T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ

Muhammed Buğra CIPLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yapı Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Bilge DORAN

Ocak, 2020

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ

Muhammed Buğra CIPLAK tarafından hazırlanan tez çalışması 30.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

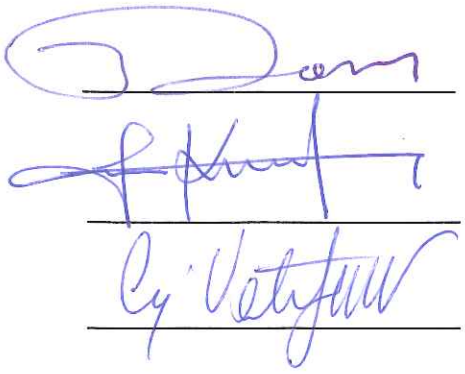
Prof. Dr. Bilge DORAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bilge DORAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat Serdar KIRÇIL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Cüneyt VATANSEVER, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi



Danışmanım Prof. Dr. Bilge DORAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Donatısız Yığma Duvarların Doğrusal Olmayan Analizi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muhammed Buğra CIPLAK



Aileme

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca engin bilgi ve deneyimleri ile bizlere yol gösteren, değerli zamanını bizlere paylaşarak; akademik ve mesleki katkılarda bulunan Araştırma Görevlisi Metin Karslıoğlu, Araştırma Görevlisi Zeynep Ünsal Aslan ve çok değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Bilge Doran'a en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Muhammed Buğra CIPLAK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

1 Giriş 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 3

1.3 Hipotez 4

2 Yığma Duvar Bileşenlerinin Mekanik Özellikleri 5

2.1 Yığma Birimleri Olarak Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri 5

2.1.1 Tuğla 6

2.1.2 Doğal Taş 9

2.1.3 Harç 11

2.2 Yığma Birimleri Mekanik Özellikleri 13

2.2.1 Basınç Dayanımları 13

2.2.1 Elastisite Modülü 15

3 Yığma Duvarın Modellenmesi 18

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi 18

3.2 Elastoplastik Hasar Modeli (CDP) 26

3.3 Yığma Duvarların Sayısal Modelleme Teknikleri 31

3.3.1 Mikro Modelleme 31

3.3.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme 32

3.3.3 Makro Modelleme 34

4 Parametrik Çalışma 36

4.1 Örnek Duvar Üzerine Çalışmalar 36

4.2 Bulgular 47

5 Sayısal Çalışmalar 49
5.1 Sayısal Çalışma No.1 ... 49
5.2 Sayısal Çalışma No.2 ... 51
5.3 Sayısal Çalışma No.3 ... 53
6 Sonuç ve Öneriler 55
Kaynakça 56
Tezden Üretilmiş Yayınlar 64

SİMGE LİSTESİ

f_{bl}	Tuğla Basınç Dayanımı
$f_m{}'$	Yığma Yapı Basınç Dayanımı
f_{mr}	Harç Basınç Dayanımı
E_m	Yığma Elastisite Modülü
E_{bl}	Tuğla Elastisite Modülü
E_{mr}	Harç Elastisite Modülü
f'_{bl}	Beton Blok Elastisite Modülü
f'_{br}	Kil Tuğla Elastisite Modülü
n_m	Harç Hacim Böleni
n_b	Tuğla Hacim Böleni
t_m	Harç Kalınlığı
t_b	Tuğla Kalınlığı
$\bar{\rho}$	Efektif Hidrostatik Basınç Gerilmesi
$\bar{q}$	von-Mises Eşdeğer Efektif Gerilmesi
σ_{max}	Maksimum Efektif Asal Gerilmesi
K_c	Deviatrik Basınç/Çekme Gerilme Yüzeyi Mesafesi
σ_{b0}	Çok Eksenli Gerilme
σ_{c0}	Tek Eksenli Gerilme
ϵ	Eksantriklik
ψ	Genleşme Açısı
μ	Viskozite Parametresi
$\varepsilon^{\rho l}$	Plastik Şekil Değiştirme Değeri
$\varepsilon_v^{\rho l}$	Viskoplastik Şekil Değiştirme Değeri
k_n	Normal Rijitlik
k_s	Kayma Rijitliği
G_b	Yığma Biriminin Kayma Modülü
G_{mr}	Harcın Kayma Modülü

fm'	Yığma Basınç Dayanımı
ft'	Yığma Çekme Dayanımı
em'	Maksimum Gerilmeye Karşılık Gelen Şekil Değiştirme

KISALTMA LİSTESİ

CDP	Elastoplastik Hasar Modeli
GFRP	Cam Elyaf Takviyeli Plastik
NLFEA	Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Analizi
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TS	Türk Standardı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Yığma Duvar [38] 5

Şekil 2.2 Fabrika Tuğlası [40] 6

Şekil 2.3 Harman Tuğlası [43] 8

Şekil 2.4 Çimento Harcı [50] 11

Şekil 2.5 Horasan Harcı İle Örülmüş Duvar [53] 12

Şekil 3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi [62] 18

Şekil 3.2 Sonlu Elemanlar Metodunda Kullanılan Bazı Eleman Tipleri [63] 19

Şekil 3.3 Sonlu Elemanlar Metodu Modelleme Örneği [66] 20

Şekil 3.4 Düğün Noktası Serbestlik Dereceleri [65] 21

Şekil 3.5 Doğrusal Elastik Malzeme Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi [67] 22

Şekil 3.6 Doğrusal Olmayan Elastik Malzeme Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi [67] 23

Şekil 3.7 Yumuşak Çelikte Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi [67] 23

Şekil 3.8 İdeal Elasto-Plastik Malzeme [67] 24

Şekil 3.9 Elastik Tam Plastik Malzemeler için Şematik Kırılma Yüzeyi [68] 25

Şekil 3.10 Beton için Çekme Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi [20] 26

Şekil 3.11 Beton için Basınç Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi [20] 27

Şekil 3.12 Deviatorik Düzlemde Akma Yüzeyleri [20] 28

Şekil 3.13 Düzlem İçi Gerilmede Akma Yüzeyleri [20] 28

Şekil 3.14 Meridyen Düzleminde Plastik Potansiyel Fonksiyonu [75] 30

Şekil 3.15 Mikro Modelleme [1] 32

Şekil 3.16 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme [1] 33

Şekil 3.17 Enterfaz Tanımı [14] 33

Şekil 3.18 Makro Modelleme [1] 34

Şekil 4.1 Deney Düzeneği [81] 36

Şekil 4.2 Clay 1 Duvarı 38

Şekil 4.3 Viskozite Parametresi için Yük-Yer Değiştirme Davranış Değişimi 41

Şekil 4.4 Genleşme Açısı için Yük-Yer Değiştirme Davranış Değişimi 47

Şekil 5.1 Haider Yığma Duvarı [82] 49

Şekil 5.2 Haider Yığma Duvarı Yük-Yer Değiştirme Grafiği 50

Şekil 5.3 Eindhoven Yığma Duvarı 51

Şekil 5.4 Eindhoven Yığma Duvarı Yük-Yer Değiştirme Grafiği 52

Şekil 5.5 Addessi Yığma Duvarı [84] 53

Şekil 5.6 Addessi Yığma Duvarı Yük-Yer Değiştirme Grafiği 54

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Düşey Delikli Tuğlaların (Kil Kagir Birimlerin) Birim Hacim Kütleleri ve Basınç Dayanım Değerleri [41] 7

Tablo 2.2 Biçim ve Basınç Dayanımlarına Göre Harman Tuğla (Kil Kagir Birim) Sınıfları [41] 8

Tablo 2.3 Harman Tuğlasının (Kil Kagir Birimin) Boyutları [41] 9

Tablo 2.4 Doğal Yapı Taşlarının Ortalama Fiziksel Değerleri [47] 10

Tablo 2.5 Yığma Taşıyıcı Duvarların Karakteristik Basınç Dayanımı [56] 15

Tablo 4.1 Geometrik Parametreler 37

Tablo 4.2 Malzeme Parametreleri 37

Tablo 4.3 CDP Hasar Modeli Malzeme Parametreleri 39

Tablo 4.4 Genleşme Açısındaki Değişimin Yatay Yüke Etkisi 48

Tablo 4.5 Viskozite Değerlerindeki Değişimin Yatay Yüke Etkisi 48

Tablo 5.1 Haider Yığma Duvarı Geometrik Parametreler 50

Tablo 5.2 Haider Yığma Duvarı Malzeme Parametreleri 50

Tablo 5.3 Eindhoven Yığma Duvarı Geometrik Parametreleri 51

Tablo 5.4 Eindhoven Yığma Duvarı Malzeme Parametreleri 52

Tablo 5.5 Addessi Yığma Duvarı Malzeme Parametreleri 54

ÖZET

Donatısız Yığma Duvarların Doğrusal Olmayan Analizi

Muhammed Buğra CIPLAK

Yapı Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bilge DORAN

Özellikle inşa tarzı açısından diğer yapılara nazaran daha az maliyet ve mühendislik hizmeti gerektiren yığma yapılar harçla birleştirilen yığma birimlerden oluşurlar. Sürekli bir ortam oluşturmadıklarından ve düşey-yatay yükler altındaki davranışları karmaşık olduğundan, sayısal modelleme bahsi yapı mühendisliğinin önemli itilaf konuları arasındadır. Yığma duvarların sayısal modelleme teknikleri ile ilgili yapılan çalışmalarda son yıllarda önemli derecede bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Bu çalışmalar sonucunda yığma duvarların düzlem içi davranışının modellenmesi hususunda birçok sayısal modelleme tekniği geliştirilmiş olsa da bu konu üzerinde kapsamlı çalışmalar halen devam etmektedir. Yığma yapılar taş, tuğla gibi esas taşıyıcı malzemelerle birlikte bu malzemeler arasındaki bağlantıyı ve yük aktarımını sağlayan harç malzemesinden oluşmaktadır. Yığma duvarı oluşturan bu malzemeler birbirlerinden oldukça farklı mekanik özelliklere sahiptirler ve farklı özelliklerdeki bu malzemeler modellenmek istendiğinde kapsamlı bir bünyesel model kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Yığma duvarı oluşturan malzemelerin davranışını yansıtabilmek adına sıklıkla tercih edilen bünyesel modellerden birisi de elastoplastik hasar modeli olan CDP (Concrete Damage Plasticity) bünye modelidir. Bu malzeme modeli için gerekli plastik parametrelerin en optimum şekilde belirlenmesi çok önemli bir konudur.

Bu çalışmada yığma duvarların CDP bünye modeline ve gerekli malzeme parametreleri dikkate alınarak makro düzeyde doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerine ağırlık verilmiştir. Bu doğrultuda, literatürde kabul görmüş bir deneysel çalışmaya ait yığma duvarın bir dizi doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. CDP bünye modeli için genleşme açısı ve viskozite parametrelerin duyarlılığı üzerine detaylı analizler ABAQUS programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın esas amacı, CDP malzeme modelindeki genleşme açısı ve viskozite parametrelerinin yığma duvarın düzlem içi yatay yük-yer değiştirme ilişkisine olan etkisinin araştırılması ve parametrelerin yığma duvar davranışını temsil edecek şekilde belirlenmesidir. Elde edilen sonuçlar, genleşme açısı ve viskozite parametrelerinin yığma duvarların düzlem içi davranışını önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Donatısız yığma duvar, viskozite parametresi, genleşme açısı, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi, beton hasar plastisitesi

ABSTRACT

Nonlinear Analysis of Unreinforced Masonry Walls

Muhammed Buğra CIPLAK

Department of Civil Engineering

Master's Thesis

Advisor: Prof. Dr. Bilge DORAN

Masonry structures are constructed of masonry units which have advantage of low cost and easy constructions. Since they are not homogeneous continuum and the behaviour under shear-compression are very complex, numerical modeling of masonry is one of the most challenging issue of structural engineering. In recent years, it has been observed that there has been significant increase for the studies of numerical modeling techniques of masonry walls. As a result of these studies, while the several numerical modelling techniques was developed for the in plane behaviour of masonry walls, detailed ongoing research on this issue is still continue. Masonry walls consist of main structural materials such as stones, bricks and mortar that provides the connection and load transfer between structural materials. These constituent materials of masonry walls have rather different mechanical properties from each other and when trying to modeling of these materials, it occurs necessary to use a comprehensive constitutive model. To reflect the behaviour of these constituent materials, Concrete Damage Plasticity (CDP) constitutive model is one of the most preferred constitutive model. It is important that the determine optimum values for plastic parameters of CDP model.

This paper is focused on nonlinear finite element (NLFE) modeling of masonry shear walls at a macro-level taking the material parameters of CDP. For this purpose, a

comprehensive nonlinear finite element analyses (NLFEA) of masonry walls subjected to a combination of vertical and horizontal forces has been achieved. The validity of the model is determined by comparing with experimental results from past studies. Detailed sensitivity analysis on the dilation angle and viscosity parameter for CDP model has been performed using ABAQUS software. The main purpose of this study is to investigate the role of parameters in CDP constitutive model and to calibrate the lateral load-displacement response of model, effects of different values of the dilation angle and the viscosity parameter are detailed. Obtained results show that the proper choice of values of dilation angle and viscosity parameter are significantly important when using CDP model for modeling purposes.

Keywords: Unreinforced masonry walls, viscosity parameter, dilation angle, nonlinear finite element analysis, concrete damage plasticity

1
Giriş

Taşıyıcı sistemi yığma kolon veya duvar olan yapılar dünya genelinde inşa edilmektedir. Ancak mevcut yönetmelikler ve şartnamelerde eksiklikler bulunmaktadır. Hem eksikliklerin giderilmesi için hem de yığma yapıların düşey ve özellikle yatay yükler altındaki davranışlarının incelenmesi, sayısal modelleme aşamasında bünye bağıntılarının gerektirdiği mekanik özellikleri belirlemek üzere çok sayıda deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Literatürde bulunan çalışmalar incelendiğinde, analiz sonuçlarının modelleme tekniği ve yapı malzemelerinin mekanik özelliklerine bağlı olduğu görülmektedir.

1.1 Literatür Özeti

Yığma yapılar, gerek dünyada gerekse ülkemizde yaygın olarak kullanılan inşa biçimidir ve tarihsel süreç boyunca çok işlevsel olarak kullanılmıştır. Günümüzde halen yapı stoğunun önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Mevcut yapıların analizini yapmak, yapı mühendisliğinin önemli bir çalışma alanıdır. Yığma bileşenleri (tuğla, taş, harç vb.) farklı mekanik özelliklere sahiptir. Hem mekanik parametrelerin belirlenmesi hem de yığma yapının kapsamlı sayısal modellenmesi oldukça zordur. Ayrıca düşey ve yatay yükler altında davranışı karmaşıktır. Bu kapsamda, literatürde deneysel ve sayısal çalışmalar oldukça fazladır. Sayısal çalışmalar, modellemenin zorluğu açısından birçok varsayım ve basitleştirme içermektedir. Başta yığma yapıların heterojen ve kompozit yapısının oluşturduğu zorluğu aşmak ve devamında ise doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi için kırılma kriterleri üzerinde çalışılmıştır. Tezin bu bölümünde, literatürde bulunan deneysel ve sayısal çalışmalar özetlenmiştir.

Lourenço [1] tarafından hazırlanan yığma yapılar için çözümleme teknikleri adlı doktora çalışmasında, sayısal modelleme noktasında öneriler sunmuştur. İlk olarak mikro modelleme tekniğini kullanarak, tüm göçme mekanizmalarını (kayma,

çatlama ve göçme) dikkate alan bir matematiksel model geliştirmiştir. Bu model enterfaz olarak adlandırılmıştır. Harç ve tuğla biriminin etkileşimini ifade etmektedir. Tezinin ikinci kısmında ise, tuğla-enterfaz-harç etkileşimini homojenleştirerek makro model tekniğini geliştirmiştir. Yığma yapı tek bir malzeme olarak modellenmiştir. Geliştirmiş olduğu modellerden elde ettiği sonuçları literatürde bulunan deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır.

Mikro model, parametrelerin gerçek davranışını yansıtması itibariyle oldukça zaman alan ve zahmetli bir tekniktir. Malzeme davranışlarının sayısal çalışmaya aktarılması zor bir çalışma alanıdır. Ancak Lourenço [1] tarafından önerilen makro model, daha kolay analiz edilebilen sayısal modelleme tekniğidir. Makro model tekniği açısından daha kullanışlı ve tercih edilebilir olmasına rağmen, birçok dezavantaja sahiptir. Mikro modelin aksine, yığma yapının göçme mekanizmasını tam olarak yansıtmamaktadır. Makro model yığma yapının genel davranışı ve kırılma yükünün belirlemesinde kullanılabilir. Literatürde, yığma yapıların çeşitli davranışlarını ve parametrelerini analiz etmek amacıyla, makro model tekniği yaklaşımı kullanılmıştır [2-9].

Yığma duvarların belirli yüklere tepkisi araştırılırken makro model daha etkili bir yöntem olarak tercih edilir. Mikro modelleme yaklaşımında, birim, harç ve birim arayüzünü ayrı ayrı göstermek mümkündür [10-11]. Her ne kadar mikro model, özellikle yığma yapının davranışını tahmin etmek için en iyi yöntem olsa da, büyük hesaplama zamanlamaları ve kaynakları gerektirir. Bu mikro modelleme eksikliklerinin üstesinden gelmek için basitleştirilmiş mikro model geliştirilmiştir ve bunla alakalı çok sayıda çalışma yapılmıştır [12-19]. Harç derzleri ve harç ara yüzleri süreksiz elemanlarda toplanır. Birimler harç kalınlığının yarısına her iki yönde de genişletilir ve sürekli elemanlar tarafından simüle edilir.

Yığma duvarların mekanik davranışını değerlendirmek için çeşitli sayısal modeller geliştirilmiştir. Bu modellerden biri ABAQUS [20] yazılımında mevcut olan Elastoplastik Hasar modelidir (CDP). Bu modelin teorisi Lubliner vd. [21] ve Lee ve Fenves [22] tarafından geliştirilmiştir. Her ne kadar CDP modeli temel beton davranışı için geliştirilmiş olsa da, CDP modelin yığma duvarda başarıyla kullanılabileceğini gösteren birçok çalışma vardır [23-28]. Ayrıca bazı

araştırmalarda, CDP modelinin ihtiyaç duyduğu parametrelerin uygun bir şekilde tanımlanmasının karmaşık olduğu gösterilmiştir [29-34].

Yığma yapıların göçme mekanizmalarının belirlenmesi için basınç ve çekme gerilmeleri altında davranışının bilinmesi gerekir. CDP hasar modeli parametreleri elastik ve plastik olarak ikiye ayrılır. Elastoplastik analiz için yığma yapının gerilme-şekil değiştirme grafiğinin elde edilmiş olması gerekir. Kompozit yapıya sahip olan yığma yapının basınç ve çekme altında davranışının belirlenmesi sayısal çalışmalar için oldukça zordur. Literatürde, bu kapsamda çalışmalar yapılmış ve elde edilen grafikler idealleştirilmiştir. Kaushik vd. [35] tarafından yapılan deneysel çalışmada, çeşitli harç ve elastisite oranlarına sahip yığma yapıların, basınç gerilmesi altında davranışı incelenmiştir. Gerilme-şekil değiştirme grafiği elde edilmiştir. Bu grafik idealleştirilerek, beraberinde birtakım formüller de önerilmiştir. Andreaus vd. [36] tarafından yapılan deneysel çalışmada, yığma yapının çekme gerilmesi altında davranışı belirlenmiştir. Elde edilen değerler grafik olarak önerilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

İlk tarihlerden modern zamanlara kadar yığma yapılar, sıradan duvarlardan tapınaklara, saraylara, savunma duvarlarına ve şehir kapılarına kadar çok çeşitli inşaatlarda kullanılmıştır. Yığma yapılar, harç ve duvar birimlerinden (tuğla, doğal taş gibi) oluşan kompozit yapılardır. Taş veya tuğla gibi malzemeler esas taşıyıcıdır. Bu malzemeler arasındaki yük aktarımını sağlayan bağlayıcı malzeme ise harçtır. Yığma birimleri farklı mekanik özelliklere sahiptir. Yığma yapılar sürekli bir ortam oluşturmazlar ve düşey-kademeli artırılan yatay yükler altında davranışları karmaşıktır ve bunun için kapsamlı bir bünyesel modelleme yapılması gerekir. Bu durum sayısal modelleme bahsi açısından yapı mühendisliğinin önemli itilaf konuları arasındadır. Ancak yığma yapıların düzlem içi davranışının modellenmesi hususunda birçok sayısal model tekniği geliştirilmiştir. Halen de çalışmalar yapılmaktadır.

Yığma yapıların düşey ve yatay yüklere karşı davranışının belirlenmesi gerekmektedir. Yığma yapılar, yatay yükler altında betonarme yapılara nazaran

oldukça gevrek davranış göstermektedir. Bu nedenle bu tür yapıların yatay yükler altında sergileyeceği performansı yeterli hassasiyetle belirleyecek bünyesel modelleme tekniklerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

Bu tez çalışmasında amaç, esas malzemesi tuğla olan bir yığma duvarın sayısal modelleme teknikleri üzerinde çalışmalar yapmaktır. İlk olarak Elastoplastik Hasar modelinin (CDP) ihtiyaç duyduğu temel mekanik parametrelerin (Genleşme açısı, viskozite) değişim aralıkları düzlemiçi yüklere maruz donatısız yığma duvarlar için araştırılmıştır. Bu amaçla, genleşme açısı ve viskozite değerleri literatürde kabul görmüş deney duvarları üzerinde parametrik bir çalışma ile belirlenmiş, elde edilen sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmak suretiyle sayısal model yaklaşımı kalibre edilmiştir. Düzlem içerisinde düşey ve artımsal yatay yük etkisinde kalan donatısız yığma duvarların, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi (NLFEA) için makro modelleme yaklaşımı tercih edilmiştir. Kalibre edilen parametrelerle beraber literatürde deneysel çalışmaları bulunan yığma duvarlar üzerinde ABAQUS / Standart (ABAQUS / CAE 6.14-1 SE) programı aracılığıyla iki boyutlu analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafiksel ortamda sunulmuştur.

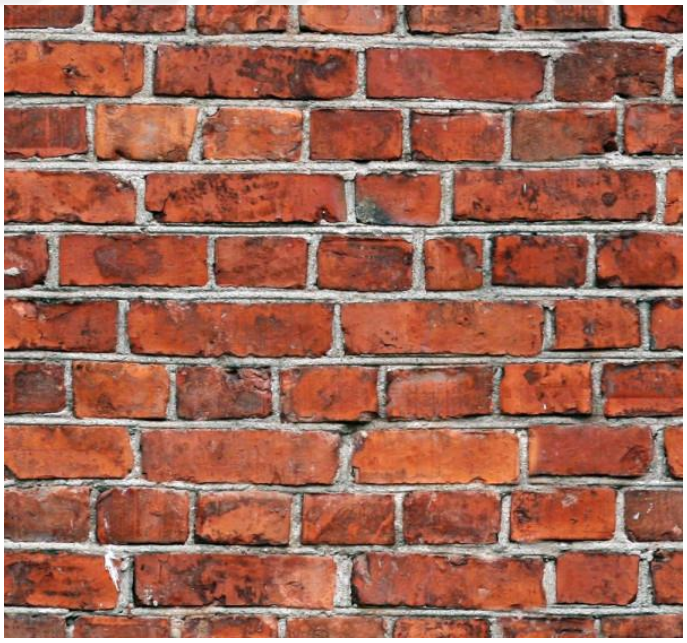
1.3 Hipotez

Yığma duvarların iki boyutlu yapısal analizi için sıkça kullanılan modelleme teknikleri; makro, basitleştirilmiş mikro ve detaylı mikro yöntemidir. Mikro modelleme tekniği, duvarın gerçek davranışını yansıtmada başarılı olsa da sayısal çalışma için programa girdi sayısı oldukça fazladır. Bu sebeple analiz süresinin uzaması ve analiz sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesinin oldukça zahmetli olması nedeniyle literatürde tercih edilmesinden kaçınılmıştır. Makro modelleme tekniği ise daha az parametre ile analiz yapılabilen bir yöntemdir. Ancak duvarın göçme modları hakkında fikir vermemektedir. Yük kapasitesi ve yer değiştirme miktarının incelenmesi açısından başarılıdır. Bu çalışmada önerilen bünye modeli ile beraber makro düzeyde gerçekleştirilen analiz sonuçları, duvarda yatay yük ve yatay yer değiştirme kapasitelerini elde etmede başarılı olmuştur.

2
Yığma Duvar Bileşenlerinin Mekanik Özellikleri

2.1 Yığma Birimleri Olarak Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Yığma yapılar, esas taşıyıcısı tuğla, doğal taş, beton, briket, gazbeton ve bağlayıcı malzemesi kireç ve çimento gibi malzemelerden oluşur. Örülerek inşa edilen yığma yapılar, farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerin etkileşimi ile bir bütün olarak davranır. Yığma yapıların düşey yüklere karşı basınç dayanımları taşıyıcı sistemler olabilmeleri itibariyle yüksek olması gerekmektedir. Nitekim, yapılan deney ve araştırmalar sonucu; yığma yapıların basınç gerilmelerine karşı dayanımları yüksek, çekme gerilmelerine karşı düşüktür. Yığma yapıların çekme dayanımı, bağlayıcı malzemenin mukavemetine eşittir. Begimgil [37] çalışmasında, yığma duvarların çekme dayanımının artırmak adına yüksek dayanımlı harç kullanılması gerektiğine ve katkı malzemesi kullanılarak oluşturulan harçların, yığma duvarın kayma dayanımını artırdığını belirtmektedir.



Şekil 2.1 Yığma Duvar [38]

Yığma birimi olarak adlandırılan ve bu tez kapsamında değerlendirilecek tuğla ve harç hakkında ayrıntılı bilgiler bu bölümde verilmektedir.

2.1.1 Tuğla

Tuğlanın hammaddesi kilden oluşur. Kilden yapılan malzemeler, pişirilmiş ve pişirilmemiş olarak ikiye ayrılır. Pişirilmemiş malzemelere kerpiç, pişirilmiş malzemelere de tuğla veya kiremit örnek verilir. Üretim şekillerine göre tuğlalar, el (harman) tuğlası (Şekil2.3) ve fabrika tuğlası (Şekil 2.2) olarak ikiye ayrılabilir [39].



Şekil 2.2 Fabrika Tuğlası [40]

Tuğlanın mekanik ve fiziksel özellikleri tuğla toprağının karışım oranına, üretim metoduna, pişirilme tekniğine ve pişirildiği sıcaklık derecesine bağlı olarak değişir. Günümüzde kullanılan harman tuğlasının boyutları; yüksekliği 5,4 – 6,3 cm; genişliği 9,2 – 11,8 cm ve boyu 20,5 – 22,7 cm arasında değişim gösterebilmektedir. Bu tuğlaların basınç dayanımları 7,5 MPa'dan az, su emme kapasitesi ve donma-çözülmeye karşı dayanımları da düşüktür. Fabrikada üretilen tuğlalarında su emme oranları düşük olup en fazla %18'dir. Bu tuğlaların basınç dayanımları 6 – 10 MPa arasında değişmekte iken yoğunluğu yüksek tuğlalarda bu değer 24 MPa kadar çıkmaktadır [39].

TS EN 771-1 standartında düşey delikli tuğlanın çeşitli parametrelerini içeren bir tablo verilmiştir. Bu parametreler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Düşey Delikli Tuğlaların (Kil Kagir Birimlerin) Birim Hacim Kütleleri ve Basınç Dayanım Değerleri [41]

Tuğla tipi	Basınç dayanımı		Birim hacim kütlesi kg/m^3	
	Aritmetik ortalama N/mm^2 (kgf/cm^2)	En küçük değer N/mm^2 (kgf/cm^2	En büyük	En küçük
2000 kg/m^3	24,0 (240)	19,0 (190)	2000	1801
	18,0 (180)	14,5 (145)		
	12,0 (120)	9,5 (95)		
1800 kg/m^3	22,0 (220)	17,5 (175)	1800	1601
	18,0 (180)	12,0 (120)		
	10,0 (100)	8,0 (80)		
1600 kg/m^3	22,0 (220)	17,5 (175)	1600	1401
	15,0 (150)	12,0 (120)		
	10,0 (100)	8,0 (80)		
1400 kg/m^3	20,0 (200)	16,0 (160)	1400	1201
	12,0 (120)	9,5 (95)		
	8,0 (80)	6,5 (65)		
1200 kg/m^3	15,0 (150)	12,0 (120)	1200	1001
	10,0 (100)	8,0 (80)		
	6,0 (60)	4,5 (45)		

Harman tuğlası; kil miktarı yüksek olan toprak, balçık, kullanılmayan tuğla parçaları gibi malzeme karışımlarının önce şekillendirip kurutulduktan sonra ocaklarda yeterli ısıda pişirilmesiyle elde edilir. Pişmiş malzeme karışımlarının kalıplar içinde sıkıştırılması ile harman (el) tuğlasının fabrika tuğlasına göre daha izotropik bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır [42].



Şekil 2.3 Harman Tuğlası [43]

Harman tuğlalarının biçimi şeklen dikdörtgen prizmadır. Fakat bölgeden bölgeye göre farklı boyutlarda üretilmelerinden dolayı standart bir tuğla kullanımına izin vermemektedirler. Pişirme ve şekillendirme metodu farklılık göstermesinden dolayı da taşıma kapasitesi farklıdır. Deliklerin ve boşlukların bulunduğu toplam alanın, tuğla yüzey kesit alanına oranı %25'ten büyük olmamalıdır [44]. Harman tuğlaları basınç dayanımlarına göre; orta ve az dayanımlı, biçimlerine göre ise de dolu ve delikli olarak sınıflandırılır. TS EN 771-1 standartında basınç dayanımları hakkında bilgiler Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 Biçim ve Basınç Dayanımlarına Göre Harman Tuğla (Kil Kagir Birim) Sınıfları [41]

Sınıflar		Ortalama hacim kütlesi (en fazla) kg/dm^3	Ortalama basınç dayanımı (en az) N/mm^2 (kgf/cm^2)	Basınç dayanımı (en az) N/mm^2 (kgf/cm^2)
Dolu harman tuğlası	Orta dayanımlı		5,0 (50)	4,0 (40)
	Az dayanımlı		3,0 (30)	2,5 (25)
Delikli harman tuğlası	Orta dayanımlı	1,40	5,0 (50)	4,0 (40)
	Az dayanımlı	1,40	3,0 (30)	2,5 (25)

Ayrıca TS EN 771-1 standartında verilen harman tuğlaları boyutları Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3 Harman Tuğlasının (Kil Kagir Birimin) Boyutları [41]

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

2.1.2 Doğal Taş

Doğal taşlar, uygarlık tarihinin başlangıcından itibaren insanlar tarafından kullanılmaktadır. İnsanlığın var olmasından günümüze kadar taşlar her daim insan yaşamının içerisinde olmuş, avcı-toplayıcı toplumlardan uzay çağına kadar varlığını korumuştur. Taştan yapılan tarihi büyük yapılar günümüzde ayakta kalmıştır (Mısır Piramitleri, Stonehenge, Yunan Akropolleri, Roma Amfitiyatro, Osmanlı çeşme ve camileri gibi). Dünyanın yedi harikasından Artemis Tapınağı ve Halikarnas Mozolesi ülkemizde bulunan tarihteki taş kullanımına en popüler örneklerdendir. Söz konusu yapılar yüzlerce km. uzaklıktan getirilerek ve yıllarca süren çabalar sonucu inşa edilmiştir. Doğal taşların yaygın olarak kullanıldığı diğer yapılara örnek; yollar, köprüler, meydanlar, anıtlar ve dikilitaşlar verilebilir. Başlı başına taş yapılar haricinde ilave malzeme olarak da kullanılan taş birçok yapıda tercih edilmektedir [45].

Dere yatakları ve dağ yamaçlarında parçalanmış halde ve dış yüzeyleri yuvarlaklaşarak aşınmış olarak bulunan çakıl taşları peyzaj çalışmalarında kullanılmaktadır. Ayrıca kalsiyum ve magnezyum karbonat birleşimli mineralden

oluşan dolomit ve kalsitin yanında mermer, granit, andezit, siyenit, tüf, bazalt, kumtaşı ve traverten de peyzaj düzenlenmesinde kullanılmaktadır. Binaların duvar ve temellerinde, büyük oranda kumtaşı, andezit, kireçtaşı, granit, tüf ve arduvaz gibi taşlardan oluşan moloz taş ve kesme taş kullanılır. Ayrıca parke ve bordur taşları olarak da kaldırım ve yollarda kullanılmaktadır. Yapısal eleman olarak duvar taşlarının seçiminde dekoratif oluşunun yanı sıra aşınmazlığı, sertliği ve ekonomik oluşu da dikkate alınmalıdır [46].

Tarihi yapılarda kullanılan yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4 Doğal Yapı Taşlarının Ortalama Fiziksel Değerleri [47]

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

Esas taşıyıcı birimi taş olan yığma yapı elemanlarının dayanımı, kullanılan taşın dayanımından daha düşük ise bu öncelikle harç dayanıma bağlıdır. Bunun yanısıra, yığma yapı elemanının dayanımı taşın öz kırılma dayanımı üzerinde çok etkili olmamaktadır. Taş ve harç birleşiminin bütünsel davranışı taş yığma yapı elemanlarının dayanımını belirler. Tarihi yapılarda kullanılan taş yığma yapı elemanları çok geniş bir aralıkta dayanım değerine sahiptir. Taş yığma yapı elemanları basınç dayanımının %25'i genel olarak kayma dayanımı eşittir [47].

2.1.3 Harç

Harç, kargir duvarlar ile iç ve dış sıvaların yapımında kullanılır ve mineral esaslı bir bağlayıcı, harç kumu, su ve gerektiğinde ilave edilen katkı maddelerinden oluşur.

Harç yığma duvarda sürekli bir ortam sağlar. Duvar bileşenlerini meydana getiren elemanların birbirleri ile bağlantısını sağlayan harcın temel kullanım amacı yığma duvarda bir bütün oluşturmaktır. Duvarın maruz kaldığı yüklerin dağılımını gerçekleştiren harç, bilşenlere esneklik sağlar [48].

Harç, yığma yapı elemanının basınç, kayma ve çekme dayanımına katkısı açısından çok önemli bir role sahiptir. Yığma yapı elemanlarında temel olarak iki çeşit birleşim dayanımı vardır; çekme dayanımı ve kayma dayanımı. Çekme dayanımı, tuğla veya taş ile harcın birleşim noktasına dik yönde oluşan çekme kuvvetlerine karşı koyar. Kayma dayanımı ise birleşim noktalarına paralel oluşan kuvvetlere karşı koyar [49]. Harçların basınç gerilmelerine karşı dayanımı, genel olarak bağlayıcı malzemenin mekanik özelliklerine bağlıdır (Bağlayıcı malzeme ve su miktarı oranı gibi) [47].

Yapı sistemlerinde harçlar üçe ayrılır; kireç harcı, çimento harcı ve horasan harcı. Kireç harcı, kum, kireç ve suyun belli bir oranda birleşmesi sonucu oluşan bir hamurdur. Kireç, harcın işlenebilirliğini artırması adına önemli bir bağlayıcıdır. Çimento harcı, çimento, kum ve suyun belirli bir oranda karıştırılması sonucu oluşan plastik yapıda bir bağlayıcıdır.



Şekil 2.4 Çimento Harcı [50]

Yığma duvarlarda çimentolu kireç harcı kullanımı yaygındır. Kireç, harcın sertleşmesini sağlar ve su kaybını azaltır. Çimento, harcın dayanımı artırmaktadır. Yığma duvarların örülme işlemi yavaş olduğu için harcın da yavaş sertleşmesi inşa açısından uyumludur [51].

Horasan harcı özellikle tarihi yığma yapılarda kullanılan bir bağlayıcı malzemedir. Öğütülmüş veya kırılmış tuğla, kiremit ve çömlek gibi malzemeler horasan olarak adlandırılmıştır. Pişirilmiş kil olarak elde edilen horasan, kireçle birleştirilerek harç şeklini alır.

Horasan harcı üretim uygulamaların bazılarında harcın içerisine kum katılmaktadır. Bazı uygulamalarda ise nohut büyüklüğünde parçalar halinde tuğla veya kiremit kırıkları gibi seramik malzemelere rastlanmaktadır. İçerisinde tuğla veya kiremit kırıklarının mevcut olduğu harç karışımları, diğer harçlardan farklı bir mekanik ve fiziksel yapıya sahip olup günümüz betonuna eşdeğer, taşıyıcı bir sistem meydana getirmektedir [52].



Şekil 2.5 Horasan Harcı İle Örülmüş Duvar [53]

2.2 Yığma Birimleri Mekanik Özellikleri

Yığma birimleri ayrı ayrı mekanik özelliklere sahiptir. Basınç ve çekme gerilmesine karşı dayanım, poisson oranı ve elastisite modülü gibi parametreler yığma birimleri olan tuğla ve harç için farklılık göstermektedir. Bu farklılık yığma yapının çeşitli yükler altında davranışını oldukça etkilemektedir.

Yığma yapı elemanları mekanik özelliklerinin elde edilmesi deneysel çalışmalar ile olmaktadır. Sayısal çalışmalarda bu elde edilen mekanik özellikler kullanılır. Ancak veri sayısının fazlalılığı ve yığma yapı birimlerinin sayısal çalışmada simüle etmenin zorluğu açısından çeşitli birleştirme teknikleri ve varsayımlar mevcuttur. Literatürde yığma duvar davranışının belirlenmesi ve sayısal çalışmaların analizini kolaylaştırmak adına çeşitli öneriler mevcuttur. Yığma duvarın elastisite modülü ve poisson oranının elde edilmesi için bağımsız yüzeylerin birleştirme tekniklerinden yararlanılır. Birleştirme tenikleri açısından önerilen birçok formülüzasyon vardır. Ayrıca basınç ve çekme gerilmelerine karşı dayanımın belirlenmesi sayısal çalışmalarda yığma yapının davranışı için oldukça önemlidir. Literatürde yığma yapının basınç ve çekme dayanımlarının elde edilmesi için deneysel çalışmalardan üretilerek önerilen birçok formülüzasyon vardır. Tezin bu bölümünde literatürde bulunan önerilerden bahsedilmektedir.

2.2.1 Basınç Dayanımları

Basınç dayanımı, yığma yapının göçme davranışınının belirlenebilmesi adına önemli bir parametredir. Sayısal çalışmalarda kullanılmak üzere bu parametre çeşitli yollarla elde edilebilir. Bu bölümde, tez kapsamında da analizi yapılacak yığma duvarın basınç dayanımı için önerilen çeşitli formüller verilmiştir.

Bennet vd. [54] yaptıkları çalışmada yığma birimlerinden tuğlanın yığma basınç dayanımı üzerine etkisini araştırmış ve deney sonuçlarını göz önüne alarak iki bağıntı üretmişlerdir. Bu bağıntılar denklem (2.1) ve (2.2)'de verilmiştir.

$$f_m' = 0.9 + 0.3 f_{bl} \text{ (MPa)} \quad (2.1)$$

$$f_m' = 1.06 (f_{bl})^{0.54} \text{ (MPa)} \quad (2.2)$$

Bu bağıntıdaki f_{bl} tuğlanın basınç dayanımını ve $f_m{}'$ yığma basınç dayanımını belirtmektedir.

Bennet vd. [54] yaptıkları çalışmada sadece dolu tuğla için de formül önermişlerdir.

$$f_m' = 1.57 \ln(f_{mr}) + 0.25 f_{bl} \quad (2.3)$$

Bu bağıntıda f_{mr} harcın basınç dayanımıdır.

Kaushik vd. [35] tarafından yapılan deneysel çalışmalar Eurocode 6 [55]'da bulunan ve bağıntı (2.4) verilen formülü geliştirmek üzeredir.

$$f_m' = K f_{bl}^{\alpha} f_{mr}^{\beta} \quad (2.4)$$

K, α ve β sabit değerlerdir.

Kaushik vd. [35] yaptıkları araştırmalar ile formülü bağıntı (2.5)'te verilen hale dönüştürmüşlerdir.

$$f_m' = 0.63 f_{bl}^{0.49} f_{mr}^{0.32} \quad (2.5)$$

Ayrıca TBDY (2018) [56] mevcut olan yığma yapılar ile ilgili mevzuatlarda basınç dayanımı hakkında tablo verilmiştir.

Tablo 2.5 Yığma Taşıyıcı Duvarların Karakteristik Basınç Dayanımı [56]

Birim-Birim Sınıfı	Harç sınıfı	Harç basınç dayanımı, f_m (MPa)*	Kargir birim basınç dayanımı, f_b (MPa)					
			5	10	15	20	25	30
Grup I	Genel amaçlı harç	M10-M20	3.4-4.2	5.5-6.8	7.3-9.0	8.9-11.0	10.4-12.9	11.9-14.6
		M2.5-M9	2.2-3.3	3.6-5.3	4.8-7.1	5.9-8.7	6.9-10.1	7.8-11.5
		M1-M2	1.7-2.1	2.8-3.4	3.7-4.5	4.5-5.5	5.2-6.4	5.9-7.3
Grup II ve Kesme taş		M10-M20	2.8-3.4	4.5-5.5	6.0-7.4	7.3-9.0	8.5-10.5	9.7-12.0
		M2.5-M9	1.8-2.7	3.0-4.4	3.9-5.8	4.8-7.1	5.6-8.3	6.4-9.4
		M1-M2	1.4-1.7	2.3-2.8	3.0-3.7	3.7-4.5	4.3-5.3	4.9-6.0
Tuğla (Grup I)	İnce tabakalı harç**		2.9	5.3	7.5	9.6	11.6	13.5
Tuğla (Grup II)			2.2	3.5	4.7	5.7	6.7	7.6
Beton (Grup I), Gazbeton			3.1	5.7	8.0	10.2	12.3	14.4
Beton (Grup II)			2.6	4.6	6.5	8.3	10.0	11.7

(*) *Harçlar M harfini takip eden rakam MPa cinsinden karakteristik basınç dayanımlarını gösterecek şekilde isimlendirilmiştir.*
(**) *İnce tabakalı harç, birimler arası harç tabakası 0.5 mm ile 3.0 mm olan harç.*

Bu tez kapsamında, dolu tuğlalı yığma duvar çalışıldığı için bağıntı 2.3 kullanılarak basınç dayanımı belirlenmiştir. Makro modelleme tekniği kullanılarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar elemanlar analizi yapılmıştır.

2.2.1 Elastisite Modülü

Tuğla ve harç farklı elastisite modülü değerlerine sahiptir. Kompozit davranış sergileyen yığma duvar elastisite modülü analitik bağıntılar yardımıyla belirlenebildiği gibi daha kesin bir şekilde deneysel çalışma ile belirlenebilir. Deneysel çalışma yapılmadığı takdirde yığma birimin davranışı tam olarak yansıtacak uygun elastisite modülünü belirlemek oldukça zordur. Literatürde bu konuyla alakalı oldukça fazla deneysel çalışma vardır. Bu bölümde, tez kapsamında da analizi yapılacak yığma duvarın elastisite modülünü elde etmek için önerilen çeşitli formüller verilmiştir.

Kaushik vd. [35] tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, yığma duvarın basınç dayanımına tuğla ve harcın etkisi araştırılmıştır. Dört tip tuğla ve üç çeşit harç kullanarak yaptığı araştırmalar sonucu aşağıdaki 3 bağıntıyı önermişlerdir.

$$E_m \approx 550\, f_m' \tag{2.6}$$

$$E_{bl} \approx 300\, f_{bl} \tag{2.7}$$

$$E_{mr} \approx 200\, f_{mr} \tag{2.8}$$

Bu bağıntıdaki, E_m yığma elastisite modülünü, E_{bl} tuğla elastisite modülünü, E_{mr} harç elastisite modülünü ve $f_m{}'$ yığma basınç dayanımını, f_{bl} tuğlanın basınç dayanımını, f_{mr} harcın basınç dayanımını belirtmektedir.

Köksal vd. [57] tarafından deneysel çalışmada, beton ve kil tuğla kullanılarak yığmanın elastisite modülü için bağıntılar önerilmiştir. Bu bağıntılar (2.9) ve (2.10) aşağıda verilmiştir.

Beton yığma halinde :

$$E_m = 500 f_{bl}' \; ila \; 1500 f_{bl}' \tag{2.9}$$

Kil tuğla yığma halinde :

$$E_m = 500 f_{br}' \; ila \; 1000 f_{br}' \tag{2.10}$$

Bu bağıntıdaki, E_m yığma elastisite modülünü, f_{bl}' beton blok elastisite modülünü ve f_{br}' kil tuğla elastisite modülünü belirtmektedir.

Paulay vd. [58] yaptıkları çalışmaları sonucu elastisite modülü için bağıntılar önermişlerdir. Bu bağıntılar (2.11) ve (2.12) aşağıda verilmiştir.

Beton blok yığma yapı:

$$E_m = 1000 f_m' \tag{2.11}$$

Kil tuğla yığma yapı:

$$E_m = 750 f_m' \tag{2.12}$$

Bu bağıntıdaki E_m elastisite modülünü ve f'_m basınç dayanımını temsil etmektedir. Köksal vd. [59] betonarme elemanlar üzerinde yaptıkları araştırmada beton elastisite modülü için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir.

$$E_o = 4750\sqrt{f'_c} \tag{2.13}$$

Brencich vd. [60] tarafından önerilen yığma elastisite modülü için bağıntılar (2.14), (2.15) ve (2.16) aşağıda verilmiştir.

$$\frac{1}{E_m} = \frac{n_b}{E_b} + \frac{n_m}{E_{mr}} + 2n_m n_b \frac{v_b E_{mr} - v_m E_b}{n_m(1-v_b)E_{mr} + n_b(1-v_m)E_b}\left(\frac{v_m}{E_{mr}^2} - \frac{v_b}{E_b^2}\right) \tag{2.14}$$

$$n_m = \frac{t_m}{(t_m + t_b)} \tag{2.15}$$

$$n_b = \frac{t_b}{(t_m + t_b)} \tag{2.16}$$

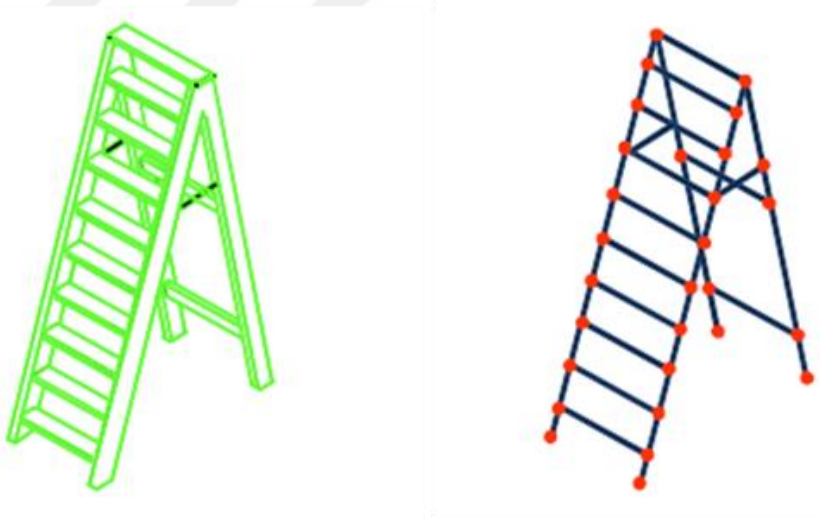
Bu bağıntıdaki, E_m yığma elastisite modülünü, E_b tuğla elastisite modülü ve E_{mr} harcın elastisite modülüdür. n_m harç için hacim böleni; n_b ise tuğla için hacim bölenidir. Bu bölenlerde ise t_m harç kalınlığı ve t_b tuğla kalınlığıdır.

TS-500 [61]'de yığma basınç ve elastisite modülü için bağıntılar verilmiştir. Tuğla serbest basınç dayanımının 0.50'si (f_d) duvar basınç dayanımı ve bu dayanımın 0.25'i (f_{em}) duvar basınç emniyet gerilmesidir. Yığma duvarda kullanılan elemanların elastisite modülü (E_d) ise $(200 \times f_d)$ olarak belirlenmiştir.

3
Yığma Duvarın Modellenmesi

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

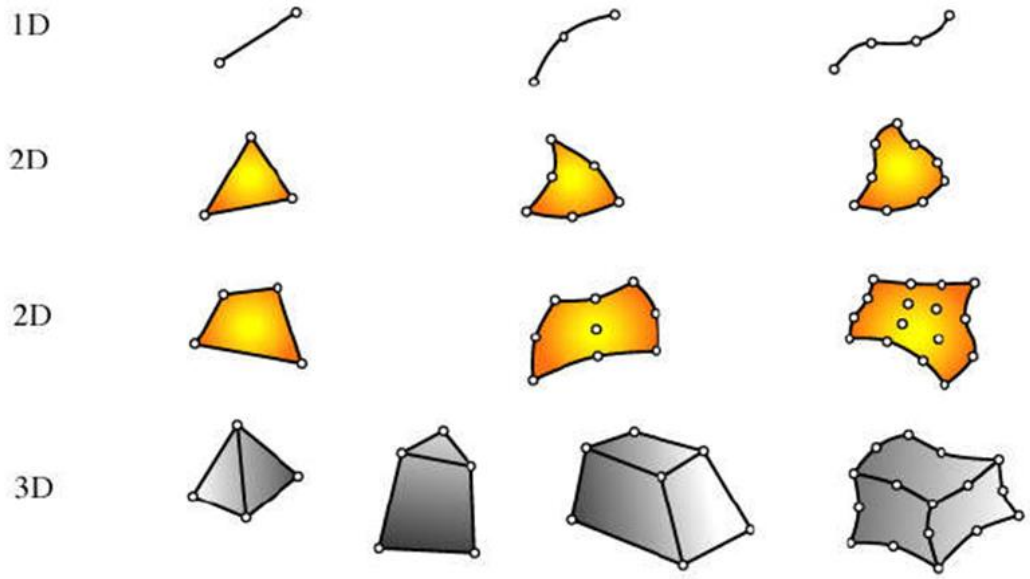
Doğada karşılaşılan her durum veya olay fizik kanunları ve matematik dili kullanılarak anlaşılabilir olmaktadır. Her olay kendine ait sayısal ifadeler barındırır. Bu sayısal ifadelerin büyüklükleri cebirsel, diferansiyel veya integral denklemler aracılığıyla çoğunlukla ifade edilebilir. Anlaşılması zor bir problem, karmaşık olmayan daha kolay olan alt problemlere ayrılarak daha anlaşılır bir hal alabilir. Oluşturulan alt problemlerin çözümü birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilmektedir. Sayısal çözümlemede elde edilen sonuçlar büyük oranda problemin yaklaşık çözümüdür. Problemin karmaşık olması sebebiyle mühendislik sayısal çözümlemelerinde, kabul edilebilir seviyelerde yaklaşık çözümler yercih edilir [62].



(a) Fiziksel Sistem (b) Matematiksel Model

Şekil 3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi [62]

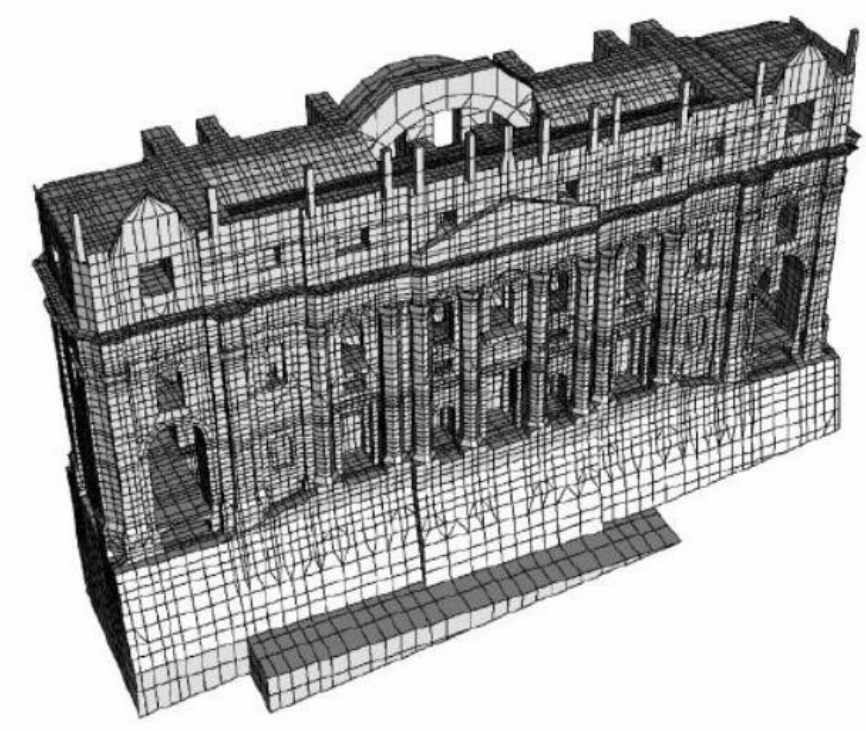
Sonlu elemanlar yöntemi, çeşitli mühendislik problemlerine çözüm arayan sayısal bir analizdir. Bu yöntemde analiz yapılacak yapısal bölümün önce matematiksel modeli oluşturulur (Şekil 3.1). Ardından uygun şekilde alt elemanlara ayrılır (Şekil 3.2). Yapının geometrisi, mesnet şartları, yapı üzerine etki eden yükler ve elemanların birleşim noktalarında serbestlik derecesi göz önüne alınarak model tanımlanır.



Şekil 3.2 Sonlu Elemanlar Metodunda Kullanılan Bazı Eleman Tipleri [63]

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1950 yılında uzay mühendisliğinde kullanılmaya başlanmıştır. İlk kullanıcıları Boeing, Bell Aerospace ve Rolls Royce firmaları olmuştur. Yöntemin ana fikrini oluşturan ilk makale 1956 yılında Turner ve arkadaşları tarafından yayınlanmıştır. Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte 1970'lerde daha olgun hale gelen bu yöntem günümüzde makine, elektrik, uçak, inşaat, hidrodinamik, atom gibi çeşitli mühendislik alanlarının yanında, tıpta ortopedi, kalp damar cerrahisi ve estetik cerrahi dallarında da kullanılmaktadır [64].

Karşılaştığımız mühendislik problemlerinin küçük bir kısmının analitik çözümü mevcuttur. Bu durum çözüm aranan bölgeye ait matematiksel ifadelerin bulunabilmesini içermesi bakımından sonsuz noktada çözümün bilinmesi anlamına gelmektedir. Analitik çözümler yalnızca bazı basitleştirilmiş ve sadeleştirilmiş fizik probleminin matematik modelleri için elde edilebilir. Uygulamada karşılaşılan pek çok mühendislik problemi için kapalı çözüm bulmak mümkün değildir. Araştırmacılar ve tecrübeli mühendisler problemin doğasını bozmayan basitleştirmeler ve varsayımlar altında yaklaşık olarak çözümlere ulaşmaktadırlar. Fakat düzgün olmayan geometri, karışık sınır koşulları, üniform olmayan yüklemeler, doğrusal olmayan malzeme davranışı gibi sebeplerden dolayı bu gibi kapalı çözümlerin elde edilmesi çok zor veya olanaksız hale gelmektedir. Sonlu elemanlar yönteminin kullanılması durumunda buna benzer durumlara ait yaklaşık çözümler kolaylıkla elde edilebilmektedir [65].



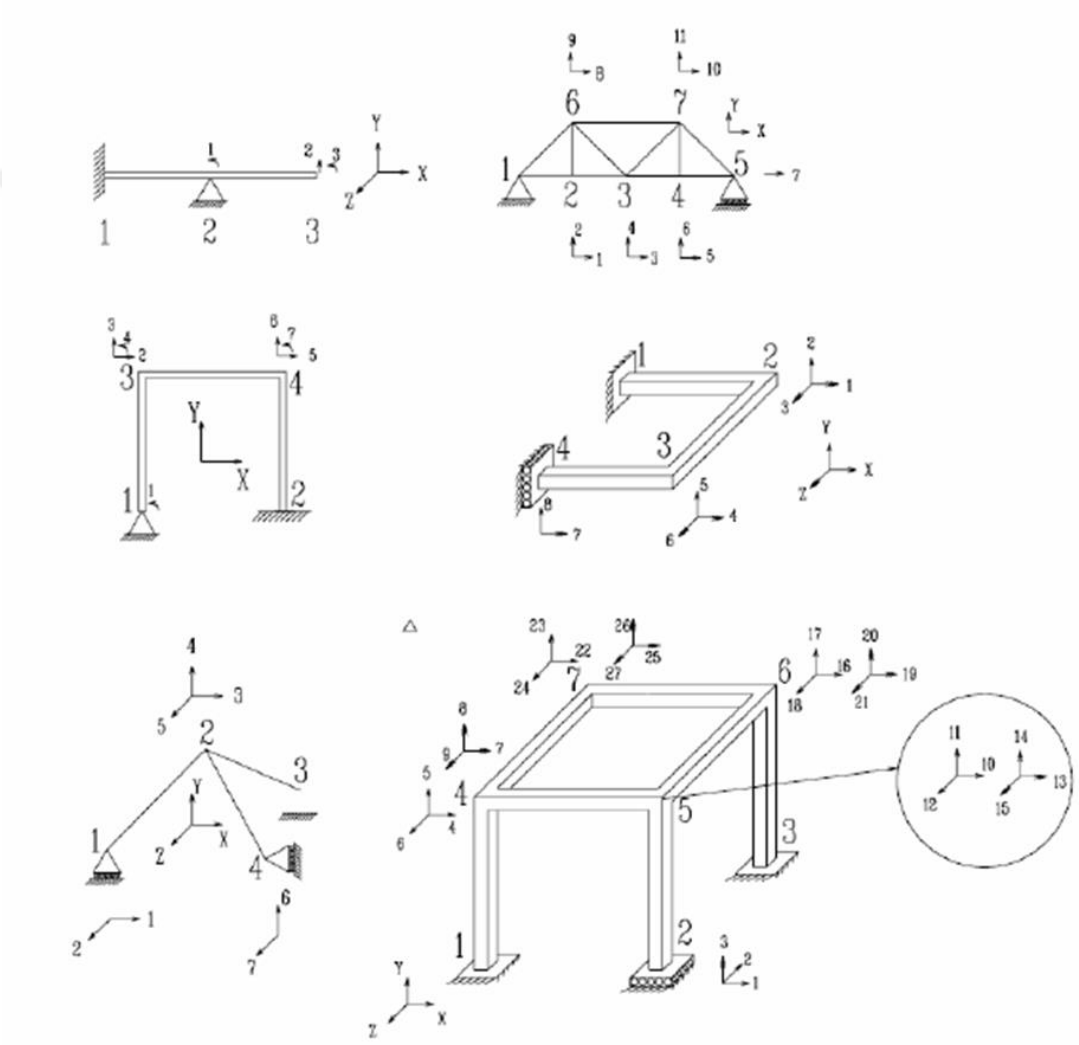
Şekil 3.3 Sonlu Elemanlar Metodu Modelleme Örneği [66]

Sonlu elemanlar metodunun 3 temel niteliği vardır [62]:

1.) Çözüm bölgesi geometrik basit alt bölgelere ayrılır.

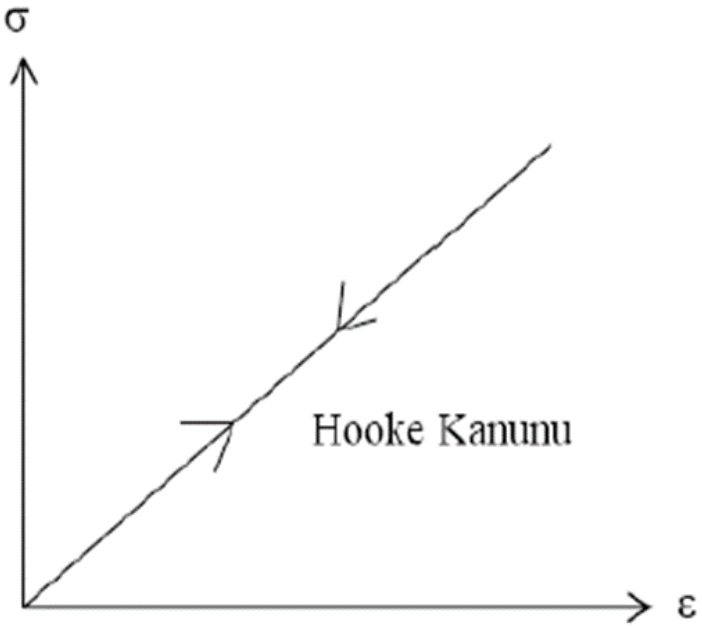
2.) Her elemandaki sürekli fonksiyonların, cebirsel polinomlarda doğrusal kombinasyon olarak ifade edileceği kabul edilir.

3.) İstenilen değerler, her elemandaki süreklilik denkleminin düğüm noktalarındaki değerlerinin elde edilmesiyle problemin çözümünde yeterli olmasını sağlar.

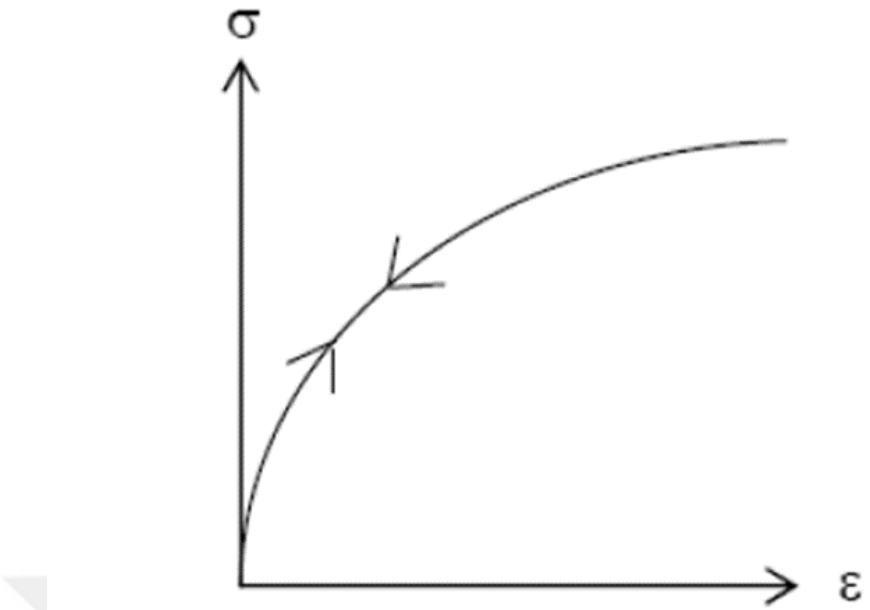


Şekil 3.4 Düğün Noktası Serbestlik Dereceleri [65]

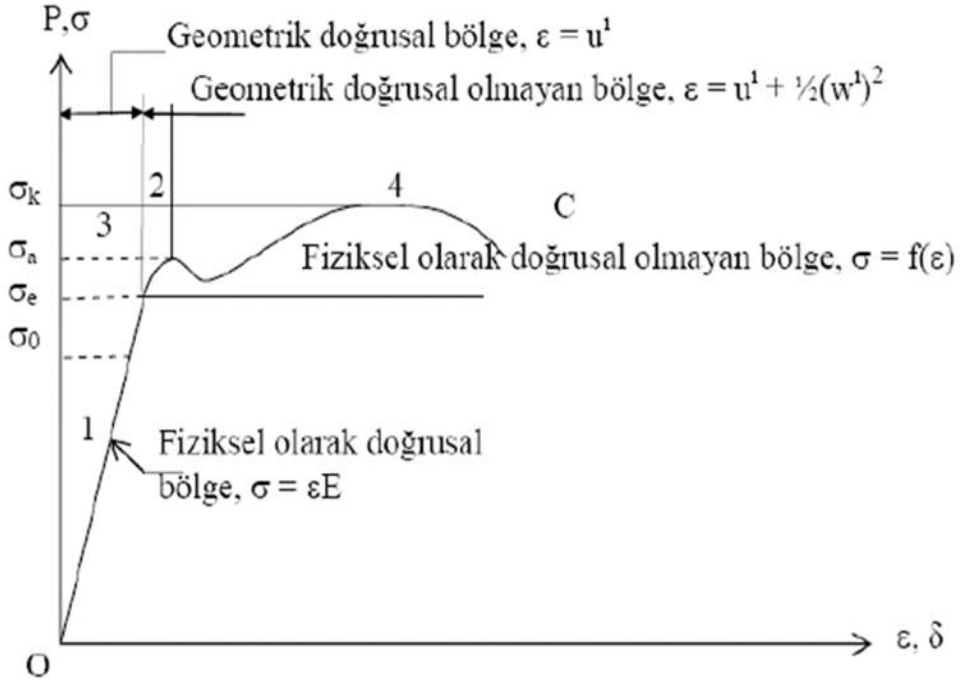
Malzemelerin yapısal özellikleri itibariyle anizotrop, ortotrop ve izotrop olabilir. Fiziksel, geometrik ve sınır şartları açısından malzeme davranışı doğrusal ve doğrusal olmayan olarak ikiye ayrılır. Fiziksel özelliği doğrusal olan malzemeler, Hooke Kanunu'na uyar (Şekil 3.5) ve bu durumda malzemenin bünye bağıntıları (gerilme-şekil değiştirme bağıntıları) doğrusaldır. Gerilme-şekil değiştirme bağıntıları doğrusal olmayan malzemeler, fiziksel özelliği doğrusal olmayan malzeme olarak adlandırılır (Şekil 3.6). 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 3.7-3.8) [67].



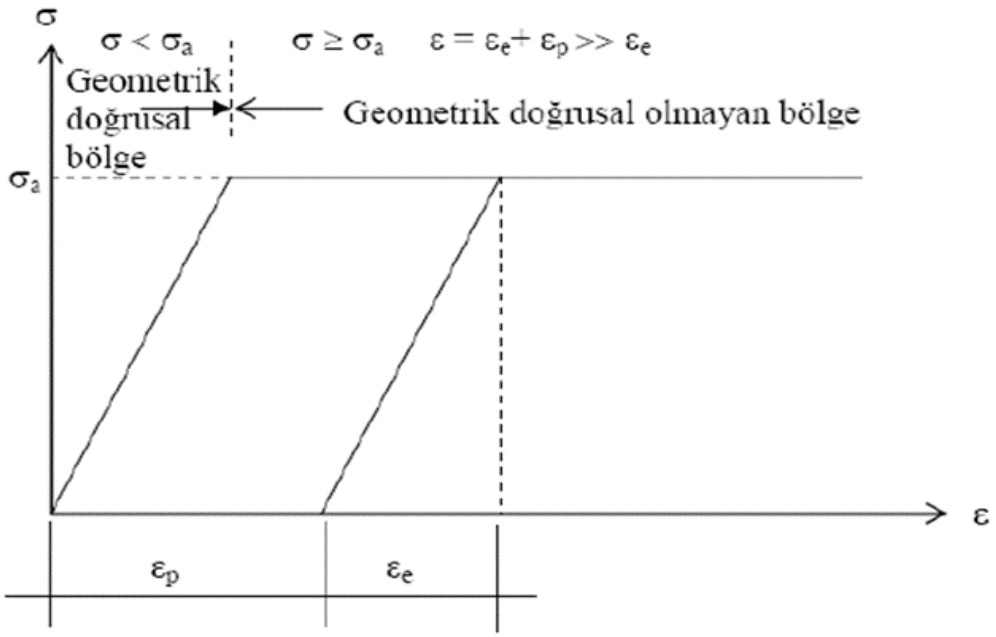
Şekil 3.5 Doğrusal Elastik Malzeme Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi [67]



Şekil 3.6 Doğrusal Olmayan Elastik Malzeme Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi [67]

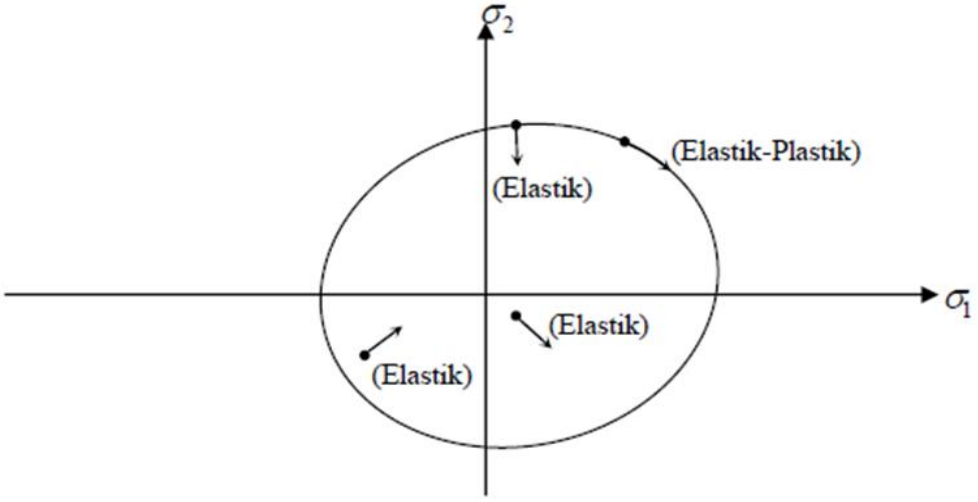


Şekil 3.7 Yumuşak Çelikte Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi [67]



Şekil 3.8 İdeal Elasto-Plastik Malzeme [67]

Birçok bilim dalında olduğu gibi, yapısal analizlerde de doğrusallaşmak en etkili araçtır. Fakat tabiatta bulunan çoğu malzeme genellikle bütünüyle doğrusal bir davranış göstermemektedir. Yapı analizinde doğrusal davranış kabulü büyük ölçüde analiz süresini kısaltmaktadır. Ancak yapısal elemanların birçoğu özellikle belirli bir yük sınırının aşılmasıyla doğrusal davranışlarını kaybetmektedirler. Taş veya tuğla yığma yapılar için çeşitli analiz yöntemleri (doğrusal ve doğrusal olmayan) uygulanmaktadır. Yığma yapı elemanları belirli limit yüklerin aşılmasıyla doğrusal olmayan davranış sergiler ve bu davranış sebebiyle doğrusal olmayan analiz yöntemi tercih edilir. Özellikle malzemenin doğrusal olmaması yığma yapının doğrusal olmayan davranış göstermesinin başlıca sebepleri arasında gösterilebilir [49].



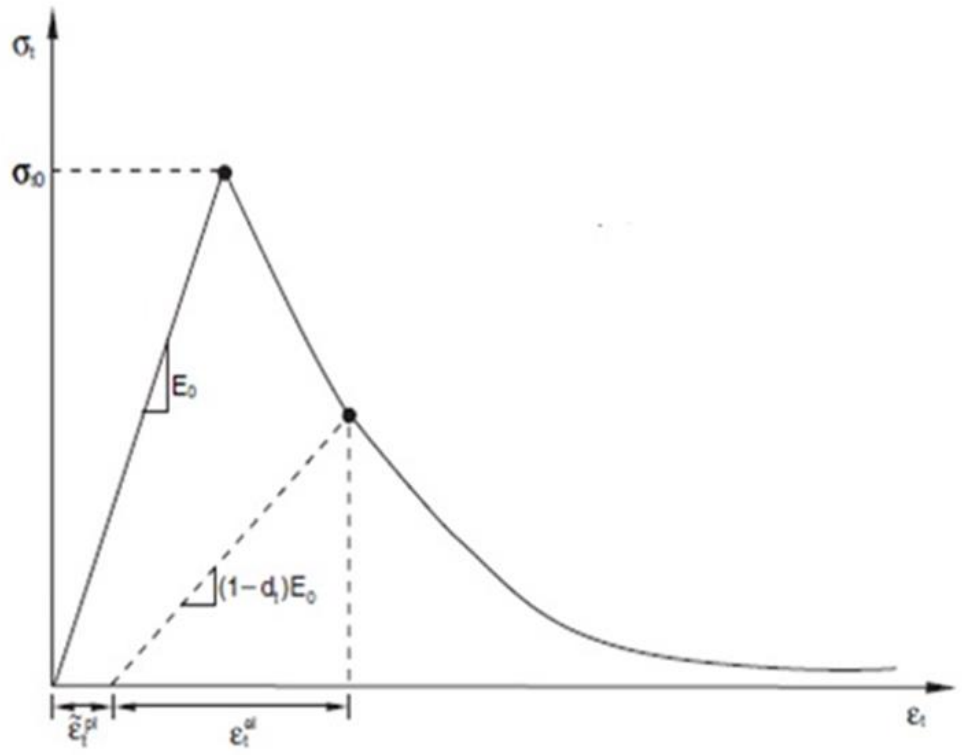
Şekil 3.9 Elastik Tam Plastik Malzemeler için Şematik Kırılma Yüzeyi [68]

Doğrusal olmayan analizlerde davranış belirli bir kırılma kriterleri ile incelenir. Bu amaçla farklı farklı yapı malzemeleri için önerilmiş olan birçok kırılma kriteri mevcuttur. Ancak her bir hipotez malzemelerin tamamını kapsamak için yeterli 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 doğrusal olmayan analiz kısımlarında, genellikle daha çok kitleye ulaşabilmek amacıyla bu tür kırılma hipotezlerini kullanmaktadır [69].

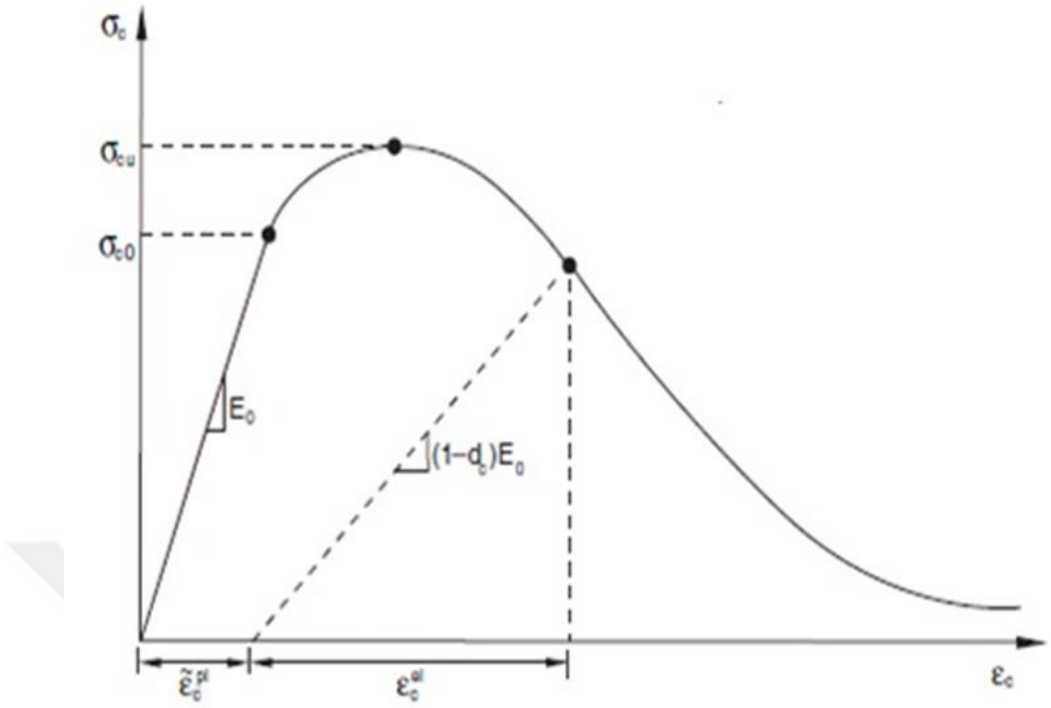
Her ne kadar yığma yapılar için genellikle kırılma kriterleri kullanılarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yapılsa da, bu tez kapsamında CDP hasar modeli kullanılmıştır. Elastik gerilme-şekil değiştirme grafiği, kırılma veya göçme yüzeylerinin varlığı, yükleme ve yumuşama kriterleri gibi analizi etkileyen unsurlar CDP modeli için de tanımlanmıştır.

3.2 Elastoplastik Hasar Modeli (CDP)

CDP betonarme elemanlar için üretilen plastisite bazlı hasar modelidir. Tek eksenli ve çok eksenli gerilmeleri dikkate alarak yapının akma yüzeyinin belirlenmesi ilkesine dayanır. CDP modeli, öncelikle Lubliner vd. [21] tarafından betonun monotonik tepkisini simüle etmek için oluşturuldu. Daha sonra da Lee ve Fenves [22] tarafından genişletildi. Model, beton ve diğer yarı kırılgan malzemeler için süreklilik içeren, plastisite bazlı hasar modelidir. Ana iki göçme mekanizmasının, gerilme çatlağı ve malzemenin basınçla ezilmesi olduğunu varsayar. Model, betonun tek eksenli çekme ve basınç tepkisinin, Şekil 3.10 ve 3.11'de gösterildiği gibi hasar görmüş plastiklik ile karakterize olduğunu varsaymaktadır [20].



Şekil 3.10 Beton için Çekme Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi [20]



Şekil 3.11 Beton için Basınç Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi [20]

Modelin akma yüzeyinin belirlenmesi ve gelişimi için Lubliner vd. [21] ve Lee ve Fenves [22] tarafından çalışmalar yapılmıştır. Şekil 3.12 ve 3.13'te gösterildiği gibi çekme ve basınç dayanımları göz önüne alınarak eğriler oluşturulmuştur. Efektif gerilme açısından, akma kriteri aşağıdaki bağıntıda tanımlanmıştır.

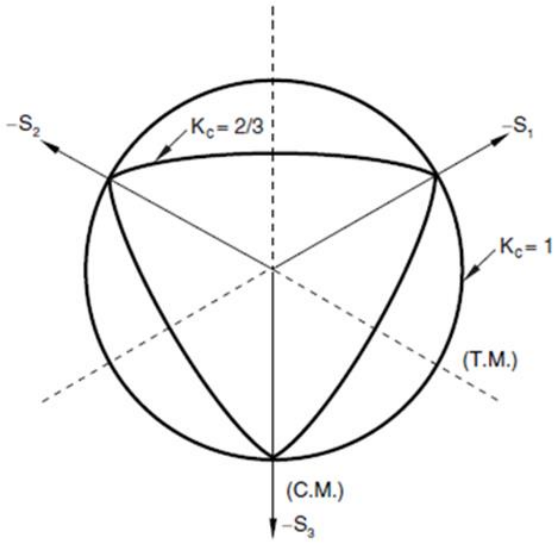
$$F = \frac{1}{1-\alpha}\left(\bar{q} - 3\alpha\bar{\rho} + \beta(\bar{\varepsilon}^{pl})(\hat{\bar{\sigma}}_{max}) - \gamma(-\hat{\bar{\sigma}}_{max})\right) - \bar{\sigma}_c\left(\bar{\varepsilon}_c^{pl}\right) = 0 \qquad (3.1)$$

Bu bağıntıdaki, $\bar{\rho}$ efektif hidrostatik basınç gerilmesi, $\bar{q}$ von-Mises eşdeğer efektif gerilmesi ve σ_{max} maksimum efektif asal gerilmesidir. α, β, γ parametreleri bağıntı (3.2), (3.3) ve (3.4)'te verilen boyutsuz malzeme sabitleridir.

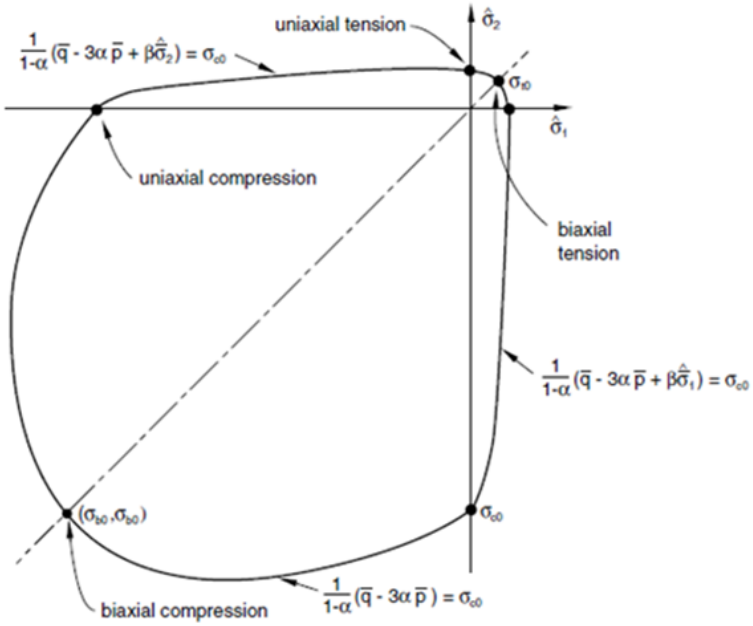
$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0})-1)}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0})-1)}; 0 \leq \alpha \leq 0.5, \qquad (3.2)$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c\left(\bar{\epsilon}_c^{\rho l}\right)}{\bar{\sigma}_t\left(\bar{\epsilon}_t^{\rho l}\right)}(1-\alpha) - (1+\alpha) \tag{3.3}$$

$$\gamma = \frac{3(1-K_c)}{2K_c-1} \tag{3.4}$$



Şekil 3.12 Deviatorik Düzlemde Akma Yüzeyleri [20]



Şekil 3.13 Düzlem İçi Gerilmede Akma Yüzeyleri [20]

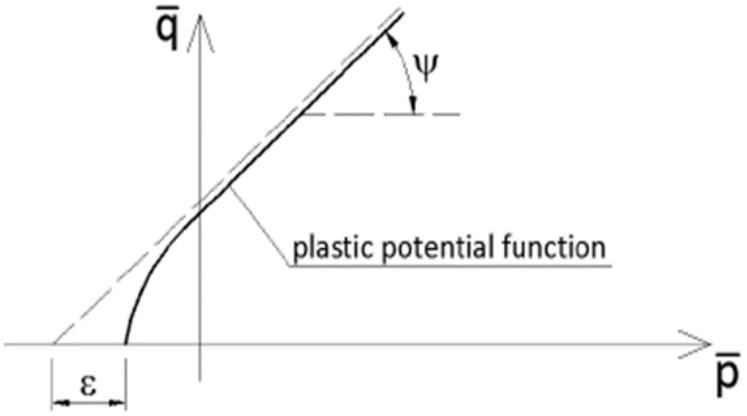
K_c parametresi, deviatrik basınç gerilme yüzeyi mesafesinin, deviatrik çekme gerilme yüzeyi mesafesine oranıdır ve Şekil 13'te gösterildiği gibi, sapma düzlemindeki akma yüzeyinin şeklini değiştirir. Oran her zaman 0.5 ila 1 arasındadır. K_c değeri 1'e eşit olursa, akma yüzeyinin şekli klasik Drucker-Prager hipotezinde olduğu gibi daireye dönüşür. K_c değeri, CDP modeli için 2/3 olarak kabul edilir.

σ_{b0}/σ_{c0} parametresi, çok eksenli gerilmenin, tek eksenli gerilmeye oranıdır. Kupfer vd. [70] ve Page [71] de belirtildiği gibi, bu oran 1.16 [21] 'e eşit kabul edilir. CDP modeli, Drucker-Prager hiperbolik fonksiyonu akış potansiyeli olarak kullanılır:

$$G = \sqrt{(\epsilon\sigma_{t0}\tan\psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{\rho}\tan\psi \tag{3.5}$$

Denklemde, eksantriklik (ϵ), plastik potansiyel fonksiyon hiperbolunun asimptotuna ulaşma hızını tanımlayan bir parametredir. Başka bir deyişle, hidrostatik eksen boyunca ölçüldüğünde, hiperbolün asimptotlarının kesişme noktası olan hiperbolün merkezi ile tepe noktası arasındaki uzunluktur. Eksantriklik sıfıra düştüğünde, meridyonel düzlemdeki yüzey, klasik Drucker-Prager kuvvet hipotezinde olduğu gibi düz bir çizgi oluşturur. CDP modeli, eksantriklik parametresinin 0.1 olduğunu, bu da malzemenin geniş bir sınırlayıcı basınç gerilme değerleri aralığında neredeyse aynı genleşme açısına sahip olduğunu gösterir [20].

Genleşme açısı (ψ), malzeme bileşik gerilme durumuna maruz kaldığında hacim genişlemesinin oluşumunu temsil eden bir parametredir. Fiziksel olarak, genleşme açısı, malzemenin bir iç sürtünme açısı ve Şekil 3.14'te gösterilen meridyenel düzlemde ölçülen, kırılma yüzeyinin hidrostatik eksene doğru eğim açısı olarak yorumlanmaktadır. Aslında, genleşme açısı, hacimsel değişimin kayma gerilimine oranını tanımlar. Mevcut literatüre göre, bu değer genellikle 31° - 42 ° arasında değişmektedir [22,72,73] ve ayrıca yığma duvar malzemeleri için önerilen değeri içeren çeşitli çalışmalar yapılmıştır [25,26,74].



Şekil 3.14 Meridyen Düzleminde Plastik Potansiyel Fonksiyonu [75]

CDP modelinde viskozite parametresi (μ), yapısal denklemlerin visko-plastik düzenlenmesini elde etmek amacıyla dahil edilmiştir. Yumuşama davranışı ve sertlik bozulması sergileyen malzeme modelleri kullanıldığında bazı yakınsama zorlukları sayısal analizlerde ortaya çıkabilir. Betonda hasar görmüş plastiklik modeli viskolastisite kullanılarak düzenlenebilir, böylece gerilmelerin akma yüzeyinin dışında kalmasına izin verilir. CDP modelinde, bağıntı (3.6) verilen Duvaut-Lions yaklaşımı ile viskoplastik regülasyon uygulanır:

$$\dot{\varepsilon}_v^{\rho l} = \frac{1}{\mu}(\varepsilon^{\rho l} - \varepsilon_v^{\rho l}) \tag{3.6}$$

(μ) viskoplastik sistemin gevşeme süresini temsil eden viskozite parametresi olup, $\varepsilon^{\rho l}$ plastik şekil değiştirme ve $\varepsilon_v^{\rho l}$ viskoplastik şekil değiştirmeyi temsil eder. Viskozite parametresi için küçük bir değerle (karakteristik zaman artışına kıyasla küçük) viskoz plastik düzenleyicinin kullanılması, genellikle sonuçlardan ödün vermeden yumuşatma rejiminde modelin yakınsaklık oranının iyileştirilmesine yardımcı olur. Viskozite parametresinin değeri zaman artış büyüklüğünden etkilenen ve Lee ve Fenves [22] 'e göre zaman artış adımının yaklaşık % 15'inin alınması gerekir.

3.3 Yığma Duvarların Sayısal Modelleme Teknikleri

Betonarme yapılardan farklı olarak yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal modellenmesinde kulanılan birçok eleman ve kabuller vardır. Yığma yapı duvarlarında taş ve tuğla gibi esas taşıyıcı yığma birimlerinin ve farklı mekanik özelliklere sahip harcın bulunması tek tip sonlu eleman kullanmayı zorlaştırmaktadır. Bu durumdan dolayı kabule uygun ve gerçek fiziksel sisteme en yakın şekilde bir modelleme tekniği oluşturmak gerekmektedir. Ayrıca bu yığma birimlerini (tuğla veya taş) ve ara yüzey elemanlarını (harç) ayrı ayrı modellemek yolu da tercih edilebilir. Ancak bu durumda yığma yapı sayısal modellemelerinde bilinmeyen sayısı oldukça fazladır. Özellikle doğrusal olmayan analiz yöntemlerinde iterasyonların da işleme katılmasından dolayı, sistemin çözüm süreci büyük bir miktarda artmaktadır [69].

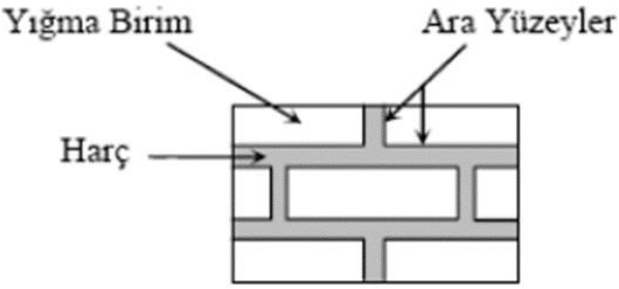
Malzemelerin yapısal mekanik özellikleri hakkında yapılan kabuller malzeme modelini oluşturan elemanların küçük parçalarının çeşitli yükler altında davranışına göre belirlenmektedir. Betonarme, beton, yığma, harç ve diğer kompozit gibi malzemeler çoğunlukla sayısal modelleme analizlerinde homojen kabul edilmelerine rağmen gerçekte yön bağımlı (anizotropik) davranış gösterirler. Ayrıca bu malzemeler gerçekte heterojen yapıda olmalarına rağmen analizlerde homojen kabul edilmektedir. Malzeme modellerinde, yapı malzemesinin gerilme-şekil değiştirme özellikleri göz önüne alınarak çözümleme yapılır. Gerçeği en iyi şekilde yansıtacak kusursuz bir sayısal model oluşturmak için malzeme ve elemanların davranışının çok iyi etüt edilmesi gerekmektedir [76].

Literatürde, yığma duvarların analizinde 3 farklı sayısal modelleme tekniği vardır; mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme.

3.3.1 Mikro Modelleme

Mikro modelleme tekniğinde (Şekil 3.15), yığma duvarı meydana getiren yığma biriminin ve harcın ayrı ayrı mekanik özellikleri; elastik olarak elastisite modülleri, poisson oranları ve elastik olmayan diğer özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu mikro

model yaklaşımında çatlak oluşumunun yığma birim ve harcın arasındaki ara yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır [1].



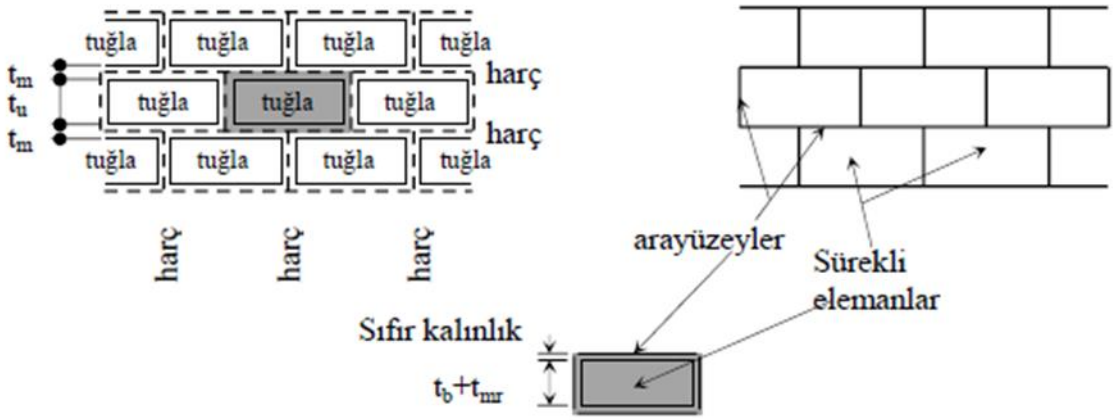
Şekil 3.15 Mikro Modelleme [1]

Bu modelleme yönteminde her bir malzemenin elastik ve plastik özellikleri dikkate alınarak tuğla, harç ve tuğla-harç arasındaki yüzey birbirinden bağımsız olarak modelleme yapılır. Mikro modellemede, harç derzlerinde oluşan karmaşık davranışı sayısal çözümleme içinde değerlendirebilmek adına harç ve tuğla arasındaki ara yüzey (temas yüzeyi) kullanılır [77].

3.3.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme

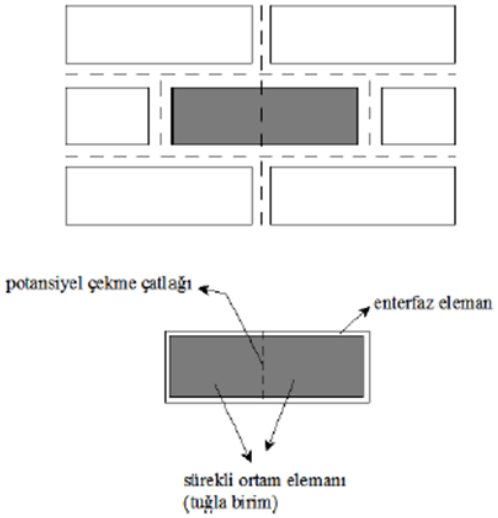
Basitleştirilmiş mikro modellemede taşıyıcı esas birimler (tuğla veya taş gibi) sürekli elemanlarla modellenirken, harç derzleri ve enterfaz (arayüz) bir bütün olarak süreksiz elemanlarla modellenir [1].

Basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi detaylı mikro modellemeye göre, sayısal veri tanımlanması ve analiz süresinde önemli oranda farklılık göstermeden modelin geometrik karışıklığını azaltır (Şekil 3.16). Bundan dolayı, sayısal davranışın tamamının anlaşılabilmesi itibarıyla büyük bir avantaja sahiptir [77].



Şekil 3.16 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme [1]

Lourenço ve Rots [14] tarafından yapılan çalışmalarda, yığmanın bütün olası göçme mekanizmalarını yansıtabilmek için enterfaz (arayüz) elemanları 'enterfaz kapak modeli' ile modellenmiştir (Şekil 3.17). Bu mekanizma, harç derzlerinde ve çekme etkisinde yığma birimde çatlak, düşey ve yatay harç derzlerinde kayma, normal gerilme değerlerinin derzlerde sürtünme oluşturması için yeterli olan diyagonal çekme çatlağı ve normal gerilmenin yüksek değerlerinde harcın genleşerek yığma birimlerin kırılma durumlarını yansıtabilmektedir.



Şekil 3.17 Enterfaz Tanımı [14]

Basitleştirilmiş modelleme tekniğinde, yığma birimlerinin boyutları, harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilir. Bu durumda harç tabakası ihmal edilmekte ve yığma birimleri ortalama ara yüzey çizgileriyle birbirinden ayrılmaktadır. Meydana gelmesi muhtemel çatlakların bu ortalama ara yüzey çizgisinde oluşacağı kabul edilmektedir [69].

Basitleştirilmiş mikro modellemede normal ve kayma rijitlikleri olarak tanımlanan k_n ve k_s aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanmaktadır [1].

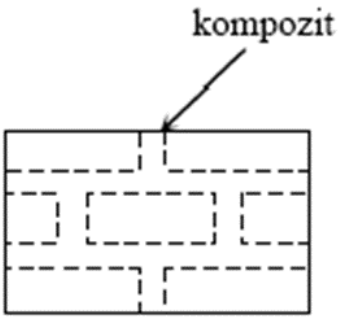
$$k_n = \frac{E_b.E_{mr}}{t_{mr}(E_b - E_{mr})} \tag{3.7}$$

$$k_s = \frac{G_b.G_{mr}}{t_{mr}(G_b - G_{mr})} \tag{3.8}$$

Bu bağıntıdaki E_b yığma birimin elastisite modülü, E_{mr} harcın elastisite modülü, G_b yığma birimin kayma modülü, G_{mr} harcın kayma modülü ve t_{mr} ise harcın kalınlığını göstermektedir.

3.3.3 Makro Modelleme

Makro modelleme, yığma birimleri ile harç arasındaki etkileşimin tüm yapı davranışını incelerken ihmal edilmesiyle oluşan sayısal modelleme tekniğidir (Şekil 3.18). Bu modelleme yaklaşımında malzeme kompozit kabul edilir. Yapının veya elemanların detaylı analizi için uygun bir model değildir. Bu yöntemde belirgin olmayan malzeme gerilmeleri için büyük ölçekli deneyler sonucu elde edilen yığma gerilme değerleri kullanılır [78].



Şekil 3.18 Makro Modelleme [1]

Makro modelleme tekniğinde yığma birimler ve bağlayıcı malzeme arasında bir enterfaz eleman olmadan homojen bir yapı olarak modellenmektedir. Bu modellemede, tuğla ve harç bir bütün olarak düşünüldüğü için yığma yapının mekanik parametreleri çeşitli birleştirme teknikleri sonucu elde edilir. Deneysel verilerin bulunmayışı ve izotrop olmayan malzeme davranışındaki karmaşıklıktan dolayı makro modellerin uygulanmasında birtakım zorluklarla karşılaşılmaktadır [79].

Page [10], makro modellemenin, düşük değerdeki gerilme değerlerinde ve aşırı gerilme dağılımlarının oluşması durumunda zaman yetersiz kaldığını belirtmiştir.

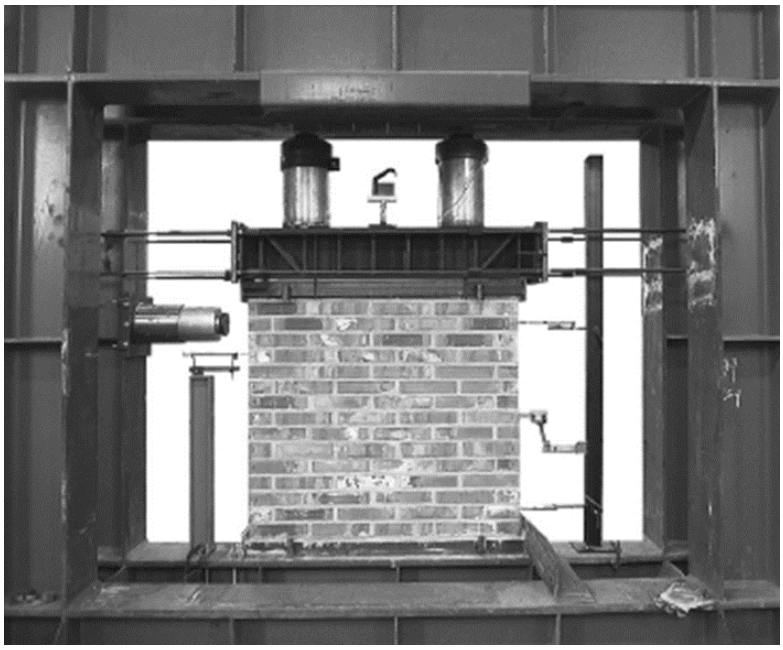
Casolo vd. [80], makro modelleme analizi yapılan duvar davranışının, mikro modelleme gerektirmeden yapı geometrisi ve birkaç malzeme parametresi ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmiştir.

4
Parametrik Çalışma

4.1 Örnek Duvar Üzerine Çalışmalar

Stratford vd. [81] tarafından yapılan deneysel bir çalışma, CDP hasar modeli parametrelerinin farklı değerlerinin donatısız yığma duvar davranışı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla seçilmiştir. Stratford, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kullanarak düzlem içi kesme kuvveti üzerine deneysel bir araştırma yapmıştır (Şekil 4.1). Aynı harç ve tuğlaya sahip altı duvar paneli inşa edilerek her malzemenin bir örneği güçlendirilmemiş, diğer ikisi GFRP kullanılarak güçlendirilmiştir. Bu çalışmada sadece güçlendirilmemiş kil tuğla duvar panelleri (CLAY 1) ele alınmıştır. Yığma duvarın geometrik ve malzeme parametreleri sırasıyla Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir.

CLAY1 duvarı yatay ve düşey yükleme altında test edildi. Duvarlara yerleştirilen çelik kiriş üzerine dikey bir 100 kN (1.38 MPa) yük uygulandı.



Şekil 4.1 Deney Düzeneği [81]

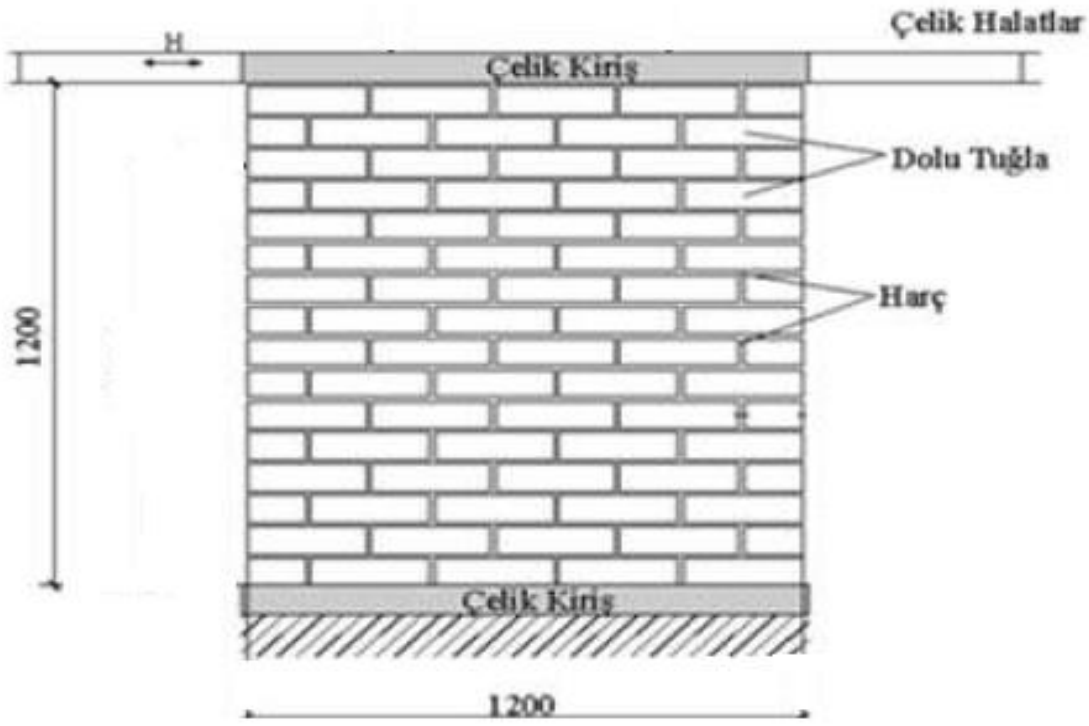
Tablo 4.1 Geometrik Parametreler

Referans	Deney	Duvar Boyutları (mm)	Tuğla Boyutları (mm)	Harç Boyutları (mm)
Stratford [1]	Clay 1 URM	1200×1200×60	228×65×60	10

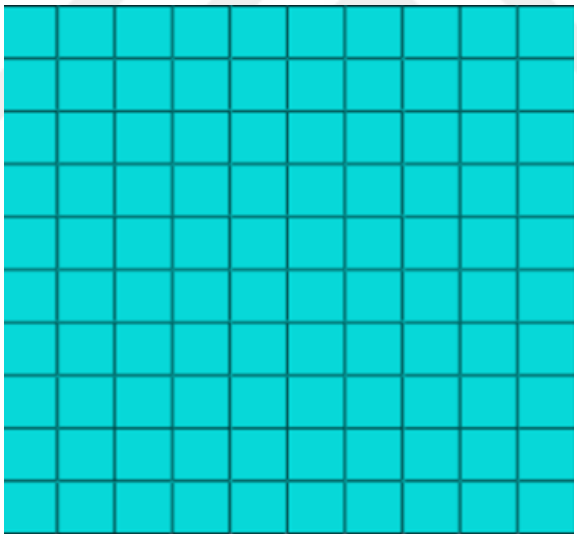
Tablo 4.2 Malzeme Parametreleri

Malzeme	Parametre	Değer
Tuğla	Basınç Dayanımı	62 MPa
	Çekme Dayanımı	8.9 MPa
	Elastisite Modülü	15800 MPa
	Poisson Oranı	0.13
Harç	Basınç Dayanımı	11 MPa
	Elastisite Modülü	3200 MPa

Bu çalışmada, sayısal analiz için, birimler ile harç arasındaki etkileşimin dikkate alınmadığı makro modelleme tekniği seçilmiştir. Sayısal simülasyonlar için sonlu eleman (FE) kodlu ABAQUS / Standart (ABAQUS / CAE 6.14-1 SE) kullanılmıştır. CDP hasar modeli, CLAY 1 duvarının doğrusal olmayan davranışını simüle etmek için kullanılmıştır. Sayısal model, deneysel sonuçlara göre yer değiştirme kontrolü (15 mm) ile iki boyutlu makro modelleme ile analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar ağ ebatları 120×120 mm ve kabuk elemanı olarak S4R kullanılmıştır (Şekil 4.2).



(a)Fiziksel Model



(b) Sayısal Model

Şekil 4.2 Clay 1 Duvarı

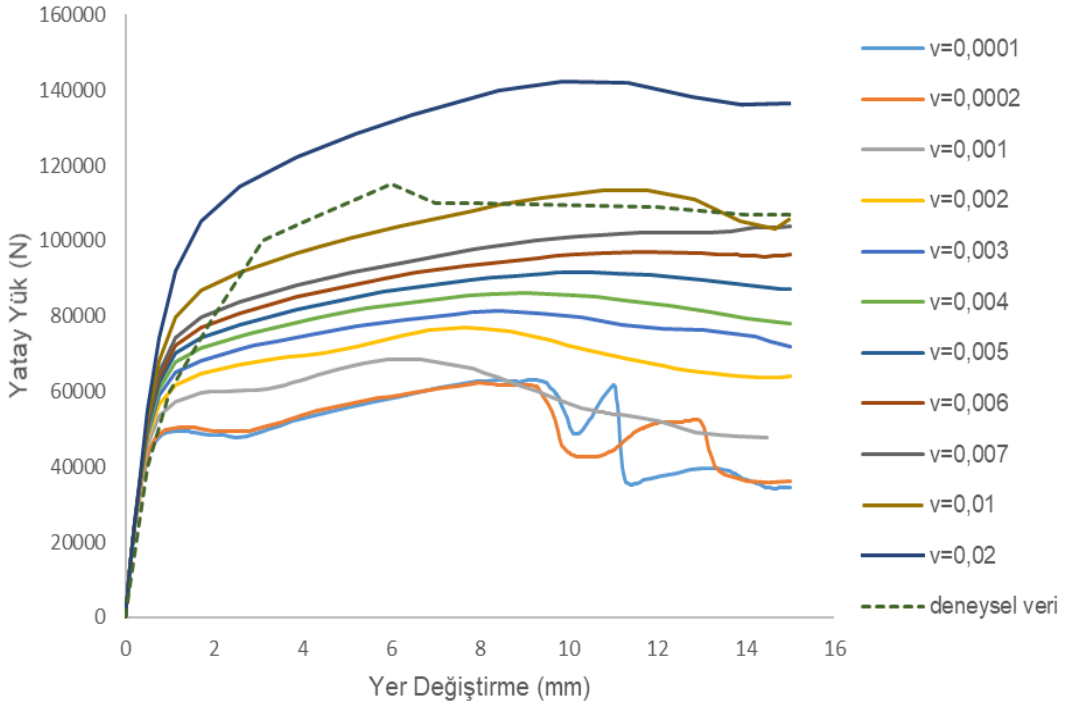
Duvar panelinin elastik ve plastik değerleri, CDP modelinin ABAQUS / CAE kodunda tanımlanması gerekmektedir. Elastisite modülü, tuğla ve harç için ayrı ayrı değerler verilmesine rağmen, makro model çalışması için panel elastisite modülü

belirlenmelidir. Bu nedenle, elastisite modülünün değeri, Brencich vd. [60] önerdiği bağımsız yüzeylerin kombinasyon formülünü kullanarak belirlenmiştir. CDP hasar modelinde, panelin gerilme-şekil değiştirme davranışı basınç ve çekme kuvvetleri altında bilinmesi gerekir. Deneysel çalışmalar yapan Kaushik vd. [35], yığma yapının basınç gerilmeleri altında davranışını yansıtan çalışmalarını idealleştirerek bir algoritma önerdiler. Akma dayanımı ($0.33fm'$) ve maksimum yer değiştirme (em') bu çalışma dikkate alınarak belirlenmiştir. Literatürde panelin basınç ve çekme dayanımının elde edilmesi için duvar bileşenlerinin basınç dayanımı (fm') ve çekme dayanımı (ft') dikkate alınarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, Bennet vd. [54] önerdiği formül, panel için basınç dayanımı ve benzer şekilde Dhanasker vd. [4] önerdiği formül ise panelin çekme dayanımı için kullanılmıştır. Parametrik çalışma için kullanılan veriler Tablo 4.3'te verilmiştir.

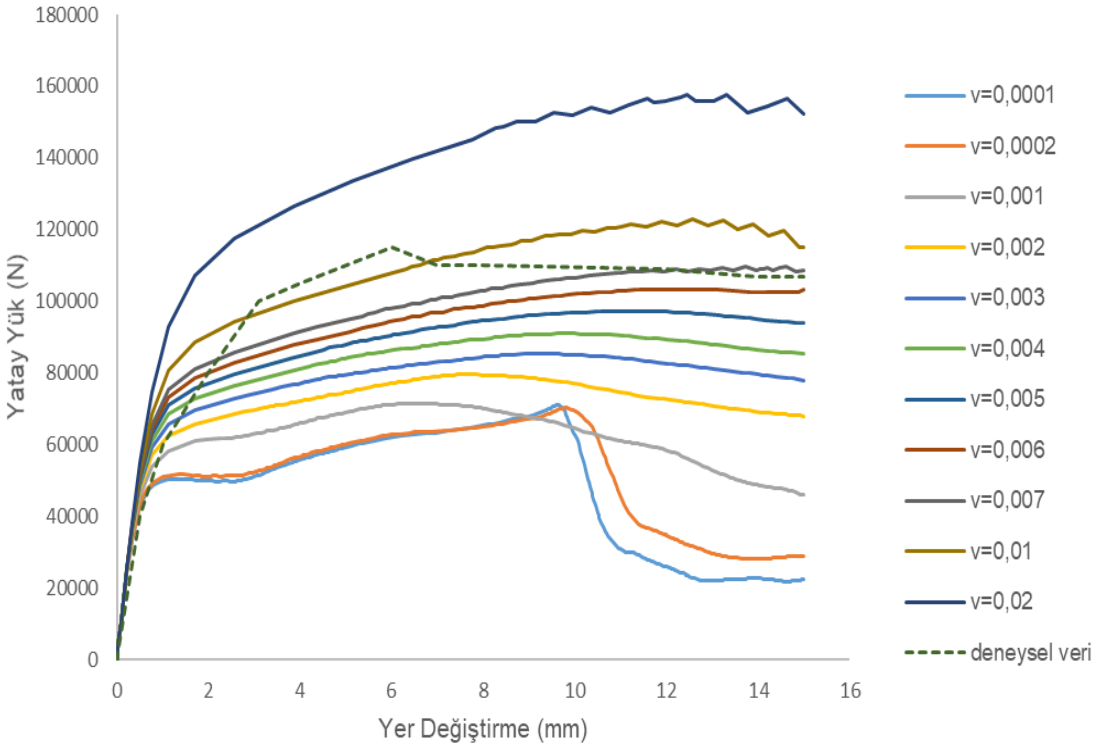
Tablo 4.3 CDP Hasar Modeli Malzeme Parametreleri

Elastisite	**Değer**	**Plastisite**	**Değer**
Elastisite Oranı	11416 MPa	Genleşme Açısı	10,20,30,40
Poisson Oranı	0.15	e	0.1
Basınç Davranışı		f_{b0}/f_{c0}	1.16
$\boldsymbol{fm'}$	19.26 MPa	K	0.667
$\boldsymbol{em'}$	0.003569 mm	Viskozite	0.0001, 0002, 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005, 0.006, 0.007, 0.01, 0.02
Çekme Davranışı			
$\boldsymbol{ft'}$	1.1 MPa		
$\boldsymbol{em'}$	0.0001 mm		

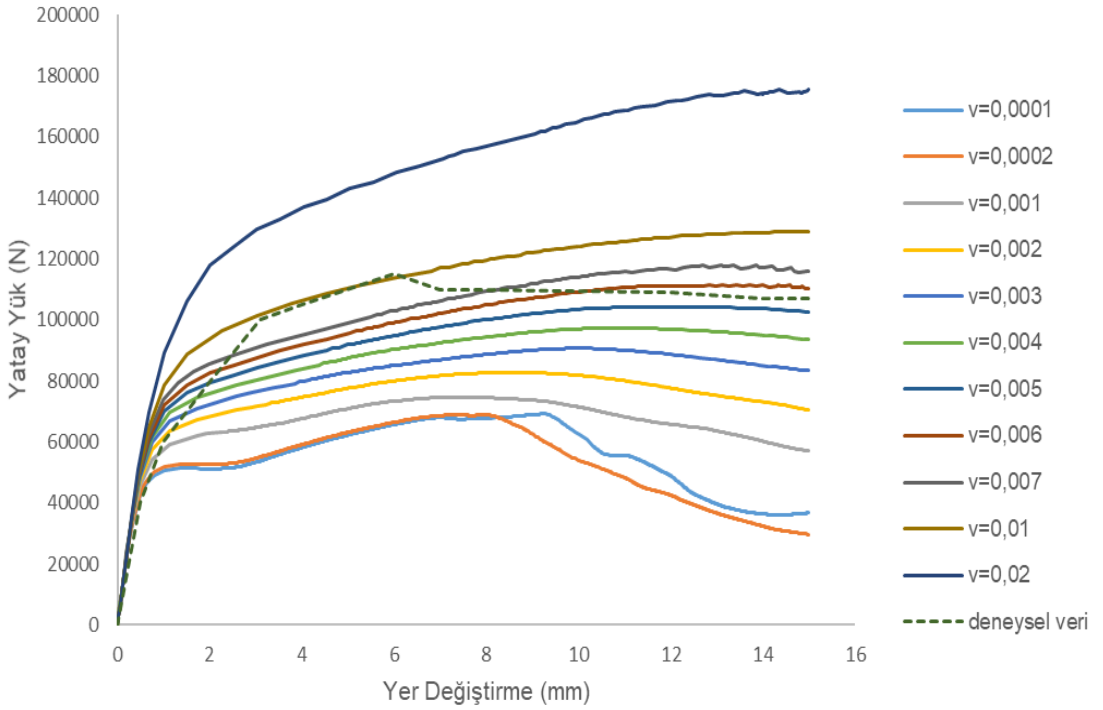
Çeşitli viskozite değerlerinin, sayısal model üzerindeki dört farklı genleşme açısı değerindeki etkisi Şekil 4.3'te verilmiştir.



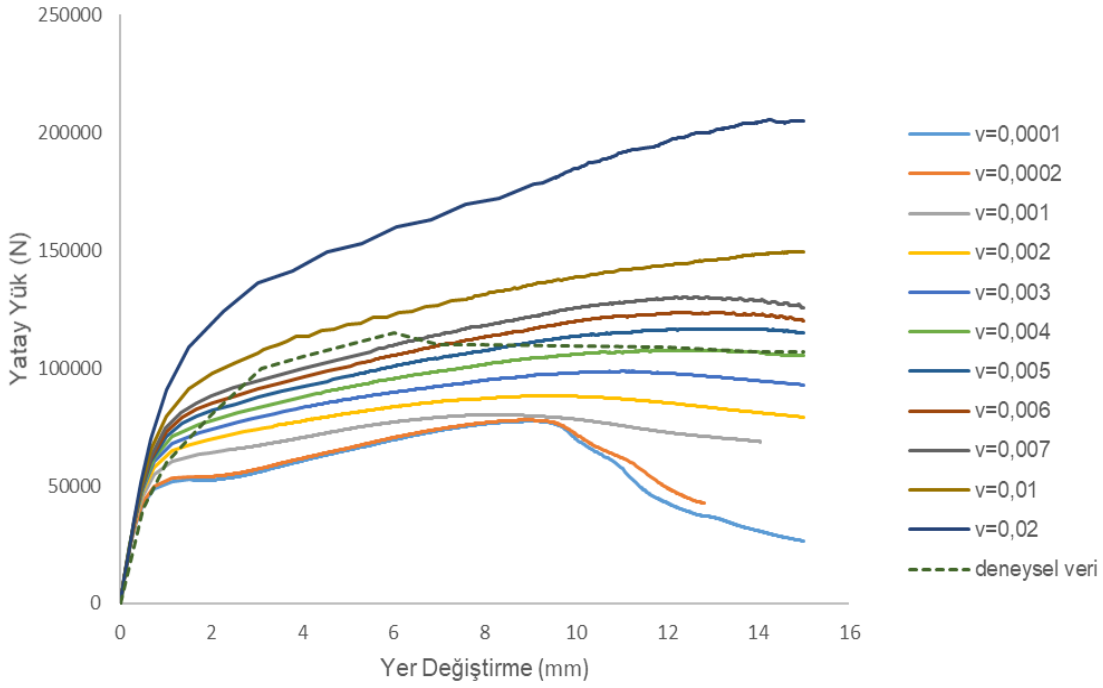
(a) Genleşme Açısı = 10°



(b) Genleşme Açısı = 20°



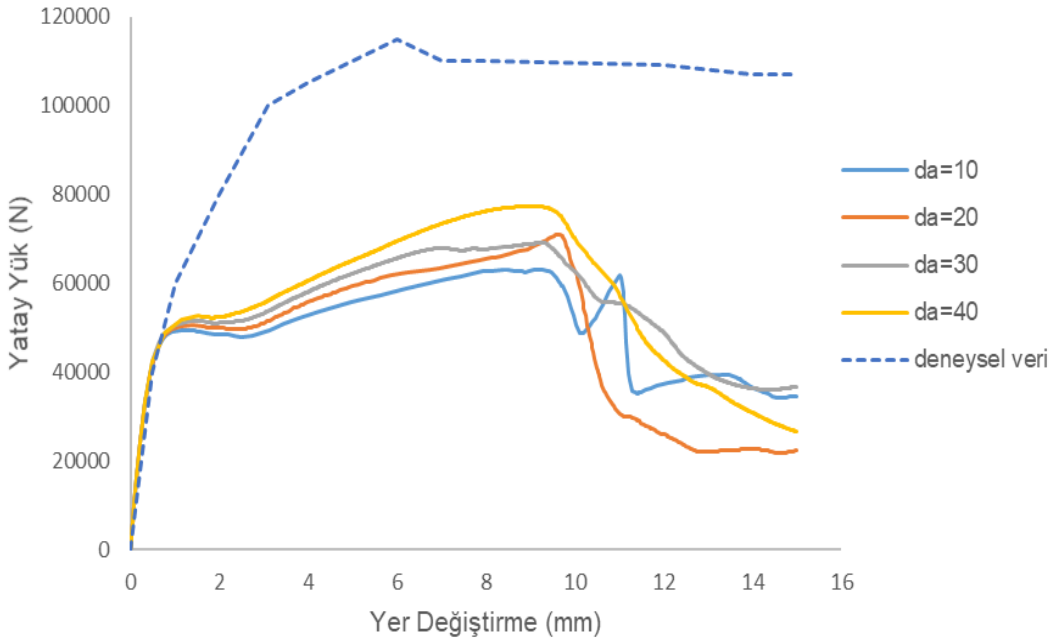
(c) Genleşme Açısı = 30°



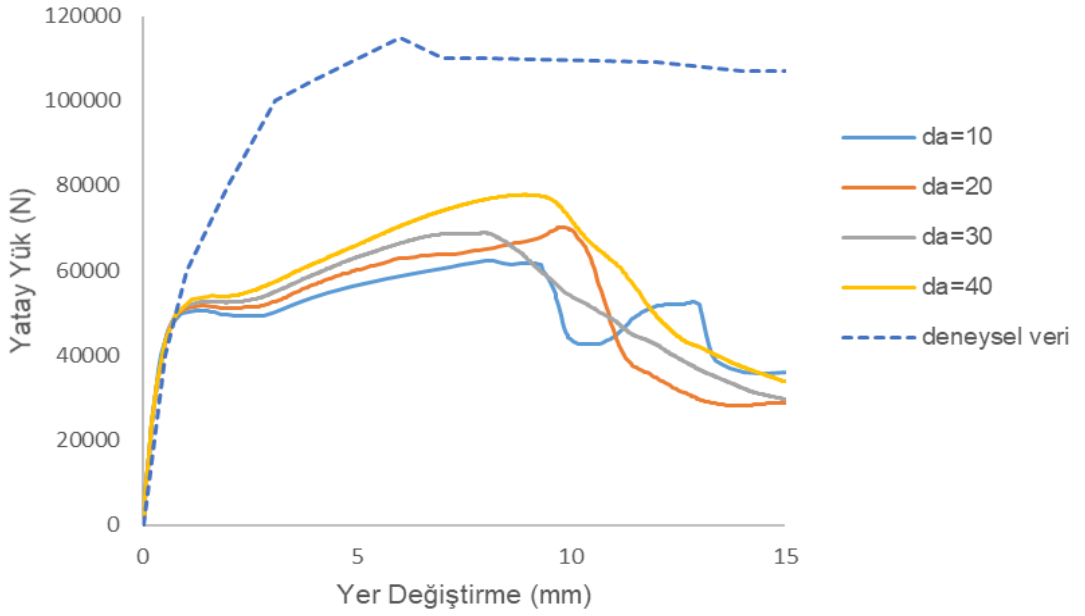
(d) Genleşme Açısı = 40°

Şekil 4.3 Viskozite Parametresi için Yük-Yer Değiştirme Davranış Değişimi

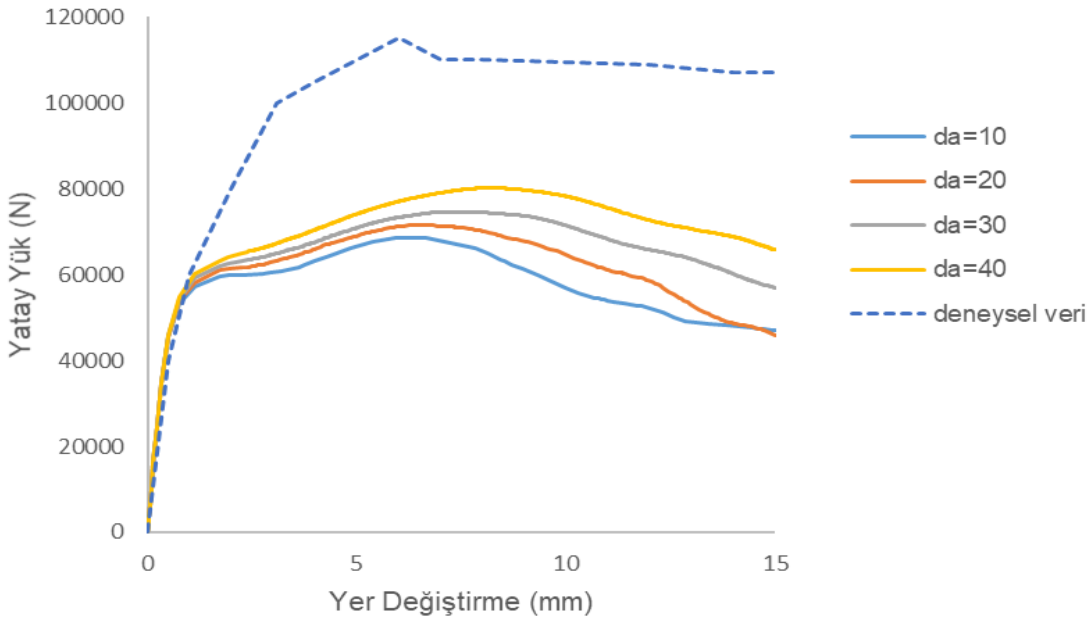
Dört farklı genleşme (dilatasyon) açısının, çeşitli viskozite değerlerinde sayısal model üzerinde etkisi Şekil 4.4'te verilmiştir.



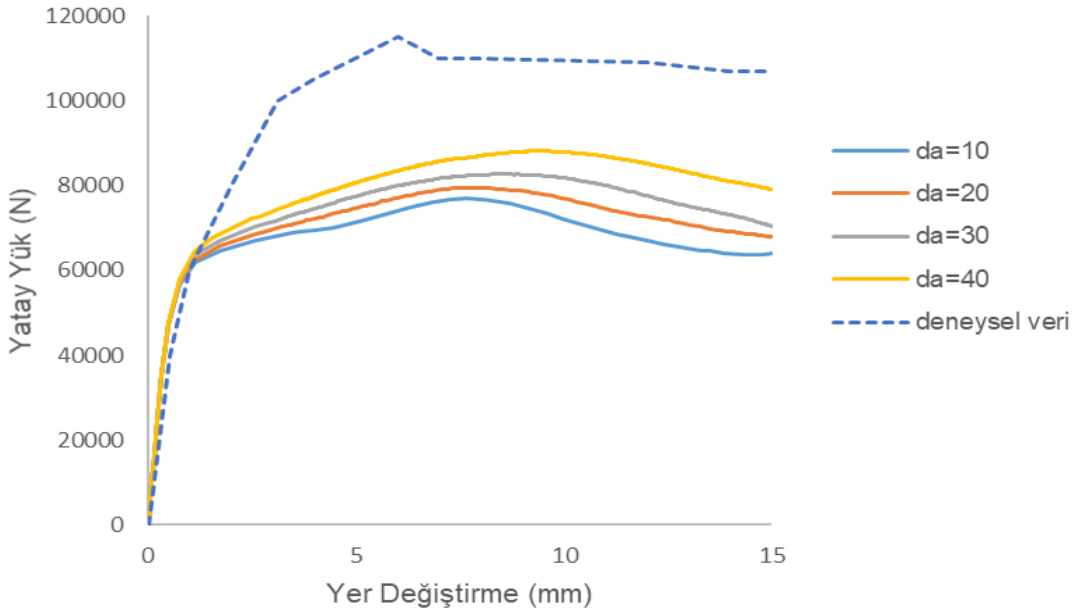
(a) Viskozite = 0.0001



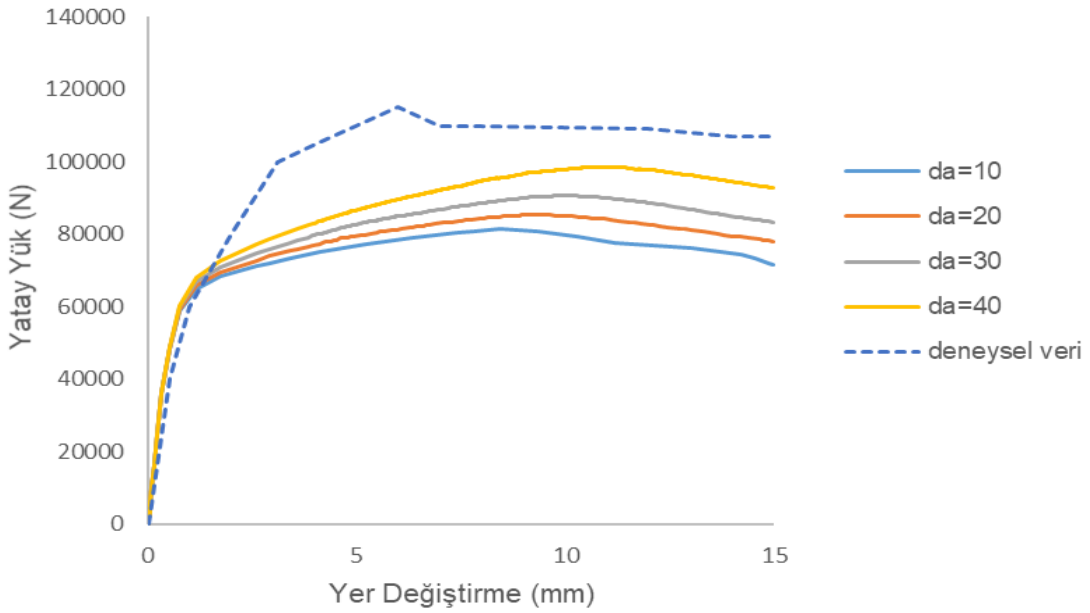
(b) Viskozite = 0.0002



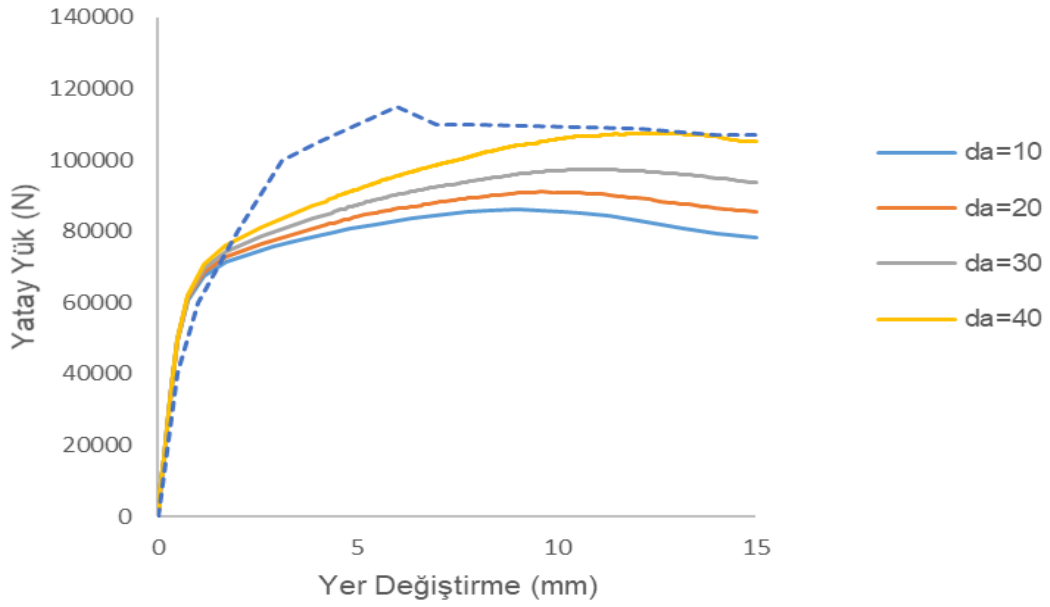
(c) Viskozite = 0.001



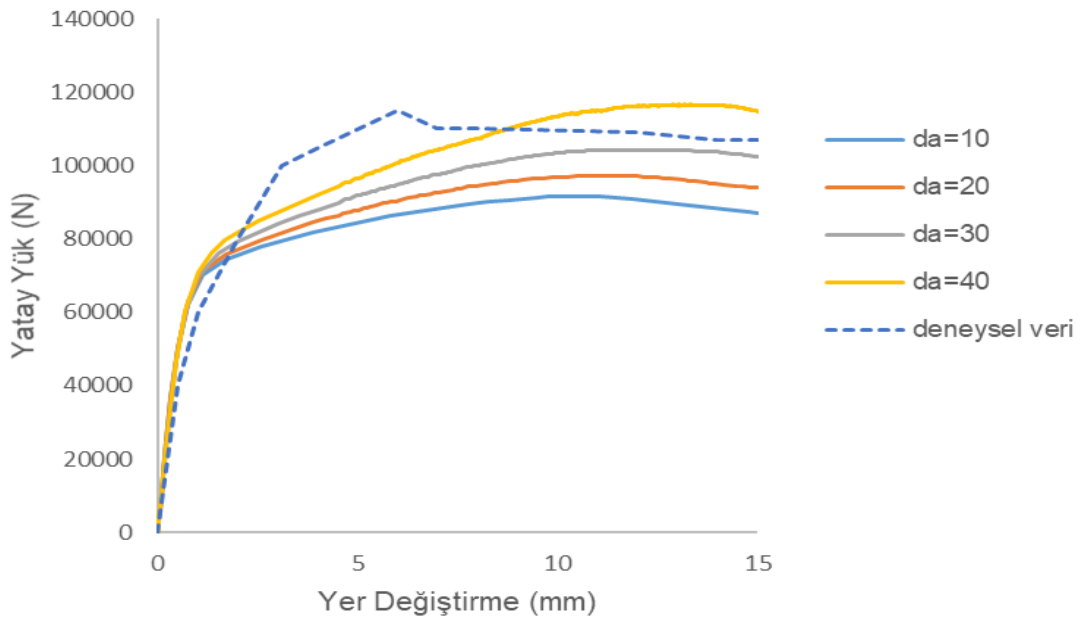
(d) Viskozite = 0.002



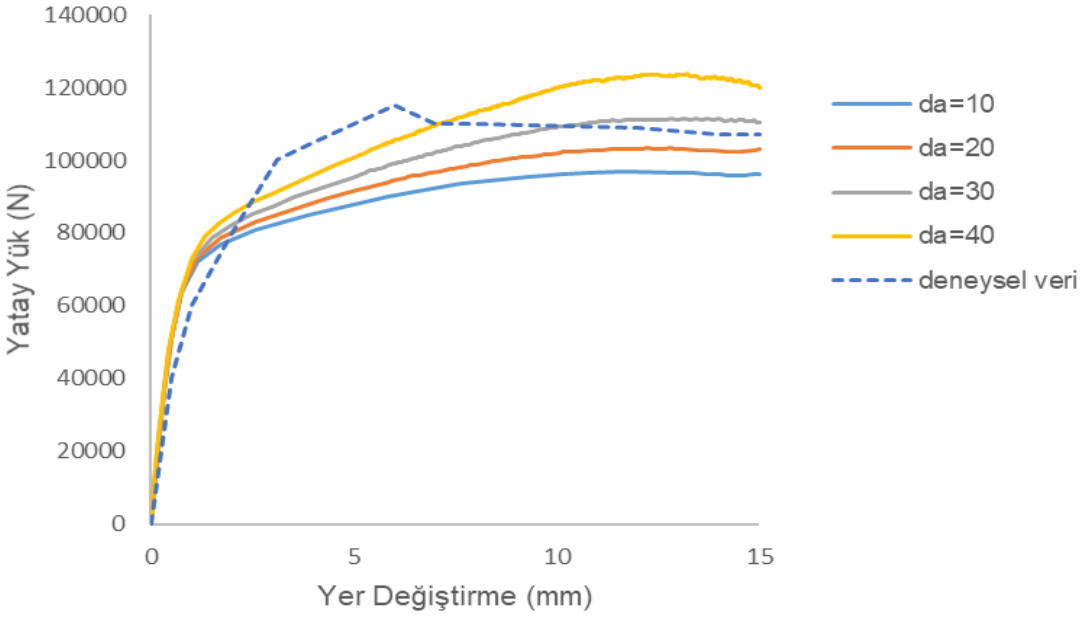
(e) Viskozite = 0.003



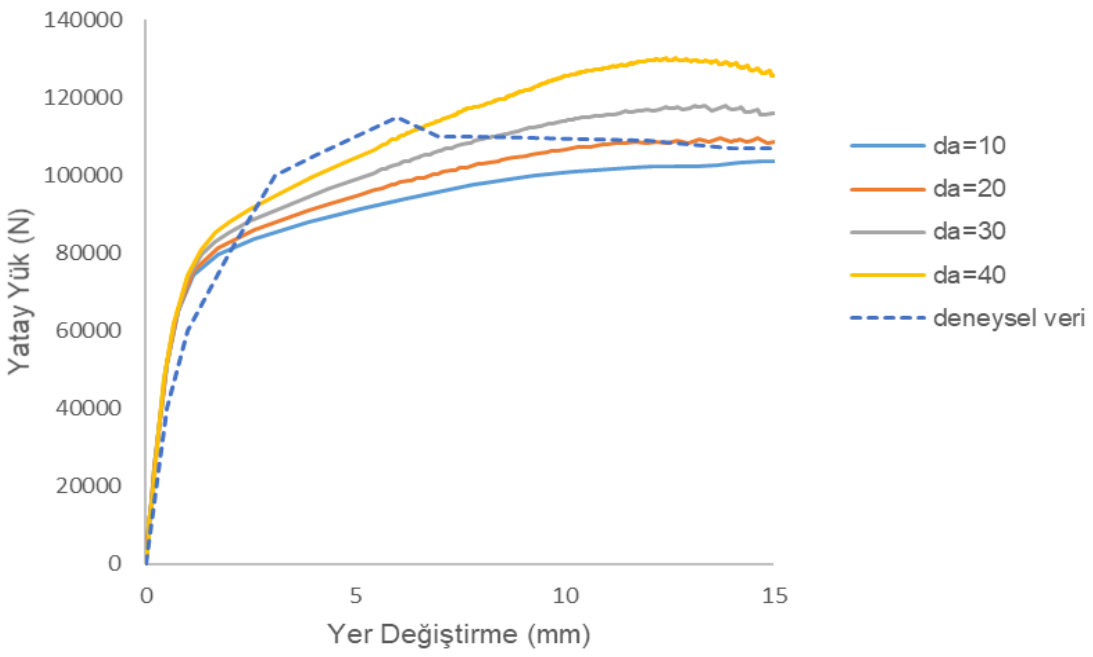
(f) Viskozite = 0.004



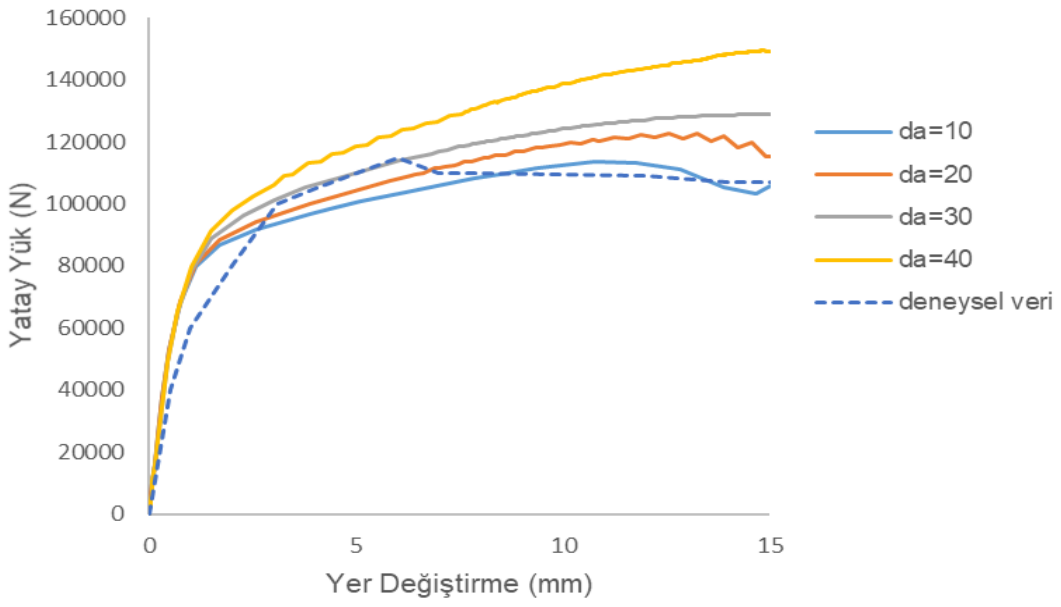
(g) Viskozite = 0.005



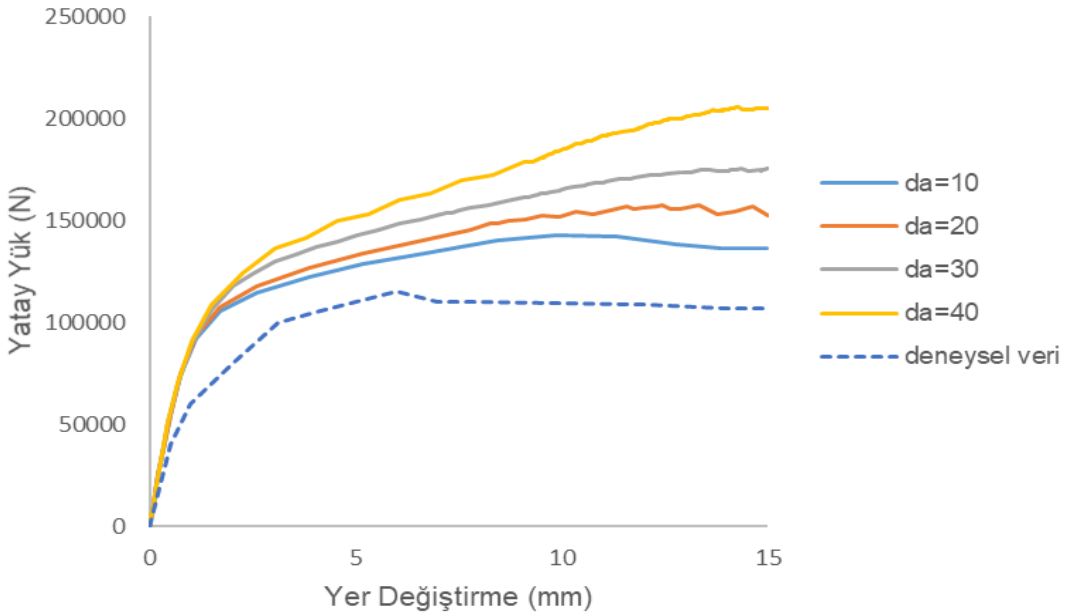
(h) Viskozite = 0.006



(ı) Viskozite = 0.007



(j) Viskozite = 0.01



(k) Viskozite = 0.02

Şekil 4.4 Genleşme Açısı için Yük-Yer Değiştirme Davranış Değişimi

4.2 Bulgular

Yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü için öncelikle yığma birimin çeşitli yükler altında davranışını uygun şekilde temsil edecek bir bünye modelinin belirlenmesi gerekir. Tez çalışmasında, betonarme elamanlar için geliştirilen elastoplastik hasar modeli (CDP) yığma duvarlara uygulanmıştır. Bunun yanısıra, CDP hasar modelinin plastiste değerlerinin yığma yapılar için uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Literatürde bu parametlerin belirlenmesi noktasında birkaç çalışma olmasına rağmen ağırlıklı olarak betonarme elemanlar için analizler yapılmıştır. Tez kapsamında yapılan parametrik çalışmada, CDP hasar modelinin yığma yapılarda kalibre edilmesi gereken parametreleri (genleşme açısı ve viskozite) üzerinde durulmuştur. Genleşme açısı ve viskozite değerlerinin değişimi doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizini büyük ölçüde etkilemiş olduğu görülmüştür. Aşağıda çalışma sonucu ulaşılan bulgular özetlenmiştir:

a) Sabit genleşme açılarında viskozite arttıkça, genel olarak yatay yükün arttığı ve yumuşama davranışının kaybolduğu görülmektedir (Şekil 4.3). Maksimum yatay yükler;

Tablo 4.4 Genleşme Açısındaki Değişimin Yatay Yüke Etkisi

Genleşme Açısı	Viskozite	Yatay Yük (N)	
		Sayısal	Deneysel
10°	0.02	142442,93	115000
20°	0.02	157586,43	
30°	0.02	175383,80	
40°	0.02	205025,50	

b) Deneysel veriler dikkate alındığında, yedi farklı viskozite değerinin genleşme açısına bağlı olarak değişimi, analizi önemli ölçüde etkilemiştir.

c) Sabir bir viskozitede, yatay yük artan genleşme açısı ile büyük ölçüde artmıştır (Şekil 4.4). Maksimum yatay yükler ;

Tablo 4.5 Viskozite Değerlerindeki Değişimin Yatay Yüke Etkisi

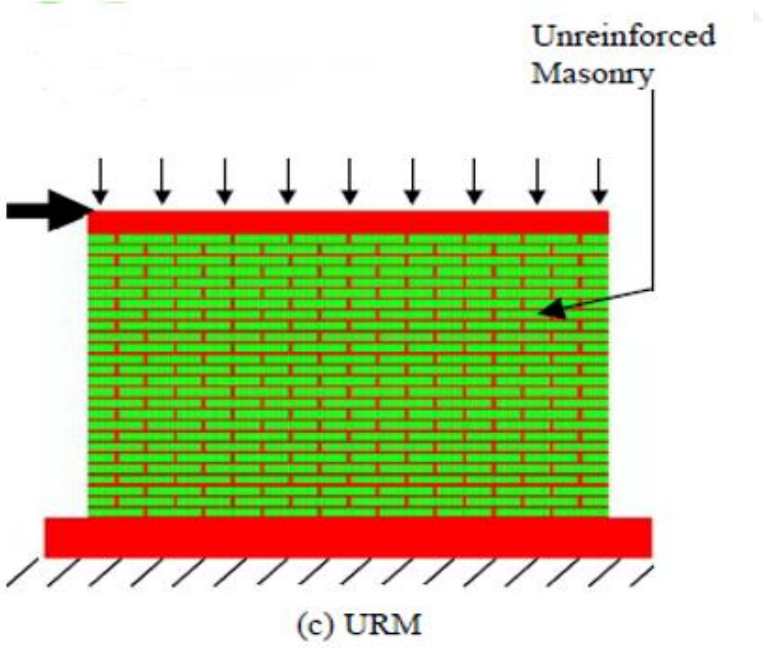
Viskozite	Genleşme Açısı	Yatay Yük (N)	
		Sayısal	Deneysel
0.0001	40°	77373,97	115000
0.002	40°	88152,54	
0.004	40°	107015,91	
0.02	40°	205025,50	

d) Tez kapsamında yapılan parametrik çalışmanın sonucu olarak; CDP makro model sonlu elemanlar analizinde, viskozite ve genleşme açısı parametrelerinin en uygun sonucu olarak sırasıyla 0.004 ve 40° olarak belirlenmiştir. Ancak bu değerler CLAY 1 duvarı içindir. Bölüm 5'te belirlenen bu değerlerin literatürde bulunan 3 duvar üzerinde etkisi araştırılmıştır.

5
Sayısal Çalışmalar

5.1 Sayısal Çalışma No.1

Haider [82] doktora tezinde, bağlayıcı malzeme olarak harcın kullanıldığı ve tuğladan üretilen paneller (Şekil 5.1) üzerinde bir dizi deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Parametrik çalışma kapsamında önerilen genleşme açısı ve viskozite değerleri göz önüne alınarak, bu panellerden donatısız yığma duvarın (URM) doğrusal olmayan makro model sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Duvar, yatay ve düşey yükler altında yer değiştirme kontrolü ($12\ mm$) ile iki boyutlu olarak CDP hasar modelinde simüle edilmiştir. Sonlu elemanlar ağ ebatları $290 \times 290\ mm$ olup, kabuk eleman olarak S4R kullanılmıştır. Duvara $0.50\ MPa$ düşey yük uygulanmıştır. Duvara ait geometrik parametreler Tablo 5.1' de verilmiştir.



Şekil 5.1 Haider Yığma Duvarı [82]

Tablo 5.1 Haider Yığma Duvarı Geometrik Parametreler

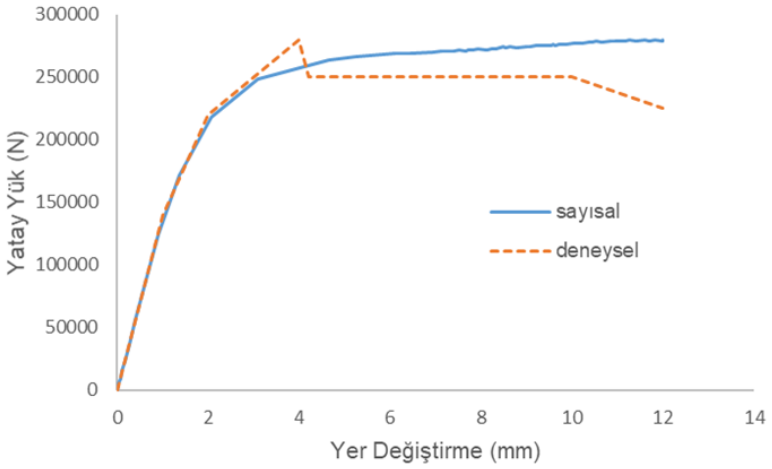
Referans	Deney	Duvar Boyutları (mm)	Tuğla Boyutları (mm)	Harç Boyutları (mm)
Haider [82]	URM	2870×2408×150	310×76×150	10

Haider [82] deneysel çalışmasında, donatılı ve donatısız duvar davranışının çevrimsel ve monotonik tepkisini simüle etmek için CDP hasar modelini kullanarak mikro modelleme yapmıştır. Elde ettiği analiz sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Bu tez kapsamında, çalışma içerisinde bulunan donatısız yığma duvarın sayısal analizi, makro modelleme yapılarak elde edilmiştir. Malzeme parametreleri (Tablo 5.2) deneysel yapılan çalışmadan alınmıştır.

Tablo 5.2 Haider Yığma Duvarı Malzeme Parametreleri

Parametre	Değer
Elastisite Modülü	6000 MPa
Poisson Oranı	0.2
fm'	15.71 MPa
Genleşme Açısı	40°
Viskozite	0.004

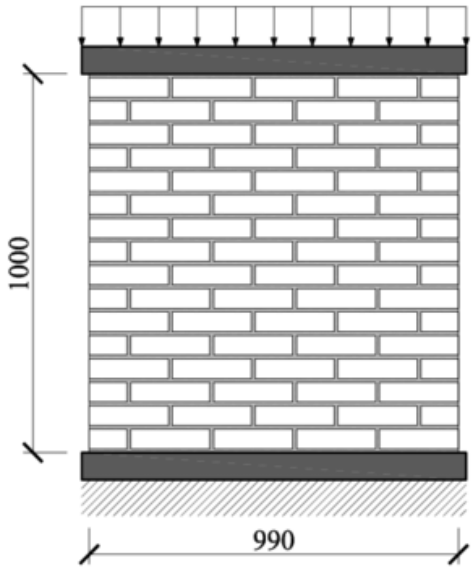
Yığma duvar makro model analiz sonucu Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2 Haider Yığma Duvarı Yük-Yer Değiştirme Grafiği

5.2 Sayısal Çalışma No.2

Raijmakers ve Velmertfoort [83] tarafından deneylerinin yapıldığı Eindhoven yığma duvarı (Şekil 5.3), yine parametrik çalışmada önerilen parametreler gereği doğrusal olmayan makro model sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Duvar, yatay ve düşey yükler altında yer değiştirme kontrolü ($4\ mm$) ile iki boyutlu olarak CDP hasar modelinde simüle edilmiştir. Sonlu elemanlar ağ ebatları $50 \times 50\ mm$ olup, kabuk eleman S4R kullanılmıştır. Duvara $0.30\ MPa$ düşey yük uygulanmıştır. Duvara ait geometrik parametreler Tablo 5.3' de verilmiştir.



Şekil 5.3 Eindhoven Yığma Duvarı

Tablo 5.3 Eindhoven Yığma Duvarı Geometrik Parametreleri

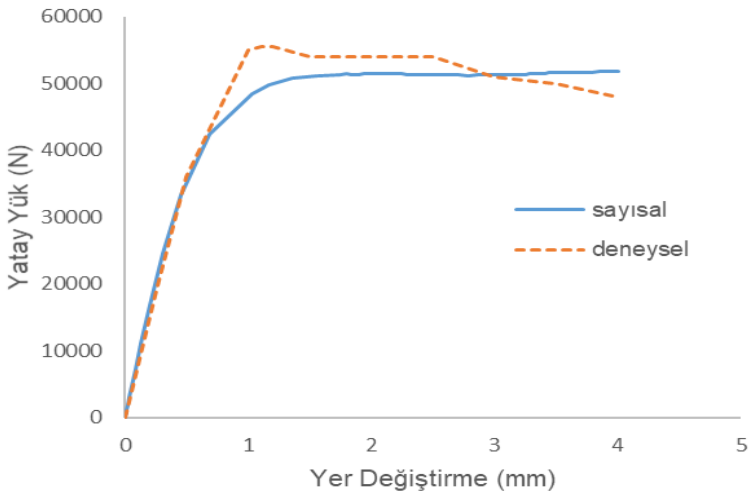
Referans	Deney	Duvar Boyutları (mm)	Tuğla Boyutları (mm)	Harç Boyutları (mm)
Eindhoven [83]	URM	900×1000×100	210×52×100	10

Yığma duvarın homojenizasyonunda, elastisite modülü ve poisson oranı Brencich vd. [60] tarafından önerilen bağımsız yüzeylerin kombinasyon formülü kullanılarak belirlenmiştir. Yığma duvar panelinin basınç dayanımı Raijmakers ve Velmertfoort [83] tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır. Malzeme parametreleri Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4 Eindhoven Yığma Duvarı Malzeme Parametreleri

Parametre	**Değer**
Elastisite Modülü	5000 MPa
Poisson Oranı	0.15
fm'	16 MPa
Genleşme Açısı	40°
Viskozite	0.004

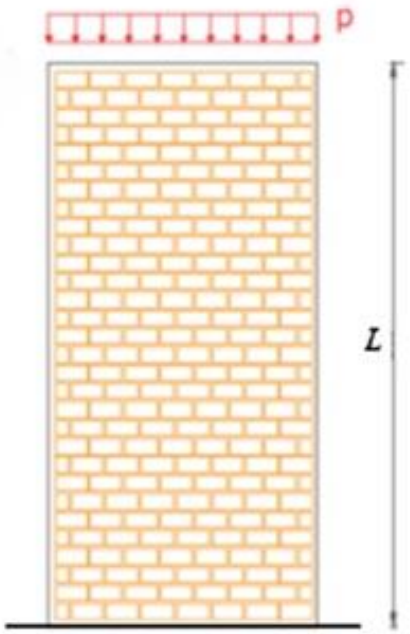
Yığma duvar makro model analiz sonucu Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4 Eindhoven Yığma Duvarı Yük-Yer Değiştirme Grafiği

5.3 Sayısal Çalışma No.3

Addessi vd. [84] tarafından yapılan çalışmada, kil tuğla ve harçla oluşturulan yığma duvar panelleri (Şekil 5.5) üzerinde bir dizi deneyler gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışma kapsamında önerilen genleşme açısı ve viskozite değerleri göz önüne alınarak, bu panellerden donatısız yığma duvarın (URM) doğrusal olmayan makro model sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Duvar, yatay ve düşey yükler altında yer değiştirme kontrolü (13 mm) ile iki boyutlu olarak CDP hasar modelinde simüle edilmiştir. Duvarın boyutları $1000 \times 2000 \times 250\ mm$ dir. Sonlu elemanlar ağ ebatları $200 \times 200\ mm$ olup, kabuk eleman S4R kullanılmıştır. Duvara 0.60 MPa düşey yük uygulanmıştır.



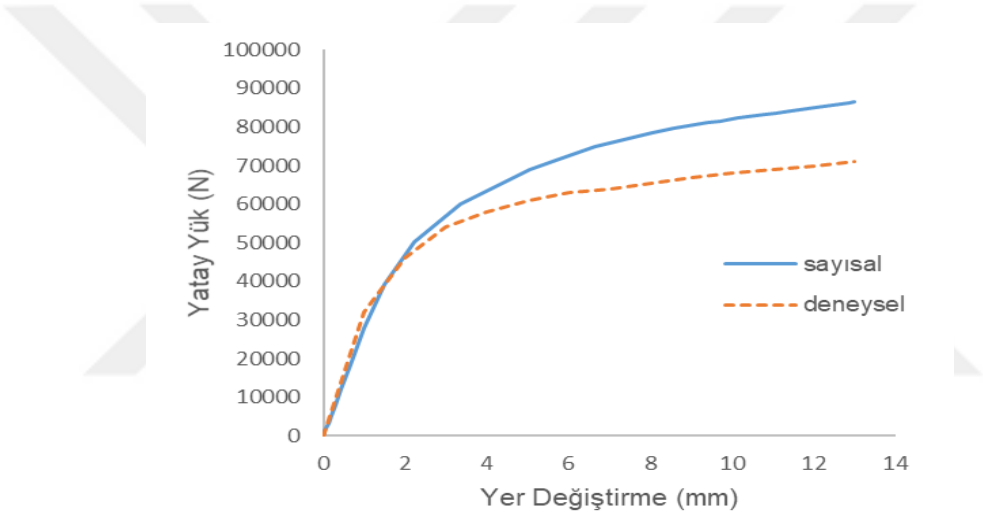
Şekil 5.5 Addessi Yığma Duvarı [84]

Yığma duvarın sayısal analizi homojenizasyonunda, elastisite modülü Kaushik vd. [35] tarafından önerilen formül kullanılarak belirlenmiştir. Panelin basınç dayanımı ve poisson oranı deneysel çalışmadan alınmıştır. Malzeme parametreleri Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.5 Addessi Yığma Duvarı Malzeme Parametreleri

Parametre	**Değer**
Elastisite Modülü	3400 MPa
Poisson Oranı	0.20
fm'	6.2 MPa
Genleşme Açısı	40°
Viskozite	0.004

Yığma duvar makro model analiz sonucu Şekil 5.6'te verilmiştir.



Şekil 5.6 Addessi Yığma Duvarı Yük-Yer Değiştirme Grafiği

6
Sonuç ve Öneriler

Yığma yapılar, dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de özellikle kırsal bölgelerin tercihi olarak halen inşa edilmektedir. Geçmişten günümüze bir kültürel aktarım sağlayan yığma yapılar, tarihsel açıdan çok önemli bir işleve sahiptir. Aynı zamanda kültürel mirasın yanında yapısal bir mirası da beraberinde getirirler. Bina stoğunun büyük bir kısmını temsil etmesi itibariyle yığma yapıların davranışının mühendislik açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle yatay ve düşey yükler altında davranışının incelenmesi malzeme parametrelerinin belirsiz olması nedeniyle karmaşıktır. Bu karmaşıklığın giderilmesi açısından yapılan akademik çalışmalar yetersiz kalmaktadır. Deneysel ve sayısal çalışmaların sayısı artırılarak, yeni yaklaşım, varsayım ve önerilerin yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda, yığma yapıların doğrusal olmayan davranışının anlaşılabilmesi için deneysel çalışmaların yanında sayısal modelleme yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, CDP elastoplastik hasar modeli parametrelerinin düşey ve tek doğrultuda artan yatay yük altında donatısız yığma duvar davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen parametrik ve sayısal çalışmaya bağlı olarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- CDP elastoplastik hasar modeli betonarme elemanlara olduğu kadar yığma duvarlar için de uygun sonuçlar vermektedir.
- Donatısız yığma duvarlarda, genleşme açısı ve viskozite parametreleri sırasıyla **40°** ve **0.004** alınabilir.
- Literatürde CDP parametreleri üzerine birçok çalışma olmasına rağmen, söz konusu parametrelerin optimize edilmesi için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Kaynakça

[1] Lourenco P., (1996). Computational strategies for masonry structures (PhD. Thesis), Delft University of Technology, The Netherlands.

[2] Pelà, L., Cervera, M., & Roca, P. (2013). An orthotropic damage model for the analysis of masonry structures. Construction and Building Materials, 41, 957-967.

[3] Medeiros, P., Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., & Gouveia, J. (2013). Numerical modelling of non-confined and confined masonry walls. Construction and Building Materials, 41, 968-976.

[4] Dhanasekar, M., & Haider, W. (2008). Explicit finite element analysis of lightly reinforced masonry shear walls. Computers & structures, 86(1-2), 15-26.

[5] Pegon, P., & Anthoine, A. (1997). Numerical strategies for solving continuum damage problems with softening: application to the homogenization of masonry. Computers & structures, 64(1-4), 623-642.

[6] Lourenço, P. B., Rots, J. G., & Blaauwendraad, J. (1998). Continuum model for masonry: parameter estimation and validation. Journal of structural engineering, 124(6), 642-652.

[7] Calderini, C., & Lagomarsino, S. (2008). Continuum model for in-plane anisotropic inelastic behavior of masonry. Journal of structural engineering, 134(2), 209-220.

[8] Penna, A., Lagomarsino, S., & Galasco, A. (2014). A nonlinear macroelement model for the seismic analysis of masonry buildings. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 43(2), 159-179.

[9] Koksal, H.O, Doran, B., Kuruscu, A.O., Kocak, A., "Elastoplastic Finite Element Analysis of Masonry Shear Walls", Korean Society of Civil Engineers (KSCE). 20(2), 784-791 (2016) DOI:10.1007/s12205-015-0393-1

[10] Page, A. W. (1978). Finite element model for masonry. Journal of the Structural Division, 104(8), 1267-1285.

[11] Anthoine, A., & Pegon, P. (1996). Numerical analysis and modelling of the damage and softening of brick masonry. In Numerical Analysis and Modelling of Composite Materials (pp. 152-184). Springer, Dordrecht.

[12] Lotfi, H. R., & Shing, P. B. (1994). Interface model applied to fracture of masonry structures. Journal of structural engineering, 120(1), 63-80.

[13] Gambarotta, L., & Lagomarsino, S. (1997). Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. Part I: the mortar joint model and its applications. Earthquake engineering & structural dynamics, 26(4), 423-439.

[14] Lourenço, P. B., & Rots, J. G. (1997). Multisurface interface model for analysis of masonry structures. Journal of engineering mechanics, 123(7), 660-668.

[15] Koksal, H.O, Jafarov, O, Doran, B., Aktan, S., Karakoç, C., "Computational material modeling of masonry walls strengthened with fiber reinforced polymers", Technopress, Structural Engineering and Mechanics. 48(5), 737-755 (2013).

[16] Doran, B., Koksal, H.O., Aktan, S., Ulukaya, S., Oktay, D., Yuzer, N., "In-Plane Shear Behavior of Traditional Masonry Walls", International Journal of Architectural Heritage. 11(2), 278–291 (2017) DOI: 10.1080/15583058.2016.1207114

[17] Bilge Doran, Nabi Yuzer, Selen Aktan, Didem Oktay and Serhan Ulukaya, "Numerical Modeling of Traditional Masonry Walls Strengthened with Grout Injection", International Journal of Architectural Heritage, vol.13, pp.1-16, 2019

[18] Doran, B., Koksal, H.O., and Akbas, B., "Strengthening R/C and Masonry Structures with Fiber Reinforced Polymers in Disaster Areas", NATO Advanced Research Workshop "Engaging the Public to Fight the Consequences of Terrorism and Disasters," Tbilisi, Georgia, 02 June - 04 June 2014

[19] Bilge Doran, Hasan Orhun Köksal, Selen Aktan, Oktay Jafarov, Cengiz Karakoç, "Constitutive modeling of masonry walls strengthened with fiber reinforced polymers", New Trends in Structural Engineering, IntechOpen, 2018. Editor: Hakan Yalçıner, Ehsan Noroozinejad Farsangi.

[20] ABAQUS, Theory Manual, Version 6.14, Documentation, Dassault Systemes Simulia Corporation.

[21] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., & Oñate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. International Journal of solids and structures, 25(3), 299-326.

[22] Lee, J., & Fenves, G. L. (1998). Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. Journal of engineering mechanics, 124(8), 892-900.

[23] Valente, M., & Milani, G. (2019). Damage assessment and collapse investigation of three historical masonry palaces under seismic actions. Engineering Failure Analysis, 98, 10-37.

[24] Valente, M., & Milani, G. (2018). Damage assessment and partial failure mechanisms activation of historical masonry churches under seismic actions: three case studies in Mantua. Engineering Failure Analysis, 92, 495-519.

[25] Agnihotri, P., Singhal, V., & Rai, D. C. (2013). Effect of in-plane damage on out-of-plane strength of unreinforced masonry walls. Engineering Structures, 57, 1-11.

[26] Minaie, E., Moon, F. L., & Hamid, A. A. (2014). Nonlinear finite element modeling of reinforced masonry shear walls for bidirectional loading response. Finite Elements in Analysis and Design, 84, 44-53.

[27] Valente, M., & Milani, G. (2016). Non-linear dynamic and static analyses on eight historical masonry towers in the North-East of Italy. Engineering Structures, 114, 241-270.

[28] Akbarzadeh, A. A., & Tasnimi, A. A. (2010). Nonlinear analysis and modeling of unreinforced masonry shear walls based on plastic damage model. Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 11(4), 189-203.

[29] Hany, N. F., Hantouche, E. G., & Harajli, M. H. (2016). Finite element modeling of FRP-confined concrete using modified concrete damaged plasticity. Engineering Structures, 125, 1-14.

[30] Szczecina, M., & Winnicki, A. (2015). Numerical simulations of corners in RC frames using Strut-and-Tie Method and CDP model. In COMPLAS XIII: proceedings of the XIII International Conference on Computational Plasticity: fundamentals and applications (pp. 608-619). CIMNE.

[31] Szczecina, M., & Winnicki, A. (2016). Selected aspects of computer modeling of reinforced concrete structures. Archives of Civil Engineering, 62(1), 51-64.

[32] Jankowiak, T., & Lodygowski, T. (2005). Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. Foundations of civil and environmental engineering, 6(1), 53-69.

[33] Michał, S., & Andrzej, W. (2015). Calibration of the CDP model parameters in Abaqus. In The 2015 World Congress on Advanced in Structural Engineering and Mechanics.

[34] Raza, A., & Ahmad, A. (2019). Numerical investigation of load-carrying capacity of GFRP-reinforced rectangular concrete members using CDP model in ABAQUS. Advances in Civil Engineering, 2019.

[35] Kaushik, H.B., & Rai, D.C., & Jain, S.K. (2007). Stress-Strain Characterists of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression'' Journal of Materials in Civil Engineering. DOI 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728)

[36] Andreaus, U., & Ippoliti, L., (1995). A Comparison Between Experimental and Numerical Results. Computer Methods and Experimental Measurements , p:603-10, Capri, Italya

[37] Begimgil, M., (1990). Aderans Arttırıcı Katkı Maddelerin İki Eksenli Yükleme Altındaki Tuğla Duvarların Kayma Davranışına Etkisi, Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[38] https://www.gninsaat.com.tr/tugla-duvarlar

[39] Şimşek, O., (2003). Yapı Malzemesi. Beta Yayınevi 2. Baskı s: 103-120, İstanbul.

[40] http://nasipinsaat.com.tr/urun/tugla/

[41] TS EN 771-1 (2005)

[42] Bayülke, N., (2013). Yığma Yapılar, Genişletilmiş 3. Baskı TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara.

[43] http://xn--yldrminaat-xubcb16d.com.tr/urun/harman-tugla/

[44] Tuncel, S., (1998). Cephe Kaplama Malzemesi Olarak Tuğlanın Betonarme Karkas Yapı Dış Duvarlarına Uygulanması ve Yağmur Suyu Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[45] Taşlıgil, N., & Şahin, G., (2016). Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Türkiye Doğal Taşlarının İktisadi Coğrafya Odağında Analizi, Marmara Coğrafya Dergisi, Sayı: 33, Ocak-2016, S.607-640.

[46] Karahan, S., D., (2018). Dünyada ve Türkiye'de Doğal Taşlar, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Mart 2018.

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

[48] Sabbioni, C., & Zappia, G., & Ghedini, N., & Riontino, C., (1997). Sulphur and Carbon Compounds on Damaged Mortars in Ancient Masonry, 4th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterrian, 1, Rodos.

[49] Kaya, Ç., (2010). Yığma Duvarların Elastik-Plastik Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[50] https://theconstructor.org/building/types-mortar-masonry/12396/

[51] Bayülke, N., (2011). Yığma Yapıların Deprem Davranışı ve Güvenliği, 1.Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim, ODTÜ, Ankara.

[52] Özgen, Ö., (2012). Horasan Harcı Üzerine Deneysel Çalışmalar, Uzmanlık Tezi, Kültür ve Turizm Bakanlığı İstanbul Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü, İstanbul.

[53] https://twitter.com/seda_ozen/status/1068511510450921472

[54] Bennett, R.M., & Boyd K.A., & Flanagan R.D., (1997). Compressive Proporties of Structural Clay Tile Prism, Journal of Structural Enginnering, 123 (7), 920-926.

[55] European Committee of Standardization CEN(1996). Design of Masonry Structures. Part 1-1: General Rules for Buildings – Reinforced and Unreinforced Masonry. ENV 1996 1-1, Eurocode 6, Brussels, Belgium.

[56] TBDY (2018)

[57] Köksal, H.O., & Köksal, E., & Yıldırım, H., (2004). Eksenel Basınç Altında Beton Briket Yığma Prizmaların Sonlu Elemanlar Analizi, İMO Teknik Dergi, 3249-3265, Yazı 218.

[58] Paulay. T., & Priestly M.J.N., (1992). Seısmıc Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, A Wiley Interscıence Publıcation, p: 113.

[59] Köksal, H.O., & Doran, B., & Turgay, T., (2009). A Practical Approach for Modelling FRP Wrapped Concrete Columns, Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 3, P: 1429-1437.

[60] Brencich, A., & Corradi, C., & Gambarotta, L., & Mantegazza G., & Sterpi E., (2005). 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.

[61] TS-500 (2000.)

[62] Demir, C., (2019). Makine Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Ders Notları.

[63] https://www.slideshare.net/alfonso.cubillos/ansys1

[64] Fish, J., & Belytschko, T., (2007). A First Course in Finite Elements, John Wiley & Sons, Chichester, England, 1-9.

[65] Aydoğan, M., (2014). Yapı Sistemlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Betonarme Yapılar Bilim Dalı Ders Notları.

[66] Lourenço P.B., (2002). Computations on Historic Masonry Structures, University of Minho, Portugal, Prog. Struct. Engng Mater, 4:301-319.

[67] Köksal, E., & Köksal, T., (1996). Çubuk Plak Kabuk Stabilitesi, YTÜ Matbaası, Yayın No:339, İstanbul.

[68] Chen, W., F., & Mizuno, E., (1990). Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier Science Publishers B.V, p:661.

[69] Ural, A., (2009). Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

[70] Kupfer, H., & Hilsdorf, H. K., & Rusch, H. (1969). Behavior of concrete under biaxial stresses. In Journal Proceedings (Vol. 66, No. 8, pp. 656-666).

[71] Page, A. W. (1981). The biaxial compressive strength of brick masonry. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 71(3), 893-906.

[72] Wu, J. Y., & Li, J., & Faria, R. (2006). An energy release rate-based plastic-damage model for concrete. International Journal of Solids and Structures, 43(3-4), 583-612.

[73] Voyiadjis, G. Z., & Taqieddin, Z. N. (2009). Elastic plastic and damage model for concrete materials: Part I-theoretical formulation. The International Journal of Structural Changes in Solids, 1(1), 31-59.

[74] Van der Pluijim, R. [1993] "Shear behaviour of bed joints," Proc. of 6th North American Masonry Conference, Philadelphia, PA, pp. 125–136.

[75] Michał, S., & Andrzej, W. (2018). Analysis of "D" regions of RC structures based on example of frame corners. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1922, No. 1, p. 130002). AIP Publishing.

[76] Can, H., & Ünay, A.İ., (2012). Tarihi Yapıların Deprem Davranışını Belirlemek için Sayısal Analiz Yöntemleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(1): 211-217.

[77] Drougkas, A., (2015). Derivation of the Properties of Masonry through Micro-modelling Techniques, PhD Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona

[78] Lourenço, P.B., (1998). Experimental and Numerical Issues in The Modelling of the Mechanical Behaviour of Masonry, Structural Analysis of Historical Constructions II, Barcelona.

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

[80] Casolo, S., & Milani, G., (2009). A Simplified Homogenization-Discrete Element Model fort he Non-Linear Static Analysis of Masonry Walls Out-of-Plane Loaded, Engineering Structures, 32(2010) 2352-2366.

[81] Stratford, T., & Pascale, G., & Manfroni, O., & Bonfiglioli, B. (2004). Shear Strengthening Masonry Panels with Sheet Glass-Fiber Reinforced Polymer. Journal of Composites for Construction, 8(5), 434-443.

[82] W. Haider (2007) '' Inplane Response of Wide Spaced Reinforced Masonry Shear Walls, Central Queensland University, Australia, PhD Thesis.

[83] Vermeltfoorth & Raijmakers TMJ (1992). Deformation Controlled Meso Shear Tests on Masonry Piers, Report B-92-1156 TNO-BOUWrrU Part 2 Draft Report, Building and Construction Research, Eindhoven, The Netherlands.

[84] D. Addessi, A. Mastrandrea, E. Sacco (2014), ''An Equilibrated Macro-Element for Nonlinear Analysis of Masonry Structures'', Engineering Structures.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: bugraciplak19@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. Nonlinear Finite Element Analysis of Unreinforced Masonry Walls, ISMSIT 2019, ID: 126, 11-13 Ekim, Ankara.