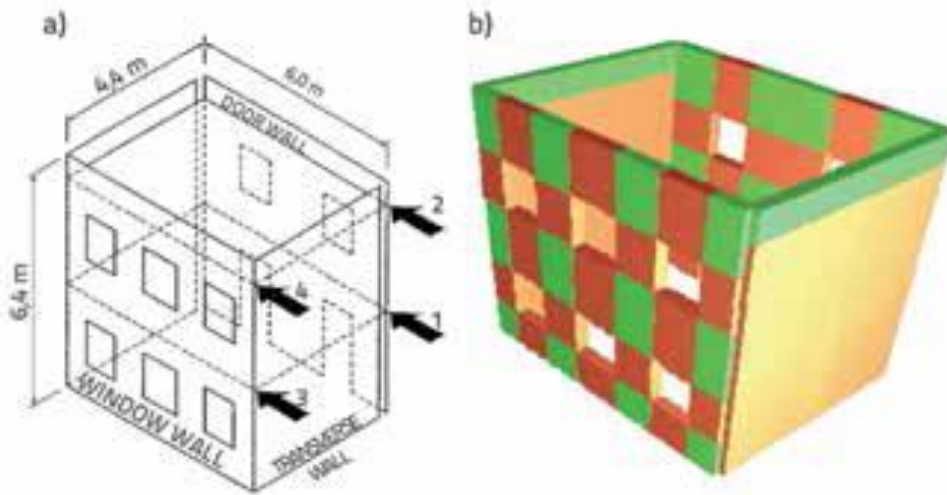
Şekil 1.1. Rijit Bloğun Salınımı (Housner, 1963)

Housner'dan sonra pek çok bilim adamı tarafından tabanın harmonik ivmesi süresince bloğun dinamik tepkisi üzerine araştırmalar yapılmıştır (Yim, 1980, Hogan, 1990, Lenci ve Rega, 2006, Shenton ve Jones, 1991, Tso ve Wong, 1989, Yim ve Lin, 1991).

Zamanın ilerlemesi ve teknolojik gelişmeler sonucunda yığma yapıların sayısal modellerle incelenmesinde önemli gelişmeler olmuştur. Bu çerçevede yığma yapıların analizinde detaylı modelleme teknikleri, analizinde de farklı yaklaşımlar ve metotlar ortaya çıkmıştır. Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak yapıların modellenmesi günümüzde de farklı versiyonları ile en çok itibar gören modelleme çeşididir.

Molins and Roca (1997) çeşitli kesitlerdeki elemanlardan oluşan yapıların analizi için bir sayısal model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model malzeme, geometrik doğrusal olmayan etkiler ve Mohr-Coulomb kesme kırılması kriterini de içermektedir (Smoljanović, 2013).

Günümüzde teknolojik gelişmelerle yığma yapı modellemesinde makro elemanları kullanarak serbestlik derecesi ve hesaplama süresini kısaltan modeller geliştirilmektedir (Gallasco vd., 2004, Brencich ve Lagomarsino, 1998, Calio vd., 2012, Casolo ve Peña, 2007, Chen vd., 2008). Her bir makro eleman ya tamamen bir duvar ya da boşluklu duvarlarda duvar parçaları olabilmektedir (Şekil 1.2).



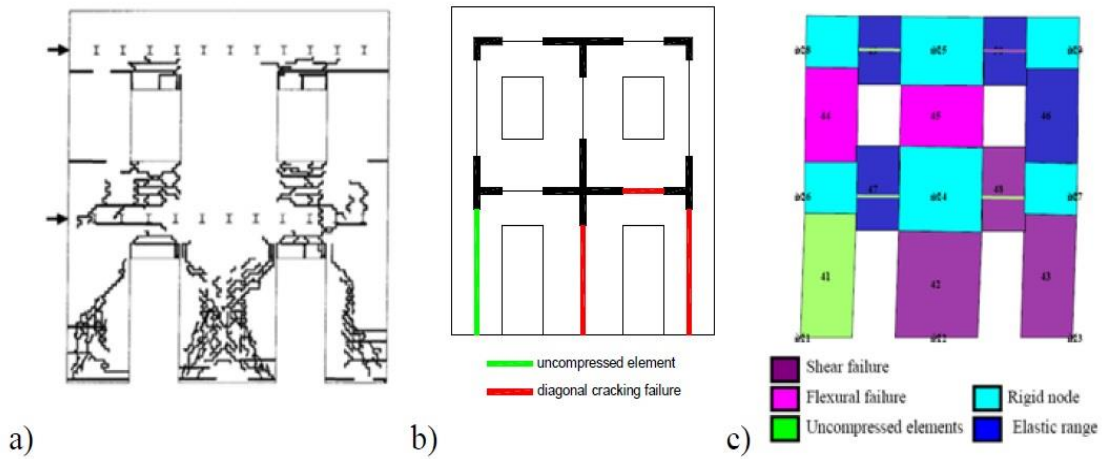
Şekil 1.2. Makro elemanlarla yığma yapı modellemesi a) Yapının şematik gösterimi; b) makro elemanlarla modellenmesi (Gallasco vd., 2004)

Asıl amaçları ulaşılan sonuçların pratikte de kullanılabilir olması olan Kappos ve diğ (2002), çalışmalarında donatısız yığma yapıları yanal yük etkisinde modellemişlerdir. Bu amaçla 2 ve 3 boyutlu olarak sonlu elemanlar ve eşdeğer çerçeve modelleri geliştirilmiş daha

sonra pushover (itme) analizi ile oluşturdukları her iki model üzerinde farklı rijitlik konfigürasyonları uygulanarak çözümlemeler yapmışlardır.

“Ayrık Sonlu Elemanlar Metodu”nu kullanarak yığma yapıların statik ve dinamik analizlerini yapan Aydan (1997), çalışmasında özellikle yığma duvarlar, kuleler, barajlar, kemerler ve piramit tiplerinin analizlerini yapmış ve bu gibi yapılarda bu metodun uygulanabilirliğini kontrol etmiştir.

Yığma yapıların modellenmesinde eşdeğer çerçeve sistemi gibi bazı basitleştirilmiş, yapıyı yaklaşık olarak modelleyen sistemler de geliştirilmiştir (Belmouden ve Lestuzzi, 2009, Demirel, 2010, Roca vd.,2005, Sima vd.,2011). Demirel (2010), çalışmasında eşyönlü ve bağıdaşık eşdeğer çubuk elemanlarla oluşturulan yığma bina modellerine yığılı plastik mafsallar atanarak oluşturulan doğrusal olmayan çubuk çerçeve modelleri, yığma yapıların modellenmesinde kullanılmaktadır. Benzer bir yaklaşımla Sabatino ve Rizzano (2010), oluşturdukları eşdeğer çerçeve modeli ile makro modelleme yöntemini karşılaştırarak eşdeğer çerçeve yöntemiyle modelleme sonucu makro modellemeye yakın sonuçlar elde etmişlerdir (Şekil 1.3.).



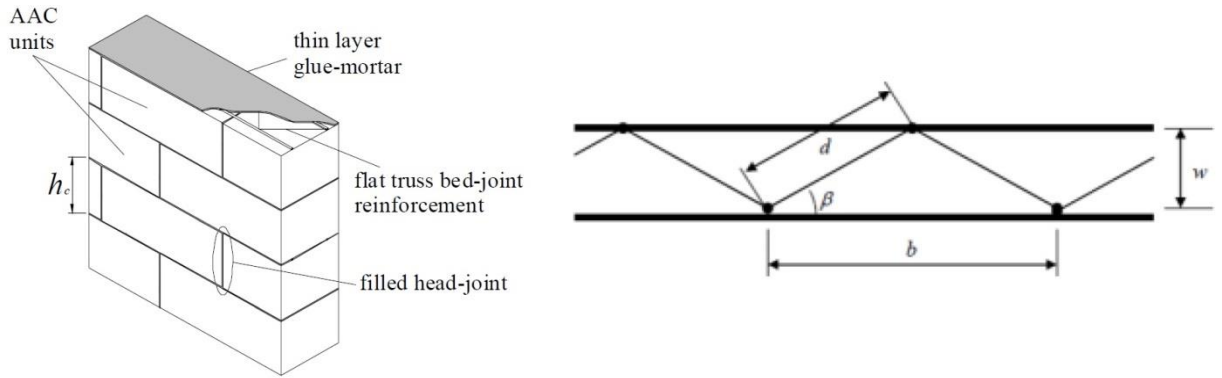
Şekil 1.3. Eşdeğer çerçeve modeli. a) Örnek duvar b) Eşdeğer çerçeve modeli c) Makro modelleme (Sabatino ve Rizzano, 2010)

Makro elemanlarla makro modellemenin ardından mikro modelleme fikri de bilim dünyasında oluşmuştur. Özellikle Lourenço (1996) doktora çalışmasında mikro modelleme tekniğiyle yapılacak olan modellemelerde kayma (kesme), çatlama ve göçme mekanizmalarını birlikte kullanmak suretiyle bir sayısal model geliştirmiştir. Makro modellemelerde ise

malzemeyi ortotrop veya anizotrop kabul ederek Rankine ve Hill kriterlerini birleştirmek suretiyle bir elastiklik sınır yüzeyi elde etmiştir. Geliştirmiş olduğu modellerden elde ettiği bulguları literatürde yapılmış olan deneysel çalışma bulgularıyla karşılaştırmıştır.

Modelleme aşamasında mikro modelleme tekniğini kullanan Berto ve diğ. (2005), yaptıkları çalışmada, yığma prizmaların aksenal basınç atındaki davranışını incelemek amacıyla 2 ve 3 boyutlu olmak üzere çeşitli analizler gerçekleştirmişlerdir. Analizlerinde zayıf harç - güçlü tuğla ve zayıf tuğla - güçlü harç malzeme özelliklerini dikkate almışlardır.

Mandilora vd. (2012), çalışmalarında mikro modelleme tekniğini kullanarak duvarları modellemişlerdir. Tuğlaların düşey olarak bağlandığı yatay derzlerdeki harçları kafes elemanlarla modelledikleri çalışmada modelleme teknikleri Şekil 1.4.'de gösterilmektedir. Ayrıca çalışmalarında çeşitli deneysel numunelerle modellerini de karşılaştırmışlardır.

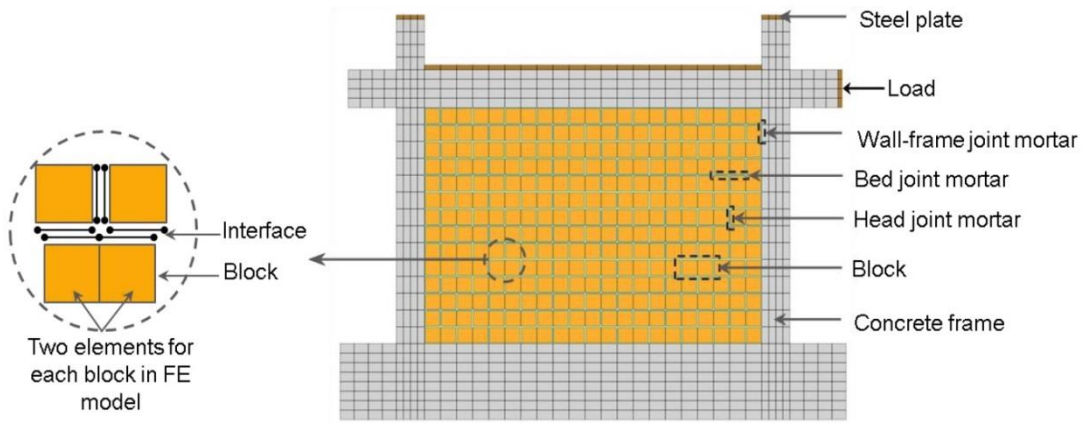


Şekil 1.4. Kafes elemanlarla yatay derzlerin modellenmesi (Mandilora vd., 2012)

Ural (2009), geliştirdiği pratik deprem hesabı programı ile sonlu elemanlar programı olan LUSAS ve DIANA yardımıyla çeşitli analizler gerçekleştirmiştir. Hem makro hem de mikro modelleme teknikleriyle analizler yapan Ural, yığma duvar mukavemetlerini, yığma duvar ve yapıların deprem davranışlarını etkileyecek olan bazı faktörleri (harç ve tuğla dayanımları, örgü biçimleri, düşey hatıllarının durumları gibi) yapısal modeller yardımıyla irdelemiştir. Çalışmada depremde hasara uğramış gerçek bir yığma yapı üzerinde önerilen modelleme tekniği uygulanmış ve sonuçlar tartışılmıştır. Ayrıca çalışmada, harç ve kâgir birimlerin dayanımlarının, örgü biçimlerinin ve hatılların yerleştirilme biçimlerinin duvarın yük taşıma kapasitesine etkileri ortaya konmuş ve açık kaynak kodlu bir sonlu elemanlar programının yazılımı verilmiştir.

Doktora tezinde hem mikro modelleme hem de makro modelleme yöntemini kullanan Sattar (2013), yığma duvarları mikro modelleme ile incelerken, kâgir elemanları 2 solid parça olarak ve yatay derzleri yatay kafes elemanlar, düşey derzleri de düşey kafes elemanlarla modelleyerek buna göre analiz yapmıştır (Şekil 1.5.). Ayrıca çalışmasında dolgu duvar bulunmayan betonarme çerçeve elemanların da davranışlarını incelemiştir.

Kullanılan modelleme teknikleri çerçevesinde makro modelleme ve eşdeğer çerçeve modeli ile modelleme kapsamında tüm yapı modellenmekte iken, teknolojik imkânlar dâhilinde mikro modelleme yöntemiyle yapının belli elemanları modellenmektedir. Bu çerçevede de mikro modelleme ile en çok yığma yapının yapısal elemanları ve yapısal elemanlardan da taşıyıcı duvarlar modellenmektedir.



Şekil 1.5. Kafes elemanlar ve katı elemanlarla mikro modelleme (Sattar, 2013)

Çalışmalarında yığma duvar elemanların kesme (kayma) ve basınç kırılması durumundaki davranışlarını belirlemek için bir formülasyon geliştirmiş olan Chaimoon ve Attard, (2006), sonlu eleman olarak üçgen elemanları kullandıkları çalışmalarında basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğini kullanmışlardır. Tuğlanın ve harcın elastik, tuğla harç ara yüzeyinin ise elastik ötesi bir davranış gösterdiğini kabul etmişlerdir. Velmertfoort ve diğ. (1993) yapmış olduğu yığma duvar deneyleriyle geliştirdikleri formülasyonu karşılaştırmışlardır.

Yaptıkları çalışmada yığma duvarların düşey tekil yükler altındaki davranışlarını kendi geliştirmiş oldukları sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla inceleyen Asteris ve Syrmakizis (2005), sonlu elemanlar modellemesinde ortotropik ve anizotropik elemanlar kullanmışlardır. İki eksenli gerilme altında farklı bir anizotropik kırılma yüzeyi önermişlerdir.

Yığma duvarların kayma davranışlarını parametrik çalışmalar yardımıyla belirlemeye çalışan Berto ve diğ (2004), çalışmaları kapsamında iki farklı hasar modeli kullanmışlardır. Birincisi mikro modelleme yardımıyla harcın davranışını belirlemek için izotropik hasar modeli, ikincisi ise yığma duvarın doğrusal olmayan davranışını belirlemek için makro modelleme yapılarak ortotropik model kullanılmıştır. Çalışmalarında ayrıca yığma duvarların örgü biçimlerinden bazılarının farklı modelleme teknikleri (mikro-makro) yardımıyla analizlerini yaparak sonuçları karşılaştırmışlardır.

Fenerci (2013), çalışmasında betonarme çerçevelerde genellikle yapısal eleman olarak kabul edilmemesine rağmen birçok depremde, dolgu duvarların hasar verici etkileri olabileceği savıyla betonarme çerçevelerde dolgu duvarların modellenmesi ve etkilerini deneysel çalışmalarla destekleyerek aktarmıştır. Çalışmasının sonucunda dolgu duvarların varlığının betonarme çerçevelerin mukavemet, rijitlik, deformasyon kapasitesi, süneklik ve göçme şeklini önemli ölçüde değiştirdiği ve dolgu duvarlardan kenar kolonlarına aktarılan dikkate değer miktarda kesme kuvveti, kesme hasarına neden olup, sünekliği azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Makro modellemede kullanılan modelin homojenleştirilmesi konusunda bir mikro-mekaniksel yöntem öneren Zucchini ve Lourenço (2002), iki aşamalı homojenleştirme işlemini dikkate alarak yığma duvardaki gerçek deformasyonlardan yola çıkarak yöntemlerini türetmişlerdir.

Farklı bir modelleme tekniği olarak da yığma duvarların analizini ayırık mekanik model olarak Lagrange metodu yardımıyla oluşturan ayrıca yeni bir yöntem (pathfollowing çözüm stratejisi) geliştiren Formica ve diğ. (2002), ayırık mekanik modelde her bir tuğlanın rijit ve her bileşim bölgesinde harcı ara yüz elemanı olarak kullanan bir yaklaşım tercih etmişlerdir. Modelde yığma duvarın tipik kesme davranışı ve yüksek hasar derecelerinde duvardaki sürtünmenin önemi vurgulanmıştır.

2- YIĞMA YAPILAR

Ülkemizde yapı stokunun çoğunluğunu oluşturan yığma yapılar, doğal taş, tuğla, kerpiç, ahşap ve hafif beton blok gibi malzemelerin, bağlayıcı özellikteki değişik harç birimleriyle veya harç kullanılmadan oluşturulan taşıyıcı duvarlardan teşkil edilen yapılardır. Yığma yapıların oluşturulduğu malzeme özellikleri çerçevesinde çekme dayanımları düşük, basınç dayanımları yüksektir. Yığma yapılar yapımlarında kullanılan malzemeler itibariyle de gevrek özellik gösteren ve ağır yapılardır ve ağır olmalarından dolayı da deprem esnasında büyük atalet kuvvetlerine maruz kalırlar. Dolayısıyla da deprem esnasında oluşan yatay yükler yapının ağırlığı ile doğru orantılı olmasından dolayı hem yüksek olmakta, hem de bu yatay yüklerden dolayı duvarların da gevrek yapısı ile birleştiğinde yapının gösterdiği esnemeler çok düşük kalmaktadır. Böylece yapının taşıma kapasitesi üzerindeki yüklerde çok çabuk çatlaklar, göçmeler ve yıkılmalar oluşmaktadır. Bu dezavantajlara rağmen ekonomik sebeplerden, yapımının nispeten kolay olmasından, malzeme teminindeki kolaylıktan ve işçiliklerin ucuz olmasından dolayı yığma yapılar özellikle kırsal kesimlerde hala yoğun olarak kullanılmaya devam etmektedir (Arıcan,2010). Yığma yapıları oluşturan bloklar genel olarak dış etkilere dayanıklı, sünekliği az, gevrek, basınca dayanımlı ve çekmeye karşı çok zayıf malzemelerdir.

2.1. Yığma Yapı Sınıfları

Yığma yapılar sistem olarak TS EN 1996-1-1+A1 (2005)'de donatısız, donatılı, öngerilmeli ve sarılmış olarak gruplanmıştır. Bu gruplamaya göre tasarım ilkeleri, yapısal analizleri ve sınır durumları da aynı yönetmelikte belirlenmiştir.

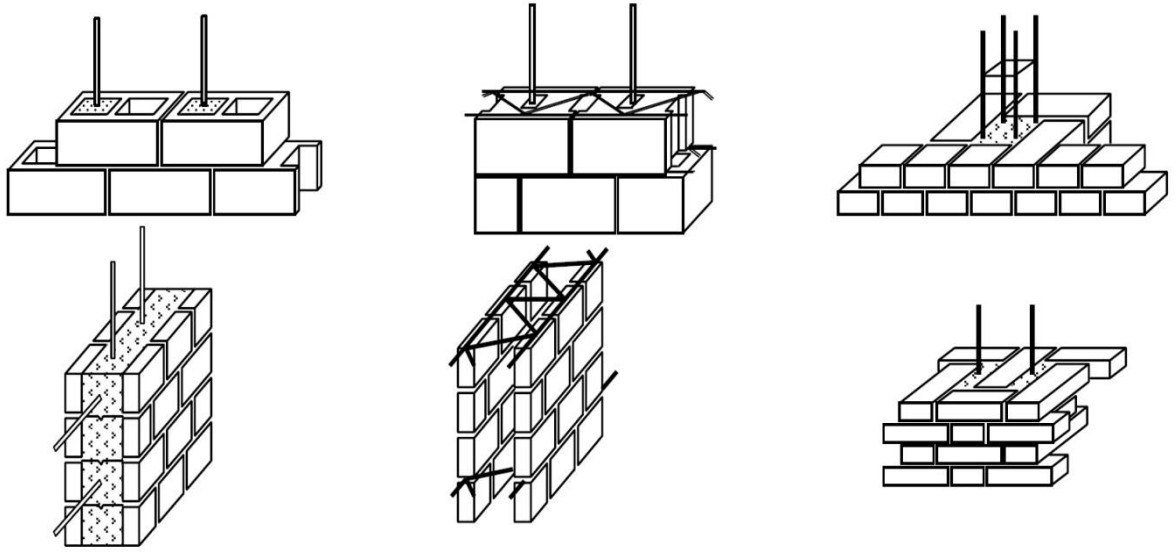
Donatısız yığma yapılar, yığma duvar elemanların yatay, düşey, tekil ve kazara oluşabilecek tüm yükleri doğrudan karşılayacağı öngörülerek doğal taş, tuğla, kerpiç ve hafif beton bloklar gibi malzemelerin bağlayıcı harçla veya harçsız olarak birleştirilmesiyle yapılmış yapılardır. İçinde her hangi bir donatı kullanılmadığı için daha gevrek olan bu yapılarda, deprem etkisi altında ani kırılma ve göçmeler oluşmaktadır. Donatısız yığma yapılarda kayma gerilmesine karşı koyacak malzeme bağlayıcı olarak kullanılan harç ve kâgir birim ile harç yüzeyi arasındaki bölgedir. Yapıda oluşacak kayma gerilmesi harcın karşılayabileceğinden fazla olursa yapının duvarlarında çatlamlar oluşur (Arıcan,2010).

Döşeme üzerine gelen sabit ve hareketli yüklerin taşıyıcı duvarlara daha düzgün ve güvenli şekilde aktarılması için diğer yığma sistemlerinde de olduğu gibi donatısız yığma yapılarda duvarların üzerine yatay hatıllar yapılmaktadır. Yapılan bu yatay hatılların esas görevi düşey yükleri taşımaktan öte bu yükleri duvara aktarmaktır. Bu çerçevede genelde moment

taşıma kapasitelerinin çok düşük olmasından ötürü hesaplamalarda bu hatıllar dikkate alınmazlar (Ural, 2009).

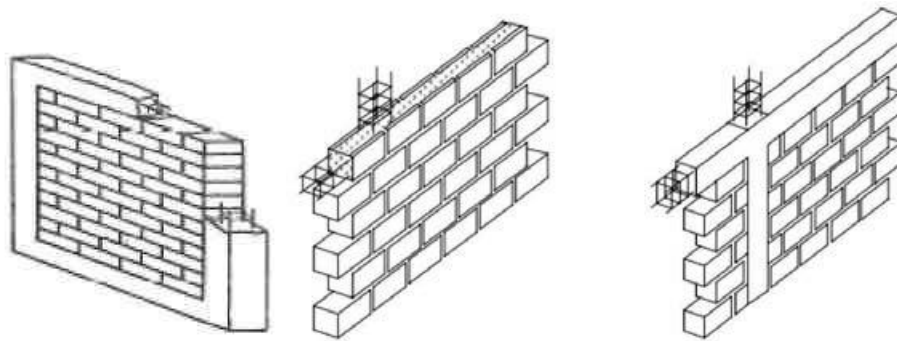
Donatılı yığma yapı; TS EN 1996-1-1+A1 (2005)'de donatı çubukları ve hasırların yığma yapıda kullanılan harç veya beton içerisine konulduğu ve böylelikle bütün malzemelerin etki tesirlerine direnç göstermede beraber hareket ettiği kâgir yapı olarak tanımlanmaktadır. Donatısız yığma yapılarda düşey kuvvetleri güvenle taşıyan duvarlar, yatay yükler altında oluşan kesme kuvvetlerini taşıyamaz Bu taşıyıcı duvarlara donatı çubukları ve hasırların eklenmesiyle donatılı yığma yapı meydana gelmiştir. Donatılı yığma yapılarda değişik uygulamalar söz konusudur. Bu uygulamalardan biri boşluklu taşıyıcı tuğlaların içine donatı yerleştirildikten sonra kalan boşlukların beton veya dolgu malzemesiyle doldurulmasıdır. Bir diğer uygulama ise iki sıra tuğla arasına yatay olarak konulan donatıların duvarların köşe ve birleşim yerlerinde oluşturulan düşey hatıllarla birleştirilmesi uygulamasıdır. Çift sıra tuğla duvar aralarında boşluk bırakarak örülmesi ve bu boşluklara yatay ve düşey hatıllar konularak daha sonra beton veya dolgu malzemesi ile doldurulması bir diğer yöntemdir (Arıcan,2010). Şekil 2.1.'de bazı donatılı yığma duvar örülme örnekleri görülmektedir.

Kesme kuvvetleri altında düşünüldüğünde donatılı yığma yapıların donatısız yığma yapılara göre deprem dayanımı daha yüksektir çünkü donatılı yığma yapılarda yatay kuvvetler donatılarla karşılanır. Donatılı yığma yapılarda da boşlukları doldurulmuş yapıların dayanımı doldurulmamışlara göre daha fazladır, fakat donatılı yığma yapılarda kullanılan duvar malzemeleri donatıların yerleştirilebilmesi amacıyla özel olarak yapıldığından maliyetleri donatısız yığma yapılara nazaran daha yüksektir (Bayülke,1992).



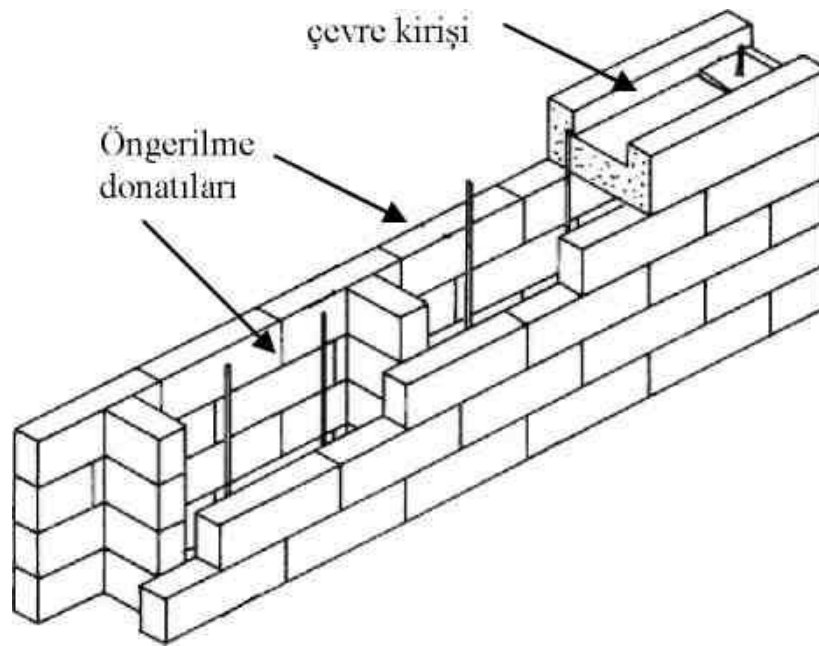
Şekil 2.1. Çeşitli donatılı yığma duvar örülme örnekleri (Tomažević, 1999)

Bir başka yığma yapı tipi olan sarılmış yığma yapılar, TS EN 1996-1-1+A1 (2005)' e göre düşey ve yatay doğrultuda betonarme veya donatılı kâgir sargı elemanları ile düzenlenen kâgir yapılar olarak tanımlanmaktadır. Yani sarılmış yığma yapılar, taşıyıcı duvarların deprem performansını artırmak için donatılı veya donatısız şekilde tanzim edilen yığma duvarları yatayda ve düşeyde çepeçevre saran betonarme veya donatılı sargı elemanları yani hatıllarla düzenlenen yığma yapı tipidir. (Şekil 2.2.) Yatay ve düşey hatılların asıl işlevi betonarme bir kolon veya kiriş gibi davranmak değil, yığma duvar elemanları arasındaki bütünlüğü koruyarak oluşabilecek çatlakların büyümelerine engel olmaktır. (Ural, 2009) Ayrıca taşıyıcı duvarların rijitliğini arttırmak ve döşemeden gelen yükleri duvarlara daha düzgün bir biçimde yayılmasını sağlamaya da yararlar (Arıcan,2010).



Şekil 2.2. Sarılmış yığma yapılar (Bayülke,1992)

Bir diğerk yığma yapı tipi olan öngerilmeli yığma yapılar, iç basınç gerilmelerinin bilerek öngermeli donatıdan oluşturulduğu yığma yapı tipidir. (TS EN 1996-1-1+A1, 2005) Ülkemizde çok fazla kullanılmayan öngerilmeli yığma yapılarda taşıyıcı duvarların eğilme, kesme ve çatlama dayanımlarını sağlanmak amacıyla, çift sıra halinde teşkil edilen taşıyıcı duvarlarda iki sıra arasında bırakılan boşluklara öngermeli donatılar yerleştirilmekte ve çimento harcıyla doldurulan ara boşluk vasıtasıyla öngerilme duvara iletilmektedir (Ural, 2009) (Şekil 2.3.).



Şekil 2.3. Öngerilmeli yığma yapılar (Arıcan,2010)

2.2. Yığma Duvarlarda Kullanılan Malzemeler

Yığma yapının en önemli yapısal elemanı olan yığma duvarlar, belirli büyüklükteki kerpiç, tuğla, taş ya da beton blokların harçla veya harçsız birleştirilmesiyle elde edilmiş, bir bütün olarak davranan elemanlardır. Aslında betonu oluşturan, çimento ve agrega da aynı özelliktedir. Fakat yığma yapıyı oluşturan bloklara göre betonun içinde bulunan agreganın boyutları çok daha küçüktür. Bu çerçevede beton homojen bir malzeme olarak görülebilirken, yığma yapıyı oluşturan blokların boyutunun, yığma yapı elemanın kesit boyutuna göre oranı daha büyük olmasından her hangi bir homojenlikten bahsetmek çok zordur. Ayrıca yığma duvar elemanını oluşturan bloklar ve bağlayıcı eleman olan harç çoğunlukla birbirinden oldukça farklı malzeme özelliklerine sahiptir (Kuruşcu, 2012).

Bilinen en eski zamanlardan günümüze, doğada bulunan taş şekiller verilerek bir araya getirilip örülerek yapılar oluşturulmuştur. Yığma yapılarda kerpiç, doğal taş, tuğla gibi çeşitli türlerde malzeme kullanılmış ve kullanılmaktadır. Bu elemanların bir araya getirilerek bir bağlayıcı malzeme kullanılarak birleştirilmesi sonucu meydana gelen yapıda, kâgir elemanların özellikleri, bağlayıcı malzemenin özellikleri ve kâgir elemanların bağlayıcı harç ile birlikte davranışı incelenmeli, yığma yapının davranışı tüm bu etkenler göz önüne alınarak bir değerlendirme yapılmalıdır (Erköseoğlu, 2012).

Bu çerçevede yığma duvarları oluşturan elemanların tek tek değerlendirilmesi gereklidir.

2.2.1. Doğal taş malzeme

Doğal taşın hemen hemen her yerde ve her türlü arazi koşullarında kolaylıkla bulunabilmesinden ötürü tarih boyunca yapılarda yaygın olarak kullanılmıştır. Taş bilinen en eski yapı malzemesidir ve kalıcı olması düşünülen yapıların inşaatlarında özellikle tercih edilmiştir. Doğal taşların hemen hepsinin ortak özelliği basınç dayanımlarının çok yüksek olması ve çekme dayanımlarının ise çok düşük olmasıdır. Basınç dayanımının yüksekliğinin bir sonucu olarak, yalnız basınç kuvveti alan kemerler, tonozlar ve kubbelerde çok kullanışlı olmuşlardır. Basınç yüklerini alan duvarlar ve ayaklar da taş malzemelerden yapılmıştır. Bazı taşların basınç altında deformasyonu betonun deformasyonuna yakın ve hatta daha azdır (Erköseoğlu, 2012). Tarih boyunca yapılarda genellikle kullanılan yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Doğal Yapı Taşlarının Ortalama Fiziksel Özellikleri (Ünay, 2002)

TAŞIN CİNSİ	BASINÇ DAYANIMI	KAYMA DAYANIMI	ÇEKME DAYANIMI	ELASTİSİTE MODÜLÜ
	<i>Mpa</i>	<i>Mpa</i>	<i>Mpa</i>	<i>Mpa</i>
GRANİT	30-70	14-33	4-7	30000-55000
MERMER	25-65	9-45	1-15	25000-70000
KİREÇ TAŞI	18-35	6-20	2-6	10000-55000
KUMTAŞI	5-30	2-10	2-4	13000-50000
KUVARS	10-30	3-10	3-4	15000-55000
SERPANTİN	7-30	2-10	6-11	23000-45000

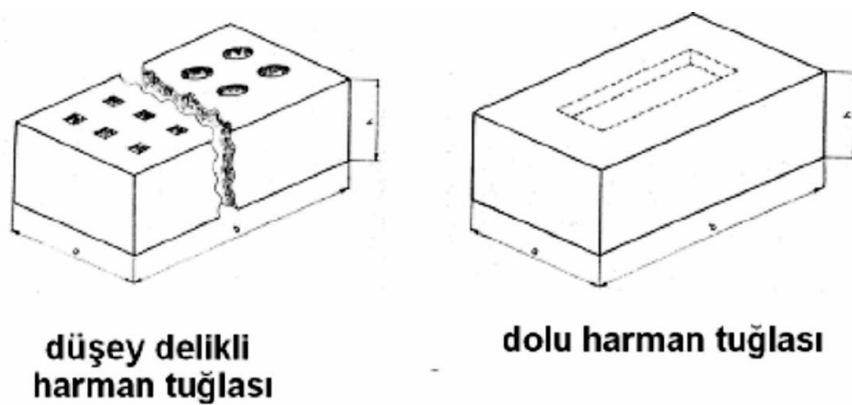
2.2.2. Pişmiş toprak (kil) tuğla malzeme

Tuğlanın tarihi çok eskilere dayanmaktadır. Tuğla, killi toprak ve balçığın, kaolin veya benzer malzemeler içeren toprağın karıştırılıp, içine kum, öğütülmüş tuğla veya kiremit tozu, kül veya benzeri katkı maddeleri katılıp su ile hazırlanan hamurun kalıplara dökülerek fırınlarda pişirilmesi ve soğutulması ile elde edilen bir malzemedir (Kuruşcu, 2012).

Yığma duvarın yapımında kullanılan malzemenin kalitesi, duvar örülmesinde kullanılan harç ve tuğlanın örülme düzeni; duvarın dayanımını belirler. Tuğlaların basınç dayanımı malzeme özelliklerine bağlı olarak 10 MPa'dan 30 MPa'a kadar değişir. İyi fırınlanmış tuğla, iyi fırınlanmamış tuğlaya göre üç kat daha fazla dayanıma sahip olur. Genel olarak tuğlanın çekme dayanımı basınç dayanımının %10'u, kayma dayanımı ise basınç dayanımının %30'u kadardır (Ünay, 2002).

Ülkemizde yapı tuğlaları, hem boyut, hem de teknik özellikleri (basınç dayanımları, yoğunluk, su ve nem dayanımı, vb.) ile TS 704 (harman tuğlası için) ve TS 705 (fabrika tuğlası için) no'lu standartlar ile tanımlanmıştır. Bu çerçevede yapı tuğlaları harman tuğlası ve fabrika tuğlası olmak üzere ikiye ayrılabilir.

Harman tuğlası kil, killi toprak ve balçığın ayrı ayrı veya birlikte yoğrulup gerektiğinde su, kum, öğütülmüş tuğla ve kiremit tozu ve benzerleri ile karıştırılarak şekillendirildikten sonra kurutulup genellikle harman yerinde ocaklarda pişirilmesi yolu ile elde edilen ve duvar yapımında kullanılan bir malzemedir (TS704, 1979).



Şekil 2.4. Harman tuğlası (TS 704, 1979)

Harman tuğlaları çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir.

Basınç dayanımlarına göre harman tuğlaları;

- Orta dayanımlı harman tuğlası
- Az dayanımlı harman tuğlası olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir.
Biçimlerine göre harman tuğlaları;
- Dolu Harman Tuğlası (DOHT)
- Delikli Harman Tuğlası (DEHT) olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir (Kuruşcu, 2012).

Çizelge 2.2. Harman tuğlası sınıfları (TS 704, 1979)

SINIFLAR		Tuğlanın Sembolü	Ortalama Hacim Ağırlığı (max) kg/dm ³	Ortalama Basınç Dayanımı (min) MPa	Basınç Dayanımı (min) MPa
Dolu Harman Tuğlası	Orta Dayanımlı	DOHT/50	Sınırlanmamıştır	5	4
	Az Dayanımlı	DOHT/30	Sınırlanmamıştır	3	2,5
Delikli Harman Tuğlası	Orta Dayanımlı	DEHT/50	1,40	5	4
	Az Dayanımlı	DEHT/30	1,40	3	2,5

Çizelge 2.3. Harman tuğlası boyutları (TS 704, 1979)

Boyutlar (mm)		Toleranslar (mm)
Uzunluk	190	+6
		-13
Genişlik	90	+4
		-5
Yükseklik	50	+3
		-2

Fabrika tuğlası ise, tuğla hamuru makinelerde biçimlendirildikten ve genellikle yapay yöntemlerle kurutulduktan sonra, fabrika fırınlarında pişirilmesi sonucunda elde edilir. TS 705 (1985)'e göre fabrika tuğlalarının birim hacim ağırlık ve basınç dayanımları Çizelge 2.4.'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Fabrika tuğlası birim hacim ağırlık ve basınç dayanımları (TS 705, 1985)

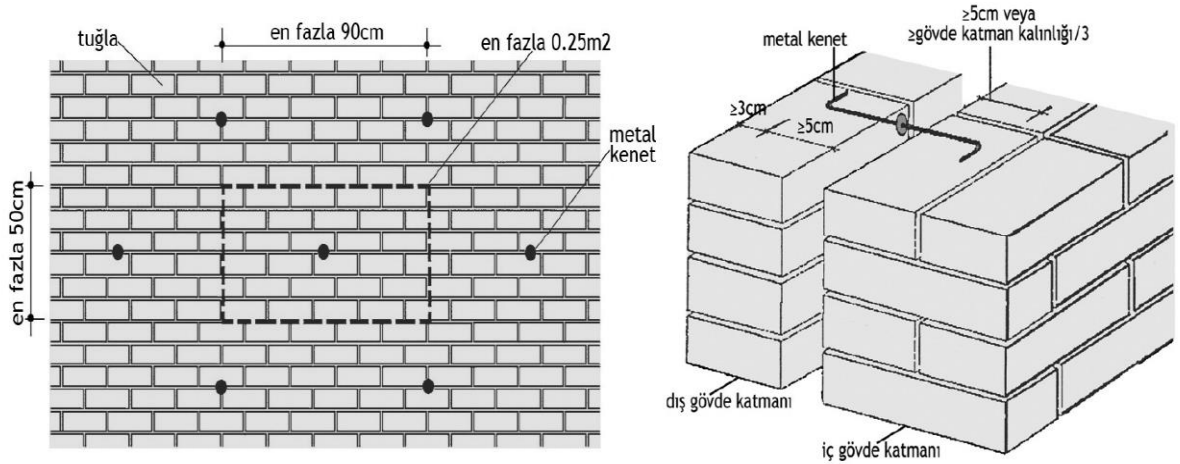
Tuğla Sınıfı	Tipi	Tuğla Sembolleri	Basınç Dayanımı		Hacim Ağırlığı (kg/m ³)		Delik Oranı (%)
			Aritmetik Ortalama (MPa)	En Küçük Değer (MPa)			
			Max.	Min.			
Dolu Tuğla	2000 kg/m ³	2,0/240	24	19	2000	1801	15
		2,0/180	18	14,5			
		2,0/120	12	9,5			
	1800 kg/m ³	1,8/220	22	17,5	1800	1601	
		1,8/150	15	12			
		1,8/100	10	8			
Seyrek Delikli Tuğla	1600 kg/m ³	1,6/220	22	17,5	1600	1401	20
		1,6/150	15	12			
		1,6/100	10	8			
	1400 kg/m ³	1,4/200	20	16	1400	1201	25
		1,4/120	12	9,5			
		1,4/80	8	6,5			
Az Delikli Tuğla	1200 kg/m ³	1,2/150	15	12	1200	1001	35
		1,2/100	10	8			
		1,2/60	6	4,5			

Taşıyıcı fabrika tuğlasının en çok % 35 düşey delikli olması gerekmektedir, fakat bu boyutta ve az delikli tuğla pişirilmeden önce kontrollü bir biçimde ve özel fırınlarda kurutulmalıdır. Aksi takdirde tuğla et kalınlığının daha çok olması nedeni ile pişme sırasında çatlaklar ve kırılmalar meydana gelmektedir (Bayülke, 2011).

Delikli fabrika tuğlalarının basınç dayanımını deliklerin oranı kadar delik yer ve şekilleri de belirler. Delik oranı aynı fakat daha çok sayıda küçük deliklerden oluşan bir tuğlanın basınç dayanımı daha fazladır. Bunun sebebi küçük delikli tuğlalarda boşlukları çevreleyen dolu kesitlerin burkulma boylarının daha küçük olmasıdır (Kuruşcu, 2012).

Fabrika tuğlası ve harman tuğlası dışında pres tuğla ve klinker tuğlası da tuğla çeşitleri arasında sayılabilir.

Ayrıca tuğla duvarlar, tek gövde katmanından meydana gelebildiği gibi, iki gövde katmanı şeklinde de örülebilmektedir. Dış duvarlarda daha iyi ısı, ses ve nem yalıtımı sağlamak amacıyla, iki gövde katmanlı duvarlar yapılmaktadır (Gür vd., 2012).



Şekil 2.5. İki gövde katmanlı tuğla duvar (Gür vd., 2012)

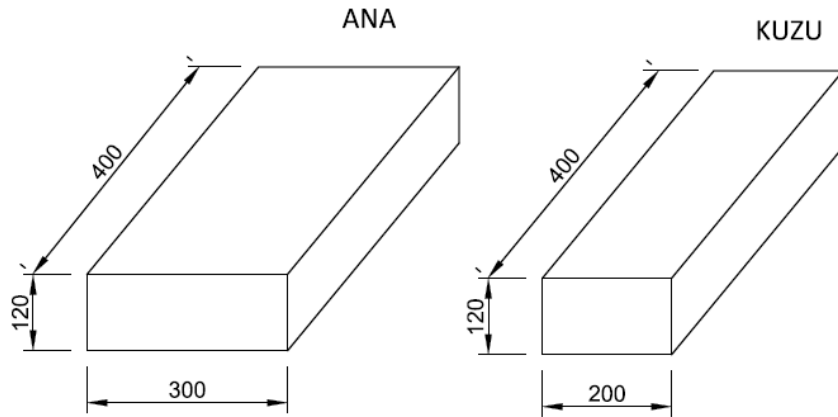
İki gövde katmanlı duvarlarda gövde katmanlarının birbirine bağlantılarını güçlendirmek ve rijitliği artırmak amacıyla, arada kalan boşluğa harç veya beton doldurulabilir. Ayrıca harç dolgulu, iki gövde katmanlı tuğla duvarlarda özellikle yatay kuvvetlere karşı daha yüksek dayanım sağlamak amacıyla dolgu harcının içine çelik donatı çubukları yerleştirilerek duvar kesme kuvvetlerine karşı da güçlendirilmiş olabilmektedir (Gür vd., 2012).

2.2.3. Kerpiç

Kerpiç belki insanlık tarihi kadar eski bir yapı malzemesidir. Kerpiç çok yüksek kil oranına sahip toprağın suyla karıştırılıp içine saman çöpü vb. malzemeler atılarak kalıplara dökülmesi, önce gölgede daha sonra güneşte kurutulması sonucu oluşturulan çiğ tuğladır. Kerpiciin basınç dayanımı tuğla kadar yüksek değildir ve suya karşı dayanıksızdır. Çizelge 2.5. ve Şekil 2.6.'da görülebileceği gibi kerpiç bloklar boyutlarına göre, ana ve kuzu olmak üzere ikiye ayrılır (TS 2515, 1985).

Çizelge 2.5. Kerpiç boyutları ve sınıflandırılması (TS 2515, 1985)

Sınıf	Boyutlar (cm)	Hacim (dm ³)	Yaklaşık Ağırlık (kg)
I	12x19x40	9,12	10-12 (Kuzu)
II	12x30x40	14,40	15-25 (Ana)
III	12x18x30	6,48	7-11 (Kuzu)
IV	12x25x30	9,00	10-15 (Ana)



Şekil 2.6. Kerpiç boyutları (TS 2515, 1985)

2.2.4. Harç

Yığma duvarlarda bloklar kadar önemli bir diğer malzeme de harçtır. Blokların cinsi ne olursa olsun birbirine bağlamada kullanılan bağlayıcı özellikteki harç yığma duvarın dayanımı üzerinde çok önemli bir role sahiptir. Yığma duvarlarda harcın basınç dayanımından öte çekme dayanımı, kayma dayanımı ve bloklar ile arasındaki aderansı çok önemlidir. Bunun sebebi yığma duvarlardaki kesme kırılmalarının büyük çoğunluğu blok ve harç arasındaki aderansın yok olması ile gerçekleşmektedir.

Yığma yapı elemanlarında temelde, çekme birleşim dayanımı ve kayma birleşim dayanımı olmak üzere iki çeşit birleşim dayanımı mevcuttur. Çekme dayanımı, blok ile harcın birleşim noktasına dik yönde oluşan çekme kuvvetlerine, kayma dayanımı ise bu noktalara paralel oluşan kuvvetlere karşı çalışır (Kuruşçu, 2012).

Harç ile bloklar arasındaki birleşim dayanımını etkileyen faktörler şöyle sıralanabilir:

- Bağlayıcı malzemenin miktarı birleşim dayanımını artırır.
- Harç karışımındaki su oranı harcın kolay işlenmesini sağlar fakat birleşim dayanımını düşürür (Kuruşçu, 2012).

Harç elemanın özellikleri bakımından Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)'de yığma duvarlarda kullanılan harç sınıfına ve duvar malzemesinin TS-2510'da verilen ortalama serbest basınç dayanımına bağlı olarak, duvar emniyet gerilmelerinin aşağıdaki tablodan alınabileceği söylenmektedir. Yönetmelikte harçlar basınç dayanımlarına göre A, B, C, D, ve E sınıfı olmak üzere beş gruba ayrılmıştır (Çizelge 2.6.).

Çizelge 2.6. Yığma Duvar Emniyet Gerilmeleri (DBYBHY, 2007)

Duvar Malzemesi Ortalama Serbest Basınç Dayanımı (MPa)	Duvarda Kullanılan Harç Sınıfı (MPa)				
	A (15)	B (11)	C (5)	D (2)	E (0.5)
25	1.8	1.4	1.2	1.0	0.8
16	1.4	1.2	1.0	0.8	0.7
11	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
7	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5
5	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)'de belirtilen bu değerlerin harçlarla ilgili kısmı için TS-2510 (1977)'a bakılırsa harç sınıfları, içerikleri ve basınç dayanımları orada da Çizelge 2.7.'deki gibidir. Duvar harcı karışımlarında, harç grubuna göre gerekli agrega ve bağlayıcı miktarları hacim olarak çizelge 2.7.'de verilen değerlere uygun olmalıdır. Harcın kullanılacağı yere ve koşullara uygun kıvamda olabilmesi için uygun miktarda su katılmalıdır. Özel hal ve gerekler dışında yerleştirildiği derzden akıp giderek derzi kısmen boş bırakacak kadar akıcı olmayan ve işlenebilmesi de zor olmayacak kadar plastik bir kıvam için gerekli su miktarı ayarlanmalıdır (Kuruşcu, 2012).

Çizelge 2.7. Harç Sınıfları (Hacimsel) (TS-2510, 1977)

Harç Grubu		Kum	Çimento	Harç Çim.	Kireç	Toz Kireç	Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)
A	-	3	1	-	-	-	150
B	1	4	1	-	-	-	110
	2	4	1	1/2	-	-	
	3	4	1	-	-	½	
	4	4	1	-	-	1	
C	1	7-9	1	2	-	-	50
	2	5	1	-	-	-	
	3	5	1	-	1	-	
D	1	6-8	1	-	2	-	20
	2	6-8	1	-	-	3	
	3	2-3	-	1	-	-	
E	-	3	-	-	1	-	5

2.3. Yığma Yapılarda Kullanılan Modelleme Teknikleri

Yığma yapı sistemleri, ülkemizde halen en çok kullanılan yapı grubudur. Ülkemizde geçmişte yapılan yığma yapıların mühendislik olarak hesapları genelde ya hiç yapılmamış ya da çok kabaca yapılmıştır. Devlet İstatistik Enstitü'nün 2000 yılında yapmış olduğu bina sayımına göre (DİE, 2000) ülkemizde 4.001.954 adet yığma bina bulunmaktadır. Geçmişte ampirik kurallara bağlı, büyük bir kısmı tecrübeye dayanan bir çizgiye sahip olan yığma yapı tasarımı, sonraki dönemlerde matematik temellere oturtulmuş ve yöntemleri büyük oranda muntazam bir hale gelmiştir (Dabanlı, 2008, Ural, 2009).

Teknolojinin ve özellikle bilgisayar teknolojisinin son yıllardaki gelişmesiyle yığma yapıların sayısal modellerle incelenmesinde önemli gelişmeler olmuştur. Bu çerçevede yığma yapıların analizinde detaylı modelleme teknikleri, analizinde de farklı yaklaşımlar ve metotlar ortaya çıkmıştır. Gelişmelerin sonucunda ortaya çıkan en önemli gelişme hiç şüphesiz sonlu elemanlar metodudur.

Sonlu elemanlar metoduyla (Finite Element Method) betonarme yapıların modellenmesi çok başarılı sonuçlar verse de yığma yapıların modellenmesinde kullanılan eleman ve kabuller,

betonarme yapılar için kullanılanlardan oldukça farklıdır. Çünkü betonarme yapı olarak her ne kadar heterojen bir malzeme (en genel manada beton ve demir) olmasına rağmen, modelleme için yapılan geçerli kabullerle bir yapısal elemanı aynı çeşit sonlu elemanla geçmek mümkün olmaktadır. (Ural, 2009) Yığma yapılarda ise durum daha farklı hale gelmektedir. Sonlu elemanlar metodu uygulanarak yapılan yığma binaların yapısal çözümlemesinde taşıyıcı duvar elemanlarının modellenmesi son derece önemlidir. Doğrusal ve doğrusal olmayan çözümlemelerde kullanılabilen sonlu elemanlar yönteminde bilinmeyen sayısının fazla olması ve büyük boyutlardaki sistem rijitlik matrisi çözüm süresini artırmaktadır (Ural ve Doğançün, 2007). Bu problem için Lourenço (1996) homojenleştirme tekniğini önermiştir. Homojenleştirme ile kâgır birim ve harçtan oluşan duvar elemanı için tek bir malzeme özelliği elde edilebilmektedir. Yığma yapıların belki de en önemli yapısal elemanı olan duvarlarda taş, tuğla, gazbeton gibi yığma birimlerin ve çok değişik yapısal karakteristiklere sahip harcın kullanılıyor olması aynı çeşit sonlu elemanla modelleme yapmayı ve homojenleştirmeyi zorlaştırmaktadır. Bu sebeple kabule uygun ve gerçekten uzaklaşmayacak şekilde bir modelleme tekniği geliştirmek gerekliliği ortadadır. Böyle yapılmadığı durumda ise yığma birimlerin ve harcın ayrı ayrı modellenmesi yolu tercih edilebilir. Yığma birimlerin ve ara yüzey elemanlarının ayrı ayrı modellendiği bu durumda ise bilinmeyen sayısı oldukça fazla olmaktadır (Ural, 2009). Fakat yığma duvarın tam olarak aslını yansıtabilmesi için de en uygun yol böyle bir modelleme yoludur. Geçmişte yapılmış araştırmalara bakıldığında literatürde yığma yapıların modellenmesi ve analizinde sistemin büyüklüğüne göre temelde iki farklı modelleme tekniğinin kullanıldığı söylenebilir. Bu modeller;

I. Makro modelleme

II. Mikro modelleme

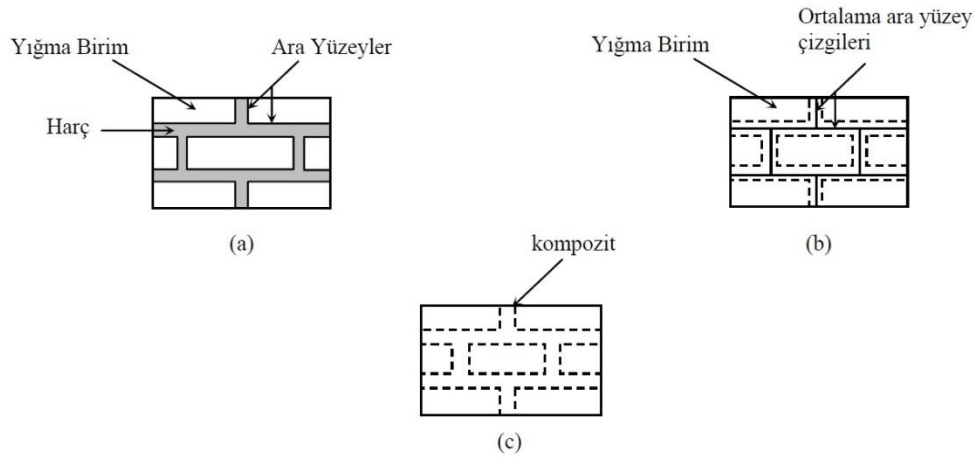
Kaynakların bazılarında da (Lourenço, 1996, Ural, 2009) modelleme teknikleri 3 gruba ayrılmıştır (Şekil 2.7.);

I. Makro Modelleme

II. Basitleştirilmiş mikro modelleme

III. Detaylı mikro modelleme

Mikro modelleme tekniğinde, yığma birimlerden taş veya tuğla ile bağlayıcı olarak kullanılan harç ayrı ayrı modellenir. Makro modellemede ise malzemeler ayrı ayrı değil, homojenleştirme çalışmaları ile genel bir ilişki içerisinde tek malzeme gibi modellenmektedir (Dabanlı, 2008).



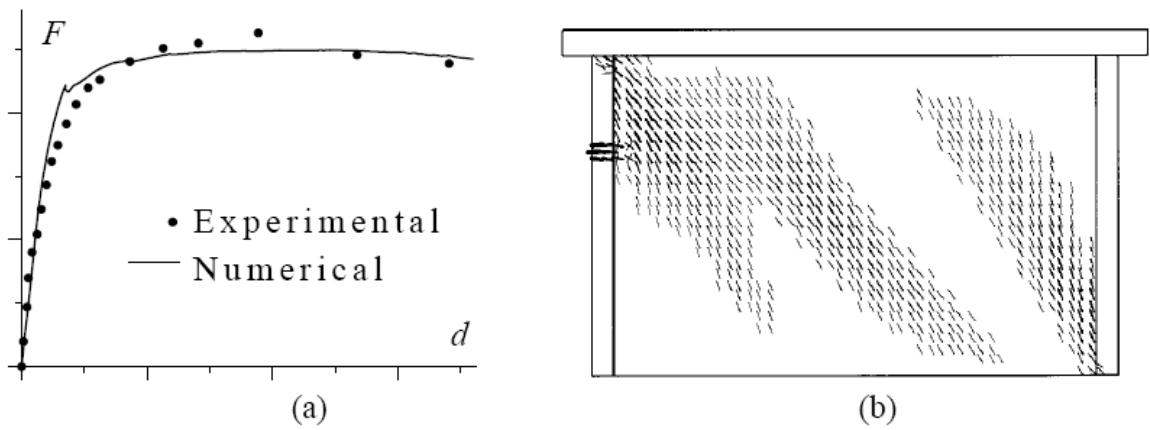
Şekil 2.7. Yığma duvar modellemeleri, a- Detaylı Mikro Modelleme, b- Basitleştirilmiş Mikro Modelleme, c- Makro Modelleme (Lourenço, 1996).

Bahsi geçen modelleme tekniklerden her biri farklı durumlar için tercih edilmektedir. Mikro modellemeler yığma duvarların detaylı incelenmesinde, kritik bölgelerin analizinde tercih edilirken, makro modellemeler karmaşık ve büyük sistemlerde, tüm yığma binanın analizinde tercih edilmektedir (Ural,2009).

2.3.1. Makro modelleme

Kâgir birimler ile harç arasındaki etkileşim yapı davranışını incelerken genellikle ihmal edilir. Bu biçimde gerçekleştirilen modelleme tekniğine makro modelleme adı verilir (Şekil 2.7.c). Makro modelleme tekniğinde incelenen yapı belli büyüklüklerde parçalara ayrılarak incelenir. Günümüzde yığma yapı modellemesinde makro elemanları kullanarak serbestlik derecesi ve hesaplama süresini kısaltan modeller geliştirilmektedir (Gallasco vd., 2004, Brencich ve Lagomarsino, 1998, Calì vd., 2012, Casolo ve Peña, 2007, Chen vd., 2008). Her bir makro eleman ya tamamen bir duvar ya da boşluklu duvarlarda duvar parçaları olabilmektedir (Şekil 1.2). Makro modelleme tekniğinde malzeme kompozit kabul edilir. Yapının veya elemanların küçük detayları için uygun bir model değildir. Bu yöntemde malzeme gerilmeleri için büyük ölçekli deneylerden elde edilen yığma gerilme değerleri kullanılır (Lourenço, 1998). Yöntem uygulanırken yığma yapı veya eleman homojen, izotrop veya anizotrop sürekli kabul edilir (Asteris ve Tzamtzis, 2003). Duvarı oluşturan kâgir birimler ve harç, duvarın farklı yerlerindeki farklı malzeme özelliklerinin ortalaması alınarak homojenize edilir (Kaya, 2010).

Şekil 2.8’de yığma bir duvara ait makro model analizi görülmektedir. Yapılan deney ile nümerik sonuçlar çok büyük benzerlik göstermiştir. Mikro model yöntemiyle ve ayırık elemanlar metoduyla yine aynı duvarın analiz edilmesinden benzer sonuçlar çıkmıştır. Uygun kabuller ve sınır şartları sağlanabildiği takdirde makro modelleme ile mikro modele göre daha kolay ve daha hızlı yeterli sonuçlara ulaşılabildiği görülmektedir (Dabanlı, 2008).



Şekil 2.8. Yığma Duvarın Makro Model Analizi a) Kuvvet-Yer değiştirme Diyagramı b) Nihai Yükte Deformasyon Şekli (Lourenço, 1996).

2.3.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme

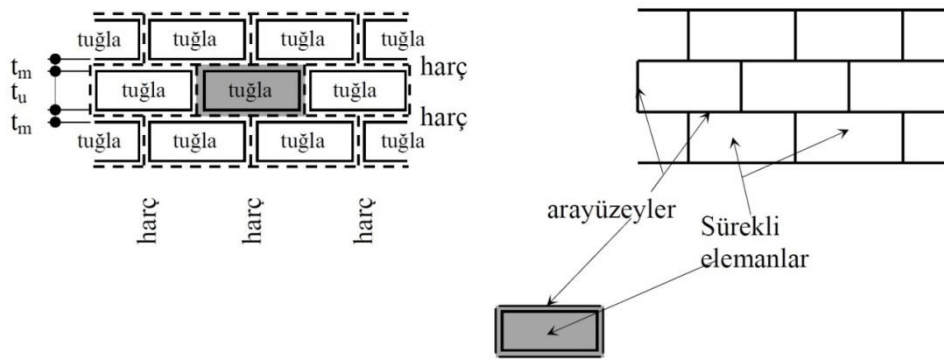
Modelleme tekniklerinden biri olan detaylı mikro modelleme tekniği aslında yığma duvarların gerçek davranışlarının modellenmesinde ve analizinde kullanılan en iyi tekniklerinden biri olsa da, günümüzdeki bilgisayar teknolojisinin durumu dikkate alındığında büyük sistemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılamadığı görülmektedir. Bundan dolayı çeşitli modelleme teknikleri geliştirilmiş, büyük yığma yapıların daha kısa sürede ve daha düşük kapasiteli bilgisayarlarda çözümü mümkün kılınmaya çalışılmıştır. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği de bu tekniklerden birisidir (Ural, 2009).

Basitleştirilmiş mikro modellemede, yığma birimlerin boyutları, Şekil 2.7.b’de görüldüğü gibi harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilmekte ve yığma birimler ortalama ara yüzey çizgileriyle birbirinden ayrılmaktadır (Ural ve Doğangün, 2009). Burada harcın Poisson oranı dikkate alınmadığından, bulgular detaylı mikro modellemeye göre biraz farklıdır (Lourenço, 1996).

Basitleştirilmiş mikro modellemede, olası göçme mekanizmalarının tamamının dikkate alınmaması önemli sorunlardan birisidir. Modellemede tanımlanacak olan ara yüzeylerde hem

çekme hem de kayma davranışlarının birlikte tanımlanması gerekmektedir. Bundan dolayı yapılan kabule göre; yığma duvarlarda meydana gelebilecek tüm çatlakların ve tüm hasarın ara yüzeylerde oluşacağı ve tuğlalarda meydana gelebilecek olan potansiyel çatlakların ise tuğlanın orta kısmında düşey olarak gerçekleşeceği kabul edilmektedir (Ural, 2009).

Basitleştirilmiş Mikro Modelleme tekniği şematik olarak aşağıda gösterilmektedir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme Tekniği (Ural, 2009).

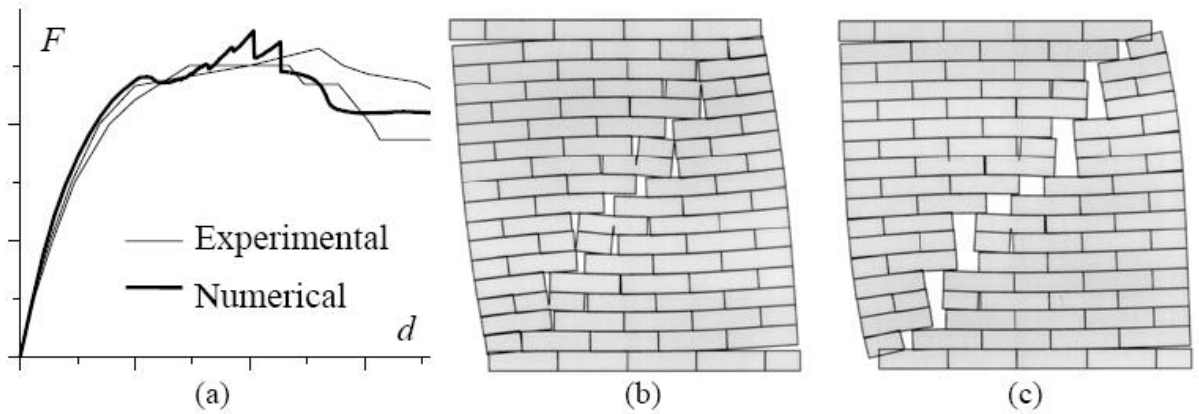
2.3.3. Detaylı mikro modelleme

Detaylı mikro modellemede yığma duvarı oluşturan yapı taşları olan tuğla ve harcın ayrı ayrı her birinin mekanik özellikleri yani Elastisite Modülleri, Poisson oranları ve elastik olmayan özellikleri hesaba katılmalıdır. Bu yaklaşımda yığma duvarda oluşacak çatlakların kâgir birim ve harcın arasındaki ara yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır (Ural ve Doğangün, 2007). Detaylı mikro modelleme tekniğinde kâgir birimler ile harç arasındaki ilişki çok iyi ve doğru bir şekilde tanımlanmalıdır (Ural, 2009).

Yığma yapılarda Şekil 2.7’de görünen ara yüzeyler yani derzler zayıflığın ön plana çıktığı düzlemlerdir. Doğru oluşturulması gereken bir modelde, kâgir birimlerden (tuğla veya taş) oluşan yığma birimlerle derzleri oluşturan harç ayrı ayrı modellenerek davranış farklılığı dikkate alınmalıdır. Ara yüzeyleri oluşturan harcın kâgir birimlere göre daha zayıf olması sebebiyle, derzlere yoğunlaşan bir model yaklaşımı olan mikro modelleme, daha ziyade küçük boyutlu yapılarda veya yapı elemanlarının ya da yapıların bir bölümünün detaylı incelenerek analiz edilmesinde kullanılan bir tekniktir. Mikro modelleme tekniğinde kâgir yapı birimleriyle harçların mekanik özellikleri net olarak bilinmelidir. Mikro modellemede, doğrusal olmayan

davranışların tamamı ara yüzlerde, oluşabilecek düşey kırılmalar da kâgir birimin tam ortasında olacak şekilde modellenebilir. Ardından bu yaklaşımda genellikle büyük bir hesap yüküyle yüz yüze gelinir. Bu özelliğinden dolayı mikro modelleme yerel analizler için yaygın olarak kullanılırken, büyük yığma yapıların tamamını değerlendiren çalışmalarda ise pek kullanılmamaktadır (Dabanlı, 2008).

Modellemelerin ardından analizler ve uygulamalar içinse sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method), ayrık elemanlar metodu (Discrete Element Method) ve limit analiz metodu (Limit Analysis Method) kullanılmaktadır. Ayrık eleman metodunda, yapı ayrı blokların birleşimi olarak kabul edilir. Yöntem büyük yer değiştirme (ara yüzler için) ve küçük şekil değiştirmeler (bloklar için) üzerine kuruludur. Her blok ayrı ayrı geometrik ve malzeme olarak modellendikten, hacim ve yüzey kuvvetleri tanımlandıktan sonra, zamana bağlı hareket denklemleri nümerik olarak çözülür (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Yığma Duvarın Mikro Modelleme Yöntemiyle Analizi a) Kuvvet-Deplasman Diyagramı b,c) Maksimum ve Nihai Yüklerdeki Deformasyonlar (Lourenço, 1996).

Mikro modelleme yönteminin bir avantajı olarak sonlu elemanlar metodu ile ayrık elemanlar metodu (FEM-DEM) beraber de kullanılabilir. Kâgir birimler sonlu elemanlar yöntemi ile modellenirken bağlayıcı harçlar ayrık elemanlar metodu ile modellenebilmektedir (Dabanlı, 2008).

Detaylı mikro modellemeye ilişkin çalışmalardan bazıları; Milani, vd. (2005-a) (2005-b), Pina ve Lourenço (2004), Zucchini ve Lourenço (2002) olarak gösterilebilir.

2.3.4. Yığma duvarların analiz yöntemleri

Yığma yapıların veya yapı elemanlarının modellenmesinin ardından uygulamaya dönük analizinin yapılması gerekmektedir. Analiz için kullanılan en temel metotlar ise sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method), ayrık elemanlar metodu (Discrete Element Method) ve limit analiz metodu (Limit Analysis Method)'dur.

Limit Analiz Metodunun en önemli özellikleri şöyle sıralanabilir;

- I. Rijit bloklar kullanılır.
- II. Blokların birbirinin içerisine girmesine izin verilmez.
- III. Optimizasyon sağlayan bir matematik yöntem kullanılır.

Hızlı analiz yapma imkânı ve tasarımda kullanılabilmesi en önemli avantajlarındanır. Çekme gerilmelerinin modele dâhil edilememesi ve sadece göçme yükü ve mekanizmanın tespit edilebilir olması da çok önemli dezavantajlarının arasında sayılabilir (Dabanlı, 2008).

Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi ayrık eleman metodunda, yapı ayrı blokların birleşimi olarak kabul edilir. Yöntem büyük yer değiştirme (ara yüzler için) ve küçük şekil değiştirmeler (bloklar için) üzerine kuruludur. Her blok ayrı ayrı geometrik ve malzeme olarak modellendikten, hacim ve yüzey kuvvetleri tanımlandıktan sonra, zamana bağlı hareket denklemleri nümerik olarak çözülür (Şekil 2.8).

Ayrık elemanlar metodunun ise en önemli özellikleri ise şunlardır;

- I. Rijit veya şekil değiştirebilen bloklar kullanılabilir.
- II. Yüzeyler ve köşe noktaları arasında bağlantı sağlanabilir.
- III. Elemanların birbiri içine girme imkânı vardır.
- IV. Dinamik problem (gerçek sönüm kat sayısı) veya statik problem (yüksek hayali sönüm kat sayısı) kullanılabilir.

Büyük deplasmanların yeterli bir yaklaşımla formüleleştirilebilmesi ve bağımsız hareket yapabilme yeteneği bu tekniğin avantajları arasındadır. Karşılıklı etkilerin doğru temsil edilebilmesi için fazla sayıda temas yüzeyine ihtiyaç duyulması ve üç boyutlu problemlerde çok fazla zamana ihtiyaç duyulması bu metodun dezavantajları arasında sayılabilir (Dabanlı, 2008).

Sonlu elemanlar metodu ise daha önce bahsedildiği gibi teknolojiye hızlı gelişmelerin ardından bilgisayarların hayatımıza girmesi ve işlem hızlarının artması sonucu ortaya çıkan en

önemli metotlardan biridir. Sonlu elemanlar metodu, çözülmesi istenen bir sistemi problemin karakterine göre sonlu elemanlara ayırarak, bu elemanlar üzerinde iç ve dış kuvvetlerin enerjisinin minimize edilmesi ve sonra bu elemanların tekrar birleştirilmesi şeklinde bir uygulamadır. Bu özelliği sayesinde sistemin özellikleri, mesnetlenme şartları, dış yüklerin durumu (sürekli ya da ani değişimleri) kolayca anlaşılabilir. Bu sebeplerden analitik metotlarla çözülmesi çok zor olan hatta çözülemeyen karışık problemlerin çözümü sonlu elemanlar metodu ile mümkün olmaktadır. Sistemin kritik bölgelerinde eleman boyutları istenilen boyuttaki parçalara ayrılarak kritik bölgenin daha detaylı hesapları yapılabilir (Ural, 2009).

Sonlu elemanlar metodunda sistem birçok elemana ayrılmakta ve eleman boyutları küçüldükçe problemin hata oranı azalmakta, fakat gereken çözüm süresi artmaktadır. Sistemin ayrıldığı her bir elemana *sonlu eleman*, birleştikleri köşe noktalarına da *düğüm noktaları* adı verilmektedir. Tüm düğüm noktalarının kendine ait bazı serbestlik dereceleri bulunmaktadır (Ural, 2009).

3. MATRİS DEPLASMAN METODU İLE İKİ BOYUTLU ÇUBUK SİSTEMLERİN ANALİZİ

Çubuk sistemler genel olarak çerçeve, kafes ve karma sistemler olarak üç kısma ayrılabilir. Çerçeve sistemler; çubukların, düğüm noktalarında birbirleriyle bağlanması sonucu oluşurlar. Buna ek olarak incelenen kafes ve karma sistemler de aslında çerçeve sistemlerin özel bir halidir. Çerçeve sistemler üzerinde yükler bulunan, düğüm noktalarına yükler etkileyen, yapı stabil olacak şekilde mafsallar kullanılabilen genel bir sistemdir. Çerçeve sistemlerde, çubuklar düğüm noktalarında birbirlerine mafsalla bağlanırsa ve yüklerde sadece düğüm noktalarından etki ederse böyle sistemlere kafes sistemler denir. Eğer bir sistem de hem çerçeve hem de kafes sistem bir arada bulunursa böyle sistemlere de karma sistemler denir.

Sistemlerin hesabının amacı dış etkilerden meydana gelen iç kuvvetlerin, deformasyonların ve deplasmanların belirlenmesidir. Hesabı yapılacak sistemler sonlu uzaklıktaki noktalarda birleşen elemanlardan meydana gelmektedir. Bu elemanların birleştiği noktalara düğüm noktaları denir. Her elemanın üzerinde bulunan düğüm noktalarındaki iç kuvvetlerin bileşenlerine uç kuvvetleri, deplasmanların bileşenlerine de uç deplasmanları denir. Hesap metodlarının amacı, sistemlerde dış etkilerden meydana gelen uç kuvvetleri ile uç deplasmanlarının belirlenmesidir. Çünkü bunlardan bütün iç kuvvetler ve deplasmanlar bulunarak sistemin hesabı tamamlanabilmektedir.

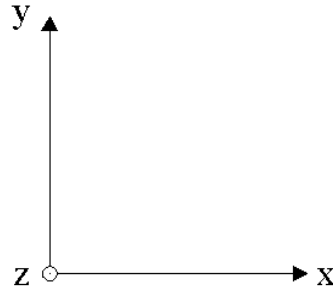
Deplasman metodunda düğüm noktası deplasmanları bilinmeyenler olarak seçilirler ve düğüm noktası denklemleri bu bilinmeyenler cinsinden yazılır. Deplasman metodunda ilk önce yapının denge denklemlerine ihtiyaç vardır. Denge denklemlerinin bulunması amacıyla yükleme-deplasman ilişkileri kullanılarak bağımsız çubuk ucu deplasmanları yükler cinsinden yazılır ve bu eşitliklerden deplasmanlar hesap edilir (Döven, 2004). Başlıca deplasman yöntemleri Açık Metodu, Cross Metodu, Sabit Noktalar Yöntemidir. Anılan bu yöntemler el ile statik çözümde kullanılan yöntemlerdir. Özellikle bilgisayarların kullanılmaya başlaması ile klasik yöntemlerle uzun hesaplamalar sonucu yapılan çözümler matris metodlar kullanılarak bilgisayarlarla kolayca ve hesap hatalarından arınmış olarak elde edilebilmektedir.

3.1. Eksen Takımları

Denge denklemlerinin oluşturulabilmesi için yapı sistemini ve elemanlarını eksen takımları ile tarif etmemiz gerekmektedir.

3.1.1. Global eksen takımı

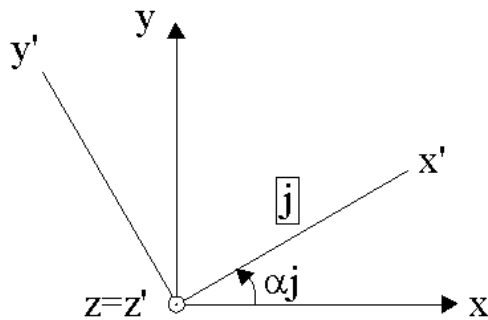
Sistemin geometrisini, her bir düğümün konumunu ve doğrultusunu belirlemek için, seçilen eksen takımına global eksen takımı denir. Düğüm deplasmanları ve sınır koşulları da bu eksen takımına göre belirlenir. Bu eksenler sağ el kuralına uymak zorundadır (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Global eksen takımı

3.1.2. Çubuk eksen takımı

Global eksen takımının, çubuğun referans açısı kadar pozitif yönde döndürülmesiyle çubuk eksen takımı oluşur. Her çubuk için ayrı ayrı tanımlanan ve çubuk doğrultusunun x eksenine ile çakışmasıyla oluşan eksen takımındır. x' , y' ve z' şeklinde ifade edilir. (') işareti mutlaka belirtilmelidir. Bu işaret çubuk eksen takımı ile global eksen takımını birbirinden ayırır. j indisi ise her zaman çubuk eksenini tanımlar (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Global eksen takımı (x, y, z) ve çubuk eksen takımı (x', y', z')

3.2. Dügüm Noktası

Çubuk elemanların uç noktalarına “dügüm noktası” adı verilir. Her çubuk iki adet dügüm noktasına bağlıdır ve bu noktalardan birisine “referans dügüm noktası”, diğerine ise “referans olmayan dügüm noktası” adı verilir (Döven, 2004). Referans dügüm noktası çubuk eksen takımının yerleştirildiği dügüm noktasıdır. Referans dügüm noktası, her zaman ‘i’ dügüm noktası olarak adlandırılır. Çubuğun diğer noktası ise ‘k’ olarak adlandırılır. Bir dügüm noktasında bir çubuk olabileceği gibi birden çok çubuk da bağlı olabilir, dolayısıyla böyle bir durumda o dügüm noktası bazı çubuklar için ‘i’ ucu iken diğer çubuklar için ‘k’ ucu olabilir.

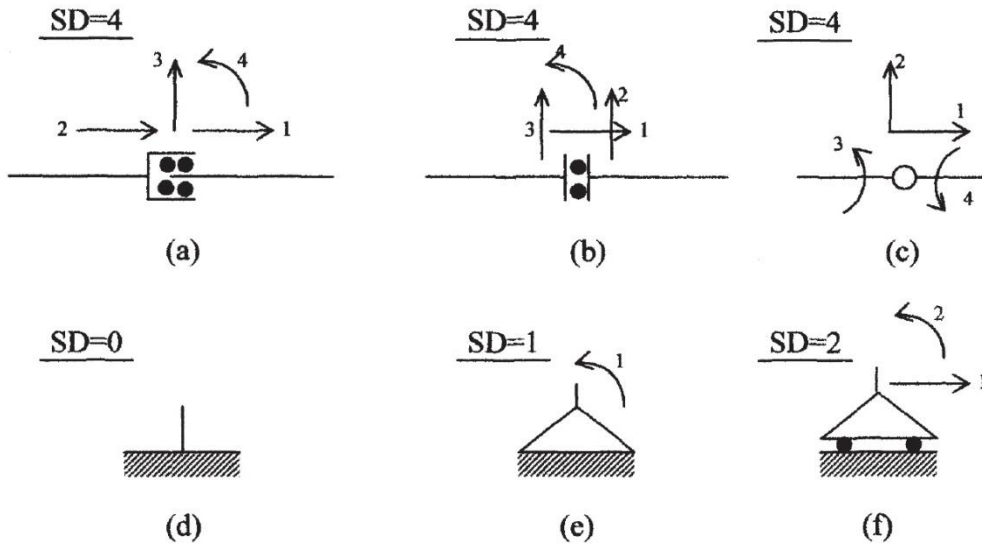
Çubukların referans dügüm noktaları ve referans olmayan dügüm noktaları çözümü yapan kişinin seçimine göre belirlenir. Programlama mantığı çerçevesinde bu seçimlerin sistematik olarak yapılması ilerleyen aşamalarda çok büyük önem kazanır.

Global eksen referans noktasına yerleştirilip, sağ el kuralına göre ‘+’ yönde çubuk ile ‘x’ eksenini çakışana kadar döndürülerek oluşturulan açıya referans açısı denir (Şekil 3.2. α_i açısı).

3.3. Serbestlikler

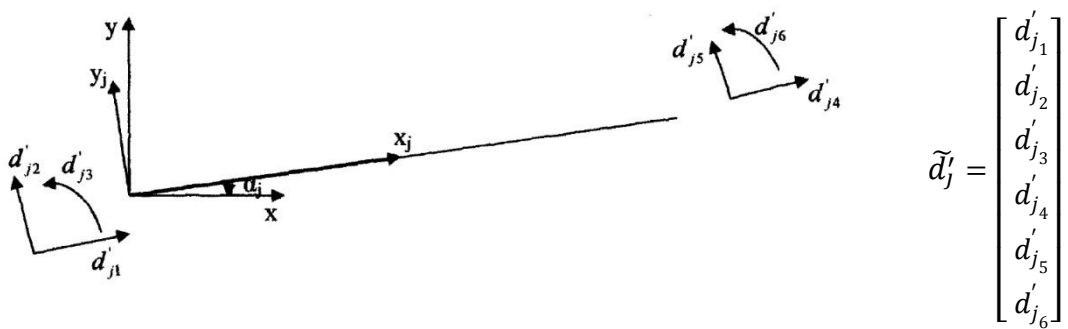
Dügüm noktalarının serbestliği, global eksen yönünde pozitif olmak üzere, x ve y eksenleri doğrultusundaki ötelenme ve z eksenini etrafındaki dönme yeterlilikleridir. Adı geçen deplasmanların meydana gelmesi engellenmemiş ise o yönde serbestliği var demektir. Sistemde bulunan her serbestliğe bir numara verilerek isimlendirilir ve tüm serbestliklerin toplamına da “serbestlik derecesi” denir.

Bir yapıdaki serbestlikler özel bazı şekillerle gösterilir. Bunlar yapı elemanlarının birleşim dügüm noktalarında olabilir veya bu elemanların mesnet bölgelerinde olabilir. Şekil 3.3.’de serbestliklerin grafik gösterimi sunulmuştur; burada (a) çubuk birleşimindeki iki çubuğun yatay hareket serbestliğini, (b) aynı birleşimde düşey hareket serbestliğini, (c) farklı dönme serbestliğini (mafsal), (d) serbestliği bulunmayan ankastre mesnet, (e) sadece dönme serbestliği bulunan sabit mesnet ve (f) dönme serbestliği ile beraber yatay hareket serbestliği bulunan kayar mesnet şekilleri gösterilmektedir (Döven, 2004).

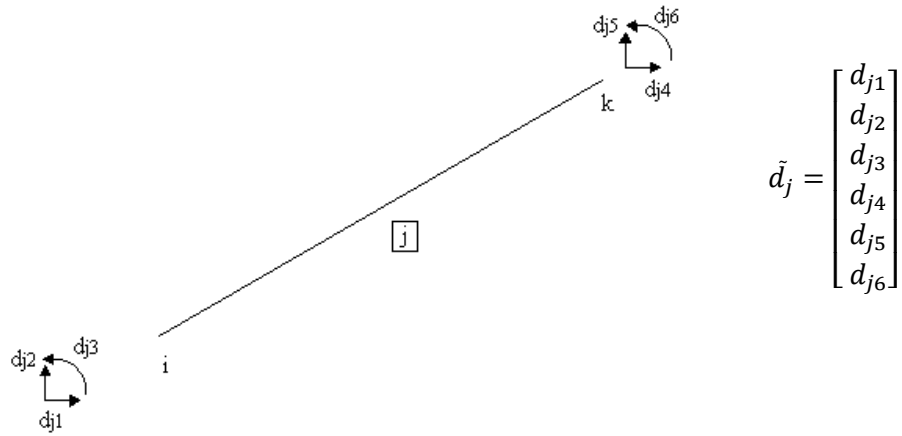


Şekil 3.3. Serbestliklerin grafik gösterimi (Döven, 2004)

Daha önce de bahsedildiği gibi her çubuk iki düğüm noktasına bağlıdır ve çubuklar bağlı oldukları düğüm noktasının serbestliğini almış olurlar. Fakat Şekil 3.3.a-b-c’de görüldüğü gibi aynı düğüm noktasına bağlı çubuk uçlarının birbirinden farklı serbestliklerinin olması durumunda, her çubuk ucu ortak serbestliklerin yanı sıra farklı olan serbestliklerden kendisine ait olan serbestlik numarasını alır. Her çubuk için referans olan ve olmayan düğüm noktaları serbestliklerinden oluşan çubuk ucu serbestlikleri vektörü $\tilde{d}_j$ oluşur. Global eksen takımına göre çubuk ucu deplasmanları $\tilde{d}_j$, çubuk eksen takımına göre çubuk ucu deplasmanlarını ifade eden $\tilde{d}_j'$ ile rotasyon matrisi (R_j) ’nin çarpılmasıyla bulunur (Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.).



Şekil 3.4. Çubuk eksen takımına göre çubuk ucu serbestlikleri



Şekil 3.5. Global eksen takımına göre çubuk ucu serbestlikleri

$$(R_j) = \begin{bmatrix} \cos \alpha_j & -\sin \alpha_j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha_j & \cos \alpha_j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_j & -\sin \alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \alpha_j & \cos \alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.4. Hiperstatiklik Derecesi

Çerçeve sistemlerde çubuklar, düğüm noktalarında birbirlerine rijit olarak bağlanmıştır. Bu nedenle her düğüm noktasının en fazla üç tane hareket serbestliği vardır. Buna karşılık kafes sistemlerde, çubuklar mafsallı olarak birbirine bağlı olup, her düğüm noktasının en fazla iki hareket serbestliği vardır.

Yapının iç kuvvetlerini (reaksiyonlar ve çubuk ucu kuvvetleri) hesaplamak için eksik denklem sayısına hiperstatiklik derecesi denir. İki boyutlu çerçevelerde her çubuk için, bağımsız çubuk ucu kuvveti sayısı 3'dür. Düğüm noktası denge denklem sayısı serbestlik derecesi kadardır. İki boyutlu çubuk sistemlerde hiperstatiklik derecesi ile serbestlik derecesi arasındaki ilişkiyi şu şekilde ifade edebiliriz:

Hiperstatiklik derecesine "hd", çubuk sayısına "cs", serbestlik derecesine de "sd" şeklinde adlandırılırsa;

Çubuk sistemlerde:

$$hd = 3 \times cs - sd$$

Kafes sistemlerde

$$hd = cs - sd$$

Karma sistemlerde:

$$hd = [3 \times (\text{Çerçeve } cs) + (\text{Kafes } cs)] - sd$$

Hiperstatiklik derecesi eğer sıfırdan küçük çıkarsa sistem oynaktır yani stabil değildir. Ama her oynak yapının hiperstatiklik derecesi sıfırdan küçük olmayabilir. Hiperstatiklik derecesi sıfır olan sistemler; denge denklemleriyle çözülebilen, statikçe belirli sistemlerdir. Hiperstatiklik derecesi sıfırdan büyük olan sistemler ise denge denklemleriyle çözülemeyen, statikçe belirsiz sistemlerdir.

Çeşitli yüklerin etkidiği bir sistemde, bütün mesnet tepkileri ve kesit tesirleri (iç kuvvetler) yalnız denge denklemleriyle bulunabiliyorsa sisteme izostatik (statikçe belirli) sistem denir. Eğer sistemin mesnet reaksiyonları ve kesit tesirleri sadece denge denklemleriyle bulunamıyorsa sisteme hiperstatik (statikçe belirsiz) sistem denir.

3.5. Düğüm Noktası Yükleri

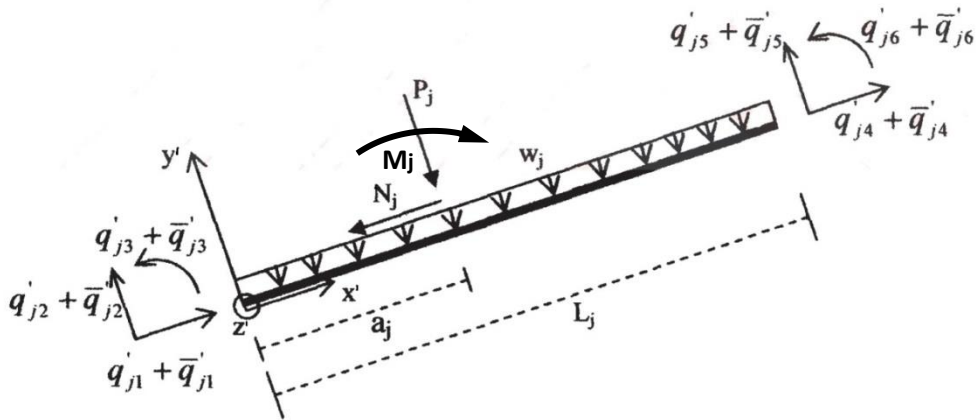
Düğüm noktası yükleri serbestlikleri deplasman yapmaya zorlayacak şekilde sisteme uygulanan kuvvetlerdir. Bu biçimde düğümlere uygulanan her kuvvet, çubuk içi gerilmelere neden olur (Döven, 2004).

Tüm serbestlik numaralarına ayrı ayrı karşılık gelen düğüm noktası yükleri düşünülür ve serbestlik derecesi kadar elemana sahip “Düğüm noktası yük vektörü” $\vec{P}$ oluşturulur, gelen kuvvetler serbestlik ile aynı yönde ise pozitif (+), ters yönde ise negatif (-) olarak işaret alır, yük olmayan serbestlik numaraları ise “0” değerini alır.

3.6. Çubuk Ucu Kuvvetleri

İki boyutlu çubuk sistemlerde yüklü herhangi bir j çubuğunun serbest cisim diyagramı Şekil 3.6.’deki gibidir. (Döven, 2004)

Şekil 3.6.’de görülen j çubuğunun çubuk ucu kuvvetleri $\vec{q}'_j$ ve $\vec{\tilde{q}}'_j$ vektörlerinin toplamı olarak gösterilmektedir. Burada $\vec{q}'_j$ çubuk eksen takımına göre çubuk ucu deformasyonlarından oluşan çubuk ucu kuvvetler vektörüken, $\vec{\tilde{q}}'_j$ vektörü çubuk yüklerinden kaynaklanan çubuk ucu kuvvetleri vektörüdür.



Şekil 3.6. j çubuğu serbest cisim diyagramı (Döven, 2004)

Şekil 3.6.'deki yüklenmiş bir çubuk için $\tilde{q}'_j$ çubuk yüklerinden kaynaklanan çubuk ucu kuvvetleri şöyle ifade edilebilir;

a_j : Çubuk üzerine etki eden P, N ve M kuvvetlerinin etkidikleri noktanın referans noktasına olan uzaklığı,

b_j : Çubuk üzerine etki eden P, N ve M kuvvetlerinin etkidikleri yerlerin referans olmayan noktaya uzaklığı,

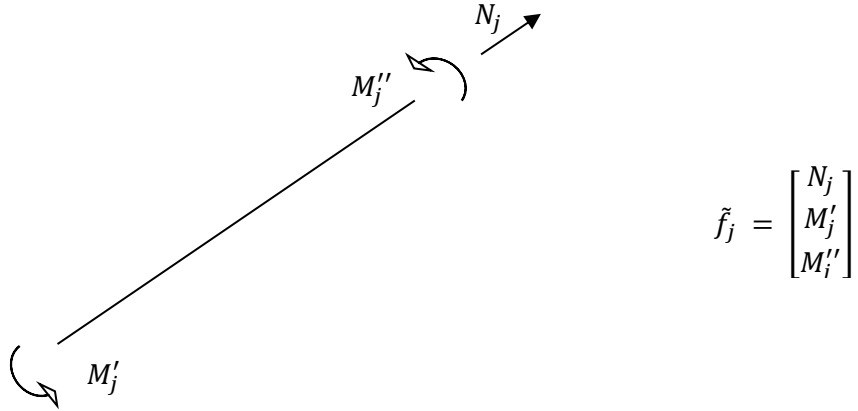
L_j : Çubuğun boyu olmak üzere;

$$\begin{aligned}
 \tilde{q}'_{j1} &= (b_j \times N_j) / L_j \\
 \tilde{q}'_{j2} &= [(w_j \times L_j) / 2] + [P_j \times b_j^2 \times (3 \times a_j + b_j) / L_j^3] - [6 \times M \times a_j \times b_j / L_j^3] \\
 \tilde{q}'_{j3} &= [(w_j \times L_j) / 12] + [(P_j \times a_j \times b_j^2 / L_j^2) + [M \times b_j \times (b_j - 2 \times a_j) / L_j^2]] \\
 \tilde{q}'_{j4} &= (a_j \times N_j) / L_j \\
 \tilde{q}'_{j5} &= [(w_j \times L_j) / 2] + [P_j \times a_j^2 \times (3 \times b_j + a_j) / L_j^3] + [6 \times M \times a_j \times b_j \times L_j^3] \\
 \tilde{q}'_{j6} &= [-(w_j \times L_j) / 12] - [(P_j \times b_j \times a_j^2 / L_j^2) + [M \times a_j \times (a_j - 2 \times b_j) / L_j^2]]
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

3.7. Bağımsız Çubuk Ucu Kuvvetleri

Çubuk eksen takımına göre yazılacak olan denge denklemleri ile çubuk ucu kuvvetlerinin bazıları diğer kuvvetler cinsinden yazılabilir. Çubuk ucu kuvvetlerin tamamının elde edilebileceği bu kuvvetlere bağımsız çubuk ucu kuvvetleri denir ve $\tilde{f}_j$ vektörü ile gösterilir.

$q'_{j_4}, q'_{j_3}, q'_{j_6}$ (N_j, M'_j, M''_j) çubuk ucu kuvvetleri bağımsız çubuk ucu kuvvetleri olarak seçilecek olursa (Şekil 3.7.) denge denklemleri yardımıyla aşağıdaki ifadeler elde edilebilir.



Şekil 3.7. Bağımsız çubuk ucu kuvvetleri ve vektör olarak gösterimi

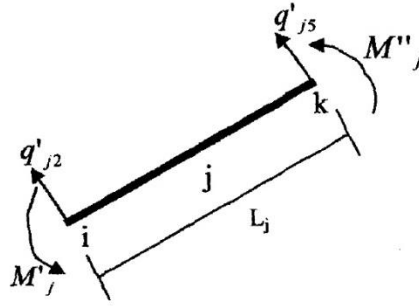
$$\sum F_x = 0 \Rightarrow q'_{j_1} + q'_{j_4} = 0$$

$$q'_{j_1} = -q'_{j_4} = -N_j \quad (3.2.)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow q'_{j_2} + q'_{j_5} = 0$$

$$q'_{j_2} = -q'_{j_5} \quad (3.3.)$$

Ele alınan çubuğun i veya k ucuna göre moment denge denklemleri de yazılırsa (Şekil 3.8.);



Şekil 3.8. Çubuk moment dengesi (Döven, 2004)

i ucuna göre moment dengesi;

$$\sum M_i = 0 \Rightarrow M'_j + M''_j + q'_{j5} \cdot L_j = 0$$

$$q'_{j5} = -\frac{1}{L_j} (M'_j + M''_j) \quad (3.4.)$$

Yukarıdaki tüm denge denklemleri düzenlenirse aşağıdaki denklemler elde edilir;

$$\begin{aligned} q'_{j1} &= -N_j \\ q'_{j2} &= \frac{1}{L_j} (M'_j + M''_j) \\ q'_{j3} &= M'_j \\ q'_{j4} &= N_j \\ q'_{j5} &= -\frac{1}{L_j} (M'_j + M''_j) \\ q'_{j6} &= M''_j \end{aligned} \quad (3.5.)$$

Elde edilen bu denklemleri matris formunda yazarsak;

$$\tilde{q}'_j = \underbrace{\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_j} & \frac{1}{L_j} \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{L_j} & \frac{-1}{L_j} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\bar{B}_j} \times \underbrace{\begin{bmatrix} N_j \\ M'_j \\ M''_j \end{bmatrix}}_{\tilde{f}_j}$$

$$\tilde{q}'_j = (\bar{B}_j) \tilde{f}_j \quad (3.6.)$$

3.8. Bağımsız Çubuk Deformasyonları

İki boyutlu bir sistemde herhangi bir j çubuğunun maruz kalabileceği deplasmanları inceleyecek olursak, temelde iki tip deplasman ortaya çıkar. Bunlardan ilki yer değiştirmelerden meydana gelen deplasmanlardır. Bu tip deplasman çubuğu oluşturan noktalarda göreceli yer değiştirme oluşturmaz, sadece çubuk elemanın uzayda yerleştiği koordinatlarda değişiklik meydana getirir. İkinci tip deplasman olarak çubuk üzerinde “Elastik Şekil Değiştirme” meydana gelebilir. Bu şekil değiştirmede rijit yer değiştirmeden farklı olarak çubuğun yapısında değişiklikler meydana getirerek kesit zorlarının oluşmasına sebep olmaktadır (Döven, 2004).

Herhangi bir j çubuğunun i düğümü d'_{j_1} , d'_{j_2} kadar pozitif yönde ötelenmiş ve d'_{j_3} kadar pozitif yönde dönmüş olsun, k düğümü de d'_{j_4} , d'_{j_5} kadar pozitif yönde ötelenmiş ve d'_{j_6} kadar pozitif yönde dönmüş olsun. Böylece başlangıçta referans düğüm olan i düğümü i' haline gelir ve referans olmayan k düğümü de k' düğümü olmuştur. i' , k' düğümleri arasında doğru eksenli biçimde çizilen ilk hali rijit yer değiştirmedir. Daha sonra elastik şekil değiştirme ile doğru eksenli olan j çubuğunun eğrilmiş eksenli görülmektedir. θ'_j ve θ''_j dönmelerine j çubuğunun bağımsız dönmeleridir. j çubuğunun boyu da Δ_j kadar uzamıştır. Bu Δ_j boy değişikliğine de j çubuğunun bağımsız boy değişikliğidir (Şekil 3.9.).

$$\begin{bmatrix} N_j \\ M_j' \\ M_j'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_j A_j}{L_j} & 0 & 0 \\ 0 & 4 \frac{E_j I_j}{L_j} & 2 \frac{E_j I_j}{L_j} \\ 0 & 2 \frac{E_j I_j}{L_j} & 4 \frac{E_j I_j}{L_j} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \Delta_j \\ Q_j' \\ Q_j'' \end{bmatrix} \quad (3.8.)$$

3.8. denklemine bakıldığında bağımsız çubuk ucu kuvvetlerini bağımsız çubuk deformasyonları cinsinden ifade eden bir katsayılar matrisi oluştuğu görülmektedir (K_j).

$$\tilde{f}_j = (K_j) \tilde{\beta}_j \quad (3.9)$$

$\tilde{\beta}_j$ bağımsız çubuk ucu deformasyonlarını çubuk ucu kuvvetleri cinsinden ifade etmek mümkündür. Şekil 3.9.'da görüldüğü gibi 3.10. ifadesine ulaşmak mümkündür.

$$\Delta_j = d'_{j_4} - d'_{j_1} \quad (3.10.)$$

Aynı şekilde yine Şekil 3.9.'dan görülebileceği gibi rölatif çökme ($-\delta_j$) 'de tarif edilebilir;

$$-\delta_j = d'_{j_5} - d'_{j_2} \quad (3.11.)$$

Şekil 3.9.'dan $\bar{\alpha}_j$ rijit dönmesi de tarif edilirse;

$$\bar{\alpha}_j = \tan \frac{-\delta_j}{L_j} \cong \frac{-\delta_j}{L_j} \quad (3.12.)$$

Referans olarak kabul edilen i ucunun dönmesi pozitif d'_{j_3} 'dür. Bu çerçevede aşağıdaki tarifler yapılabilir;

$$\theta_j' = d'_{j_3} - \bar{\alpha}_j = d'_{j_3} + \frac{\delta_j}{L_j} = d'_{j_3} + \frac{1}{L_j} (d'_{j_2} - d'_{j_5}) \quad (3.13.)$$

$$\theta_j'' = d'_{j_6} - \bar{\alpha}_j = d'_{j_6} + \frac{\delta_j}{L_j} = d'_{j_3} + \frac{1}{L_j} (d'_{j_2} - d'_{j_5}) \quad (3.14.)$$

Tüm bu ifadeler düzenlenerek matris formunda yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} \Delta_j \\ \theta_j' \\ \theta_j'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_j} & 1 & 0 & -\frac{1}{L_j} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_j} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_j} & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} d'_{j_1} \\ d'_{j_2} \\ d'_{j_3} \\ d'_{j_4} \\ d'_{j_5} \\ d'_{j_6} \end{bmatrix} \quad (3.15.)$$

3.15. ifadesinden görüldüğü gibi bağımsız çubuk deformasyonları ile bağımsız çubuk ucu deplasmanları arasındaki dönüşümü gerçekleştiren matrisin daha önce hesaplanmış olan $(\bar{B}_j)$ matrisinin transpozudur. Bu çerçevede 3.15. denklemi şu şekilde ifade edilebilir;

$$\tilde{\beta}_j = (\bar{B}_j^T) \tilde{d}_j' \quad (3.16)$$

3.9. Rijitlik (Stifnes) Matrisi

Daha önce çıkarılan denklemleri düzenleyerek sistemin rijitlik matrisine ulaşılabilir. Öncelikle çubuk eksenlerine göre tarif edilen $\tilde{d}_j'$ vektörü, global eksene göre tarif edilen $\tilde{d}_j$ vektörü cinsinden tarif edilirse;

$$\tilde{d}_j' = (R_j^T) \tilde{d}_j \quad (3.17)$$

(R_j^T) matrisi daha önce tarif edilen (R_j) rotasyon matrisinin transpozudur. Daha sonra 3.16'daki tarifte 3.17 yazılırsa;

$$\tilde{\beta}_j = (\bar{B}_j^T) \tilde{d}_j' = (\bar{B}_j^T) (R_j^T) \tilde{d}_j = (B_j^T) \tilde{d}_j \quad (3.18)$$

ifadesi elde edilir.

Yine rotasyon matrisini kullanarak global eksen takımına göre çubuk ucu kuvvetleri çubuk eksen takımına göre çubuk ucu kuvvetleri cinsinden yazılabilir;

$$\tilde{q}_j = (R_j) \tilde{q}_j' \quad (3.19)$$

Aynı şekilde yüklerden kaynaklanan çubuk ucu kuvvetleri için de aynı işlem yapıldığında;

$$\tilde{\tilde{q}}_j = (R_j) \tilde{\tilde{q}}_j' \quad (3.20)$$

3.19 ifadesindeki çubuk eksen takımına göre çubuk ucu kuvvetlerinin yerine 3.6 denklemi yazılırsa;

$$\begin{aligned} \tilde{q}_j &= (R_j) \tilde{q}_j' = (R_j) (\bar{B}_j) \tilde{f}_j \\ \tilde{q}_j &= (B_j) \tilde{f}_j \end{aligned} \quad (3.21)$$

ifadesine ulaşılır. Toplam çubuk ucu kuvvetleri için 3.20 ve 3.21 denklemleri toplanırsa;

$$(\tilde{q}_j + \tilde{\tilde{q}}_j) = (B_j) \tilde{f}_j + (R_j) \tilde{q}_j' \quad (3.22)$$

Sadece bir çubuk için çıkarılan bu ifadeler sistemde bulunan tüm çubuklar için toplama yöntemi ile yazılarak ve sistemin denge şartları göz önünde bulundurularak şu sonuca ulaşılır;

$$(B). \tilde{F} + \tilde{Q} = \tilde{P} \quad (3.23)$$

3.9.1. Toplama yöntemi

(B_j) matrisinin sistemdeki her bir çubuk için sistematik olarak nasıl oluşturulduğunu inceledikten sonra toplama yöntemiyle (B) matrisine de ulaşılabilir. Bunun için öncelikle sistemdeki her çubuk için (B_j) matrisleri oluşturulur. (B_j) matrisinin her birinin boyutu 6×3 'dür. (B) matrisinin boyutu ise sistemin serbestlik derecesine $3 \times$ sistemdeki çubuk sayısıdır.

$$(B_j) = \begin{array}{ccc|c} N_j & M_j' & M_j'' & \\ \hline & & & d_{j1} \\ \hline & & & d_{j2} \\ \hline & & & d_{j3} \\ \hline & & & d_{j4} \\ \hline & & & d_{j5} \\ \hline & & & d_{j6} \end{array}$$

Şekil 3.10. (B_j) Matrisi

Sistemdeki çubuk sayısını cs , serbestlik derecesini de sd olarak adlandırırsak (B) matrisini oluşturmak için her (B_j) matrisinin serbestlik numaralarının geldiği satır ve o çubuğa ait bağımsız çubuk ucu kuvvetinin bulunduğu sütunun kesişimine (B_j) matrisinin o elemanı taşınır.

	N_1	N_2	..	..	N_{cs}	M_1'	M_2'	..	..	M_{cs}'	M_1''	M_2''	..	..	M_{cs}''	
(B) =																1
																2
																3
																4
																.
																.
																.
																.
																.
																sd

Şekil 3.11. (B) Matrisi

Bu şekilde toplama yöntemi kullanılarak (B) matrisi oluşturulur. Aynı şekilde serbestlik numaralarına göre $\tilde{Q}$ vektörü de toplama yöntemiyle oluşturulur. Bu vektör serbestlik derecesi boyutundadır. $\tilde{P}$ vektörü de serbestlik numaralarına göre daha önce oluşturulmuştu. Böylece 3.23 denklemi oluşturulmuş olur.

3.9.2. Rijitlik matrisinin oluşturulması ve sistemin çözümü

(B) matrisinin oluşturulmasının ardından, yine toplama yöntemi kullanılarak 3.9 denkleminde (K) matrisi ve 3.16 denkleminde de (B^T) matrisi oluşturulur;

$$\tilde{F} = (K) \cdot \tilde{\beta} \quad (3.24)$$

$$\tilde{\beta} = (B^T) \cdot \tilde{x} \quad (3.25)$$

Daha sonra 3.23, 3.24, 3.25 denklemleri uygun şekilde bir büyük matriste birleştirilerek tüm bilinmeyenler yani, $\tilde{F}$ çubuk ucu kuvvetleri, $\tilde{x}$ çubuk ucu deplasmanları ve $\tilde{\beta}$ çubuk deformasyonları aynı denklem takımı ile çözülebilir. Bu yöntem “Genel Matris Metodu” adı verilir. Fakat bu işlemler için oluşturulması gereken kare matrisin bir boyutu serbestlik derecesi + 6 x çubuk sayısı kadar olacaktır. Dolayısıyla çözülmesi gereken denklem sayısı özellikle büyük sistemler düşünüldüğünde çok fazla olacaktır.

Bunun yerine bu üç denklemin ufak hesap adımlarıyla bilinmeyen sayısını ve dolayısıyla denklem sayısını düşürmek hiç de zor değildir. 3.23 denkleminde $\tilde{F}$ çubuk ucu kuvvetleri yerine 3.24'deki denklem yazılır ve daha sonra da $\tilde{\beta}$ çubuk deformasyonları yerine de 3.25 denklemini yazılırsa, bilinmeyen olarak sadece $\tilde{x}$ çubuk ucu deplasmanları

kalacaktır. Böylece sadece serbestlik derecesi kadar denklem çözülecektir. Bu işlemler sonunda denklem takımı şu hale gelir;

$$(B) \cdot [(K) \cdot (B^T)] \cdot \tilde{x} + \tilde{Q} = \tilde{P}$$

Bu denklem takımında $(B) \cdot [(K) \cdot (B^T)]$ matrislerinin çarpımıyla oluşan matrise rijitlik (stiffness) matrisi adı verilir;

$$(S) \cdot \tilde{x} = \tilde{P} - \tilde{Q} \quad (3.26)$$

Matris-deplasman metodu adı verilen bu yöntemle 3.26 denklem takımı çözülerek $\tilde{x}$ çubuk ucu deplasmanları hesaplanır. Serbestliklerdeki deplasmanlar hesap edildikten sonra geriye doğru çözüm yapılmaya devam edilir.

$\tilde{F}$ çubuk ucu kuvvetlerinin hesaplanması için 3.27'deki denklem kullanılır;

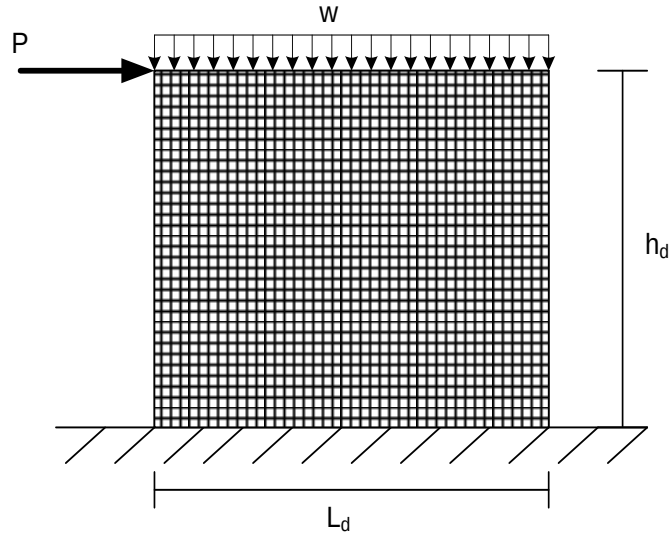
$$\tilde{F} = [(K) \cdot (B^T)] \cdot \tilde{x} \quad (3.27)$$

$\tilde{F}$ çubuk ucu kuvvetleri ile bağımsız çubuk ucu kuvvetleri olan $\tilde{f}_j$ 'ler hesap edilmiş olur ve ardından bağımsız çubuk ucu kuvvetleri kullanılarak $\tilde{q}'_j$ çubuk ucu kuvvetleri ve $(\tilde{q}_j + \tilde{q}'_j)$ toplam çubuk ucu kuvvetleri hesap edilir.

Eğer ihtiyaç duyuluyorsa $\tilde{\beta}$ çubuk deformasyonları da 3.25 denkleminde hesap edilir.

4. DUVARLARIN ÇUBUK ELEMANLARLA MODELLENMESİ

Yığma yapılarda yapısal elemanların en önemlisi olan duvarlar, yapının taşıyıcı özelliğe sahip elemanlarıdır. Üzerlerindeki yatay hatıllar vasıtası ile döşeme ve üst katlardan gelen düşey yükleri ve deprem-rüzgâr gibi yatay yükleri aktarırlar (Şekil 4.1.). Yığma duvarlarının statik ve dinamik davranışları yapının bütünlüğü ve sürekliliği açısından büyük öneme sahiptir.



Şekil 4.1. Yığma duvar yükleri

Bu bölümde, yığma duvarların mikro-modelleme ile modellenmesi için çerçeve ve kafes elemanlardan oluşan iki boyutlu modelleme tarifi yapılacaktır. Geliştirilen modelin statik analizi için matris deplasman metodu kullanılacaktır.

4.1 Yığma Duvarın Modellenmesi

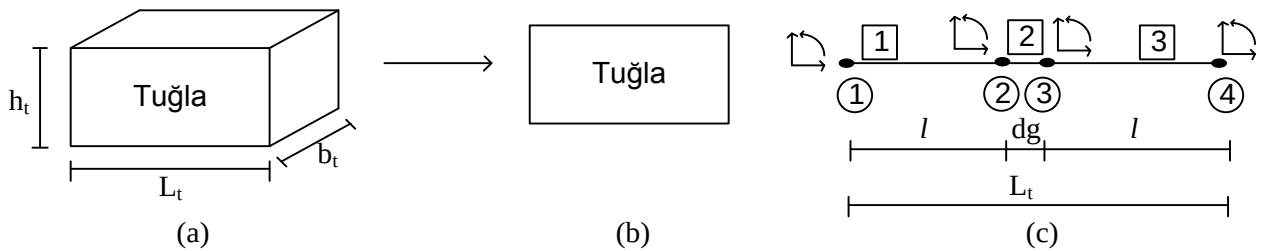
Yığma duvar elemanlar bilindiği gibi kâgir birimler ve harcın birleşmesinden oluşan yapısal elemanlardır. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi duvarların tek parça olarak modellenmesinden başlayarak, belli sayıda parçalara bölünmesi ile homojenleştirmenin uygulandığı makro modelleme yöntemleri ve daha detaylı incelemeler için çok küçük parçalara ayrılarak kâgir birimlerin (tuğla) ve harcın temsil edildiği mikro modelleme yöntemleri geliştirilmiştir.

Daha önce söz edildiği gibi tuğla, tuğla hamuru makinelerde biçimlendirildikten ve genellikle yapay yöntemlerle kurutulduktan sonra, fabrika fırınlarında pişirilmesi sonucunda

elde edilir. Günümüzde artık hemen her yerde fabrika tuğlaları kullanılmaktadır. Genel olarak yığma yapılar için kullanılan fabrika tuğlaları deprem yönetmeliği gereği % 35'ten çok boşluğu olmayan düşey delikli taşıyıcı tuğlalardır. Şekil 4.2.a.'da verilen boyut isimlendirmelerinde, h_t ; tuğlanın yüksekliğini, b_t ; tuğlanın genişliğini ve L_t ; tuğlanın boyunu temsil etmek üzere, $L_t \times b_t \times h_t$ olmak üzere genelde 29 x 19 x 13.5 cm., 29 x 24 x 13.5 cm., 39 x 19 x 13.5 cm. ebatlarında üretim yapılmaktadır.

Bu çalışmada tuğla ve harç birimleri ayrı ayrı ve karma olarak modellenmiştir. En genel manada tuğla elemanlar yatay çerçeve eleman olarak, yatay derzi oluşturan birimler tuğlaların aksenal rijitliği ile birlikte değerlendirilerek eşdeğer çerçeve eleman olarak ve düşey derzi oluşturan harç birimleri ise kafes eleman olarak modellenmiştir. Bu şekilde yığma duvar iki boyutlu çerçeve-kafes karma sistem olarak çubuk elemanlarla modellenmekte ve çözüme gidilmektedir.

Tuğla elemanların her biri 4 düğüm noktalı ve birbirine rijit bağlı 3 adet çerçeve eleman olarak modellenmektedir (Şekil 4.2.c). Bu tuğlaların tam ortadan şaşırtmalı olarak dizildiği kabulünden dolayı ortada düşey derz genişliği (dg) kadar bir parça ve her iki yanında eşit uzunlukta (l) iki parça olarak modellenmiştir. Tuğla elemanın kesit özelliklerine göre alanı, atalet momenti ve çerçeve elemanın boyu hesaplanmaktadır. Elastisite modülü de malzeme cinsine göre belirlenmektedir.



Şekil 4.2. Tuğlanın çubuk eleman ile (çerçeve eleman) mikro modellenmesi

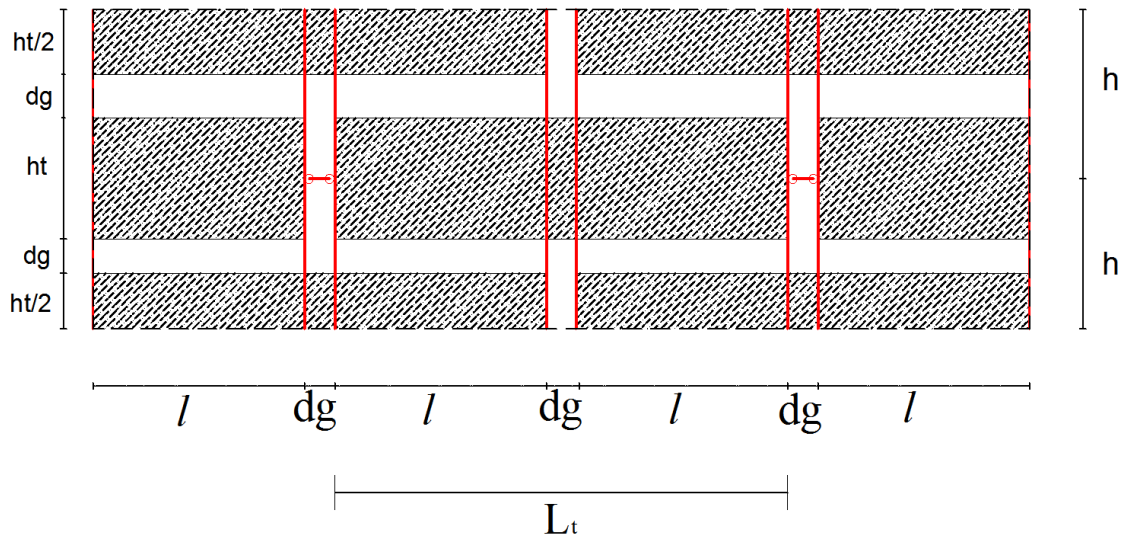
Tuğla eleman çerçeve çubuk olarak modellendiğinde çubuk elemanların kesit alanları (A_t), atalet momenti (I_t) ve 2 ile 3 düğümünün arasındaki çerçeve çubuğun boyu derz genişliği (dg) olmak üzere, kenarlardaki çerçeve çubukları boyları (l) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$A_t = b_t \times h_t \quad (4.1)$$

$$I_t = \frac{b_t \times h_t^3}{12} \quad (4.2)$$

$$l = (L_t - dg)/2 \quad (4.3)$$

Modelleme aşamasında harç birimleri yatay ve düşey derzler olmak üzere iki gruba ayırırsak; yatay derzler tuğla yükseklikleri ile birlikte çerçeve çubuk elemanlarla, düşey derzler ise kafes çubuk elemanlarla modellenmekte ve düşey derzler için bir adet kafes eleman, yatay derzlerde ise tuğlalarda (çerçeve elemanlarda) bulunan her düğümden birer tane düşey (90°'lik) çerçeve çubuk elemanlarla sistem modellenmektedir (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Harç birimlerin çerçeve ve kafes elemanlarla modellenmesi

Harç birimleri temsil eden elemanların alanları, elemanların bulunduğu tuğla yüzünde kalan harç alanının her bir elemana eşit dağıtılması ile bulunmuştur. Şekil 4.2.a.'daki boyutlar çerçevesinde harç birimleri temsil eden elemanların kesit alanları, yatay derz çerçeve elemanların her birinin alanı (A_{hy}), Atalet Momenti (I_{hy}) ve düşey derzlerdeki kafes elemanın alanı (A_{hd}) aşağıdaki gibi hesaplanır. I_{hy} tanımındaki β , düşey tuğla sayısına bağlı olarak hesaplanan bir çarpandır. B hesabı (4.10) ifadesiyle verilmektedir.

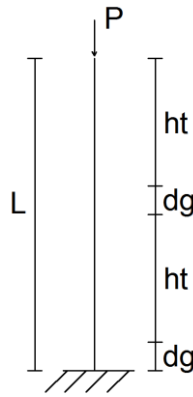
$$A_{hy} = (L_t \times b_t) / 4 \quad I_{hy} = \beta \cdot ((L_t / 4)^3 \times b_t / 12) = \beta \cdot I \quad (4.4)$$

$$A_{hd} = (h_t \times b_t) \quad (4.5)$$

Harç birimleri temsil eden elemanların boyları tuğla elemanın uzunluğu, yüksekliği ve yatay ve düşey derzlerin kalınlıklarına göre bulunmaktadır. Düşey derzin boyu zaten derz genişliğine (dg) eşit olmakta, yatay derz çubuk elemanların boyları (h) için ise modelin geometrisinden faydalanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$h = h_t + dg \quad (4.6)$$

Elastisite Modülü ise düşey derzi temsil eden kafes eleman için harç elemanın elastisite modülüne göre seçilirken, yatay derzi temsil eden çerçeve çubuk elemanlar içinse hesaplanan çubuk boyunun bir kısmı tuğla birimin içinde, bir kısmı ise harç birimin içinde kalmasından dolayı eşdeğer elastisite modülünün (E_e) hesaplanması gerekmektedir. Duvar tek bir çubuk eleman gibi düşünülürse ve eksenel yük ile yüklenirse oluşacak uzama veya kısalmayı Hooke Kanunu'na göre hesaplayabiliriz (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Eksenel yükleme halinde örnek bir çubuk eleman.

P yükü yüklenmiş örnek duvar 2 adet tuğla ile örülerek oluşturulmuş. Hooke Kanunu'na göre Şekil 4.4.'deki duvarın boy değişimi şöyle tarif edilebilir:

$$\Delta = P \times L / E_e \times A \quad (4.7)$$

Boy değişimi E_t tuğlanın elastisite modülü, E_h ise harcın elastisite modülü olmak üzere aynı zamanda aşağıdaki gibi de tarif edilebilir:

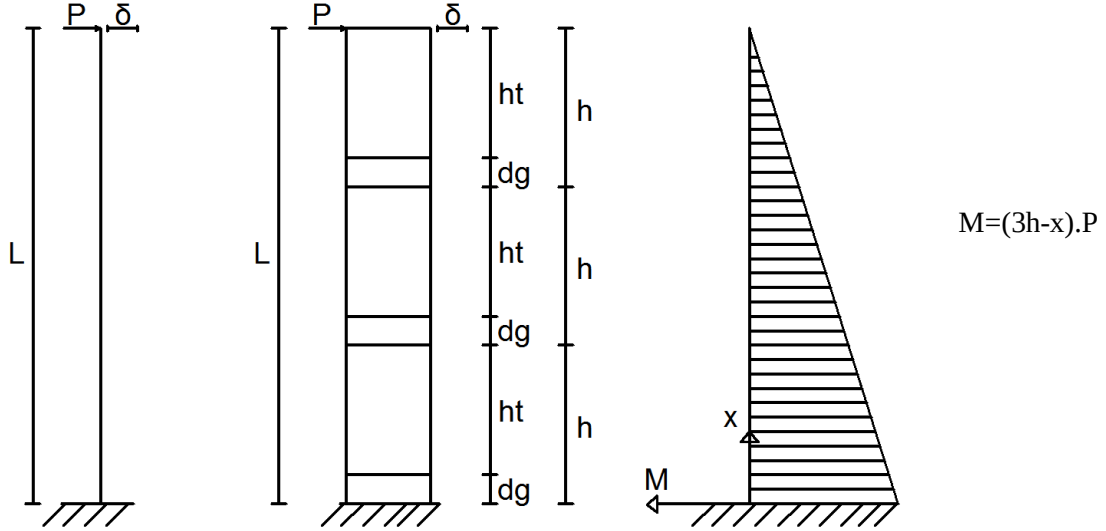
$$\Delta = (P \times 2 \times h_t / E_t \times A) + (P \times 2 \times dg / E_h \times A) \quad (4.8)$$

4.7 ve 4.8 denklemleri düzenlenerek düşey çerçevenin elastisite modülüne ulaşılır:

$$E_e = E_t \times E_h \times (h_t + dg) / (h_t \times E_h + dg \times E_t) \quad (4.9)$$

Şekil 4.5.'deki düşey çerçeve eleman için (4.4) tariflerinde yer alan β çarpanı şöyle hesaplanır: Düşey eleman A_{hy} kesit alanına ve I_{hy} atalet momentine sahiptir ve $3.h$ boyundadır (Şekil 4.6.'daki duvar modeline aittir). Bu düşey elemana tepeden etki eden P yükü δ yatay yer değiştirmesi meydana getirir. Bu düşey eleman kesit alanları $((L_t \times b_t) / 4)$ olan dg yüksekliğinde üç derzden ve h_t yüksekliğinde üç tuğladan oluştuğu düşünülmektedir. Bu durumda bu kompozit sütuna etki eden P yatay yükünün de aynı δ yatay yer değiştirmesi beklenir. Bunu sağlamak için

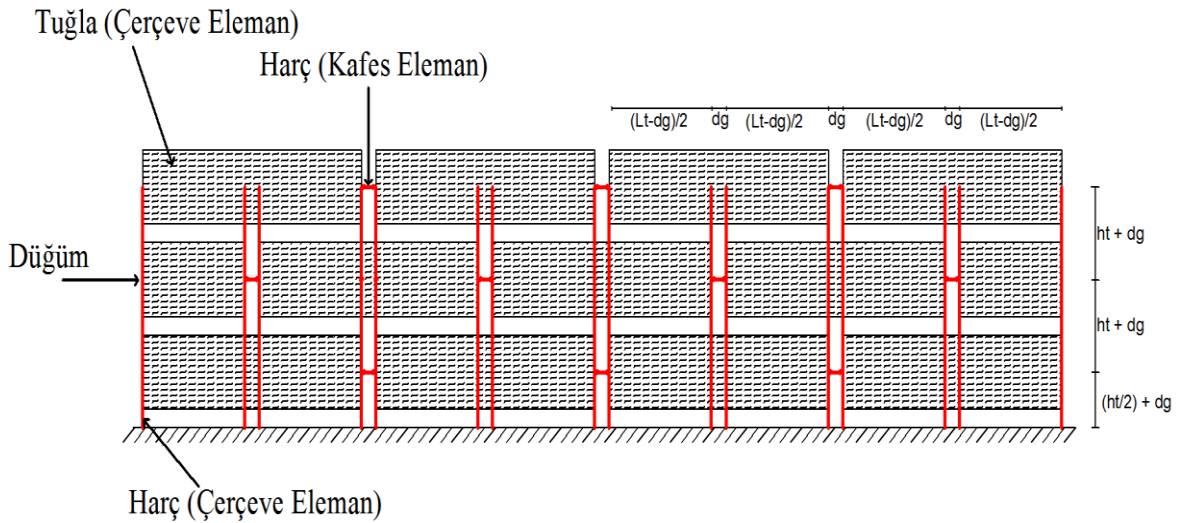
iki modelde depolanan eğilmeye bağlı şekil değişikliği enerjisi eşitlenerek Şekil 4.6'daki duvar modelindeki düşey çerçeve eleman için $I_{hy} = \beta \cdot I$ tarifindeki β hesaplanır (4.10).



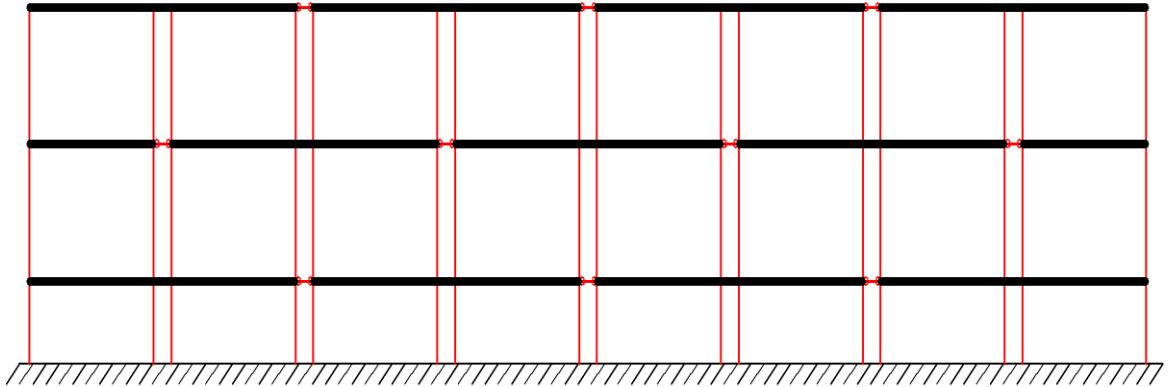
Şekil 4.5. Düşey çerçeve eleman modeli

$$\int_0^{3h} \frac{M^2}{2.E_e.\beta.I} dx = \int_0^{dg} \frac{M^2}{2.E_h.I} dx + \int_{dg}^h \frac{M^2}{2.E_f.I} dx + \int_h^{h+dg} \frac{M^2}{2.E_h.I} dx + \int_{h+dg}^{2h} \frac{M^2}{2.E_f.I} dx + \int_{2h}^{2h+dg} \frac{M^2}{2.E_h.I} dx + \int_{2h+dg}^{3h} \frac{M^2}{2.E_f.I} dx \quad (4.10)$$

Diğer duvar örnekleri için de (4.10) tarifine benzer şekilde β çarpanları hesaplanır.



Şekil 4.6. Tuğla ve harcın çerçeve ve kafes elemanlarla mikro modellenmesi



Şekil 4.7. Mikro modelin temsili gösterimi

Harç ve kâgir birim elemanların çubuk elemanlar ile tarif edildiği duvar bir çerçeve-kafes karma yapı olarak modellenir. Modelleme sonunda incelenecek duvarın boyutuna göre olması gereken tuğla sayısının 4 katı, serbestliği olan düğüm olmaktadır. Tam tuğla sayısının 3 katı ve şaşırtmalı örülme durumuna göre yapılan modelleme ile duvar baş ve sonunda da kalan parça tuğla için parça başına bir veya iki adet daha tuğlayı modelleyen çerçeve çubuk olmaktadır. Harç birimler ise duvarın boyutuna göre her yatay derz için dört adet çerçeve eleman, her düşey derz için bir adet kafes eleman kullanılarak modellenmektedir (Şekil 4.6., Şekil 4.7.).

Bir duvarın çubuk elemanlarla modellenmesinde, düğüm sayısı, çubuk sayısı ve serbestlik derecesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

Burada; yts Yatay tuğla sayısını, dts Düşey tuğla sayısını, L_d Duvarın uzunluğunu, h_d Duvarın yüksekliğini, L_t Tuğlanın uzunluğunu, h_t Tuğlanın yüksekliğini, dg Yatay-düşey derz kalınlığını, ds Düğüm sayısını, ϕcs Çerçeve çubuk sayısını, kcs Kafes çubuk sayısını, cs Çubuk sayısını ve sd Serbestlik derecesini ifade etmek üzere;

$$yts = (L_d + dg) / (L_t + dg) \quad (\text{Küsuratı üste tamamlanır}) \quad (4.11)$$

$$dts = h_d / (h_t + dg) \quad (\text{Küsuratı atılır}) \quad (4.12)$$

$$ds = (yts \times 4) \times (dts + 1) \quad (4.13)$$

$$\phi cs = [yts \times dts \times 3 - (dts/2)] + [yts \times dts \times 4] \quad (4.14)$$

$$kcs = (yts - 1) \times dts + (dts/2) \quad (4.15)$$

$$cs = \phi cs + kcs \quad (4.16)$$

$$sd = yts \times dts \times 4 \times 3 \quad (4.17)$$

Örneğin 329 cm. genişliğinde, 290 cm. yüksekliğinde, şaşırtmalı olarak 29*19*13.5 cm. ölçülerinde yığma tuğla ile örülen duvar için hesaplama adımları ve eleman sayıları aşağıdaki gibidir:

$$\text{Yatay tuğla sayısı (yts)} = 330/(29+1) = 11 \text{ adet}$$

$$\text{Düşey tuğla sayısı (dts)} = 290/(13.5+1) = 20 \text{ adet}$$

$$\text{Düğüm sayısı (ds)} = (11 \times 4) \times (20 + 1) = 924 \text{ adet}$$

$$\text{Çubuk sayısı (cs)} = (11 \times 20 \times 3 - 20/2) + [(11-1) \times 20 + 20/2] + (11 \times 20 \times 4) = 1.740 \text{ adet}$$

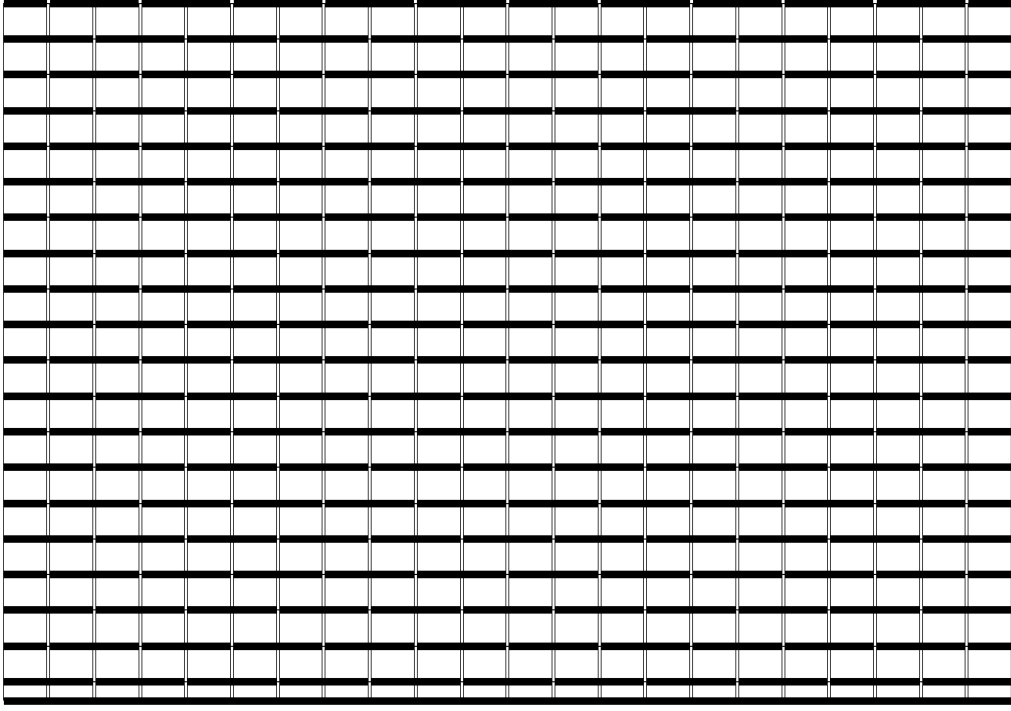
$$\text{Serbestlik derecesi (sd)} = 11 \times 20 \times 4 \times 3 = 2.640$$

329 cm x 290 cm boyutlarındaki duvarın kâgir eleman ve harç elemanın çerçeve ve kafes eleman olarak modellenmesi sonucu;

Düğüm Sayısı: 924 Adet

Çubuk Sayısı: 1.740 Adet

Serbestlik Derecesi: 2.640'tır. Adı geçen duvarın modeldeki görünüşü Şekil 4.8.'de verilmektedir.

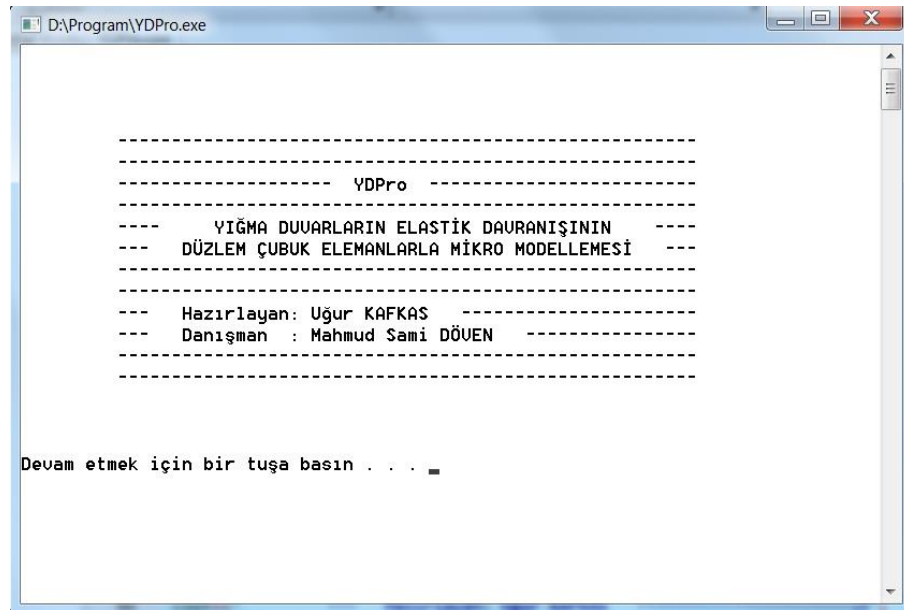


Şekil 4.8. 329 x 290 cm. boyutlarındaki duvarın modelinin temsili gösterimi

5. GELİŞTİRİLEN BİLGİSAYAR PROGRAMI VE UYGULAMA

5.1. Geliştirilen Bilgisayar Programı

Bölüm 4’de anlatıldığı gibi çerçeve ve kafes çubuk elemanlarla modellenen duvarın tarif edilen yüklemeler altında statik analizinin Bölüm 3’de anlatılan matris deplasman yöntemi kullanılarak yapılması için bir bilgisayar programı (YDPro) geliştirilmiştir.

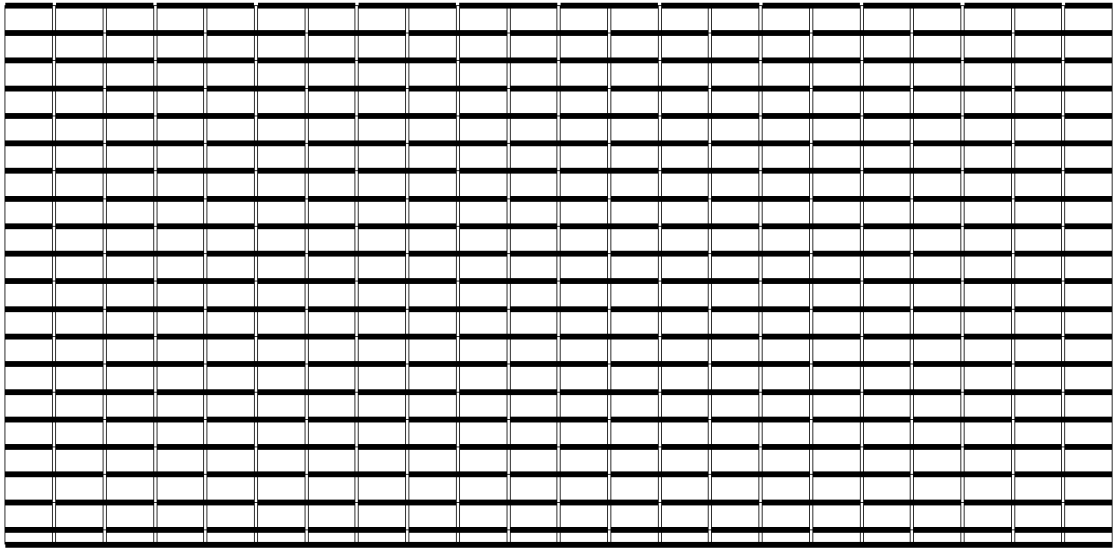


Şekil 5.1. YDPro giriş ekranı

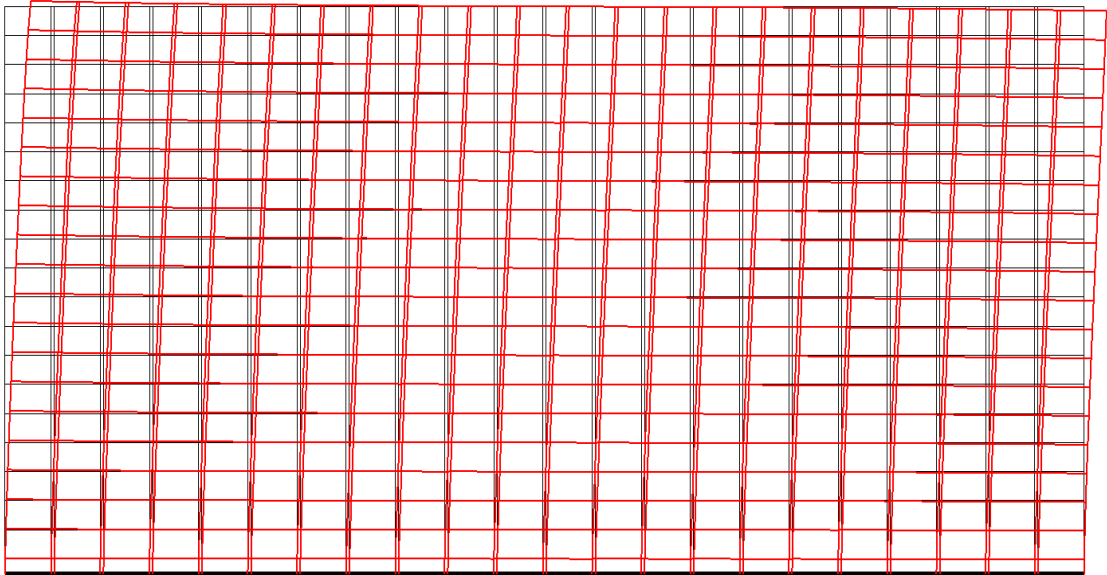
Konsol uygulaması şeklinde C++ programlama dili kullanılarak geliştirilen program yardımıyla boyutları ve birim özellikleri girilen duvar Bölüm 4’de anlatıldığı gibi çubuk elemanlarla modellenmektedir ve türetilen çerçeve-kafes karma yapı, tarif edilen düşey ve yatay yükler etkisi altında analiz edilmektedir. Analiz sonunda düğüm deplasmanları ve çubuk ucu kuvvetleri bulunmaktadır. Çubuk ucu kuvvetleri tuğla ve harç birimlerindeki kuvvetleri temsil ederken, düğüm deplasmanları ise duvarın deformasyonunu temsil etmektedir.

Bu çalışmada tuğla ve harç birimlerden oluşmuş kompozit bir yapı olan duvarın elastik davranışı incelendiğinden düğüm deplasmanları kullanılarak mevcut yapının deformasyonlarının ne kadar olduğu tespit edilmektedir. Duvarın şekil değişikliğini çizdirmek için açık kaynak kodlu grafik özellikli bir matematik uygulaması olan SCILAB programı kullanılmıştır. Deformasyon öncesi duvar, düğüm koordinatları ve çubuk başlangıç bitiş düğüm bilgileri kullanılarak çizdirilmekte (Şekil 5.2) ve sonrasında düğüm noktaları deplasman yapmış

koordinatları kullanılarak duvarın deformasyon yapmış hali abartılı ölçeklendirilerek çizdirilmektedir (Şekil 5.3). Böylelikle duvarın şekil değişikliği grafik olarak incelenebilmektedir.

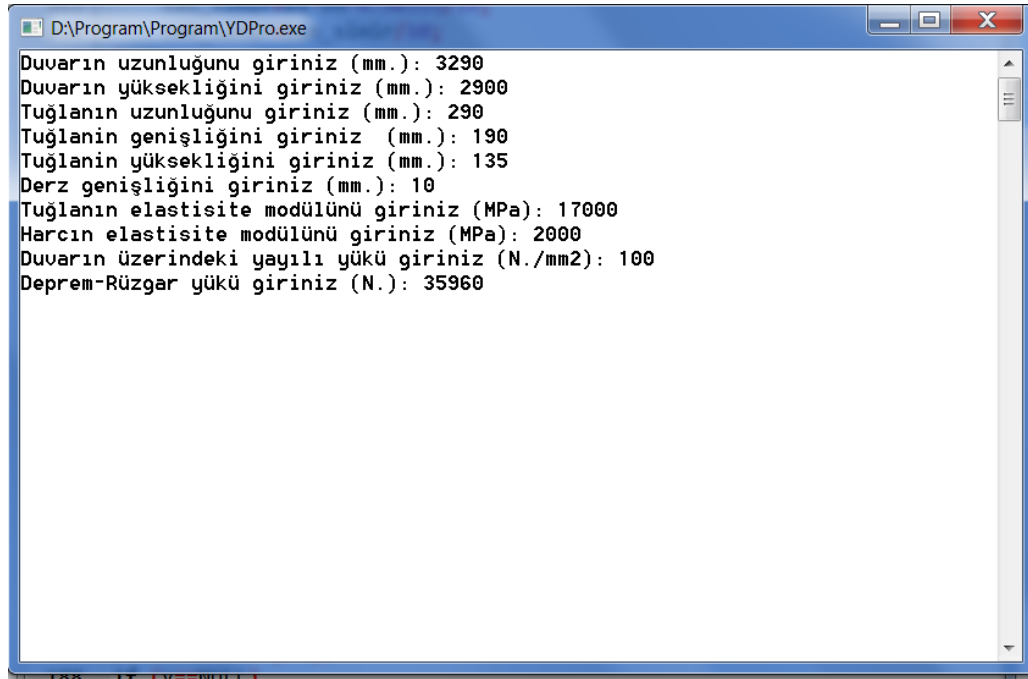


Şekil 5.2. Deformasyon öncesi duvarın şematik gösterimi



Şekil 5.3. Deformasyon yapmış duvarın şematik gösterimi

Her hangi bir duvarın analizinin yapılabilmesi için öncelikle duvar ve birimlerinin kesit ve malzeme özelliklerinin program ekranından data olarak girilmesi gerekmektedir. Bu özellikler, duvarın uzunluğu (L_d), duvarın yüksekliği (h_d), tuğlanın uzunluğu (L_t), tuğlanın genişliği (b_t) ve tuğlanın yüksekliğidir (h_t). Malzeme özelliği olarak ise harç ve tuğlanın Elastisite Modülü (E) girilmektedir (Şekil 5.4.).



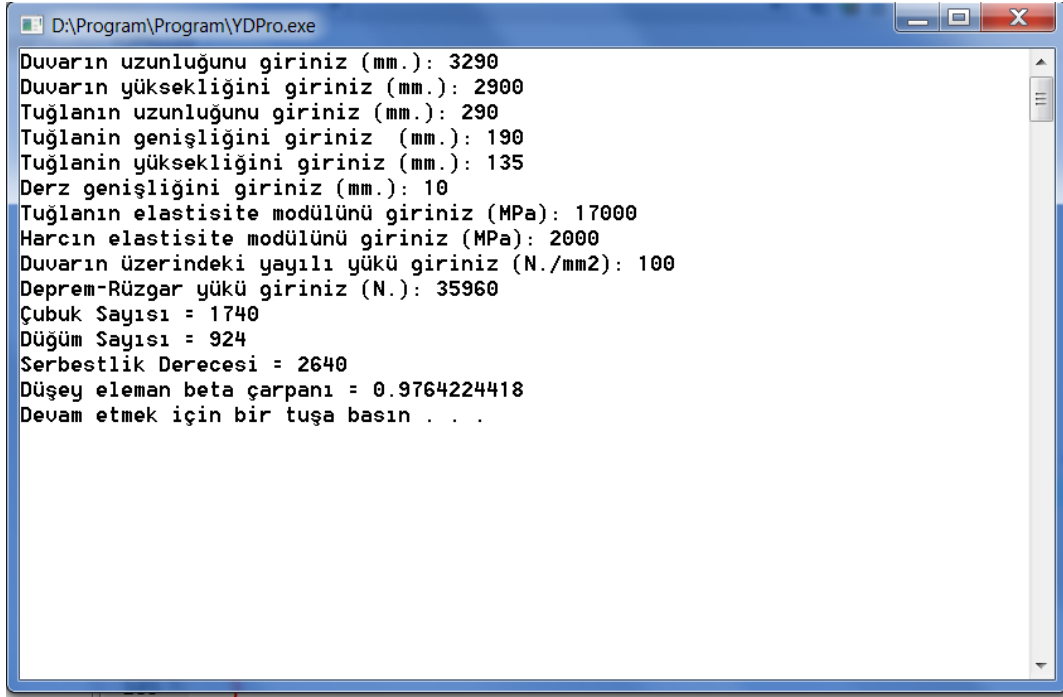
Şekil 5.4. Programın veri giriş ekranı

Program bir örnekle incelenecektir (Şekil 5.4.). Örnekte 329 cm. uzunluğunda, 290 cm. yüksekliğinde ve 19 cm. genişliğinde bir duvar ele alınmıştır. Yığma duvar 29 x 19 x 13.5 cm. ölçülerinde düşey delikli yığma tuğla ve kum, çimento ve kireç karışımı harç ile örülmüştür.

Veri giriş ekranında öncelikle incelenecek duvarın uzunluğu ve yüksekliği programa girilmektedir. Program tarafından daha sonra duvarı oluşturan yapısal elemanların (tuğla ve harç) bilgileri istenmektedir. Öncelikle kâgir birimin uzunluğu, genişliği ve yüksekliği girilmektedir. Daha sonra duvarda kullanılan kâgir birimin ve harç biriminin elastisite modülü de burada tanımlanmaktadır.

Programa son olarak yüklerle ilgili bilgiler girilmektedir. Öncelikle duvarın üzerindeki diğer katlardan ve döşemeden gelen hareketli ve sabit yükler ile duvarın kendi ağırlığından oluşan yayılı yük değeri program tarafından istemekte ve ardından deprem veya rüzgâr yükü istenmektedir (Şekil 5.4.).

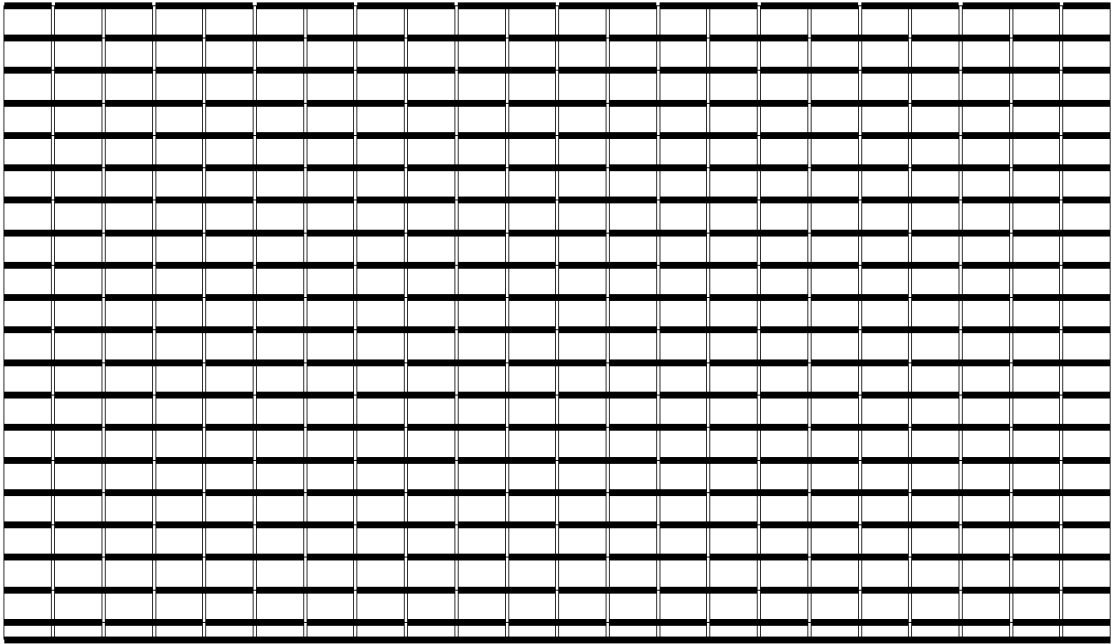
Yüklerin de girilmesinin ardından duvar çerçeve ve kafes elemanlar ile modellenir (Şekil 5.5.).



Şekil 5.5. Modeldeki düğüm sayısı, çubuk sayısı ve serbestlik derecesi

Uygulanan modelleme sonrası duvarın temsili çizimi Şekil 5.6.'da gösterilmektedir. Kalın olarak gösterilen elemanlar çerçeve eleman olup kâğır birimi yani tuğlaları, ince çizgiler ise derzlerde bulunan harç elemanı temsil eden çerçeve ve kafes elemanlardır.

Ardından modelleme yöntemine göre hesaplanan düğüm ve çubuk sayısına, serbestlik derecesine ve girilen yüklere göre oluşturulan rijitlik matrisi ve yük vektörlerine göre hesaplama yapılarak deplasmanlar ve çubuk ucu kuvvetleri hesaplanır. Daha sonra sonuçlar dosyaya yazdırılır ve ardından da çizim ile ilgili SCILAB dosyası hazırlanır (Şekil 5.7.). Daha sonra Şekil 5.6.'daki temsili modelin abartılı şekil değişikliği çizilir (Şekil 5.8.).



Şekil 5.6. Çerçeve ve kafes elemanlarla modellenen duvarın temsili gösterimi

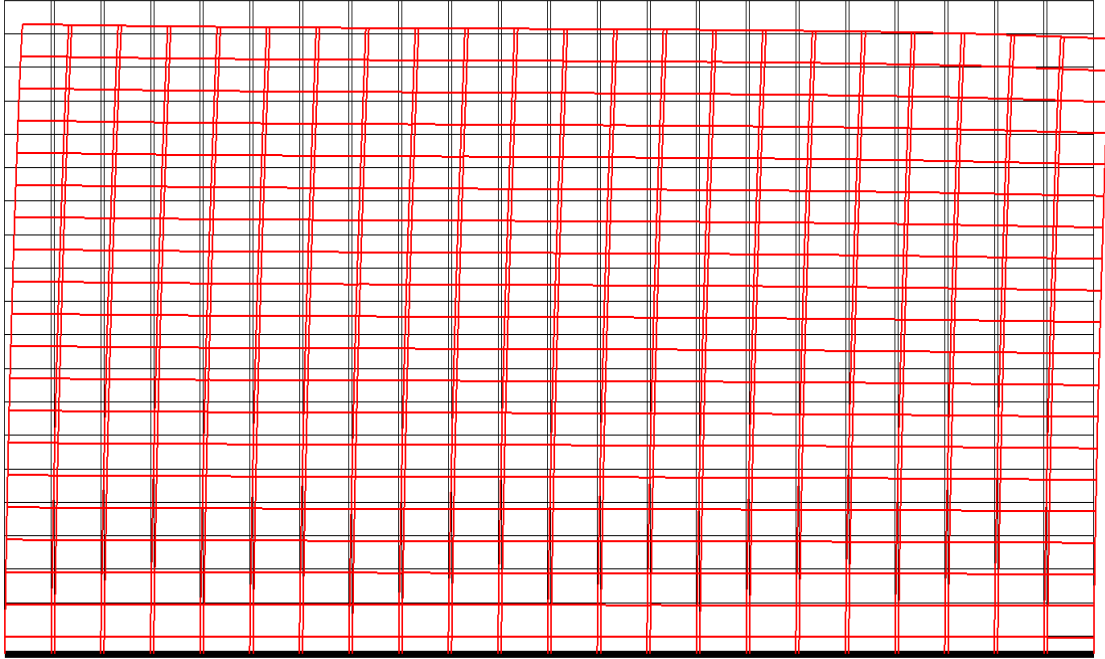
```

D:\Program\Program\YDPro.exe
Duvarın yüksekliğini giriniz (mm.): 2900
Tuğlanın uzunluğunu giriniz (mm.): 290
Tuğlanın genişliğini giriniz (mm.): 190
Tuğlanın yüksekliğini giriniz (mm.): 135
Derz genişliğini giriniz (mm.): 10
Tuğlanın elastisite modülünü giriniz (MPa): 17000
Harcın elastisite modülünü giriniz (MPa): 2000
Duvarın üzerindeki yayılı yükü giriniz (N./mm2): 100
Deprem-Rüzgar yükü giriniz (N.): 35960
Çubuk Sayısı = 1740
Düğüm Sayısı = 924
Serbestlik Derecesi = 2640
Düşey eleman beta çarpanı = 0.9764224418
Devam etmek için bir tuşa basın . . .
RİJİTLİK MATRİSİ OLUŞTURULUYOR LÜTFEN BEKLEYİN
RİJİTLİK MATRİSİ OLUŞTURULDU
ELİMİNASYON BAŞLIYOR LÜTFEN BEKLEYİN
ÇÖZÜM TAMAMLANDI SONUÇLAR HAZIRLANIYOR LÜTFEN BEKLEYİN
SONUÇLAR BAŞARIYLA İŞLENDİ
ÇİZİM HAZIRLANIYOR LÜTFEN BEKLEYİN
ÇİZİM HAZIRLANDI, TEŞEKKÜRLER.

-----
Process exited after 101.4 seconds with return value 0
Devam etmek için bir tuşa basın . . .

```

Şekil 5.7. Analiz sonu

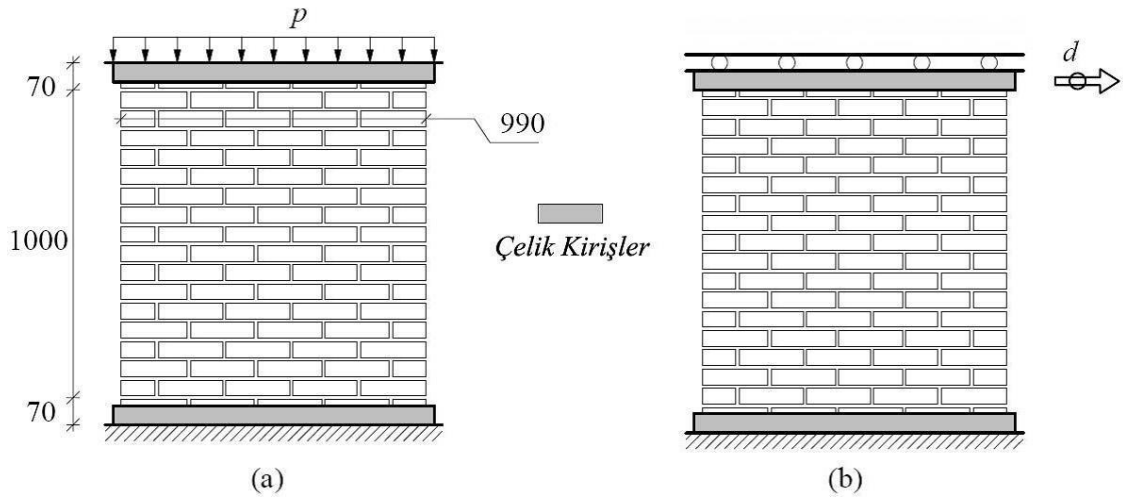


Şekil 5.8. Şekil değişikliği gösterimi

5.2. Mikro Modelleme Tekniği İle Sayısal Çözümler

5.2.1. Eindhoven duvarları

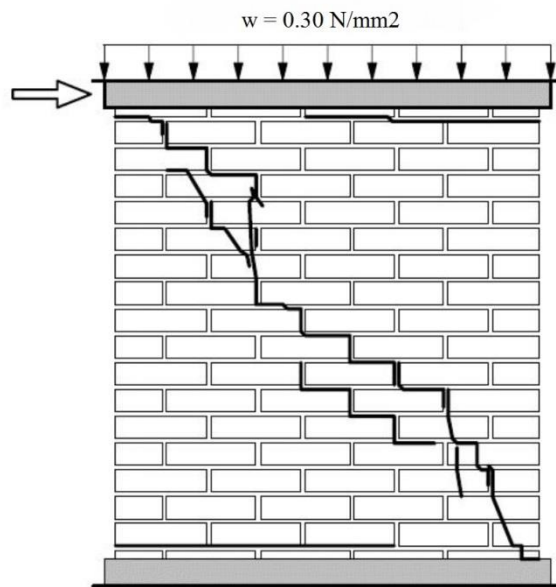
Geliştirilen mikro modelleme tekniği ile ilgili olarak bu bölümde Raijmakers ve Vermeltfoort (1992) ve Vermeltfoort ve Raijmakers (1993) tarafından CUR Project 1997 adlı proje kapsamında deneyi gerçekleştirilen yığma duvarlar ele alınacaktır. Adı geçen deneylerde dolu duvar deneyi, 1000x990x100 mm boyutunda, 10 mm kalınlığında harç ile derzlenmiş 210x52x100 mm boyutlarında tuğlaların kullanıldığı duvarlar üzerinde yapılmıştır. Örnek duvar Şekil 5.9.'da gösterildiği gibi üst ve altından 70 mm kalınlıkta çelik kirişlerle rijit bir düzlem oluşturacak şekilde bağlanmıştır (Kuruşcu, 2012).



Şekil 5.9. Eindhoven duvarının geometrisi ve yükleme şekilleri; a) Düşey yükleme b) Yatay yükleme (Kuruşcu, 2012)

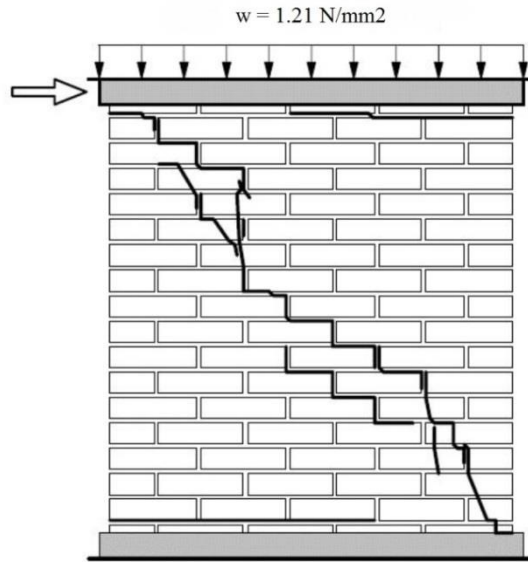
Deneye tabi tutulan dört duvar J4D, J5D, J6D ve J7D olarak adlandırılmıştır.

İlk iki duvarda üstten $0,30 \text{ N/mm}^2$ yayılı yük uygulanmış, böylece toplam 30 kN yük yüklenmiştir. Daha sonra da yatay yük ardışık olarak yüklenmiş ve deplasmanlar kaydedilmiştir (Şekil 5.10.).



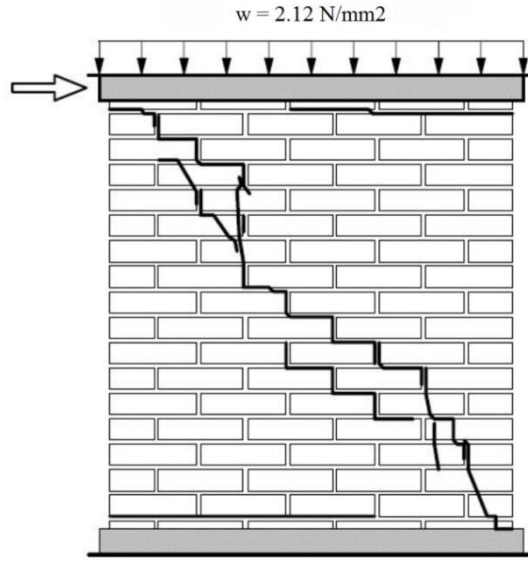
Şekil 5.10. J4D ve J5D Duvarlarının yükleme ve oluşan çatlak şekli (Kuruşcu, 2012)

Şekil 5.11.'de görünen J6D duvarına da $1,21 \text{ N/mm}^2$ yayılı yük yüklenerek toplam 120 kN yük yüklenmiş ve aynı şekilde yatay yük ardışık olarak yüklenmiş ve deplasmanlar kaydedilmiştir.



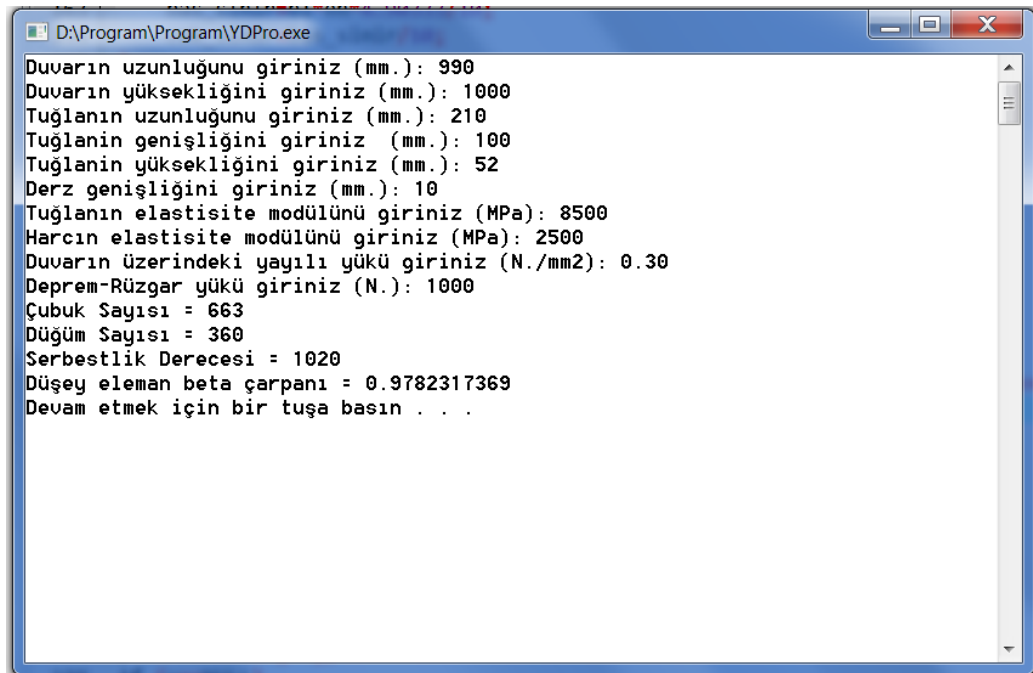
Şekil 5.11. J6D Duvarının yükleme ve oluşan çatlak şekli (Kuruşcu, 2012)

J7D duvarına da $2,12 \text{ N/mm}^2$ yayılı yük uygulanmış ve toplam uygulanan yayılı yük 210 kN'dur. Daha sonra da yatay yük ardışık olarak yüklenmiş ve deplasmanlar kaydedilmiştir (Şekil 5.12.).

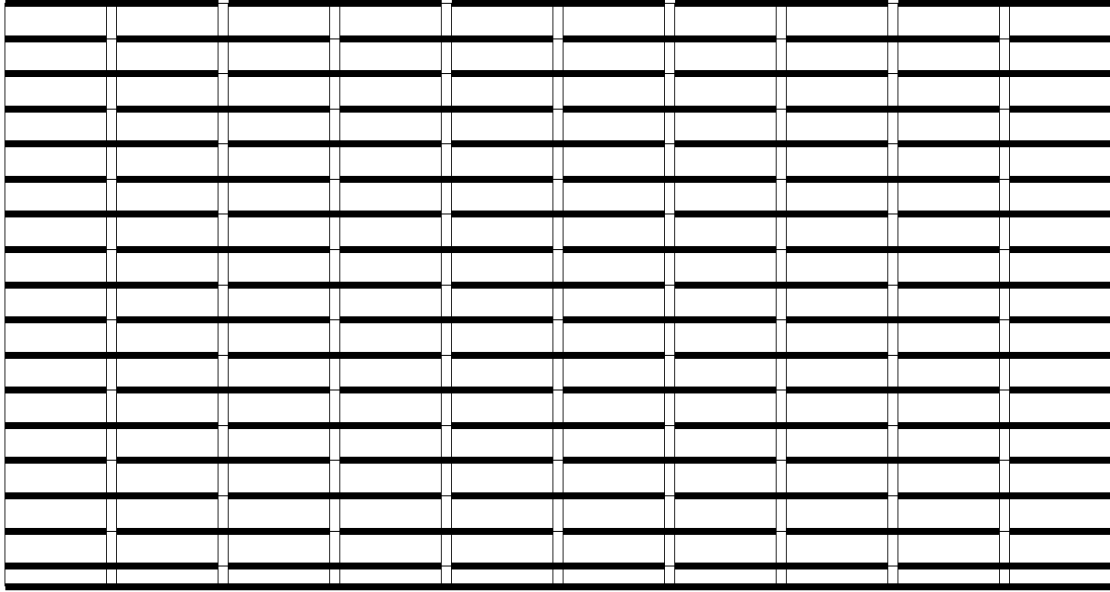


Şekil 5.12. J7D Duvarının yükleme ve oluşan çatlak şekli (Kuruşcu, 2012)

Bu üç duvarın bu çalışma kapsamında önerilen mikro modelleme yöntemiyle çözümü için Kuruşcu (2012)'nin çalışmasında kullandığı verilerden Elastisite modülü olarak bloklar için 8500 MPa ve harç için de 2500 MPa alınmış ve üst kısımdaki çelik blok için de 200000 MPa alınarak çözüm yapılmıştır.



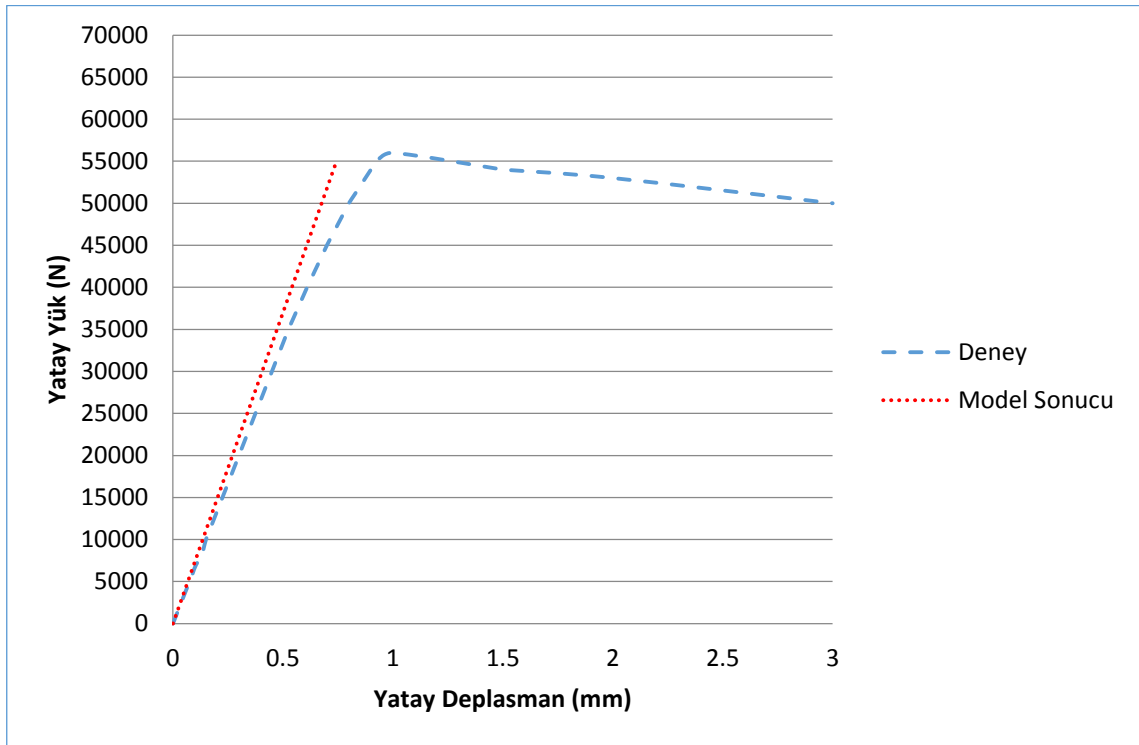
Şekil 5.13. Mikro modelin oluşturulması



Şekil 5.14. Mikro modelleme ile oluşan temsili sonlu eleman modeli

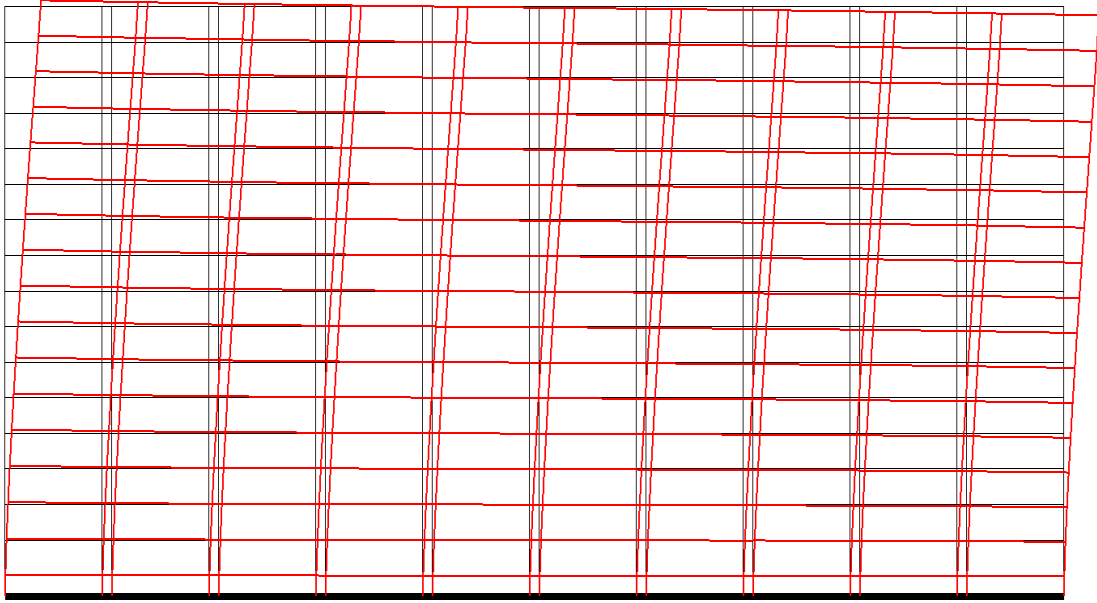
Duvar çubuk elemanlarla mikro modellendiğinde (Şekil 5.13.) 360 düğümlü, 663 çubuk elemandan oluşan ve 1.020 serbestlik derecesine sahip bir yapı ortaya çıkmıştır.

J4D duvarı için deney sonunda bulunan yatay yük – yatay deplasman eğrisi Şekil 5.15.’de verilmiştir. Modelin analizi sonunda bulunan yatay yük – yatay deplasman doğrusu da aynı grafiğe işlenmiştir ve elastik bölgede deplasmanların yakınlığı dikkat çekicidir. Deney sonunda bir değerden sonra duvar plastik deformasyona uğramış ve model doğrusundan ayrılan bir eğri oluşmuştur. Oluşan şekil değişikliği Şekil 5.16.’da gösterilmektedir.

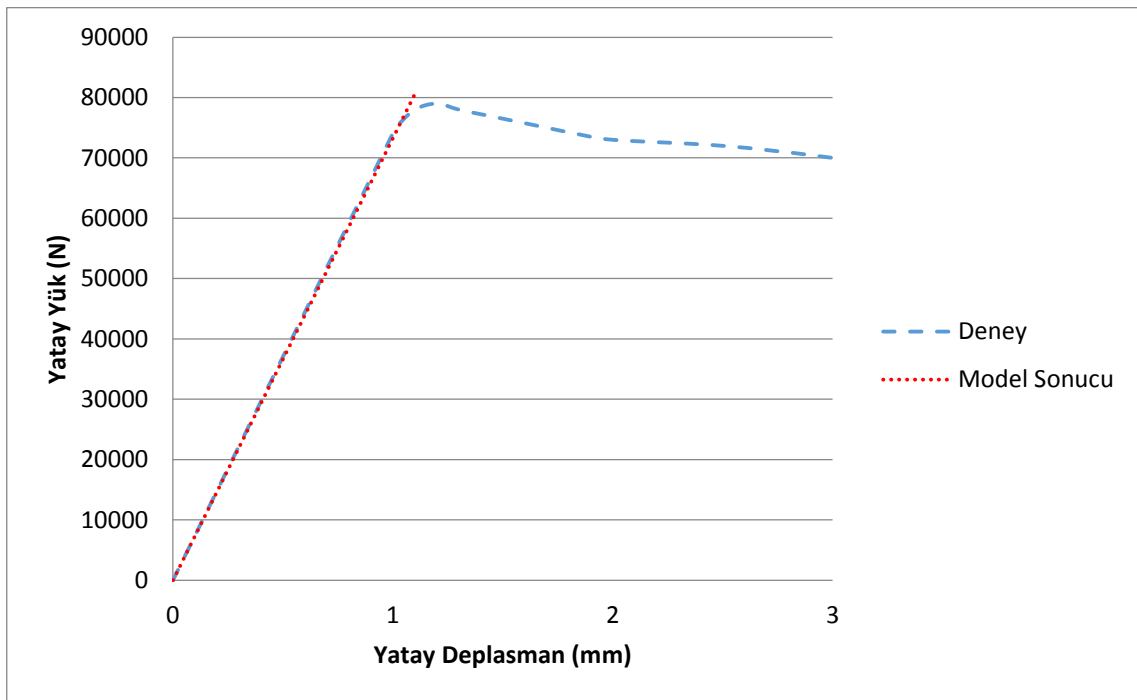


Şekil 5.15. 0,30 N/mm² yayılı yük için yatay yüklemeler sonucu yük-deplasman eğrisi
(Kuruşcu, 2012)

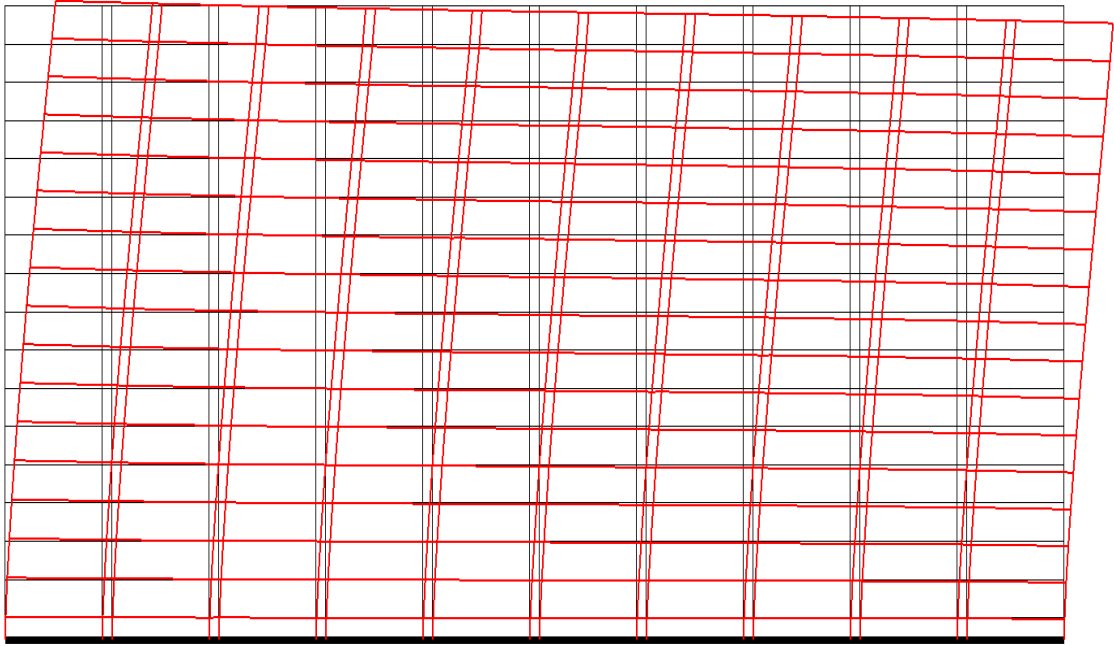
J6D duvarı için deney sonunda bulunan yatay yük – yatay deplasman eğrisi Şekil 5.17.’de verilmiştir. Modelin analizi sonunda bulunan yatay yük – yatay deplasman doğrusu da aynı grafiğe işlenmiş ve elastik bölgede deplasmanın birebir örtüştüğü görülmüştür. Deney sonunda bir değerden sonra duvar plastik deformasyona uğramış ve model doğrusundan ayrılan bir eğri oluşmuştur. Oluşan şekil değişikliği Şekil 5.18.’de gösterilmektedir.



Şekil 5.16. 0,30 N/mm² yayılı yük için en fazla yatay yükleme sonucu şekil değişikliği

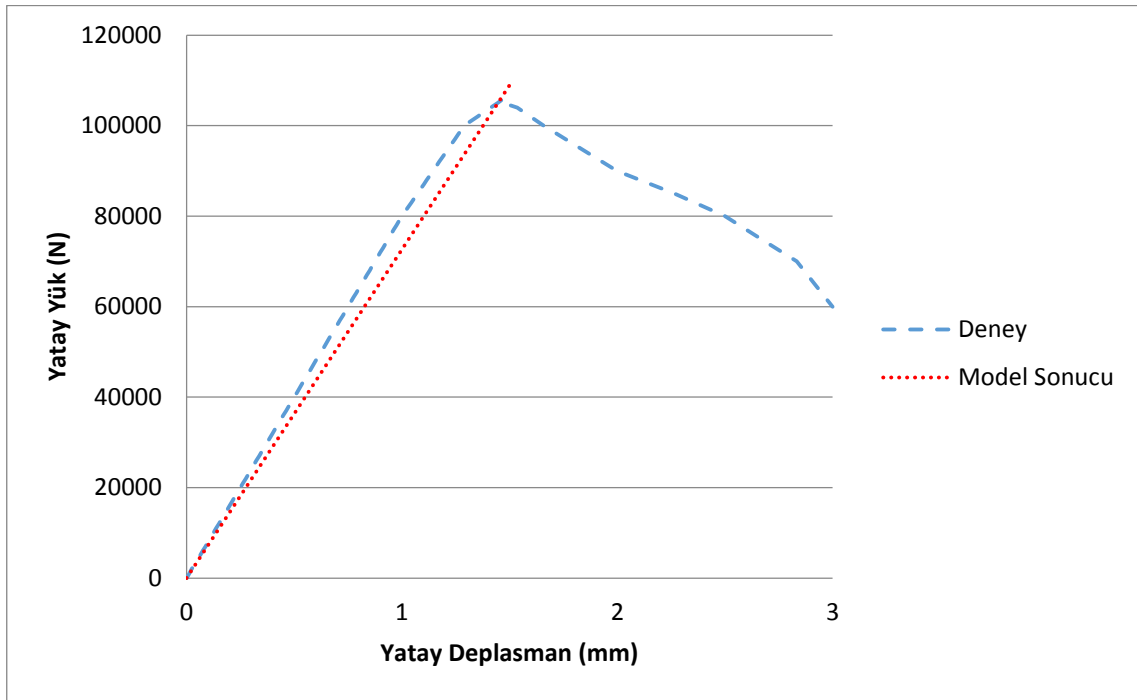


Şekil 5.17. 1,21 N/mm² yayılı yük için yatay yüklemeler sonucu yük-deplasman eğrisi
(Kuruşcu, 2012)

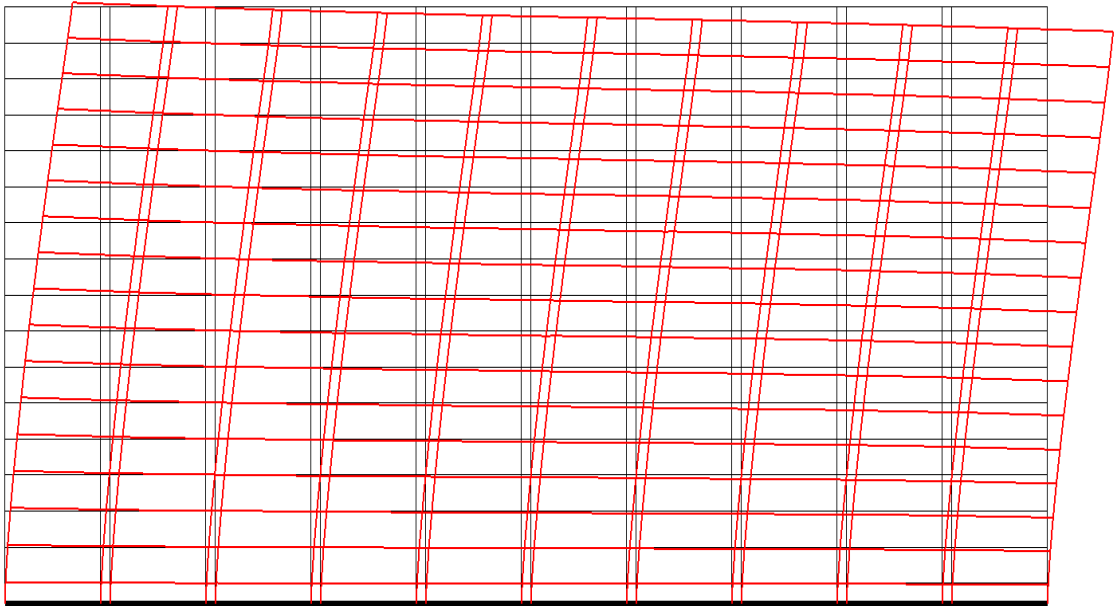


Şekil 5.18. $1,21 \text{ N/mm}^2$ yayılı yük için en fazla yatay yükleme sonucu şekil değişikliği

J7D duvarı için deney sonunda bulunan yatay yük – yatay deplasman eğrisi Şekil 5.19.’de verilmiştir. Modelin analizi sonunda bulunan yatay yük – yatay deplasman doğrusu da aynı grafiğe işlenmiş ve elastik bölgede deplasmanın yakınsadığı görülmüştür. Deney sonunda bir değerden sonra duvar plastik deformasyona uğramış ve model doğrusundan ayrılan bir eğri oluşmuştur. Oluşan şekil değişikliği Şekil 5.20.’de gösterilmektedir.



Şekil 5.19. 2,12 N/mm² yayılı yük için ardışık yatay yüklemeler sonucu yük-deplasman eğrisi (Kuruşcu, 2012)



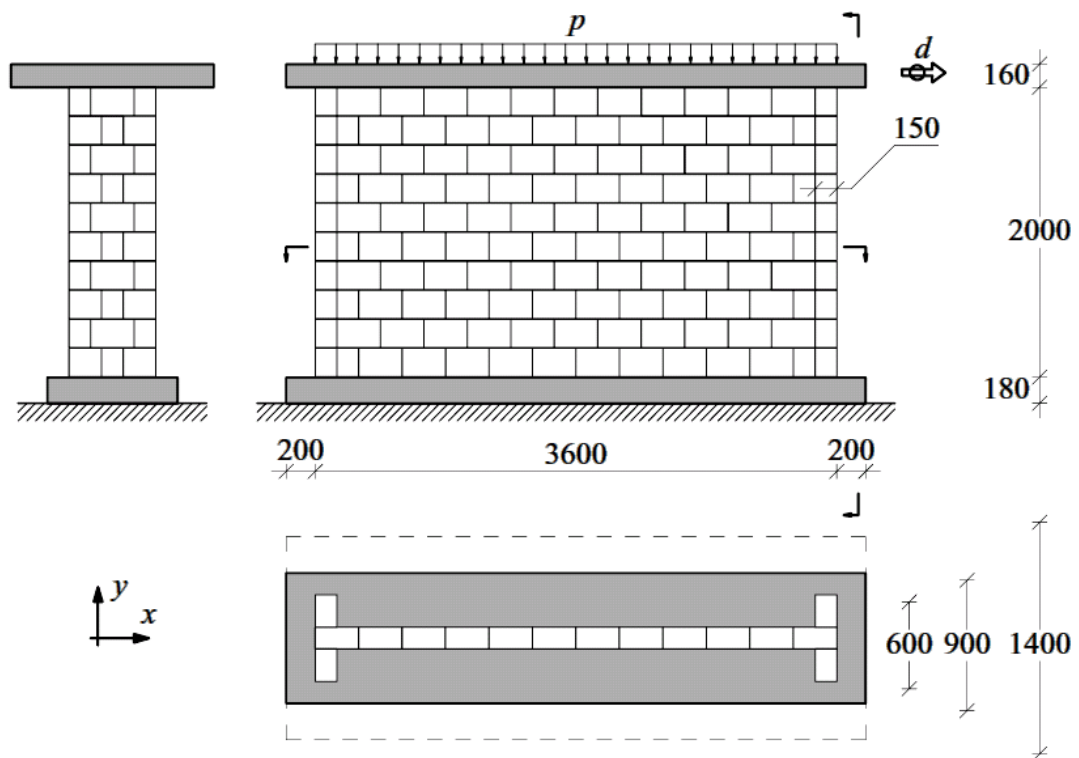
Şekil 5.20. 2,12 N/mm² yayılı yük için en fazla yatay yükleme sonucu şekil değişikliği

5.2.2. ETHZ duvarları

İsviçre'nin Zürih kentinde Ganz ve Thurlimann (1983) tarafından yapılan deneyler çok başarılı sonuçlar vermiş ve literatüre önemli katkılar sağlamıştır. Şekil 5.21.'de geometrik özellikleri gösterilen iki adet duvar imal edilerek 2 farklı düşey yayılı yük ile yüklenmiş ve yatay yükler ardışık olarak yüklenerek deplasmanlar  l   m  t r. Uygulanan düşey yükler, Elastisite modülleri ve duvar yapımında kullanılan eleman boyutları  izelge 5.1.'de verilmiştir.

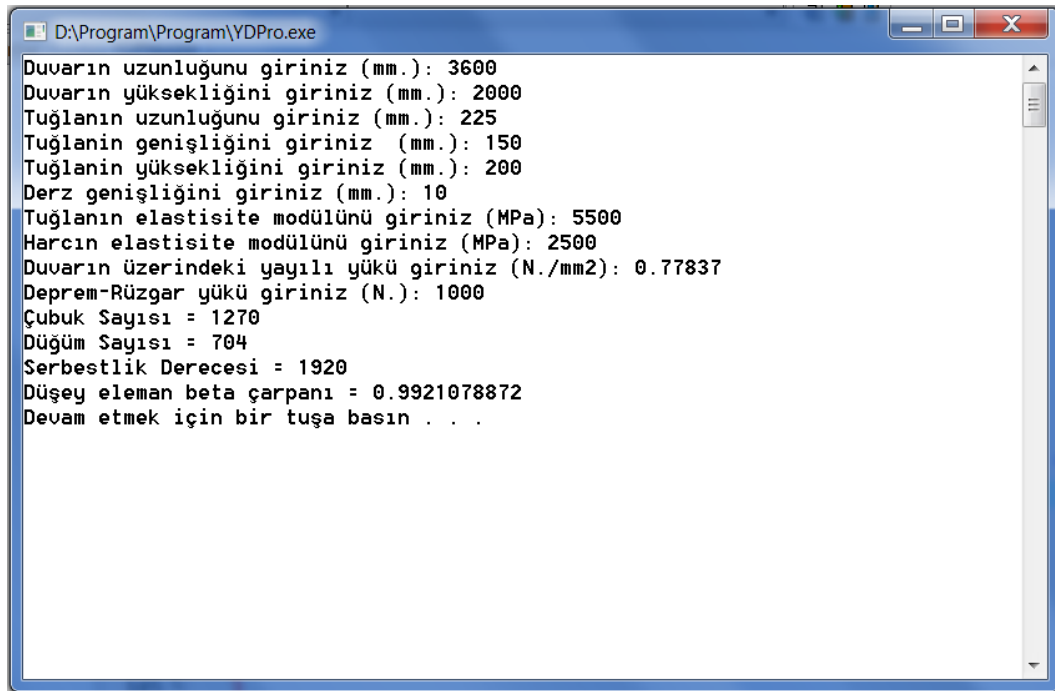
Çizelge 5.1. ETHZ duvarları  zellikleri (Kuru cu, 2012)

Duvar isimleri	Duvar boyutları (mm)	Eleman boyutu (mm)	Uygulanan düşey yük (kN)	E_{blok} (MPa)	$E_{\text{harç}}$ (MPa)
W1	3600x2000x150	225x200x150	416	4.500	1.750
W2	3600x2000x150	225x200x150	1.287	5.500	2.500



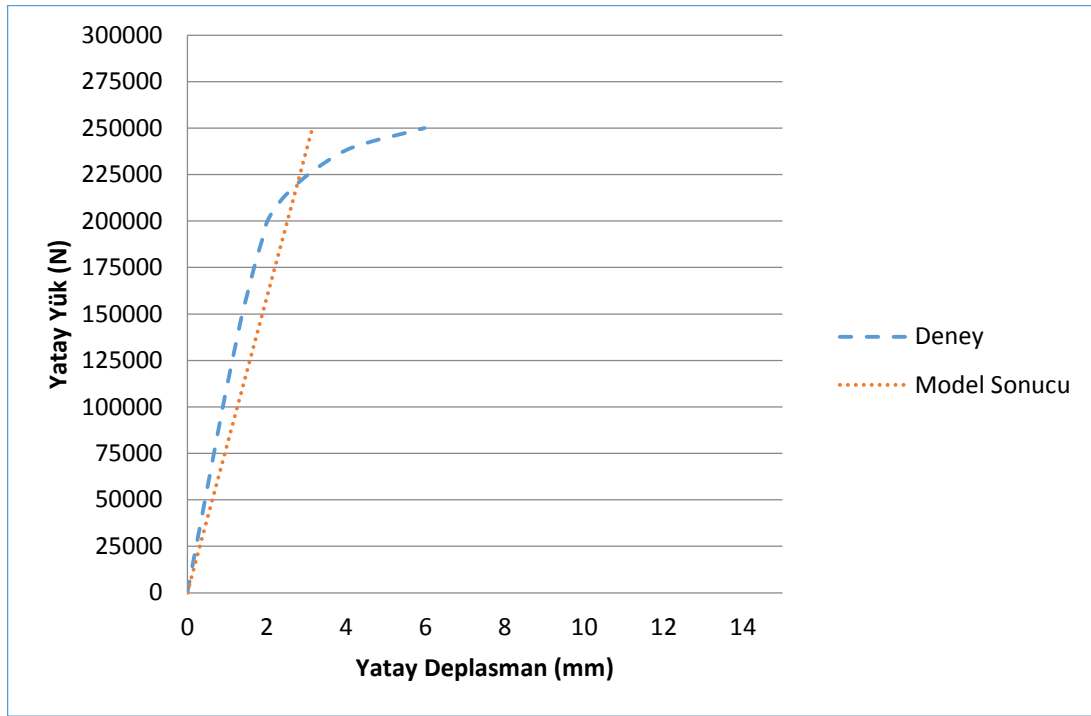
Şekil 5.21. ETHZ duvarları geometrik özellikleri ( l  ler mm.) ve yükleme biçimi (Kuru cu, 2012)

W1 ve W2 duvarlarının modellenmesiyle YDPro'ya girildiği ekran g r nt    ekil 5.22.'de gösterilmiştir.

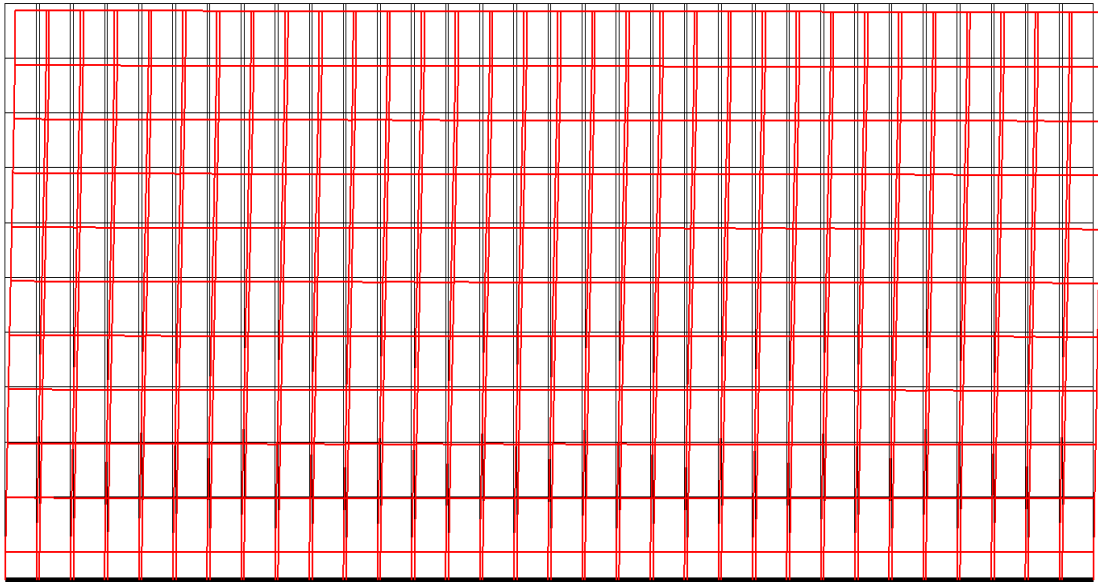


Şekil 5.22. ETHZ duvarları için mikro modelin oluşturulması

W1 duvarı için deney sonunda bulunan yatay yük – yatay deplasman eğrisi Şekil 5.23.’te verilmiştir. Modelin analizi sonunda bulunan yatay yük – yatay deplasman doğrusu da aynı grafiğe işlenmiş ve elastik bölgede deplasmanın Kuruşcu (2012)’de kullandığı Elastisite modülleri ile yakınsadığı görülmüştür. Deney sonunda bir değerden sonra duvar plastik deformasyona uğramış ve model doğrusundan ayrılan bir eğri oluşmuştur. Oluşan şekil değişikliği Şekil 5.24.’de gösterilmektedir.



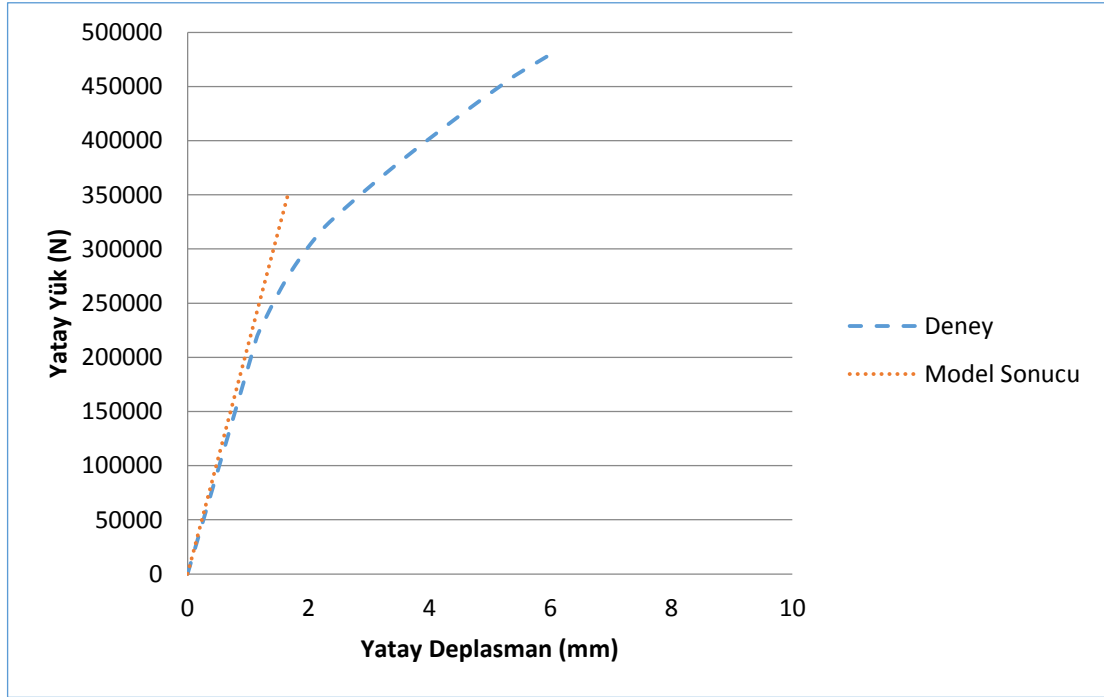
Şekil 5.23. W1 duvarı ardışık yatay yüklemeler sonucu yük-deplasman eğrisi (Kuruşcu, 2012).



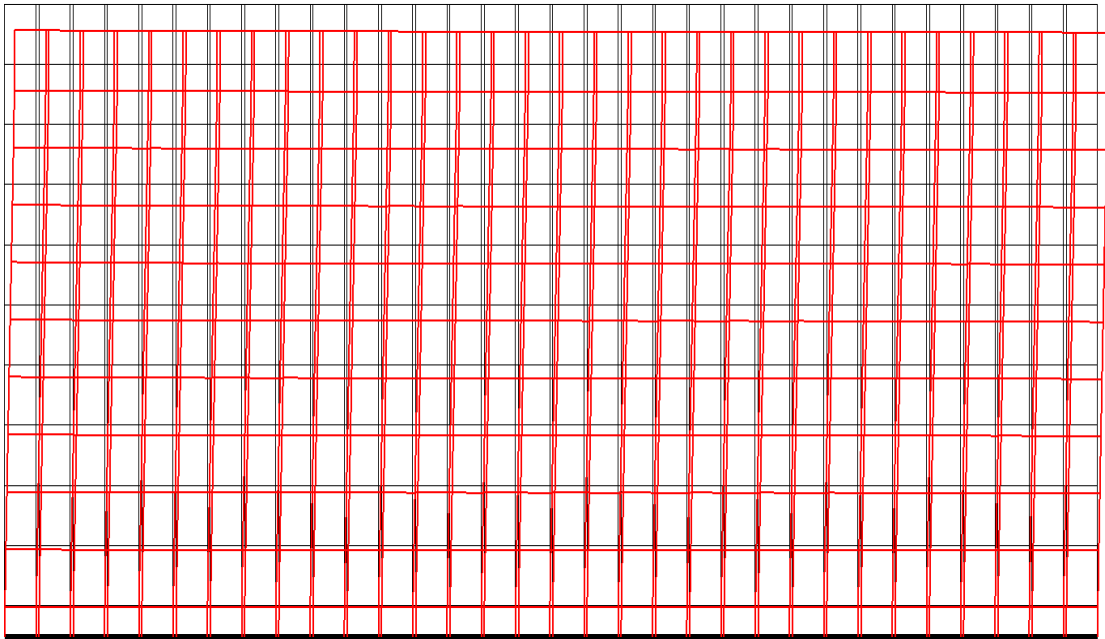
Şekil 5.24. W1 duvarı yükleme sonucu şekil değişikliği

W2 duvarı ilk duvardan farklı olarak düşey yük olarak 1.287 kN ile yüklenmiş ve ardışık yatay yüklemeler sonucunda bulunan yatay yük – yatay deplasman eğrisi Şekil 5.25.'de verilmiştir. Modelin analizi sonunda bulunan yatay yük – yatay deplasman doğrusu da aynı

grafiğe işlenmiş ve elastik bölgede deplasmanın neredeyse örtüştüğü görülmüştür. Oluşan şekil değişikliği Şekil 5.26.'da gösterilmektedir.



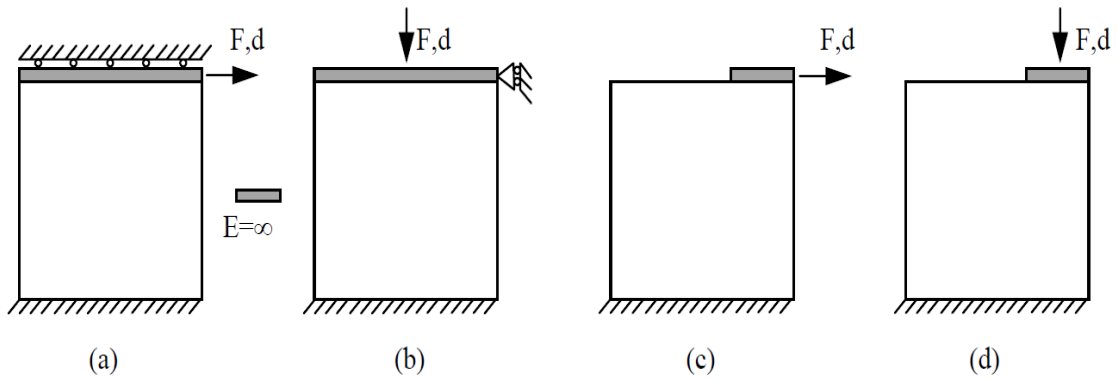
Şekil 5.25. W2 duvarı ardışık yatay yüklemeler sonucu yük-deplasman eğrisi (Kuruşcu, 2012).



Şekil 5.26. W2 duvarı yükleme sonucu şekil değişikliği

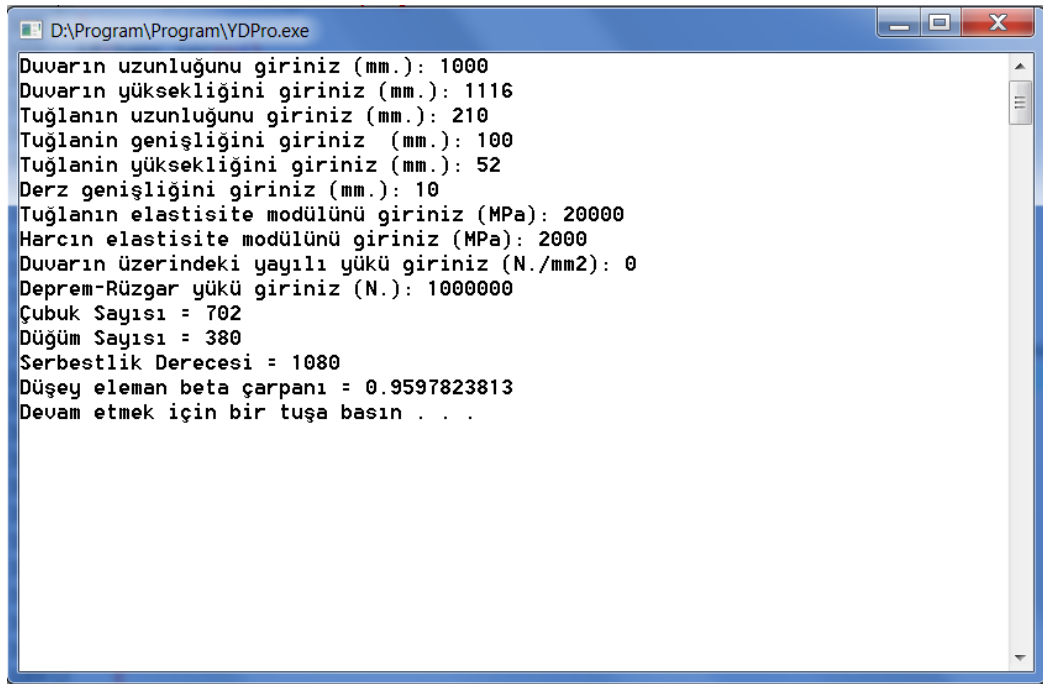
5.2.3. Lourenço yığma duvar modeli

Lourenço (1996)'nın yapmış olduğu doktora tezindeki çalışmada yer alan duvar modeli 18 sıra 210 x 52 x100 (mm³) boyutundaki tuğla ile 10 (mm) kalınlığındaki harç tabakasından teşkil edilmiştir. Ural (2009)'da da analizi yapılan duvar için Ural bloklar için elastisite modülünü 20.000 N/mm², harç içinse 2.000 N/mm² kullanmıştır. Burada kullanılan modellemeye de aynı değerler kullanılmıştır. Hem Lourenço (1996)'da, hem de Ural (2009)'da oluşturulan bu model üzerine 4 farklı yükleme gerçekleştirilerek maksimum deplasmanlar kaydedilmiştir. Yükleme şekilleri ve kaydedilen deplasmanlar Şekil 5.27.'da gösterilmiştir. Tüm yükleme değerleri 1.000 kN olarak alınmış, fakat ilk iki yükleme üstte rijit bloğa yayılı olarak yapılırken, son iki yükleme rijit tek tuğlanın ortasına tekil olarak yüklenmiştir.



Şekil 5.27. Modele ait yükleme şekilleri (Lourenço, 1996;Ural, 2009)

YDPro'da oluşturulan model sonrası ekran görüntüsü aşağıdadır (Şekil 5.28.).

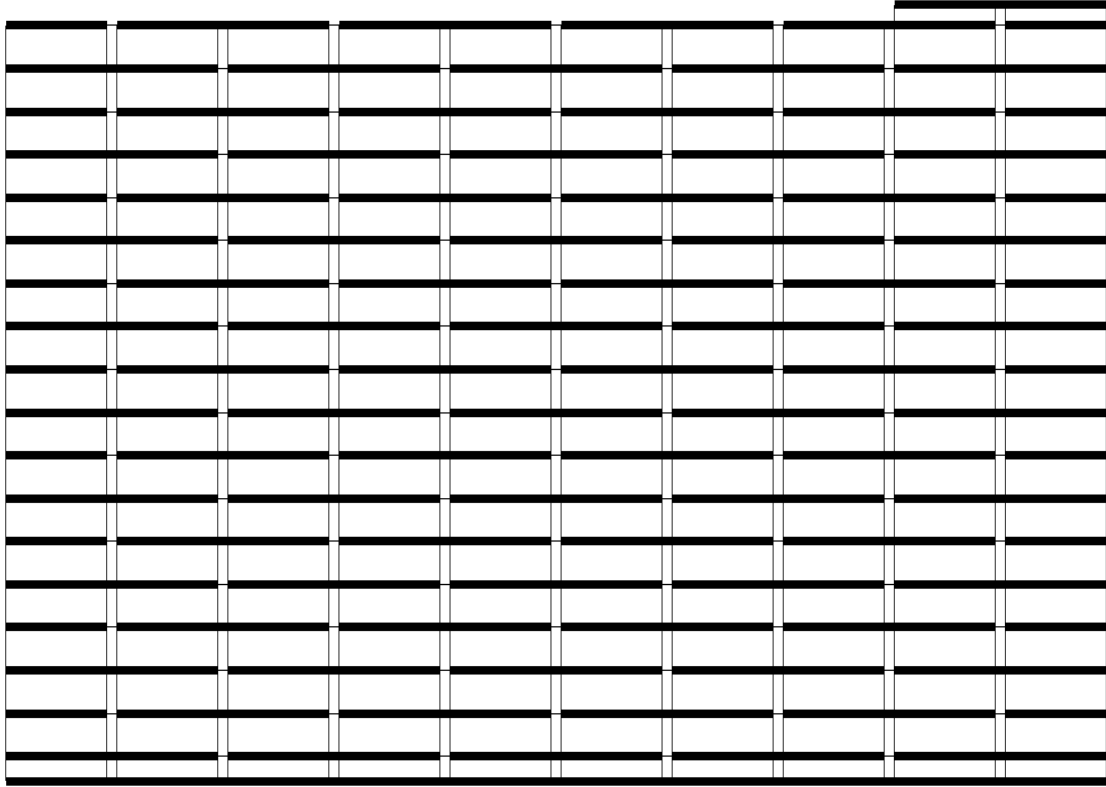


Şekil 5.28. Model veri giriş ekran görüntüsü.

Oluşan modellerle ilgili şematik gösterim de Şekil 5.29 ve Şekil 5.30.'da verilmiştir.



Şekil 5.29. 1. ve 2. yükleme sonucu oluşan model

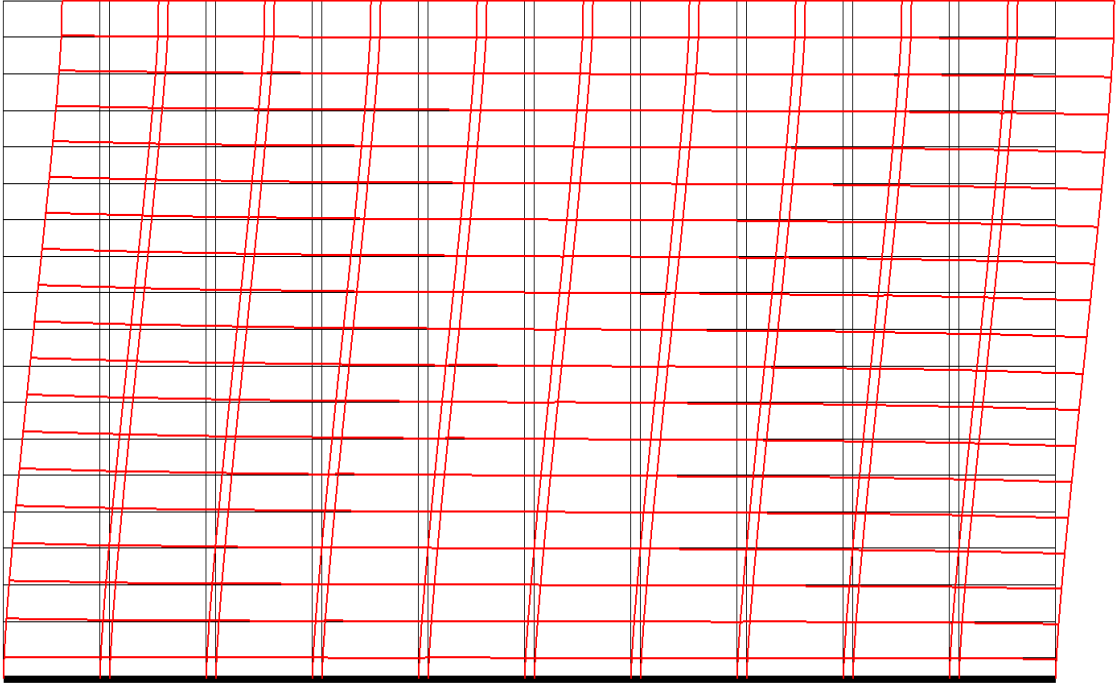


Şekil 5.30. 3. ve 4. yükleme sonucu oluşan model

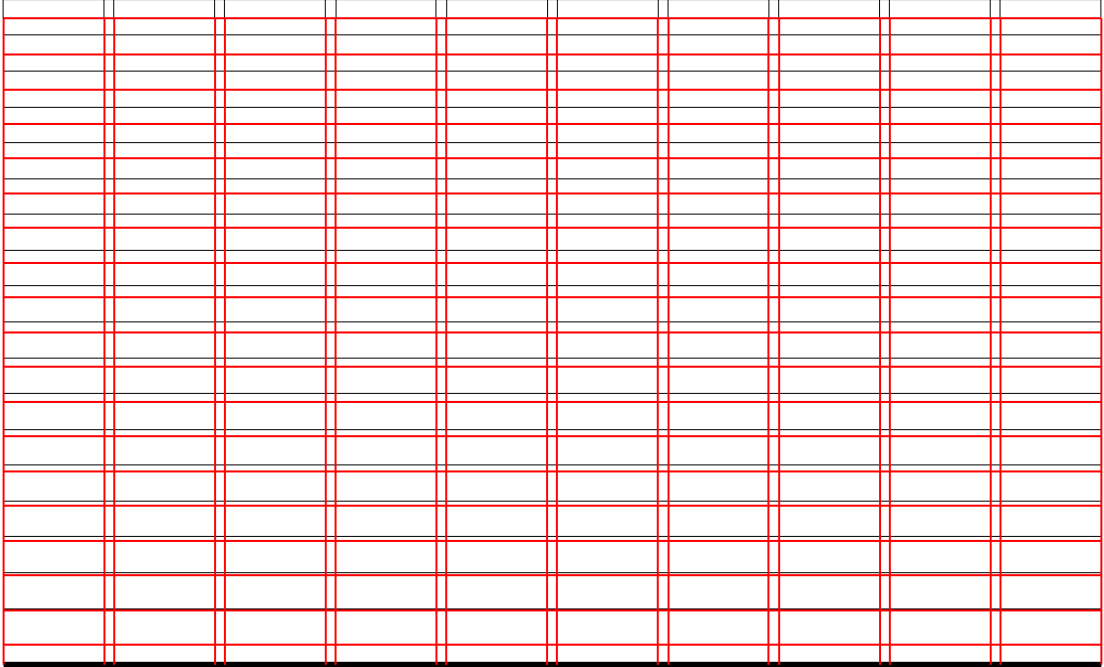
Yapılan yüklemeler sonucunda oluşan deplasman değerleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.2.'de verilmiştir. Daha sonra da her yükleme için oluşan şekil değişiklikleri sırasıyla Şekil 5.31., Şekil 5.32., Şekil 5.33., Şekil 5.34.'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Karşılaştırmalı deplasman değerleri

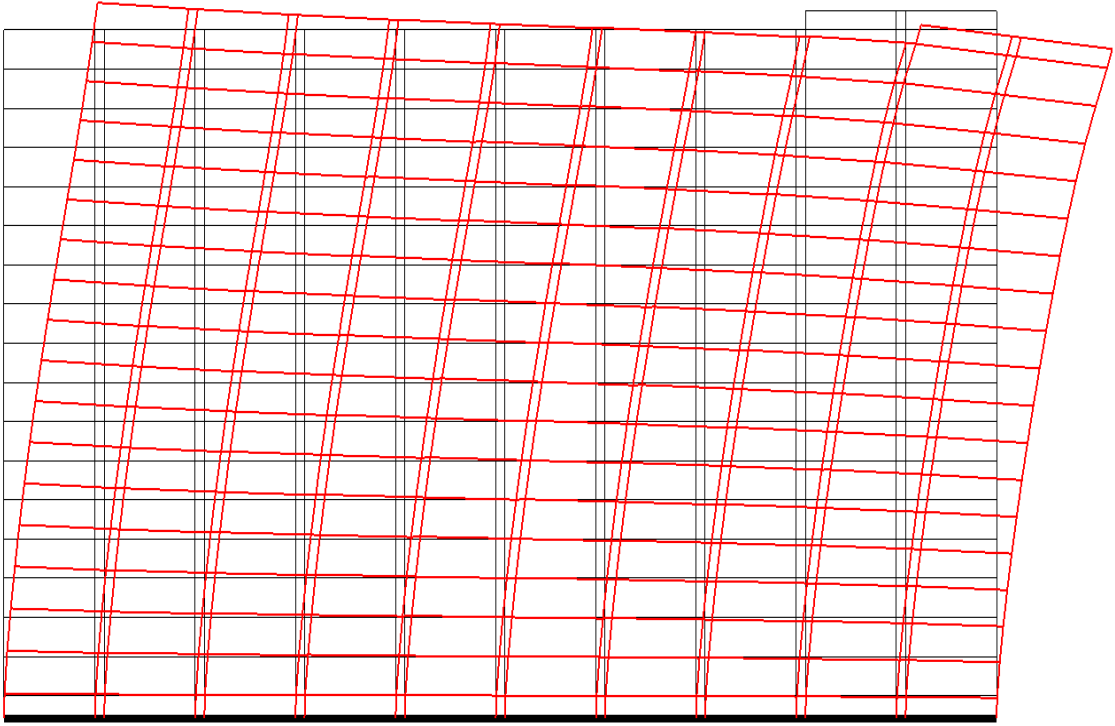
	Lourenço (1996) (mm)	LUSAS Ural (2009) (mm)	FEMMAS-L Ural (2009) (mm)	YDPro (mm)
Yükleme-1	5.39	5.413	5.413	5.6291
Yükleme-2	1.35	1.359	1.3588	1.3361
Yükleme-3	12.41	13	12.996	12.7928
Yükleme-4	3.82	3.85	4.62	5.27



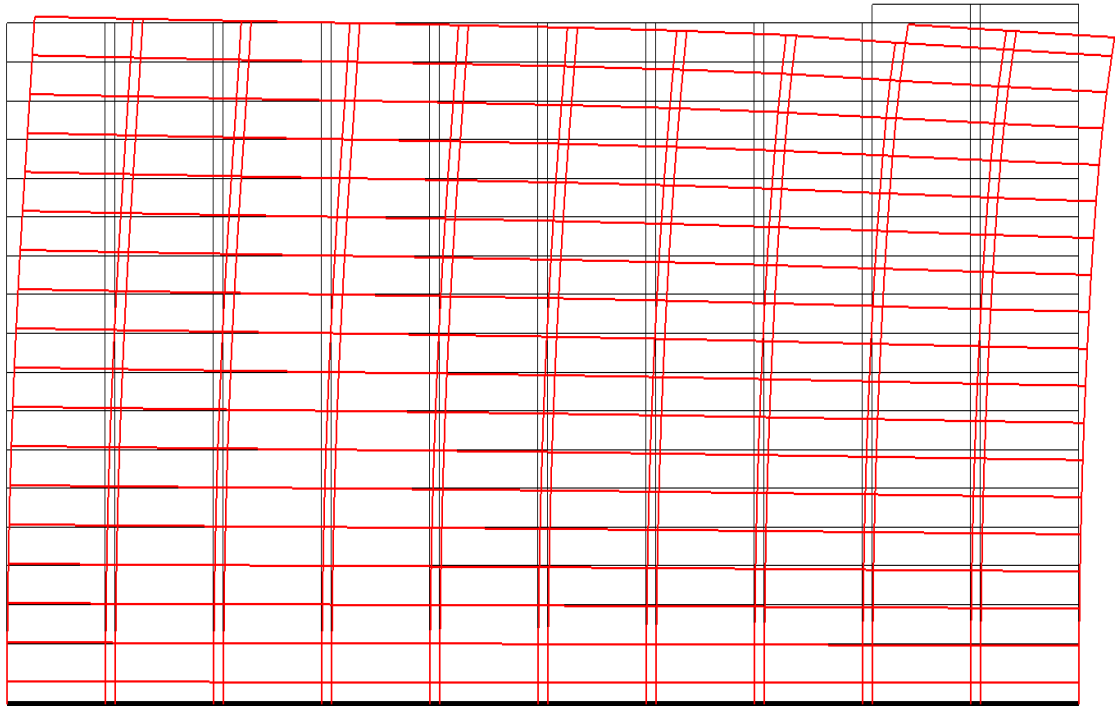
Şekil 5.31. 1. yükleme sonucu şekil değişikliği



Şekil 5.32. 2. yükleme sonucu şekil değişikliği



Şekil 5.33. 3. yükleme sonucu şekil değişikliği

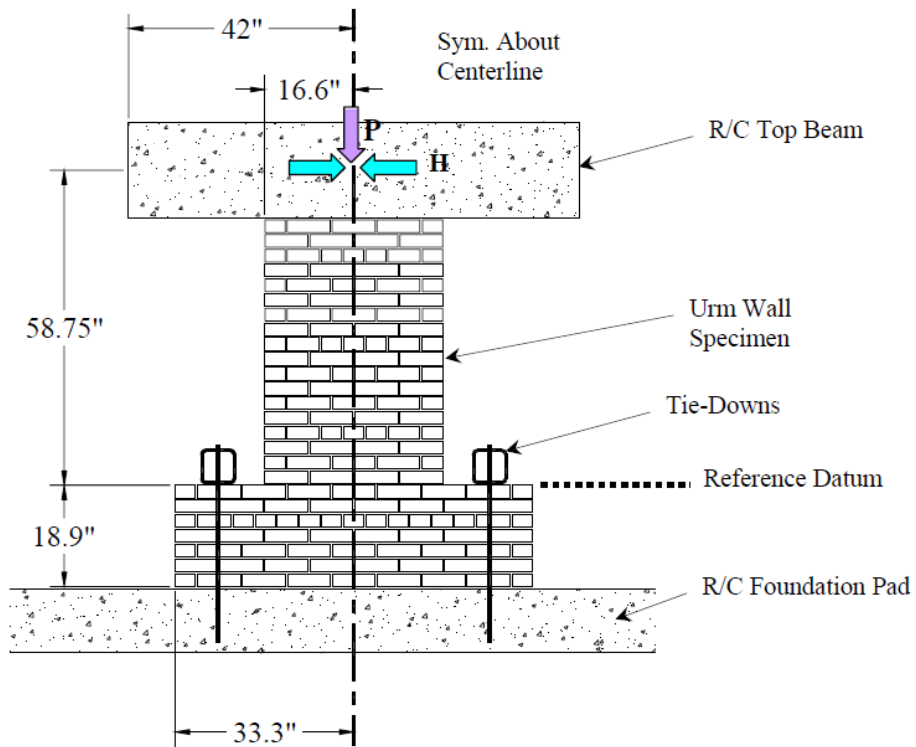


Şekil 5.34. 4. yükleme sonucu şekil değişikliği

5.2.4. Franklin yığma duvar deneyi modeli

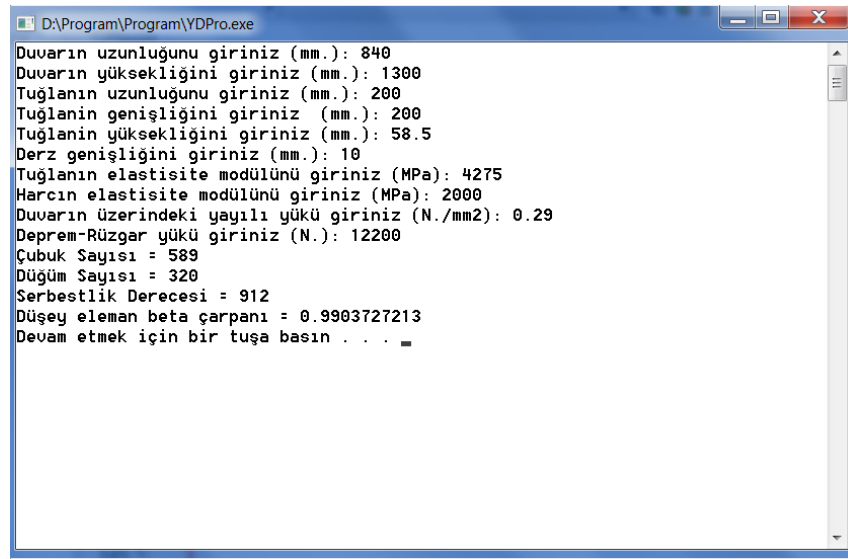
Franklin vd. (2001) tarafından kurulan deney düzeneğinde 8 farklı donatısız ve donatılı duvar değişik yüklemeler altında kırılmıştır. Bu duvarlardan 1F adındaki donatısız duvarın modellenmesi bu çalışma kapsamında yapılacaktır.

1F duvarı 840 mm. uzunluğunda, 1.500 mm. yüksekliğinde ve 200 mm. genişliğindedir. Franklin vd. (2001)'de de belirtildiği gibi önceden yapılan 10 adet örnek üzerinde yapılan deneyler sonucunda elastisite modülü yaklaşık 4.275 MPa bulunmuştur. Duvara yüklenen düşey yük değeri de yaklaşık 0.29 MPa'dır. Yüklenen bu düşey yük değerinin ardından yapılan ardışık yatay yüklemeler sonucu duvarın deplasmanı kaydedilmiştir (Demirel, 2010). Şekil 5.35.'de duvarın şematik gösterimi yer almaktadır. Duvarın altına ve üstünde rijit bloklar yer almaktadır.



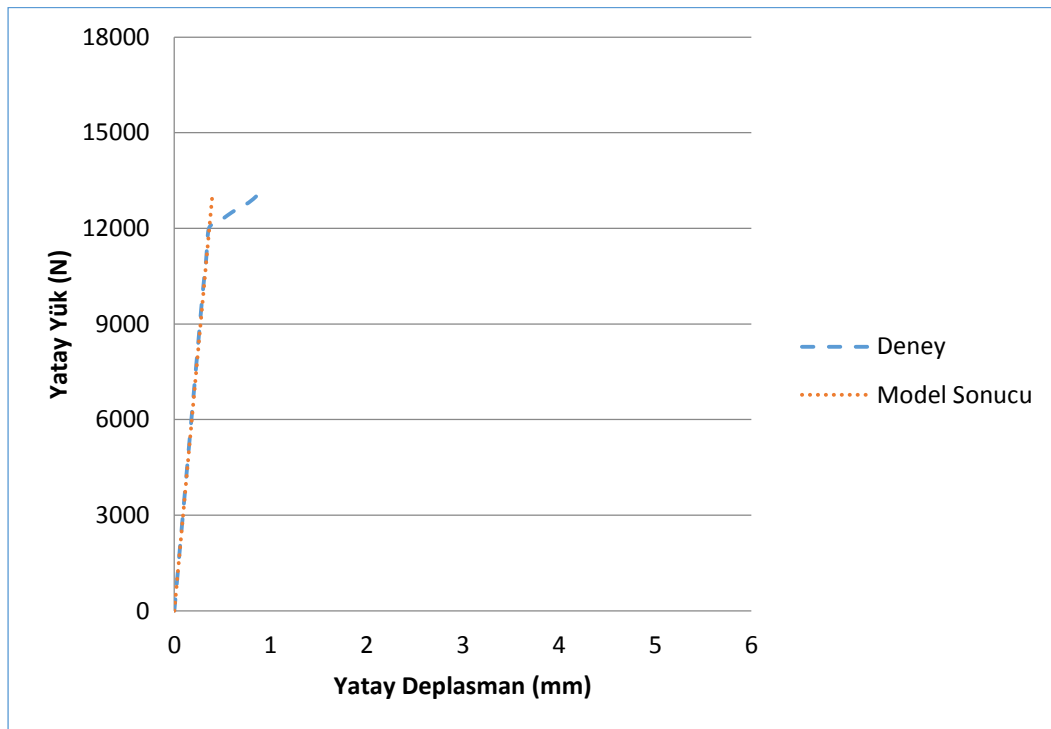
Şekil 5.35. 1F Duvarı geometrik özellikleri (Franklin vd., 2001)

Modelin uygulandığı 1F duvarı modelleme sonucu 589 çubuk eleman, 320 adet düğüm noktası ve 912 serbestlik derecesine sahip bir yapı olarak modellenmiştir (Şekil 5.36.).



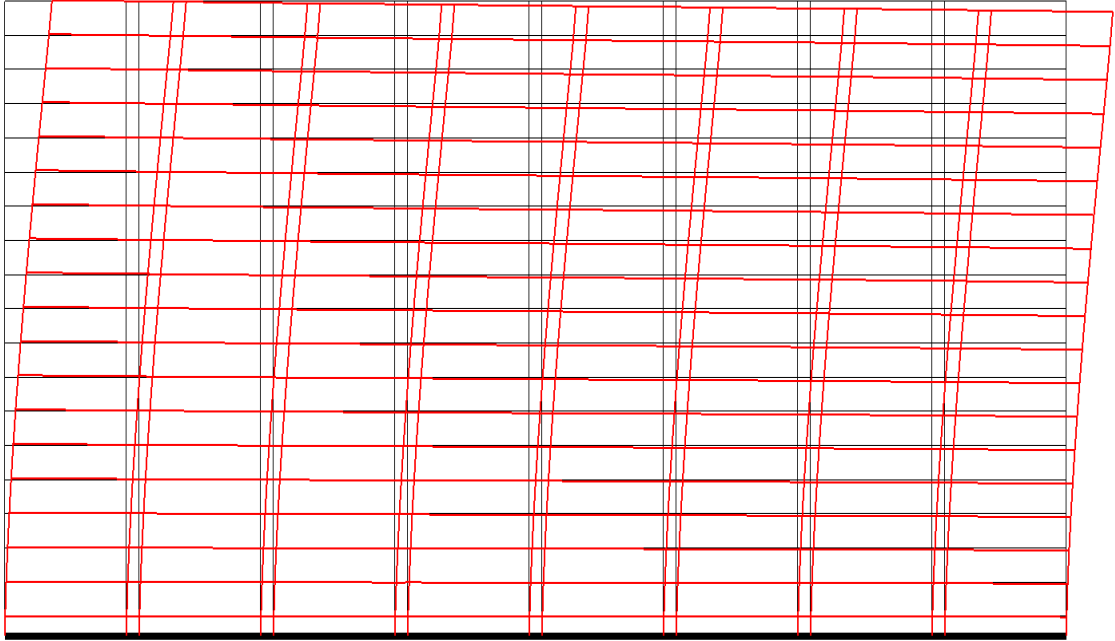
Şekil 5.36. 1F Duvarı modeli

Modele uygulanan ardışık yatay yüklemeler sonucu deney düzeneğinde ve YDPro modelinin çözümünde ulaşılan yatay yükleme – yatay yer değiştirme grafiği Şekil 5.37.’de gösterilmiştir.



Şekil 5.37. 1F duvarı ardışık yatay yüklemeler sonucu yük-deplasman eğrisi (Franklin vd. 2001).

1F duvarının modelleme sonucunda oluşan deplasmanların deney düzeneği sonuçlarına elastik bölgede son derece uyumlu olduğu görülmektedir. Modelin yükleme sonucu oluşan temsili şekil değişikliği de Şekil 5.38.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.38. 1F duvarı şekil değişikliği

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yığma yapılar ülkemizde ve hatta dünyada hala tercih edilen yapılardır. Özellikle kırsal kesimlerde çeşitli zorluklar (malzeme temini, maliyetler, işçilik vb.) yüzünden hâlâ yığma yapılar tercih edilmektedir. Yeni yapıların yanı sıra mevcut yapı stokunun da çoğunluğu hala yığma yapılar oluşturmaktadır.

Yığma yapıların matematiksel olarak modellenmesindeki zorluklara rağmen böyle bir modelleme de bir zorunluluktur. Literatürde yığma duvarların modellenmesi için makro ve mikro modelleme teknikleri verilmiştir. Daha hassas çözüm yapan mikro modelleme tekniği ile tuğla ve harç birimleri üç boyutlu olarak bloklar halinde veya iki boyutlu kabuk elemanlar ile modellenmektedir. Bu çalışmada tuğla ve harç birimleri iki boyutlu çubuk elemanlar olarak modellenmiştir. Bu da daha az düğüm sayısı ve daha az denklem manâsına gelmektedir. Çerçeve ve kafes elemanlar kullanılarak mikro modellenmesi yapılan duvarın elastik davranışını tespit etmek üzere modelin statik analizini gerçekleştirmek için bir bilgisayar programı (YDPro) geliştirilmiştir.

Literatürdeki yığma duvar deneylerinden bazılarının ve bazı modelleme örneklerinin geliştirilen bilgisayar programı YDPro ile yapılan analiz sonucunda elastik bölgede elde edilen deplasman değerleri ve yatay yük – yatay deplasman doğrusu literatür sonuçlarıyla oldukça uyumludur.

Elastik bölgede gayet başarılı sonuç veren bu modelleme tekniği deneysel çalışmalarla da desteklenerek plastik davranışın modellenmesinde kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılabilir. Ayrıca duvarın elastik davranışının modellendiği bu yöntem ile dolgu duvarların kolon giriş davranışlarına etkileri de incelenebilir ve yığma ve karkas yapılardaki taşıyıcı ve/veya dolgu duvarları bu yöntemle modellenerek yapı bir bütün olarak analiz edilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Arıcan, Y. (2010), Yığma Yapıların Deprem Etkisi Altındaki Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Asteris, P.G., ve Tzamtzis, A.D., (2003), On the Use of a Regular Yield Surface for the Analysis of Unreinforced Masonry Walls, *Electronic Journal of Structural Engineering* 3, s. 23 – 42.

Asteris, P.G. ve Syrmakizis, C.A. (2005), Strength of Unreinforced Masonry Walls under Concentrated Compression Loads. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 10(2), s. 133-140.

Aydan, Ö. (1997), Analysis of Masonry Structures by Finite Element Method, Prof. Dr. A. Rifat Yarar Symposium, İstanbul.

Bayülke, N., (1992), Gazbeton Blok Yığma Yapı Sarsma Tablası Deneyi Raporu, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Bayülke, N., (2011), Yığma Yapıların Deprem Davranışı Ve Güvenliği, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara.

Belmouden, Y., Lestuzzi, P. (2009), An equivalent frame model for seismic analysis of masonry and reinforced concrete buildings, *Construction and Building Materials*, s. 40-53.

Berto, L., Saetta, A., Scotta, R. ve Vitaliani, R. (2005), Failure Mechanism of Masonry Prism Loaded in Axial Compression: Computational Aspects, *Materials and Structures*, 38:276, s. 249-256.

Berto, L., Saetta, A., Scotta, R. ve Vitaliani, R. (2004), Shear Behaviour of Masonry Panel: Parametric FE Analyses, *International Journal of Solid and Structures*, 41:16-17, s. 4383–4405.

Brencich, A., Lagomarsino, S. (1998), A macro-element dynamic model for masonry shear walls, In: Pande GN and Middleton J, ed. *Computer methods in structural masonry - 4*, Proc. of the Int. Symp., E&FN Spon, Londra.

Caliò, I., Marletta, M., Pantò, B. (2012), A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings, *Engineering Structures*, 40, s. 327-338

Casolo, S., Peña, F. (2007), Rigid element model for in-plane dynamics of masonry walls considering hysteretic behaviour and damage, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(8):1029 - 1048.

Chaimoon, K. ve Attard, M.M. (2007), Modeling of Unreinforced Masonry Walls under Shear and Compression, *Engineering Structures*, s. 2056-2068.

Chen, S.Y., Moon, F.L., Yi, T. (2008), A macroelement for the nonlinear analysis of in-plane unreinforced masonry piers, *Engineering Structures* s. 2242-2252.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Dabanlı, Ö. (2008), Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

DBYBHY. (2007), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Demirel, İ. O. (2010), Tuğla Yığma Yapıların Deplasmana Bağlı Analizi İçin Doğrusal Olmayan Eşdeğer Çerçeve Modeli, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

DİE. (2000), Bina Sayımı, Devlet İstatistik Enstitüsü, Ankara.

Erköseoğlu, G., (2012), Kültürel Mirasın Depremden Korunması Ve Turizme Kazandırılması Amacı İle Uygulanabilecek Güçlendirme Teknikleri, Uzmanlık Tezi, T.C. Kültür Ve Turizm Bakanlığı Yatırım Ve İşletmeler Genel Müdürlüğü, Ankara.

Fenerci, A. (2013), The Effect Of Infill Walls On The Seismic Performance Of Boundary Columns In Reinforced Concrete Frames, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Formica, G., Sansalone, V. ve Casciaro, R. (2002), A Mixed Solution Strategy for the Nonlinear Analysis of Brick Masonry Walls, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 191: 51-52, s. 5847–5876.

Franklin, S., Lynch J., ve Abrams D. P., (2001), Performance of Rehabilitated URM Shear Walls: Flexural Behavior of Piers, ST-6 Project Final Report, Mid-America Earthquake Center Publications, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Gür, N.V., Deniz, Ö.Ş., Ekinci, S., (2012), Kagir Yığma Duvarlarda Taşıyıcı Malzeme Ve Bileşenler, 6. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu, Bursa.

Galasco, A., Lagomarsino, S., Penna, A., Resemini, S. (2004), Non-linear seismic analysis of masonry structures, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Kanada, s. 843.

Ganz, H. R., Thurlimann B., (1983), Strength of Brick Walls Under Normal Force and Shear, Proc. 8th int. Symp. on Load Bearing Brickwork, Londra.

Hogan, S.J. (1990), The many steady state responses of rigid block under harmonic forcing, Bulletin Earthquake Engineering and Structural Dynamics.

Housner, G.W. (1963), The behaviour of inverted pendulum structures during earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America.

Kappos, A.J., Penelis, G.G. ve Drakopoulos, C.G. (2002), Evaluation of Simplified Models for Lateral Load Analysis of Unreinforced Masonry Buildings, Journal of Structural Engineering, 128(7), s. 890.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kaya, Ç. (2010), Yığma Duvarların Elastik-Plastik Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Köksal, H.O., Karakoç, C. ve Yıldırım, H. (2005), Compressive Behavior and Failure Mechanisms of Concrete Masonry Prisms, Journal of Materials in Civil Engineering, 17(1), s. 107-115.

Kuruşcu, A.O. (2012), Yığma Duvar Ve Temellerde Doğrusal Olmayan Modelleme, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Lenci, S., Rega, G. (2006), A dynamical systems approach to the overturning of rocking blocks, Chaos, Solitons and Fractals.

Lourenço, P.B., (1996), Computational Strategies for Masonry Structures, Doktora Tezi, Delft University of Technology, Delft, Hollanda.

Lourenço P.B., (1998), Experimental and Numerical Issues in The Modelling of The Mechanical Behaviour of Masonry, Sturctural Analysis of Historical Constructions II, Barcelona, İspanya.

Lourenço, P.B., (2000), Structural behavior of civil engineering structures: Highlight in historical and masonry structures, Universidade do Minho, Portekiz.

Mandirola, M., Penna, A., Rota, M., Magenes, G., (2012), Experimental assessment of the shear response of autoclaved aerated concrete (AAC) masonry with flat truss bed-joint reinforcement, 15th International Brick and Block Masonry Conference, Florianópolis, Brezilya.

Milani, G., Lourenço, P.B. ve Tralli, A. (2005-a), A Micro Mechanical Model for the Homogenized Limit Analysis of out-of-plane Loaded Masonry Walls, 10th International Conference on Civil, Structural Environmental Engineering Computing, Rome, İtalya, s. 185.

Milani, G., Lourenço, P.B. ve Tralli, A. (2005-b), A Simple Homogenized Micro Mechanical Model for the Analysis at the Collapse of out-of-plane Loaded Masonry Walls, XVII Congresso AIMETA di Meccanica Teorica e Applicata, Firenze, İtalya, s. 1-12.

Molins, C., Roca, P. (1997), Capacity of masonry arches and spatial frames, Journal of Structural Engineering, ASCE, 124(6), s. 653.

Pina-Henriques, J. ve Lourenço, P.B. (2004), Masonry Micro Modeling Adopted a Discontinuous Framework, Proceedings of Seventh International Conference on Computational Structures Technology, Lisbon, Portekiz.

Raijmakers T.M.J. ve Vermeltfoort A.Th. (1992), Deformation Controlled Tests In Masonry Shear Walls, [in Dutch]. Report B-92-1156, TNO-Bouw, Delft.

Roca, P., Molins, C., Mari A.R. (2005), Strength capacity of masonry Wall structures by the equivalent frame method, Journal of Structural Engineering, 131 (10): s. 1601-10.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Sabatino, R. ve Rizzano G., (2010), Non linear static analysis of masonry structures simplified equivalent frames and accurate models, Proc. of 8th International Masonry Conference, Dresden, Almanya, s. 1211-1220.

Sattar, S. (2013), Influence Of Masonry Infill Walls And Other Building Characteristics On Seismic Collapse Of Concrete Frame Buildings, Doktora Tezi, University of Colorado, Colorado, ABD.

Shenton, H.W., Jones, N.P. (1991), Base excitation of rigid bodies, I: Formulation, ASCE Journal of Engineering Mechanics, 117:10, s. 2286-2306.

Sima, J.F., Roca, P., Molins, C. (2011), Nonlinear response of masonry wall structure subjected to cyclic and dynamic loading, Engineering Structures, s. 1955-1965.

Smoljanović, H., Živaljić, N., Nikolić Ž., (2013), Overview of the methods for the modelling of historical masonry structures, Journal of the Croatian Association of Civil Engineers Gradevinar, Hırvatistan.

Tomažević, M. (1999), Earthquake Resistant Design of Masonry Buildings, Singapore: Imperial College Press.

TS-2510. (1977), Kâgir Duvarlar Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 2515, (1985), Kerpiç Yapıların Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 704., (1979), Harman tuğlası (duvarlar için) Türk Standartları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 705, (1985), Duvarlar İçin Dolu ve Delikli Fabrika Tuğlaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1996-1-1+A1, (2005), Kâgir yapıların tasarımı - Bölüm 1-1: Donatılı ve donatısız kâgir yapılar için genel kurallar (Eurocode 6), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Tso, W.K., Wong, C.M. (1989), Steady state rocking response of rigid blocks, Part I: Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, s. 89-120.

Ural, A. (2009), Yığma Yapıların Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Ural, A., Doğançın, A. (2007), Mikro Modelleme Tekniği Kullanılarak Yığma Yapıların Deprem Performanslarının İncelenmesi, International Earthquake Symposium Kocaeli 2007, Kocaeli, s. 323-331.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Ural, A., Doğangün, A. (2009), Yığma Duvarların Kayma Kapasitelerini Etkileyen Parametreler: Desteksiz Duvar Uzunluğu, e-Journal of New World Sciences Academy 2009, 4, (3), s. 340-350, www.newwsa.com.

Ünay, A. İ., (2002), Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, Ankara: ODTÜ Mimarlık Fakültesi Basım İşliği.

Vermeltfoort, A.Th. ve Raijmakers, T.M.J. (1993), Deformation Controlled Tests in Masonry Shear Walls, Part 2 (in Dutch). Report TUE/BKO/93.08. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Hollanda.

Vermeltfoort, A.T., Raijmakers, T.M. ve Janssen, H.J. (1993), Shear Tests on Masonry Walls, Proc. 6th North American Masonry Conference, Kanada, s. 1183-1193.

Yim, C., Chopra, A.K., Penzien, J., (1980), Rocking response of rigid blocks to earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 8: s. 565–587.

Yim, S.C.S., Lin, H. (1991), Nonlinear impact and chaotic response of slender rocking objects, ASCE Journal of Engineering Mechanics, s. 2079-2100.

Zucchini, A. ve Lourenço, P.B. (2002), A Micro Mechanical Model for the Homogenization of Masonry, International Journal of Solids and Structures. 39, s. 3233-3255.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Uğur KAFKAS

Doğum Tarihi ve Yeri: 16 Eylül 1978, Kütahya

Medeni Durumu: Evli

email: ugur.kafkas@dpu.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Kurum	Bölüm	Mezuniyet Tarihi
Lise	Ali Güral Lisesi		1997
Önlisans	Dumlupınar Üniversitesi	İnşaat	1999
Lisans	Selçuk Üniversitesi	Sosyoloji	2003
Lisans	Dumlupınar Üniversitesi	İnşaat Mühendisliği	2013
Yüksek Lisans	Dumlupınar Üniversitesi	İnşaat Mühendisliği	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2004 – Halen	Dumlupınar Üniversitesi	Tekniker

YABANCI DİL

İngilizce