

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YIĞMA DUVARLARIN ELASTİK-PLASTİK HESABI

İnş. Müh. Çiğdem KAYA

**FBE İnşaat Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd Doç. Dr. Bilge DORAN

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
1.2 Önceki Çalışmalar	2
2. YIĞMA YAPILARDA KULLANILAN MALZEMELER	4
2.1 Tuğla	5
2.1.1 Harman Tuğlası	6
2.2 Doğal Taş Malzeme	8
2.3 Kerpiç	10
2.4 Harç	11
2.4.1 Kireç Harcı	12
2.4.2 Horasan Harcı	12
3. YIĞMA YAPI ELEMANLARI	13
3.1 Duvar	14
3.2 Döşeme	17
3.2.1 Volta Döşeme	18
3.2.2 Adi Volta Döşeme	18
3.3 Kemer	19
3.4 Kubbe	22
3.5 Tonoz	23
4. YIĞMA DUVARIN MODELLENMESİ	25
4.1 Sonlu Eleman Metodu	25
4.2 Doğrusal Olmayan Sistemlerde Sonlu Eleman Yöntemi	26
4.3 Drucker-Prager Malzeme Modeli	28
4.4 Yığma Yapılarda Kullanılan Modelleme Teknikleri	31
4.4.1 Mikro modelleme	32
4.4.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme	32
4.4.3 Makro Modelleme	34
4.5 Örnek Model Üzerinde Çalışmalar	36

5.	SONUÇ ve ÖNERİLER	52
	KAYNAKLAR.....	53
	ÖZGEÇMİŞ.....	56

SİMGE LİSTESİ

σ	Gerilme
ε	Birim deformasyon
E	Elastik modül
ϕ	İçsel sürtünme açısı
c	Kohezyon
c_b	Tuğla için kohezyon değeri
c_{mr}	Harç için kohezyon değeri
f_b	Tuğlanın basınç dayanımı
f_{mr}	Harcın basınç dayanımı
ϕ_{mr}	Harcın içsel sürtünme açısı
t_b	Tuğlanın et kalınlığı
t_{mr}	Harcın et kalınlığı
P	J4D duvarı için uygulanan düşey yük
ν	Poisson oranı
E_m	Harcın elastisite modülü
E_{br}	Tuğlanın elastisite modülü
E_M	Yığma duvarın elastisite modülü

KISALTMA LİSTESİ

TS	Türk Standartları
DOHT	Dolu harman tuğlası
DEHT	Delikli harman tuğlası
M.S.	Milattan sonra

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Dolu ve delikli tuğla elemanlar (TS 704, 1979).....	5
Şekil 2.2 Afganistan da kerpiçten yapılan savunma maksatlı surlar (Bayraktar, 2006).....	11
Şekil 3.1 Yığma taşıyıcı sistemin yapım aşamaları a,b,c,d,e (Arun, 2003).....	13
Şekil 3.2 Taş tuğla karışımı taşıyıcı kargir duvar (Bayraktar, 2006)	15
Şekil 3.3 Tuğla duvar örgüleri.....	16
Şekil 3.4 Taş duvar örgüleri	16
Şekil 3.5 Demir kenet ve zıvanalarla desteklenmiş yanaşık derzli kesme taş duvar örgüsü (Akıncı, 1998).....	17
Şekil 3.6 Volta döşeme.....	18
Şekil 3.7 Volta döşeme duvar birleşim detayı.....	18
Şekil 3.8 Adi volta döşeme.....	19
Şekil 3.9 Düz tavanlı adi volta döşeme	19
Şekil 3.10 Kemerin muhtelif kısımlarının isimleri.....	20
Şekil 3.11 Kemerlerde yük akışının gösterilmesi (Kuruşçu, 2005).....	21
Şekil 3.12 Kemer yapım şekilleri ((Mahrabel, 2006).....	21
Şekil 3.13 Ayasofya, İstanbul.....	22
Şekil 3.14 Kubbelerde yük taşıma mekanizması (Kuruşçu, 2005).....	22
Şekil 3.15 a) İlkel tonoz, b) Beşik tonoz, c) Çapraz veya haçvari tonoz, d) Manastır tonozu (Kuruşçu, 2005)	23
Şekil 3.16 Tonoz biçimlenmeleri (Hasol, 1998).....	24
Şekil 4.1 Doğrusal elastik malzeme (Köksal ve Köksal, 1996)	26
Şekil 4.2 Doğrusal olmayan elastik malzeme (Köksal ve Köksal, 1996).....	26
Şekil 4.3 Yumuşak çelikte $\sigma - \epsilon$ eğrisi (Köksal ve Köksal, 1996).....	27
Şekil 4.4 İdeal elasto-plastik malzeme (Köksal ve Köksal, 1996)	27
Şekil 4.5 Drucker-Prager kriteri: (a) meridyen düzlemi, $\theta = 0^\circ$; (b) π düzlemi (Chen, 1982).....	29
Şekil 4.6 Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriterlerinin karşılaştırılması, (a) asal gerilme uzayında, (b) deviator düzlemde (Chen ve Han, 1988).	30
Şekil 4.7 Yığma duvarlarındaki modelleme teknikleri, a) Mikro modelleme, b) Basitleştirilmiş mikro modelleme, c) Makro modelleme (Lourenço, 1996).....	32
Şekil 4.8 Drucker-Prager kriteri (Chen ve Mizuno, 1990).	33
Şekil 4.9 Ortotropik Rankine kriteri için kırılma yüzeyi ($\tau_{xy} \geq 0$ için.....	33
Şekil 4.10 Hill kriteri için kırılma yüzeyi ($\tau_{xy} \geq 0$ için.....	33
Şekil 4.11 Kompozit arayüzey kırılma kriteri (Lourenço, 1996)	34

Şekil 4.12 Basitleştirilmiş mikro model tekniği	34
Şekil 4.13 Roma’ daki St. Peter’s Bazilikası (Lourenço, 2002).....	35
Şekil 4.14 Ayasofya Camii sonlu eleman modeli (www.LUSAS.com).....	36
Şekil 4.15 Eindhoven yığma duvarı JD4 için deneysel kırılma örneği (Zucchini ve Lourenço, 2009)	36
Şekil 4.16 3 boyutlu katı eleman için kullanılan HX8M eksen ve modeli (LUSAS-ver.13.6).....	37
Şekil 4.17 Mikro model de 3 boyutlu J4D duvarı düşey yükleme	38
Şekil 4.18 Mikro model de 3 boyutlu J4D duvarı yatay yükleme.....	38
Şekil 4.19 Eindhoven duvarı, deneysel ve 3 boyutlu mikro model için yatay yük–yer değiştirme grafiği	39
Şekil 4.20 Mikro modelde 3 boyutlu sonlu eleman ağı için şekil değiştirmiş durum	40
Şekil 4.21 2 boyutlu ince kabuk eleman için kullanılan QTS4 eksen ve modeli (LUSAS-ver.13.6)	40
Şekil 4.22 2 boyutlu ince kabuk eleman için dönme serbestlikleri (LUSAS-ver.13.6)	41
Şekil 4.23 Mikro modelde kabuk eleman için sonlu eleman ağı (düşey yükleme).....	41
Şekil 4.24 Mikro modelde kabuk eleman için sonlu eleman ağı (yatay yükleme).....	42
Şekil 4.25 Eindhoven duvarı, deneysel ve 2 boyutlu mikro model için yatay yük–yer değiştirme grafiği	42
Şekil 4.26 Mikro modelde 2 boyutlu sonlu eleman ağı için şekil değiştirmiş durum	43
Şekil 4.27 Mikro modelde 3 boyutlu ve 2 boyutlu sonlu elemanların, deneysel yatay yük–yer değiştirme eğrileri ile karşılaştırılması.....	43
Şekil 4.28 Makro modelde 2 boyutlu 40x50x50 mm boyutlarında sonlu eleman ağı (düşey yükleme)	44
Şekil 4.29 Makro modelde 2 boyutlu 40x50x50 mm boyutlarında sonlu eleman ağı (yatay yükleme)	44
Şekil 4.30 2 boyutlu ince kabuk eleman için kullanılan QTS4 eksen ve modeli (LUSAS-ver.13).....	45
Şekil 4.31 2 boyutlu ince kabuk eleman için dönme serbestlikleri (LUSAS-ver.13.6)	45
Şekil 4.32 2 boyutlu makro model ve deneysel yatay yük–yer değiştirme grafiği	47
Şekil 4.33 2 boyutlu makro modelde şekil değiştirmiş durum.....	47
Şekil 4.34 Makro modelde 3 boyutlu 40x50x50 mm boyutlarında sonlu eleman ağı (düşey yükleme)	48
Şekil 4.35 Makro modelde 3 boyutlu 40x50x50 mm boyutlarında sonlu eleman ağı (yatay yükleme)	48

Şekil 4.36 3 boyutlu katı eleman için kullanılan HX8M eksen ve modeli (LUSAS-ver.13) ..	49
Şekil 4.37 3 boyutlu makro model ve deneysel yatay yük-yer değiştirme grafiği	50
Şekil 4.38 3 boyutlu makro modelde şekil değiştirmiş durum	50
Şekil 4.39 Makro modelde 3 boyutlu ve 2 boyutlu sonlu elemanların, deneysel yatay yük-yer değiştirme eğrileri ile karşılaştırılması.....	51
Şekil 4.40 Makro ve mikro modelde 3 boyutlu ve 2 boyutlu sonlu elemanların, deneysel yatay yük-yer değiştirme eğrileri ile karşılaştırılması	51

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Tuğlaların ortalama fiziksel özellikleri (Ünay, 2002)	6
Çizelge 2.2 Biçim ve basınç dayanımlarına göre harman tuğlası sınıfları (TS 704, 1979).....	7
Çizelge 2.3 Harman tuğlasının boyutları (mm) (TS 704, 1979).....	7
Çizelge 2.4 Doğal yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri (Ünay, 2002)	8
Çizelge 2.5 Doğal duvar taşlarının dayanım gruplarına göre en küçük basınç dayanımları (TS 2510, 1977)	9
Çizelge 4.1 3 boyutlu mikro model için malzeme parametreleri	39
Çizelge 4.2 Mikro modelde kabuk eleman için kullanılan parametreler.....	42
Çizelge 4.3 Makro model için homojenleştirmede kullanılan parametreler	46
Çizelge 4.4 Makro model için modelde kullanılan parametreler	46
Çizelge 4.5 Makro model için homojenleştirmede kullanılan parametreler	49
Çizelge 4.6 Makro model için modelde kullanılan parametreler	50

ÖNSÖZ

Tezin yürütülmesi sırasında tüm iyi niyetiyle bana her türlü yardımı sağlayan başta tez danışmanım Sayın Yrd Doç. Dr. Bilge Doran' a, deneyimlerini, bilgilerini ve yardımlarını benden esirgemeyen Sayın Dr. Hafez Keypour' a ve Sayın Ali Bayraktar'a, çalışmalarımı destekleyen TÜBİTAK' a, tez süresi boyunca benden manevi desteğini esirgemeyen tüm aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Büyük depremlerin kısa periyotlarla meydana geldiği Ülkemizde, bu yer hareketlerine karşı dayanıksız olan birçok tarihi yığma bina bulunmaktadır. Tarihi yapıların depreme karşı dayanıksız olmalarının en önemli nedeni yığma malzemenin doğrusal olmayan davranışı ve çekme dayanımının çok düşük olmasıdır.

Yığma yapıların en önemli taşıyıcı elemanı yatay yükleri karşılayacak olan donatısız yığma duvarlardır. Literatürde donatısız yığma duvarlarla ilgili çok az sayıda deneysel veri bulunduğundan, yatay ve düşey yükler etkisinde olan duvarların davranışları ile ilgili hala yanıt bekleyen birçok soru bulunmaktadır ve deneysel verilerle uyum gösteren uygun sayısal modelleme tekniği henüz tam olarak ortaya konamamıştır. Bu çalışmanın esas amacı, donatısız yığma duvarların doğrusal olmayan analizi ile ilgili modelleme tekniklerinin araştırılmasıdır.

Yığma yapıların elastik-plastik hesabı, diğer teorik hesap tekniklerinin yanında oldukça pratik olacaktır. Çalışmada, elastik-plastik hesapta kırılma kriteri olarak Drucker-Prager modeli kullanılmıştır. Drucker-Prager kırılma kriterinin ihtiyaç duyduğu malzeme parametreleri kohezyon ve içsel sürtünme açısıdır. Bu tez kapsamında aynı zamanda, anılan malzeme parametrelerinden kohezyon değerleri, içsel sürtünme açısı sabit alınmak suretiyle araştırılmıştır. Bu bağlamda, literatürde yer alan donatısız yığma duvarlar farklı sonlu eleman tipleri, mikro ve makro gibi modelleme teknikleri kullanılarak sonlu elemanlar tekniği ile çözümleme yapılmıştır. Analiz sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmış, parametrelerin uygunluğu sınanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yığma yapılar, Drucker-Prager kriteri, sonlu eleman yöntemi, modelleme teknikleri

ABSTRACT

There is huge number of historical masonry structures which is vulnerable to seismic ground motions in Turkey. Catastrophic earthquakes with quite short periods often occur in Turkey. The high seismic vulnerability of historical buildings is due to the mechanical properties of masonry material such as the highly non-linear behavior and very small tensile strength. The main structural component of masonry buildings is the unreinforced masonry (URM) shear walls used as responsible for carrying the lateral loading such as wind and earthquake. As the lack of the experimental data for URM walls in literature, there is a still unresolved aspect in the assessment of the behavior of unreinforced masonry walls under shear and compression and we are still far from efficient numerical procedures in harmony with the results of full scale tests. The main contribution of this study is to present several numerical simulations of URM walls using non-linear finite element analysis (NLFEA).

The elasto-plastic analysis of masonry structures refer to simple solutions rather than using complex theoretical models. In this study, Drucker-Prager criterion is selected for the elasto-plastic analyses. The main parameters of Drucker-Prager criterion are cohesion and internal friction angle. This thesis also aims to explore the cohesion parameter while the internal friction angle is kept constant. In this context, URM walls located in the literature are simulated using different finite-element types and modeling techniques such as micro and macro modeling. The results of analysis for micro and macro models are compared with the experimental results.

Key Words: Masonry structures, Drucker-Prager yield criterion, finite element method, modeling techniques,

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Ülkemizde kırsal kesimlerin büyük bir çoğunluğunda taş, kerpiç, briket veya pişmiş toprak tuğlalar kullanılarak yığma türü yapılar inşa edilmektedir. 2000' li yıllarda Devlet İstatistik Enstitü' nün Türkiye' de ki bina türlerini belirlemeye yönelik yapmış olduğu sayımlarda binaların yaklaşık olarak %51' inin yığma yapı olduğu saptanmıştır (DİE, 2000). Yapılan bu araştırmada da görüldüğü üzere; yığma yapıların kolay inşa edilebilmesi, ekonomik, estetik, sağlam olması yangın, don vb. dış etkilere karşı dayanımlarının yüksek olması ve az bakım gerektirmesi bu tür yapıların yaygın olarak kullanılmasının nedenleri arasında gösterilebilir.

Yığma yapılar ile ilgili yapılan çalışmaların birçoğunu; bu yapıların en önemli yapısal elemanlarından biri olan taşıyıcı duvarların incelendiği araştırmalar oluşturmaktadır. Yapılan bu araştırmalarda, çeşitli modelleme teknikleri kullanılarak taşıyıcı duvarların malzeme parametreleri ve bu parametrelerin davranışa olan etkileri belirlenmektedir. Yığma yapıların nümerik analizlerinde karmaşık modelleme tekniklerinden çok basitleştirilmiş modelleme tekniklerinin kullanılması zaman ve pratiklik açısından önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında öncelikle yığma yapı elemanları ve bu elemanlardan temel taşıyıcı olan yığma duvarlar ve malzeme karakteristikleri incelenmiştir. Çalışmada, yığma duvarların farklı sonlu eleman tipleri ve farklı modelleme teknikleri kullanılarak söz konusu parametrelerin değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Yığma duvar analizinden yapısal sistem analizine geçildiğinde modelleme kolaylığı ve analiz süresinin kısalmasını sağlamak için makro modelleme ile uygun parametreler kullanılarak deneysel sonuçlara yakın verilere ulaşmak hedeflenmiştir.

Doğrusal olmayan sistemlerin analizlerinde yaygın olarak kullanılan LUSAS-ver.13.6 paket programı tercih edilerek literatürde deneysel sonuçları var olan belirli yükler altındaki örnek bir duvar modellenmiştir. Daha önce çalışmaları yapılmış olan üç boyutlu mikro model (Köksal vd., 2010), iki boyutlu sonlu eleman ağına dönüştürülerek modelin analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizlere ek olarak; örnek duvarın makro modelleme tekniği ile de iki boyutlu ve üç boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Modeller oluşturulurken yığma duvarların doğrusal olmayan iki ve üç boyutlu sonlu eleman analizlerinde Drucker-Prager malzeme kırılma kriteri esas alınmıştır. Drucker-Prager kriterinin ihtiyaç duyduğu malzeme parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısının belirlenmesi için literatürdeki bazı çalışmalardan yararlanılmıştır.

İki ve üç boyutlu mikro ve makro modellerde kullanılan parametreler ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Gerek modelleme gerekse analiz aşamasında kolaylık sağlaması açısından makro model kullanımı önerilmiştir.

1.2 Önceki Çalışmalar

Yığma yapılarda kullanılan modelleme teknikleri ile elastik ötesi davranış hakkında P.B. Lourenço (1996)' tarafından hazırlanan doktora çalışmasında oldukça faydalı bilgiler sunulmaktadır. Lourenço (1996) çalışmasında mikro modelleme tekniği ile yapılacak olan modellemelerde mümkün olabilecek tüm göçme mekanizmalarını dikkate alan matematiksel bir model geliştirmiştir. Bu model ile malzemelerin gerçek davranışlarını dikkate alarak Rankine ve Hill kriterlerini birleştirmek sureti ile bir sınır yüzeyi elde etmiştir. Geliştirmiş olduğu modellerden elde ettiği sonuçları literatürde yapılmış olan deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmıştır.

Köksal vd. (2004, 2005), yaptıkları çalışmalarda yığma prizmaların ve sıvalı beton prizmaların basınç dayanımlarını plastik analiz ile belirli bir kırılma kriteri kullanarak ve izotropik hasar modeli ile ayrı ayrı belirlemeye çalışmışlardır. Ayrıca bu çalışmada, kırılma kriteri olarak Drucker-Prager modeli için gerekli olan kohezyon ve sürtünme açısı değerleriyle ilgili bir bağıntı da önermişlerdir. Buna göre blok ve harca ait kohezyon değerleri belirledikleri aşağıdaki formüllerde hesaplanmaktadır:

$$c_b = \frac{f_b}{4} \quad (1.1)$$

$$c_{mr} = 0,129f_{mr} + 1,85 \quad (1.2)$$

Burada f_b ve f_{mr} sırasıyla blokların ve harcın basınç dayanımlarını temsil etmektedir. Ayrıca harca ait sürtünme açısı için (1.3) bağıntısı önerilmiştir:

$$\varphi_{mr} = 1,519 \cdot f_{mr} \quad (1.3)$$

Buna karşın blokların sürtünme açısı değerleri hakkında herhangi bir formülasyon vermemişlerdir.

Asteris ve Tzamtzis (2003), çalışmalarında donatısız yığma yapıların sonlu elemanlar modellemesinde makro modellemeyi dikkate alarak iki eksenli gerilme hali için bir algoritma önermişlerdir. İki eksenli gerilme altındaki model için, anizotropik kırılma yüzeyi tanımlamışlardır.

Batur (1999), çalışmasında donatısız yığma binanın yatay yükler altındaki davranışını incelemiş ve konu ile ilgili Türk Standartlarını, Eurocode 8, AIJ, ACI ve BS 5628 ile karşılaştırmıştır. Türk şartnamelerinin eksik olduğu durumları belirtmiş ve önerilerde bulunmuştur. Çalışmanın sonunda 3 katlı donatısız yığma binanın yatay ve düşey yükler altında çözümü yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir.

Ural (2009), geliştirilmiş olan bir adet pratik deprem hesabı programı ile sonlu elemanlar programı olan LUSAS ve DIANA yardımıyla çeşitli analizler gerçekleştirmiştir. Yığma duvar dayanımlarını, yığma yapıların deprem davranışlarını etkileyecek olan bazı parametreler (harç ve tuğla dayanımları, örgü biçimleri, düşey hatıllarının durumları gibi) yapısal modeller yardımıyla irdelenmiştir. Önerilen modelleme tekniği depremde hasara uğramış gerçek bir yığma yapı üzerinde uygulanmış, sonuçlar tartışılmıştır. Ayrıca çalışmada, harç ve yığma birimlerin dayanımlarının, örgü biçimlerinin ve hatılların yerleştirilme biçimlerinin duvarın yük taşıma kapasitesine etkileri ortaya konmuş, bu konuda çalışacak olanlara açık kaynak kodlu bir sonlu elemanlar programının yazılımı sunulmuştur.

Kuruşçu (2005), eksenel yüke maruz yığma duvar elemanlarda izotrop hasar modellerinden “Oliver hasar modeli” ni kullanarak elde ettiği yük-yer değiştirme eğrileri ile deneysel verileri kıyaslamış ve bu hasar modeli için malzeme parametrelerini belirlemeye yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Yıldırım (2007), literatürde deney sonuçları var olan prizmaların üç boyutlu sonlu eleman analizlerini LUSAS programı yardımıyla gerçekleştirmiştir. Anılan prizmaların doğrusal olmayan üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde Drucker-Prager kırılma kriteri ve izotropik hasar modeli (Oliver modeli) kullanmıştır. Bu analizler sonucunda Drucker-Prager kırılma kriterinin malzeme parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı ve malzeme hasar parametresi için bazı bağıntılar önermiştir. Ayrıca içi boş ve içi dolu prizmaların basınç dayanımlarını tahmin etmeye yönelik iki bağıntı daha önermiştir.

2. YIĞMA YAPILARDA KULLANILAN MALZEMELER

Yığma yapı elemanları, çamurdan yapılmış kerpiçten doğal taş kadar geniş bir yelpazede, metalik özellik taşımayan inorganik malzemelerin çoğunu içinde barındırır. Ancak, yığma yapılarda en çok kullanılan malzemeler doğal taş ve tuğladır. Yığma yapı elemanlarının dayanım ve deformasyon özelliklerinin analitik yöntemlerle belirlenmesi oldukça zordur. Öte yandan, tarihi yapıların taşıyıcı elemanlarının taşıma gücünün laboratuvar deneyleriyle belirlenmesi çok zor bir işlem olup neredeyse olanaksızdır. Ancak, sanatsal ve kültürel değerlerini yaralamadan, bu yapılardan alınabilecek çok küçük örnekler veya aynı özellikleri taşıyan prototip modeller laboratuvarlarda test edilebilmektedir. Fakat, bu deneyler sonucunda elde edilen veriler hiç bir zaman tam doğru sonuç vermez. Küçük bir örnekten elde edilen sonuçlar çok daha büyük boyutlara sahip mevcut yapı elemanlarının gerçek davranış özelliğini yansıtmaz.

Malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yığma yapıların yük taşıma performansını çok yakından etkiler. Bu özellikler, dayanıklılık, su emme katsayısı, basınç dayanımı, kayma dayanımı, çekme dayanımı ve ısı genleşme özellikleridir. Malzemenin dayanıklılığı, hava kirliliği, rüzgarın ve aşırı ısının neden olduğu aşınma, çatlaklara dolan suyun donması sonucunda oluşan basıncın neden olduğu zararlara karşı malzemenin basınç dayanımı ve su emme kapasitesi ile ölçülmektedir.

Yapı elemanının basınç dayanımı yığma yapıların yük taşıma kapasiteleri açısından çok büyük önem taşır. Yığma yapı elemanları, çok küçük çekme dayanımı olan, beton gibi kırılgan malzeme özelliğine sahiptir. Eğilme momenti ve kayma gerilmelerine karşı da, yığma yapı malzemeleri ve beton çok çarpıcı benzerlikler gösterir. Yığma yapı elemanları, belirli bir büyüklükte temel birim malzemenin (tuğla veya taş) harç veya başka bağlayıcı malzeme ile kaynaşması sonucunda elde edilmiş, bir bütün olarak davranan elemanlardır. Betonun oluşturan, agrega ve çimento da hemen hemen aynı özellikleri taşımaktadır. Ancak, yığma yapı birim elemanı taş veya tuğlaya göre betondaki agreganın boyutları oldukça küçüktür. Bu özelliğinden dolayı beton homojen bir malzeme olarak kabul edilebilir. Buna karşılık, yığma yapı malzemesini oluşturan taş veya tuğla birim elemanın boyutunun, yığma yapı elemanın kesit boyutuna göre oranı daha büyüktür. Ayrıca yığma yapı elemanını oluşturan birim elemanlar ve bağlayıcı eleman olan harç çoğunlukla birbirinden oldukça farklı malzeme özelliklerine sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı yığma yapı elemanı, genellikle birim elemanının boyutları ve birbirine bağlanma şekline göre homojen malzeme olarak kabul edilebilir. Yığma yapı elemanlarında birim elemanların bağlanma şekli yapı elemanın taşıma

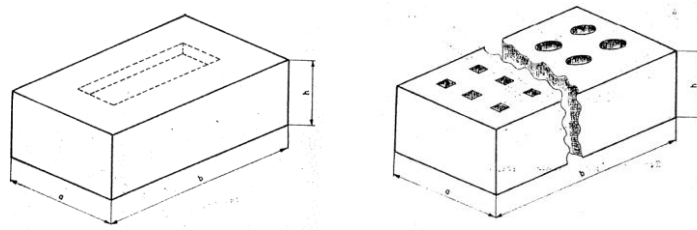
gücü bakımından da çok önemlidir (Ünay, 2002).

2.1 Tuğla

Tuğla; kil, killi toprak ve balçığın ayrı ayrı veya harman edilip, gerektiğinde su, kum, öğütülmüş tuğla ve kiremit tozu, kül ve benzerleri ile karıştırılarak makinelerle şekillendirilip ve kurutulduktan sonra fırınlarda pişirilmesiyle elde edilen ve duvar yapımında kullanılan malzemedir. Seramik malzeme olarak da tanımlanan tuğlalar, fiziki olarak sert, gevrek ve ısıya dayanıklıdır.

İnşaatlarda kullanılan tuğlaların pişirilme sıcaklıkları 950–1200 santigrad civarındadır. Yüksek sıcaklıkta pişirildiklerinden dolayı ateşe dayanıklı malzemedirler. Pişirilmeleri sırasında, içinde sonsuz sayıda mikroskobik çatlaklar, boşluklar ve geçitler oluşur. Bu boşluklar tuğlanın bütün özelliklerini etkiler. Genellikle tuğlanın porozitesi (boşluk hacminin dış hacmine oranı) %25’ den fazla ise basınç dayanımı giderek azalır (Batur, 1999).

Yapılan araştırmalar, Roma döneminden çok önce bile tuğlanın önemli bir yığma yapı elemanı olarak kullanıldığını göstermektedir. Tarihi yapılarda, pişirilmiş kilden üretilen tuğlayı oluşturan malzemeler genellikle dere yataklarında yüzeysel olarak biriken kum taşlarının kalıntılarından elde edilirdi. Pişmiş kilden üretilen tuğlalar, görünüşleri ve işlevlerine göre birçok kritere göre sınıflandırılabilir. Tarihi yapılarda kullanılan tuğlalar saf kaolin ve kil karışımının fırınlarda yüksek ısı altında pişirilmesiyle elde edilir. Fırın teknolojisinin bulunmadığı yerlerde, bazı tarihi yapılarda kullanılan tuğlaların doğrudan güneş ısı altında üretildiğine de rastlanmaktadır (Ünay, 2002).



Şekil 2.1 Dolu ve delikli tuğla elemanlar (TS 704, 1979)

Her yerde kolay bulunup üretilmesi ve ucuz olması nedeniyle bir çok yerdeki yapının ana malzemesi olma niteliğini kazanmıştır. Tuğlanın taş gibi yalnız basınca dayanıklı bir malzeme olmasından dolayı yapı taşıyıcı sistemi basınç alacak şekilde biçimlenmiştir. Böylece, kütleli (masif) bir yapı biçimi doğmuştur. Geleneksel büyük örtü sistemlerinin esas elemanlarını oluşturan kemer, tonoz ve kubbe, kerpiç ve tuğlanın ana yapı malzemesi olduğu bölgelerde

ortaya çıkmıştır (Kuruşcu, 2005).

Tuğla ile örülmüş bir duvarın dayanımı, kullanılan tuğlanın kalitesi, uygulanan harç ve duvarın örülme şekli ile doğrudan etkilidir. Tuğlaların basınç dayanımları 10 MPa ile 30 MPa arasında değişiklik gösterir. Tuğlanın basınç dayanımında, yapımında kullanılan malzeme ve iyi fırınlanmış olması etkilidir. Bazı tuğla türlerinin ortalama fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Tuğlaların ortalama fiziksel özellikleri (Ünay, 2002)

Basınç dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kayma dayanımı (MPa)
10-30	2,7-5,0	10-20

2.1.1 Harman Tuğlası

Harman tuğlası kil, killi toprak ve balçığın ayrı ayrı veya birlikte yoğrulup gerektiğinde su, kum, öğütülmüş tuğla ve kiremit tozu ve benzerleri ile karıştırılıp şekillendirildikten sonra kurutulup genellikle harman yerinde ocaklarda pişirilmesi yolu ile elde edilen ve duvar yapımında kullanılan bir malzemedir (TS 704, 1979).

Harman tuğlaları basınç dayanımlarına ve biçimlerine göre Şekil 2.1 ve Çizelge 2.2’ de görüldüğü gibi iki farklı sınıfa ayrılmaktadır.

Basınç dayanımlarına göre harman tuğlaları;

- Orta dayanımlı harman tuğlası
- Az dayanımlı harman tuğlası olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmaktadır.

Biçimlerine göre harman tuğlaları;

- Dolu harman tuğlası (DOHT)
- Delikli harman tuğlası (DEHT) olarak iki şekilde sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 2.2 Biçim ve basınç dayanımlarına göre harman tuğlası sınıfları (TS 704, 1979)

SINIFLAR		Tuğlanın Sembolü	Ortalama Hacim Ağırlığı (max) Kg/dm ³	Ortalama Basınç Dayanımı (min) Kgf/cm ² (N/mm ²)	Basınç Dayanımı (min) Kgf/cm ² (N/mm ²)
Dolu Harman Tuğlası	Orta Dayanımlı ¹⁾	DOHT/30	Sınırlandırılma -mıdır	50 (5,0)	40 (4,0)
	Az Dayanımlı	DOHT/30		30 (3,0)	25 (2,5)
Delikli Harman Tuğlası	Orta Dayanımlı ¹⁾	DEHT/50	1,40	50 (5,0)	40 (4,0)
	Az Dayanımlı	DEHT/30	1,40	30 (3,0)	25 (2,8)
1) Yapımcı tarafından standarda uygunluk belgesinde belirtilmiş olması koşulu ile uygulanır.					

Ortalama boyutları Çizelge 2.3' te gösterilen harman tuğlası dikdörtgenler prizması şeklinde olmalı, yüzleri ve kenarları düzgün bulunmalıdır. Dolu tuğlaların üst yüzünün ortasında, derinliği 10 mm den fazla olmayan çukurluklar bulunabilir. Tuğla üst yüzünde bu şekilde çukurluklar bulunması halinde çukur kenarlarının, bulundukları yüzün kenarlarına uzaklığı 20 mm den daha az olmamalıdır. Düşey delikli harman tuğlasında bulunan delikler, tuğlanın alt ve üst yüzlerinde olabildiğince eşit aralıklarla yayılmış bulunmalı ve bu yüzlere dik olarak tuğlanın bütün yüksekliği boyunca devam etmelidir.

Çizelge 2.3 Harman tuğlasının boyutları (mm) (TS 704, 1979)

BOYUTLAR		TOLERANSLAR
Uzunluk (b)	190	+ 6
		- 13
Genişlik (a)	90	+ 4
		- 5
Yükseklik (h)	50	+ 3
		- 2

2.2 Doğal Taş Malzeme

Doğada bulunan ya da taş ocaklarından çıkarılan, homojen yapılı, atmosfer etkilerine dayanıklı olan doğal taş, akıcı kıvamdaki magma tabakasının zamanla soğuması ve sertleşmesi sonucunda oluşan bir malzemedir (Türkçü, 2000).

Taş en eski yapı malzemelerinden biridir ve kalıcı olması düşünülen yapılarda kullanılması dikkat çekicidir. Özellikle basınç çalışan sistemlerin vazgeçilmez malzemesi olmuştur. Taş, basınç dayanımı fazla, çekme dayanımı zayıf bir malzemedir. Taş ile örülmüş duvarın dayanımı taşın cinsi, kesme biçimi, harç ve birleşim dokusu ile ilgilidir. Genellikle tarihi yapılarda kullanılan yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri Çizelge 2.4’ te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 Doğal yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri (Ünay, 2002)

Taşın Cinsi	Basınç Dayanımı(MPa)	Kayma Dayanımı(MPa)	Çekme Dayanımı(MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Granit	30-70	14-33	4-7	30000-55000
Mermer	25-65	9-45	1-15	25000-70000
Kireç taşı	18-35	6-20	2-6	10000-55000
Kumtaşı	5-30	2-10	2-4	13000-50000
Kuvars	10-30	3-10	3-4	15000-55000
Serpantin	7-30	2-10	6-11	23000-45000

Taşın ana birim olarak kullanıldığı yığma yapı elemanlarının dayanımı, eğer taş harçtan daha az dayanıma sahip ise, öncelikle harcın dayanımına bağlıdır. Öte yandan, taşın kendi öz kırılma dayanımı, taş kullanılan yığma yapı elemanın gerçek dayanımı üzerinde çok etkili olamaz. Taş yığma yapı elemanlarının dayanımı genel olarak taş ve harç birleşiminin ortak davranışına göre belirlenir. Tarihi yapılarda kullanılan taş yığma yapı elemanları çok geniş bir dayanım değeri gösterir. Taş yığma yapı elemanlarının kayma dayanımı genel olarak basınç dayanımının %25’i kadardır. (Ünay, 2002)

TS 2510’ a (1977) göre kargir duvarların yapımında kullanılacak doğal taşlar ocak taşı olmalı ve bünyelerinde çatlak kısımlar ve hava etkisi ile ayrılmış veya ayrılmaya başlamış kısımlar bulunmamalıdır. Taşların, elde edildikleri ocağın açık yüzeyine yakın yerlerinden çıkarılmış olanlarının, hava tesirleri ile ayrılmış, bozulmuş veya rengi değişmiş kısımları, taş ocağında iken temizlenmeli ve yapı yerine getirilmiş olan taşların hiç bir yerinde, bu şekilde bozulmuş, ayrılmış veya renk değiştirmiş kısımların bulunmaması sağlanmalıdır.

Duvar yapımında kullanılacak doğal taşların en küçük basınç dayanımları cinslerine göre Çizelge 2.5' de verilen değerlerden küçük olmamalıdır.

Çizelge 2.5' de anılanların dışında kalan doğal yapı taşlarının kullanılması halinde, yukarıdaki diğer özelliklerin gerçekleşmiş bulunması koşulu ile, basınç dayanım sonuçlarına göre yük taşıma bakımından girebileceği dayanım grubu ve taşıma gücü saptanır.

Çizelge 2.5 Doğal duvar taşlarının dayanım gruplarına göre en küçük basınç dayanımları (TS 2510, 1977)

Dayanım Grubu	Taş Cinsleri	En Küçük Basınç Dayanım kgf/cm^2
I	Kireçtaşı, (kalker) traverten, kireç bağlayıcılı kumtaşı	350
II	Yoğun kireçtaşı, dolomit, bazalt	500
III	Silis bağlayıcılı kumtaşı grovak vb.	800
IV	Granit, siyenit, diorit, melafir, diabaz vb.	1200

Günümüzde taş işçiliği ustalık gerektirdiği için özellikle gelişmiş ülkelerde pahalı bir malzeme olarak görülmektedir. Ayrıca doğal taş fiyatları artık eskiden olduğu gibi, yapay taşlara oranla ucuz da değildir. Taş duvarların kalınlığından kaynaklanan temellerin ve temel sömellerinin daha büyük yapılması zorunluluğu yapı maliyetini artıran bir başka etken olmaktadır. Taş duvarlar tuğla duvarların en az iki katı (moloz duvarlarda iki buçuk katı) kalınlığında yapılırlar.

Yüzeylerinin yeterince düzgün olmaması daha kalın bir harç ve sıva işçiliği gerektirmektedir. Bunlardan dolayı doğal taş artık bir kaplama malzemesi olarak da duvar yapımında yer almaktadır. Böylece dış fiziksel etkilere karşı dayanıklı olan bu malzeme ince plaklar (levhalar) halinde kaplama görevini görür ve duvarlara güzel bir görünüm kazandırır.

Taş duvarların bir başka olumsuz yanı da ülkemizdeki kat adedinin sınırlı olmasıdır. Örneğin, Afet yönetmeliğine göre moloz taş duvarlar en çok tek kat olarak yapılabilirler. (Kuruşcu, 2005)

2.3 Kerpiç

Yapı malzemesi olarak kerpicing kullanılması, ilk insanlara dayanır. Kerpicing ana malzemesi killi toprak olmakla birlikte içine saz ve kamışın da katıldığı güneşte kurutulmuş kerpiçten duvarlar oluşturulmuştur (Şekil 2.2). Nil ve Mezopotamya vadilerinde kerpiç, binlerce yıl yapı malzemesi olmuştur.

Harcın içindeki kum ve çakılın birleşmesi için çimento ve kirece ihtiyaç vardır. Kerpiçte ise bu yapıştırıcı, kendi bünyesinde bulunan kildir. Malzeme dayanımını artırmak için kerpiç harcına bazı katkı maddeleri eklenmiştir. Bunlar;

- Lifli malzemeler: Ot, saman, kamış artığı, bitki sapı,
- Ağaç cinsinden malzemeler: Çam iğneleri, ağaç dalları, ahşap elyaf, talaş,
- Mineral ve taş cinsinden malzemeler: Kum, çakıl, taş ya da kaya kırıntıları, cüruf, tuğla kırıntısıdır.

Bitkisel katkılar, malzemedeki nemin dışarı atılarak çatlakların önlenmesi için kullanılmıştır. Ancak, günümüzde bitkilerin çürüyerek yapıda bozulmalara neden olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı, yapıda stabiliteyi artırmak için mineral ve taş cinsinden malzemeleri killi toprağa katmak uygundur (Kömürcüoğlu, 1962).

Kerpiç üniteler, %30-%40 oranında kil ve %60-%70 oranında toprağın su ile birlikte karıştırılması ile genellikle 300/400/120 mm boyutlarında üretilmektedir (Aytekin, 2006).

İnsanlık tarihi ile hemen hemen aynı yaşta olan yapı gereci kerpicing uzun ömrünün sebepleri iyi sorgulanmalıdır. Kerpiç açık hava şartlarında, yapısındaki çekme elemanları ile oluşan dokusu, bloklarının dağılmaya karşı direncini oluşturmuştur. Dağılmaya karşı direncinin olması yapılardaki uzun ömrünün sebebidir. İnsan eli ile oluşturulan hiçbir yapı malzemesi kerpiç kadar uzun ömürlü olamamıştır (Bayraktar, 2006).



Şekil 2.2 Afganistan da kerpiçten yapılan savunma maksatlı surlar (Bayraktar, 2006)

2.4 Harç

Harç, kargir duvarlar ile iç ve dış sıvaların yapımında kullanılan ve mineral esaslı bir bağlayıcı, harç kumu, su ve gerektiğinde ilave edilen katkı maddelerinin uygun oranlardaki karışımları ile oluşturulan bir yapı malzemesidir (TS 2717, 1977).

Günümüzdeki yığma yapılarda ise harç, bağlayıcı özelliği olan malzeme, kum ve suyun karışımından oluşur, zamanla sertleşir. Bağlayıcı özelliği olan malzeme olarak genellikle sönmüş kireç veya Portland çimentosu kullanılmaktadır. Harcın ana görevi, taş ve tuğla gibi yığma yapı malzemesinin birim elemanlarını bir arada tutarak birleşik bir yapı elemanı oluşturmaktır. Yığma yapı elemanının bağlanma şekli ve özellikleri strüktürel güvenilirlik bakımından çok önemlidir. Elemanın basınç dayanımı, kayma dayanımı ve çekme dayanımı açısından harcın çok önemli bir rolü vardır. Yığma yapı elemanlarında esas olarak, çekme birleşim dayanımı ve kayma birleşim dayanımı olmak üzere iki çeşit birleşim dayanımı vardır. Çekme dayanımı, tuğla veya taş ile harcın birleşim noktasına dik yönde oluşan çekme kuvvetlerine, kayma dayanımı ise bu noktalara paralel oluşan kuvvetlere karşı koyarlar.

Harç ile taş veya tuğla birim elemanı arasındaki birleşim dayanımını etkileyen faktörler şunlardır:

- Bağlayıcı malzemenin miktarı birleşim dayanımını artırır.
- Taş ve tuğla gibi birim elemanın yüzeyinin dokusu harcın boşluklara girmesini

sağlayarak birim elemanlar arasında kusursuz bir birleşim dayanımı oluşturur.

Harçların basınç dayanımı çoğunlukla bağlayıcı malzemenin tipine, kalitesine ve harç karışımını oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Harcın basınç dayanımı bağlayıcı malzemenin ve su miktarının oranına göre değişir. Harcın basınç dayanımı deney için hazırlanmış bir örneğin test edilmesiyle ölçülebilir. Ancak, örnek malzemede ölçülen basınç dayanımı çoğunlukla, yığma yapı elemanının birleşim noktasındaki basınç dayanımını tam olarak yansıtmaz (Ünay, 2002).

Yığma yapı elemanlarını bir arada tutan çekme dayanımı yüksek olan harcın, bağlayıcı malzeme çeşidine göre adlandırılan harç çeşitleri bulunmaktadır. Bunlardan kullanımına sıklıkla rastladığımız;

- Kireç harcı
- Horasan harcıdır.

2.4.1 Kireç Harcı

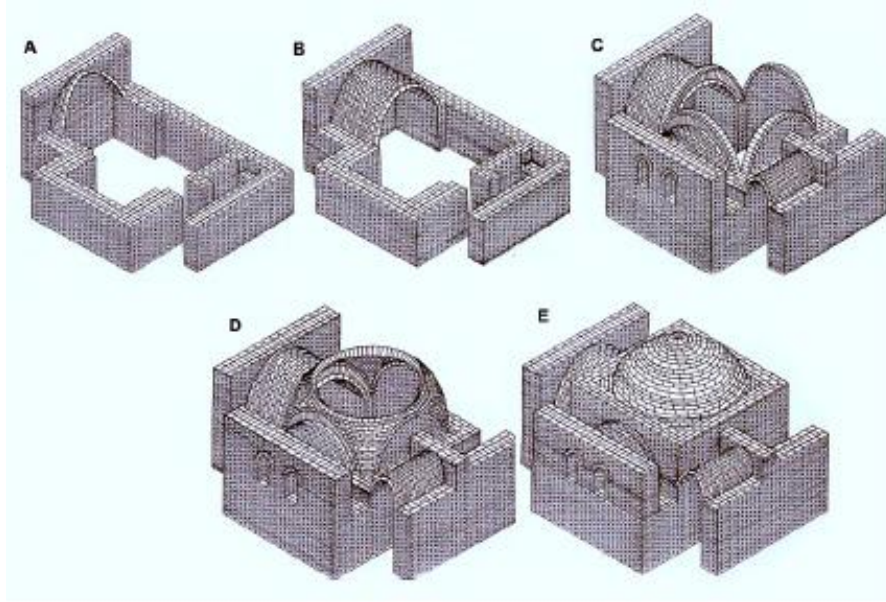
Bağlayıcı olarak kireç dolgu olarak agrega kullanılarak su ile yapılan hamurlara kireç harcı denmektedir. Kireç harcı hazırlanmasında harcın özelliklerini iyileştirmek için, kullanılacak yapı kısımlarına uygun, organik veya inorganik katkı malzemeleri katılabilmektedir (Bayraktar, 2006)

2.4.2 Horasan Harcı

Horasan, pişirildikten sonra öğütülmüş kildir. Horasan harcı, horasan ve kireçle yapılan harca denir. Su ile hidrata olan kireç ($Ca(OH)_2$) zamanla suyunu atar, kristalleşir ve katılaşıp. Kirecin bu katılaşması kristalize olayından ileri geldiği için, su ile temasında tekrar yumuşar. Kirecin suda erimeyen katı cisme dönüşmesi karbondioksitle kimyasal reaksiyona girerek kalsiyum karbonata dönüşmesi ile mümkündür. Kirecin (CO_2) ile reaksiyona girebilmesi için havaya yani havadaki (CO_2)' ye gerek vardır. Havadaki (CO_2) gazının duvar katmanlarına girmesi yıllar almaktadır. Hidrata kirecin (CO_2) ile reaksiyona girmesi için önce kurumasi gerekmektedir. Harç mutlaka duvar örüldükten sonra kuru ortamda muhafaza edilmelidir. Kireç kalsiyum karbonata dönüştükten sonra sertleşme süreci devam eder. Pişmiş kil tozu kimyasal etkinlik kazanmış silistir (SiO_2). Silis zayıf bir asittir. Kuvvetli baz olan kireç, pişmiş kil tozları ile asit-baz reaksiyona girince kalsiyum silikat oluşur. Bu oluşum için rutubetli ortam yeterlidir. Kalsiyum karbonat ve kalsiyum silikat dış tesirlere dayanıklı malzemelerdir (Bayraktar, 2006).

3. YIĞMA YAPI ELEMANLARI

Tarih sürecinde çok farklı uygulamalar sergileyen geleneksel yığma yapılarda strüktürel elemanların irdelenebilmesi için öncelikle yığma yapı kavramına değinmek gerekmektedir. Taş, tuğla, kerpiç, briket, ahşap gibi yapı malzemelerinin üst üste yerleştirilip kendi ağırlıkları ile ya da harç ile birleştirilerek duvar, kemer, kubbe, tonoz, sütun gibi taşıyıcı elemanlar oluşturması şeklindeki yapı yapımına yığma sistem denir (Erol, 1997). Bu tür yapılarda duvarlar, taşıyıcı olmakla beraber mekânları birbirinden ayıran mimari bir görevi de üstlenirler. Yığma sistemin en önemli özelliklerinden biri, yapı malzemelerinin kendi ağırlığı ile birbiri üzerine yerleşerek bir bütün yapı elemanı oluşturmasıdır. Şekil 3.1’ de yığma taşıyıcı bir sistemin yapım aşamaları örnek olarak gösterilmiştir. Düşey taşıyıcılar ve örtü elemanlarının birleşmesinden oluşan geleneksel taşıyıcı sistem, geleneksel yapı malzemelerinin olanakları dâhilinde biçim almıştır.



Şekil 3.1 Yığma taşıyıcı sistemin yapım aşamaları a,b,c,d,e (Arun, 2003)

Taşıyıcı yapı elemanları doğal taş, kum taşı, tuğla ve benzerleri bloklarla düzenlenmiş yığma kagir yapılar, dış etkilere dayanıklı malzemelerle üretildiği için günümüze kadar ayakta kalabilmiştir. Yığma kagir yapılar, süneklilikleri az, gevrek bir malzeme ile inşa edilir. Yapılarında ve dayanımlarında işçilik önemli rol oynar.

Kagir yapıların düşey yükler ve yatay deprem yüklerine dayanımı; duvar geometrisine, kullanılan malzeme dayanımına, yığma blokların birleştirilme şekline bağlıdır.

Kagir yapıların davranışında duvarı oluşturan blokların basınç dayanımı önemlidir çünkü

blokların çekme dayanımı çok küçüktür. Bu nedenle deprem kuvvetleri karşısında duvarın düzlemi doğrultusunda ve düzlemine dik birim ağırlığa gelen eğilme dayanımı çok zayıftır. Doğası gereği duvarı oluşturan blokların yangın dayanımı yüksektir. Blokların su emme ve gözenek özelliği don hasarı dayanımında etkilidir. Birim ağırlığın taşıma gücüne oranı yüksek olması nedeniyle yığma kagir bloklarla ağır bloklar oluşturulur (Arun, 2005).

3.1 Duvar

Taşıyıcı duvarlar çatıdan temele yük aktarımını sağlamakla beraber mimari fonksiyonu belirlemeye ve mekan tanımına yardımcı vazgeçilmez yapı elemanlarıdır. Çoğunlukla duvarların düzlemsel, normal ve kesme kuvvetine karşı yeterli bir dayanıklılığa sahip olması açısından yontma taş, moloz taş, tuğla veya kerpiçten imal edilmişlerdir. Bağlayıcı olarak çeşitli harçlar ve demir elemanlar kullanılmıştır.

Kargır duvarlar düşey yük tesirlerinde kalan taşıyıcı basınç elemanlarıdır. Gevrek olan yapısından dolayı yalnız basınç gerilmesine dayanabilmektedir. Çekme kuvveti taşımadığı kabul edilmektedir. Yapılarda kargır duvarları basınç elemanı olarak kullanmak emniyetli ve ekonomik çözüm olmaktadır. Tarihte tüm düşey yükler kargır duvarlarla temellere aktarılmıştır. Çatı ve döşemelerden gelen yükler, duvarın kendi ağırlığı, düşey doğrultulu kuvvetlerdir. Bu yükler beden duvarlarında basınç gerilmesi üretir. Kargır duvarlar basınç gerilmesini rahat taşıdığı için düşey yükleri temele aktarılması kolay ve ekonomik olmaktadır. Ancak kargır duvarlar parça elemanlarından oluşan yığınlardır. Yığınları bir arada tutan kuvvetlerle ilgili tüm kanunlar kargır duvarlar içinde geçerlidir. Yığınları bir arada tutan kuvvetler;

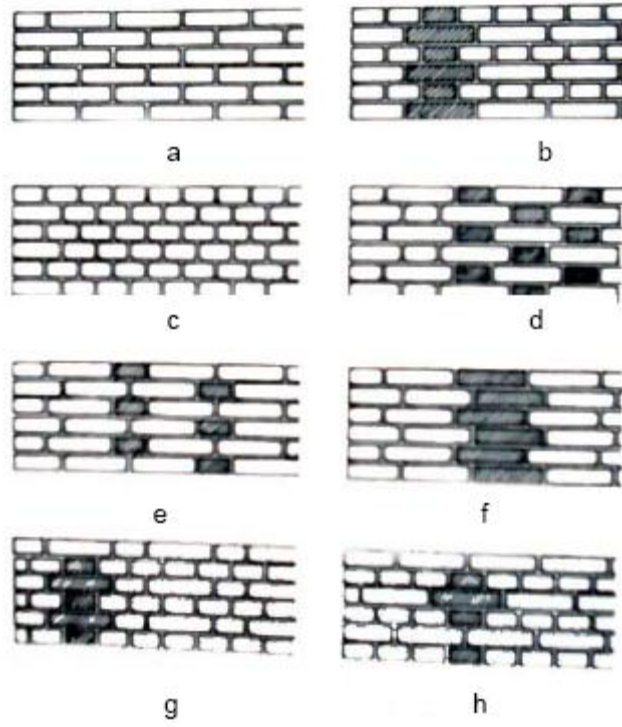
- Yığınlar, bünyelerini oluşturan parçaların veya zerelerin aralarındaki sürtünme dirençleri ile bir arada kalmaktadır. Sürtünme dirençleri kayma gerilmesi oluşturur. Kayma gerilmesi yığınlarda, çekme ve basınç kuvveti üretir.
- Kargır duvar yığını parçalarını bir arada tutan bir diğer unsur harç malzemesidir. Tarihte harçlara çekme ve yapışma özelliği kazandırılması için çok uğraşılmıştır. Harçların yapısına katkı maddesi ilave ederek özellikli harçlar yapılmak istenmiştir. Harçlar duvar parçalarını daha iyi bir arada tutmasını temin etmişlerdir (Bayraktar, 2006).



Şekil 3.2 Taş tuğla karışımı taşıyıcı kargir duvar (Bayraktar, 2006)

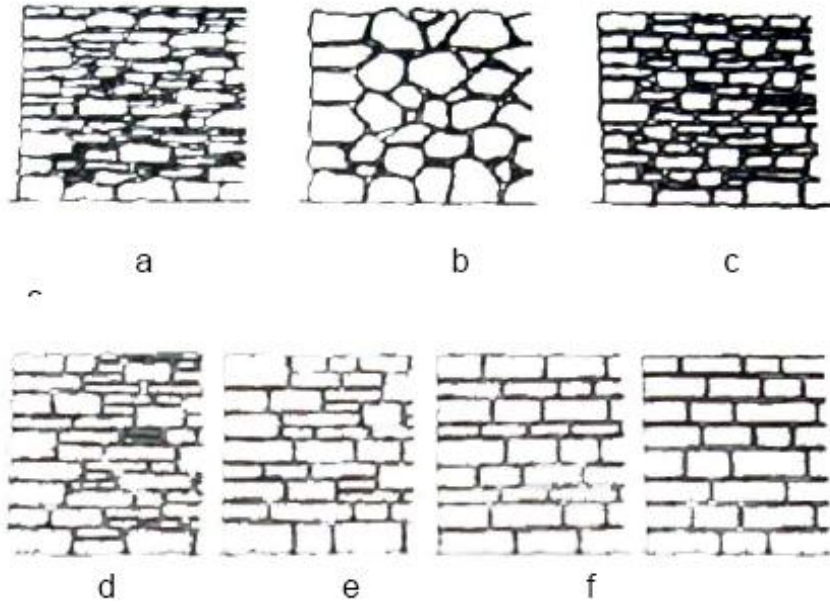
Duvarların taşıma kapasitesi birçok etkene bağlıdır. Bunlardan birisi de geometrisini oluşturan yapım şeklidir. Kalın bir kargir duvar dolu ya da arası boşluklu yapılabilir. Duvarların her iki yüzünün tek tip olabildiği gibi farklı tip duvar yüzü de olabilir. Dolu duvarlara tek cidarlı, iki yüzü arası boşluklu yapılan; içi boş bırakıldıysa iki, doldurulduysa üç cidarlı duvar ya da sandık duvar denir.

Duvar dayanımını etkileyen diğer bir özellik ise duvarın örgü biçimidir. Duvar örgüsünün şaşırtmalı yapılmalı yani düşey derzlerin üst üste getirilmemesine dikkat edilmelidir (Şekil 3.2). Böyle bir durumda yük dağılımı istenilen şekilde sağlanamadığı için örgünün zayıf noktası olan düşey harç çizgisi boyunca çatlamasına yol açar. Şaşırtmalı bir duvarda ise yükler aşağı doğru yayılarak dağılır ve duvarın doğru yük dağılımını sağlamasına yardımcı olur. Bazı tuğla duvar örgüleri Şekil 3.3’ de, bazı taş duvar örgüleri Şekil 3.4’ de verilmiştir.



Şekil 3.3 Tuğla duvar örgüleri

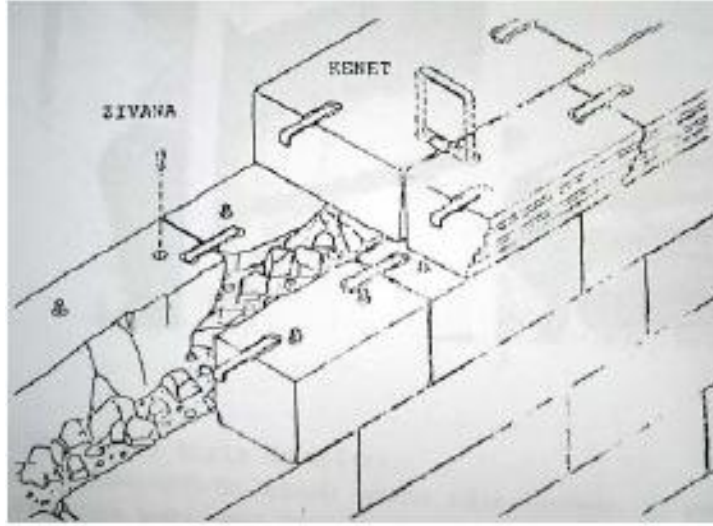
a) Normal yarım tuğla örgüsü, b) İngiliz örgüsü (blok örgü), c) Normal bir tuğla örgüsü, d) Gotik ya da Polonya örgüsü, e) Atlamalı örgü, f) Dörtte bir kaydırmalı yarım tuğla örgüsü, g) Hollanda ya da Flaman örgüsü, h) Haç biçimi örgü (Hasol, 1998)



Şekil 3.4 Taş duvar örgüleri

a) Kuruduvar, b) Kiklop örgüsü (mozaik örgü), c) Moloz taş duvar, d) Kaba yonu, e) Düzensiz ince yonu, f) Düzgün ince yonu, g) Kesme taş (Hasol, 1998)

Duvarlarda mutlaka kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Kayma gerilmeleri çekme ve basınç kuvvetleri oluşturur. Sıfır derz taş duvarlarda oluşan basınç gerilmelerini taş bloklar karşılar; çekme ve kayma gerilmeleri ise yatayda ve düşeyde taş elemanları birbirine bağlamak için kullanılan kenet ve zıvana ile karşılanır (Şekil 3.5). Derzli yığma duvarlarda ise çekme elemanlar; bloklar arası harç ile birlikte duvar içlerine yerleştirilen ahşap kalaslar veya lama demir çubuklardır.



Şekil 3.5 Demir kenet ve zıvanalarla desteklenmiş yanaşık derzli kesme taş duvar örgüsü (Akıncı, 1998)

3.2 Döşeme

Döşemeler, binanın iki katını, yapının oturduğu zeminle kapalı hacmi ya da en üst kat ile dış mekânı, ayırma görevi üstlenen yatay taşıyıcı yapı elemanıdır (Soygeniş, 1999).

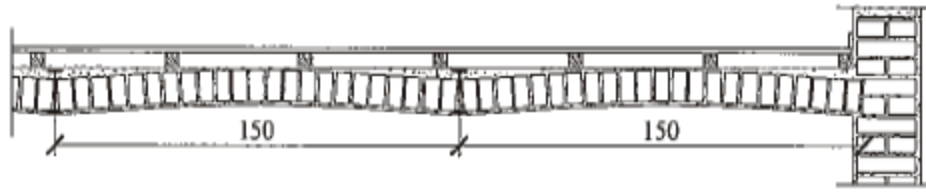
Özellikle bina türü yapılarda, döşemeler yüklerin yapı sistemi ile ilk karşılaştıkları elemanlardır. Yapıların gerçek amacının bir mekânı örtmek olduğu düşünülürse, örtü sistemini veya katlar arasında tabanı ve tavanı oluşturan döşemelerin, yapıların mimari formunu etkileyen en önemli yapı elemanları olduğu söylenebilir. Döşemeler düşey yükler altında, çeşitli yük aktarım şekilleri dışında yapının genel davranışını etkilemezler. Ancak, deprem sırasında diyafram etkisi nedeniyle yatay yük aktarımı bakımından döşemelerin önemi artar. Özellikle, binanın bazı bölümlerinde döşemelerin olmaması ya da boşlukların bulunması düzensiz plan oluşturur ve yapının depreme karşı davranışını olumsuz etkiler (Ünay, 2002)

Yığma kagir yapılarda volta döşemelere çok sık rastlanır. Değişken aks aralığında yerleştirilen putreller arasına kalıplarla, çitalarla tuğlanın eğik olarak yerleştirilmesiyle oluşan

tonoz döşemedir. Putrellerin aks aralığına ve tuğlanın putrel arasına yerleşme şekline göre volta döşeme ve adi volta döşeme olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

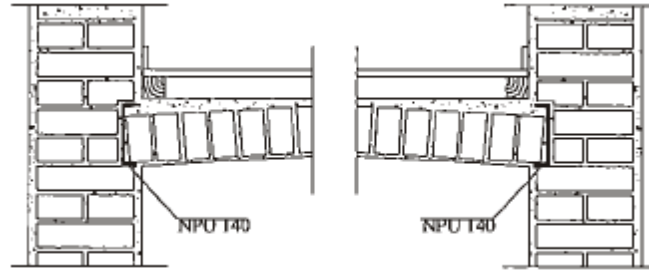
3.2.1 Volta Döşeme

1.50 m. aks aralığında dizilmiş putreller arasına kalıp yapılarak, tuğlalarla tonoz şeklinde inşa edilir (Şekil 3.6). Kalıplar, profillere asılan kancalara oturtulurlar. Bu döşemelerde duvar dibinde başlangıcın profille başlamasına ihtiyaç yoktur. Tonoz, duvara oturtulur (Şekil 3.7). Tonoz örgüsünde bağlayıcı olarak, yapım yılı dikkate alındığında çimento yada özel karışım harçları kullanıldığı görülür.



Şekil 3.6 Volta döşeme

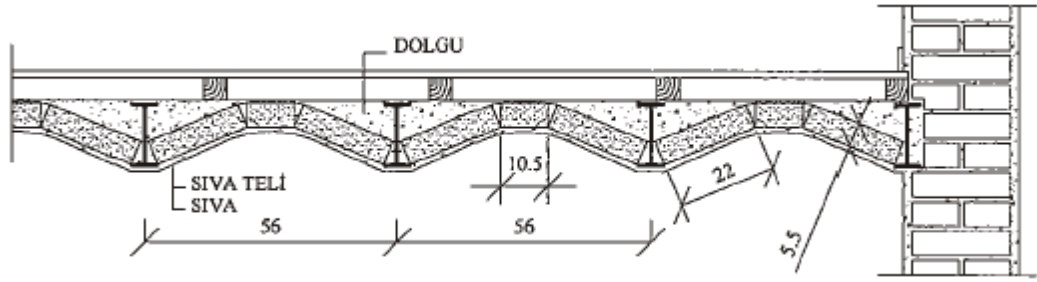
Dolgu malzemesi olarak curuf betonu kullanıldığında putrellerin üstünü örtecek kalınlıkta yapılması uygundur (Yücesoy, 2001; Kanca, 2004).



Şekil 3.7 Volta döşeme duvar birleşim detayı

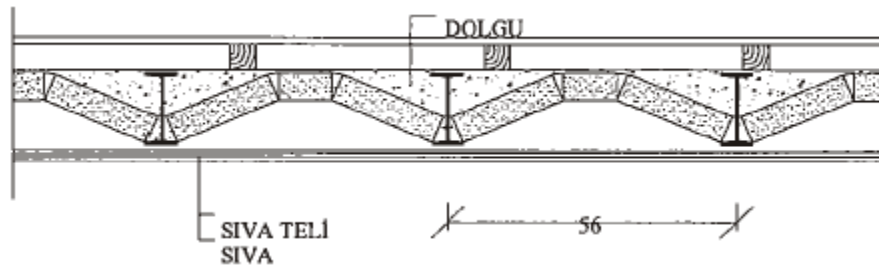
3.2.2 Adi Volta Döşeme

0.50 – 0.56 m. aks aralığında bir dizilmiş olan NPI profiller arasına üç tuğladan yapılan tonoz döşemedir (Şekil 3.8). Tuğlaları bağlayıcı olarak genellikle çimento harcı veya yapının yaşına uygun olarak özel karışım harçları kullanılmıştır. Tuğlaların üstü putrel başlıklarının seviyesine kadar curuf betonu ile doldurularak tesviye edilir ve döşeme kaplaması yapılır. Putrellerin altı sıra teli ile kaplanarak tuğlalarla birlikte sıvanmasının yanı sıra yalnız tuğlaların altı sıvanıp putrellerin altı yağlı boya ile de boyanabilir.



Şekil 3.8 Adi volta döşeme

Eğer düz bir tavan istenilirse, putrelden putrele sıva teli kaplanarak, üstü sıva ile sıvanır. Adi volta döşemeler duvar kenarlarında putrelle başlatılır (Şekil 3.9), duvara tonoz sistemi oturtularak başlatılmaz (Ulkay, 1978, Kanca, 2004).



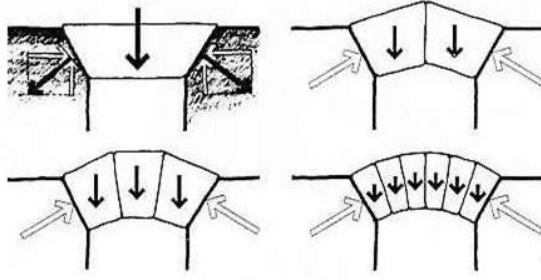
Şekil 3.9 Düz tavanlı adi volta döşeme

3.3 Kemer

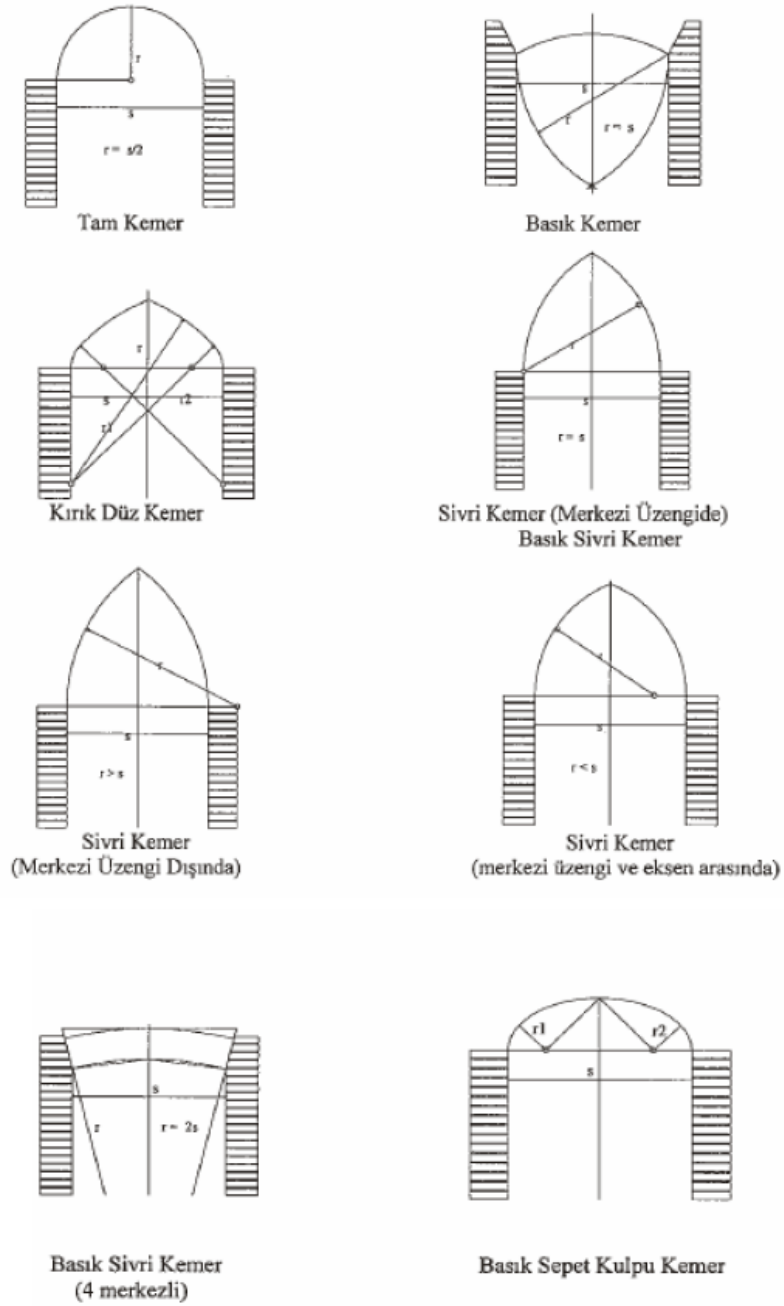
Kemerler, iki sütun veya ayak arasındaki açıklığı geçmek için yapılan eğri eksenli kirişlerdir. Kemerler, taş yada tuğla ile inşa edilir. Taş kemerler, moloz, kaba yonu, ince yonu veya kesme taştan yapılır (Ulkay, 1978).

Büyük açıklıklı mekânlar yapabilmenin ilk adımı hiç şüphesiz kemerlerin bulunmasıyla atılmıştır. Kemerin, strüktürel gelişmenin ilk biçimi olduğu söylenebilir. Üzerine gelen yükleri, basınç şeklinde ileterek açıklığın iki yanına aktaran kemer, yalnız basınca çalışır. Bu nedenle taş, tuğla gibi basınç direnci yüksek, çekme direnci düşük malzemelerin kemer yapımında kullanılması uygundur (Özer, 2006).

Bir kemerde, kemer örgü taşı olarak üzengi, kilit taşı ve kemer taşları olmak üzere üç eleman bulunur (Şekil 3.10). Üzenği taşı, kemerin başlama taşıdır. Kilit taşı, kemerin düşey ekseninde bulunan ve kendisi ile üzengi arasındaki taşları kilitleyen taşıdır. Kemer taşları, kilit taşı ile üzengi taşları arasında kemeri oluşturan taşlardır (Bayülke, 1992).



Şekil 3.11 Kemerlerde yük akışının gösterilmesi (Kuruşçu, 2005)



Şekil 3.12 Kemer yapım şekilleri ((Mahrabel, 2006)

3.4 Kubbe

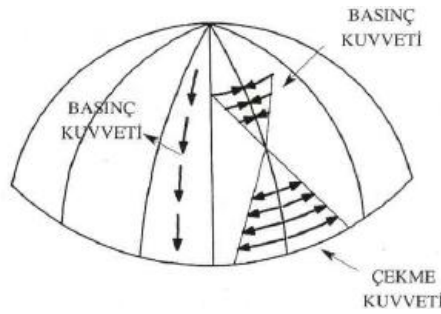
Kubbe, bir kemerin simetri eksenini etrafında dönmesiyle elde edilir. Kuvvetleri pozitif çift eğrilikli yüzeylerde taşıyan kabuklardır. Tromp (tonoz mesnet), pandantif (küresel mesnet) ve Türk üçgeni, kubbeli mekan örtüsünde geçit elemanı olarak kullanılan en sık karşılaşılan formların başında gelmektedir (Kuban, 1998) (Şekil 3.13).

Kubbenin tabanında oluşacak çekme gerilmelerine karşı alınacak en hayati önlem, bölgenin çekme gerilmelerine dayanıklı bir malzemeden yapılmış bir çember ile kuşatılmasıdır. Büyük kubbeli yapılardaki kasnaklar masif ve ağır yapıyla, bu bölgede oluşacak çekme kuvvetlerini etkisiz hale getirirler (Ünay, 2002) (Şekil 3.14).



Şekil 3.13 Ayasofya, İstanbul

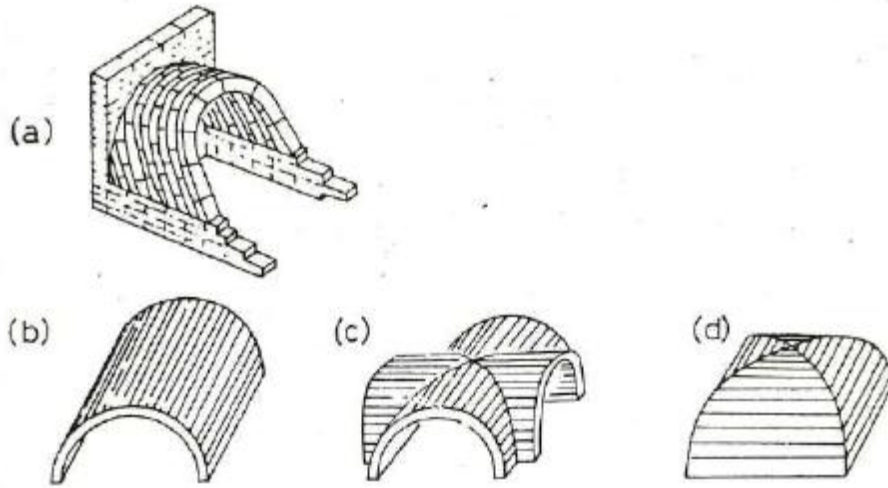
Kubbenin yükü, kubbe ayakları vasıtasıyla mesnet yüklerinin düşey bileşenlerini kemerlere; yanal bileşenleri ise kemer düzlemlerine dik doğrultuda yerleştirilmiş yarım kemerler veya payandalarla alınır. Kubbeden kemerlere taşınan düşey yüklerin kemer düzlemi içindeki itkileri de gergilerle alınır (Saraç, 2003)



Şekil 3.14 Kubbelerde yük taşıma mekanizması (Kuruşçu, 2005)

3.5 Tonoz

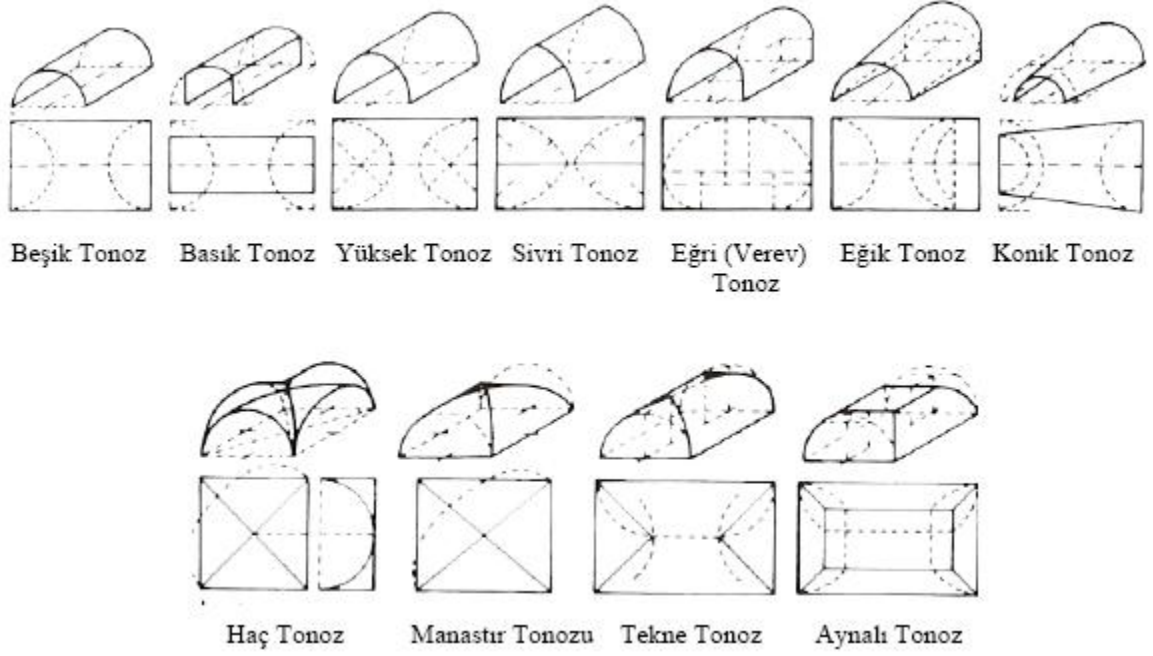
Tonoz; bir kemerin kendi düzleminde, dik doğrultuda ötelenmesi sonucu meydana gelen bir mekan örtü sistemidir. Tonoz dikdörtgen planlı mekanların örtülmesinde kullanılmıştır. İlk olarak Mezopotamya ve Mısır'da birbirinden bağımsız kemerlerin yan yana konması ile tonoz oluşmuştur (Şekil 3.15,a). Tonozun mesnet noktalarında sürekli bir taşıyıcı düzlem gerekir. Örneğin Mezopotamya yapılarında beşik tonoz, daima masif bir alt yapıyı gerektirmiştir (Şekil 3.15,b). Bu da geçilen boşluklara göre, taşıyıcı duvarların çok geniş yapılması sonucunu doğurmuştur. Daha sonraları, örneğin Sarsani mimarisinde, taşıyıcı alt yapının biraz hafifletilmesi ve daha gelişmiş bir iç mekan düzeni, güneybatı İran'da M.S.350'de yapılmış, Servistan Sarayında görülmektedir. Buna benzer ilerlemeler, Roma devrinde de kaydedilmiştir. Böylece tonoz ve kubbe ile örtülü mekanlarda, tek bir hacimden oluşan dikdörtgen planlı bir mekandan, yavaş yavaş birkaç üniteli bir mekana doğru bir gelişmenin olduğu gözlenebilir. Çok üniteli bir mekan örtü sistemi "Çapraz Tonoz" dur. (Şekil 3.15,c). Çapraz veya haçvari tonoz, iki beşik tonozun dik olarak kesişmesinden meydana gelir. Bu tür tonozun en önemli özelliği mekan örtü yüklerinin köşelerde toplanmasıdır. Bu tür bir tonoz, sütun ve ayaklar tarafından taşınabilmekte ve birçok üniteli bir mekanın mekan örtü birimi 40 olabilmektedir. Bu tür mekan örtü birimlerinin gelişmiş biçimleri, gotik mimaride çok kullanılmıştır. İki beşik tonozun kesişmesi çeşitli şekillerde düşünülebilir.



Şekil 3.15 a)İlkel tonoz, b)Beşik tonoz, c)Çapraz veya haçvari tonoz, d)Manastır tonozu
(Kuruşçu, 2005)

Tonozun strüktürel özelliği, dayanak noktasında sürekli taşıyıcı elemanları gerektirmesidir. Erken Mezopotamya döneminde elde edilen, çok geniş duvarlardan oluşan alt yapı üzerine

konumlandırılan beşik tonozun ardından, zamanla çeşitli tonoz türleri elde edilmiştir. Bunlar: beşik tonoz, sivri tonoz, konik tonoz, verrev tonoz, eğik tonoz, haç tonoz, tekne tonoz, aynalı tonoz, manastır tonozu olarak sıralanabilir (Şekil 3. 16).



Şekil 3.16 Tonz biçimlenmeleri (Hasol, 1998)

4. YIĞMA DUVARIN MODELLENMESİ

4.1 Sonlu Eleman Metodu

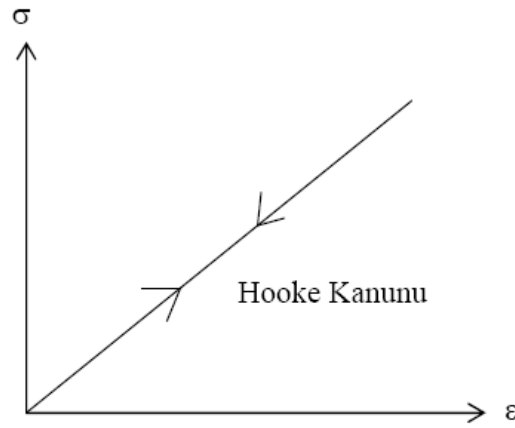
Bilgisayar teknolojisinin hızla ilerlemesiyle mekanikte yeni nümerik metotlar kullanılmaya başlanmıştır. Yığma yapıların strüktürel analizi için genellikle sonlu eleman analizi yöntemi kullanılır. Bu analiz, yapının tamamı ya da belirli bir elemanın matematiksel modelinin oluşturulmasıyla başlar. Yapının analizin amacına uygun şekilde ve sayıda elemanlara ayrılması bu aşamada gerçekleşir. Yapının geometrik boyutları, yapı üzerine etki eden yükler, mesnet şartları, elemanların birleşim noktalarının hareket yetenekleri ve serbestlik derecesi göz önünde bulundurularak model tanımlanır.

Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli bir sistemi problemin karakterine uygun sonlu elemanlara ayırarak elde edilen elemanlar üzerinde iç ve dış kuvvetlerin potansiyel enerjisinin minimize edilmesi ve sonra bu elemanların birleştirilmesi tarzında bir uygulama getirmektedir. Bunun sonucu olarak mesnet şartları, sisteme ait özellikler, dış yüklerin sürekli ya da ani değişimleri kolayca göz önüne alınabilmektedir. Dolayısıyla sonlu elemanlar yöntemi analitik metotlarla çözülemeyen karışık problemlere uygulanabilmektedir. Yüzeysel sistemin kritik bölgelerinde eleman boyutları küçültülerek o bölgenin daha ayrıntılı incelenmesi mümkün olmaktadır. Diğer bir avantajı da sınır şartlarının problemin çözüm sırasına göre en son adımda hesaplara dâhil edilmesidir. Böylece çeşitli sınır şartlarını probleme uygularken baştaki yoğun hesaplara girilmemektedir (Köksal, 1995).

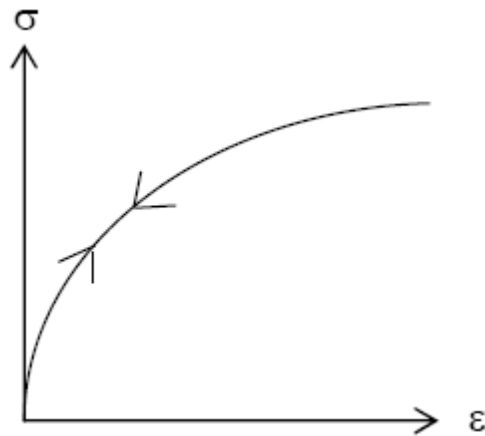
Sonlu elemanlar yönteminde sistem sonlu sayıda elemana ayrılmaktadır. Eleman boyutları küçüldükçe problemin hata oranı azalmakta, fakat çözüm süresi uzamaktadır. Sistemi oluşturan elemanların her birine sonlu eleman denmektedir ve birleştikleri köşe noktaları da fiktif düğüm noktaları olarak adlandırılmaktadır. Her elemana ait olan düğüm noktalarında bazı serbestlik dereceleri tanımlanmaktadır. Eleman davranışının belirlenmesinde bu serbestlik derecelerini içeren denklemler önemli rol oynamaktadır. Gerek düğüm noktalarında ve gerekse eleman sınır yüzeylerinde bazı süreklilik şartları sağlandığında yapının matematiksel bir modeli elde edilmekte ve her bir sonlu eleman parçasının davranış denklemlerinin çözülmesi sonucunda tüm taşıyıcı sistemin davranışı belirlenmiş olmaktadır (Bağcı, 2003).

4.2 Doğrusal Olmayan Sistemlerde Sonlu Eleman Yöntemi

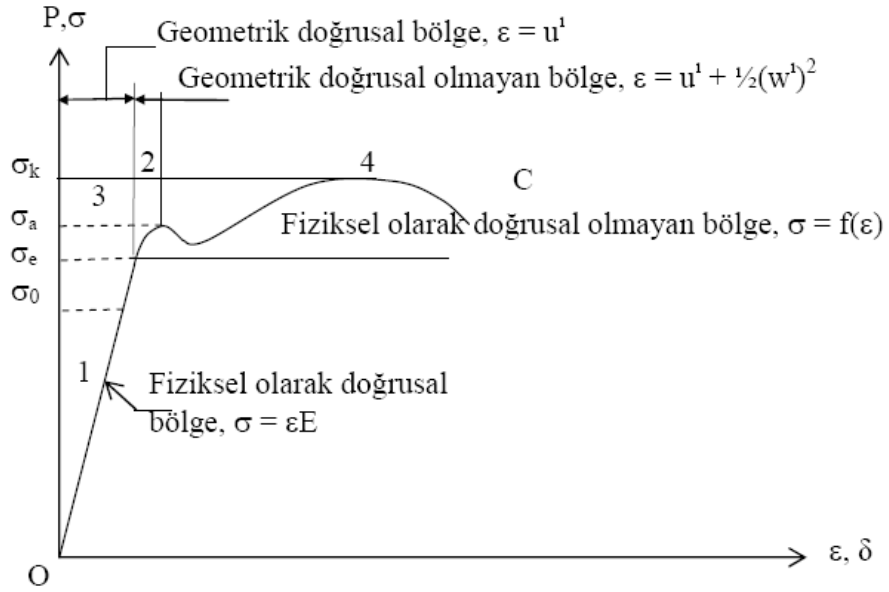
Malzemelerin yapısal özellikleri, anizotrop, ortotrop ve izotrop olabilir. Malzemenin davranışı, fiziksel, geometrik ve sınır şartları açısından doğrusal ve doğrusal olmayan olarak ikiye ayrılır. Doğrusal fiziksel özelliğe sahip malzemeler, Hooke Kanununa uyarlar (Şekil 4.1) ve bu durumda malzemenin bünye bağıntıları yani gerilme-şekil değiştirme bağıntıları doğrusaldır. Gerilme-şekil değiştirme bağıntıları doğrusal olmayan malzemelere, fiziksel özelliği doğrusal olmayan malzeme denir (Şekil 4.2). Elastik malzemelerin fiziksel özellikleri doğrusal ya da doğrusal olmayan olabilir. Yer değiştirme-şekil değiştirme bağıntılarının doğrusal ya da doğrusal olmaması, malzemenin geometrik özelliğini belirler (Şekil 4.3 - 4.4) (Köksal ve Köksal, 1996).



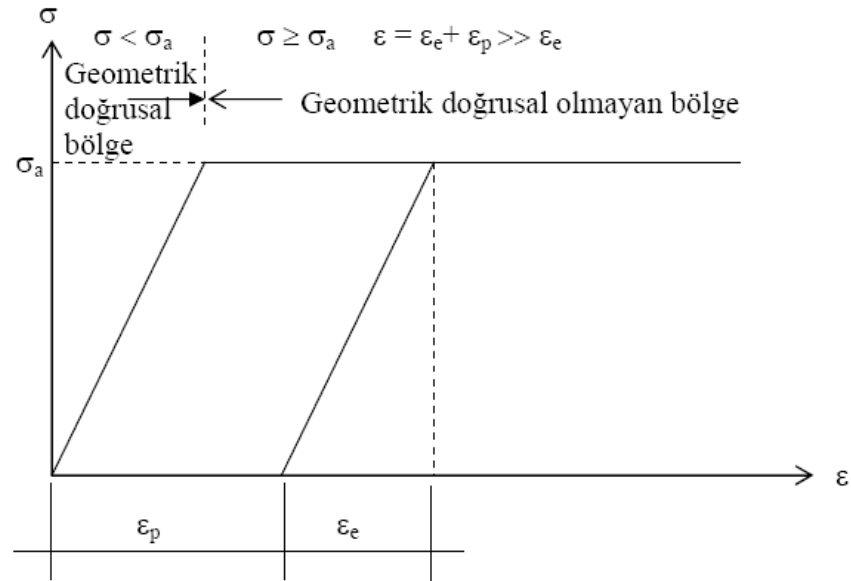
Şekil 4.1 Doğrusal elastik malzeme (Köksal ve Köksal, 1996)



Şekil 4.2 Doğrusal olmayan elastik malzeme (Köksal ve Köksal, 1996)



Şekil 4.3 Yumuşak çelikte $\sigma - \epsilon$ eğrisi (Köksal ve Köksal, 1996)



Şekil 4.4 İdeal elasto-plastik malzeme (Köksal ve Köksal, 1996)

Çoğu bilim konularında olduğu gibi, yapı analizinde de doğrusallaşmak en etkili araçtır. Fakat şunu da unutmamak gerekir ki; doğada bulunan çoğu malzeme genellikle tam anlamıyla doğrusal bir davranış göstermemektedir. Yapı analizinde doğrusal davranış varsayımı önemli

oranda hesapları kısaltmaktadır ancak yapısal elemanların birçoğu özellikle belirli bir yük sınırının aşılmasıyla doğrusal davranışlarını yitirmektedirler. Taş veya tuğla yığma yapılar için çeşitli analiz yöntemleri uygulanmaktadır. Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemlerinden; yapı elemanlarının doğrusal olmayan bir davranış göstermesi bize doğrusal olmayan analiz yöntemini seçmemize sebep olmuştur. Yığma yapı elemanları da hali ile limit yüklerin aşılmasıyla doğrusal olmayan davranış sergiler. Malzemenin doğrusal olmayan davranış göstermesinin başlıca sebepleri arasında özellikle malzemenin doğrusal olmaması gösterilebilir.

Doğrusal olmayan analizlerde davranış belirli bir kırılma kriteri ile irdelenir. Bu amaçla farklı yapı malzemeleri için önerilmiş olan bir çok kırılma kriteri mevcuttur. Her bir hipotez bütün malzemeler için geçerli değildir. Örneğin von-Mises Hipotezi genellikle çelik türü malzemelerde, Drucker-Prager Hipotezi ise beton gibi gevrek davranış gösteren malzemeler için kullanılmaktadır. Bu doğrultuda ticari yazılım programları genellikle daha çok kitleye hitap edebilmek amacıyla doğrusal olmayan analiz kısımlarında çoğunlukla bu tür kırılma hipotezlerini kullanmaktadır (Ural, 2009)

4.3 Drucker-Prager Malzeme Modeli

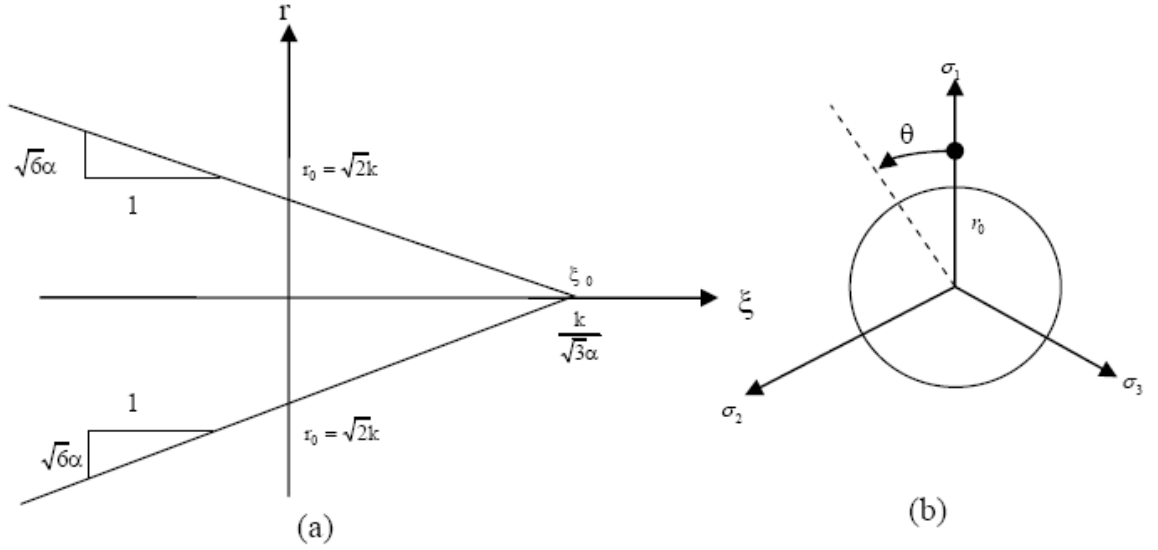
Lineer teoride malzemenin akma gerilmesi aşılmadıkça, gerilme-birim deformasyon ilişkisi doğrusal kabul edilir ve hesaplar doğrusal elastisite teorisine göre yapılır. Akma gerilmesi üzerindeki gerilmeler (pekleşme) dikkate alınmaz. Bu bağlamda, yapıların elastik olarak incelenmesinin, gerilme dağılımının her zaman düzgün olmadığı ve yüksek gerilmeli yerel bölgelerin plastikleşebileceğinin düşünülmesi durumunda, gerçeği tam olarak yansıtmayacağı açıktır. Plastik hesap, süneklikten faydalanarak üniform dağılmayan gerilmeleri daha gerçekçi bir şekilde hesaplamaya imkan verir (Köksal vd., 2004).

Son yıllarda, malzemelerin bünye bağıntılarının belirlenmesinde kullanılan pek çok matematik model geliştirilmiştir. Söz konusu modeller betonun mekanik davranışını, plastik ve visko-plastik teoriler yardımıyla ifade edebilmektedir. Yapıların plastik analizinde kullanılmak üzere hazırlanmış, sonlu eleman yöntemi ile çalışan paket programlarda yer alan ve en çok kullanılan, en temel malzeme modeli Drucker-Prager malzeme modelidir. Anılan kriterin beton, betonarme ve yığma yapı elemanlarına uygulanması ile ilgili bir çok araştırma gerçekleştirilmiştir (Doran, 2004; Köksal vd., 2004; Doran, 2009; Köksal vd., 2009; Doran vd., 2009; Köksal ve Doran, 2010). Söz konusu modelde akma kriterinin, Von-Mises kriterinde hidrostatik gerilme etkisini ek bir terim ile dikkate alarak,

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (4.1)$$

Şeklinde ifade etmektedir. $\alpha = 0$ olması durumunda kriter, Von-Mises kriteri ile aynı olacaktır (Chen, 1982).

Asal gerilme uzayında yukarıdaki bağıntının kırılma yüzeyi dairesel bir koni olacaktır, bu koninin meridyen ve π düzlemi üzerindeki ara kesiti Şekil 4.5’ te gösterilmiştir.

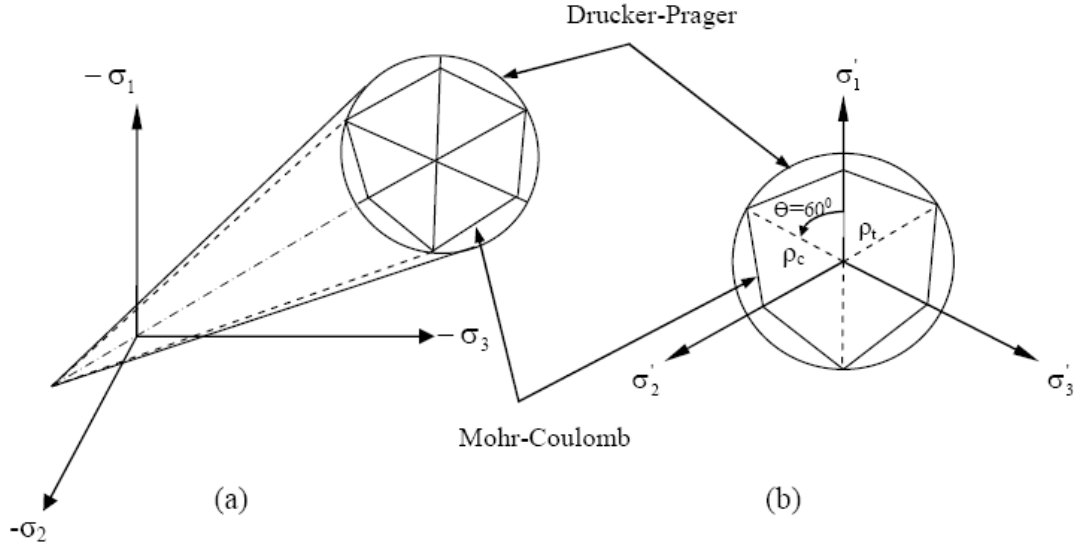


Şekil 4.5 Drucker-Prager kriteri: (a) meridyen düzlemi, $\theta = 0^\circ$; (b) π düzlemi (Chen, 1982)

Şekil 4.6’ da görüldüğü gibi Drucker-Prager kriteri, Mohr-Coulomb kriterine oldukça yakındır. Örneğin, Drucker-Prager dairesi, Mohr-Coulomb altıgenine dıştan çizilen bir sınır daire olarak düşünülürse, iki yüzey α , k ve $\theta = 60^\circ$ ile belirlenecek basınç meridyenine uygun düşmektedir. α ve k (4.1) ve (4.2) de gösterilen şekilde belirlenmektedir (Chen & Mizuno, 1990);

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (4.2)$$

$$k = \frac{6 \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (4.3)$$



Şekil 4.6 Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriterlerinin karşılaştırılması, (a) asal gerilme uzayında, (b) deviatör düzlemde (Chen ve Han, 1988).

Burada φ ve c , sırası ile malzemenin içsel sürtünme açısını ve kohezyonunu ifade eden parametrelerdir. LUSAS-ver.13 programı, plastik analiz safhasında bu değerleri dikkate almaktadır. (4.2) ve (4.3) de verilen bağıntıdaki sabitlerle belirlenen koni, Mohr-Coulomb akma yüzeyindeki altıgen pramidi çevreleyen bir dış sınır görünümündedir (Şekil 4.6a).

Drucker-Prager kırılma kriterinin koni şeklinde olması koninin uç kısmı betonun çekme dayanımını, ucu açık kısmı üç eksenli hidrostatik yükleme altında sonsuza kadar dayanabileceğini gösterdiğinden beton gibi çekme ve basınç dayanımları farklı olan malzemenin davranışına uygun kırılma kriteri olmaktadır (Yıldırım, 2007).

Köksal ve diğ. (2004, 2005), yaptıkları çalışmalarda yığma prizmaların ve sıvalı beton prizmaların basınç dayanımlarına ilişkin hesaplamaları elasto-plastik yaklaşıma ve izotropik hasar modeline göre yapmışlardır. Ayrıca bu çalışmada, Drucker-Prager kırılma kriteri için gerekli olan kohezyon ve sürtünme açısı değerleriyle ilgili bir bağıntı da önermişlerdir. Buna göre blok ve harca ait kohezyon değerleri belirledikleri aşağıdaki formüllerde hesaplanmaktadır.

$$c_b = \frac{f_b}{4} \quad (4.4)$$

$$c_{mr} = 0,129f_{mr} + 1,85 \quad (4.5)$$

Burada f_b ve f_{mr} sırasıyla blokların ve harcın basınç dayanımlarını temsil etmektedir. Ayrıca harca ait sürtünme açısı değerleri de aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Buna karşın

blokların sürtünme açısı değerleri hakkında herhangi bir formülasyon vermemişlerdir.

$$\varphi_{mr} = 1,519 \cdot f_{mr} \quad (4.6)$$

4.4 Yığma Yapılarda Kullanılan Modelleme Teknikleri

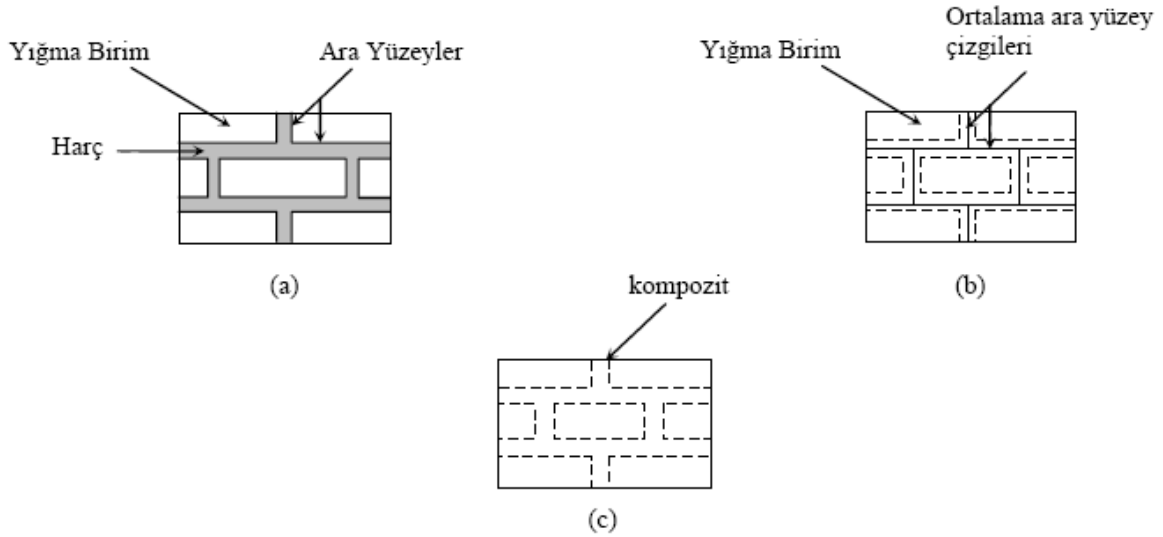
Yığma yapı sistemleri, ülkemizde hala daha kullanılan yapı grubunu oluşturmaktadır. Bunların hesapları ise genelde ya hiç yapılmamış ya da arşivlenmemiştir. Son zamanlarda bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde, sayısal yöntemlerin kullanıldığı bilimsel araştırmalar hız kazanmış ve daha az zamanda daha büyük yapı sistemlerine ilişkin modellerin çözümü mümkün hale gelmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yığma yapıların modellenmesinde kullanılan eleman ve kabuller, betonarme yapılar için kullanılanlardan oldukça farklıdır. Yığma yapı duvarlarında taş ve tuğla gibi yığma birimlerin ve farklı karakteristiklere sahip harcın bulunması tek tip sonlu eleman kullanmayı zorlaştırmaktadır. Bu durumda kabule uygun ve gerçekten uzaklaşmayacak şekilde bir modelleme tekniği geliştirmek gerekmektedir. Ya da bu birimleri ayrı ayrı modellemek yolu tercih edilmelidir. Yığma birimlerin ve ara yüzey elemanlarının ayrı ayrı modellendiği bu durumda ise bilinmeyen sayısı oldukça fazla olmaktadır. Özellikle doğrusal olmayan çözümlemelerde iterasyonların da işleme katıldığı düşünülürse, sistemin çözüm süresi aşırı oranlarda artmaktadır (Ural, 2009).

Yığma yapıların analizinde sistemin büyüklüğüne bağlı olarak üç farklı modelleme tekniğinin kullanıldığı söylenebilir.

1. Mikro modelleme
2. Basitleştirilmiş mikro modelleme
3. Makro modelleme

Yığma yapı sistemlerin modellenmesinde kullanılan yaygın söz konusu teknikler Şekil 4.7' de verilmiştir.



Şekil 4.7 Yığma duvarlarındaki modelleme teknikleri, a) Mikro modelleme, b) Basitleştirilmiş mikro modelleme, c) Makro modelleme (Lourenço, 1996)

4.4.1 Mikro modelleme

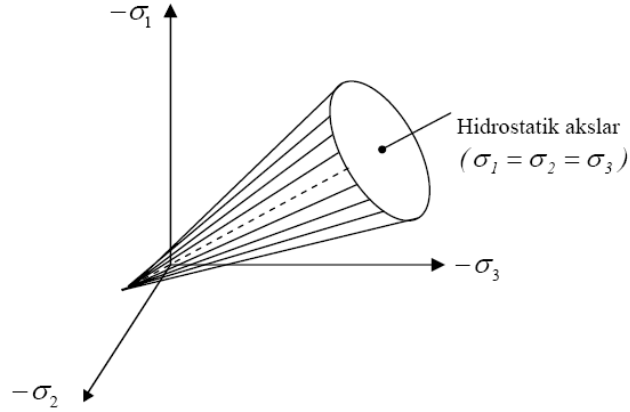
Bu modelleme tekniğinde, yığma duvarı meydana getiren yığma birimin ve harcın ayrı ayrı mekanik özellikleri yani Elastisite Modülleri, Poisson Oranları ve elastik olmayan diğer özellikleri dikkate alınmaktadır (Şekil 4.7-a). Bu yaklaşımda çatlakların yığma birim ve harcın arasındaki ara yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır (Lourenço, Computational Strategies for Masonry Structures, 1996). Anılan teknik kullanılırken yığma birimler ile harç arasındaki ilişki çok iyi ve doğru bir şekilde tanımlanmalıdır. Bu modelleme tekniğine ilişkin yapılan çalışmalardan bazıları; Milani, vd. (2005-a) (2005-b), Pina ve Lourenço (2004), Zucchini ve Lourenço (2002) olarak belirtilebilir.

4.4.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme

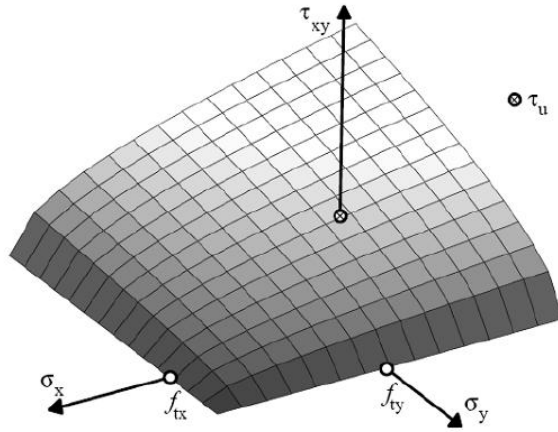
Basitleştirilmiş mikro modellemede yığma blok ve düğümlerden oluşur. Düğümler ise harç ve iki tane harç-blok arayüzünden oluşur ve ortalama bir arayüz teşkil eder. Modelin şeklini tamamlamak için ise blok boyutları genişletilmiştir. Bu yöntemde bloklar düğüm noktalarından potansiyel kırılma-kayma yüzeyleri (Şekil 4.8-4.10) ile birbirine bağlanmıştır. Harcın poisson etkisi göz ardı edildiğinden dolayı doğruluk payı düşüktür (Lourenço, 2002).

Basitleştirilmiş Mikro Modelleme Tekniği kullanılarak yapılan modellemelerde, muhtemel göçme mekanizmalarının tümünün dikkate alınamaması önemli sorunlardan birisidir. Modellemede tanımlanacak olan ara yüzeylerde hem çekme hem de kayma davranışlarının birlikte tanımlanması gerekmektedir. Bu sebeple yapılan kabule göre; yığma duvarlarda

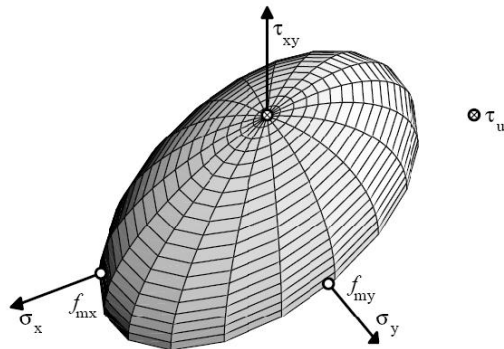
meydana gelebilecek olan çekme ve kayma çatlaklarının ve tüm hasarın ara yüzeylerde oluşacağı ve tuğlalarda meydana gelebilecek olan potansiyel çatlakların ise tuğlanın orta kısmında düşey olarak gerçekleşeceği kabul edilmektedir (Şekil 4.11).



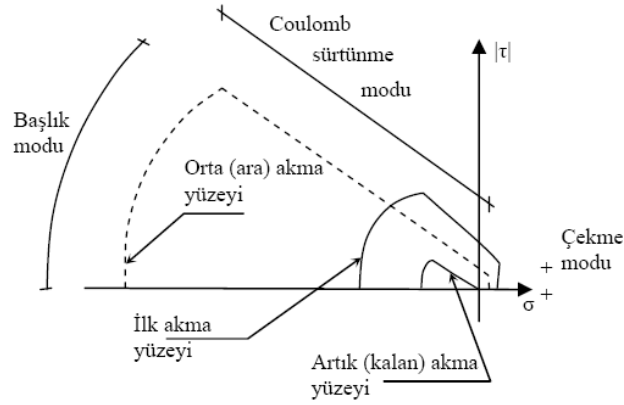
Şekil 4.8 Drucker-Prager kriteri (Chen ve Mizuno, 1990).



Şekil 4.9 Ortotropik Rankine kriteri için kırılma yüzeyi ($\tau_{xy} \geq 0$ için gösterilmiştir) (Lourenço, 1996).



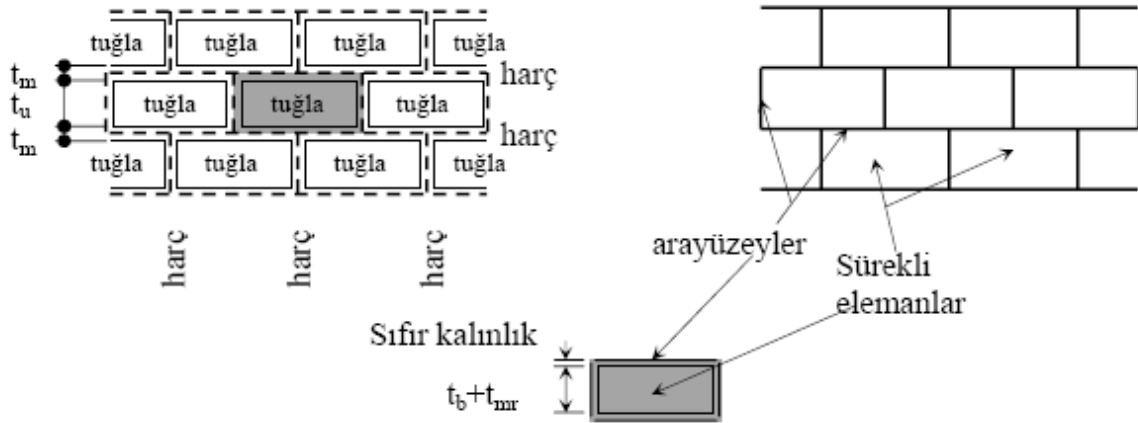
Şekil 4.10 Hill kriteri için kırılma yüzeyi ($\tau_{xy} \geq 0$ için gösterilmiştir) (Lourenço, 1996).



Şekil 4.11 Kompozit arayüzey kırılma kriteri (Lourenço, 1996)

Bu modelleme tekniğinde, yığma birimlerin boyutları, harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilmekte ve yığma birimler ortalama ara yüzey çizgileriyle birbirinden ayrılmaktadır (bkz. Şekil 4.7-b). Meydana gelmesi muhtemel çatlakların bu ortalama ara yüzey çizgisinde meydana geleceği kabul edilmektedir (Ural, 2009).

Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği şematik olarak Şekil 4.12’ de gösterilmiştir.

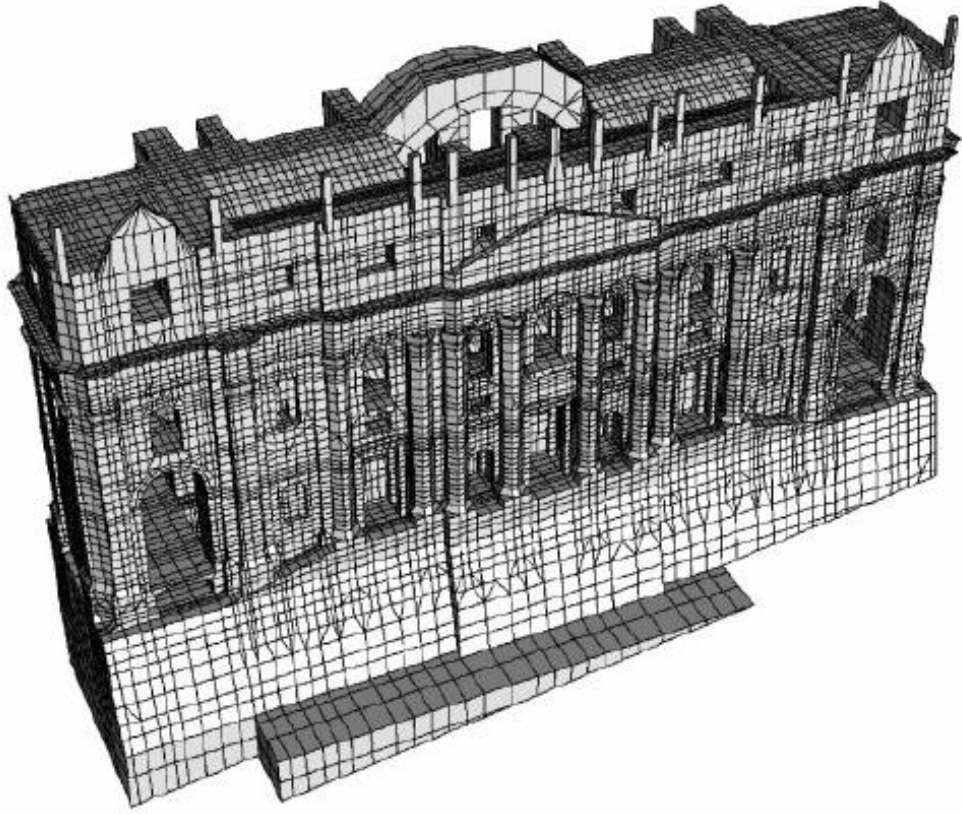


Şekil 4.12 Basitleştirilmiş mikro model tekniği

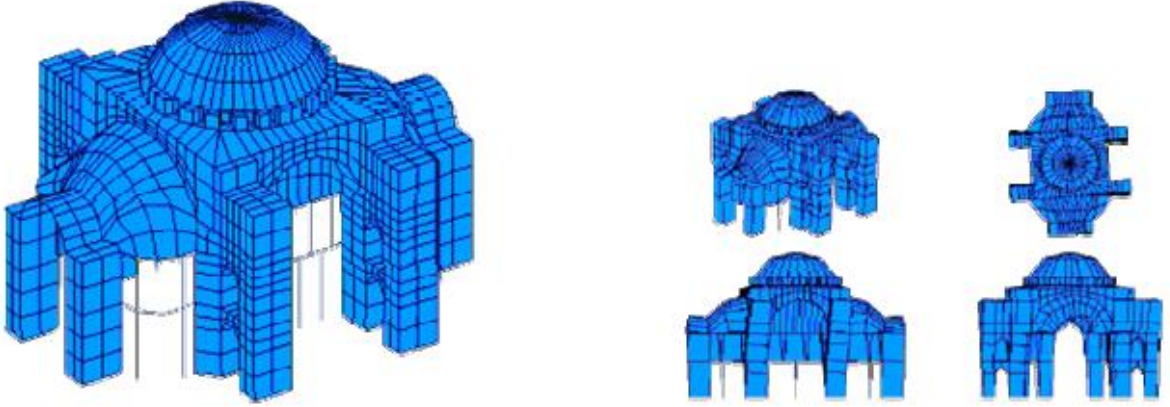
4.4.3 Makro Modelleme

Genellikle ve uygulamaya yönelik çalışmalarda blok ile harç arasındaki etkileşim tüm yapı davranışını incelerken ihmal edilir. Bu şekilde gerçekleştirilen modelleme tekniği makro modelleme olarak anılır (Şekil 4.7-c). Bu yaklaşımda malzeme kompozit kabul edilir. Yapının veya elemanların küçük detayları için uygun bir model değildir. Bu yöntemde açık olmayan

malzeme gerilmeleri için büyük ölçekli deneylerden elde edilen yığma gerilme değerleri kullanılır (Lourenço, 1998). Yöntem uygulanırken yığma homojen, izotrop veya anizotrop sürekli kabul edilir (Asteris ve Tzamtzis, 2003). Elemanın farklı yerlerindeki farklı malzeme özelliklerinin ortalaması alınarak homojenize edilir. Genellikle karmaşık sistemli tarihi yapıların duvar parçalarının, ayak, payanda, kemer ve tonozlarının modellenmesine uygundur. Tarihi yapıların duvar örgüsündeki düzen makro modelleme yaparken kabul edilen deneysel verilere dayanan homojenleştirmenin çok umut verici sonuçlar verdiğini göstermektedir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’ de gösterildiği gibi cephesi makro model ile yapılmış olan Roma’daki St. Peter’s Bazilikası ve Ayasofya Camii buna iyi bir örnektir (Kuruşcu, 2005)



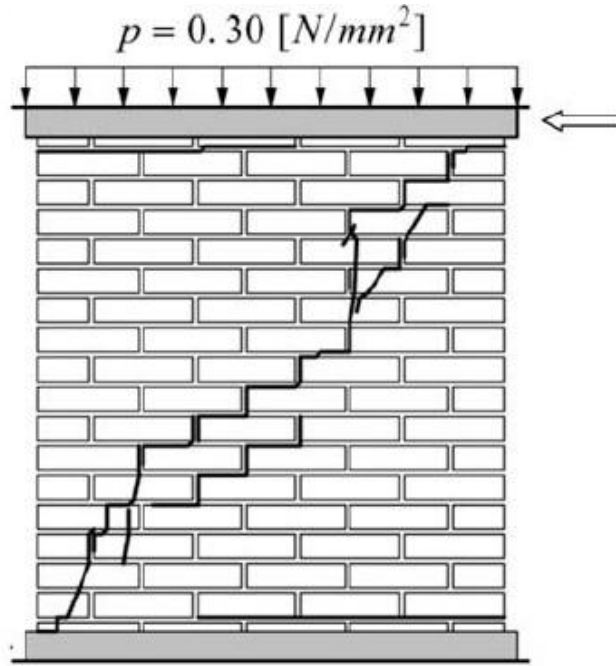
Şekil 4.13 Roma’ daki St. Peter’s Bazilikası (Lourenço, 2002)



Şekil 4.14 Ayasofya Camii sonlu eleman modeli (www.LUSAS.com)

4.5 Örnek Model Üzerinde Çalışmalar

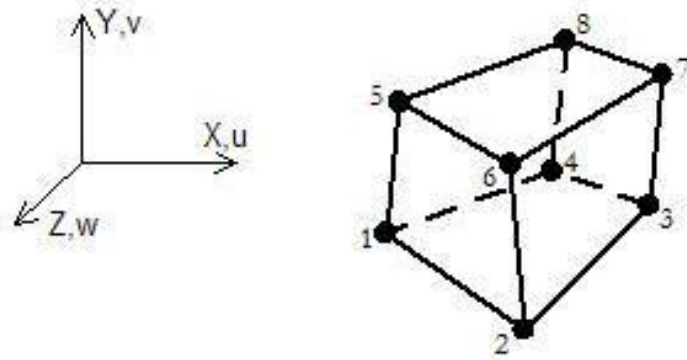
Kullanılan sonlu eleman modeli 1992 yılında Raijmakers ve Velmertfoort tarafından deneylerinin yapıldığı bir modeldir. Bu modelin boyutları 990 x 1000 x 100 mm. olup 16 sıra harman tuğlası, en üst ve en altta 2 sıra betonarme hatıl ile 18 sıradan oluşmaktadır. Harman tuğlasının boyutları 210 x 52 x 100 mm, tuğlaları birbirine bağlayan harç ise 10mm.'den uygulanmıştır. Rijit plak üzerine yatayda ve düşeyde kuvvetler uygulanmıştır. J4D duvarı için uygulanan yükler, düşeyde $p = 0,30 \text{ MPa}$ düzgün yayılı yük, toplam 29.920 N.uygulanmış, yatayda ise F kuvveti uygulanmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Eindhoven yığma duvarı JD4 için deneysel kırılma örneği (Zucchini ve Lourenço, 2009)

Doğrusal olmayan modelleme de yaygın olarak kullanılan LUSAS-ver.13.6 modelleyici, çözümleme için tercih edilmiştir. LUSAS-ver.13.6 statik hesap programında elasto-plastik analizlerde Drucker-Prager kırılma kriteri kullanılmıştır (Köksal vd., 2010). Oluşturulan model üzerinde iki ve üç boyutlu; detaylı mikro ve makro model yöntemleri kullanılarak çözümler üretilmiştir. Anılan kırılma kriterinin ihtiyaç duyduğu parametreler (c) kohezyon ve (φ) içsel sürtünme açısıdır. Bu çalışmanın temel amacı, yığma duvarların farklı sonlu eleman tipleri ve farklı modelleme tekniklerinin kullanılması durumunda söz konusu parametrelerin değişiminin incelenmesidir.

Üç boyutlu analizlerde 8 düğüm noktalı ve 3 serbestliği bulunan katı (solid) eleman HX8M (LUSAS-ver.13.6) kullanılmıştır. Şekil 4.16' da gösterildiği gibi 8 düğüm noktalı eleman z eksenini doğrultusunda sağ el kuralına göre numaralandırılmıştır. Koordinatları x , y , z eksenlerinde, u , v , w yönlerinde serbestliğe sahip eleman elastik analiz için izotropik malzeme modeli, plastik analizde ise Drucker-Prager malzeme modeli kullanılmıştır.



Şekil 4.16 3 boyutlu katı eleman için kullanılan HX8M eksen ve modeli (LUSAS-ver.13.6)

Bu hasar modelinde belirleyici olan iki parametre vardır. Bunlar (c) kohezyon ve (φ) içsel sürtünme açısıdır.

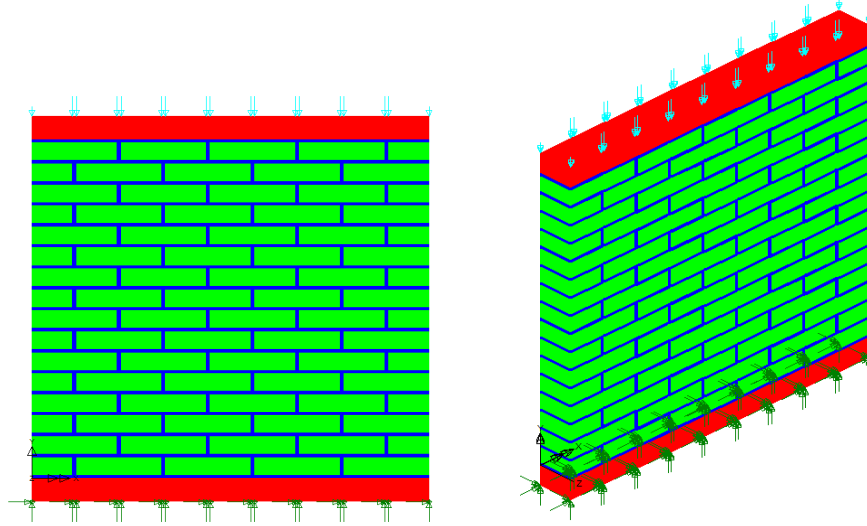
Köksal ve diğ. (2004, 2005), yaptıkları çalışmalarda Drucker-Prager kırılma kriteri için gerekli olan kohezyon ve sürtünme açısı değerleriyle ilgili bir bağıntı önermişlerdir. Buna göre blok ve harca ait kohezyon değerleri belirledikleri aşağıdaki formüllerde hesaplanmaktadır.

$$c_b = \frac{f_b}{4} \quad (4.4)$$

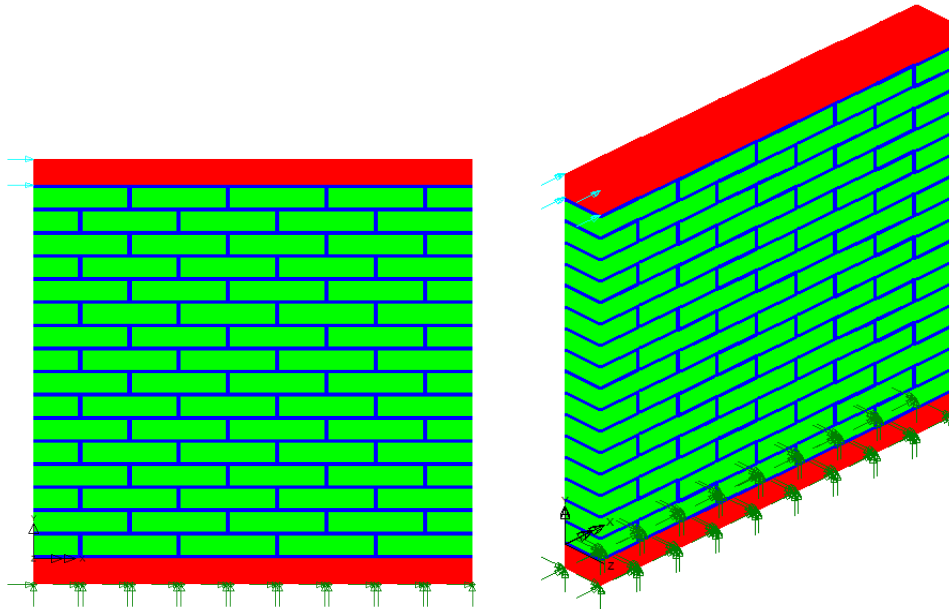
$$c_{mr} = 0,129f_{mr} + 1,85 \quad (4.5)$$

Burada f_b ve f_{mr} sırasıyla blokların ve harcın basınç dayanımlarını temsil etmektedir. Ayrıca harca ait sürtünme açısı değerleri de aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Buna karşın blokların sürtünme açısı değerleri hakkında herhangi bir formülasyon vermemişlerdir.

$$\varphi_{mr} = 1,519. f_{mr} \quad (4.6)$$



Şekil 4.17 Mikro model de 3 boyutlu J4D duvarı düşey yükleme



Şekil 4.18 Mikro model de 3 boyutlu J4D duvarı yatay yükleme

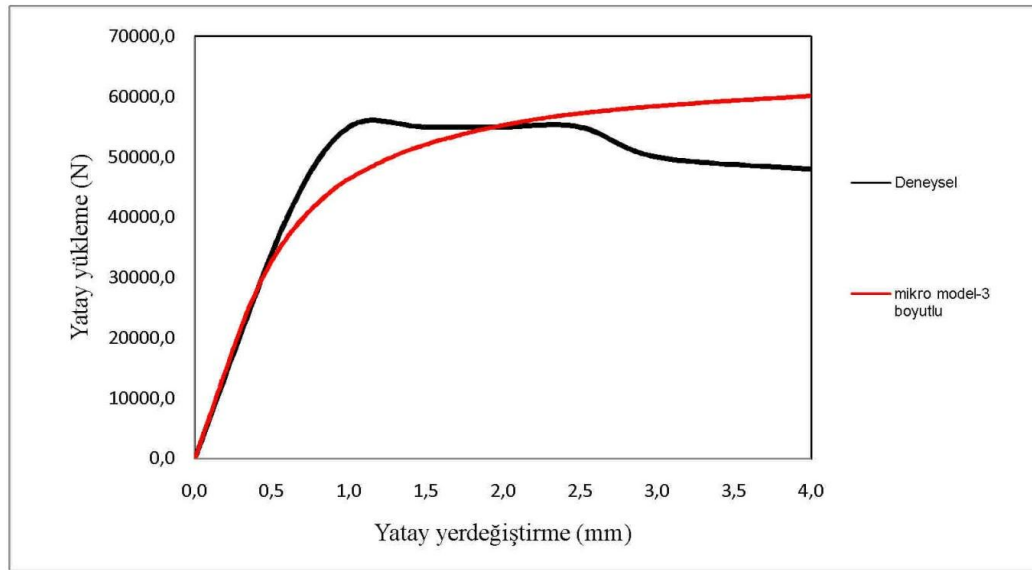
Analizleri yapılan 3 boyutlu mikro model 990 x 1000 x100 mm. boyutlarında ve 595 elaman, 1296 düğüm noktası sayısına sahiptir. Alt rijit plak kısmından yere ankastre ile bağlanan

model de düşey yayılı yük Şekil 4.17' de, yatay yükleme ise Şekil 4.18' de görülmektedir.

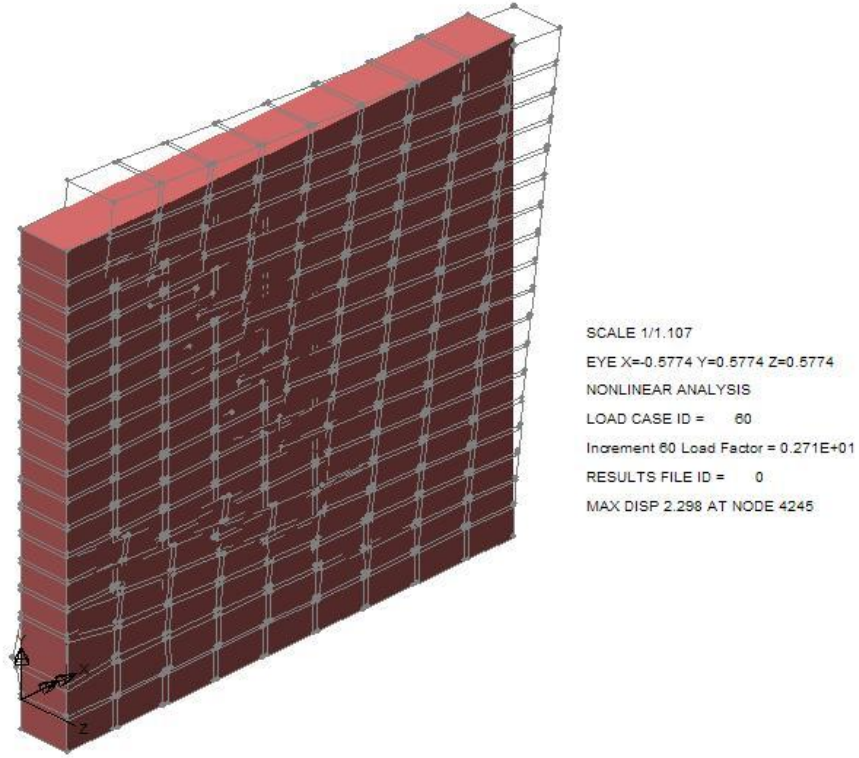
Çizelge 4.1 3 boyutlu mikro model için malzeme parametreleri

3 boyutlu mikro model	ν	E (MPa)	ϕ	c (MPa)
Tuğla	0,15	17000	60°	1,4
Harç	0,15	1200	60°	1,4

Deneysel modelle yapılan karşılaştırmalarda duvarın sağ en üst noktası için yatay yük yer değiştirme eğrileri çizilmiştir ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 4.19). Ayrıca Çizelge 4.1' de verilen malzeme parametreleri kullanılarak modellenen sonlu eleman ağı için şekil değiştirmiş durum Şekil 4.20' de gösterildiği gibidir.

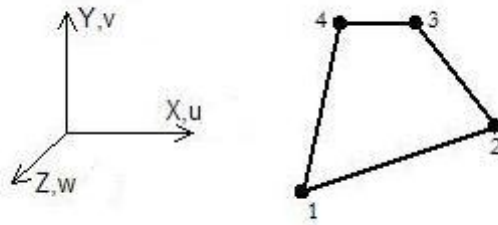


Şekil 4.19 Eindhoven duvarı, deneysel ve 3 boyutlu mikro model için yatay yük–yer değiştirme grafiği

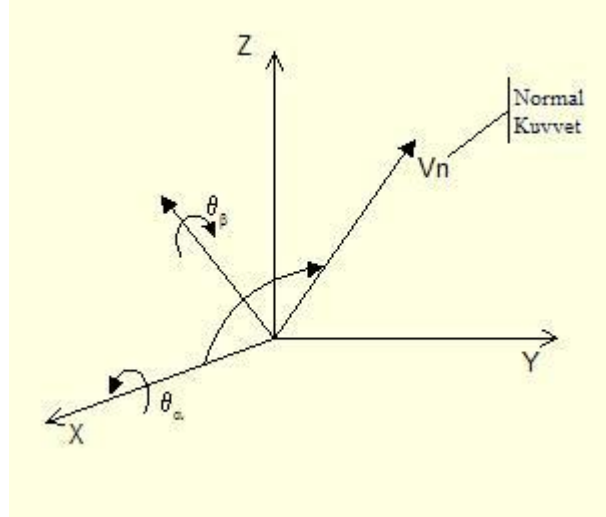


Şekil 4.20 Mikro modelde 3 boyutlu sonlu elaman ağı için şekil değiştirmiş durum

Örnek duvar boyutlarıyla 2 boyutlu mikro modelleme tekniği kullanılarak yapılan analizlerde 4 düğüm noktalı ve 5 serbestliği bulunan ince kabuk (thick shell) eleman QTS4 (LUSAS-ver.13.6) kullanılmıştır. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’ de görüldüğü gibi kullanılan eleman 4 düğüm noktalı ve u, v, w yönlerinde yer değiştirme; $\theta_\alpha, \theta_\beta$ olmak üzere dönme serbestliğine sahiptir.



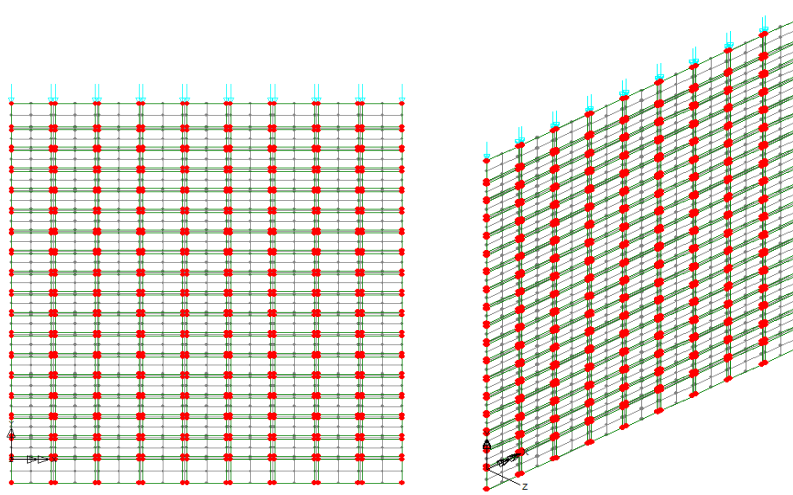
Şekil 4.21 2 boyutlu ince kabuk eleman için kullanılan QTS4 eksen ve modeli (LUSAS-ver.13.6)



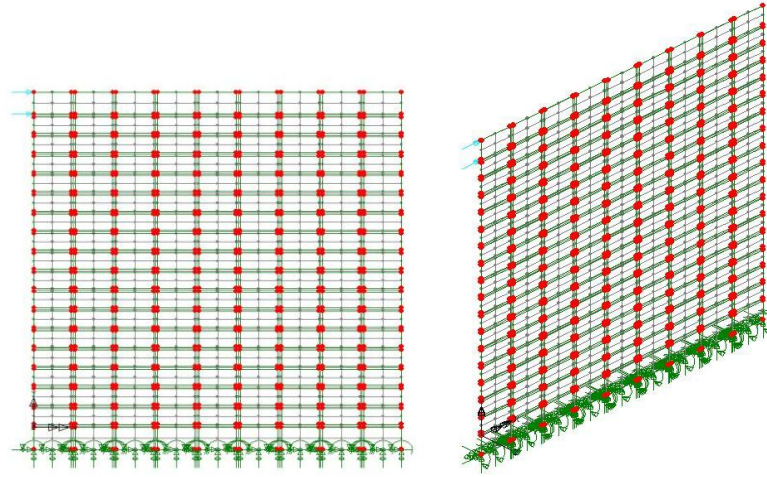
Şekil 4.22 2 boyutlu ince kabuk eleman için dönme serbestlikleri (LUSAS-ver.136)

Koordinatları x, y, z eksenlerinde, $u, v, w, \theta_\alpha, \theta_\beta$ yönlerinde serbestliğe sahip eleman elastik analiz için izotropik malzeme modeli, plastik analizde ise Drucker-Prager malzeme modeli kullanılmıştır.

İki boyutlu mikro modelleme ile $990 \times 1000 \times 100$ mm. boyutlarında kabuk eleman için oluşturulan sonlu eleman ağı 2380 eleman, 2485 düğüm noktasından oluşmaktadır (Şekil 4.23 - 4.24).



Şekil 4.23 Mikro modelde kabuk eleman için sonlu eleman ağı (düşey yükleme)



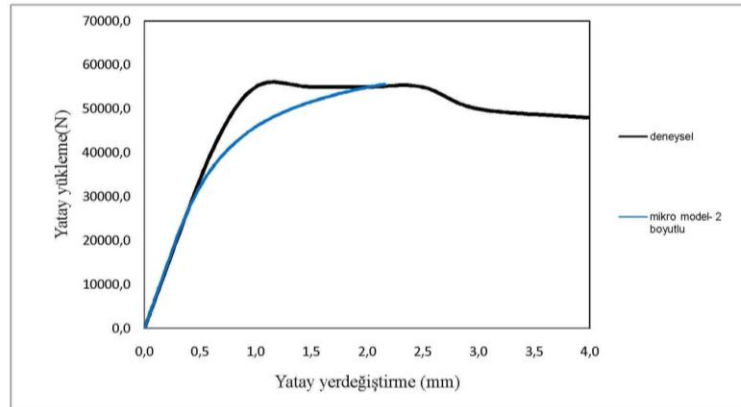
Şekil 4.24 Mikro modelde kabuk eleman için sonlu eleman ağı (yatay yükleme)

Aynı yatay ve düşey yüklerle yapılan analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.2’ de gösterildiği gibidir.

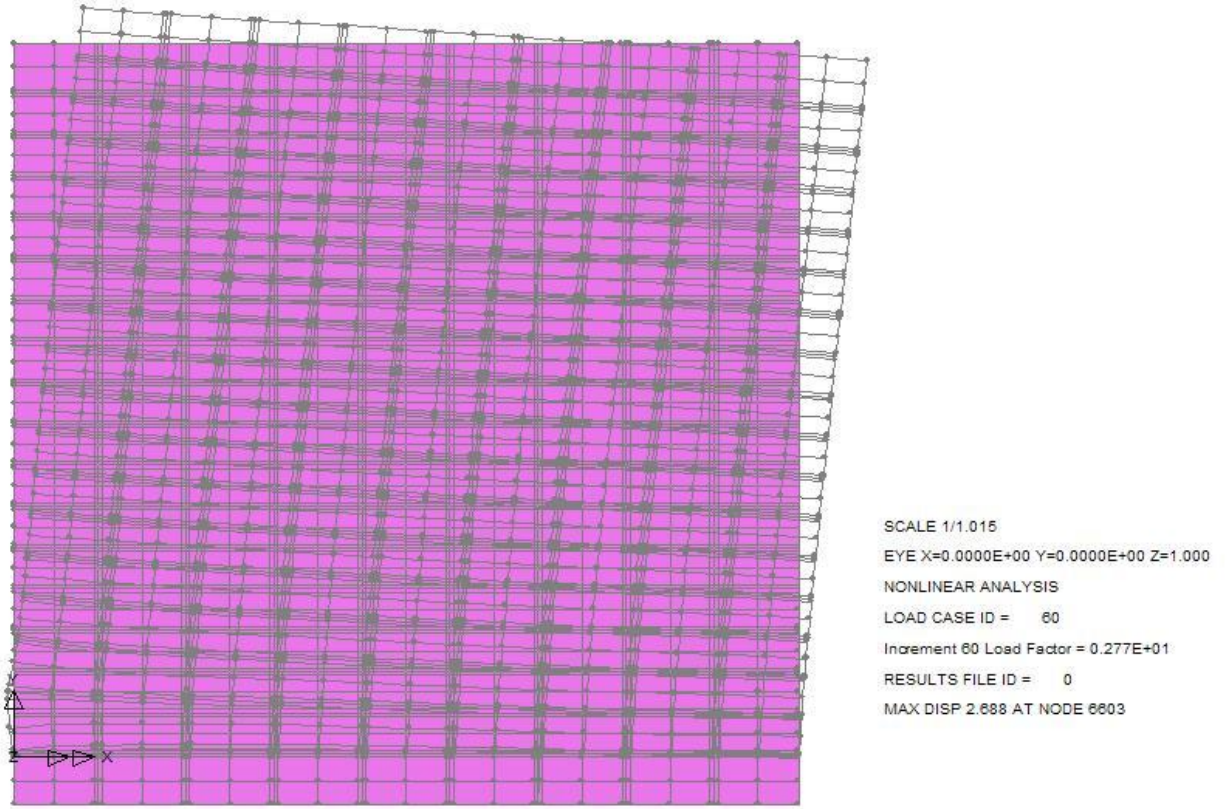
Çizelge 4.2 Mikro modelde kabuk eleman için kullanılan parametreler

2 boyutlu mikro model	ν	E (MPa)	ϕ	c (MPa)
Tuğla	0,15	17000	60°	1,4
Harç	0,15	1200	60°	1,4

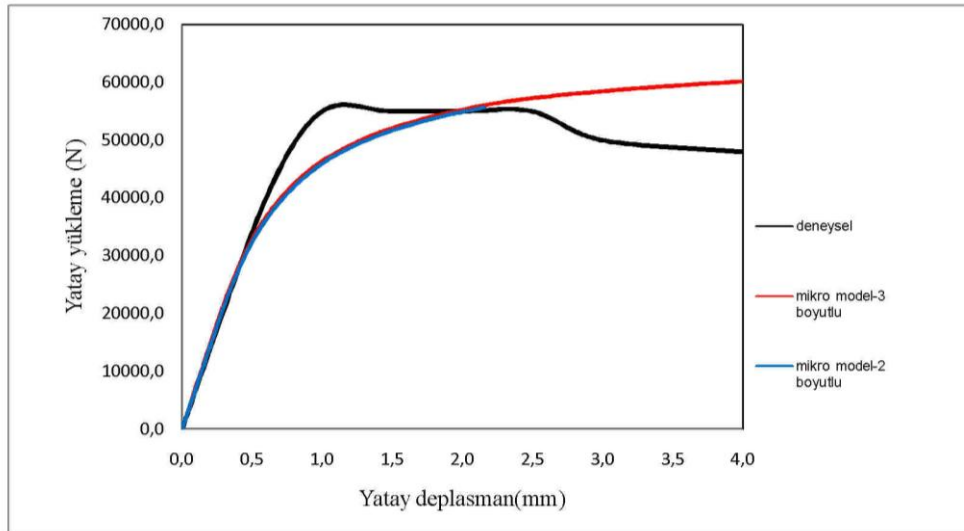
Deneysel modelle yapılan karşılaştırmalarda duvarın sağ en üst noktası için yatay yük yer değiştirme eğrileri çizilmiştir ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 4.25). Mikro modelde 2 boyutlu sonlu eleman ağı için şekil değiştirmiş durum Şekil 4.26’ da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.25 Eindhoven duvarı, deneysel ve 2 boyutlu mikro model için yatay yük–yer değiştirme grafiği

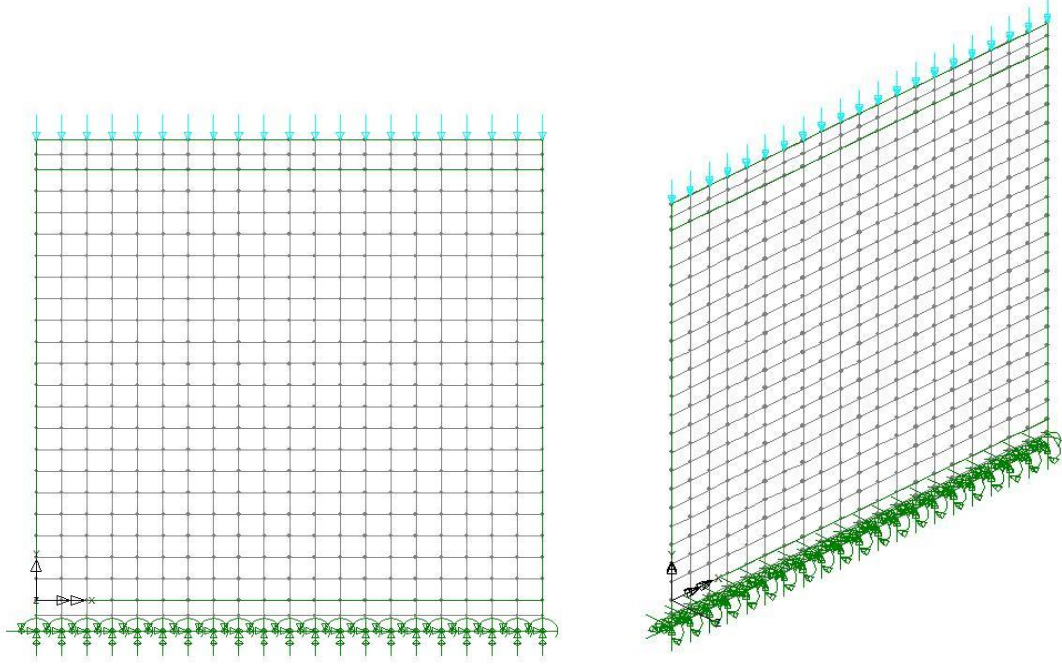


Şekil 4.26 Mikro modelde 2 boyutlu sonlu elaman ağı için şekil değiştirmiş durum

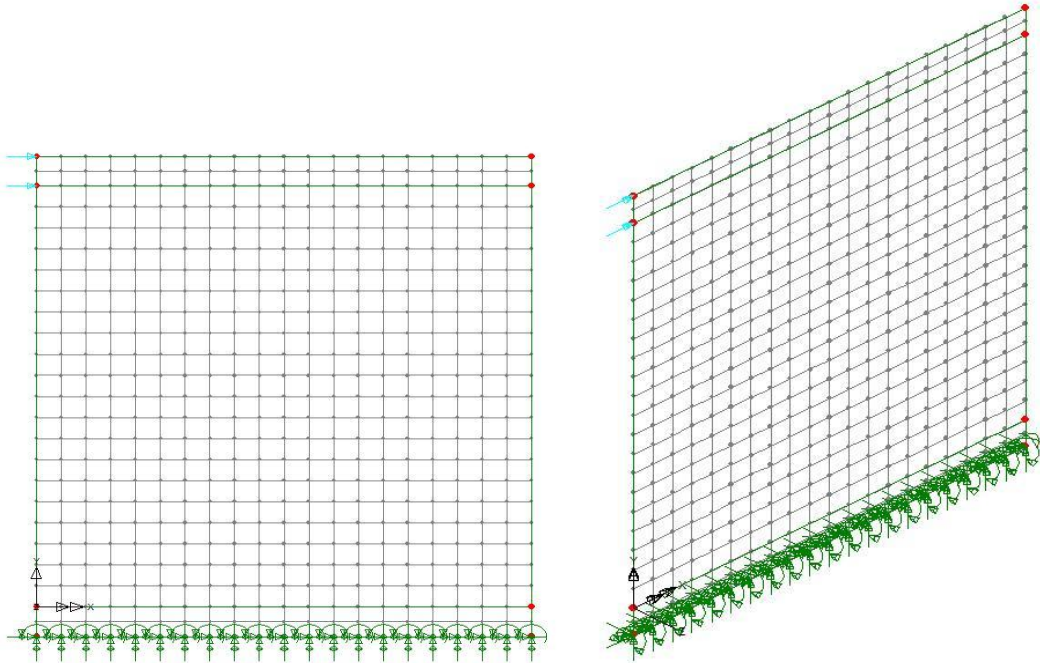


Şekil 4.27 Mikro modelde 3 boyutlu ve 2 boyutlu sonlu elemanların, deneysel yatay yük-yer değiştirme eğrileri ile karşılaştırılması

Şekil 4.27' de görüldüğü gibi 2 ve 3 boyutlu modellerde elde edilen yatay yük-yer değiştirme eğrileri birbirleriyle çakışmıştır ve deneysel sonuçla yakınlığı gözlenmiştir.

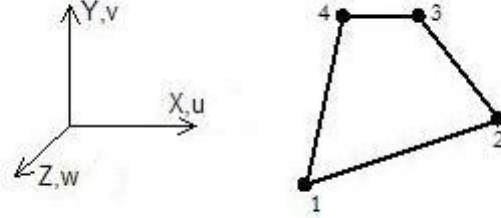


Şekil 4.28 Makro modelde 2 boyutlu 40x50x50 mm boyutlarında sonlu eleman ağı (düşey yükleme)

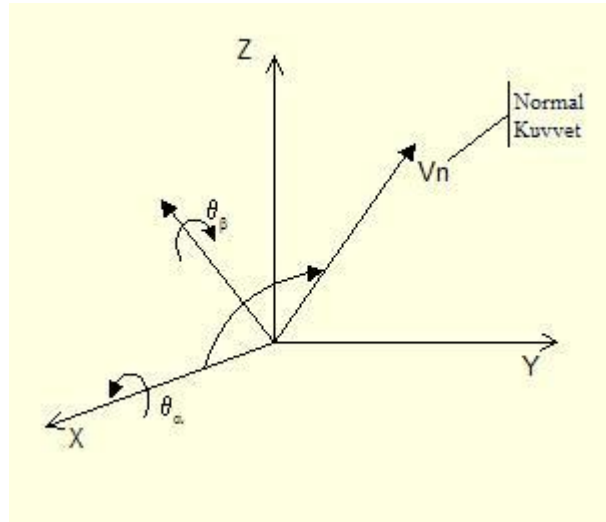


Şekil 4.29 Makro modelde 2 boyutlu 40x50x50 mm boyutlarında sonlu eleman ağı (yatay yükleme)

Örnek duvar boyutlarıyla 2 boyutlu makro modelleme tekniği kullanılarak yapılan analizlerde 4 düğüm noktalı ve 5 serbestliği bulunan ince kabuk (thick shell) eleman QTS4 (LUSAS-ver.13) kullanılmıştır. Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’ de görüldüğü gibi 4 düğüm noktalı eleman u, v, w yönlerinde yer değiştirme; θ_α , θ_β olmak üzere dönme serbestliğine sahiptir.



Şekil 4.30 2 boyutlu ince kabuk eleman için kullanılan QTS4 eksen ve modeli (LUSAS-ver.13)



Şekil 4.31 2 boyutlu ince kabul eleman için dönme serbestlikleri (LUSAS-ver.13.6)

Koordinatları x, y, z eksenlerinde, u, v, w, θ_α , θ_β yönlerinde serbestliğe sahip eleman elastik analiz için izotropik malzeme modeli, plastik analizde ise Drucker-Prager malzeme modeli kullanılmıştır. Bu hasar modelinde belirleyici olan parametreler; (c) kohezyon ve (ϕ) içsel sürtünme açısıdır.

İki boyutlu makro modelleme ile 990 x 1000 x100 mm. boyutlarında kabuk eleman için oluşturulan sonlu eleman ağı 480 eleman, 525 düğüm noktasından oluşmaktadır.

Şekil 4.28 ve 4.29’ da görülen modelde tuğla ve harç için homojenleştirme yapılmıştır ve tek bir malzeme olarak LUSAS-ver.13’ de tanımlanmıştır. Yığma duvarın elastisite modülü için

(4.7) de verilen bağımsız yüzeylerin birleşim formülünden yararlanılmıştır (Brencich vd.).

$$\frac{1}{E_M} = \frac{\eta_b}{E_b} + \frac{\eta_m}{E_m} + 2\eta_m\eta_b \frac{v_b E_m - v_m E_b}{\eta_m(1-v_b)E_m + \eta_b(1-v_m)E_b} \left(\frac{v_m}{E_m^2} - \frac{v_b}{E_b^2} \right) \quad (4.7)$$

$$\eta_m = t_m / (t_m + t_b) \quad (4.8)$$

$$\eta_b = t_b / (t_m + t_b) \quad (4.9)$$

η_m harç için hacim bölün; η_b ise tuğla için hacim bölünidir. Bu hacim bölünleri ise t_m (harç kalınlığı), ve t_b (tuğla kalınlığı) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler %1' den daha düşüktür böylece elastisite değeri belirleme de poisson oranına bağlı kalınmamış olunuyor.

Çizelge 4.3 Makro model için homojenleştirmede kullanılan parametreler

	v	E (MPa)	t (mm)
Tuğla (b)	0,15	17000	52
Harç (m)	0,15	1200	10

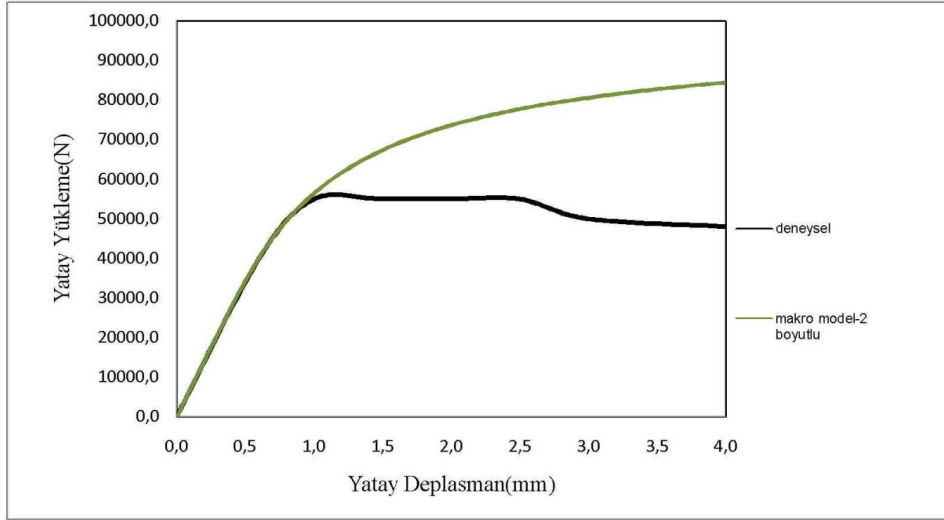
Çizelge 4.3' te verilen malzeme parametreleriyle önce (4.8), (4.9) bağıntıları ve buradan elde edilen η_m ve η_b değerleriyle yığma duvarın elastisite modülünü (E_M) (4.7) bağıntısını kullanarak hesaplarız. Homojenleştirme için (4.7) bağıntısından yararlanılarak E_M değeri belirlendikten sonra, diğer bir parametre olan kohezyon (c) değeri için (4.10) bağıntısından yararlanılmış ve f_c (basınç dayanımı) için 16 MPa değeri kullanılmıştır.

$$c = 0,1225f_c(MPa) + 0.22 \quad (4.10)$$

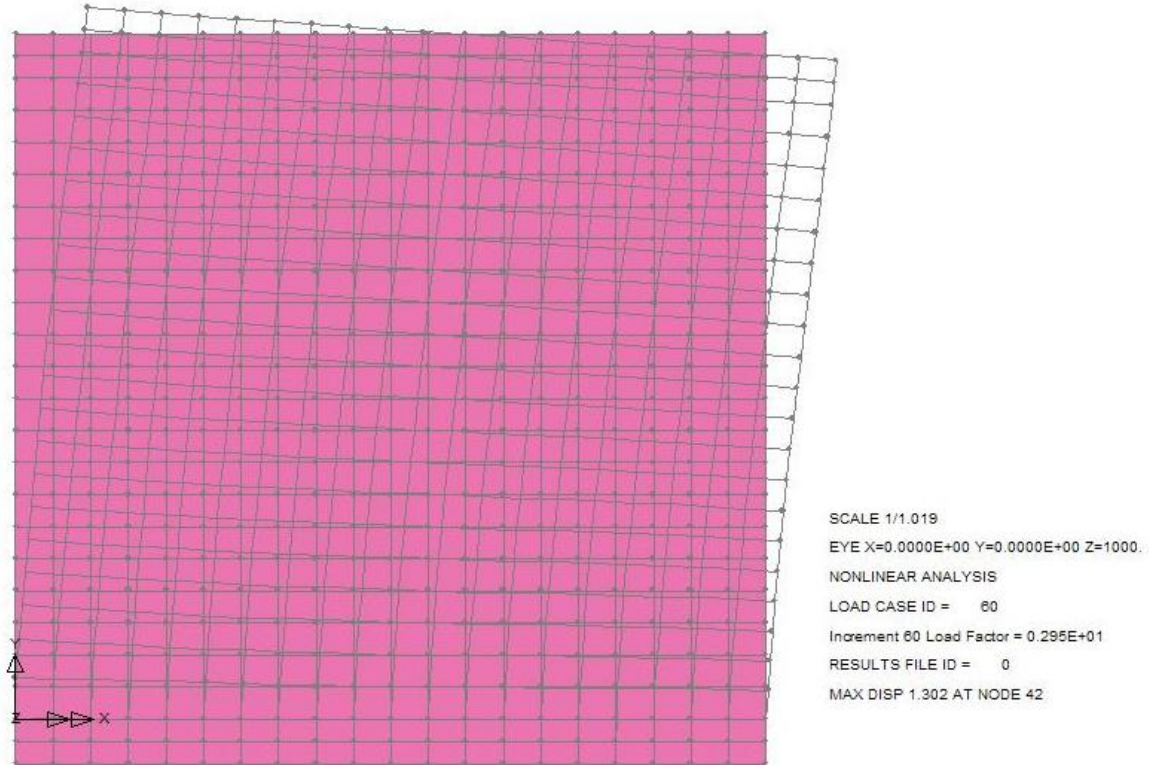
Bunun sonucunda yaklaşık olarak elastisite modülü 5400 MPa, kohezyon ise 2,18 MPa olarak bulunur. Oluşturulan modelde kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 4.4' de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Makro model için modelde kullanılan parametreler

	f_c (MPa)	v	E (MPa)	ϕ	c (MPa)
Yığma Duvar	16	0,15	5000	60°	2,2

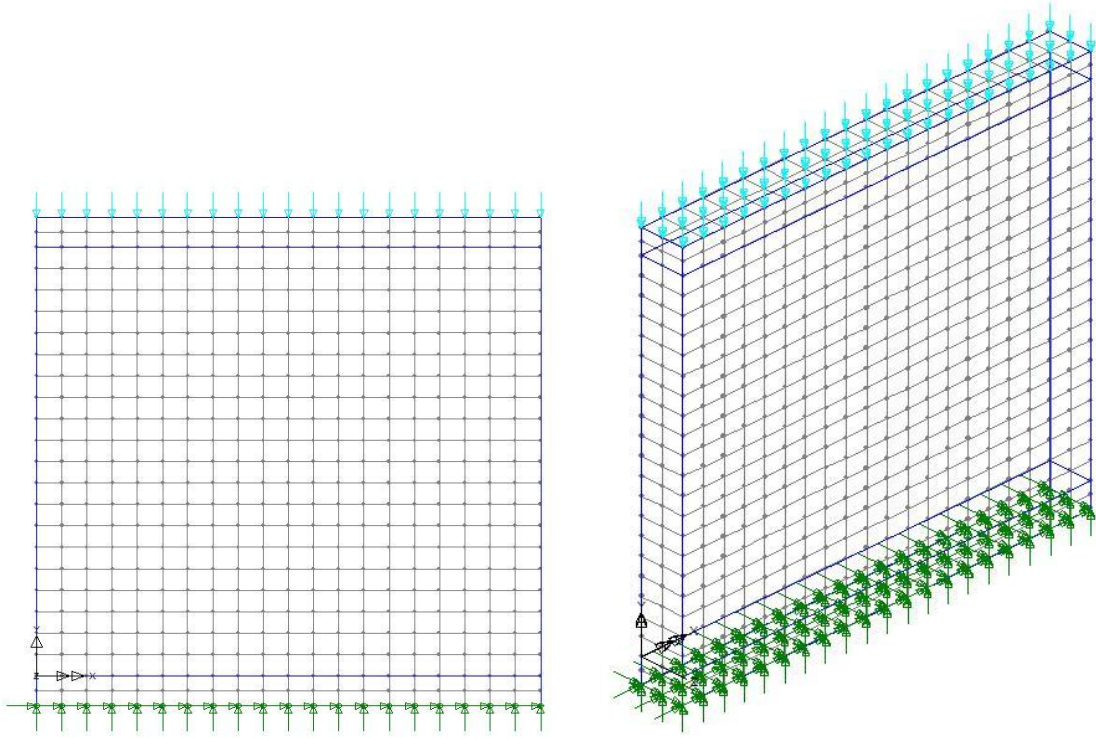


Şekil 4.32 2 boyutlu makro model ve deneysel yatay yük-yer değiştirme grafiği

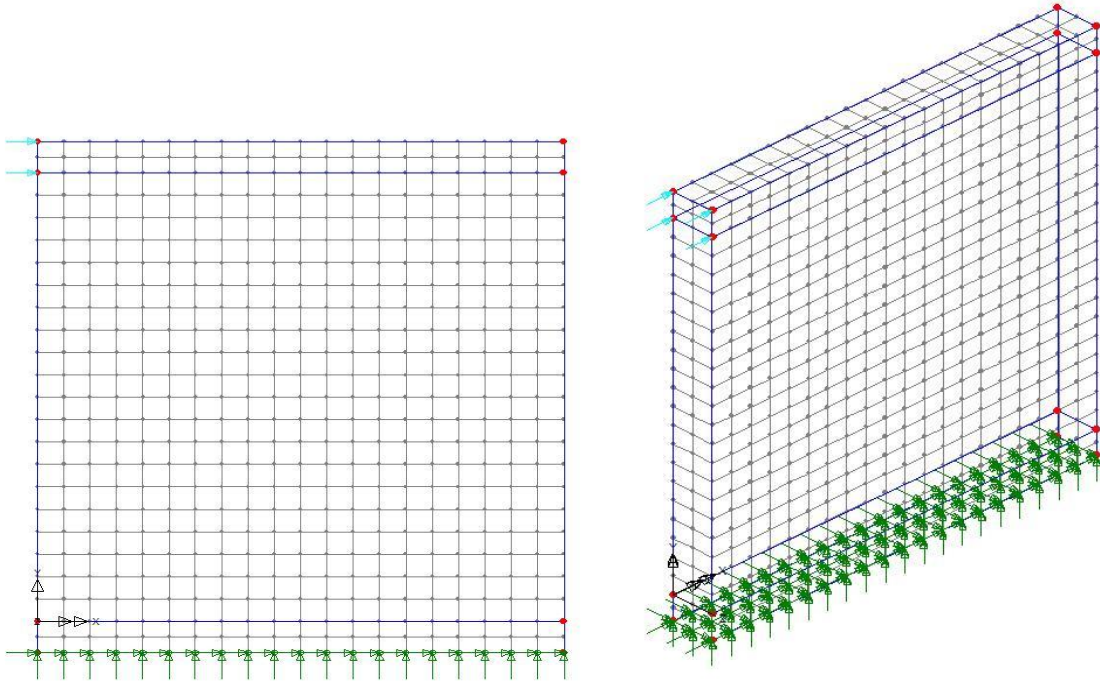


Şekil 4.33 2 boyutlu makro modelde şekil değiştirmiş durum

Deneysel modellerle yapılan karşılaştırmalarda duvarın sağ en üst noktası için yatay yük yer değiştirme eğrileri çizilmiştir ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 4.32). Makro modelde 2 boyutlu sonlu eleman ağı için şekil değiştirmiş durum Şekil 4.33’ da gösterildiği gibidir.

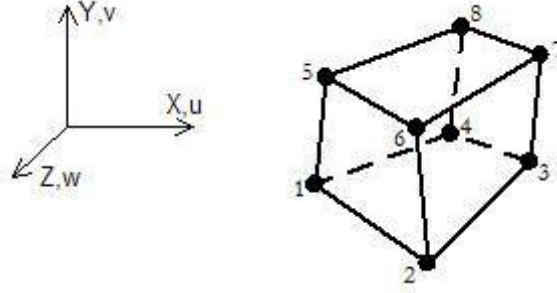


Şekil 4.34 Makro modelde 3 boyutlu 40x50x50 mm boyutlarında sonlu eleman ağı (düşey yükleme)



Şekil 4.35 Makro modelde 3 boyutlu 40x50x50 mm boyutlarında sonlu eleman ağı (yatay yükleme)

Üç boyutlu analizlerde 8 düğüm noktalı ve 3 serbestliği bulunan katı (solid) eleman HX8M (LUSAS-ver.13) kullanılmıştır. Şekil 4.36’ da gösterildiği gibi 8 düğüm noktalı eleman z eksenini doğrultusunda sağ el kuralına göre numaralandırılmıştır. Koordinatları x, y, z eksenlerinde, u, v, w yönlerinde serbestliğe sahip eleman elastik analiz için izotropik malzeme modeli, plastik analizde ise Drucker-Prager malzeme modeli kullanılmıştır.



Şekil 4.36 3 boyutlu katı eleman için kullanılan HX8M eksen ve modeli (LUSAS-ver.13)

Analizleri yapılan 3 boyutlu makro model 990 x 1000 x100 mm. boyutlarında ve 960 eleman, 1575 düğüm noktası sayısına sahiptir. Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’ de görülen modelde tuğla ve harç için homojenleştirme yapılmıştır ve tek bir malzeme olarak LUSAS-ver.13’ da tanımlanmıştır. Yığma duvarın elastisite modülü için (4.7) de verilen bağımsız yüzeylerin birleşim formülünden yararlanılmıştır.

Çizelge 4.5 Makro model için homojenleştirmede kullanılan parametreler

	v	E (MPa)	t (mm)
Tuğla (b)	0,15	17000	52
Harç (m)	0,15	1200	10

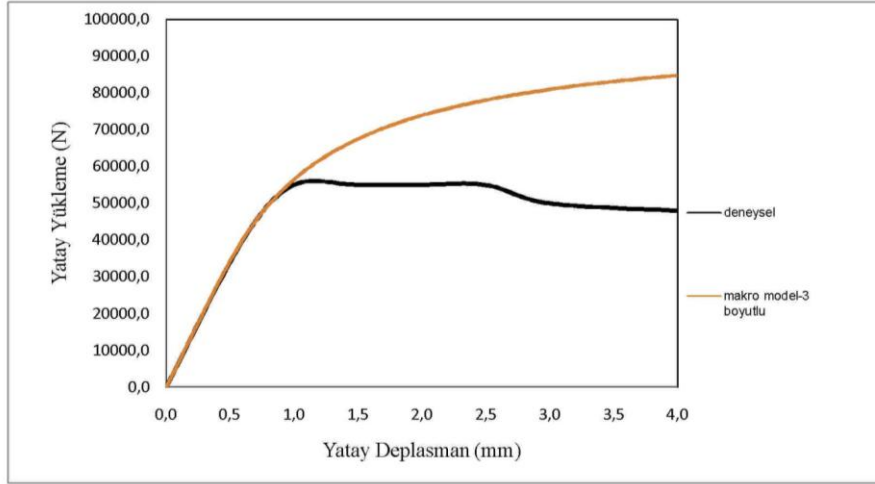
Çizelge 4.5’ de verilen malzeme parametreleriyle önce (4.8), (4.9) bağıntıları ve buradan elde edilen η_m ve η_b değerleriyle yığma duvarın elastisite modülünü (E_M) (4.7) bağıntısını kullanarak hesaplarız. Homojenleştirme için (4.7) bağıntısından yararlanılarak E_M değeri belirlendikten sonra, diğer bir parametre olan kohezyon (c) değeri için (4.11) bağıntısından yararlanılmış ve f_c (basınç dayanımı) için 16 MPa değeri kullanılmıştır.

$$c = 0,1225f_c(MPa) + 0.22 \quad (4.11)$$

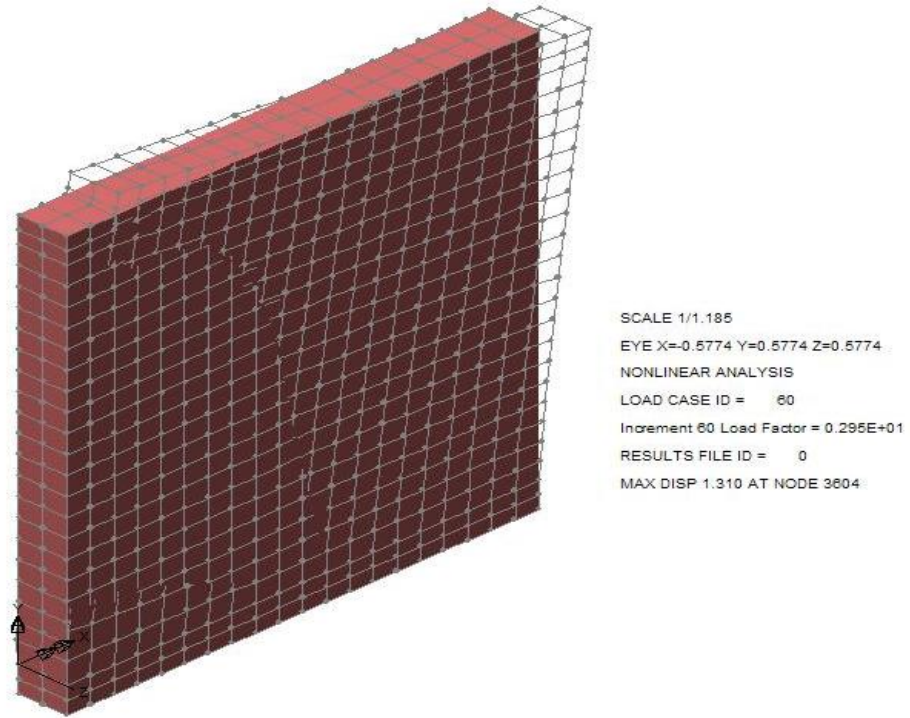
Bunun sonucunda yaklaşık olarak elastisite modülünü 5400 MPa, kohezyon değerini ise 2,18 olarak buluruz. Makro model için kullanılan parametreler Çizelge 4.6’ da gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.6 Makro model için modelde kullanılan parametreler

	f_c (MPa)	ν	E (MPa)	ϕ	c (MPa)
Yığma Duvar	16	0,15	5000	60°	2,2



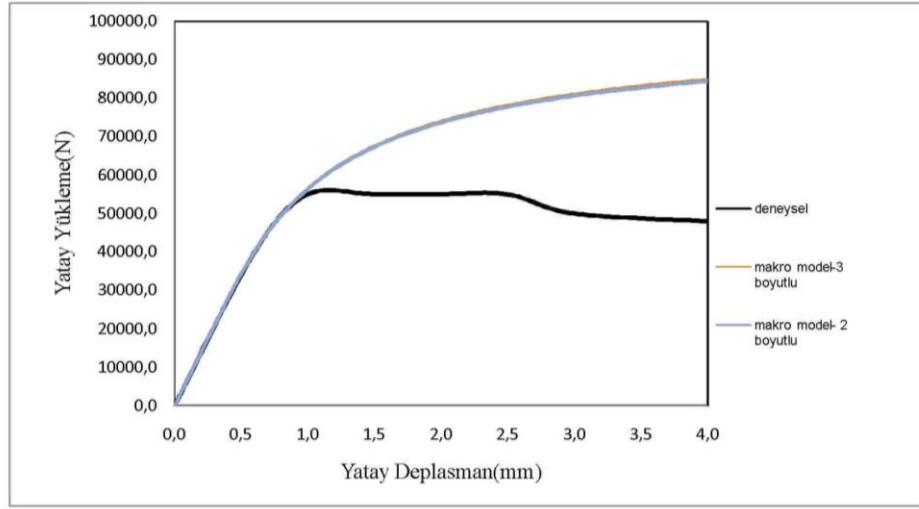
Şekil 4.37 3 boyutlu makro model ve deneysel yatay yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 4.38 3 boyutlu makro modelde şekil değiştirmiş durum

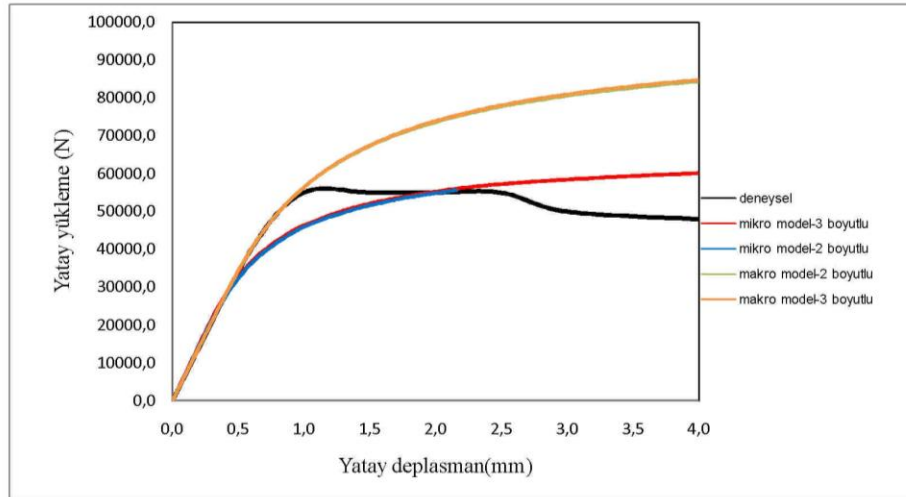
Deneysel modelle yapılan karşılaştırmalarda duvarın sağ en üst noktası için yatay yük yer değiştirme eğrileri çizilmiştir ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 4.37). Makro

modelde 3 boyutlu sonlu elaman ağı için şekil değiştirmiş durum Şekil 4.38’ da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.39 Makro modelde 3 boyutlu ve 2 boyutlu sonlu elemanların, deneysel yatay yük-yer değiştirme eğrileri ile karşılaştırılması

Makro modelde üç boyutlu ve iki boyutlu sonlu elemanların deneysel ve yatay yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 4.39’ da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.40 Makro ve mikro modelde 3 boyutlu ve 2 boyutlu sonlu elemanların, deneysel yatay yük-yer değiştirme eğrileri ile karşılaştırılması

Yapılan çalışma sonucu 4 farklı modelin yatay yük- yatay yer değiştirme eğrilerinin deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.40 da gösterildiği gibidir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yığma yapılar günümüzde hala kırsal kesimlerde inşa edilmekte ve nüfusumuzun büyük bir çoğunluğu bu tür yapılarda yaşamaktadır. Ülkemizde çok tercih edilen bir yapı türü olmasına rağmen yapı davranışı ile ilgili mühendislik açısından yeterli çalışmalar bulunmamaktadır. Yığma yapılar ile ilgili gerek üniversitelerimizin inşaat mühendisliği bölümlerinde verilen eğitimin, gerekse bu konularla ilgili yapılan akademik çalışmaların yetersiz olduğu söylenebilir. Aynı zamanda yığma yapıların davranışlarının belirlenmesi için yapılan hesap yöntemlerinin karmaşık, kullanılacak malzeme parametrelerinin belirsiz oluşu bilgi karmaşasına yol açmaktadır.

Yukarıda belirtilen unsurlar göz önünde bulundurularak, bu tez kapsamında, donatısız yığma duvarların iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile elastik-plastik modellemeleri yapılmış, plastik aşamada kullanılan kırılma modelinin ihtiyaç duyduğu malzeme parametrelerinden kohezyon ile ilgili parametrik bir araştırma yapılmıştır. Bu bağlamda, literatürde yer alan örnek bir donatısız yığma duvarın, farklı sonlu eleman tipleri ile çalışan mikro ve makro modelleme tekniği ile numerik modeli oluşturulmuş, doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri, Drucker-Prager kırılma kriterinin belirlemiş olduğu akma yüzeyi kullanılarak LUSAS-ver.13 programında gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki paragraflarda elde edilen sonuçlar görülmektedir:

- 1) Örnek deney duvarına ait deney düzeneğinde duvarın alt ve üst kesimlerinde yer alan rijit plaklar ile duvarın bağlantıları tam olarak rijit olmadığı düşünüldüğünden, İki ve üç boyutlu sonlu eleman tipleri ile oluşturulan numerik modellerde, deneysel verilerle uyumlu sonuçlar elde edilmek için herhangi bir diyafram çalışması öngörülmemiştir. (Şekil 4.20, Şekil 4.26, Şekil 4.33 ve Şekil 4.38)
- 2) Şekil 4.40’ da görüleceği gibi 2 boyutlu ve 3 boyutlu sonlu eleman tipiyle yapılan mikro modellemelerde elde edilen yatay yük – yatay yer değiştirme ilişkisi, yük taşıma kapasitesi açısından gerek elastik gerek plastik bölgede oldukça deneysel verilerle uyumludur.
- 3) 2 ve 3 boyutlu sonlu eleman tipleri ile hazırlanan makro modellere ait analiz sonuçları değerlendirildiğinde, Şekil 4.40’ dan da görülebileceği gibi, Bölüm 4’ de belirtilen yaklaşım çerçevesinde elastik bölge için yatay yük – yatay yer değiştirme ilişkisinin, yük taşıma kapasitesi ve başlangıç eğimi açısından deneysel verilerle uyumlu olduğu, ancak plastik bölgede deneysel verilerin oldukça üzerinde kaldığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- 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, Pg 23 – 42.
- Aytekin, İ., (2006), Donatısız ve Sarılmış Yığma Yapıların Deprem Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Bağcı, M., (2003), Yatay Yükler Etkisindeki Dolgulu Betonarme Düzlem Çerçevelerin Malzeme Bakımından Nonlinear Analizi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Batur, A., (1999), Donatısız Yığma Binaların Yatay Yükler Altındaki Davranışı ve Bazı Ülkelerin Şartnamelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bayraktar, A., (2006), Tarihi Yapıların Analitik İncelenmesi ve Sismik Güçlendirme Metotları, Beta Yayınları, İstanbul.
- Bayülke, N., (1992), Yığma Yapılar, T.C. İmar ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü, Ankara.
- Brencich, A., Corradi, C., Gambarotta, L., Mantegazza, G. ve Sterpi, E., "Compressive Strength of Solid Clay Brick Masonry under Eccentric Loading", Department of Structural and Geotechnical Engineering, University of Genoa, Italy, RUREDIL s.p.a., Milan, Italy.
- Chen, W.F., (1982), *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill Company, New York.
- Chen, W.F., ve Saleeb, A.T., (1982), *Constitutive Equations for Engineering Materials, Vol.1, Elasticity and Modeling*, N.Y. Wiley, New York.
- Chen, W.F., ve Han, D.J., (1988), *Plasticity for Structural Engineers*, N.Y. Springer-Verlag, New York.
- Chen, W.F. ve Mizuno, E., (1990), "Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier Science Publishers B.V", 661.
- Çamlıbel, N., (2000), *Temellerin Takviyesi*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- DİE, (2000), *Bina Sayımı*, Devlet İstatistik Enstitüsü, Ankara.
- Doran, B., (2009), "Numerical Simulation of Conventional RC Columns Under Concentric Loading", *J Mater Design*, 30(6): 2158-2166.
- Doran, B., Köksal, H.O. ve Turgay, T., (2009), "Nonlinear Finite Element Modeling of Rectangular/Square Concrete Columns Confined with FRP", *J Mater Design*, 30(8): 3066-3075.
- Doran, B., (2004), "Elastic-Plastic Analysis of R/C Coupled Shear Walls: The Equivalent Stiffness Ratio of The Tie Elements", *Indian Institute of Science*, 83: 87-94.
- Erol, A.İ., (1997), *Mimarlıkta Taşıyıcı Sistemler*, Karaelmas Üniversitesi Zonguldak MYO, Zonguldak.
- Hasol, D., (1998), *Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü*, s. 450-457, YEM Yayınları, İstanbul.
- Kanca, A.G., (2004), Yığma Yapıların Depreme Karşı Dayanımları Beyoğlu Postane Hizmet Binası ve Beyoğlu Han Binası, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- Kömürcüoğlu, E.A., (1962), *Yapı Malzemesi Olarak Kerpiç ve Kerpiç İnşaat Sistemleri*, İTÜ

Matbaası, İstanbul.

Köksal, H.O., Doran, B., ve Turgay, T., (2009), “A Practical Approach for Modelling FRP Wrapped Concrete Columns”, *Construction and Building Materials*, 23(3): 1429–1437.

Köksal, H.O., Doran, B., Özsoy, A.E., ve Alacalı, N.S., (2004), “Nonlinear Modeling of Concentrically Loaded Reinforced Blockwork Masonry Columns”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31: 1012-1023.

Köksal, H.O. ve Doran, B., (2010), “Stress-Strain Model of Rectangular/Square Concrete Columns Confined with FRP Sheets”, *Proceedings of ICE-Structures and Buildings*.

Köksal, H.O., Doran, B., Kuruşçu, A.O., ve Ferruh Altınsoy, F., (2010), “Modelling The In-Plane Behavior of Unreinforced Masonry Walls”, *Monubasin8 2010 Patras, Greece*.

Köksal, E. ve Köksal, T., (1996), *Çubuk Plak Kabuk Stabilitesi*, YTÜ Matbası, Yayın No:309, 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, 107-115.

Köksal, T., (1995), *Sonlu Elemanlar Metodu*, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

Kuban, D., (1998), *Mimarlık Kavramları*, Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, İstanbul.

Kuruşçu, A.O. (2005), *Yığma Yapıların Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

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

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

Lourenço, P.B., (2002), “Computations on Historic Masonry Structures”, *University of Minho, Portugal, Prog. Struct. Engng Mater.*, 4:301–319.

Lusas. Finite element system. Version 13.6, FEA ltd, Surrey, UK 2006.

Mahrabel, H.A., (2006), *Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Teknikleri*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

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, Italy.

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, 1-12, Frenze, Italy.

Özer, S., (2006), *Geleneksel Yığma Yapılarda Strüktürel Elemanların Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

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, Portugal.

Saraç, M.M., (2003), *Tarihi Yığma Kargir Yapıların Güçlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi, İstanbul.

Soygeniş, M., (1999), Yapı 2, Birsen Yayınevi, İstanbul.

TS 2510, (1977)

TS 2717, (1977)

TS 704, (1979)

Türkçü, Ç., (2000), Yapım, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Ulkay, S., (1978). Yapı Bilgisi, YTÜ Mimarlık Fakültesi Baskı İşliği, İstanbul.

Ural, A.,(2009), Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

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

www.LUSAS.com

Yıldırım, H., (2007), Yığma Yapı Elemanları İçin İzotropik Hasar Modeli Geliştirilmesi ve Sonlu Eleman Uygulamaları, Doktora Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yücesoy, L., (2001). Temeller Duvarlar Döşemeler, Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, İstanbul.

Zucchini, A. ve Lourenço, P.B., (2009). “A Micro Mechanical Homogenisation Model for Masonry: Application to Shear Walls”, International Journal of Solids and Structures, 46, 871-886.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi: 04.10.1984

Doğum yeri: İstanbul

Lise: 1995-2002 Vefa Anadolu Lisesi

Lisans: 2002-2007 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fak.
İnşaat Mühendisliği

Yüksek Lisans 2007-2010 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enst.
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı

Çalıştığı kurumlar

2008-Devam ediyor Kaya İnşaat ve Taah. Koll. Şti.