

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AĞIRLIK İSTİNAT DUVARLARININ TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Doğukan SEVİNÇ

**HAZİRAN 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AĞIRLIK İSTİNAT DUVARLARININ TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

DOĞUKAN SEVİNÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01 / 06 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 25 / 06 / 2021

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca karşılaştığım problemler ve zorluklarda akılcı ve doğru yaklaşımlarla yol gösteren, destek olan ve her koşulda yardımcı olmaya çalışanlar sayesinde tez çalışmamı bitirmiş durumdayım.

Lisans hayatımda tanıştığım ve yüksek lisans hayatımda da danışman hocam olmayı kabul eden, tez konumu öneren, çalışmalarımda beni destekleyen ve yardımını esirgemeyen, kendisini tanımaktan onur duyduğum Sayın Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU'na teşekkürü borç bilir, saygılarımı sunarım.

Yaptığım araştırmalar sonucunda bir makalesi sayesinde adını öğrendiğim ve Sayın Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU vesilesiyle tanıştığım, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve bilgisiyle bana yol gösteren Sayın Vahid SHOBEIRI'ye teşekkürü borç bilir, saygılarımı sunarım.

Lisans eğitimi ve yüksek lisans eğitimi boyunca yakın arkadaşım olan ve yardımını ve desteğini her zaman hissettiğim Arş. Gör. Aytuğ KUMANDAŞ'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca benimle ilgilenen, bana yol gösteren, bugünlere gelmemi sağlayan, her koşulda ve durumda yanımda olan değerli ailem, babam Yılmaz SEVİNÇ, annem Esin SEVİNÇ, kardeşim Melisa Deniz SEVİNÇ, dedem Kamil YAZICI, anneannem Ayten YAZICI ve yıllardır aileden biri olan hayat arkadaşım Özge OR'a minnet ve şükranlarımı sunar, sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Doğukan SEVİNÇ
Trabzon 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Ağırlık İstinat Duvarlarının Topoloji Optimizasyonu” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarı yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 25.06.2021

Doğukan SEVİNÇ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. İstinat Duvarları	1
1.2.1. İstinat Duvarı Tipleri.....	2
1.2.1.1. Rijit İstinat Duvarları	3
1.2.1.1.1. Ağırlık Tipi İstinat Duvarı	4
1.2.1.1.2. Yarı Ağırlık İstinat Duvarı.....	5
1.2.1.1.3. Konsol İstinat Duvarı	5
1.2.1.1.4. Payandalı İstinat Duvarı.....	5
1.2.1.1.5. Ters Payandalı İstinat Duvarı.....	6
1.2.1.1.6. Eşikli Konsol İstinat Duvarı.....	6
1.2.1.2. Yarı Rijit İstinat Duvarları	6
1.2.1.2.1. Kafes Tipi İstinat Duvarı.....	6
1.2.1.2.2. Sandık Tipi İstinat Duvarı.....	7
1.2.1.2.3. Kazıklı Perde İstinat Duvarı.....	8
1.2.1.2.4. Diyafram İstinat Duvarı	9
1.2.1.3. Esnek İstinat Duvarı	9
1.2.1.3.1. Palplanş Perde	10
1.2.1.3.2. Donatılı Zemin İstinat Duvarları.....	10
1.2.2. İstinat Duvarlarının Kullanım Alanları	11
1.2.3. İstinat Duvarlarına Etkiyen Yanal Toprak Basınçları.....	12
1.2.3.1. Aktif Toprak Basıncı.....	16
1.2.3.2. Pasif Toprak Basıncı	17

1.2.4.	Yanal Toprak Basınç Teorileri.....	18
1.2.4.1.	Rankine Basınç Teorisi	18
1.2.4.2.	Rankine Basınç Teorisiyle Toprak Basınçlarının Hesaplanması	18
1.2.4.3.	Eğimli Dolgu Durumunda Rankine Yöntemi	21
1.2.4.4.	Coulomb Toprak Basıncı Teorisi	21
1.2.4.5.	Coulomb Yöntemi ile Statik Toprak Basınçlarının Hesaplanması	22
1.2.4.6.	Rankine ile Coulomb Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	25
1.2.5.	İstinat Duvarı Drenaj Sistemleri.....	25
1.3.	Optimizasyon	30
1.3.1.	Optimizasyon Probleminin Formüle Edilmesi.....	31
1.3.1.1.	Problemin Tanımlanması	32
1.3.1.2.	Problem ile İlgili Veri Toplanması	32
1.3.1.3.	Tasarım Değişkenlerinin Belirlenmesi ve Tanımlanması	32
1.3.1.4.	Amaç Fonksiyonun Belirlenmesi	33
1.3.1.5.	Kısıtların Belirlenmesi	35
1.3.2.	Optimizasyon İşleminin Matematiksel İfadesi.....	35
1.3.3.	Yapısal Optimizasyon	36
1.4.	Topoloji Optimizasyonu.....	39
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	45
2.1.	Part Modülü.....	45
2.2.	Property Modülü	46
2.3.	Assembly Modülü	47
2.4.	Step Modülü	47
2.5.	Interaction Modülü.....	48
2.6.	Load Modülü	49
2.7.	Mesh Modülü	49
2.8.	Optimization Modülü	50
2.9.	Job Modülü	53
3.	BULGULAR VE İRDELEME	55
3.1.	5x5x5 m İstinat Duvarının Optimizasyonu	55
3.2.	4x4x4 m İstinat Duvarının Optimizasyonu	69
3.3.	3x3x3 m İstinat Duvarının Optimizasyonu	78
3.4.	5x5x5 m İstinat Duvarının Plastik Durum İçin Optimizasyonu	87

4.	SONUÇLAR	94
5.	ÖNERİLER	96
6.	KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans

ÖZET

AĞIRLIK İSTİNAT DUVARLARININ TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Doğukan SEVİNÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU
2021, 98 Sayfa

Bu çalışmada, bir birim ayrıtı 3 m, 4 m ve 5 m olan kare istinat duvarlarına tabanda ankastre mesnet ve x yönünde ötelenmelerine kısıtları konarak, 50 kPa değerinde bir üçgen yayılı yüke maruz bırakılarak elastik ve plastik durum için topoloji optimizasyonu işlemi ABAQUS/CAE programıyla gerçekleştirildi. Elastik durum için optimizasyon işlemi ABAQUS/CAE programı içinde bulunan optimizasyon modülünden gerçekleştirildi. Burada program aracılığıyla konan optimizasyon kriterlerimiz, hedef fonksiyonumuz gerilme enerjisini minimuma indirmek ve belirlenen kısıt ise optimizasyon sonucunda toplam hacmin %30'un altına inmesinin engellenmesidir. Plastik durum için optimizasyon, Phyton dilinde bir kod yazılarak ABAQUS/CAE programı vasıtasıyla çalıştırılmıştır. Gerilme enerjisi düşük parçalar iterasyon sayısına bağlı olarak sistemden çıkarılmıştır. Ortaya çıkan topolojilere bakılarak mantıksal bir çıkarım yapıldığında günümüzde kullanılan istinat duvarları ile ABAQUS/CAE programı sonucunda ortaya çıkan optimum topoğrafyalar büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla, ABAQUS/CAE programı inşaat mühendisliği alanında optimizasyon işlemlerinde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: İstinat Duvarı, Topoloji Optimizasyonu, ABAQUS Komut Dosyası

Master Thesis

SUMMARY

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF GRAVITY RETAINING WALLS

Doğukan SEVİNÇ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU
2021, 98 Pages

In this study, the topology optimization process for the elastic and plastic situation was carried out with the ABAQUS/CAE program by placing a built-in support at the base and restrictions on their offset in the x direction on square retaining walls with a unit edge of 3 m, 4 m and 5 m, subjecting a 50 kPa triangular distributed load. Optimization process for the elastic situation was performed from the optimization module within the ABAQUS/CAE program. Our optimization criteria set through the program, our objective function is to minimize the stress energy and the determined constraint is to prevent the total volume from falling below 30% as a result of optimization. For the plastic situation, the optimization was run through the ABAQUS scripting interface by writing a code in Python language. Parts with low strain energy were removed from the system with iterations. When a logical inference is made by looking at the topologies that have emerged, the retaining walls used today and the optimum topographies resulting from the ABAQUS/CAE program are largely similar. Therefore, ABAQUS / CAE program can be used in optimization processes in the field of civil engineering.

Key Words: Retaining Walls, Topology Optimization, ABAQUS Scripting

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Rijit istinat duvarı tipleri	4
Şekil 1.2.	Kafes tipi duvarlar	7
Şekil 1.3.	Sandık tipi dayanma duvarı	8
Şekil 1.4.	Donatılı zemin duvarlar	11
Şekil 1.5.	İstinat duvarı kullanım alanları	12
Şekil 1.6.	Sükûnetteki toprak basıncı	14
Şekil 1.7.	Aktif toprak basıncı durumu	16
Şekil 1.8.	Pasif toprak basıncı durumu	17
Şekil 1.9.	Kohezyonlu zeminlerde aktif ve pasif basınç dağılımları	20
Şekil 1.10.	Zemin üst yüzeyinin yatay ile " α " açısı yaptığı durum	21
Şekil 1.11.	Aktif durum için Coulomb kama teorisi	22
Şekil 1.12.	Pasif durum için Coulomb kama teorisi	24
Şekil 1.13.	İstinat duvarlarında basit boyuna diren ve eğimli diren	26
Şekil 1.14.	İstinat duvarında barbakan sistemi	26
Şekil 1.15.	Dolgu ve yarmada istinat duvarlarında büzöl drenaj sistemleri	28
Şekil 1.16.	İstinat duvarları arkasında büzöl drenaj sistemi ve duvar arkalarının dolgusunun yapımı	29
Şekil 1.17.	Bir optimizasyonda tasarım süreci	31
Şekil 1.18.	Amaç fonksiyonun minimum ve maksimum noktası	34
Şekil 1.19.	Eşitlik ve eşitsizlik içeren sınır koşullarına ait uygun bölge tanımlamaları	35
Şekil 1.20.	Birleştirilmiş optimizasyon yöntemleri	38
Şekil 1.21.	Ankastre kirişin optimizasyonu	40
Şekil 1.22.	RUAG Uzay için anten destek kolu için tasarım süreci (Khai,L., 2017) ..	41
Şekil 1.23.	Bir kirişin topoloji optimizasyonu	43
Şekil 2.1.	ABAQUS "Create Part" model penceresi	46
Şekil 2.2.	Malzeme özellikleri tanım penceresi	47
Şekil 2.3.	Create step butonu ve menüsü	48
Şekil 2.4.	Create interaction butonu ve menüsü	48

Şekil 2.5.	Create load butonu ve menüsü, create boundary butonu ve menüsü	49
Şekil 2.6.	Seed part butonu ve global seeds menüsü	50
Şekil 2.7.	Create optimization task butonu ve menüsü.....	51
Şekil 2.8.	Create objective function ve objective function manager butonu.....	51
Şekil 2.9.	Create constraint ve constraint manager butonu	52
Şekil 2.10.	Design response manager menüsü ve butonu.....	52
Şekil 2.11.	Create job butonu, job manager butonu ve menüsü	53
Şekil 2.12.	Create optimization process butonu, optimization process manager butonu ve menüsü	54
Şekil 3.1.	Bir birim ayrıtı 3 m, 4 m ve 5 m olan istinat duvarı.....	55
Şekil 3.2.	5x5x5 m olan istinat duvarının genel özellikleri	56
Şekil 3.3.	5x5x5 m olan istinat derinliğin tanımlanması	56
Şekil 3.4.	Özgöl ağırlığın tanımlanması	57
Şekil 3.5.	Elastisite modülü ve poisson oranının tanımlanması	57
Şekil 3.6.	Assembly modülünde montajın yapılması	58
Şekil 3.7.	Genel statik olarak çözüm adımının tanımlanması	58
Şekil 3.8.	Bir ayrıtı 0.5 m olan eş karelere bölünmüş sistem	59
Şekil 3.9.	Sistemde tanımlanan – z yönündeki üçgen yayılı	59
Şekil 3.10.	Ankastre mesnet ve x yönünde ötelenmeyi engelleyici mesnet sistemi....	60
Şekil 3.11.	Hedef fonksiyonu ve kısıt fonksiyonun tanımlanması	60
Şekil 3.12.	5x5x5 m kare sistemin statik analiz sonucu	61
Şekil 3.13.	5x5x5 m model on iterasyonluk optimum sistem	61
Şekil 3.14.	5x5x5 m model arkadan görünüş y-x eksenini.....	62
Şekil 3.15.	5x5x5 m model y-z eksenini.....	62
Şekil 3.16.	5x5x5 m model on yedi iterasyonluk optimum sistem	63
Şekil 3.17.	5x5x5 m model on yedi iterasyonluk sistemde taban bozulumu	63
Şekil 3.18.	5x5x5 m model yirmi iki iterasyonluk optimum sistem	64
Şekil 3.19.	5x5x5 m model yirmi iki iterasyonluk optimum sistem y-z eksenini	64
Şekil 3.20.	5x5x5 m model yirmi iki iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini	65
Şekil 3.21.	5x5x5 m model otuz iterasyonluk optimum sistem	65
Şekil 3.22.	5x5x5 m model otuz iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini	66
Şekil 3.23.	5x5x5 m model kırk iterasyonluk optimum sistem	66
Şekil 3.24.	5x5x5 m model kırk iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini	67

Şekil 3.25.	5x5x5 m model elli iterasyonluk optimum sistem	67
Şekil 3.26.	5x5x5 m model elli iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini.....	68
Şekil 3.27.	5x5x5 m model elli iterasyonluk optimum sistem toplam değişim.....	68
Şekil 3.28.	4x4x4 m kare sistemin statik analiz sonucu	69
Şekil 3.29.	4x4x4 m model on iterasyonluk optimum sistem	69
Şekil 3.30.	4x4x4 m model arkadan görünüş y-x eksenini.....	70
Şekil 3.31.	4x4x4 m model y-z eksenini.....	71
Şekil 3.32.	4x4x4 m model on sekiz iterasyonluk optimum sistem	71
Şekil 3.33.	4x4x4 m model on sekiz iterasyonluk sistemde taban bozulumu	72
Şekil 3.34.	4x4x4 m model yirmi üç iterasyonluk optimum sistem	72
Şekil 3.35.	4x4x4 m model yirmi üç iterasyonluk optimum sistem y-z eksenini.....	73
Şekil 3.36.	4x4x4 m model yirmi üç iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini	73
Şekil 3.37.	4x4x4 m model yirmi üç iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini	74
Şekil 3.38.	4x4x4 m model otuz iterasyonluk optimum sistem	74
Şekil 3.39.	4x4x4 m model otuz iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini.....	75
Şekil 3.40.	4x4x4 m model kırk iterasyonluk optimum sistem	75
Şekil 3.41.	4x4x4 m model kırk iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini	76
Şekil 3.42.	4x4x4 m model elli iterasyonluk optimum sistem	76
Şekil 3.43.	4x4x4 m model elli iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini.....	77
Şekil 3.44.	4x4x4 m model elli iterasyonluk optimum sistem toplam değişim.....	77
Şekil 3.45.	3x3x3 m kare sistemin statik analiz sonucu	78
Şekil 3.46.	3x3x3 m model on iterasyonluk optimum sistem	78
Şekil 3.47.	3x3x3 m model arkadan görünüş y-x eksenini.....	79
Şekil 3.48.	3x3x3 m model y-z eksenini.....	80
Şekil 3.49.	3x3x3 m model on dokuz iterasyonluk optimum sistem.....	80
Şekil 3.50.	3x3x3 m model on dokuz iterasyonluk sistemde taban bozulumu.....	81
Şekil 3.51.	3x3x3 m model yirmi dört iterasyonluk optimum sistem	81
Şekil 3.52.	3x3x3 m model yirmi dört iterasyonluk optimum sistem y-z eksenini	82
Şekil 3.53.	3x3x3 m yirmi dört iterasyonluk optimum sistem arkadan görünüş.....	82
Şekil 3.54.	3x3x3 m model yirmi dört iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini.....	83
Şekil 3.55.	3x3x3 m model otuz iterasyonluk optimum sistem	83
Şekil 3.56.	3x3x3 m model otuz iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini	84
Şekil 3.57.	3x3x3 m model kırk iterasyonluk optimum sistem	84

Şekil 3.58.	3x3x3 m model kırk iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini	85
Şekil 3.59.	3x3x3 m model elli iterasyonluk optimum sistem	85
Şekil 3.60.	3x3x3 m model elli iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini.....	86
Şekil 3.61.	3x3x3 m model elli iterasyonluk optimum sistem toplam değişim.....	86
Şekil 3.62.	5x5x5 m plastik model on iterasyonluk optimum sistem.....	88
Şekil 3.63.	5x5x5 m on iterasyonluk plastik model arkadan görünüş y-x eksenini	88
Şekil 3.64.	5x5x5 m on iterasyonluk plastik model y-z eksenini	89
Şekil 3.65.	5x5x5 m plastik model yirmi iterasyonluk optimal sistem	89
Şekil 3.66.	5x5x5 m yirmi iterasyonluk plastik model y-z eksenini	90
Şekil 3.67.	5x5x5 m yirmi iterasyonluk plastik model y-x eksenini	90
Şekil 3.68.	5x5x5 m plastik model yirmi altı iterasyonluk optimal sistem	91
Şekil 3.69.	5x5x5 m yirmi altı iterasyonluk plastik model y-z eksenini	91
Şekil 3.70.	5x5x5 m yirmi altı iterasyonluk plastik model y-x eksenini	92
Şekil 3.71.	5x5x5 m yirmi yedi iterasyonluk plastik model optimal sistem	92
Şekil 3.72.	5x5x5 m yirmi yedi iterasyonluk plastik model arkadan görünüş	93
Şekil 3.73.	5x5x5 m plastik model yirmi altı iterasyonluk optimum sistem toplam değişim	93

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1	Aktif toprak basıncının oluşması için gereken tipik yer değiştirmeler (Das, 2013)	16
Tablo 1.2.	Pasif toprak basıncının oluşması için gereken tipik yer değiştirmeler (Das, 2013)	17
Tablo 3.1.	BS20 beton sınıfı için malzeme özellikleri	87



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AKO	: Aşırı konsolidasyon oranı
CAD	: Computer-aided design
CAE	: Computer-aided engineering
c	: Zeminin sahip olduğu kohezyondur
cm	: Santimetre
kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
kPa	: Kilopascal
K_{as}	: Statik aktif toprak basıncı kat sayısı
K_{ps}	: Statik pasif toprak basıncı kat sayısıdır
K_0	: Sükûnet durumundaki yanal toprak basıncı katsayısı
m	: Metre
m^2	: Metrekare
mm	: milimetre
q	: Sürşarj yükü
P_a	: AB düzlemi boyunca etkiyen aktif bileşke kuvvet
P_{as}	: Minumum şartlardaki aktif durum
P_p	: AB düzlemi boyunca etkiyen pasif bileşke kuvvet
P_{ps}	: Maksimum şartlardaki pasif durum
PI	: Zeminin plastisite indisi
R	: BC kayma düzlemi boyunca etkiyen bileşke kuvveti
u	: Hidrostatik su basıncı
W	: ABC kamasının kendi ağırlığı
z	: Duvar arkası zemin yüzünden derinlik
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
δ	: Duvar ile zemin arasındaki sürtünme açısı
σ_h	: Yanal gerilme
σ_v	: Düşey gerilme
ϕ	: Zeminin kayma mukavemeti açısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Eğik yüzeyler ile sınırlanmış zeminler, kendi ağırlıkları ve çeşitli durumlarda dış kuvvetler etkisinde düşey doğrultuda harekete zorlanırlar. Şevleri zorlayan başlıca kuvvetler zemin üzerindeki ağırlıklar, deprem gibi sismik kuvvetler, yer altı ve yer üstü sularının hareketi sonucu oluşan kuvvetleri örnek gösterebiliriz.

İnşaat mühendisliğinde kaymaya çalışan zeminlerin kaymasına engel olmak amacıyla istinat (dayanma) yapılarının kullanılması gerekir. Bu çalışmamızda istinat duvarlarını inceleyeceğiz.

İstinat duvarları, farklı kotlardaki iki zeminin toprak yüzeyini tutmaya yarayan ve zemin ağırlığından kaynaklanan yanal toprak basıncını, talep edilen bir güvenlik ile karşılayan mühendislik yapılarıdır.

Genel olarak istinat duvarları rijit, yarı rijit, esnek şekilde sınıflandırılabilir. Başlıca örneklerini; ağırlık, yarı ağırlık, payandalı, ters payandalı, konsol, kafes ve sandık tipi duvar olarak kabul edebiliriz. İstinat duvarları yaygın olarak kullanıldığı için olası bir afet durumunda ağır hasarlara sebebiyet verebilir. Bu sebepten ötürü özellikle deprem bölgelerinde tasarım kriterlerini doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir. Ayrıca mühendislik yapılarının ekonomik olarak tasarlanması da gerekmektedir.

İstinat duvarlarını minimum maliyet ile tüm koşullar göz önünde tutularak tasarımı yapılmalıdır. Burada bahsettiğimiz şartlar göz önüne alarak bir tasarım düşünüldüğünde karşımıza çıkan durumun aslında bir optimizasyon problemi olduğunu anlayabiliriz. Biz de bu çalışmamızda istinat duvarlarına Abaqus programı yardımıyla topoloji optimizasyon ilkelerini benimseyerek optimizasyon işlemleri gerçekleştirdik.

1.2. İstinat Duvarları

Kazı çalışmaları veya topoğrafik sebepler ile kot seviyeleri farklı zemin yüzeyleri arasında bariz geçişler oluşmaktadır. Farklı kotlara sahip zemin yüzeyleri arasında denge sağlamak amacıyla geçiş yüzeyine uygun açılar verilerek bu geçişler yapılmaktadır.

Ama bu tarz bir çözüm yolu izlenmesine inşaat alanının yetersizliği ve zeminin türü engel olabilmektedir. Bu nedenle, eğimli olan arazilerden fayda sağlamak amacıyla zemin daha dik tutulmak istenmektedir. Farklı kotlara sahip zemin yüzeyini tutmayı sağlayan istinat yapılarına bu ve bunun gibi olaylarda ihtiyaç duyulmaktadır.

Yarma, derin kazı ve yüksek seddelerde herhangi bir dayanma yapısına ihtiyaç duyulup, duyulmadığı aşağıda verilen parametrelere bağlıdır;

- Jeolojik durum,
- Yer altı su seviyesi,
- Hafriyat malzemesinin dolguda kullanılabilmesi,
- Ulaşım olanakları ve iş makinelerinin konumu,
- Mevcut yapılar ve yer altı tesislerinin konumu,
- Kullanılacak alanın büyüklüğü.

Yukarıdaki parametrelere bağlı olarak nasıl bir çözüm yolu izleneceği sadece projenin ilk adımıdır.

1.2.1. İstinat Duvarı Tipleri

İstinat duvarının kullanılması kadar, hangi tip istinat duvarının seçileceği de oldukça önemlidir. Çünkü istinat duvarının seçimi gerekli dayanımın sağlaması, ekonomik olması gibi faktörleri ayarlamak için yapılır. Belirli bir proje için istinat duvarının seçiminde dikkate alınması gereken faktörler şunlardır:

- Hafriyat durumunun yarma ya da dolgu olması
- İstinat duvarının boyutu
- İstinat duvarının ortalama yüksekliği
- Temel koşulları (temelin derin ya da sığ olması)
- Seçilmiş dolgu malzemesinin mevcudiyeti ve maliyeti
- Geçici kazı sistemlerine ihtiyaç
- İnşaat sırasında trafiğin durumu
- Estetik

Şev eğimini ya da yüksekliğini değiştirerek şev problemi çözüme ulaşmadığı durumlarda ise, aşağıdaki üç parametre göz önüne alınarak istinat duvarının türüne karar verilmektedir:

- İstinat duvarının ömrü,
- İstinat duvarı için ayrılacak alan,
- İzin verilen maksimum deformasyon.

Yer altı tesislerinin ve dayanma duvarı civarında yer alan yapıların zarar görmemesi için, istinat yapısının deformasyonlarını düşük seviyede tutulması ve en önemli özellik olarak rijit olmalıdır. Başka bir taraftan da sistem seçiminde dayanma yapısının geçici ya da kalıcı olması önemli bir etkindir.

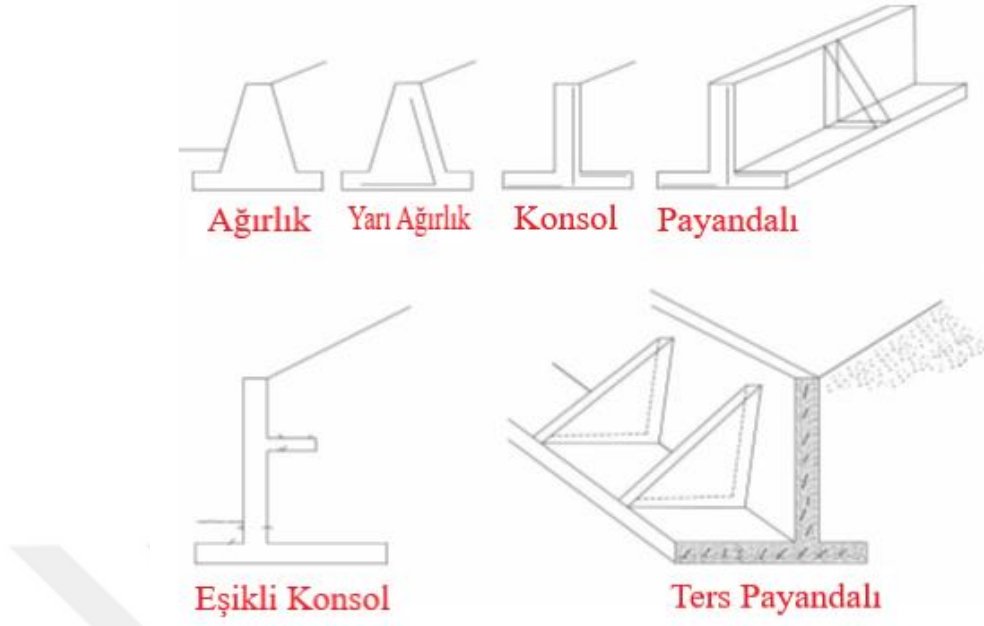
Dayanma yapısının sürekli olması durumunda kullanılacak olan malzemenin karakteristikleri ve malzemelerin boyutları bu amaca uygun olarak belirlenmelidir. TS 7944 (1990)'e göre istinat duvarları başlıca rijit, yarı rijit ve esnek olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir.

1.2.1.1. Rijit İstinat Duvarları

Geçmişten günümüze kadar en eski istinat duvarı tipi olarak adlandırılan rijit istinat duvarları günümüzde en çok tercih edilen istinat duvarlarından biridir. Zemin itkisi ile alt uçlarında bir miktar dönme yapabileceği ihtimali ile hesaplanan, yanal basınç kuvvetlerini kendi ağırlıkları ile dengelemeye çalışan, eğilme rijitlikleri perdelerine göre daha büyük olan çok az deformasyon yapan yapı elemanlarıdır.

Yanal itkiler altında, taban da kayma ve/veya devrilme, arkasındaki zemin ile birlikte toptan göçme gibi yapısal davranışlar gösterebilirler.

Şekil 1.1'de görüldüğü gibi rijit istinat duvarları ağırlık, yarı ağırlık, konsol, payandalı eşikli konsol ve ters payandalı olmak üzere altı ana başlık altında incelenebilir.



Şekil 1.1. Rijit istinat duvarı tipleri

1.2.1.1.1. Ağırlık Tipi İstinat Duvarı

En eski, en çok tercih edilen ve tasarımı en kolay yapılan istinat duvarı ağırlık tipi istinat duvarıdır. Bu tip duvarlar betondan ya da kagir olarak üretilebilmektedir. Kendi ağırlıkları ve kalınlıkları sayesinde bu tarz imal edilmiş istinat duvarları stabilitesini sağlamaktadırlar.

Eğilme etkilerini ortadan kaldırmak için yeterince kalın olarak üretilirler. Ağırlık duvarlarının hareketi, rijit blok ötelenmesi ve/veya dönmesi şeklinde olabilmektedir. Bu gruba dahil olan duvarlarda, duvar yüksekliği arttırıldığında toprak basıncında artış meydana gelir. Bu durumun sorun teşkil etmemesi için duvar ağırlığının da arttırılması şarttır. Bu artış sonucunda büyük miktarda malzeme kullanımı ve çok büyük taban genişliğine neden olduğu takdirde bu tip duvarların 4-4.5 m'den daha yüksek yapılması ekonomik açıdan tercih edilmez.

Aşırı çekme kuvvetlerini karşılamak amacıyla ağırlık dayanma duvarlarının kritik bölgelerine (gövdenin temele bağlandığı noktalar vb.) donatı yerleştirilebilmektedir.

Bu şekilde donatı yerleştirilerek tasarlanan istinat duvarlarına ise yarı ağırlık istinat duvarları denilmektedir.

1.2.1.1.2. Yarı Ağırlık İstinat Duvarı

Yarı ağırlık dayanama duvarları bilinen en eski yapılardandır. Betondan ya da kaya parçalarının harçla birleştirilmesiyle inşa edilirler. Genelde beton malzeme miktarını ya da kaya parça miktarını azaltmak amacıyla çekme gerilmelerinin olduğu gövdenin temele bağlandığı kısımlara çelik donatı yerleştirilir.

Ağırlık tipi dayanma duvarlarının olumsuz özelliklerinden biri de dolguda meydana gelen yer altı suyunun yeterli düzeyde kurutulmamasıdır. 4.5 m yüksekliğe kadar ekonomiktirler.

1.2.1.1.3. Konsol İstinat Duvarı

Konsol dayanma duvarları betonun basıncı ve donatının çekme dayanımı nedeni ile narin yapılardır. Bu özelliklerine rağmen 20 m yükseklikte imal edilebilirler. Ama ekonomik maksimum yükseklikleri ise 7,5 m civarlarındadır. Bu tip dayanma duvarlarında topuk arkasındaki temel uzun tutularak üzerine bulunan toprağın itkisinden faydalanılmaktadırlar.

Toprak itkisi karşı koyan kuvvetlerin yetersiz kaldığı durumlarda duvarı öne doğru hareket ettirebilir. Buna engel olmak amacıyla pasif direncin arttırılması için temele dış yapılmalıdır.

1.2.1.1.4. Payandalı İstinat Duvarı

Konsol dayanma duvarlarında zemin basıncının fazla olması ve konsolun yüksek olması durumunda taban plağıyla konsolu bağlayan payandalara ihtiyaç vardır. Kesme kuvvetlerinin ve eğilme momentlerinin karşılanmasında payandalar büyük bir rol oynar.

Ayakta veya topukta bulunmasına göre payandalar farklı görev yaparlar. Topukta bulunması durumunda çekmeye çalışan payandalar, ayakta bulunması durumunda ise basınca çalışmaktadırlar. Payandalı istinat duvarları 8-12 m arasında üretildiği takdirde ekonomik olmaktadır.

1.2.1.1.5. Ters Payandalı İstinat Duvarı

Ters payandalı istinat duvarları, payandaların ön tarafta bir engel oluşturmadığı durumlarda kullanılmaktadırlar. Payanda basınca çalıştığında bu duvar tipinin kullanılması temeldeki beton miktarında önemli tasarruf sağlamaktadır. Ancak düşey toprak yükü az olan topuk üzerine etki gösterdiğinden duvar stabilitesine katkısı çok daha az olmaktadır.

1.2.1.1.6. Eşikli Konsol İstinat Duvarı

Temel birleşimindeki maksimum momentin bir ya da iki eşiğe gelecek düşey toprak yükünden kaynaklanan ters yöndeki momentlerle karşılanması eşikli konsol istinat dayanma duvarındaki temel amaçtır. Eşikler duvar sırtına bir veya birkaç sıra ile tabana paralel üretilmektedirler. Eşik sayısı, konumu ve genişliği çeşitli deneme hesapları ile belirlenir.

1.2.1.2. Yarı Rijit İstinat Duvarları

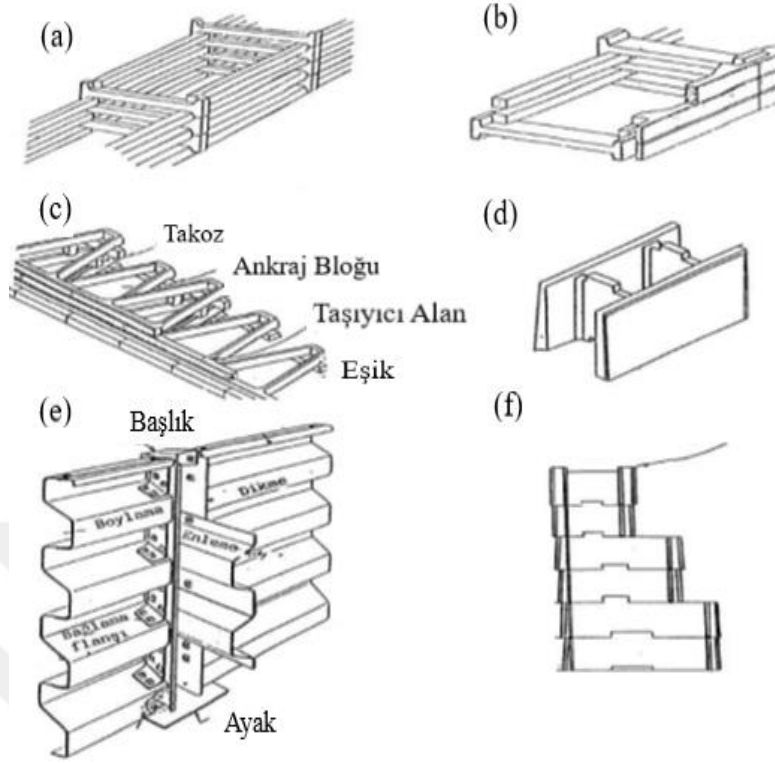
Toprak basıncını karşılamayan yanı sıra izin verilen düzeyde hareket ederek veya basıncın büyük bir miktarını zemine aktararak görevlerini yerine getiren istinat duvarlarına yarı rijit istinat duvarları denir. Kafes ve sandık tipi dayanma duvarları temel örnekleri olup kazıklı perde ve diyafram duvarları da yarı rijit istinat duvarlarına örnektir.

1.2.1.2.1. Kafes Tipi İstinat Duvarı

Kafes tipi istinat duvarları birbirine geçmeli metal ya da betonarme kirişlerle gerekli uzunluk ve yükseklikte birbirine bağlı hücrelerden oluşmaktadır. Bu yapı elemanlarıyla üretilen kafeslerin içi taşla, gerektiğinde ise daneli malzemeyle doldurularak istinat duvarı inşa edilmektedir. En kesitteki hücre miktarı yüksekliği 6 m'den yüksek olması durumunda iki katına çıkarılmalıdır. Kafes tipi duvarlar Şekil 1.2'de gösterilmektedir.

Kafeslerin üretildiği malzemeye göre kafes duvarlar iki tip olarak sınıflandırılır;

- Çelik Kafes Türü İstinat Duvarı
- Betonarme Kafes Türü İstinat Duvarı



Şekil 1.2. Kafes tipi duvarlar

1.2.1.2.2. Sandık Tipi İstinat Duvarı

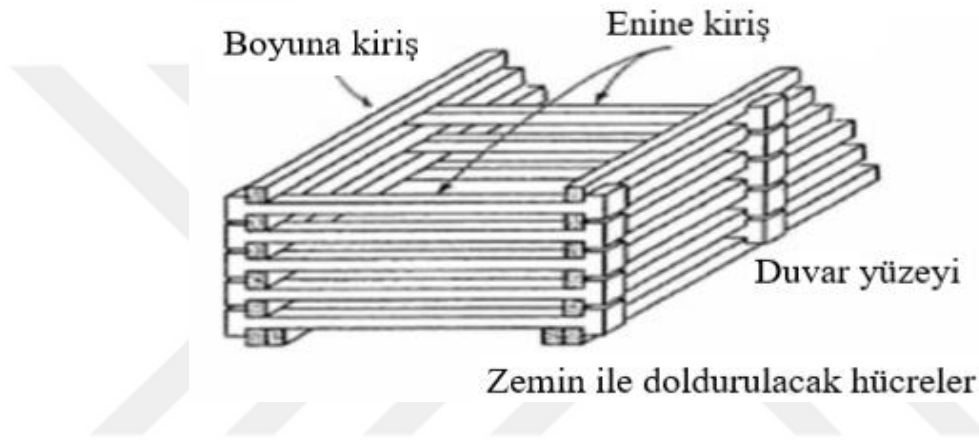
Paslanmaz çelik teller ile üretilen kafes tipi tel örgü sandıklar içine kaya dolgu yerleştirilerek inşa edilen dayanma duvarına sandık tipi dayanma duvarı denir. Sandık tipi dayanma duvarının taban boyutları 1m×1m ve uzunluğu 2-4 m arasında değişmektedir.

Sandık tipi istinat duvarları bu sandıklar üst üste konularak inşa edilirler. Drenaj sorunu çıkmamasının nedeni duvarın gövdesinin 150-250 mm çapında kaya dolgu malzemesi kullanılması sayesinde. Bu tip duvarlar farklı oturmalarından ötürü hasar görmezler. Su kanalları şevlerinin korunmasında, erozyon önlenmesi amacıyla ve deniz inşaatlarında sandık tipi istinat duvarları kullanılabilir. Yapı duraylılığı ve aşındırıcı kuvvetlere karşı direncini sandık tipi istinat duvarı kaya dolgusundan alır.

Su kuvvetlerine karşı direnç ya da bir yapıya karşı etkiyen toprak pratikte bir sandığın kaya dolgusu içinde ve ayrı gabyon birimlerinin kaya dolgu yüzeyleri arasında oluşan kenetlenme ve sürtünmeden kaynaklanır.

Sandık sepetinin yapısal olarak birincil hedefi kullanılan kaya malzemelerini yerinde tutmaktır. Yanal hareketleri ve temel oturmalarını karşılayabilen ve bunların yanında duraylılığını koruyan sandık tipi istinat duvarı, esnek bir yapı olma avantajına da sahiptir.

Suyun duvar içinde hareketini mümkün kılan ise kaya dolgusunun açık yapısı sayesinde. Duvarın arka kısmında yüksek su basınçlarının meydana gelmesini bu özellik engellemiş olur. En mantıklı çözüm duraylılığı azaltabilen ve sızıntıyı önleyebilen drenaj sisteminin yerleştirilmesidir. Sandık tipi yapılar, beton inşaat ile karşılaştırıldığında toplam maliyet ve inşaat zamanı açısından gerçekten büyük bir tasarruf edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 1.3. Sandık tipi dayanma duvarı

1.2.1.2.3. Kazıklı Perde İstinat Duvarı

Zemin özelliklerinin yetersiz olduğu ortamlarda tutulması gereken zemin yüksekliği fazla ise kazıklı perde dayanma duvarları tercih edilir. İlk olarak betonarme kazıklardan bir perde oluşturulur ve kazıya bundan sonra devam edilir. Toprak basıncı miktarına göre kazık çapları 45-80 cm arası seçilmelidir. Kazıkların ekonomik olmayacak şekilde uzun olması durumunda güvenliği sağlamak için bir veya birkaç ankrajla kuşaklı ya da kuşaksız olarak desteklenmelidir.

Bu tip perdeler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Teğet kazıklı perdeler
- Bindirmeli kazıklı perdeler
- Enjeksiyonlu teğet kazıklı perdeler
- Aralıklı kazıklarla oluşturulan perdeler

1.2.1.2.4. Diyafram İstinat Duvarı

Diyafram duvarlarının kullanım durumlarını şu şekilde özetleyebiliriz:

- Zeminin kohezyonsuz olması durumunda,
- Kazı yüzlerinin önceden desteklenmesi için derin kazı yapılırken,
- Kazı çukurunun yer altı suyuyla teşebbüsünü önlemek için,
- Kazı öncesinde komşu yapıların güvenliğini sağlamak amacıyla.

Diyafram duvarlar donatılı ve donatısız olarak imal edilebilirler. Diğer yöntemlerde bulunmayan özellikleri; kısıtlı alanda çalışma imkânı, titreşim ve gürültü azlığıdır. Temel çukuru açılmadan çukur çevresinde 80-120 cm bulamaç hendeği özel makinesi ve yöntemiyle hazırlanırken, içi bentonit çimento bulamacı ile doldurulduğundan zemin göçme yapmamakta ve bulamaç zaman içinde sertleştiğinden taşıyıcı özellik edinmekte ve geçirimsizliği sağlamaktadır.

Sabit ve derin kazılarda yüksek yanal basınçları karşılamak ve yük taşıma kapasitesine ihtiyaç duyulduğundan yalnız bentonitten meydana gelen bulamaç sonra tremi beton uygulamayla dışarı çıkarılmaktadır. Bunun sayesinde dirençli duvar elde edilmiş olur.

1.2.1.3. Esnek İstinat Duvarı

Esnek istinat duvarlarının başlıca tercih edilme nedenleri:

- Geleneksel duvarların temel zemini taşıyamadığı durumlarda iyi bir taşıyıcı olması,
- Su kenarındaki inşaat çalışmalarının diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha kolay olması ve kurutma işlemlerinin ucuzluğu,
- Yapımının kolay olması,
- Geçici duvar oluşturma mecburiyeti,
- Yeniden kullanılma olanağının ekonomi sağlaması,

sebebi ile rijit ve yarı rijit türlere tercih edilmektedir.

1.2.1.3.1. Palplanş Perde

Zemine çelik, ahşap ya da hazır beton elemanların yan yana çakılmasıyla imal edilir. Genellikle çelik türleri tercih edilmektedir. Çünkü çelik perdelerin boy-kalınlık oranının fazla olması nedeniyle ekonomik avantaj sağlaması, taşıma kolaylığı ve önemli ölçüde suya karşı geçirimsizdir. Bu tip perdeler aşağıdaki gibi sınıflandırılır:

- Ankastre palplanş (Gömme perdeler)
- Ankarlı palplanş (Bağlı perdeler)
 - Zemine tam ankastre bağlı perdeler
 - Zemine yarı ankastre bağlı perdeler

1.2.1.3.2. Donatılı Zemin İstinat Duvarları

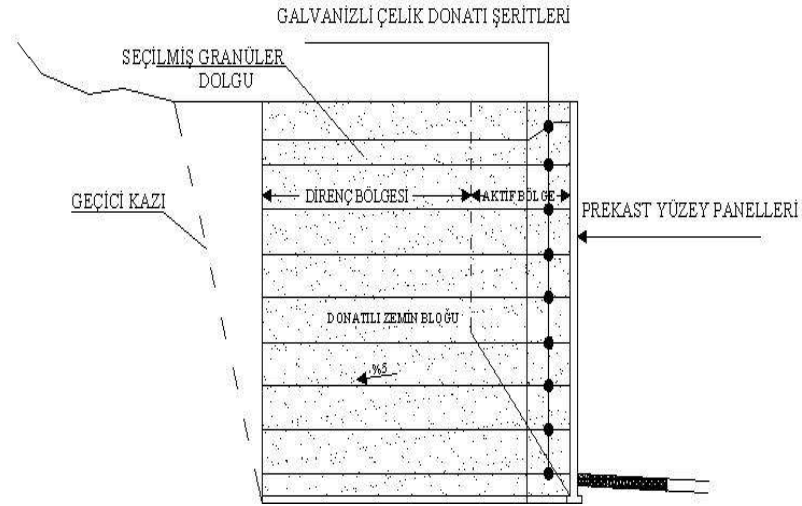
Genellikle galvanizli ya da geosentetik çelikten imal edilmiş şerit ya da çubukların çekme gerilmelerini karşılamak amacıyla dolgunun içine yerleştirilmesi ile imal edilirler.

Şeritlerde galvaniz yerine plastik, alüminyum ya da biyolojik ayrışma yapmayan örgüler de tercih edilebilir. Dış yüzeyde şeritler ya da çubuklar ince elemanlar ile birleştirilirler.

Yukarıda yaptığımız uygulamaların amacı yüzeyi tutabilmektir. Kullanılan elemanların çoğunlukla prefabrike betondan yapılmasının sebebi dayanıklılık, yanal toprak basınçlarını karşılamak, her noktadaki gerekli mukavemeti sağlamak ve estetikdir.

İhtiyaç duyulan zemin sürtünmesini sağlayabilmek için donatılar yeterli genişlik ve uzunluğa sahip olmalıdır. Yapı yüksekliğine bağlı olarak genişlik ve uzunluk 0.8-1.2 katı arasında değişmektedir. Dolgunun içsel sürtünme açısının minimum açısı yirmi beş derece tutularak ihtiyaç duyulan sürtünme elde edilir.

Bunun haricinde ihtiyaç duyulan dolgu malzemesinin %25'lik kısmı No:200 elekten geçmelidir. En ekonomik olan duvar yüksekliği, 10-12 m arasında değişen bu istinat duvarlarıdır. Şekil 1.4'de donatılı zemin duvarlarına örnek verilmiştir.

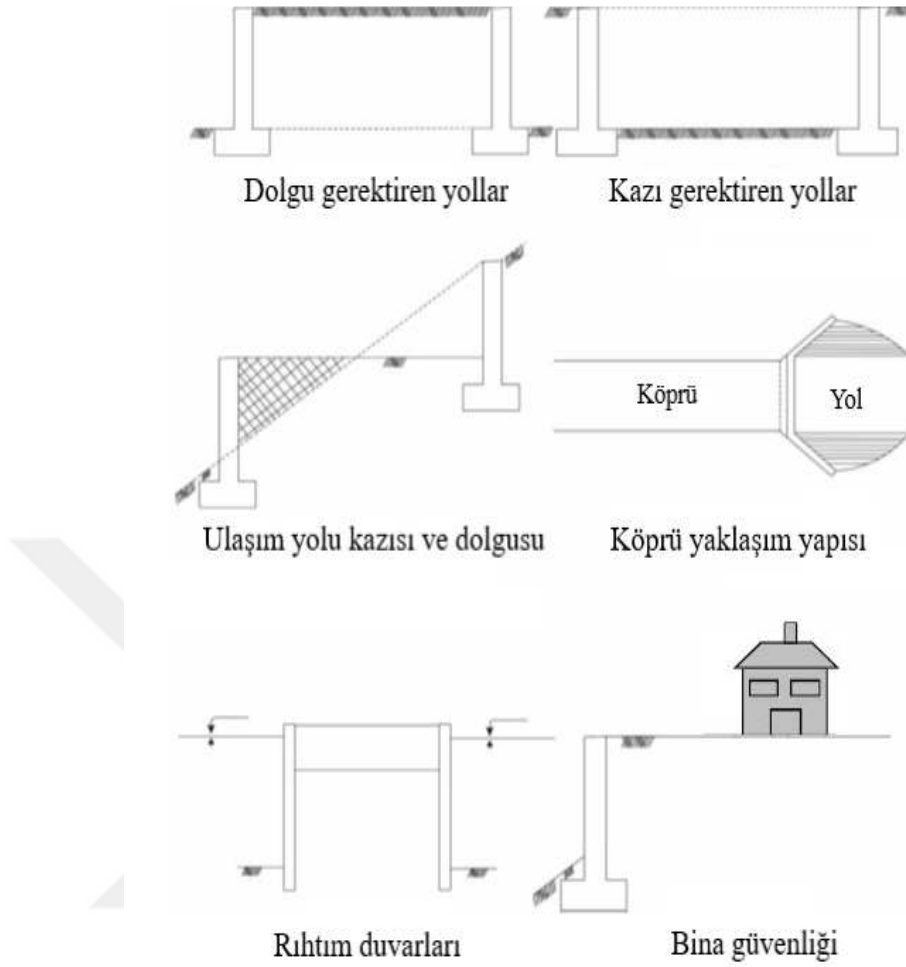


Şekil 1.4. Donatılı zemin duvarlar

1.2.2. İstinat Duvarlarının Kullanım Alanları

- Rıhtımlarda,
- Köprü kenar ayaklarında,
- Binaların bodrum duvarlarında,
- Yol inşaatlarının şev düzenlemesi yapımında,
- Bina güvenliğini sağlamak için şev stabilitesinde,
- Büyük dolgulara ve yarmalara ihtiyaç duyulan yollarda,

istinat duvarları kullanılmaktadır. Araziden yararlanmak için eğimli arazilerde zemini doğal şev açısından daha dik açıyla kullanmak, malzeme deposu amacıyla kullanmak, göçme veya kayma ihtimali olan zeminlerin yıkılmasını engellemek ve derin çukurların yan duvarlarını tutmak gibi çeşitli amaçlarda kullanılabilen bu toprak tutucu dayanma yapılarının birçok farklı inşaat projesinde kullanılabilir. Şekil 1.5’de istinat duvarı kullanım alanlarına örnek verilmiştir.



Şekil 1.5. İstinat duvarı kullanım alanları

1.2.3. İstinat Duvarlarına Etkiyen Yanal Toprak Basınçları

Zemin tabakaları içinde kendi ağırlıklarından ve üzerlerine uygulanan yükten ötürü gerilmeler oluşmaktadır. Belirli bir z derinliği için zeminlerde düşey gerilme hesabı yapılabilmektedir. Ama zeminlerde yalnız düşey gerilmeler oluşmamaktadır. Ayrıcı düşey gerilmeler neticesinde zeminlerde yanal gerilmeler de oluşmaktadır. İstinat yapılarının tasarımı için, istinat yapılarına gelen düşey ve yanal gerilmelerin bilinmesi gerekir.

Yanal toprak basınçlarının belirlenmesi hususundaki en yaygın hata, aktif yüklerin arttığı ve pasif direncin azaldığı yamaç durumlarının meydana gelmesidir. Yamaç durumlarının meydana gelmesinin nedeni, toprak malzemesi miktarında hacimsel bir artış ya da azalışın meydana gelmesidir.

Aktif basınç katsayısını değiştirebilecek durumlar şunlardır:

- Duvarın arkadaki dolgu ya da yamaç eğimi
- Bir istinat duvarının, diğer istinat duvarının aktif basınç kaması içinde olması durumunda üstteki duvardan bir kuvvet alır
- Eğimli jeolojik tabakaların varlığı ya da aktif basınç kamasında yer alan duvarın arkasındaki dolguları
- Pasif direncin azalmasına neden olabilecek yükleme koşulları

Düşey ve düşeye yakın eğime sahip zeminlerin desteklemesi ya da tutulması amacıyla istinat duvarları tercih edilebilir. İmal edilecek dayanma duvarlarının tasarımını en iyi tarzda yapılabilmesi için istinat duvarının karşılaması gereken yanal toprak basınçlarının dikkatlice bulunması gereklidir. Duvar arkasında oluşabilecek yanal toprak basınçlarının etkilendiği parametreler şunlardır:

- İstinat duvarı tipi
- Zeminin drenaj koşulları
- Zeminin birim hacim ağırlığı
- İstinat duvarının hareket miktarı
- Zeminin kayma mukavemeti parametreleri

Zemin kütlelerini tutan istinat duvarlarının karşılaşılabileceği üç sınır değeri vardır.

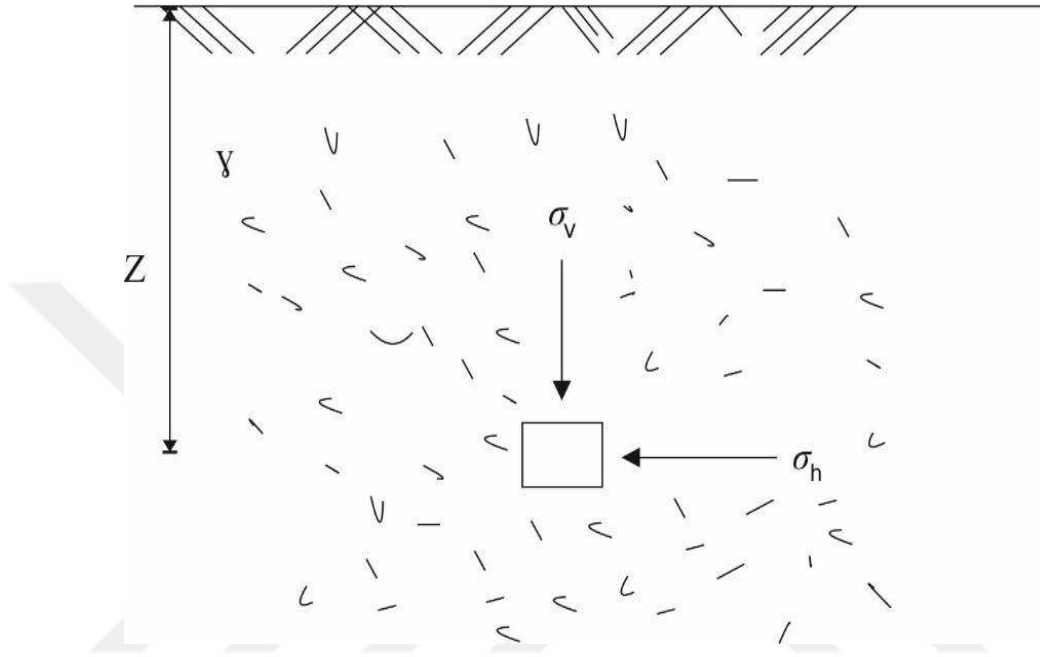
- Hiçbir şekilde duvarın hareketine izin verilmemesi durumunda, duvarın maruz kalacağı basınca sükûnetteki toprak basıncı denir.
- Zeminin mobilize edilmesi duvarın dolgudan dışarı doğru hareketiyle sağlanması durumunda, duvarın maruz kalacağı basınca aktif toprak basıncı denir.
- Zeminin mobilize edilmesi duvarın dolguya doğru yeterli miktarda hareketi sağlaması durumunda, duvarın maruz kalacağı basınca pasif toprak basıncı denir.

Toprak basıncının alabileceği minimum değere aktif basınç, alabileceği maksimum değere ise pasif basınç denir. Aktif basınç göçme anında meydana gelirken, pasif basınç işe zemin kabarmasıyla göçme meydana gelmektedir.

Coulomb (1776) ve Rankine (1857) teorileri aktif ve pasif zemin basınçlarını incelerken, zemin dolgusunun içinde kırılma yüzeyi meydana gelinceye kadar yatay yönde zeminlerin istenilen miktarda hareket etmesine dayanır.

Zemin ortamında yatay deformasyon ya da yatay deplasmanın bulunmadığı ve duvarın hareket edemediği doğal duruma sükûnetteki durum denir.

Sükûnetteki durumda zemin elastik bölgede bulunur. Ama zemini kayma mukavemetini toprak basıncıyla bağdaştırmak doğru değildir. İstinat duvarının hiçbir yönde hareket etmesi istenmiyorsa, Şekil 1.6’da ki sükûnetteki durum için verilen z derinliğindeki zemin kütleğinde ilk olarak düşey gerilme hesabı yapılır.



Şekil 1.6. Sükûnetteki toprak basıncı

q : Sürşarj yükü

γ : Zeminin birim hacim ağırlığı

z : Duvar arkası zemin yüzünden derinlik

olmak üzere düşey gerilme,

$$\sigma_v = q + \gamma \cdot z \quad (1.1)$$

şeklinde hesaplanır.

Zeminin dış yüklerden ve kendi ağırlığından ötürü ortaya çıkan yanal gerilmeler bulunan düşey gerilmeler yardımıyla Bağıntı 1.2’de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot K_0 + u \quad (1.2)$$

Bu denklemde ifade edilen,

σ_v : Düşey gerilme

K_0 : Sükûnet durumundaki yanal toprak basıncı katsayısı

u : Hidrostatik su basıncı

olarak ifade edilmektedir. Zemin tipine göre birçok denklemle hesaplanan K_0 katsayısı boyutsuz bir parametredir.

Bu katsayının belirlenmesi ile ilgili bilim insanları tarafından farklı yaklaşımlar yapılmıştır. Sunulan yaklaşımlar kısaca aşağıda sıralanmıştır:

Kumlar için,

$$K_0 = 1 - \sin \emptyset \quad (1.3)$$

Normal konsolide killeri için,

$$K_0 = 0,95 - \sin \emptyset \quad (1.4)$$

$$K_0 = 0,4 + 0,007 \cdot (PI) , PI = 0-40 \quad (1.5)$$

$$K_0 = 0,64 + 0,001 \cdot (PI) , PI = 40-80 \quad (1.6)$$

Aşırı Konsolide killeri için,

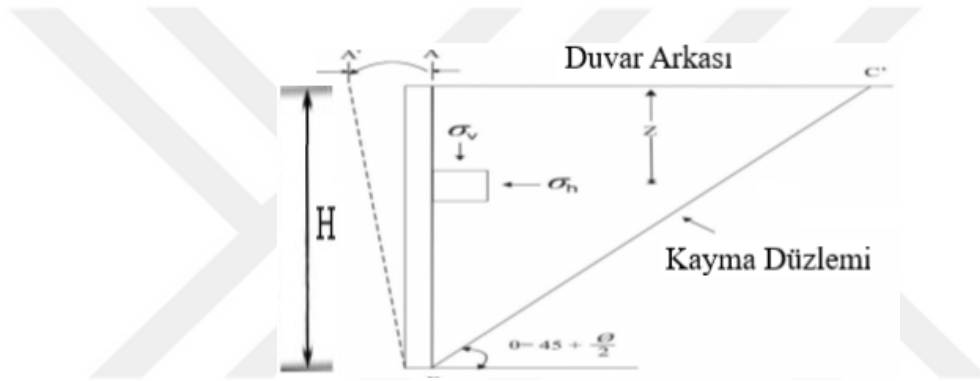
AKO: Aşırı konsolidasyon oranı,

$$K_0 = (1 - \sin \emptyset) \cdot (AKO)^{\sin \emptyset} \quad (1.7)$$

olarak ifade edilmektedir.

1.2.3.1. Aktif Toprak Basıncı

Zemin ve duvar hareketleri yüzünden istinat duvarlarına etkiyen statik toprak basınçları etkilenmektedir. İtkiye maruz olan ve arkasındaki zemini tutan duvar, dolgu dışına doğru çok az hareket ettiğinde düşey gerilmelerde değişim olmaz iken sükûnetteki yatay zemin gerilmeleri azalmaya başlayacak ve belirli bir limiti geçtikten sonra kayma yüzeyleri oluşacaktır. Göçmenin olduğu değer, yatay gerilmelerin en aza indiği değerdir. Kayma yüzeyi boyunca dışarı doğru hareket etmeye çalışan zemin kamasının duvara yapmış olduğu yanal toprak basıncı aktif toprak basıncı olarak adlandırılır. Zemin kamasındaki kayma düzlemleri Şekil 1.7’de görüldüğü üzere yatayla $(45 + \phi/2)$ açı yapmaktadır.



Şekil 1.7. Aktif toprak basıncı durumu

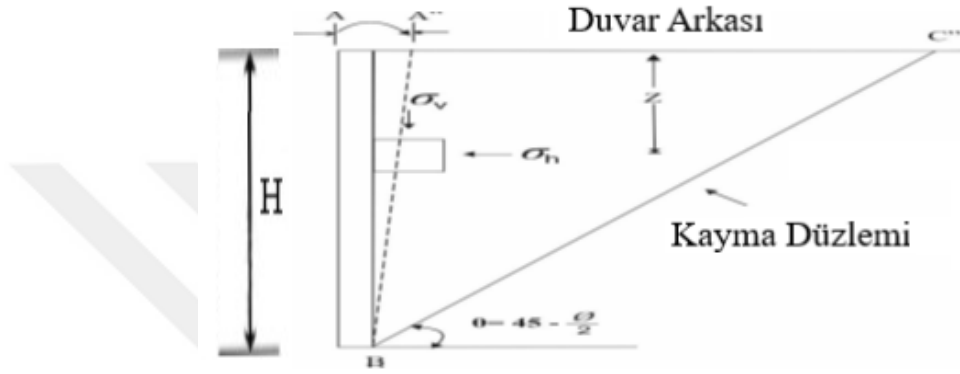
Duvar çok az bir hareket etmesi taktirde, aktif toprak basınçları oluşmaktadır. Değişik zemin türleri için ihtiyaç duyulan yer değiştirme değerleri dayanma duvarı yüksekliği olan H ile bağıntılı olarak Tablo 1.1’de gösterilmiştir.

Tablo 1.1 Aktif toprak basıncının oluşması için gereken tipik yer değiştirmeler (Das, 2013).

Zemin Tipi	Yer Değiştirme
Gevşek Kum	0.001H-0.002H
Sıkı Kum	0.0005H-0.001H
Yumuşak Kil	0.02H
Sert Kil	0.01H

1.2.3.2. Pasif Toprak Basıncı

Pasif basınç, istinat duvarının dolguya doğru hareket ettiğinde oluşur. Zemin kaması bu durumda istinat duvarına pasif basınç uygulamaktadır. Kamanın istinat duvarına uyguladığı bu dirence pasif toprak basıncı denir. Zemin kamasındaki kayma düzlemleri Şekil 1.8’de görüldüğü gibi yatayla $(45 - \phi/2)$ açı yapmaktadır.



Şekil 1.8. Pasif toprak basıncı durumu

Zeminin aktif ve sükûnetteki toprak basınçlarına kıyasla, pasif toprak basınçları çok daha büyük değerlere sahiptir. Duvarın belli bir miktar hareket etmesi sonucu pasif toprak basınçları oluşabilir. Değişik zemin türleri için ihtiyaç duyulan yer değiştirme değerleri dayanma duvarı yüksekliği olan H ile bağıntılı olarak Tablo 1.2’de gösterilmiştir.

Tablo 1.2. Pasif toprak basıncının oluşması için gereken tipik yer değiştirmeler (Das, 2013).

Zemin Tipi	Yer Değiştirme
Gevşek Kum	0.01H
Sıkı Kum	0.005H
Yumuşak Kil	0.04H
Sert Kil	0.02H

1.2.4. Yanal Toprak Basınç Teorileri

Yanal zemin toprak basınçlarıyla alakalı ilk çalışmalar Charles-Augustin de Coulomb (1776) ve William Rankine (1857) tarafından yapılmıştır. Bu kısımda istinat duvarlarına etkiyen statik toprak basınçlarının hesaplanabilmesi için kullanılan Rankine ve Coulomb yöntemlerini inceleyeceğiz. Öğrenme kolaylığı açısından Coulomb teorisi daha önce bulunmuş olsa da ilk olarak Rankine teorisi açıklanacaktır.

1.2.4.1. Rankine Basınç Teorisi

Zemin davranışları ve gerilme şartları için birçok kabuller yaparak, minimum aktif ve maksimum pasif toprak basınçlarını hesaplayabilmek için William Rankine (1857) tarafından bir yöntem bulunmuştur. Öncelerinde sadece kohezyonsuz zeminler için kabul gören bu yöntem sonrasında gerekli düzenlemeler yapılarak kohezyonlu zeminler için de kullanılmıştır.

Rankine yönteminin kabulleri aşağıda açıklanmıştır:

- Yalnızca düşey duvarlarda uygulanabilir.
- Zemin yüzü yatay olmaktadır, yatay ve düşey doğrultularda kayma gerilmeleri oluşmamaktadır.
- Zemin kütlesi izotrop ve homojendir. Yani zeminin her noktasında kohezyon, birim hacim ağırlığı ve kayma direnci açısı aynıdır.
- Duvarı rijit ve pürüzsüz, duvar arkasını ise düz kabul eder. Bu kabul, toprak basınçlarının hesaplanmasını gerçekten kolaylaştırır. Ama gerçekte duvar arkasıyla zemin arasında bir miktar sürtünme bulunmaktadır.

1.2.4.2. Rankine Basınç Teorisiyle Toprak Basınçlarının Hesaplanması

Zemin üst yüzeyinden itibaren herhangi bir z derinliği için toprak basıncı, minimum şartlardaki aktif durum şu şekilde açıklanmıştır:

$$P_{as} = \gamma \cdot z \cdot K_{as} - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_{as}} \quad (1.8)$$

Bu denklemde ifade edilen,

γ : Zeminin birim hacim ağırlığı,

K_{as} : Statik aktif toprak basıncı kat sayısı,

c : Zeminin sahip olduğu kohezyondur.

Yatay bir arka dolguyu tutan düz bir düşey istinat duvarı durumunda statik aktif toprak basıncı katsayısı ise,

$$K_{as} = \frac{1 - \sin \emptyset}{1 + \sin \emptyset} = \tan^2 \left(45 - \frac{\emptyset}{2} \right) \quad (1.9)$$

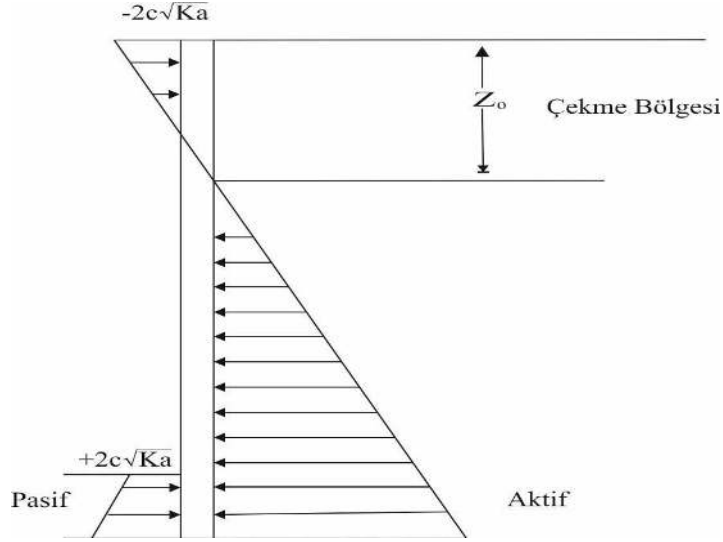
olarak ifade edilmektedir. Kohezyonun olmadığı durumda Rankine yöntemine göre istinat duvarına etkiyen aktif toprak basıncı Bağntı 1.8’de duvar yüksekliği yani H boyunca integralini alınarak yeni bir bağıntı elde edilir (Bağıntı 1.10).

$$P_{as} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_{as} \quad (1.10)$$

Yüksekliği H olan istinat duvarında, aktif toprak basıncının bulunduğu nokta duvarın taban kotundan H/3 kadar yukarıda bulunmaktadır. Toprak basıncının dağılımı ise üçgen şeklindedir. Toprak basıncı dağılımını etkileyen parametreler; zeminin kohezyonu, kayma mukavemet açısı ve zemin üst yüzeyinin eğimidir. Aktif ve pasif toprak basıncının kohezyonlu zeminlerde derinlikle değişimi Şekil 1.9’da ifade edilmiştir. Derinlikle bağlantılı olarak zeminde oluşan çekme gerilmeleri azalmakta ve çekme çatlağı derinliği olarak kabul edilen z_0 derinliğinde ise bu değer sıfır olmaktadır. Bağntı 1.8’den yararlanılarak çekme gerilmeleri etkisinde olan zeminlerde z_0 ,

$$z_0 = \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot \sqrt{K_{as}}} \quad (1.11)$$

olarak elde edilir.



Şekil 1.9. Kohezyonlu zeminlerde aktif ve pasif basınç dağılımları

Zemin üst yüzeyinden itibaren herhangi bir z derinliği için toprak basıncı, maksimum şartlardaki pasif durum şu şekilde açıklanmıştır:

$$P_{ps} = \gamma \cdot z \cdot K_{as} + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_{ps}} \quad (1.12)$$

Bu denklemde ifade edilen,

K_{ps} : Statik pasif toprak basıncı kat sayısıdır.

Statik pasif toprak basıncı katsayısı ise,

$$K_{ps} = \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} = \tan^2 \left(45 + \frac{\theta}{2} \right) \quad (1.13)$$

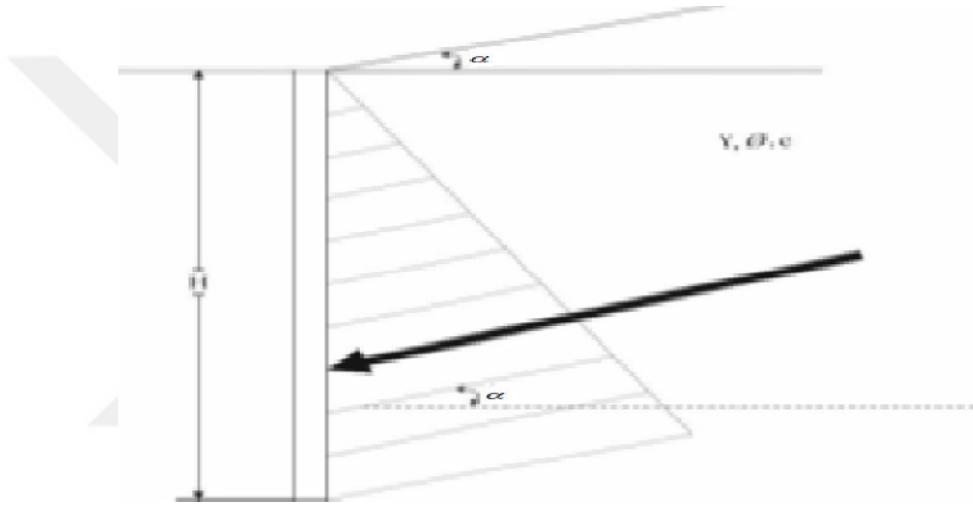
olarak ifade edilmektedir. Kohezyonun olmadığı durumda Rankine yöntemine göre, istinat duvarına etkiyen aktif toprak basıncı Bağıntı 1.12’de duvar yüksekliği yani H boyunca integralini alınarak yeni bir bağıntı elde edilir (Bağıntı 1.14).

$$P_{ps} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_{ps} \quad (1.14)$$

Yüksekliği H olan istinat duvarında, pasif toprak basıncının bulunduğu nokta duvarın taban kotundan $H/3$ kadar yukarıda bulunmaktadır.

1.2.4.3. Eğimli Dolgu Durumunda Rankine Yöntemi

Eğer kullanılan dolgu granüler bir zemin ve duvarda sürtünmesiz olarak kabul yapılırsa, zemin üst yüzeyinin yatayla “ α ” açısı yaptığı durumda statik toprak basıncı katsayısı sonsuz şev çözümleri kullanılarak farklı bir tarzda hesaplanabilmektedir. Şekil 1.10’da gösterilen yatay ile “ α ” açısı yapan dolgunun toprak basıncı katsayısı statik aktif (K_{as}) ve statik pasif toprak basıncı katsayıları (K_{ps}) olmak üzere Bağıntı 1.15 ve 1.16’da verilmiştir.



Şekil 1.10. Zemin üst yüzeyinin yatay ile “ α ” açısı yaptığı durum

$$K_{as} = \cos \alpha \cdot \frac{\cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi}}{\cos \alpha + \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi}} \quad (1.15)$$

$$K_{ps} = \cos \alpha \cdot \frac{\cos \alpha + \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi}}{\cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi}} \quad (1.16)$$

1.2.4.4. Coulomb Toprak Basıncı Teorisi

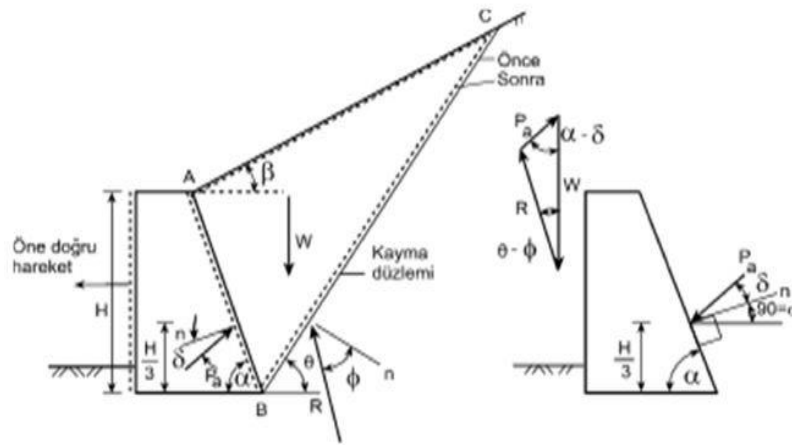
Bu teori Coulomb tarafından 1776 yılında ortaya atılmıştır. Rankine teorisinin aksine dolgu malzemesi seçiminde granüler zemini tercih ederken, duvarında sürtünmesinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır.

Duvarın birim uzunluğuna gelen yanal zemin basıncını hesaplamaktadır. Coulomb basınç teorisi kama teorisi olarak da bilinir. Duvar dolgudan aktif zemin basınçları altında uzaklaşır. İstinat duvarının hareketinden kaynaklanan duvar arkasındaki basınçlar ve kayan zemin kütlelerini de göz önünde tutarak minimum aktif ve maksimum pasif toprak basınçlarının hesabında aşağıdaki bilgilere dikkat edilmelidir:

- Zemin homojen ve izotropdur.
- Granüler zemin koşullarında geçerlidir.
- Duvar ile zemin arasındaki sürtünme hesaba katılmaktadır.
- Kayma yüzeyi boyunca sürtünme kuvvetleri üniform olarak dağılmıştır.
- Kohezyonsuz zeminlerde, duvar arkasında kayan kütle üçgen (kama) şeklindedir.
- Kayma yüzeyi gerçekte eğri olsa da, bu teoride hesap kolaylığı açısından düzlemsel kabul edilmektedir.
- Duvar, öne ya da arkaya doğru hareket ederken, duvar arkasında oluşan ve kayan zemin kütlelerinin dengesine dikkat edilmelidir.

1.2.4.5. Coulomb Yöntemi ile Statik Toprak Basınçlarının Hesaplanması

Aktif durum için kohezyonsuz zeminlerde etkiyen kuvvetlerin etkisinde kama aşağı doğru hareket ettiğinden Şekil 1.11’de görülen P_a ve R kuvvetleri, yüzey normalleri ile hareket yönün tersine δ ve θ açılarını yapar.



Şekil 1.11. Aktif durum için Coulomb kama teorisi

Şekil 1.11’de üçgen kamaya etkiyen kuvvetler gösterilmiştir. Burada ifade edilen,

P_a : AB düzlemi boyunca etkiyen aktif bileşke kuvvet

W : ABC kamasının kendi ağırlığı

δ : Duvar ile zemin arasındaki sürtünme açısı

R : BC kayma düzlemi boyunca etkiyen bileşke kuvveti

ϕ : Zeminin kayma mukavemeti açısı

olarak tanımlanmıştır.

AB düzlemi boyunca etkiyen aktif bileşke kuvvet,

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_{as} \quad (1.17)$$

olarak hesaplanırken, statik aktif toprak basıncı katsayısı K_{as} ,

$$K_{as} = \frac{\sin^2(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (1.18)$$

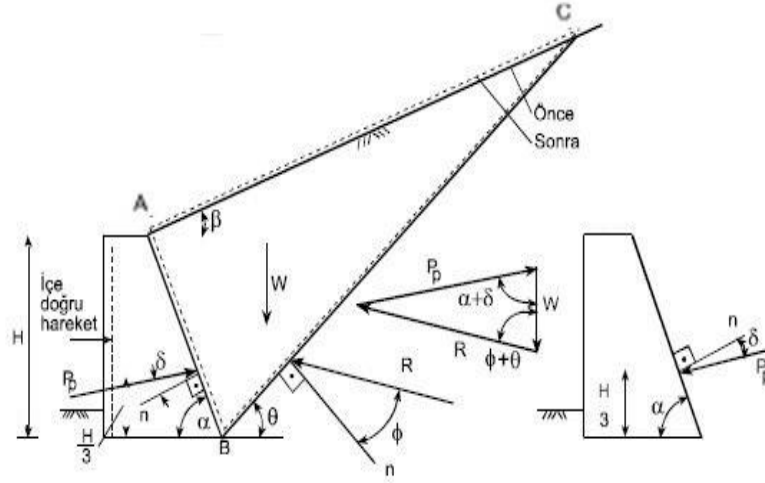
olarak elde edilir. Aktif toprak basıncı bu yöntemde zemin kamasına etkiyen kuvvetlerin dengesinden faydalanılarak bulunduğu için toprak basınç dağılımı kesin olarak bulunamaz.

Toprak basınç dağılımı yaklaşık olarak,

$$P_a = \gamma \cdot z \cdot K_{as} \quad (1.19)$$

şeklinde doğrusal olarak gösterilebilir. Yüksekliği H olan istinat duvarında, aktif toprak basıncının bulunduğu nokta duvarın taban kotundan $H/3$ kadar yukarıda bulunmaktadır.

Pasif durumda kohezyonsuz zeminler için, Şekil 1.12’de görüldüğü gibi duvar arkaya doğru hareket ederken üçgen kama yukarı doğru hareket eder. Zemin kamasının duvara yapmış olduğu basıncın minimum değerine pasif toprak basıncı denilmektedir. Kohezyonlu zeminlerde, aktif durumda $\delta < \phi/3$ olarak kabul edilir. BC düzlemseldir.



Şekil 1.12. Pasif durum için Coulomb kama teorisi

Şekil 1.12’de üçgen kamaya etki eden kuvvetler verilmiştir. Burada ifade edilen,

P_p : AB düzlemi boyunca etkiyen pasif bileşke kuvvet

W : ABC kamasının kendi ağırlığı

δ : Duvar ile zemin arasındaki sürtünme açısı

R : BC kayma düzlemi boyunca etkiyen bileşke kuvveti

ϕ : Zeminin kayma mukavemeti açısı

olarak tanımlanmıştır.

AB düzlemi boyunca etkiyen pasif bileşke kuvvet,

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_{ps} \quad (1.20)$$

olarak hesaplanırken, statik pasif toprak basıncı katsayısı K_{ps} ,

$$K_{ps} = \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (1.21)$$

olarak elde edilir. Pasif toprak basıncı bu yöntemde zemin kamasına etkiyen kuvvetlerin dengesinden faydalanılarak bulunduğu için toprak basınç dağılımı kesin olarak bulunamaz.

Toprak basınç dağılımı yaklaşık olarak,

$$P_p = \gamma \cdot z \cdot K_{ps} \quad (1.22)$$

şeklinde doğrusal olarak gösterilebilir. Yüksekliği H olan istinat duvarında, pasif toprak basıncının bulunduğu nokta duvarın taban kotundan H/3 kadar yukarıda bulunmaktadır.

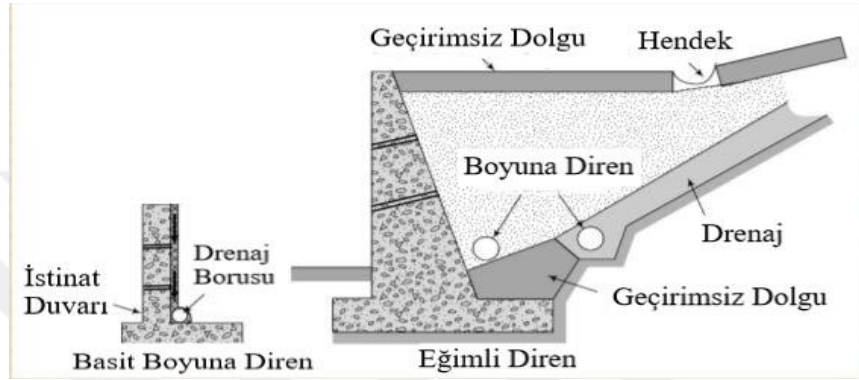
1.2.4.6. Rankine ile Coulomb Yöntemlerinin Karşılaştırılması

- Zeminin sükûnette olduğu statik durumda iki yöntem de kullanılabilir.
- Rankine yönteminde kohezyonlu zemin, tabakalı zemin ve yer altı suyu koşulları göz önüne alındığında çok daha kolay çözüm yolu sağlar.
- Rankine yönteminde zemindeki kohezyonu da göz önüne alarak hesap yaparken, Coulomb yönteminde zemini kohezyonsuz ve kuru kabul ederiz.
- İstinat duvarı ve geri dolgu arasındaki sürtünme açısı Rankine yönteminde $\delta=0^\circ$ olarak kabul edilirken, Coulomb yönteminde sürtünme ihmal edilmiştir.
- Plastik denge durumundan fikir yürüterek basıncın gerilme esaslı olduğunu Rankine tespit ederken, Coulomb'un yaşadığı yıllarda matematikte trigonometri hakkında bilgi sahibi olunmadığı dolayısı geometrik yöntemler kullanılarak çözüm yoluna gidilmiştir ve bileşke kuvvet kamanın dengesinden bulunmuştur.

1.2.5. İstinat Duvarı Drenaj Sistemleri

İstinat duvarları devamlı olarak dış etkenlere maruzdur. Dış etkenlerin etki kapasitesi, çevresel koşullar göz önüne alarak hesaplanmalıdır. Unutulmaması gereken önemli konulardan biri istinat duvarına gelen sulardır. Zeminin kendisinin bünyesinde su olabileceği gibi, yağmurdan kaynaklanan sulara ya da karın erimesi sonucu oluşan sulara dikkat edilmelidir. Bu suların varlığı sonucu istinat duvarı arkasındaki zemin boşluklarının su ile dolması durumunda zemin itkisinde artışa neden olur. Bu artışın negatif etkilerini engellemek için iyi bir drenaj çalışması yapılmalıdır.

Duvar arkasında dolgu yapılırken ince daneli malzemeler tercih edilirse su tutma kapasitesi artacağından, yapıya etkiyen ağırlık artacağı için mantıklı bir tercih olmaz. Bu yüzden dolgu malzemesi olarak iri daneli kohezyonsuz malzemeler tercih edilmelidir. Duvar arkasına yapılan dolguların kompaksiyonu iyi olmalıdır. Dolgulardan kaynaklanan aktif yanal toprak basıncı hesaplanan güvenli sınırları geçmemelidir. İstinat duvarlarında basit boyuna diren ve eğimli diren Şekil 1.13’de verildiği gibidir.



Şekil 1.13. İstinat duvarlarında basit boyuna diren ve eğimli diren

Duvar arkasında biriken suların duvarın dışına tahliyesini sağlayan duvar yüzeyinde bulunan deliklere barbakan ismi verilir. Şekil 1.14’de istinat duvarında bir barbakan sistemi gösterilmiştir.



Şekil 1.14. İstinat duvarında barbakan sistemi

İstinat duvarlarında barbakan deliklerinde dikkat edilmesi gereken özellikler:

- En alt düzeyde bulunan barbakanlar zeminden 10 cm yukarıda olacak şekilde imal edilmelidir.
- Duvar genişliği boyunca her 3-4 m de en az bir barbakan yerleştirilmelidir.
- Duvar yüksekliğince ise en az 3m de bir yine 3-4 m aralık ile barbakanlar şaşırtmalı olarak yerleştirilmelidir.
- İstinat duvarlarının arkasındaki dolgu toprak ise taşla istif yapmak drenaj açısından önemlidir. Ancak dolgu taş ya da ağırlıklı olarak taşlı bir dolgu olursa buna gerek yoktur.
- Barbakan borusunun çapı projelerden projeye değişiklik gösterebilir. Projelerde 10 cm, 20 cm, 50 cm ve 100 cm gibi belli başlı çaplar kullanılmaktadır. Boru çapının seçimi çok önemlidir. Küçük seçilmesi durumunda tıkanma riski ortaya çıkacağı gibi, çok büyük seçilme durumunda ise bazı hayvanların barınağı haline gelebileceği düşünülmelidir. Hayvanların giriş çıkışını engellemek için boru ağızlarının tel örgüyle kapatılması mantıklı bir yöntemdir.
- Barbakan deliklerinin imalatında fabrikada üretilen plastik ya da beton büzlerde kullanılabilir.
- Barbakan borusunun başladığı duvar içerisinde kalan baş kısmı da ince filtre malzemeyle kaplanmalıdır. Bu sayede toprak ve agregaların boru içine akması neticesinde tıkanma olaylarının önüne geçilmiş olunur.
- İstinat duvarımızdan estetik açıdan da fayda sağlamak için duvar üzerine çiçeklikler yerleştirilebilir. Yerleştirilen bu çiçekliklere, su temini sızan suların buraya uygun sistem ile aktarılmasıyla sağlanabilir. Böylece güzel bir görüntü ve sürdürülebilirlik sağlanmış olur.

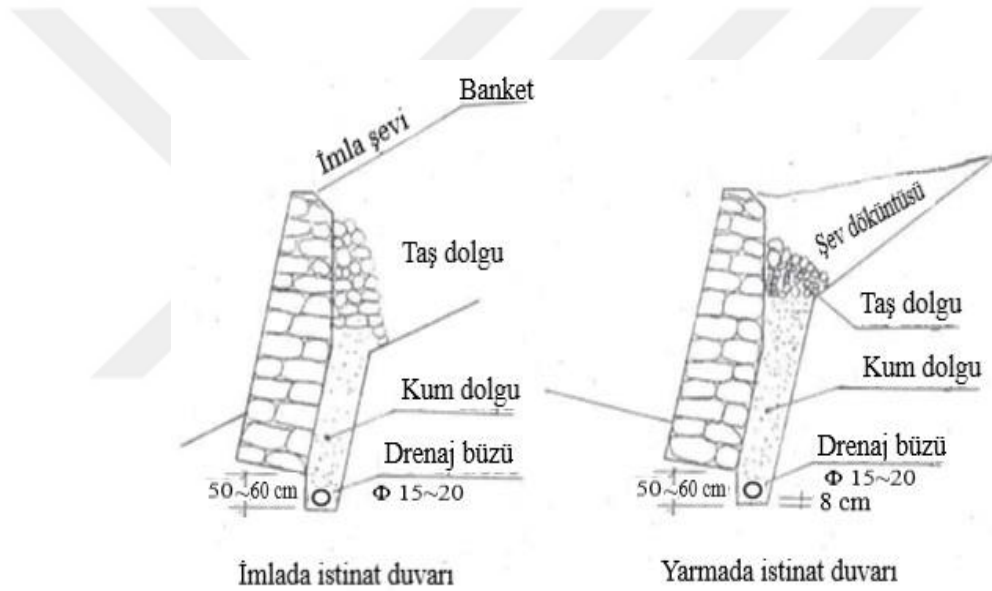
İstinat duvarlarında drenajı iki genel başlık altında inceleyebiliriz:

- a. Dolgu önüne yapılan istinat duvarları
- b. Yarma önüne yapılan istinat duvarları

Dolgu önüne yapılan istinat duvarlarının drenajı için duvara barbakan deliklerinin konması etkili bir yöntemdir. Bir başka yöntem olarak duvarın dolgu zemin yüzünü kestiği düzeye, duvarın arkasında duvara paralel olacak şekilde drenaj büzleri yerleştirdikten sonra dolgunun bunun üzerine yapılmasıyla da drenaj sağlanabilir.

Taş dolgu üzerindeki şevlerden taş dolgu üzerine bir su sızması gerçekleşebilir. Su sızmasıyla beraber gelen zemin parçaları taş dolgunun boşluklarını tıkayabilir. Bu durum yapılan drenaj sisteminin çalışmasını engeller. Drenaj sisteminin sürdürülebilirliğini korumak için bu durumun yaşanabileceği bölgelere filtre malzemesi koymak doğru bir hamle olacaktır.

Yer altı su seviyesi yüksek bir yerde istinat duvarı temelimiz bulunuyor ise temelin kuru tutulması önem arz eder. Temelin arka yüzüne ve temel taban düzeyi altında büzü bir drenaj hendeği yapılmalıdır. Yer altı, kar ve yağmur suları fazlası bu hendekte toplanır. Toplanan bu hendekten suyun tahliye işlemi için ise drenaj borusu kullanılmalıdır. Şekil 1.15’de bu sistem gösterilmiştir.



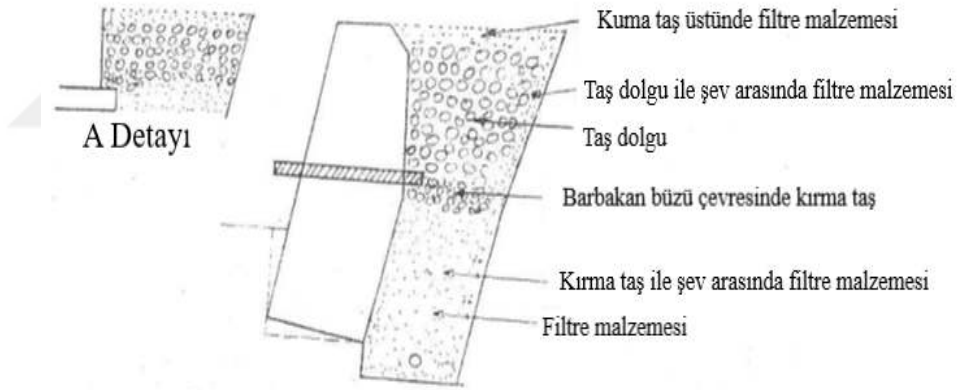
Şekil 1.15. Dolgu ve yarmada istinat duvarlarında büzü drenaj sistemleri

Yarmalarda inşa edilen istinat duvarlarında barbakan sistemi yine iyi sonuç veren bir sistemdir. Barbakan deliklerinden filtre malzemesi içine doğru bir büz uzatılmalı ve büzün filtre malzemesi yönündeki ağzına iri çakıllar yerleştirildikten sonra filtre malzemesi yerleştirilmelidir.

İstinat duvarı arkasında drenaj için bir boşluk bırakılmalıdır. Duvara paralel olacak şekilde bırakılan boşluk tabanına bir drenaj büzü dizisi ve daha sonra drenaj büzü dizesi üzerine de filtre malzemesi konmalıdır. Filtre malzemesi seviyesi yarma şevi ile bırakılan bu boşluk yan yüzünün kesiştiği noktaların üzerinde olacak şekilde yükseltilir.

Yarma şevinden kaynaklanan bir su sızıntıları varsa filtre malzemesi su sızıntılarının üzerinde kalacak şekilde yükseltilmelidir. İstinat duvarı arkasına taş dolgu yapmak drenaj bakımından ekonomik ve yeterli bir yöntem olsa da bazı zayıflıklarından ötürü yeterli olmadığı durumlar vardır. Örneğin, taş dolgunun arasında boşluklar bulunmaktadır. Su sızıntılarıyla gelen zemin parçacıkları zaman geçtikçe taş dolgunun tıkanmasına sebebiyet verir. Zamana bağlı olarak istinat duvarı arkasında su miktarı artar. Bu artış sonucu kayma direnci düşer ve aktif itki kuvveti artar. Bu sorunun meydana gelmesini istemiyorsak yine filtre kullanmak akılcı bir çözüm olacaktır. Filtre malzemesi, taş dolgu ile yarma yakasındaki yüzey arasına yerleştirilmelidir.

Yarmada büyük ölçüde su akışı mevcut ise ilk yapılması gereken drenaj önlemleri duvar girişindeki yarma şevi kitlesi içine yapılmalıdır. Burada amaç duvardan önce olan bölgede su sorununu engellemektir. Su sorunu kontrol altına alındıktan sonra istinat duvarı inşaatına başlanmalıdır.



Şekil 1.16. İstinat duvarları arkasında büzlü drenaj sistemi ve duvar arkalarının dolgusunun yapımı

1.3. Optimizasyon

Optimizasyon, bir sistemde belirli kısıtlar altında belirlenmiş bir amaç fonksiyonunun en iyi değeri alabilmesi için karar değişkenlerinin alacağı değerleri belirleme işlemidir. Başka bir deyişle istenen bir çıktıyı elde etmek için, sistem girdilerinin ve/veya bu girdilerin değerlerinin neler olabileceğini belirleme sürecidir. Modelleme ve çözümleme optimizasyon problemlerinde iki önemli bileşenlerdendir.

Hayatta karşımıza çıkan soruların matematik dilinde ifade edilmesine modelleme ve bu modeli sağlayan en iyi çözümün bulunması işlemine çözümleme denir. Optimizasyon problemlerini ele alırken ilk olarak karar vermemiz gereken şey nasıl bir çözüm tekniği izleyeceğimizdir. Çünkü her optimizasyon probleminin kısıtları ve hedef fonksiyonu farklıdır.

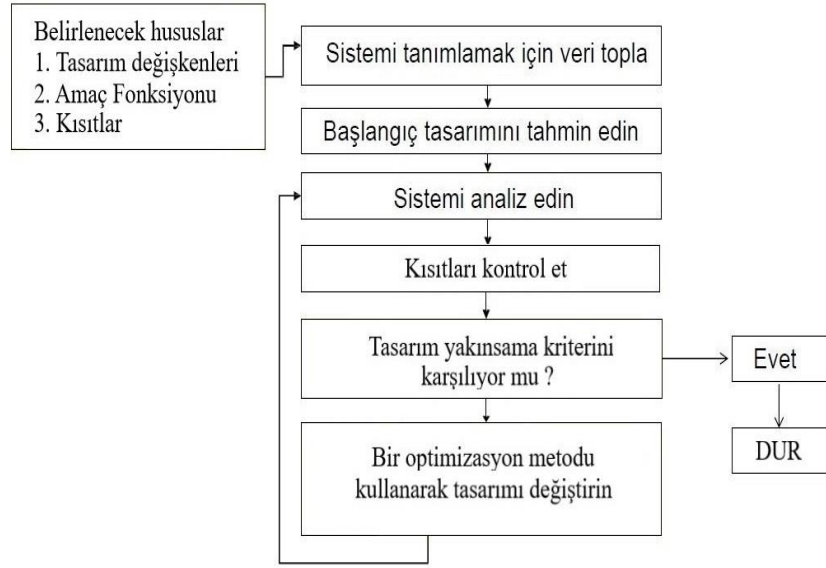
Optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan başlıca teknikler şunlardır:

- Analitik yöntemler
 - İzin verilen tolerans dahilinde optimum çözümü verirler. Ancak büyük boyutlu problemlerin çözümünde sonuca ulaşmak çok uzun sürer ya da sonuca varılamayabilir. Bazı analitik yöntemler; matematiksel modelleme, dal sınır algoritması vb.
- Sezgisel yöntemler
 - Belirli bir algoritmayı izleyen, problem odaklı çözüm yöntemleridir. Analitik yöntemlere göre çok daha hızlı çözüm üretebilirler. Ama optimum çözüme ulaşma başarısı analitik yöntemle kıyasla daha azdır. Bazı sezgisel yöntemler; Johnson Algoritması, pozisyon ağırlığı yöntemi vb.
- Meta-sezgisel yöntemler
 - Belirli algoritmaların, problemin yapısına uyarlanmasıyla elde edilen çözüm yöntemleridir. Bazı meta-sezgisel yöntemler; genetik algoritma, karınca kolonisi algoritması, parçacık sürü optimizasyonu vb.

Optimizasyon teknikleri, çalışan bir tasarım ya da sistemin yapılması, en iyi performansa ulaşma ve tasarımı ya da sistemi güvenilir ve sağlam yapmak için kullanılabilir.

Ayrıca tasarım problemleri hakkında da fikir verir.

Şekil 1.17’de bir tasarım sürecinin işleyişi vermiştir.



Şekil 1.17. Bir optimizasyonda tasarım süreci

1.3.1. Optimizasyon Probleminin Formüle Edilmesi

Optimizasyon problemini formüle ederken, kritik sınır koşulları çok önemlidir. Eğer kritik sınır koşulları yeterince dikkate alınmazsa, elde edilen optimum çözüm hatalı olacaktır. Ama bu alt ve üst sınırlar ile optimum çözüm arasında doğrusal bir bağlantı olduğu anlamına da gelmez. Çok fazla sınır koşulu formülasyona katılırsa ya da sınır koşulları tutarsız ise problem için doğru sonuçlar almak mümkün olmayabilir. Ancak yine de matematiksel olarak iyi tanımlanmış veya iyi formüle edilmiş bir tasarım problemi, uygun yöntem ile çözüldüğünde doğru sonuçlara ulaşılabilir. Optimum tasarım problemleri çözümünde işlem adımları sırasıyla uygulanarak doğru çözüme gidilebilir.

1. Adım: Problemin tanımlanması
2. Adım: Problemle ilgili veri toplanılması
3. Adım: Tasarım değişkenlerinin belirlenmesi ve tanımlanması
4. Adım: Amaç fonksiyonun belirlenmesi
5. Adım: Kısıtların belirlenmesi

1.3.1.1. Problemin Tanımlanması

Problemim tanımlanması, tasarım hedefinin ne olduğunu ve nasıl bir performans hedeflediğimizi olarak özetlenebilir.

1.3.1.2. Problem ile İlgili Veri Toplanması

Problemi daha iyi ele alabilmek ve matematiksel olarak değerlendirebilmek amacıyla malzeme özellikleri, performans beklentileri, hammadde maliyetleri vb. gibi gerekli bilgileri toplamak gerekmektedir. Ayrıca incelenen tasarım probleminin çözümünde farklı alternatiflerin analizlerinin uygulanabilirliği de irdelenmektedir. Bu yüzden ekipmanların ve analiz işlemlerinin ne olduğu bu aşamada karar verilmeli ve tanımlanmalıdır. Genelde problemlerin tanımlanması belirsiz olması nedeniyle problemin çözüm yöntemi ve formüle edilmesi amacıyla bazı kabuller yapılması gereklidir. Bazı tasarım verileri ise bir sonraki adımda belirlenecek olan tasarım değişkenleri ve parametreleriyle bağlantılıdır. Bu nedenle formülasyon sırasında kullanılmak için bu verilere gerek duyulmaktadır.

1.3.1.3. Tasarım Değişkenlerinin Belirlenmesi ve Tanımlanması

Tasarım değişkenleri tasarlanacak sistemi tanımladığı için belirlenmesi gerçekten önemlidir. Çünkü her bir tasarım değişkenine veren farklı değerler, farklı tasarımların ortaya çıkmasına sebep olacaktır. Bu değişkenler çoğu zaman optimizasyon değişkeni olarak isimlendirilir ve birçok değer verilebildiğinden dolayı ‘serbest’ olarak tanımlanmaktadır.

Tasarım değişkenleri belirlenirken, birbirinden bağımsız tanımlanmalıdır. Çünkü değişkenlerin birbirine bağlı olması durumunda, değişkenlere bağımsız değerlerin atanmasını engeller. Bu durumda ise problemin serbestlik derecesi doğrudan etkilenmektedir.

Bazı tasarım problemleri için bir sistem farklı değişken kümeleriyle tanımlanabilir. Seçilen değişken kümesine göre tasarımın probleminin matematiksel gösterimi de farklı olmaktadır.

Tasarım değişkenlerine atanan sayısal değerler ile sistemin tasarımı ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu sistemin bütün sınır koşullarını sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmelidir. Problemin matematiksel tanımı doğru yapabilmek için uygun tasarım değişkeni seçilmelidir. Bu yüzden formülasyon işleminin başında bütün tasarım değişkeni seçimleri dikkatli olarak incelenmelidir. Bazı durumlarda ise problemin formülasyonuna esneklik kazandırmak için tasarımın sahip olduğu serbestlik derecesinden daha fazla tasarım değişkeni belirlenebilir.

Tasarım problemi için değişken tanımlaması yapılmakta zorlanıyorsa, tüm değişkenler listelenmelidir. Daha sonra her biri ayrı değerlendirilerek, arasından probleme en uygun olan değişken veya değişkenler seçilmelidir. Değişken belirlendikten sonra ise farklı sayısal değerler verilerek farklı tasarım denemeleri yapılmalıdır.

Bir optimizasyon probleminin bütün bilinmeyenleri tasarım değişkenleri olarak tanımlanabilir. Tasarım değişkenleri belirlenirken aşağıdaki maddeler dikkate alınarak değerlendirilmelidir:

- Tasarım değişkenleri birbirinden bağımsız olarak seçilmelidir. Eğer değişkenler birbirinden bağımsız değilse ya da seçilemiyorsa aralarında eşitlik şartı olmalıdır.
- Genelde tasarım probleminin doğru tanımlanması için minimum sayıda değişken kullanılmalıdır.
- Tasarım probleminin doğru bir matematiksel ifadeye dönüştürülebilmesi için dönüştürülme aşamasında formülasyonu en doğru tarzda tanımlayabilmek için birçok bağımsız değişken kullanılmalıdır. Optimizasyon işleminin ilerleyen safhasında ise sayıca fazla olan değişkenlere sabit sayısal değerler verilerek tasarım değişkeni miktarı azaltılabilir.
- Her bir tasarım değişkenine sayısal değerler verilerek deneme yapılmalı, ortaya çıkan tasarımın uygunluğu değerlendirilmelidir.

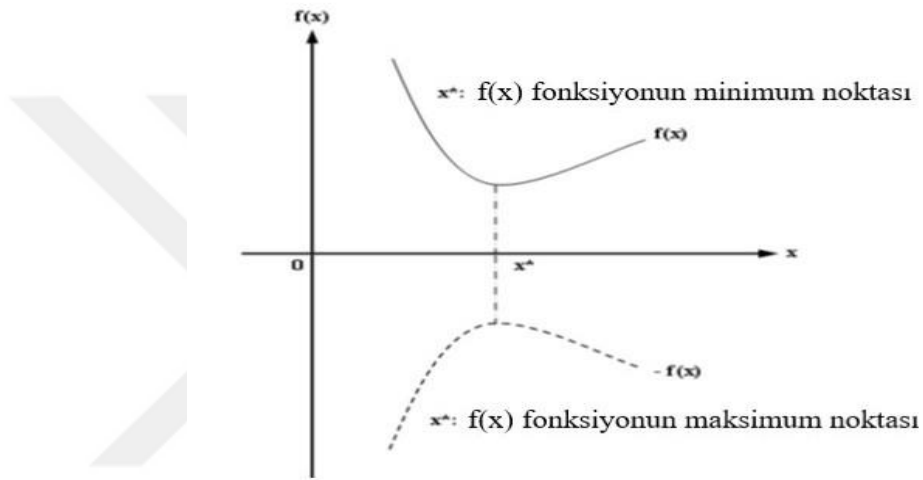
1.3.1.4. Amaç Fonksiyonun Belirlenmesi

Yapılan tasarımlar için çeşitli kabul edilebilir çözümler vardır. Bu tasarım çözümlerini kıyaslanabilmesi amacıyla belirli bir parametre belirlenmelidir.

Genelde uygulamada belirlenen parametreler, tasarım değişkenlerini içeren skaler bir fonksiyon olarak belirlenmektedir. Tasarım değişkeni içeren skaler bir fonksiyon olarak tanımlanan bir parametre, problemin yapısına göre maksimize veya minimize yapılması

gereken amaç fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır. Tasarım değişkenlerinden doğrudan veya dolaylı olarak etkilenmiş amaç fonksiyonu için geçerli ve doğru bir amaç fonksiyonu olduğu söylenebilir.

Böyle bir durum gerçekleşmediyse amaç fonksiyonu yeniden düzenlenmelidir. En iyi nümerik rakamlar amaç fonksiyonu için kullanıldığında elde edilen çözüm optimize edilmiş bir tasarımıdır. Amaç fonksiyonunun minimum ve maksimum noktası Şekil 1.18’de gösterilmiştir.



Şekil 1.18. Amaç fonksiyonunun minimum ve maksimum noktası

Uygun amaç fonksiyonunun seçimi tasarım süreci içinde çok önemlidir. Maliyet, sürdürülebilirlik, enerji tüketimi, zaman tasarrufu gibi parametreler amaç fonksiyonu olarak seçilebilmektedirler.

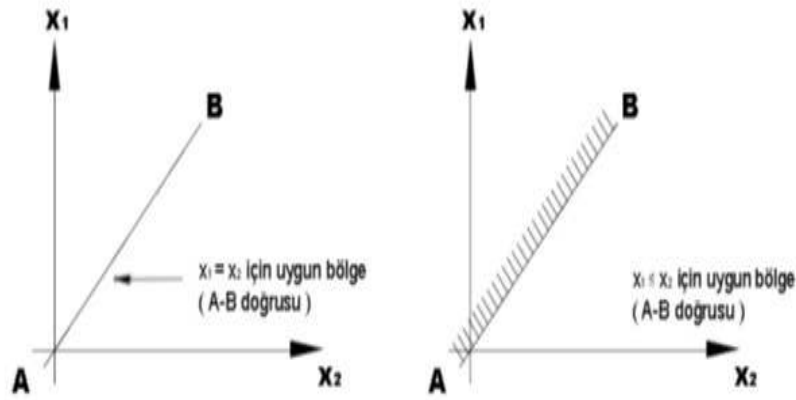
Tasarım optimizasyonu için bazı problemlerde tek amaç fonksiyonu belirlenirken, bazı problemlerde ise birden fazla amaç fonksiyonu belirlenebilmektedir. Bazı tasarım problemleri için ise amaç fonksiyonun ve tasarım değişkenlerinin belirlenmesi gerçekten zordur.

Bu durumda mühendislik becerilerimizi ve tecrübelerimizi kullanarak değişkenleri tanımlamalıyız ve amaç fonksiyonunu oluşturmalıyız. Tasarım problemleri karmaşık ve kapsamlıysa, tasarım problemi alt problemlere bölünerek çözüm kolaylığı sağlanabilir.

1.3.1.5. Kısıtların Belirlenmesi

Bir tasarım ile alakalı sınırlamaların tümü kısıt olarak adlandırılır. Tasarıma ait kısıtların belirlenmesi ve tanımlanması optimizasyon formülasyonun son adımıdır. Gerçek hayatta kullanılan sistem ve yapılar, belirli bir kaynak kullanılarak ve ihtiyaç olan bir performans beklentisi içinde imal edilmektedir. Optimum sonuç elde edilmek için kısıtların nümerik değerlerinde değişiklik söz konusudur. Bu yüzden tasarıma ait kısıtlar, tasarım değişkenlerine bağlı olmalı ve en az bir adet olmak üzere tasarım değişkeninin fonksiyonu da olmalıdırlar.

Tasarım problemleri eşitlik ve eşitsizlik içeren sınır koşullarına sahip olabilirler. Eğer eşitlik içeren tüm sınır koşulları sağlanıyor ise bu tasarım uygulanabilir bir tasarımdır. Eşitsizlik içeren sınır koşulları ise eşitlik içeren sınır koşullarına kıyasla daha çok uygulanabilir. Eşitlik ve eşitsizlik içeren sınır koşullarına ait uygun bölge tanımlamaları Şekil 1.19'da gösterilmiştir.



Şekil 1.19. Eşitlik ve eşitsizlik içeren sınır koşullarına ait uygun bölge tanımlamaları

1.3.2. Optimizasyon İşleminin Matematiksel İfadesi

Sınır koşullarına sahip olan bir optimizasyon işlemi matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$[X = (x_1, x_2, x_3 \dots x_n)]$: Tasarım değişkenleri

$f(x)$: Amaç fonksiyonu

R^e : Tasarım uzayı

$g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, 3, \dots m$: Eşitsizlik içeren sınır koşulu

$h_j(x) = 0, j = 1, 2, 3 \dots n$: Eşitlik içeren sınır koşulu

Bu optimizasyon problemi, $f(x)$ fonksiyonunu maksimize veya minimize eden $g_j(x)$ ve $h_j(x)$ sınır koşullarına bağlı “X” tasarım değişkenlerinin belirlenmesi olarak ifade edilebilir.

Matematiksel gösterimi ise;

$X^* \in R^e$ için $f(X^*) = \min f(X)$ ya da $f(X^*) = \max f(X)$

Tasarım değişkenlerinin toplam sayısı “e” ve sınır koşullarının toplam sayısı “m” ve “n” olarak kabul edilir ve birbirlerinden bağımsızdırlar.

1.3.3. Yapısal Optimizasyon

Üretilebilirlik, ağırlık ve mukavemet gibi çeşitli performans parametrelerini göz önüne alarak imal edilen sistemler birçok şekilde tasarlanabilirler. Teorik tasarım aşaması sistemin planlamasında büyük öneme sahiptir. Belirlenen sınır koşullarında en düşük kütleli ve yüksek performansa sahip tasarımların oluşturulması çok önemlidir. Bu tasarımların oluşturulmasında yapısal optimizasyon teknikleri önemli birer araçtır.

Yapısal optimizasyon süreci amaç fonksiyonlarının, sınır koşullarını sağlayacak şekilde amaç fonksiyonun optimize edilmesini hedeflemektedir. Bu süreçte optimizasyon işlemini gerçekleştirmek ve tasarımı görsel olarak meydana getirmek amacıyla geometrik modelleme araçlarına (CAD), problemin çözümünü yapmak için ise yapısal analiz yazılımlarına (CAE) ve optimum tasarıma ulaşılması için hedefe yönelik bir algoritmaya ihtiyaç vardır.

Tasarlanan geometriyi tanımlamak için kullanılan tasarım değişkenlerinin tiplerine göre yapısal optimizasyon teknikleri sınıflandırılabilir. Amaç fonksiyonu ve kısıtlar, tasarım değişkenleri tarzında tanımlanabilen fonksiyonlar olarak tanımlanabilmelidir.

Tasarım tipi sayısını artırabilmek için, tasarım değişkenleri tarafından kontrolü sağlanan yapısal niteliklere göre boyut, şekil veya topoloji optimizasyonu teknikleri kullanılabilir.

Yapısal optimizasyon teknikleri, tasarımın belirlediği sınır koşullarını ve kısıtları dikkate alarak yapılan tasarımın şeklini, boyutunu ve topolojisini yapı optimum özellikleri kazanıncaya kadar değiştirmektedir.

Yapısal optimizasyon yöntemleri yukarıda da ifade edildiği gibi 3 ana başlık altında incelenebilir:

- Boyut optimizasyonu: Yapısal optimizasyon türleri arasındaki en basit algoritmaya sahip yöntemdir. Bu yöntemde tasarımda şekil ve topolojide değişiklik yapılmaz. Yapılan değişiklik sadece boyutsal ölçülerdedir. Bu yüzden optimizasyon algoritmasının hedefi, en optimum yapısal davranışı gösteren tasarımın boyutlarını ifade eden genişlik, yükseklik, atalet momenti ve kalınlık gibi tasarım değişkenlerinin belirlenmesini amaçlamaktadır.
- Şekil optimizasyonu: Yapının topolojisi sabit tutulmak şartıyla, geometrisi en iyi olan optimum yapısal tasarımı sağlamaya çalışmaktadır. Tasarım değişkenleri, tasarımın şeklini ve geometrisini kontrol etmektedir bu sayede yapının şeklini ve geometrisini tasarım değişkenlerinin her bir değeri belirler.
- Topoloji optimizasyonu: Bu yöntemde tasarımın daha iyi hale getirilmesi için belirli bir tasarım uzayı içinde bulunan malzemenin dağılımı, yeni sınırlar oluşturacak tarzda değiştirilmektedir. Tasarımın topolojisini tasarım değişkenleri tanımlamaktadır. Bu yöntem, tasarım uzayı içinde bulunan malzemenin sayısının, şeklinin, boyutunun, konumlandırılmasının ve malzeme boşluklarının belirlenmesi için kullanılabilecek en iyi yöntemlerden biridir. Başka bir deyişle topoloji optimizasyonu önceden tanımlanan sınır koşullarına göre amaç fonksiyonunu sağlayan yapısal biçimin oluşturulması işlemine denir.

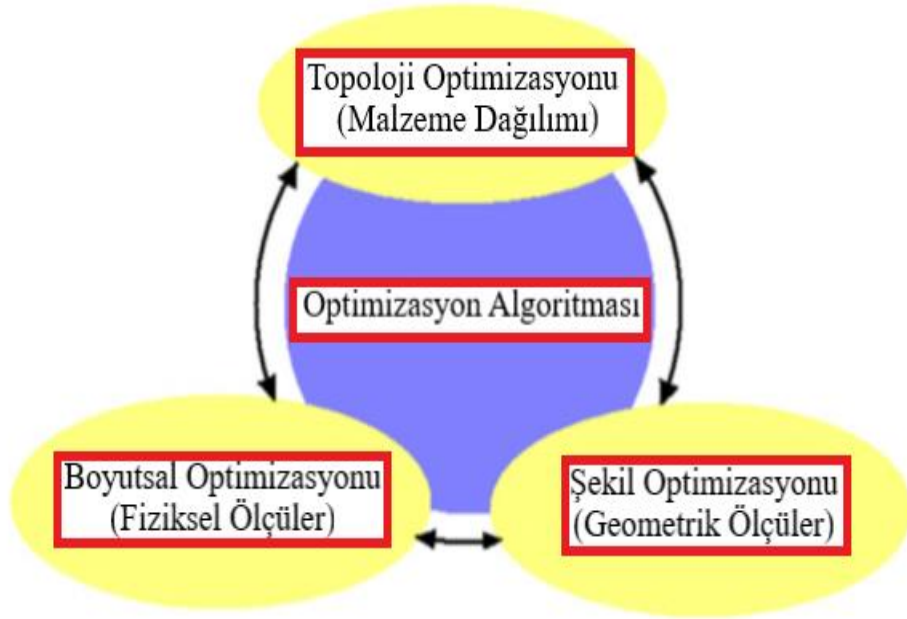
Tasarımın topolojisi, boyut ve şekil optimizasyonu yöntemlerinde önceden belirlenir.

Bu yöntemler, kavramsal tasarımla önceden belirlenmiş kısıtlar içinde tasarımın geometrisini ve boyutlarını değiştirerek optimum hale ulaşılmasını hedeflemektedir. Bu yüzden şekil optimizasyonu yönteminde mevcut tasarımın sınırlarında herhangi bir değişiklik yapılamaz.

Elde edilen sonuçlar yalnızca kavramsal tasarımdan elde edildiği için optimum olmaktan uzaktır. Bu yüzden boyut ve şekil optimizasyonu için daha kaliteli sonuçlar elde edilmek isteniyorsa optimizasyon işlemine en iyi topolojiye sahip olan kavramsal tasarım ile başlanması optimum sonuca ulaşma olasılığını artıracaktır.

Malzeme yoğunlukları ve doğrultuları topoloji optimizasyonu döngüsü içinde iki farklı aşama içinde tanımlanır. İlk aşamada tasarım uzayı içinde malzeme yerleşimi belirlenir.

İkinci aşamadaysa topolojinin yapısal direngenliği belirleyen bölgesel dağılımı tanımlanır. İlk iki aşamanın sırasıyla gerçekleşmesinden sonra tasarımımızın şekil ve malzeme dağılımının geometrik olarak optimizasyonu sağlanmış olur. Bunun nedeni bölgesel malzeme dağılımının yapının direngenliği doğrudan etkilemesidir. Boyut ve şekil optimizasyonu yöntemlerinin kullanılması, en iyi topolojiye sahip tasarımın elde edilmesinden sonra başlar. Boyut ve şekil optimizasyonu yöntemleri de tasarım uzayındaki bölgesel geometrileri ve fiziksel ölçüleri doğrudan etkilediği için direngenliği de artırır. Bu sayede her iki yöntem kendi içlerinde birbirlerini tamamlamaktadır. Birleştirilmiş optimizasyon yöntemleri Şekil 1.20’de verilmiştir.



Şekil 1.20. Birleştirilmiş optimizasyon yöntemleri

1.4. Topoloji Optimizasyonu

Günümüz dünyasında pazar ihtiyaçlarını karşılamak, yüksek kaliteli ürünler üretmek çok önemlidir. Ama daha da önemlisi bu yüksek kaliteli ürünleri kısa zamanda ve düşük maliyetle üretmektir. Tam olarak bu aşamada yeni ve işlevsel tasarım yaklaşımlarına ihtiyaç vardır.

Endüstriyel alanda ürün geliştirme süreci önemlidir. Ürün performansı ve üretim maliyetleri ürün geliştirme sürecinde önemli parametrelerdir. Bu parametreler dikkate alınarak optimum tasarıma ulaşılmaktadır. Elde edilen bu optimum tasarımın ekonomik olarak üretilebilir olması, mümkünse kompleks şekiller yerine basit ve sade şekillere sahip olması tercih edilir.

Topolojik tasarım teknolojileri ilk kez kullanıldığından beri yıllar içinde sürekli geliştirilmiş bugün fark etmesek de endüstride birçok alanda ve günlük hayatımızda kullanılmaktadırlar.

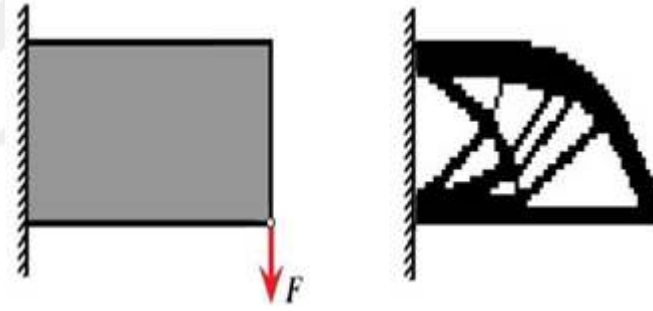
Daha önce de bahsettiğimiz ürün performansı ve üretim maliyetleri direkt olarak bir ürünün topolojisinden etkilenmektedir. Bu yüzden son yirmi yıl içinde, yapısal elemanların optimum topolojilerini ortaya çıkarmak için çalışmalar yapılmıştır. Optimum topolojide tasarımın şekli malzeme yoğunluğu tarafından belirlenir. Optimum topolojide tasarımın geometrisi ise bilgisayar destekli analizler sonucu belirlenebilir.

İlk aşamada belirlenen kavramsal tasarımların topolojileri optimum değil ise iki istenmeyen durum ortaya çıkabilir. Bunlar uygun olamayan yapısal tasarım ve yüksek üretim maliyetleridir. Eğer optimum topolojiye sahip tasarımlar oluşturulduysa, tasarım amaçlarına daha hızlı, doğru ve kaliteli şekilde ulaşılabilir. Bu yüzden yapısal dağılımı doğru olarak belirlemek ürün geliştirmenin ilk aşamalarında oldukça önemlidir.

En genel yaklaşımla, sürekli yapıların optimizasyonu, tasarım uzayında malzeme olsa da olmasa da her bir noktadaki yapı elemanının bulunmasını sağlamalıdır. Kullanılan sonlu elemanlar ile analiz yöntemi ile de yapıya ait her bir eleman ya boşluk (malzemesiz alan) ya da yapısal eleman olarak ifade edilmektedir. Bu durumda tasarımın ilk aşamalarında, yapının topolojisi değişkendir ve genel formülasyon malzeme dağılımının belirlenebilmesine izin vermelidir. Bu şekilde formüle edilen topolojik tasarım problemleri, doğası gereği bölünmüş ya da parçalanmış optimizasyon problemleridir (Bendose, Sigmund, 2003).

Sürekli sistemler için izotropik malzeme yoğunluğunun belirli sınırlar içinde değer tahmininin yapıldığı yöntemler ile, optimum tasarımların klasik “siyah-beyaz” tasarımlar şeklinde yönlendirildiği yöntemler beraber kullanılabilir. Her iki yöntemde de malzeme yoğunluğu “0” ile “1” arasında değer alır ve yoğunluğun ara değerleri için de fiziksel tasarım denemeleri yapılabilir (Bendose, Sigmund, 2003).

Topoloji optimizasyonuna ait bir örnek Şekil 1.21’de verilmiştir. Şekilden de anlayabileceğiniz gibi, optimizasyon problemi bir kütle kısıtına bağlı olarak direngenliği maksimize etmeye çalışılmıştır. Şekilden de anlaşılacağı üzere kiriş ankastre bağlanmıştır. Optimizasyon açısından bakıldığında tasarım uzayı, kirişin gri olarak gözüken malzeme bölgesidir. Ayrıca bu bölge homojendir ve yoğunluğu sabittir. Optimizasyon işlemiyle sınır koşullar sağlanarak amaç fonksiyonu optimize edilmeye çalışılır. Bu sayede malzeme dağılımı ve miktarı ayarlanacaktır.



Şekil 1.21. Ankastre kiriş optimizasyonu

Yukarıda kısa bahsedilen topolojik tasarım yaklaşımı yöntemi yaygın olarak temel yapı yaklaşımı olarak da bilinmektedir.

Sisteme etkiyen tüm kuvvetleri ve sınır koşullarını bir bütün olarak gören optimum yapı, tasarımın en başında seçilen bütün bağlantı elemanlarının bir alt kümesi olarak ortaya çıkmaktadır. Eğer her bir düğüm noktasının konumu, tasarım değişkeni olarak seçilmez ise kaliteli bir topolojik tasarım ortaya çıkarmak için normalden fazla düğüm noktası kullanılmalıdır. Düğüm noktaları miktarı tasarım değişkeni olarak belirlenmezse, bu metot standart bir boyut belirleme yaklaşımı olarak ortaya çıkar.

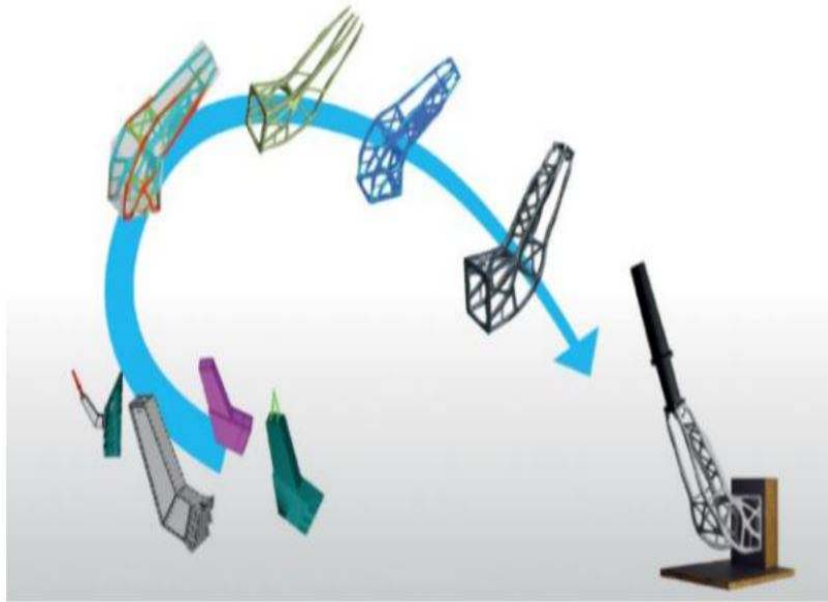
Genel olarak da devamlı yapıların topolojik tasarım problemlerinde sonlu elemanlar ile modellenmiş belirli bir tasarım uzayında, malzemenin optimal yoğunluk dağılımının ne olacağının karar verilmesinde kullanılır.

Topoloji optimizasyonundaki asıl amaç rijitliği maksimum yapan en iyi malzeme dağılımını bulmaktır.

Topoloji optimizasyonu yaparken başlıca şu hususlara dikkat edilmelidir:

- Optimizasyonu yapılan tasarımın dış boyutlarında herhangi bir değişiklik yapılmamalıdır.
- Tasarımın direngenliğini artırmak için belirli bölgelerden malzeme çıkarılmalıdır.

Son yıllarda teknolojinin gelişmesi ve bilgisayar programlarının sayesinde, topoloji optimizasyonunun kullanım alanları artmıştır. Özellikle uzay çalışmaları, havacılık, otomotiv, inşaat vb. sektörlerde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem lineer hem de non-lineer alandaki yapısal problemlerin çözümünde topolojik tasarım yaklaşımı kullanılmaktadır. Önümüzdeki yıllarda ise uygulama alanı sayısında ise ciddi şekilde artış beklenmektedir. Şekil 1.22’de bir uzay uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 1.22. RUAG Uzay için anten destek kolu için tasarım süreci (Khai, L., 2017).

İlk yapısal tasarım denemeleri topolojik olarak kafes sistemleri üzerinde denenmiştir.

Kafes sistemleri düşük hacimsel oranlı yapılar olarak da adlandırılırlar. 20. Yüzyılın başında Avusturalyalı mucit Mitchell (1904) optimizasyon alanında önemli çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmaların sonucunda yapısal optimizasyon alanında önemli yöntemler ve algoritmalar geliştirmiştir. Mitchell, kafeslerin minimum ağırlık dağılımı üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bunlarla ilgili de optimizasyon kriterleri belirlemiştir. Michell'den sonra ise Rozvany ve ekibi kafes sistemlerini ele almıştır. Michell'in çalışmalarını incelemiş, genişletmiş ve geliştirmişlerdir. Bu çalışmaların sonucunda Rozvany ve Prager (1977) en iyi yerleşim teorisini (optimal layout theory) geliştirmişlerdir.

Yapısal analizde topoloji optimizasyonu önemlidir. İlk yapılan çalışmalarda yapısal analiz için sonlu elemanlar analiz yöntemleri kullanılmıştır. Bu denemelerde optimal yapısal şekiller sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Daha iyi sonuçlar elde etmenin kullanılan ağ yapısının miktarına bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Topoloji optimizasyonunda nümerik yöntemlerde çokça kullanılan yöntemlerdir. Nümerik yöntemlerle ilgili ilk çalışmalar 1988 yılında Bendose ve Kikuchi tarafından yapılmıştır. Bendose ve Kikuchi, sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyon yaklaşımını ilk çalışan bilim adamları olmuşlardır. Yaptıkları çalışmalarında katmalı malzeme modelini kullanmışlardır. Katmalı malzeme modelinin, optimizasyondan sonra tasarım uzayı incelendiğinde malzemenin farklı doğrultularında farklı malzeme yoğunlukları veya boşluklar içerdiğini tahmin etmişlerdir. Optimizasyon problemini ise boşlukların optimal dağılımına göre çözümlenmişlerdir.

Bir başka ifadeyle Bendose ve Kikuchi, "homojenizasyon" yönteminden yararlanılmasını önermişlerdir. Homojenizasyon yöntemi önceden belirlenmiş bir tasarım uzayında, hücresel mikro yapıların homojenizasyonunu hedefleyen optimal malzeme dağılımının belirlenmesi olarak açıklanabilir. Bu metot, makroskopik yapı elemanlarının özelliklerinin bulunmasında kullanılmıştır. Ayrıca mikro yapı elemanlarıyla, makroskopik yapı elemanlarının arasındaki bağlantının bulunması amacıyla da kullanılmıştır.

Suziki ve Kikuchi (1991), homojenizasyon yöntemini kullanarak lineer elastic düzlemsel yapıların direngenliği üzerine bilimsel çalışmalar yapmışlardır. Aynı yöntem ile Diaz ve Bendose (1992) ise birden çok yüklemenin bulunduğu sistemlerde optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir.

Yang ve Chuang (1994), yapısal topolojinin belirlenmesi amacıyla yoğunluk yöntemini kullanmışlardır. Bu yönteminin kullanılmasındaki amaç yapının direngenliğinin ve en düşük öz değerinin maksimize edilmesidir. Yaptıkları çalışmada tasarım değişkeni olarak her bir elemanın yoğunluğu seçilmekte ve ampirik bir formül vasıtasıyla eleman yoğunluklarının elastisite modülü açıklanmaktadır.

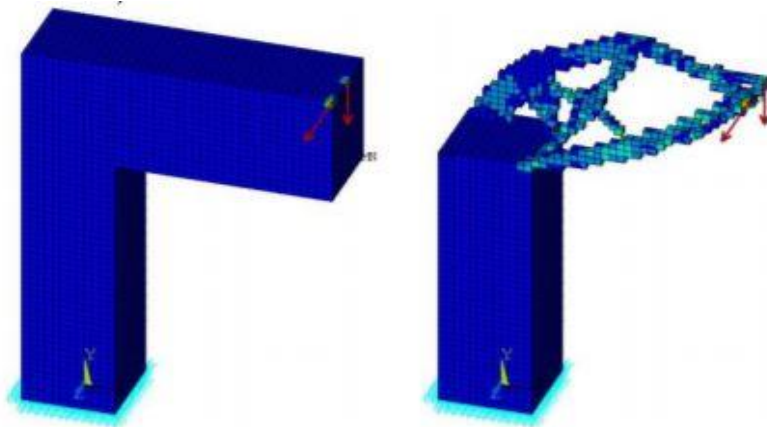
Luo ve Gea (1998), sacların ve plakaların optimum direngen tasarımı hakkında çalışmışlar yürütmüşlerdir.

Nishiwaki ve takım arkadaşları (1998) ve Sigmund (2001), mekanizmalarının tasarımını topoloji optimizasyonu yöntemi ile optimize etmişlerdir.

Lin ve Chou (1999), iki adımdan oluşan ve homojenizasyon yöntemini baz alan bir topoloji optimizasyonu algoritması kullanımını faydalı olabileceğini söylemişlerdir.

Lin ve Chao (2000), topoloji ve şekil optimizasyonu yöntemleriyle optimize hale getirilmiş iki boyutlu yapıların topolojilerinin otomatik olarak yorumlanabilmesi amacıyla bir yöntem ileri sürmüşlerdir.

Topoloji optimizasyonun tüm bu kullanım alanlarının yanında uzay, havacılık, inşaat, otomotiv endüstrilerinde de birçok uygulama alanı bulmuştur. Şekil 4.3’de inşaat alanındaki bir kirişin topoloji optimizasyonu sonucu optimize olmuş hali verilmiştir.



Şekil 1.23. Bir kirişin topoloji optimizasyonu

Zou, Chen, Zhang ve Yang (2006), topoloji optimizasyonu işleminin başlarında üretilebilirlik kısıtlarını dikkate alan hibrit bir algoritma tasarımı yapmışlardır.

Zuo ve Xie (2015), üç boyutlu topoloji optimizasyonu için yüz satırlık bir kod yazmışlardır. Bu kod hacim kısıtlaması ile optimizasyon işlemini gerçekleştirir. Abaqus programıyla kullanılabilir.

Shoebieri (2019), doğrusal olmayan yapılarda dinamik yükler altında topoloji optimizasyon tasarımı yapmıştır.

Mühendislik problemlerinin çözümünde topoloji optimizasyonu etkili bir yöntem olarak kullanılabilir. Topoloji optimizasyonu ile bir problemin optimum çözümünün bulunması kadar bulunan çözümün de uygulanabilirliği çok önemlidir. Burada uygulanabilirliği sınırlandıran faktör tasarımın üretilebilme kapasitesidir. Standart topoloji optimizasyonu algoritmaları kullanıldıktan sonra meydana gelen optimum tasarım, genellikle karmaşık ve değerlendirilmesi zor verilere ve sınırlara sahiptir. Bu yüzden optimizasyondan sonra meydana gelen verinin değerlendirilmeden üretilmesi pek mümkün değildir. Topolojinin üretim yöntemleri değerlendirilerek oluşturulmasından sonra verinin yorumlanması çok daha doğru bir yöntemdir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Optimizasyon işlemi problemin zorluğuna göre karmaşık ve çözülmesi uzun zaman sürebilir. Bu sorunlar dikkate alındığında karşılaşılan problemlerin bilgisayar yardımıyla çözülmesi zaman tasarrufu sağladığı gibi bulunan çözümün de daha doğru bir sonuç olmasını da sağlar. Optimizasyon problemi birçok yazılım sayesinde kolay bir şekilde modellenilebilmekte, istenilen kısıtlar ve hedef fonksiyonları ise gerçeğe yakın bir şekilde tanımlanabilmektedir.

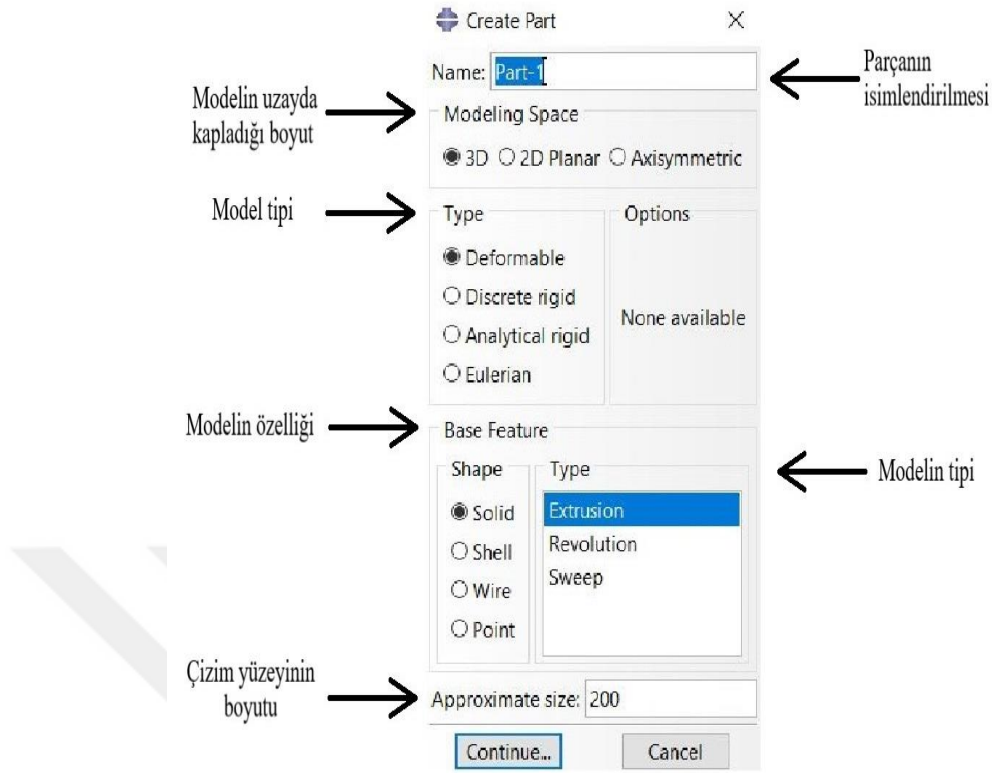
Optimizasyon problemleri için çokça yazılım programları geliştirilmiştir. İnşaat mühendisliğinde kullanılan ve optimizasyon işlemi yapmamızı sağlayan bazı programlar: ABAQUS, ANSYS, MATLAB vb. Bu programlara tasarım gibi farklı amaçlarda da yardımcı olabilen Pro/Engineer, Solidworks, AutoCAD programları da en çok kullanılan programlardır.

Tezimizde kullanılmak üzere ABAQUS/CAE programı tercih edilmiştir. Bunun nedeni ABAQUS/CAE programının tasarım kısmının rahatlıkla yapılabilmesi, optimizasyon işlemlerinin rahatlığı ve en önemli nedeni ise inşaat mühendisliğinde çok fazla kullanılmayan bu program vasıtasıyla farklı bir pencereden optimizasyon problemin irdelenmesi ve çözülmeye çalışılmasıdır.

2.1. Part Modülü

Bu modülde yeni bir model oluşturabilmek amacıyla *New Model Database* butonuna tıklanmalıdır. Bu işlem adımı yapıldıktan sonra *Create Part* bölümü ortaya çıkar. Bu bölüm problemin modellenmesi için Şekil 2.1’de gözüktüğü üzere seçenekler sunmaktadır.

Parçanın isimlendirilmesi, eğer tek bir parça ile değil de birden fazla parçayla çalıştığımız durumlarda daha kolay işlem yapmak için her bir parçayı adlandırmak faydamıza olacaktır. Modelin uzayda kapladığı boyut, tamamen incelenen modelle alakalıdır. Model üç boyutlu ise *3D*, iki boyutlu ise *2D Planar* ve tek boyutlu ise *Axisymmetric* seçeneği tercih edilmelidir. Modelin özelliği, tasarlanmak istenilen modelin tipi katı ise *Solid*, kabuk ise *Shell*, ince kiriş ya da çubuk ise *Wire*, noktalardan oluşuyor ise *Point* seçeneği tercih edilmelidir.

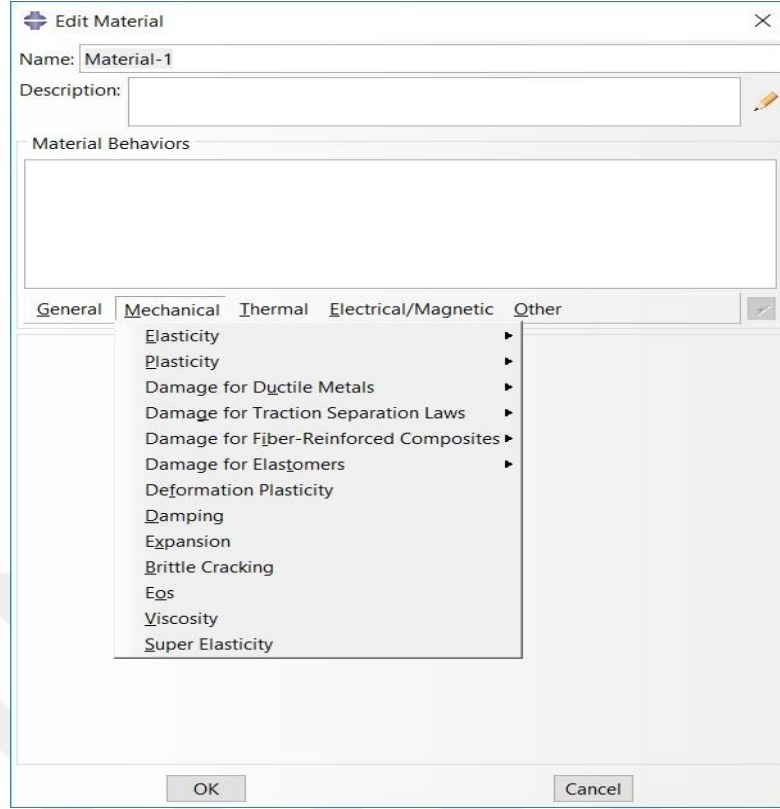


Şekil 2.1. ABAQUS “Create Part” model penceresi

Modeli oluşturma yönteminde dikkat edilecek nokta model tipinin ne olduğudur. Model tipine göre *Deformable*, *Discrete rigid*, *Analytical rigid* ve *Eularian* seçilebilir. ABAQUS programı çizimin rahat bir şekilde yapılabilmesi amacıyla çizim yüzeyini dilimlere ayırır. Ancak her bir dilim arasındaki mesafeyi çizim yüzeyinin boyutu seçeneğinden kullanıcı tarafından yapılmalıdır.

2.2. Property Modülü

Part modülünde modelleme işlemi tamamlandıktan sonra bu modülde analiz sırasında kullanılacak olan malzemenin özellikleri tanımlanır. Tanımlama işlemi *Create Material* butonuna basıldıktan sonra Şekil 2.2’de görüldüğü üzere malzemenin cinsi ve davranışı seçeneklerden seçilmelidir. Malzemenin genel, mekanik, termal, elektriksel/manyetik ve diğer davranışları buradan tanımlanabilir.



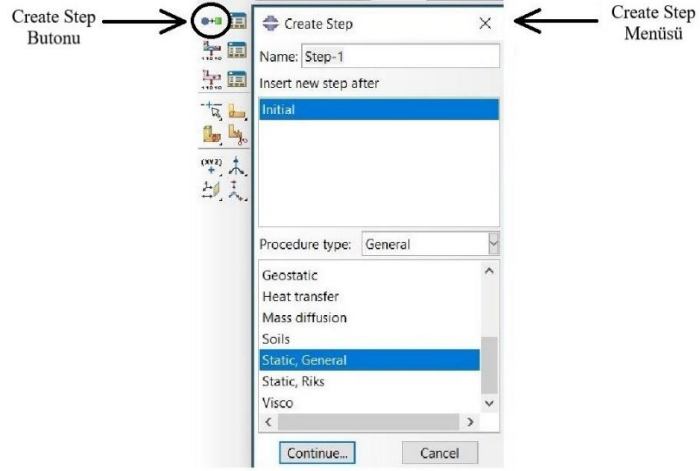
Şekil 2.2. Malzeme özellikleri tanım penceresi

2.3. Assembly Modülü

ABAQUS/CAE programı makine mühendisliği alanında çok fazla tercih edilen bir programdır. Çünkü farklı parçaların entegre edilmesi ya da montajı bu programda rahatlıkla sağlanabilir. Assembly Modülü parçaların konumlandırılması işlemine olanak sağlar. Birden fazla parçalarla çalışıldığında montaj kısmı bu modülde gerçekleştirilir.

2.4. Step Modülü

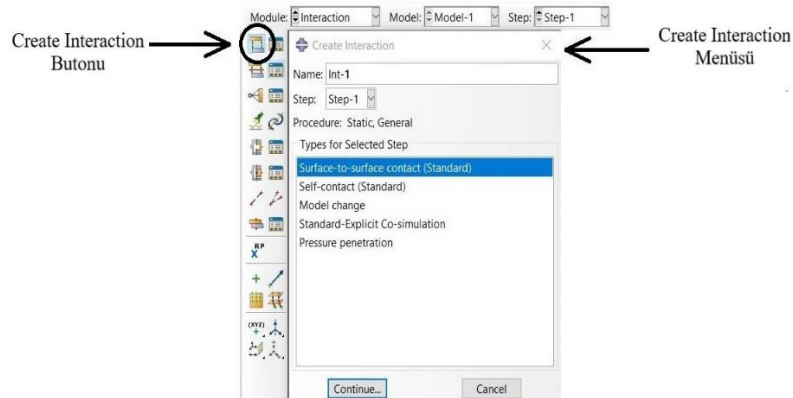
Step modülünde analizin ne tür bir analiz olduğu seçilir, takip edilecek işlem adımları ve süreleri programa tanımlanır. Şekil 2.3’de gösterildiği gibi birçok analiz tipi için seçenekler sunulmuştur. Yeni bir işlem adımı oluşturmak için *Create Step* butonu kullanılmalıdır. Step modülü ilerleyen işlem adımlarında sınır koşullarının ve yüklemelerin tanımlanması esnasında kullanılacaktır.



Şekil 2.3. Create step butonu ve menüsü

2.5. Interaction Modülü

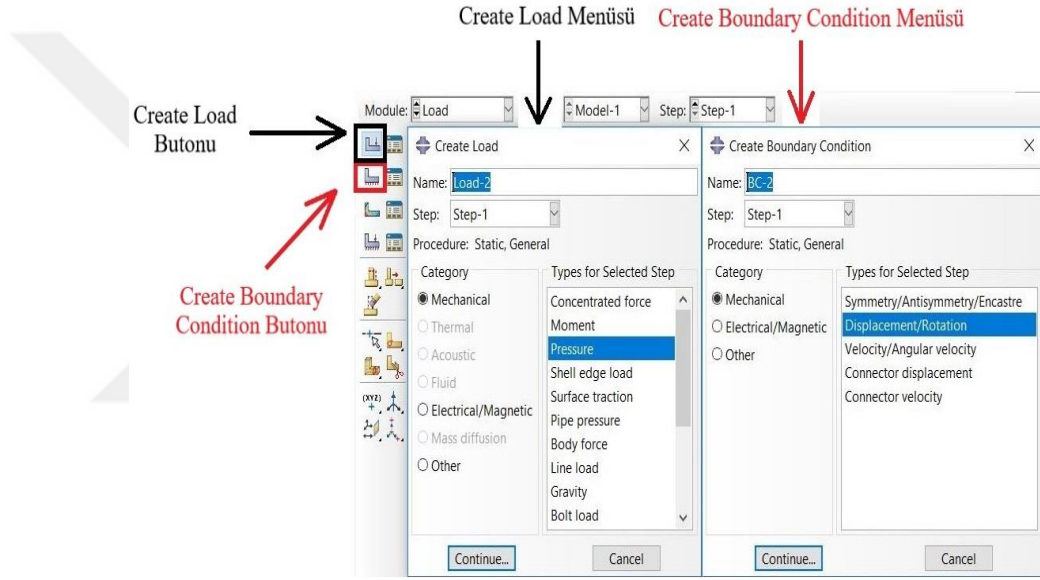
Interaction modülü, modülümüzde birden fazla parça var ise ve bu parçalar etkileşim halinde ise kullanılır. Parça yüzeylerinin birbirleri ile olan etkileşimleri ve yüzeylerin arasında bulunan sürtünme kuvvetleri tanımlanır. Örneğin makine mühendisliğinde makine parçaları arasındaki bağlantılar, bu bağlantılar aralarında oluşan kayma ve itme kuvvetleri bu modülde tanımlanır. Şekil 2.4’de gösterildiği gibi Interaction modülünde yeni bir etkileşim yaratmak için *Create Interaction* butonu kullanılır. Burada aralarındaki etkileşim türü tanımlanır.



Şekil 2.4. Create interaction butonu ve menüsü

2.6. Load Modülü

Load modülünde, Şekil 2.4’de görüldüğü gibi sistemimize gelecek yüklemelerin cinsi ve değerlerini ve Şekil 2.5’de görüldüğü gibi sınır şartlarını tanımlayabiliriz. Load modülünde tanımlama yapmaya sınır şartlarından başlamak analiz kolaylığı açısından daha mantıklı bir tercih olacaktır. Sınır şartlarını *Edit Boundary Condition* butonu kullanarak tanımlayabiliriz. Sınır şartları tanımlandıktan sonra *Create Load* butonu kullanılarak sistemimize gelecek yüklemenin cinsi ve daha sonra yüklemenin miktarını tanımlayabiliriz.

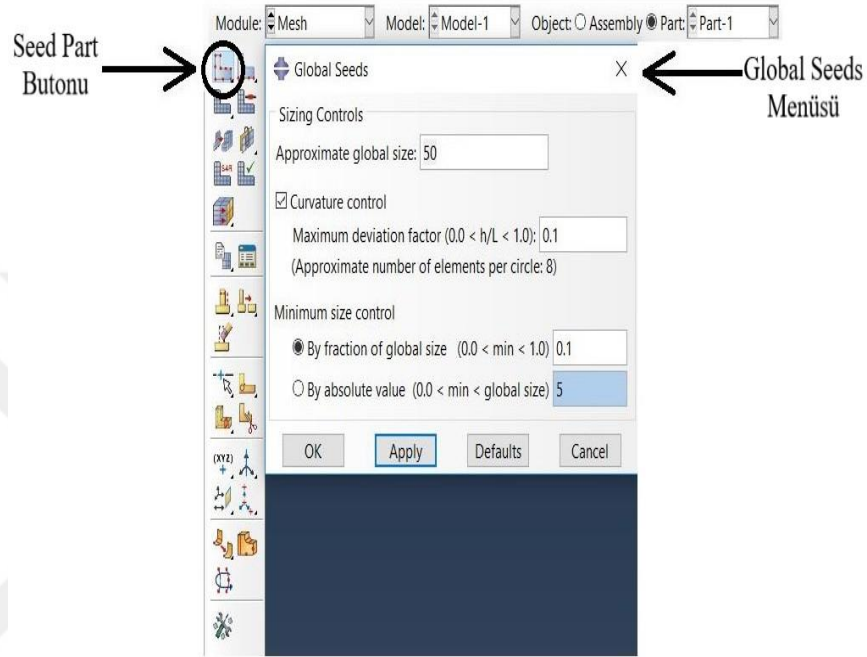


Şekil 2.5. Create load butonu ve menüsü, create boundary butonu ve menüsü

2.7. Mesh Modülü

Mesh modülünde amaç sistemimize bir mesh ağı oluşturmaktır. Mesh, sistemin ya da parçanın küçük sistemlere ya da parçalara bölünmesi olarak da basitçe açıklanabilir. ABAQUS/CAE programı otomatik olarak kendi belirlediği en küçük mesh boyutlarını sunmaktadır. Parçamızı meshlemek için Şekil 2.6’da görüldüğü gibi *Seed Part* butonuna basılmalıdır. Daha sonra mesh aralıklarını *Approximate Global Size* bölümünden ayarlanabilir.

Analizin daha doğru ve kesin sonuçlar vermesi isteniyorsa mesh boyutunu küçültmeliyiz. Ama dikkat edilmelidir ki mesh boyutu küçüldükçe mesh miktarı artacağından analizin çözülmesi çok daha uzun zaman alacağı anlamına gelmektedir. Analiz hızını etkileyen parametreler ise mesh miktarı ve bilgisayar kalitesidir.

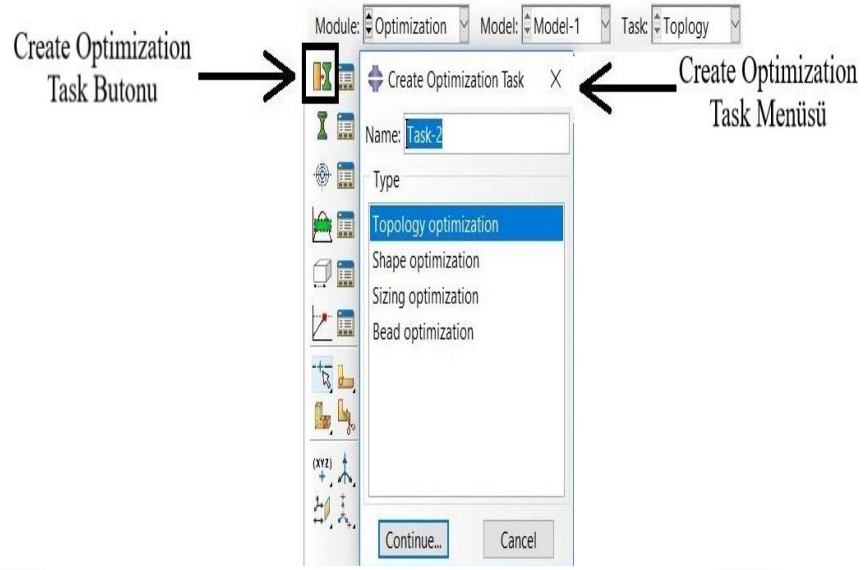


Şekil 2.6. Seed part butonu ve global seeds menüsü

2.8. Optimization Modülü

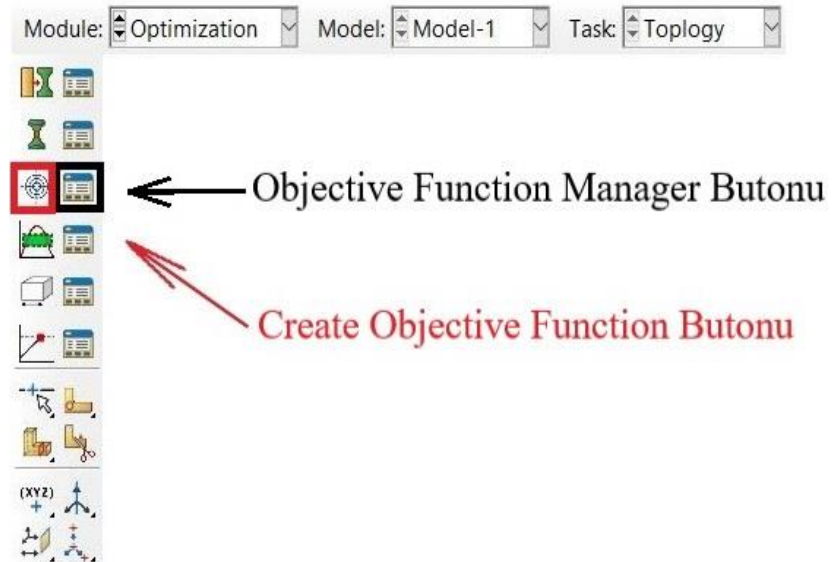
Optimization modülünde, optimizasyonumuzu tanımlayan amaç fonksiyonu ve kısıtları tanımlamaktır. ABAQUS/CAE programı topoloji, şekil, boyut ve tane (bead) optimizasyonlarını gerçekleştirebilir.

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi *Create Optimization Task* butonuna basıldıktan sonra hangi tür optimizasyon yapacağımızı seçebiliriz.



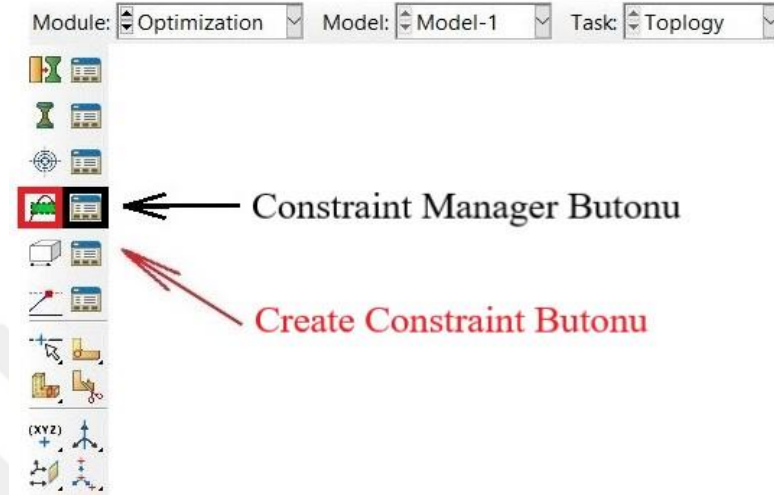
Şekil 2.7. Create optimization task butonu ve menüsü

Seçilen optimizasyon ilgili *Manager* butonundan gerekli düzenlemeler yapılarak oluşturulur. Daha sonra Şekil 2.8’de görüldüğü gibi hedef fonksiyonu *Create Objective Function* butonu tıklanarak oluşturulur ve ilgili *Objective Function Manager* butonuna tıklanarak tanımlama yapılır.



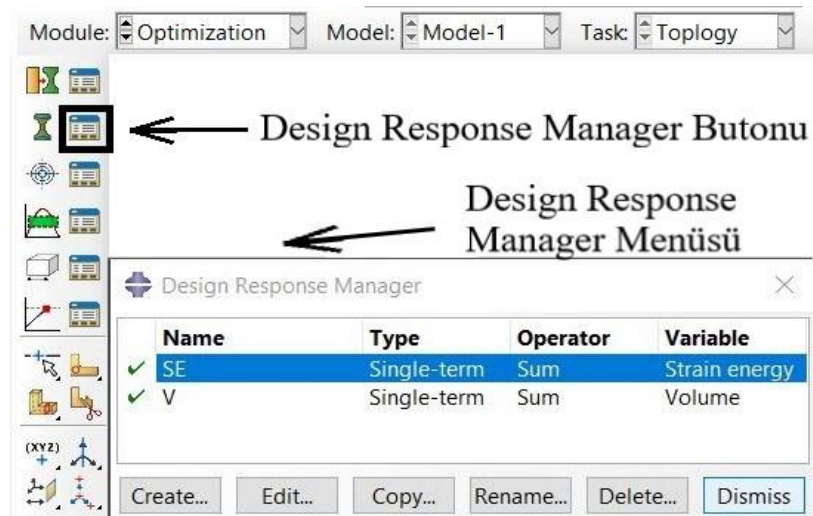
Şekil 2.8. Create objective function ve objective function manager butonu

Hedef fonksiyonu tanımlandıktan sonra Şekil 2.9’da görüldüğü gibi *Create Constraint* butonuna tıklanarak kısıtlar tanımlanır ve daha sonra *Constraint Manager* butonuna tıklanarak tanımlama yapılır.



Şekil 2.9. Create constraint ve constraint manager butonu

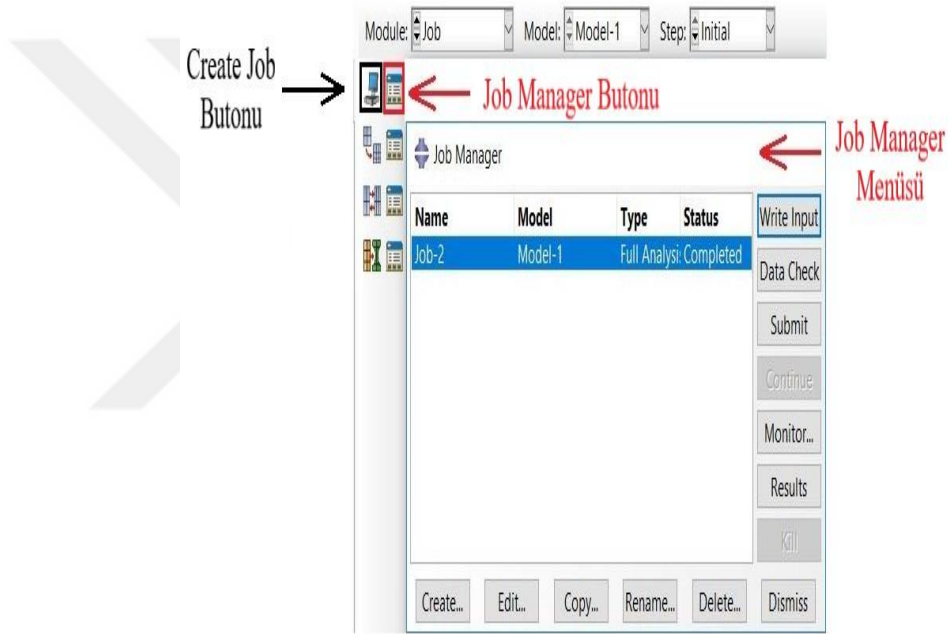
Hedef fonksiyonu ve kısıtlar tanımlandıktan sonra Şekil 2.10’da görüldüğü gibi hedef fonksiyonu ve kısıtlar bir bütün olarak *Design Response Manager* butonuna tıklayarak tanımlanır.



Şekil 2.10. Design response manager menüsü ve butonu

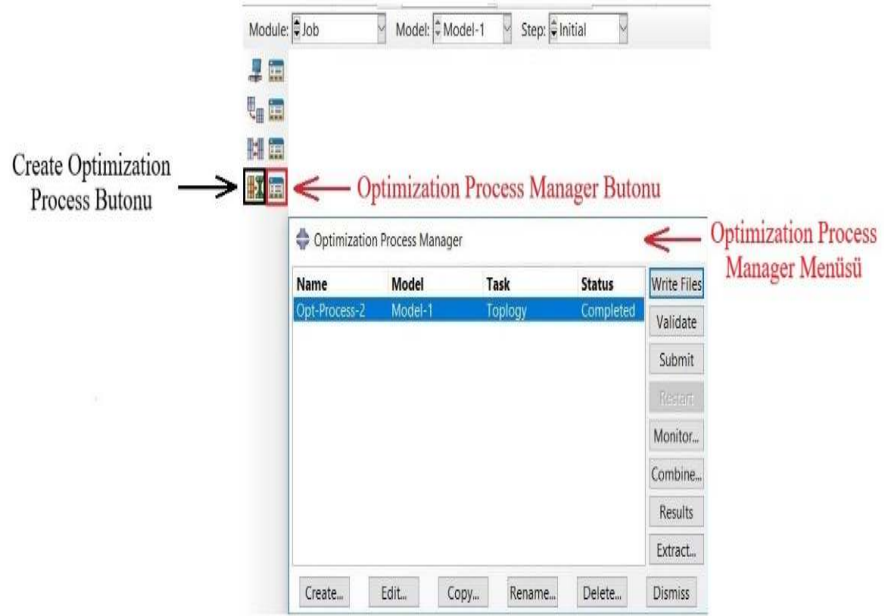
2.9. Job Modülü

Job menüsünde, analize hazır hale getirdiğimiz sistemimizin çözüm aşamasının gerçekleştiği kısımdır. Analizle ilgili bütün ayrıntılar bu bölümde gözlemlenir ve yorumlanır. Analizin ne durumda olduğu, eğer var ise oluşan hataların ya da uyarıların ne olduğu buradan öğrenilir. Şekil 2.11’de gösterilen *Create Job* butonuna tıklanarak analiz özellikleri belirlenir. Daha sonra *Job Manager* butonuna tıklayarak analiz yapıldıktan sonra sonucu görüntüleyebiliriz.



Şekil 2.11. Create job butonu, job manager butonu ve menüsü

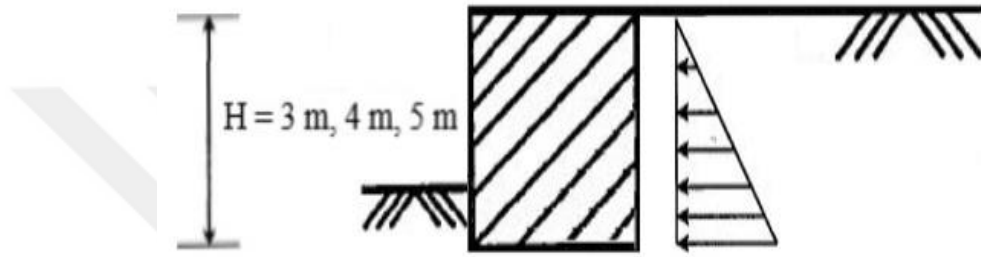
Optimizasyon kısmının analizi yine bu menüden gerçekleştirilir. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi *Create Optimization Process* butonuna tıklanarak optimizasyon analizinin özellikleri girilir. Daha sonra *Optimization Process Manager* butonuna tıklayarak analiz yapıldıktan sonra sonucu görüntüleyebiliriz.



Şekil 2.12. Create optimization process butonu, optimization process manager butonu ve menüsü

3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu çalışmada bir birim ayrıtı 5 m, 4 m ve 3 m olan kare istinat duvarları ABAQUS/CAE programı yardımıyla modellenmiştir (Şekil 3.1). Modellenen sistemler yine aynı programın optimizasyon modülünde, topoloji optimizasyonu kapsamında farklı iterasyonlar ile optimum duruma getirilmeye çalışılmıştır.

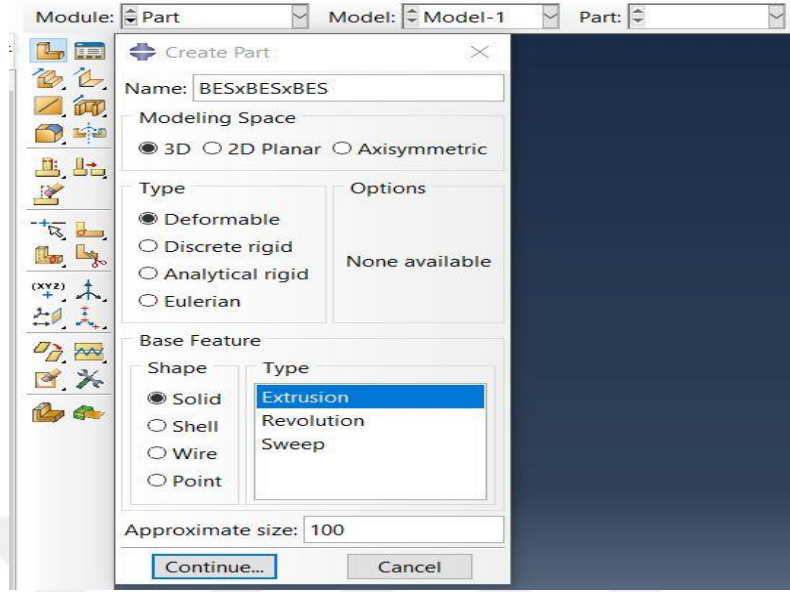


Şekil 3.1. Bir birim ayrıtı 3 m, 4 m ve 5 m olan istinat duvarı

3.1. 5x5x5 m İstinat Duvarının Optimizasyonu

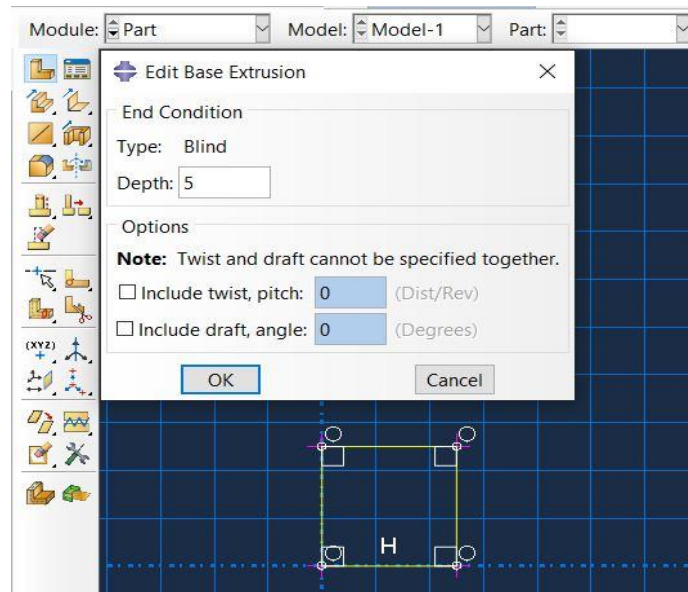
ABAQUS programı başlatıldıktan sonra *Part Modülünden* sistemin genel özellikleri Şekil 3.2’de görüldüğü gibi tanımlanır. Çalışmamız üç boyutlu olduğu için *3D* seçeneği, sistem deformasyonlara açık olduğu için *Deformable* seçeneği, madde biçimi olarak *Solid* ve *Extrusion* ve çizim yapılacak alanın boyutu 100 seçilmiştir. Burada yazılan 100 sayısının anlamı 100 m’dir. Çünkü ABAQUS programı belli bir birim sistemini kullanmadığı için kullanmak istediğiniz birime göre boyut ve özellikleri SI birim sistemini ifade edecek şekilde sisteme tanımlıyoruz. Biz burada SI birim sistemini kullanmayı tercih ettik.

Genel özellikleri girilen sistemin çizim alanında bir ayrıtı 5 m olacak şekilde iki boyutlu olarak çizimi tamamlandıktan sonra Şekil 3.3’de görüldüğü gibi üçüncü boyuta geçmek için derinlik özelliği *Depth* seçeneğine 5 yazılarak üç boyutlu sistem oluşturulmuş olur.

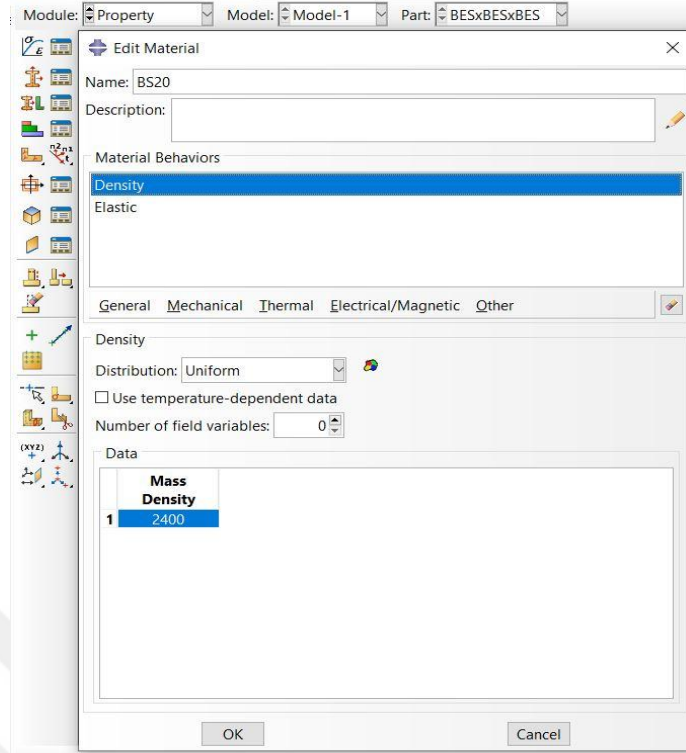


Şekil 3.2. 5x5x5 m olan istinat duvarının genel özellikleri

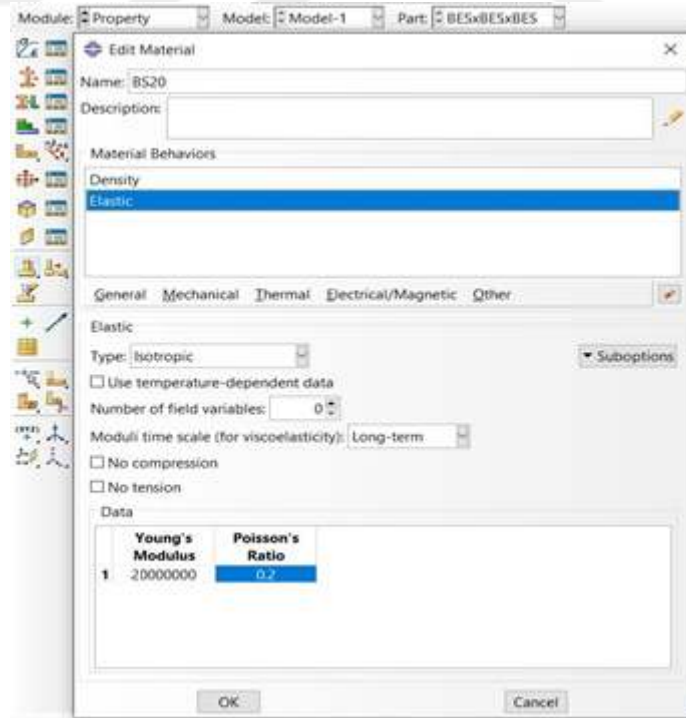
Üç boyutlu olarak tasarımı yapılan sistemin malzeme özellikleri *Property Modülü* kullanılarak tanımlanır. Beton sınıfı olarak BS20 kullanılmıştır. Şekil 3.4’de görüldüğü gibi bir m^3 betonun ağırlığı 2400 kg olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.5’de görüldüğü üzere elastisite modülü 20000000 kN / m^2 ve poisson oranı 0.2 olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.3. 5x5x5 m olan istinat duvarının derinliğin tanımlanması

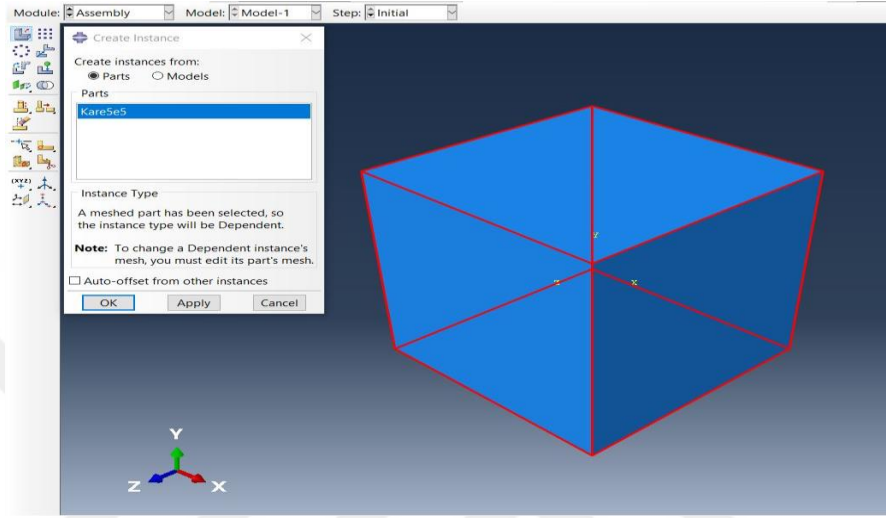


Şekil 3.4. Özgül ağırlığın tanımlanması



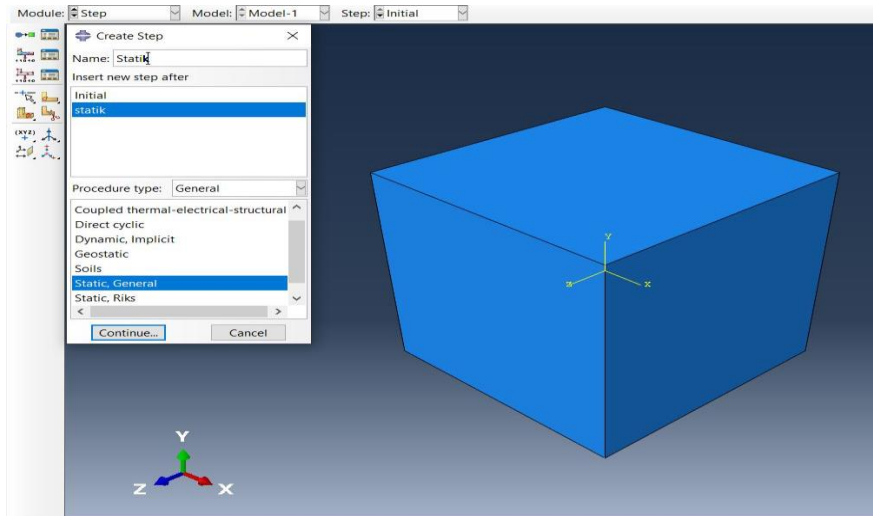
Şekil 3.5. Elastisite modülü ve poisson oranının tanımlanması

Malzeme özellikleri girilen sistemin montajı *Assembly Modülü* kullanılarak tanımlanır. Sistemimizde tek bir montaj modülü vardır. Şekil 3.6’da görüldüğü üzere sistem tek bir parça halinde tanımlanır.



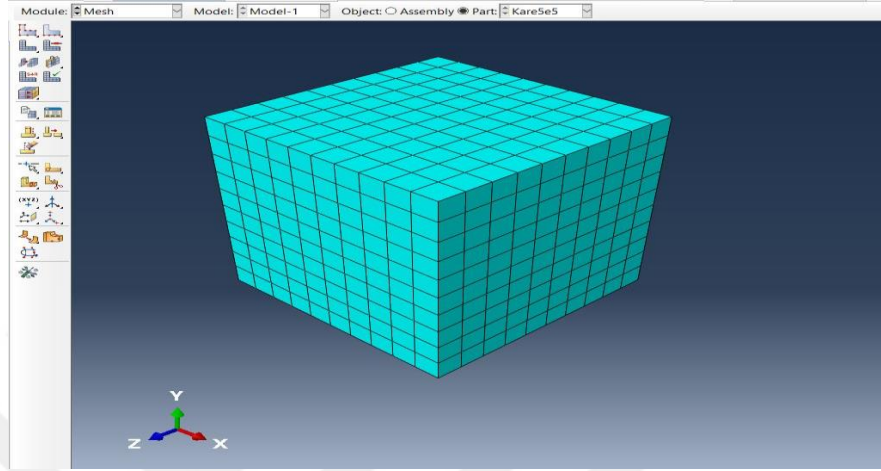
Şekil 3.6. Assembly modülünde montajın yapılması

Montajı yapılan sistemin *Step Modülü* kullanılarak çözüm adımı tanımlanır. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi çözüm adımı genel statik olarak tanımlanır.



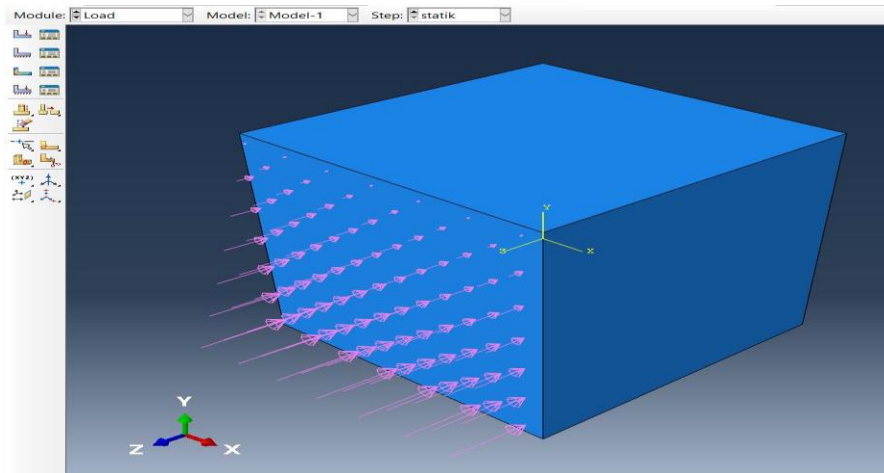
Şekil 3.7. Genel statik olarak çözüm adımının tanımlanması

Çözüm adımı tanımlanan sistemi *Mesh Modülü* kullanılarak eş karelere bölünür. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi daha iyi bir analizin gerçekleştirilebilmesi için bir kenarı 0.5 m olan eş karelere bölünür.



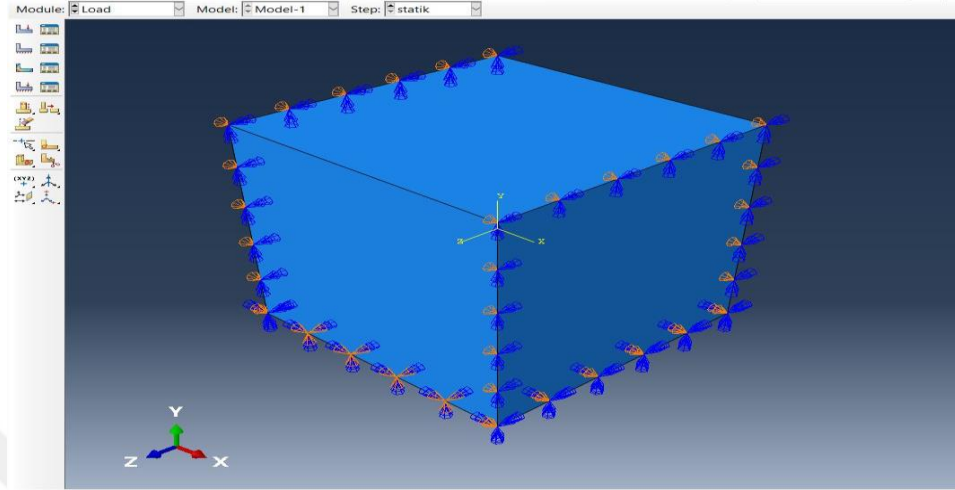
Şekil 3.8. Bir ayrıtı 0.5 m olan eş karelere bölünmüş sistem

Eş karelere bölünmüş sistemi *Load Modülü* kullanılarak yüklemeler ve mesnet sistemi tanımlanır. Şekil 3.9’da görüldüğü gibi sistemde $-z$ yönünde gelen 50 kPa’lık üçgen yayılı yük tanımlanır. Bunun nedeni yüksekliği 5 m olarak tanımlanan istinat duvarının etkileşime girdiği zeminin de birim hacim ağırlığının $10 \text{ kN} / \text{m}^3$ kabul edildiği için 50 kPa değeri kullanılmıştır.



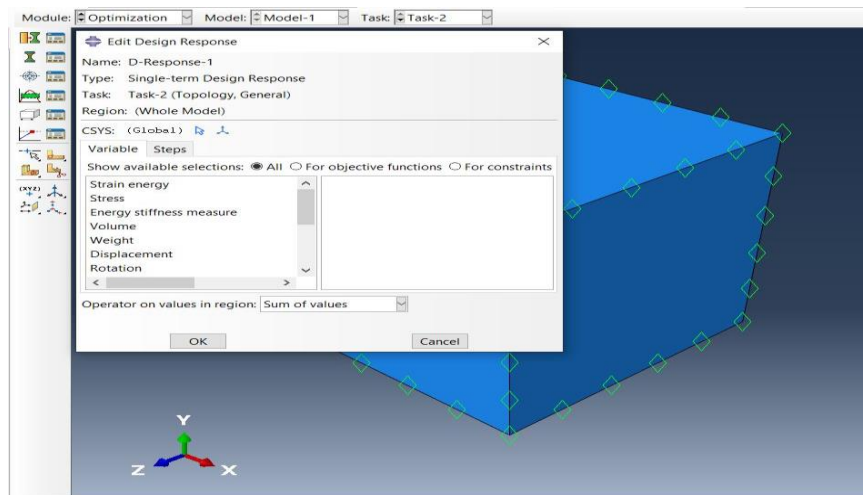
Şekil 3.9. Sistemde tanımlanan $-z$ yönündeki üçgen yayılı

Şekil 3.10'da görüldüğü gibi sistemde tabanda ankastre mesnet ve x yönünde ötelenmeleri engellemek için de mesnet sistemi yerleştirilmiştir.



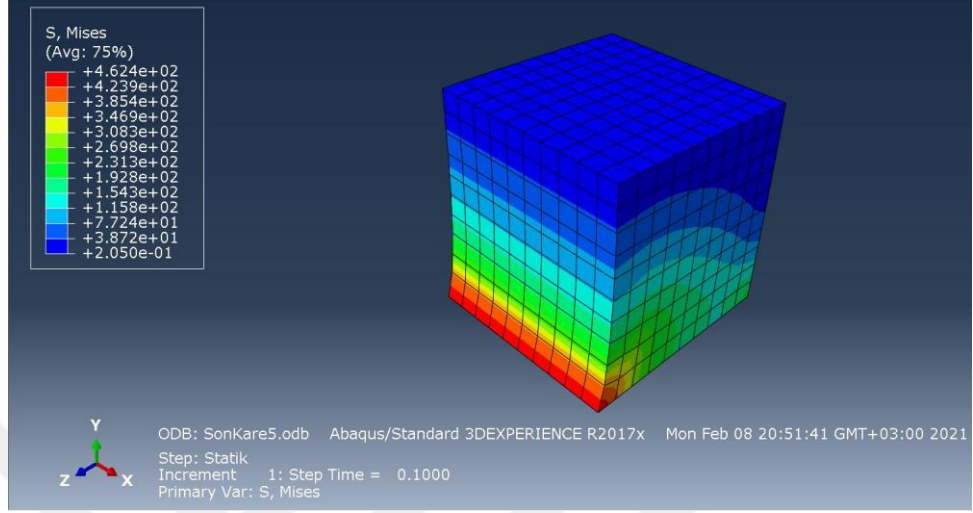
Şekil 3.10. Ankastre mesnet ve x yönünde ötelenmeyi engelleyici mesnet sistemi

Yük ve kısıtlar tanımlanan sistemin *Optimization Modülü* kullanılarak hedef fonksiyonu ve kısıt vektörü tanımlanır. Şekil 3.11'de görüldüğü üzere hedef fonksiyonu olarak *Strain Energy* kısıt fonksiyonu olarak ise *Volume* seçilmiştir. Burada hedef fonksiyonu gerilme enerjisi, kısıt fonksiyonu ise hacimdir.



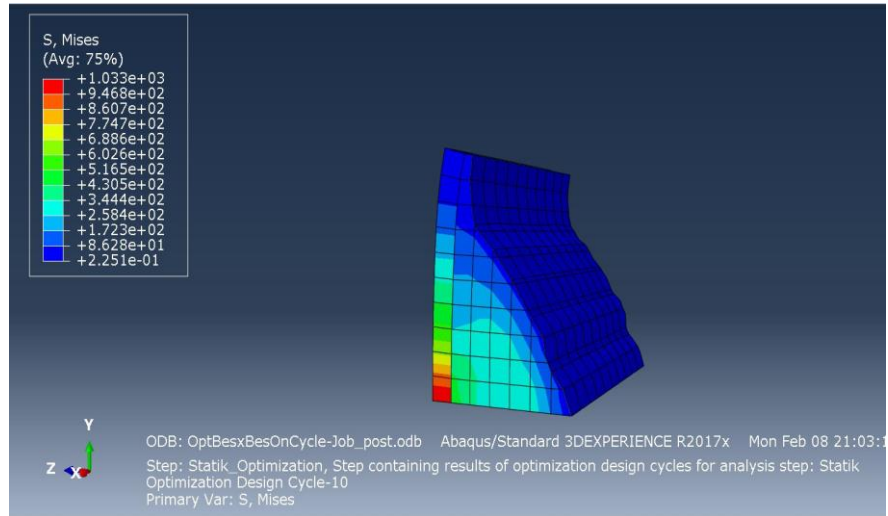
Şekil 3.11. Hedef fonksiyonu ve kısıt fonksiyonun tanımlanması

Sistemin bütün özellikleri tanımlandıktan sonra *Job Modülü* kullanılarak sistemin statik analizi yapılır.



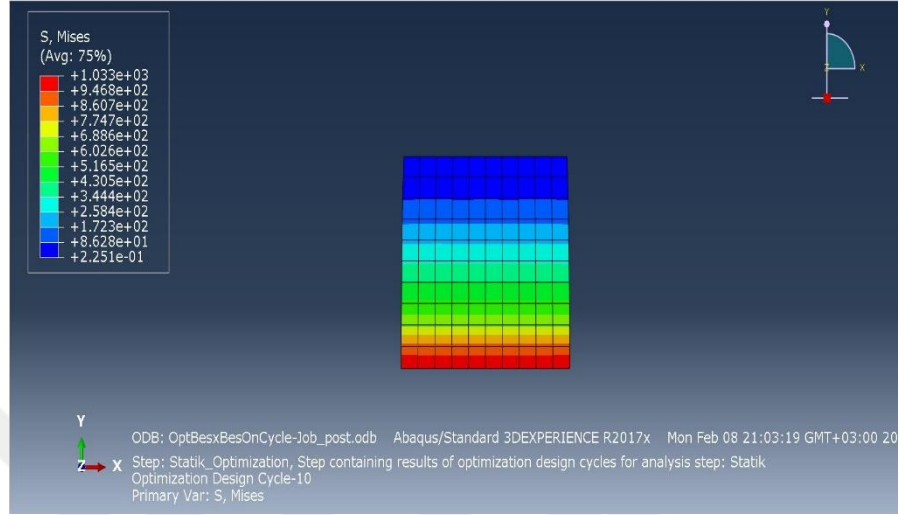
Şekil 3.12. 5x5x5 m kare sistemin statik analiz sonucu

Şekil 3.12’de tabloda görüldüğü gibi zorlanmalar kuvvetin olduğu yönde olmuştur ve kuvvet artıkça artmıştır. Beklenildiği gibi en çok zorlanan kesit tabanda 50 kPa değerinde kuvvete uğrayan taban kesitidir. Statik analizi tanımlanmış sistemi optimum hale getirmek için ilk olarak on iterasyonluk optimizasyon işlemi yine aynı modülden gerçekleştirilir.

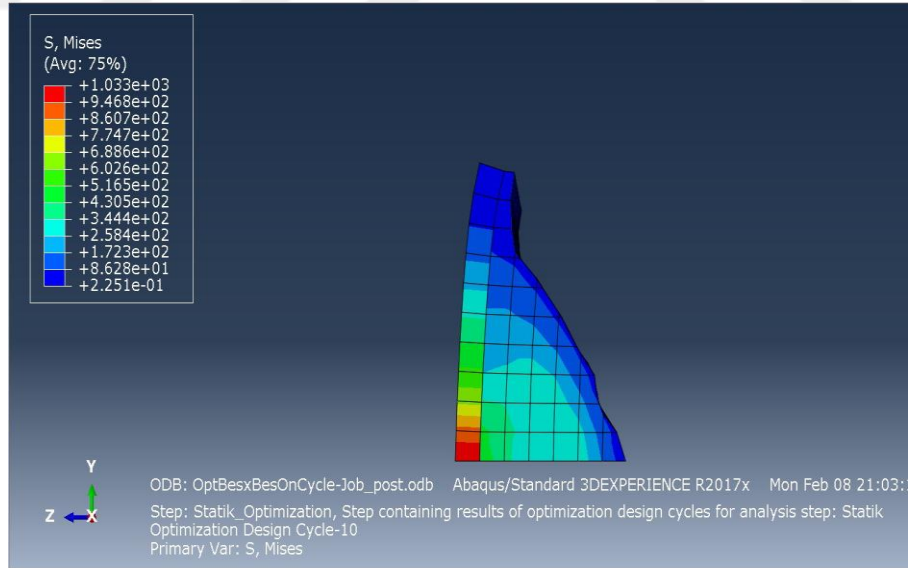


Şekil 3.13. 5x5x5 m model on iterasyonluk optimum sistem

Şekil 3.13’de görüldüğü gibi on iterasyon sonucunda sistemden bazı parçalar çıkarılmıştır. Çıkarılan parçalar, gerilme miktarının en düşük görüldüğü mavi parçalardan seçilmiştir. 5x5x5 sistemin arkadan görünüşü Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



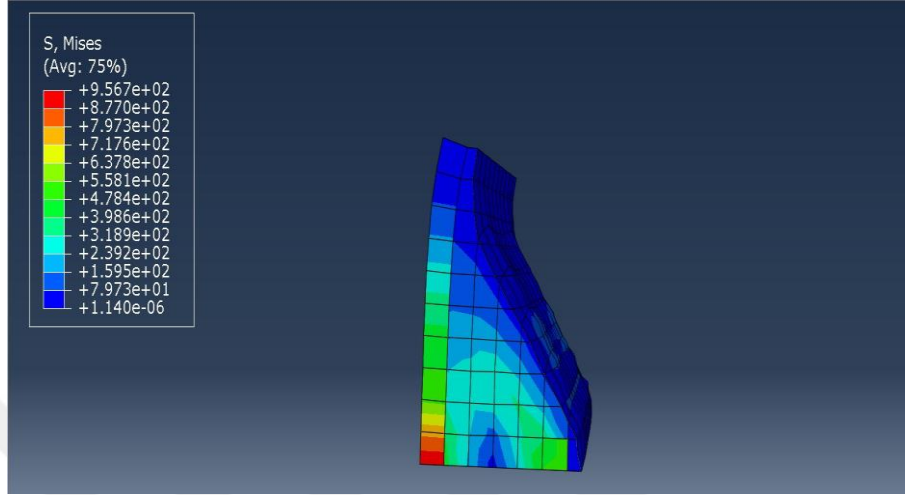
Şekil 3.14. 5x5x5 m model arkadan görünüş y-x eksen



Şekil 3.15. 5x5x5 m model y-z eksen

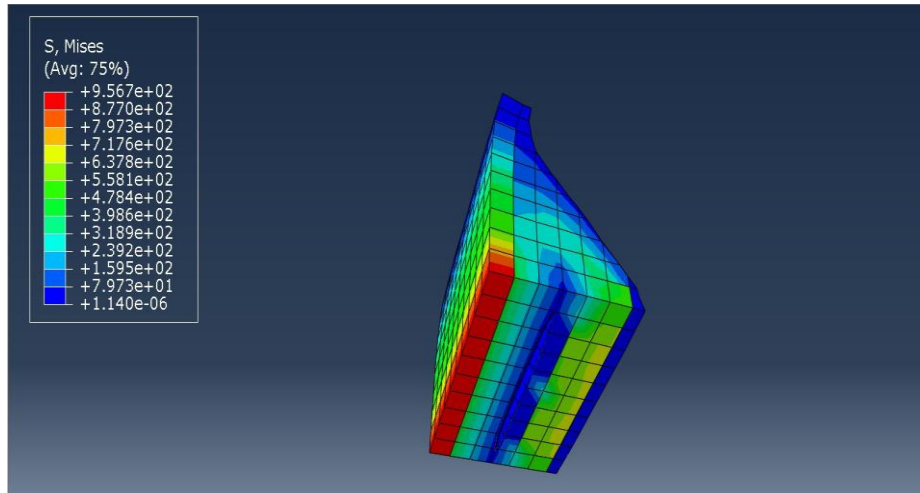
Sistemi daha optimal hale getirmek için iterasyonlara devam edilmelidir. Şekil 3.15’de görülen on yedinci iterasyona kadar görsel bir değişim gözlenmemiştir.

Bu iterasyonda tabanda gerilmelerin çok olmadığını düşünerek, yazılım tarafından buradan parça çıkarılmıştır. 5x5x5 m model on yedi iterasyonluk optimum sistem Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



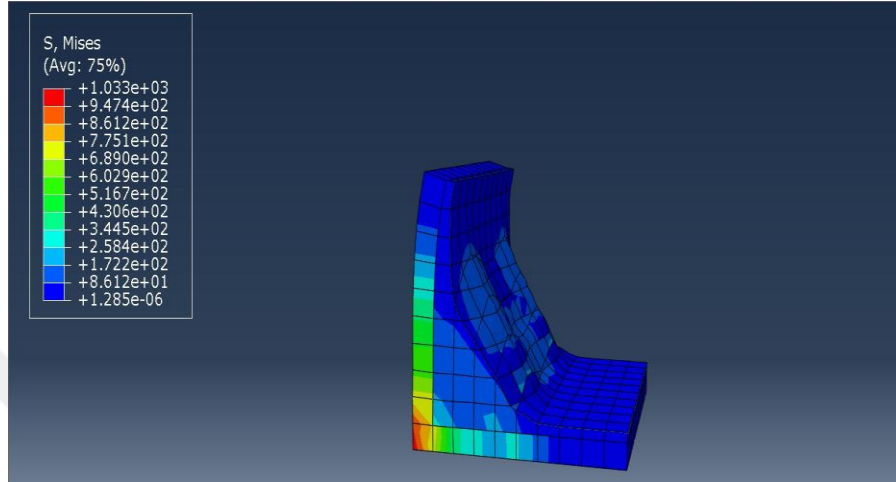
Şekil 3.16. 5x5x5 m model on yedi iterasyonluk optimum sistem

Şekil 3.17’de tabandan çıkarılan kesit daha net bir şekilde görülmektedir. Çıkarılan bu parça sonucu taban sonunda da gerilmeler artarak mavi olan bazı kesitler yeşil renge dönmüştür. Ancak ortaya çıkan bu analiz modeli kabul edilemez. Çünkü tabandan kayıp istenmeyen bir durumdur.



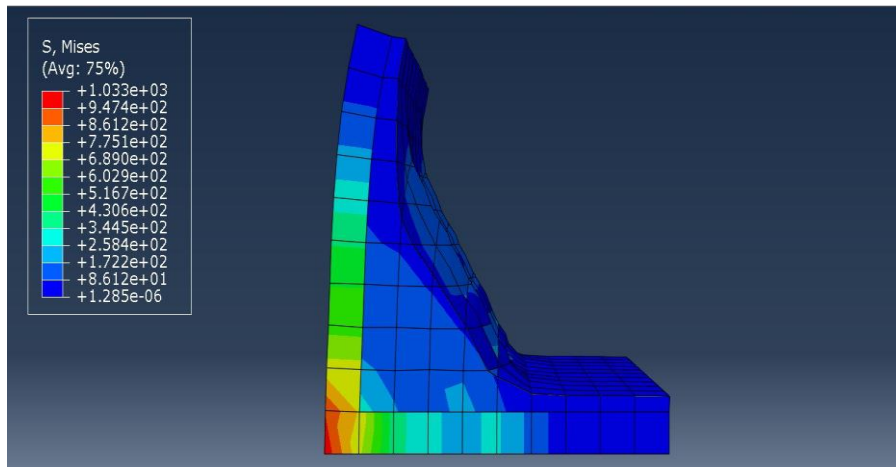
Şekil 3.17. 5x5x5 m model on yedi iterasyonluk sistemde taban bozulumu

Buradaki taban kaybını engellemek için *Optimization Modülü* içinde bulunan *Create Geometric Restriction* butonu kullanılmıştır. Tabandaki topolojik değişiklikler sıfıra indirilmiştir.



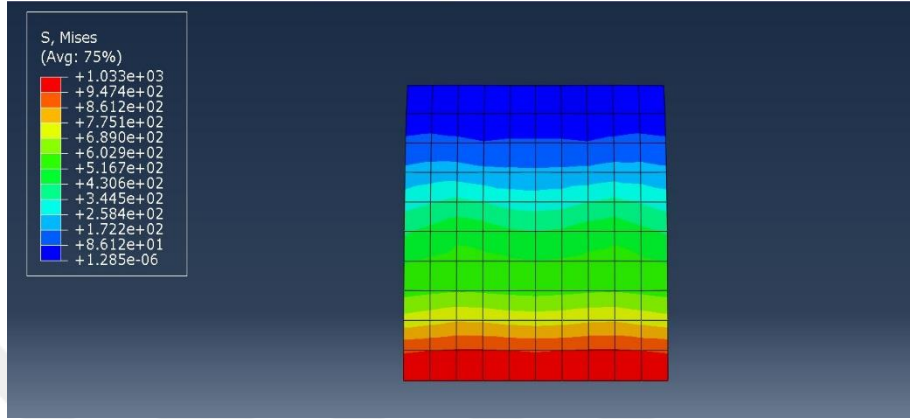
Şekil 3.18. 5x5x5 m model yirmi iki iterasyonluk optimum sistem

Şekil 3.18’de görüldüğü üzere, taban seviyesi sınırlandırılmıştır ve topolojik değişime katılmamıştır. Tabandan sınırlandırılma sonucu kayıp yok olsa bile, gövdeden çıkarılan parça sayısı artışı için gerilme miktarında artış gözlenmektedir. 5x5x5 m model yirmi iki iterasyonluk optimum sistem y-z eksenini Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. 5x5x5 m model yirmi iki iterasyonluk optimum sistem y-z eksenini

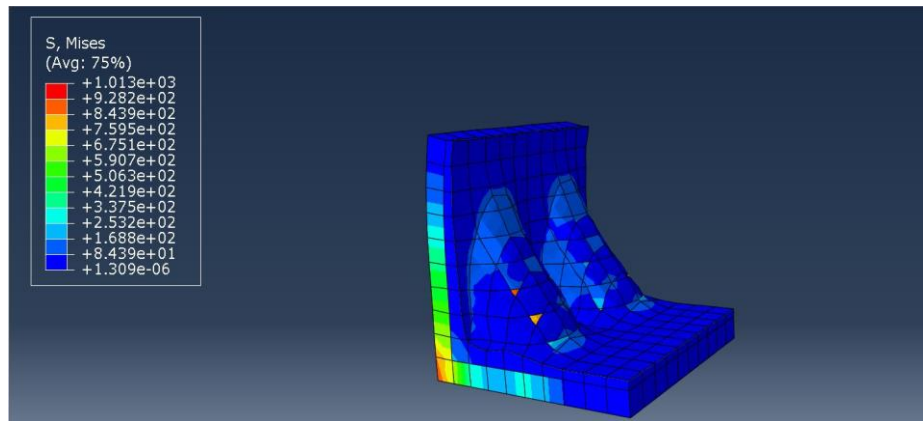
Ayrıca bu iterasyonda, payandalaşmanın gözle görülür bir şekilde hissedilmesi de başlamıştır. 5x5x5 m model yirmi iki iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. 5x5x5 m model yirmi iki iterasyonluk optimum sistem y-x eksenini

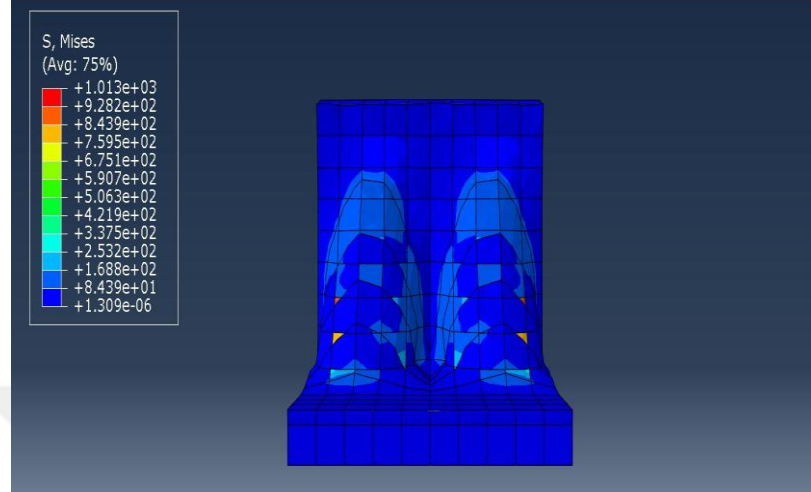
Yirmi ikinci iterasyon ile on yedinci iterasyon y-x eksenini kapsamasında kıyaslanır ise gerilme miktarının daha fazla olduğu şekillerin sol tarafında bulunan tablodan anlaşılacaktır.

Ayrıca taban seviyesinden itibaren görsel kontrol yapılırsa gerilme artışına bağlı olarak zorlanan kesitler de renk değişimi ya da aynı renk grubunda taranılan bölge miktarında artış gözlenmektedir. Örneğin, taban kesiti için kırmızı renk miktarında artış gözlenmektedir.



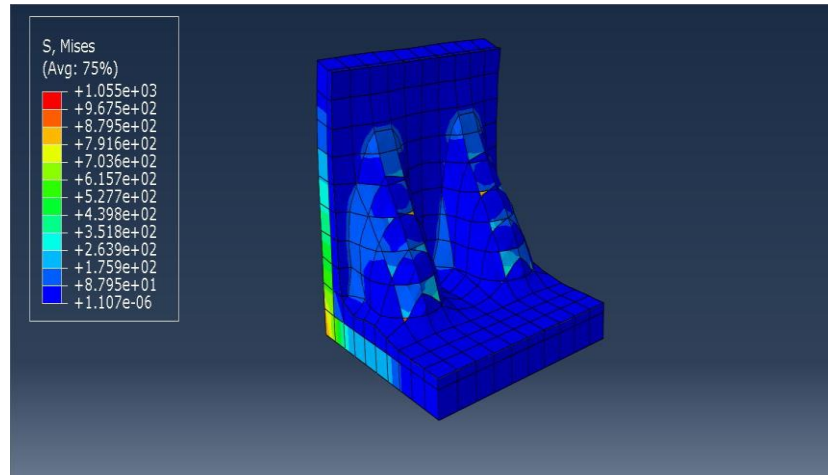
Şekil 3.21. 5x5x5 m model otuz iterasyonluk optimum sistem

Şekil 3.21’de görüldüğü üzere iterasyon sayısındaki artışa bağlı olarak çıkan parça sayısı artmıştır ve payandalaşma da artmıştır.



Şekil 3.22. 5x5x5 m model otuz iterasyonluk optimum sistem y-x eksen

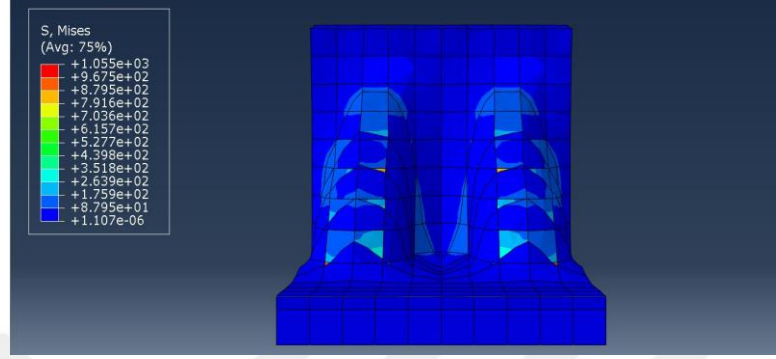
Şekil 3.22’de görüldüğü üzere payandalar arasındaki boşluktan malzeme çıkarımı ve dolayısıyla payandalar arasındaki boşluk miktarı da artmıştır. Payanda kalınlığı azalmıştır.



Şekil 3.23. 5x5x5 m model kırk iterasyonluk optimum sistem

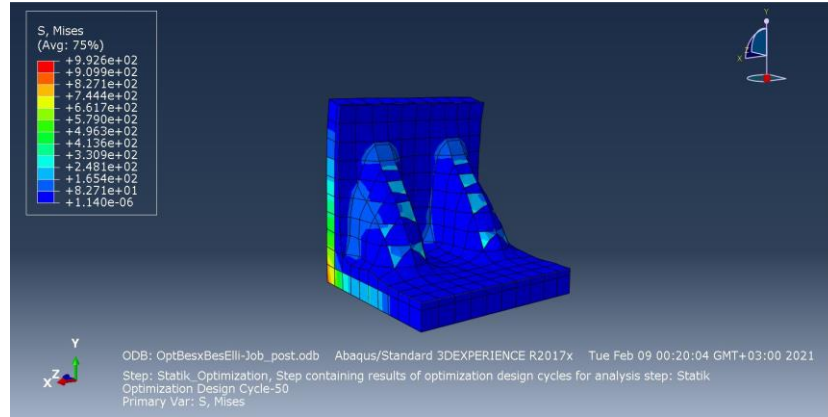
Şekil 3.23’de görüldüğü üzere iterasyon sayısındaki artışa bağlı olarak çıkan parça sayısı artmıştır ve payandalaşma da artmıştır. Gerilme miktarında artış gözlenmektedir.

Payandalarda gözükten kırmızı ve turuncu renkler bu bölgelerin diğer payanda kısımlara göre daha çok zorlandığını ifade eder. 5x5x5 m model kırk iterasyonluk optimum sistem y-x ekseni Şekil 3.24’de gösterilmiştir.



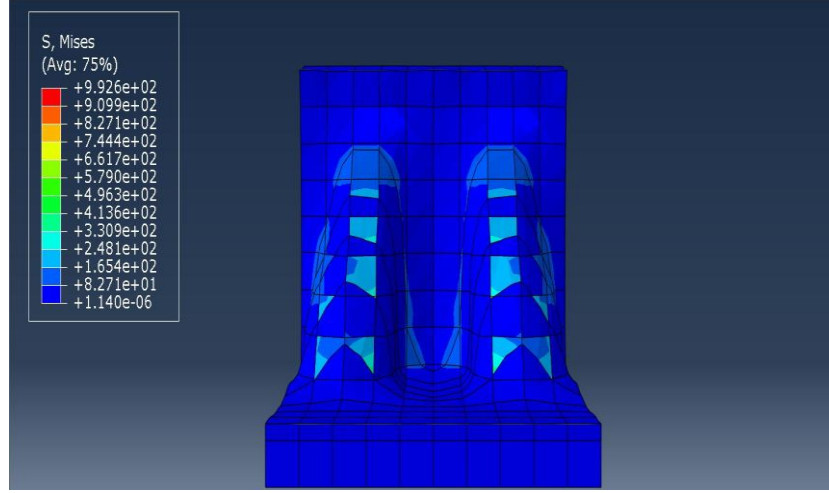
Şekil 3.24. 5x5x5 m model kırk iterasyonluk optimum sistem y-x ekseni

Kırk iterasyonluk optimum sistem ile otuz iterasyonluk optimum sistem y-x ekseni kapsamında yorumlayacak olursak; payandaların kalınlığının azaldığı, arasındaki boşluğun artışı söylenebilir.



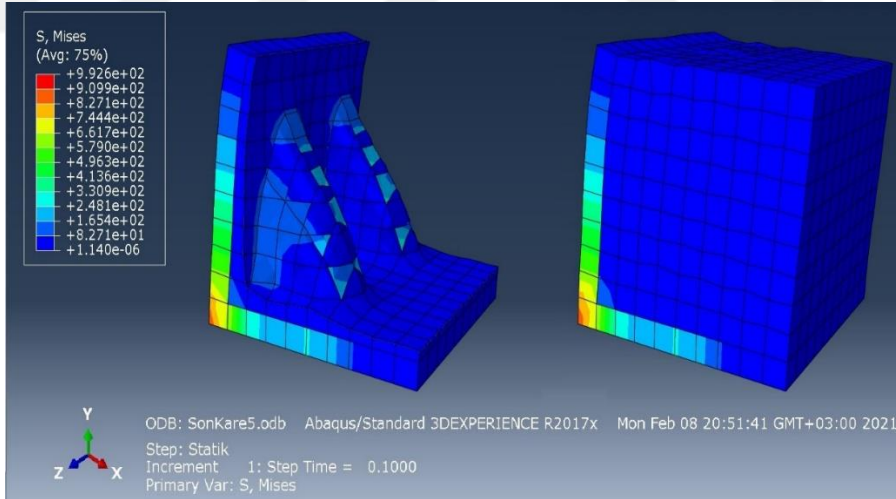
Şekil 3.25. 5x5x5 m model elli iterasyonluk optimum sistem

Şekil 3.25’de görüldüğü üzere payandaların üzerindeki bazı mavi renkli alanların turkuaz renkli alanlara dönüştüğü gözle görülebilir. Bunun anlamı, yapılan iterasyonlar sonucu çıkarılan parçaların sayısındaki artışa bağlı olarak bu alanlardaki gerilme miktarında artış gözlenmiştir.



Şekil 3.26. 5x5x5 m model elli iterasyonluk optimum sistem y-x eksen

Şekil 3.26’da görüldüğü üzere daha önceki iterasyonlarla kıyaslandığında payandaların kalınlığı azalmış ve aralarındaki boşluk artmıştır. Özellikle otuzuncu iterasyonda gösterilen optimum y-x eksen ile arasındaki fark ciddi ölçüde fazladır.

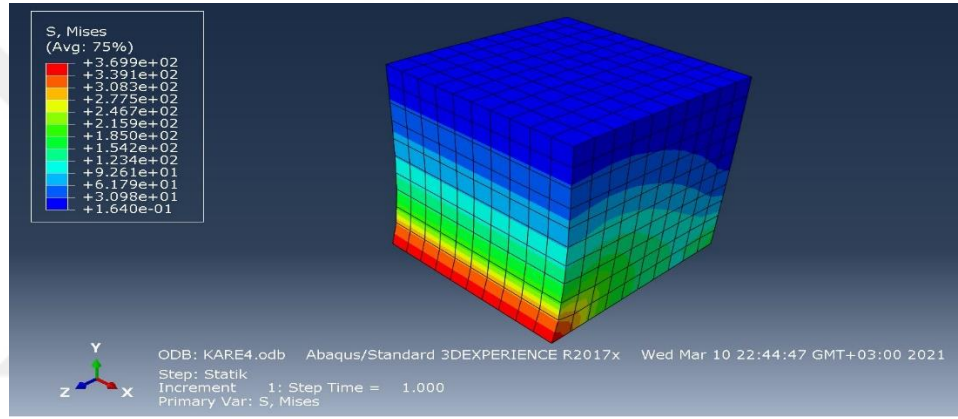


Şekil 3.27. 5x5x5 m model elli iterasyonluk optimum sistem toplam değişim

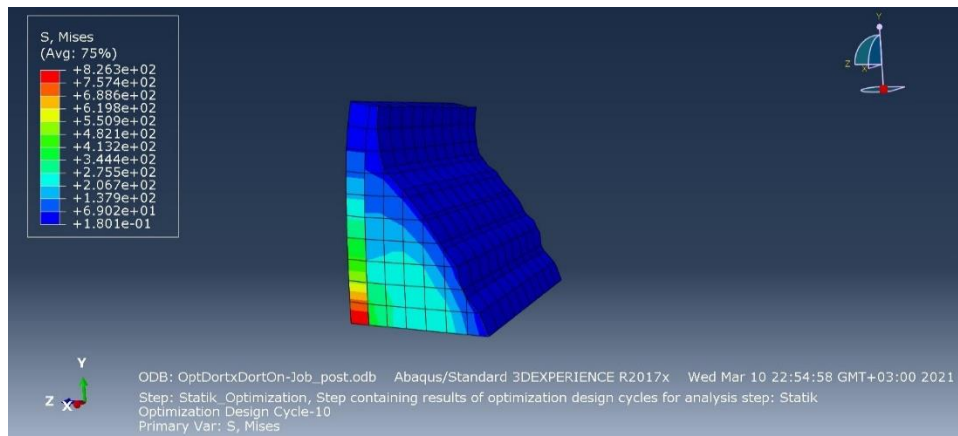
Şekil 3.27’de görüldüğü üzere ilk tasarım modelimiz ile elli iterasyonluk optimizasyon sonucunda oluşan modelimiz arasında ciddi bir fark vardır. Bu sisteme ait özellikleri yeni tasarımımızla daha hızlı, daha az malzeme, iş gücü ve para harcayarak karşılayabiliriz.

3.2. 4x4x4 m İstinat Duvarının Optimizasyonu

4x4x4 m istinat duvarını tanımlamak için genel özellikleri *Part* sisteminde tanımlandıktan sonra bir ayrıtı 4 m olacak şekilde iki boyutlu olarak çizilir. Daha sonra *Depth* seçeneğine de 4 m yazılarak sistem üç boyutlu olarak oluşturulmuş olur. Malzeme özellikleri, montaj, meshlemek, yüklemeler ve mesnet koşulları ve optimizasyon kriterleri 5x5x5 m istinat duvarında olduğu gibi sırasıyla ilgili modüller kullanılarak aynı işlem adımları tekrarlanır. Bütün özellikleri tanımlanan sistemin, *Job Modülü* kullanılarak statik analizi yapılır.



Şekil 3.28. 4x4x4 m kare sistemin statik analiz sonucu

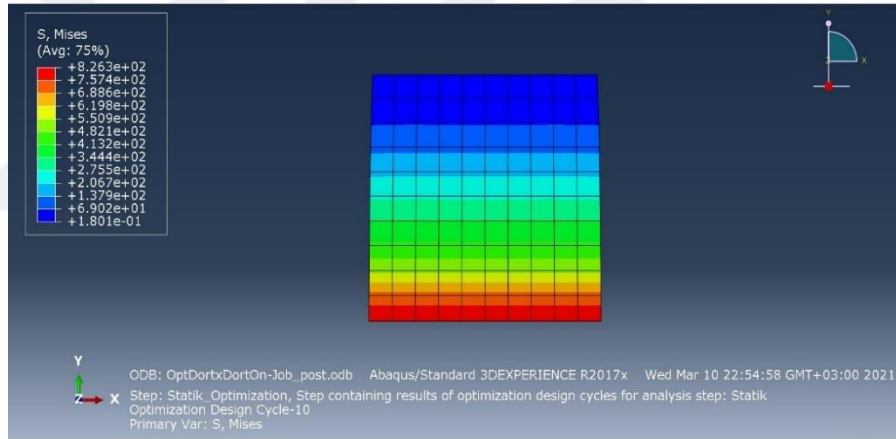


Şekil 3.29 4x4x4 m model on iterasyonluk optimum sistem

Şekil 3.28’de görüldüğü gibi gerilmeler kuvvetin olduğu yönde meydana gelmiştir ve –y yönünde kuvvet artışına bağlı olarak artmıştır. Beklenildiği gibi en çok zorlanan kesit tabanda 50 kPa değerinde kuvvete uğrayan taban kesitidir. 5x5x5 m olan istinat sistemi ile kıyas yapılacak olursa, gerilme miktarında azalma vardır.

Statik analizi tamamlanmış sistemi optimum hale getirmek ve 5x5x5 m istinat duvarıyla kıyas yapmak için on iterasyon, yirmi üç iterasyon, otuz iterasyon, kırk iterasyon ve elli iterasyonluk optimizasyonlar yine *Job Modülü* kullanılarak gerçekleştirildi.

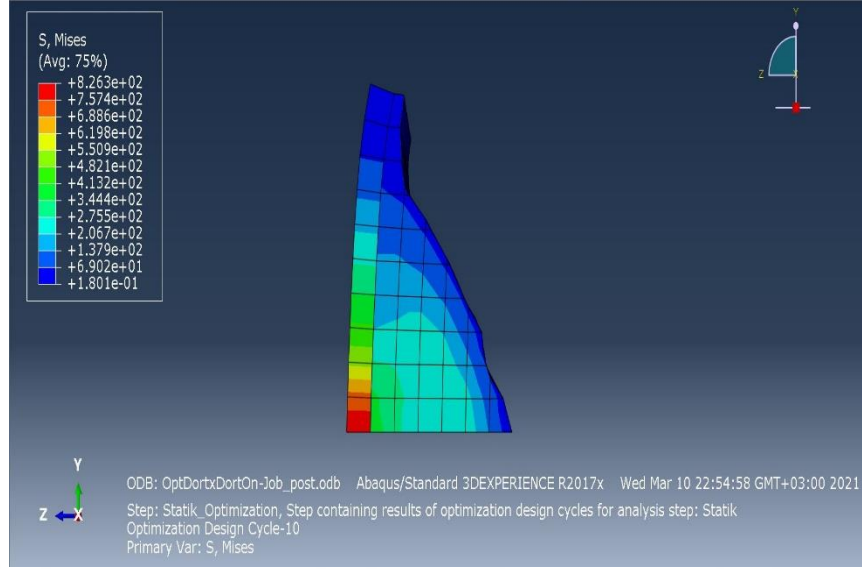
Şekil 3.29’da görüldüğü gibi on iterasyon sonucunda sistemden bazı parçalar çıkarılmıştır. Daha önce de değindiğimiz gibi çıkarılan parçalar, gerilme miktarının en düşük görüldüğü mavi parçalardan seçilmiştir. 5x5x5 m model ile kıyas yapıldığında maksimum gerilme miktarı optimum sistem için de daha azdır.



Şekil 3.30. 4x4x4 m model arkadan görünüş y-x eksen

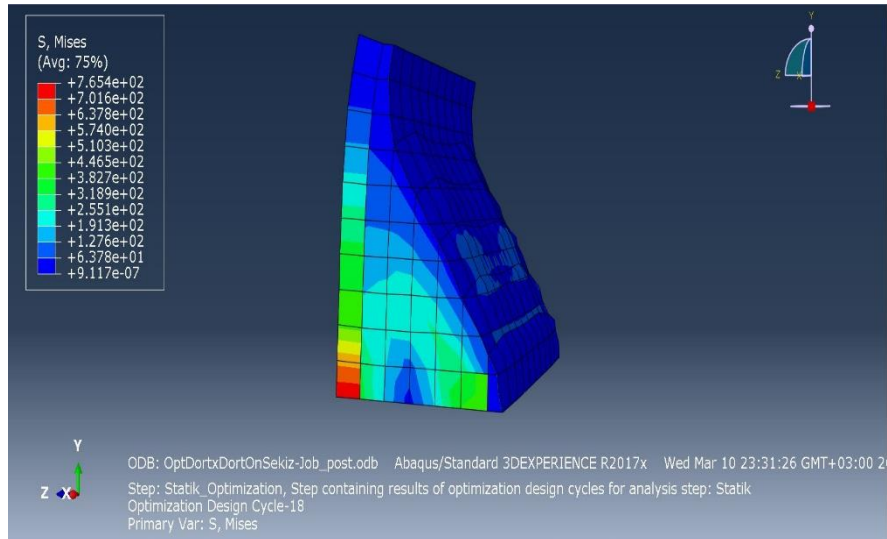
Şekil 3.30’da görüldüğü gibi 5x5x5m ile 4x4x4m sistem arasında y-x eksen için kıyas yapıldığında, arka yüzeyde bulunan ve şeklin sol tarafında renklerle ifade edilen gerilme miktarı renk geçişleri her iki sistem için de yüksek miktarda görsel benzerlik içerir. Gerilme renk çizgi sınırları görsel olarak aynı olsa da gerilme miktarı 4x4x4 m sistem için daha azdır.

Şekil 3.31’de görülen 4x4x4 m y-z eksen kapsamında 5x5x5 m model ile kıyaslandığında gerilme renk geçişleri yüksek miktarda görsel benzerlik içerse de gerilme miktarı 4x4x4m model için daha azdır.



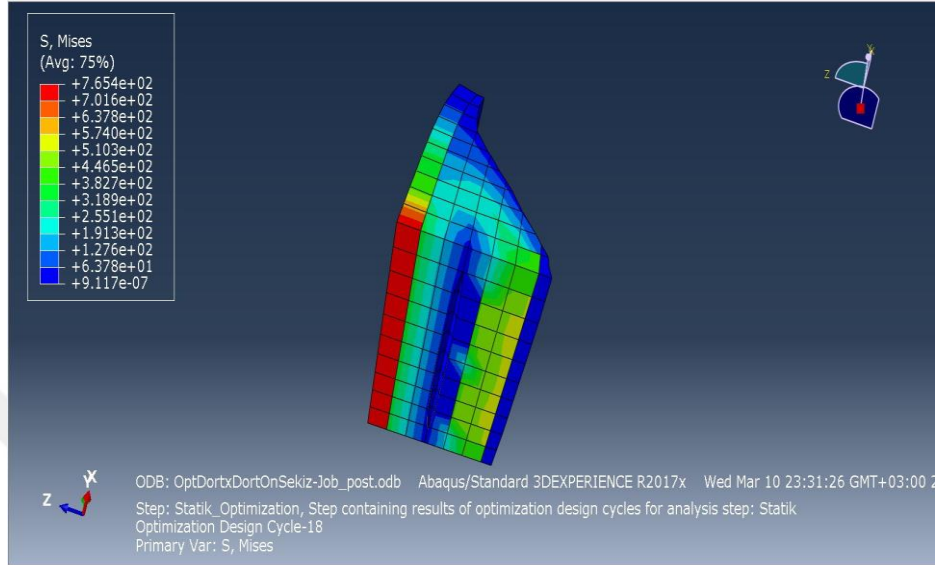
Şekil 3.31. 4x4x4 m model y-z eksen

Sistemi daha optimal düzeye getirmek için iterasyonlara devam ettirilmelir. Şekil 3.32’de görülen on sekizinci iterasyona kadar gerilme değerleri değişse de görsel bir değişim görülmemiştir. On sekizinci iterasyonda tabanda gerilmelerin çok olmadığı yazılım tarafından düşünülerek buradan parça çıkarılmıştır.

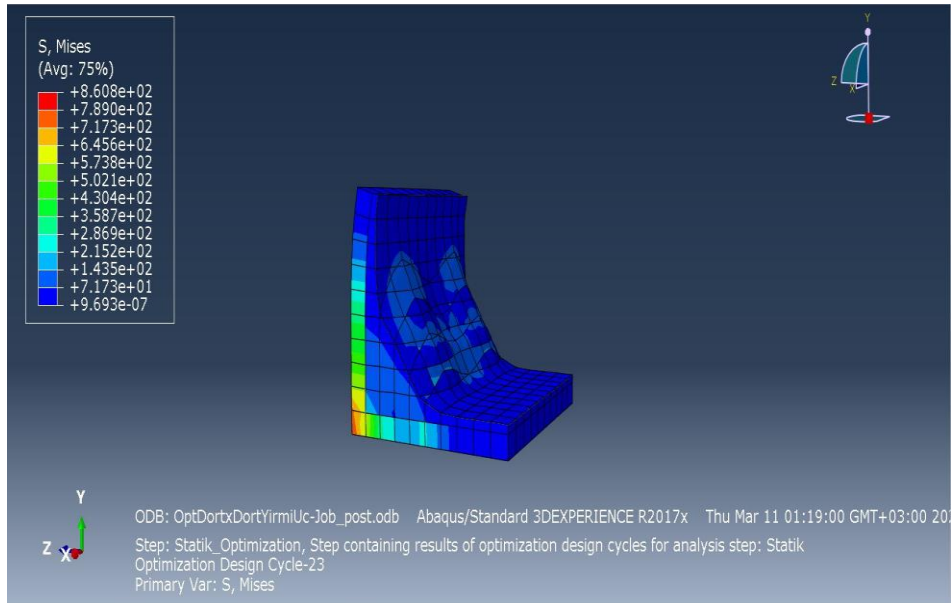


Şekil 3.32. 4x4x4 m model on sekiz iterasyonluk optimum sistem

Şekil 3.33’de tabandan çıkarılan kesit daha net bir şekilde görülmektedir. 5x5x5 m modelde açıklandığı gibi böyle bir durum ve model kabul edilemez. O yüzden bundan sonra ki iterasyonlarda taban bölümünden parça çıkarımı kısıtı yapılarak devam edilmiştir.

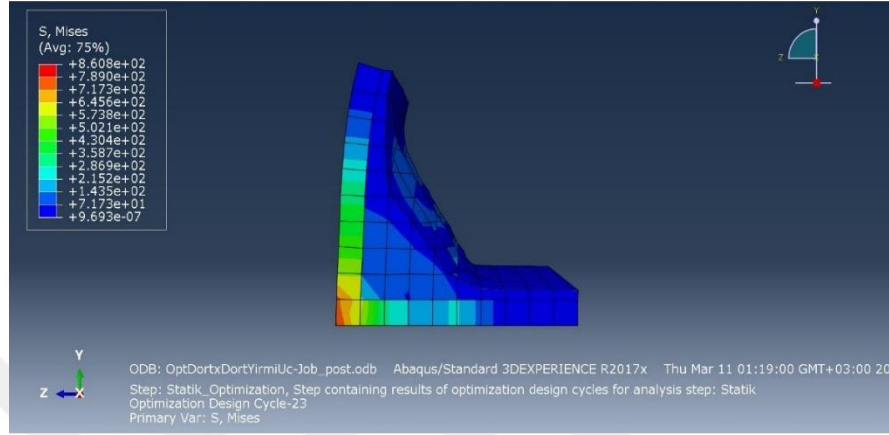


Şekil 3.33. 4x4x4 m model on sekiz iterasyonluk sistemde taban bozulumu



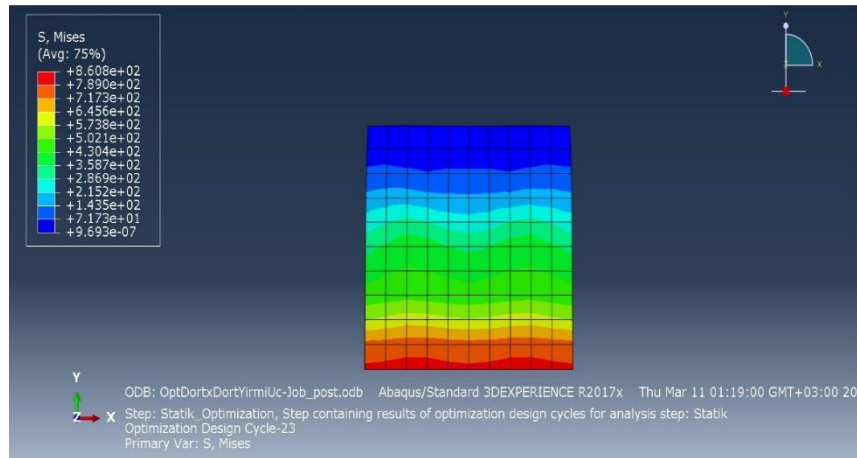
Şekil 3.34. 4x4x4 m model yirmi üç iterasyonluk optimum sistem

Şekil 3.34’de görüldüğü üzere, taban seviyesine kısıt konulmuştur ve topolojik değişim engellenmiştir. Taban seviyesinde optimizasyon gerçekleşmesi de geri kalan kısımdan eksilen parçalar olduğu için gerilme miktarında artış gözlenmektedir. 5x5x5 m sistem ile kıyaslandığında gerilme miktarı daha azdır.



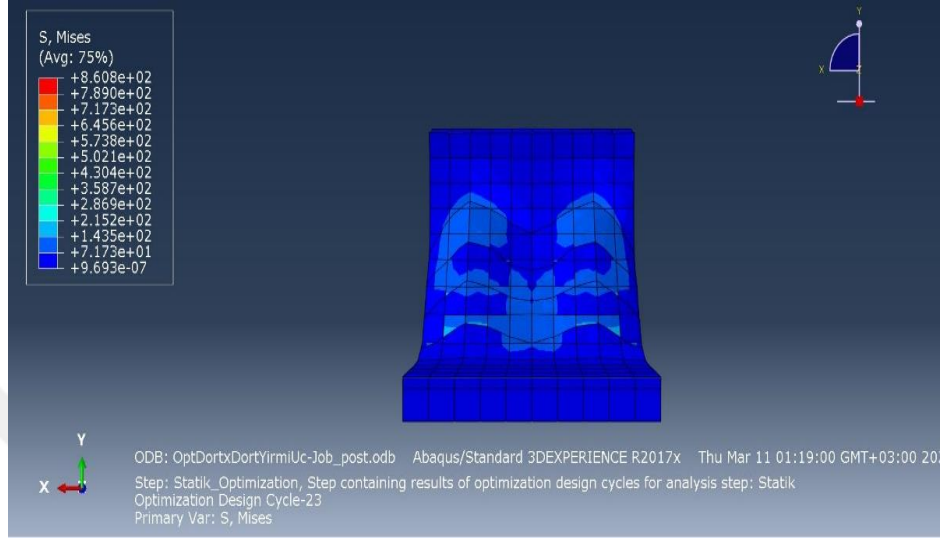
Şekil 3.35. 4x4x4 m model yirmi üç iterasyonluk optimum sistem y-z eksen

Şekil 3.35 ile Şekil 3.30 kıyaslanırsa gövde bölümü ciddi bir optimizasyona uğradığı görülür. Şekil 3.37’de görüldüğü üzere iterasyonda, payandalaşmanın başladığı da gözle görülür bir biçimde fark edilir. Gerilme miktarı on sekizinci iterasyonla kıyaslandığında artmıştır.

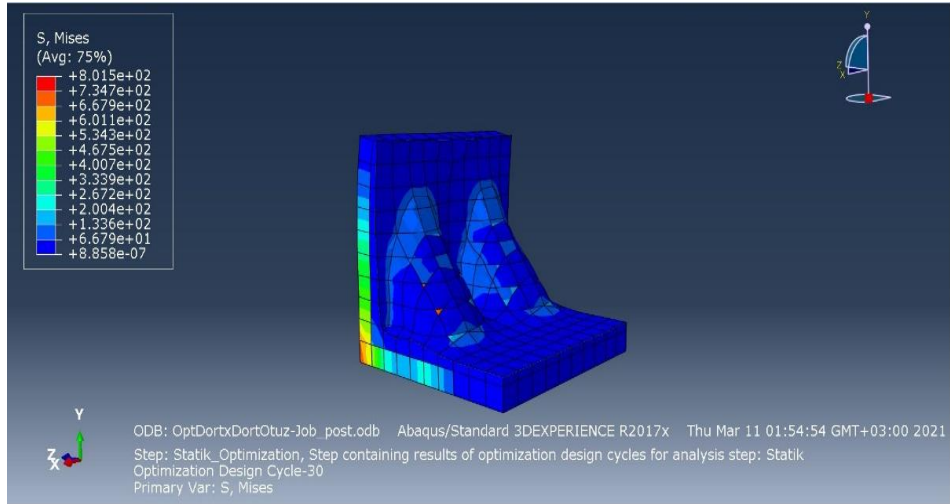


Şekil 3.36. 4x4x4 m model yirmi üç iterasyonluk optimum sistem y-x eksen

Şekil 3.36’da görüldüğü üzere taban seviyesinden itibaren görsel kontrol yapılırsa gerilme artışına bağlı olarak zorlanan kesitler de renk değişimi ya da aynı renk grubunda taranılan bölge miktarında değişim gözlenmektedir.

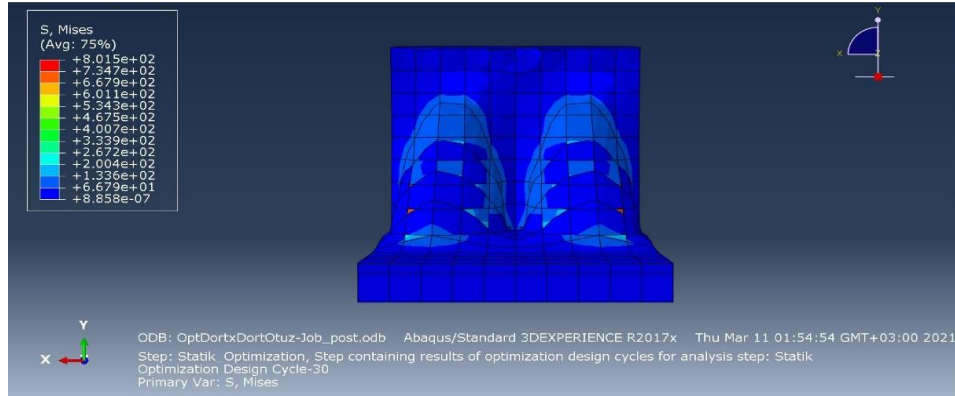


Şekil 3.37. 4x4x4 m model yirmi üç iterasyonluk optimum sistem y-x eksen



Şekil 3.38. 4x4x4 m model otuz iterasyonluk optimum sistem

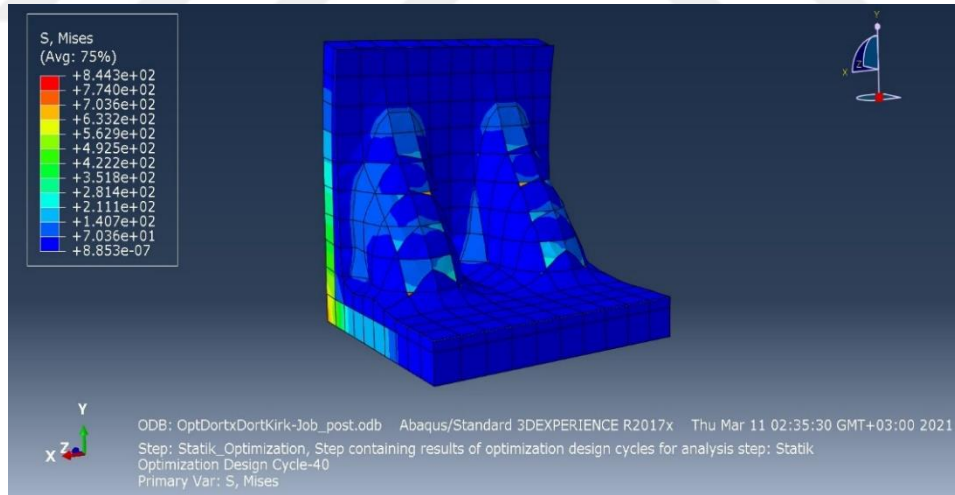
Şekil 3.38’de görüldüğü üzere iterasyon sayısındaki artışa bağlı olarak çıkan parça sayısı artmıştır ve payandalaşma da artmıştır. 5x5x5 m modelle, otuz iterasyonluk optimum sistem kapsamında kıyaslandığında gerilme miktarında azalma gözlemlenir.



Şekil 3.39. 4x4x4 m model otuz iterasyonluk optimum sistem y-x eksenli

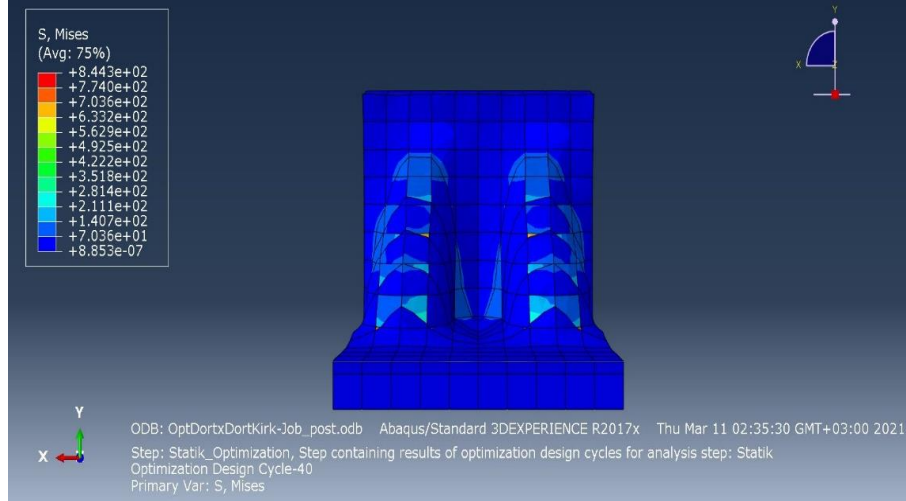
Şekil 3.39’da görüldüğü üzere payalar arasındaki boşluktan malzeme çıkarımı ve dolayısıyla payandalar arasındaki boşluk miktarı da artmıştır. Payanda kalınlığı azalmıştır.

Payandalarda gözükten kırmızı ve turkuaz renkler bu bölgelerin diğer payanda kısımlara göre daha çok gerilmeye uğradığını ifade eder.

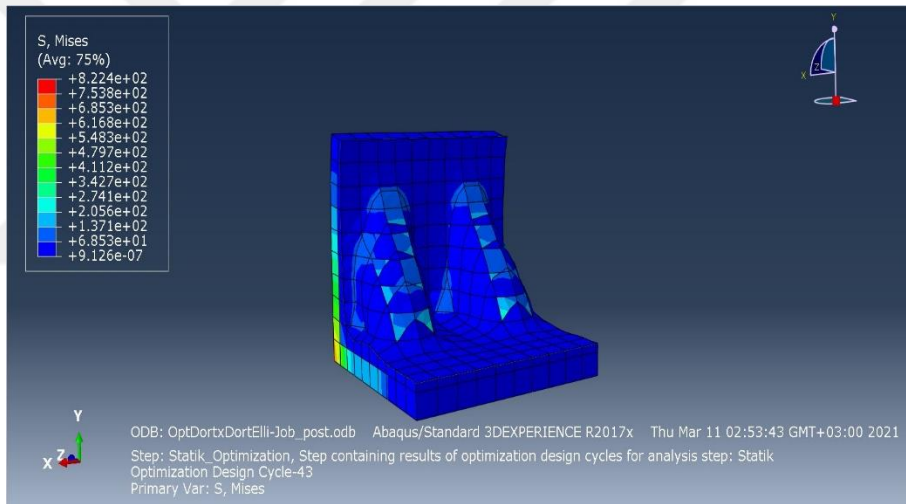


Şekil 3.40. 4x4x4 m model kırk iterasyonluk optimum sistem

Şekil 3.40’da görüldüğü üzere iterasyon sayısındaki artışa bağlı olarak çıkan parça sayısı artmıştır ve payandalaşma da artmıştır. Gerilme miktarında otuz iterasyonluk sisteme kıyasla artış gözlenmiştir. 5x5x5 m model ile kıyas yapıldığında gerilme miktarında azalma gerçekleşmiştir. Şekil 3.41’de payandalar arası boşluğun artışı gözlenmektedir.

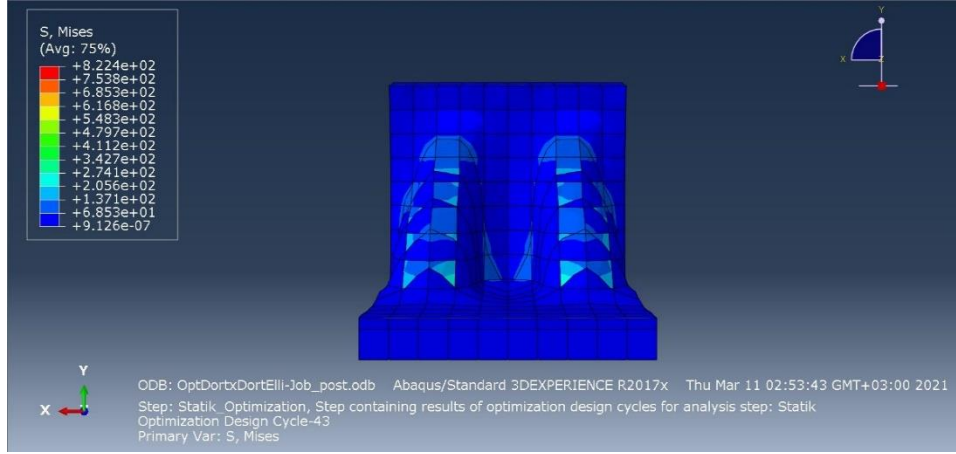


Şekil 3.41. 4x4x4 m model kırk iterasyonluk optimum sistem y-x eksenli



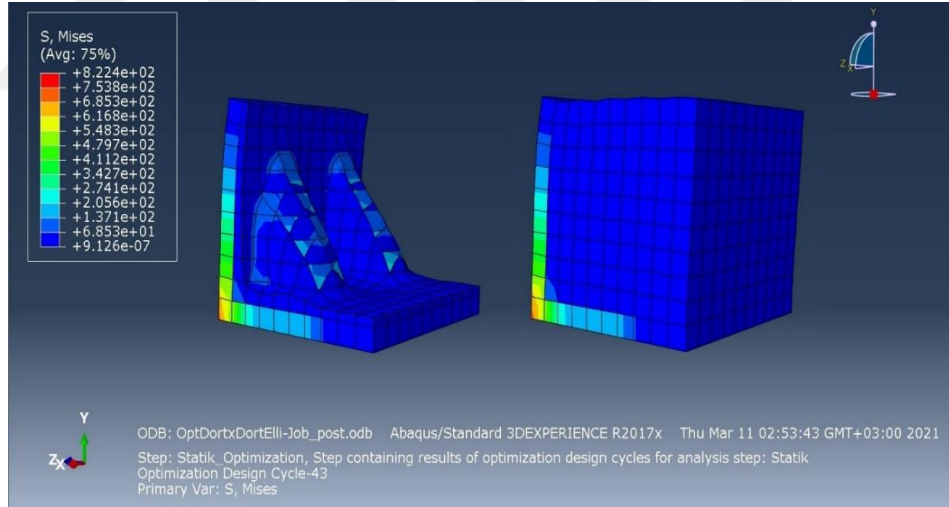
Şekil 3.42. 4x4x4 m model elli iterasyonluk optimum sistem

Şekil 3.42’de görüldüğü üzere payandaların üzerindeki bazı mavi renkli alanların turkuaz renkli alanlara dönüştüğü gözle görülebilir. Bunun anlamı, yapılan iterasyonlar sonucu çıkarılan parçaların sayısındaki artışa bağlı olarak bu alanlardaki gerilme miktarında artış gözlenmiştir. 5x5x5 m sistem ile kıyaslandığında gerilme miktarında azalma gözlenmiştir.



Şekil 3.43. 4x4x4 m model elli iterasyonluk optimum sistem y-x eksen

Şekil 3.43’de görüldüğü üzere daha önceki iterasyonlarla kıyaslandığında payandaların kalınlığı azalmış ve aralarındaki boşluk artmıştır. Özellikle yirmi üç iterasyonda gösterilen optimum y-x eksen ile arasındaki fark ciddi ölçüde fazladır.



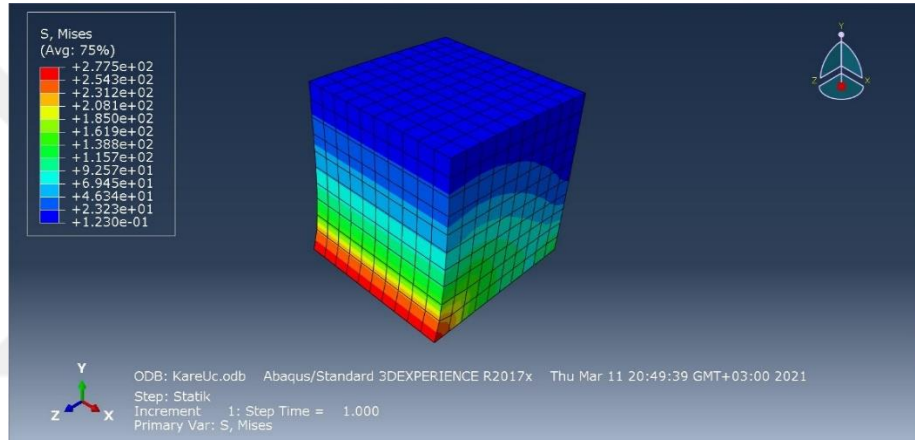
Şekil 3.44. 4x4x4 m model elli iterasyonluk optimum sistem toplam değişim

Şekil 3.44’de görüldüğü üzere ilk tasarım modelimiz ile elli iterasyonluk optimizasyon sonucunda oluşan modelimiz arasında ciddi bir fark vardır. 5x5x5 modelle görsel olarak çok benzer olsa da gerilme miktarı olarak daha az bir gerilmeye maruz kalan bir model olmuştur.

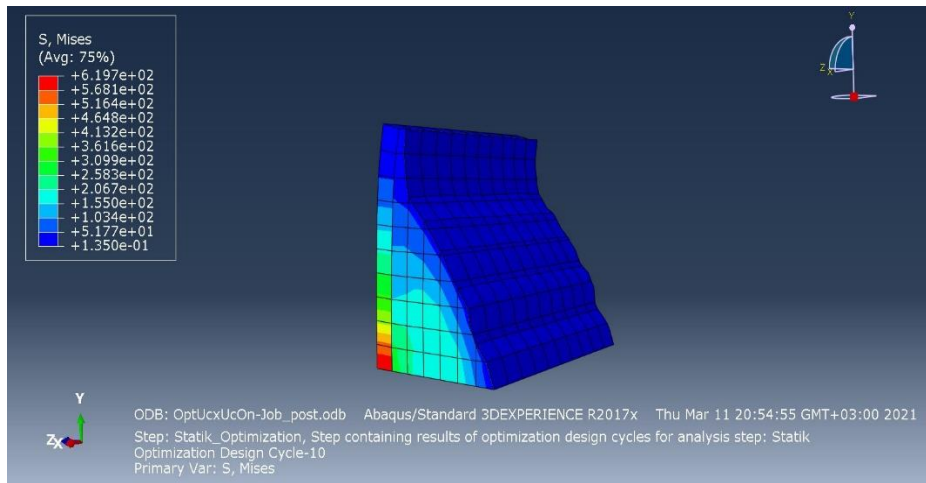
Bu sisteme ait özellikleri yeni tasarımıımızla daha hızlı, daha az malzeme, iş gücü ve para harcayarak karşılayabiliriz.

3.3. 3x3x3 m İstinat Duvarının Optimizasyonu

3x3x3 m istinat duvarını tanımlamak için için genel özellikleri *Part* sisteminde tanımlandıktan sonra bir ayrıtı üç metre olacak şekilde iki boyutlu olarak çizilir Daha sonra *Depth* seçeneğine de dört metre yazılarak sistem üç boyutlu olarak oluşturulmuş olur. Malzeme özellikleri, montaj, meshlemek, yüklemeler ve mesnet koşulları ve optimizasyon kriterleri 5x5x5 m istinat duvarında olduğu gibi sırasıyla ilgili modüller kullanılarak aynı işlem adımları tekrarlanır. Bütün özellikleri tanımlanan sistemin, *Job Modülü* kullanılarak statik analizi yapılır.



Şekil 3.45. 3x3x3 m kare sistemin statik analiz sonucu

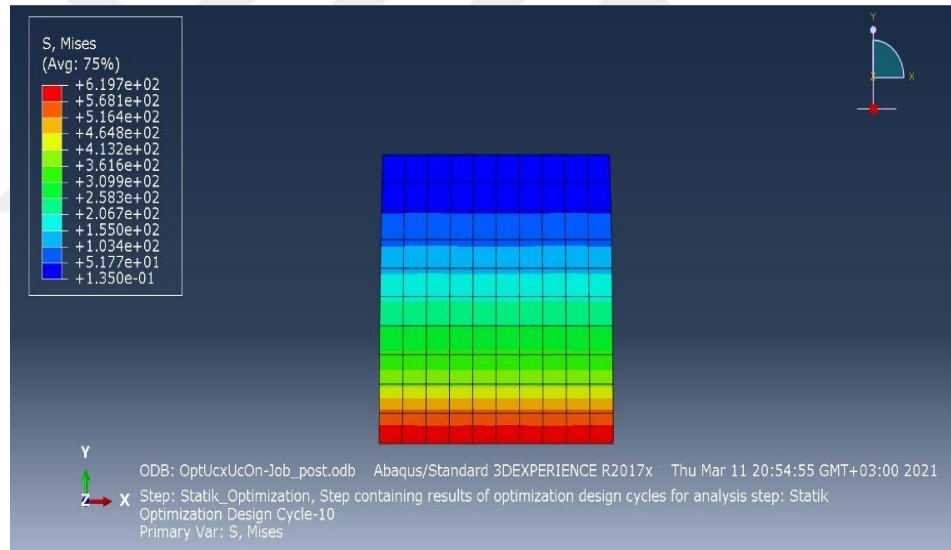


Şekil 3.46. 3x3x3 m model on iterasyonluk optimum sistem

Şekil 3.45’de görüldüğü gibi gerilmeler kuvvetin olduğu yönde meydana gelmiştir ve –y yönünde kuvvet artışına bağlı olarak artmıştır. Beklenildiği gibi en çok zorlanan kesit tabanda 50 kPa değerinde kuvvete uğrayan taban kesitidir. 5x5x5 m ve 4x4x4 m olan istinat sistemleri ile kıyas yapılacak olursa, gerilme miktarında azalma vardır.

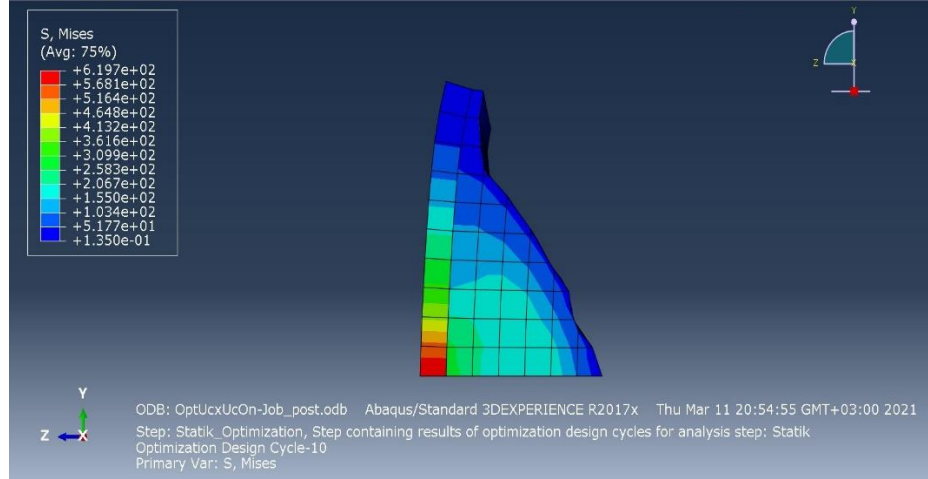
Statik analizi tamamlanmış sistemi optimum hale getirmek ve diğer iki istinat duvarıyla kıyas yapmak için farklı iterasyonlar için optimizasyon işlemleri *Job Modülü* kullanılarak gerçekleştirildi.

Şekil 3.46’da on iterasyon sonucunda sistemden bazı parçalar çıkarılmıştır. Daha önce de değindiğimiz gibi çıkarılan parçalar, gerilme miktarının en düşük görüldüğü mavi parçalardan seçilmiştir. Diğer iki model ile kıyas yapıldığında maksimum gerilme miktarı optimum sistem için de daha azdır.



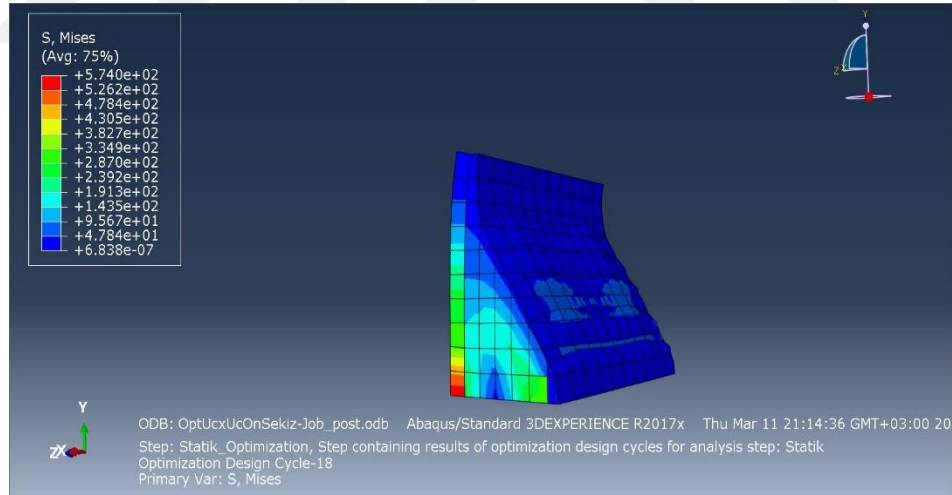
Şekil 3.47. 3x3x3 m model arkadan görünüş y-x eksenli

Şekil 3.47’de görüldüğü gibi diğer iki sistem arasında y-x eksenli için kıyas yapıldığında, arka yüzeyde bulunan ve şeklin sol tarafında renklerle ifade edilen gerilme miktarı renk geçişleri her iki sistem için de yüksek miktarda görsel benzerlik içerir. Gerilme renk çizgi sınırları görsel olarak aynı olsa da gerilme miktarı 3x3x3 m sistem için daha azdır.



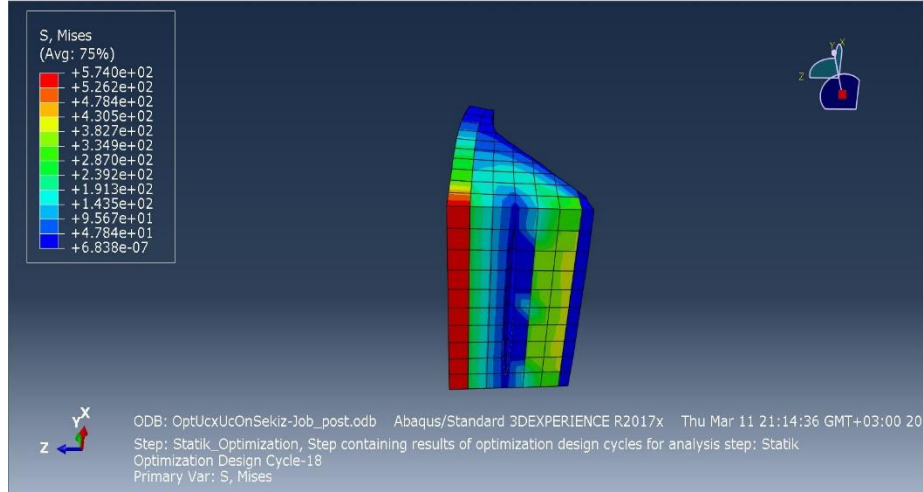
Şekil 3.48. 3x3x3 m model y-z eksenli

Şekil 3.48’de görülen 3x3x3 m y-z eksenli kapsamında 5x5x5 m model ve 4x4x4 m model ile kıyaslandığında gerilme renk geçişleri yüksek miktarda görsel benzerlik içerse de gerilme miktarı 3x3x3 m model için daha azdır.



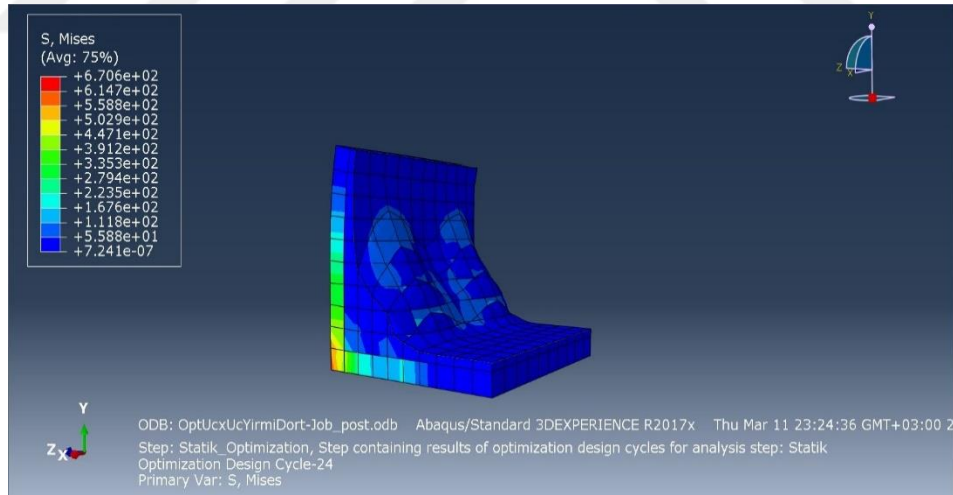
Şekil 3.49. 3x3x3 m model on dokuz iterasyonluk optimum sistem

Sistemi daha optimal düzeye getirmek için iterasyonlara devam ettirilmelidir. Şekil 3.49’da görülen on dokuzuncu iterasyona kadar gerilme değerleri değişse de görsel bir değişim görülmemiştir. On dokuzuncu iterasyonda tabanda gerilmelerin çok olmadığı yazılım tarafından düşünülerek buradan parça çıkarılmıştır.



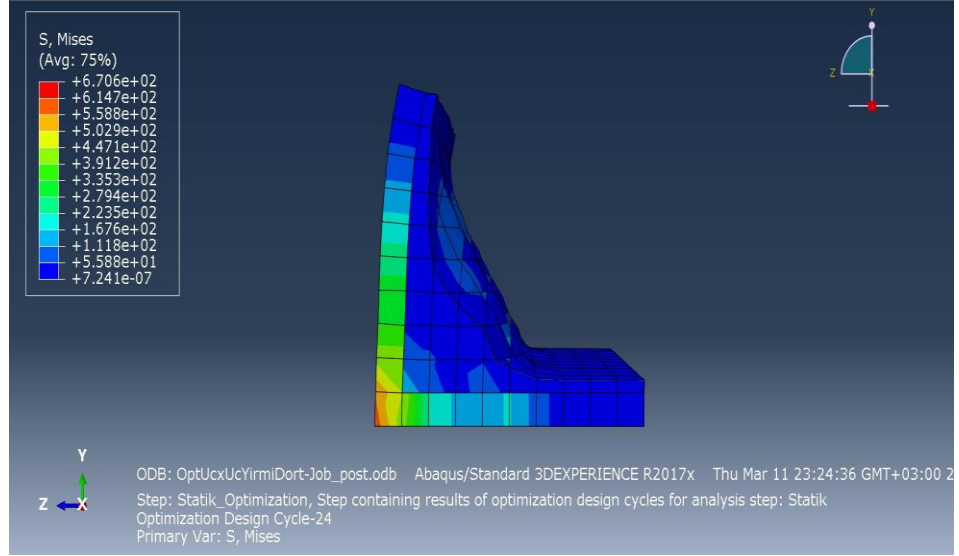
Şekil 3.50. 3x3x3 m model on dokuz iterasyonluk sistemde taban bozulumu

Şekil 3.50’de tabandan çıkarılan kesit daha net bir şekilde görülmektedir. Diğer iki modelde açıklandığı gibi böyle bir durum ve model kabul edilemez. O yüzden bundan sonra ki iterasyonlarda taban bölümünden parça çıkarımı kısıtı yapılarak devam edilmiştir.



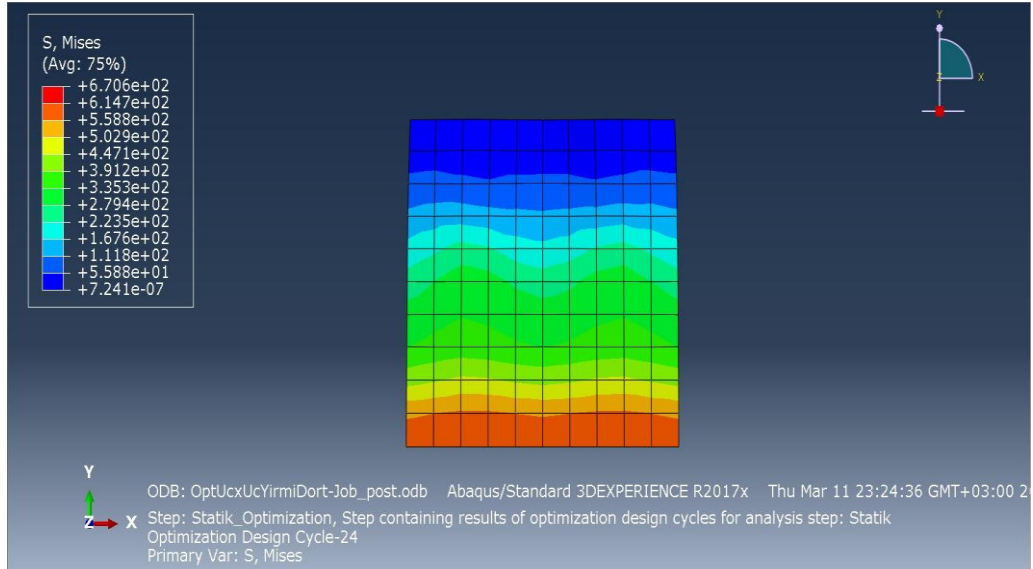
Şekil 3.51. 3x3x3 m model yirmi dört iterasyonluk optimum sistem

Şekil 3.51’de görüldüğü üzere, taban seviyesine kısıt konulmuştur ve topolojik değişim engellenmiştir. Taban seviyesinde optimizasyon gerçekleşmese de geri kalan kısımdan eksilen parçalar olduğu için gerilme miktarında artış gözlenmektedir. Diğer iki sistem ile kıyaslandığında gerilme miktarı daha azdır.



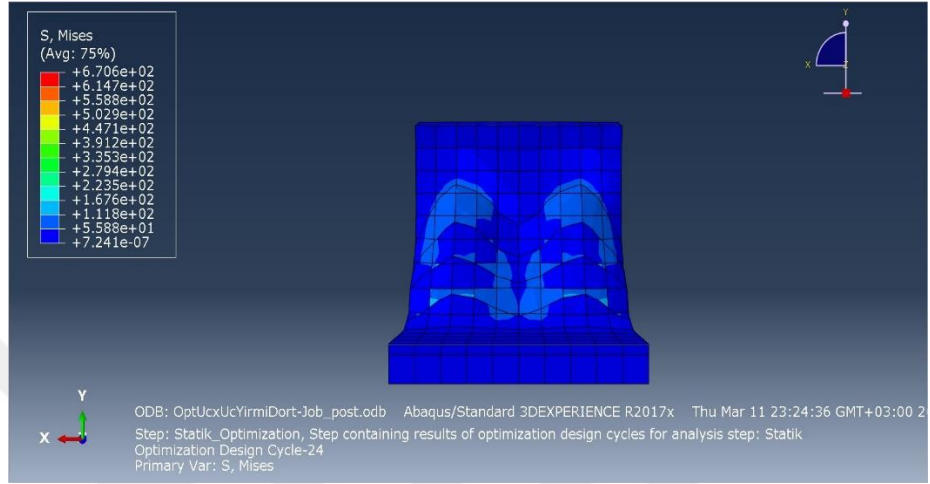
Şekil 3.52. 3x3x3 m model yirmi dört iterasyonluk optimum sistem y-z eksen

Şekil 3.52 ile Şekil 3.48 kıyaslanırsa gövde bölümü ciddi bir optimizasyona uğradığı görülür. Şekil 3.54’de görüldüğü üzere iterasyonda, payandalaşmanın başladığı da gözle görülür bir biçimde fark edilir. Gerilme miktarı on dokuzuncu iterasyonla kıyaslandığında artmıştır.

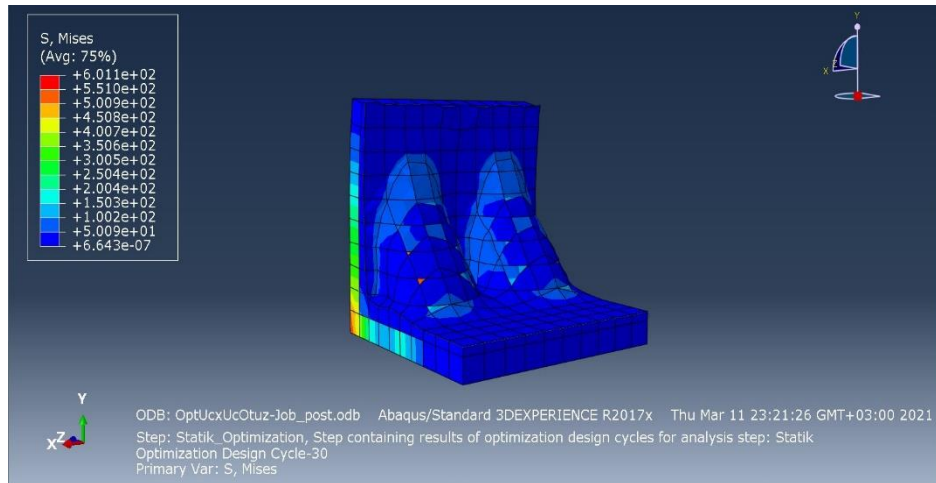


Şekil 3.53. 3x3x3 m model yirmi dört iterasyonluk optimum sistem arkadan görünüş

Şekil 3.53’de görüldüğü üzere taban seviyesinden itibaren görsel kontrol yapılırsa gerilme artışına bağlı olarak zorlanan kesitler de renk değişimi ya da aynı renk grubunda taranılan bölge miktarında değişim gözlenmektedir. En alt kesin için diğer iki sistem ile kıyas yapılırsa 3x3x3 m model için en alt kesitin rengi turuncuya yakın gözükmemektedir.

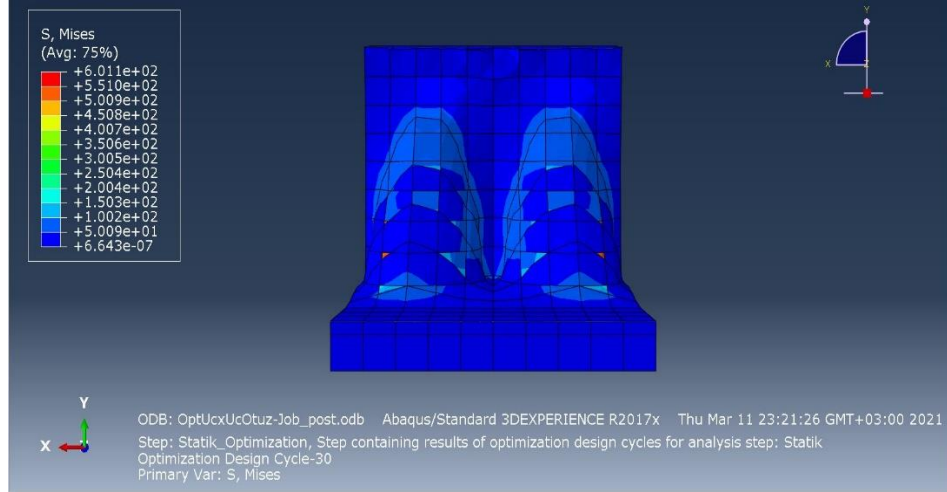


Şekil 3.54. 3x3x3 m model yirmi dört iterasyonluk optimum sistem y-x eksen



Şekil 3.55. 3x3x3 m model otuz iterasyonluk optimum sistem

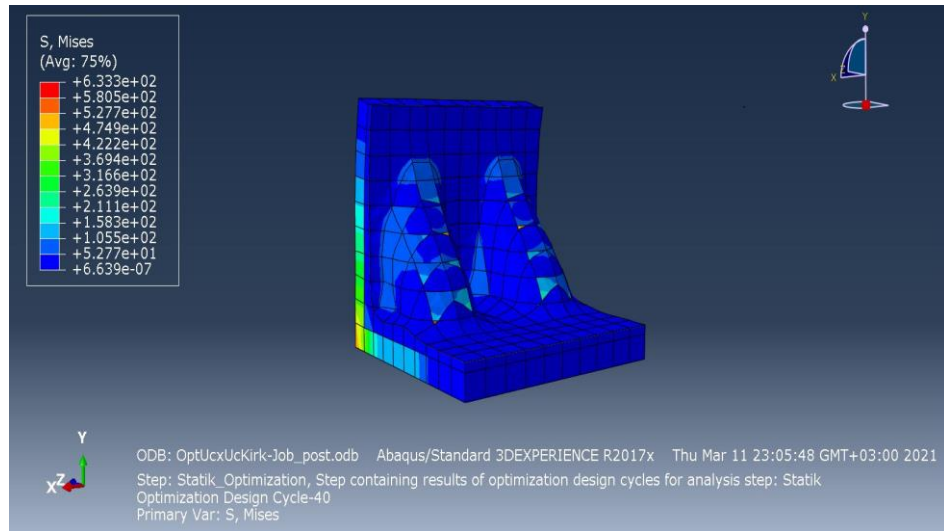
Şekil 3.55’de görüldüğü üzere iterasyon sayısındaki artışa bağlı olarak çıkan parça sayısı artmıştır ve payandalaşma da artmıştır. Diğer iki model ile otuz iterasyonluk optimum sistem kapsamında kıyaslandığında gerilme miktarında azalma gözlemlenir.



Şekil 3.56. 3x3x3 m model otuz iterasyonluk optimum sistem y-x eksenli

Şekil 3.56’da görüldüğü üzere payalar arasındaki boşluktan malzeme çıkarımı ve dolayısıyla payandalar arasındaki boşluk miktarı da artmıştır. Payanda kalınlığı azalmıştır.

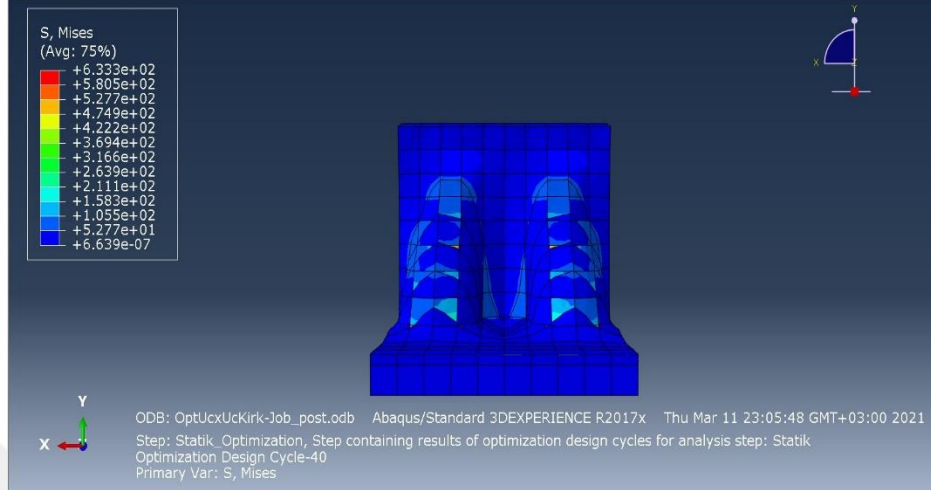
Payandalarda gözükten kırmızı ve turkuaz renkler bu bölgelerin diğer payanda kısımlara göre daha çok gerilmeye uğradığını ifade eder.



Şekil 3.57. 3x3x3 m model kırk iterasyonluk optimum sistem

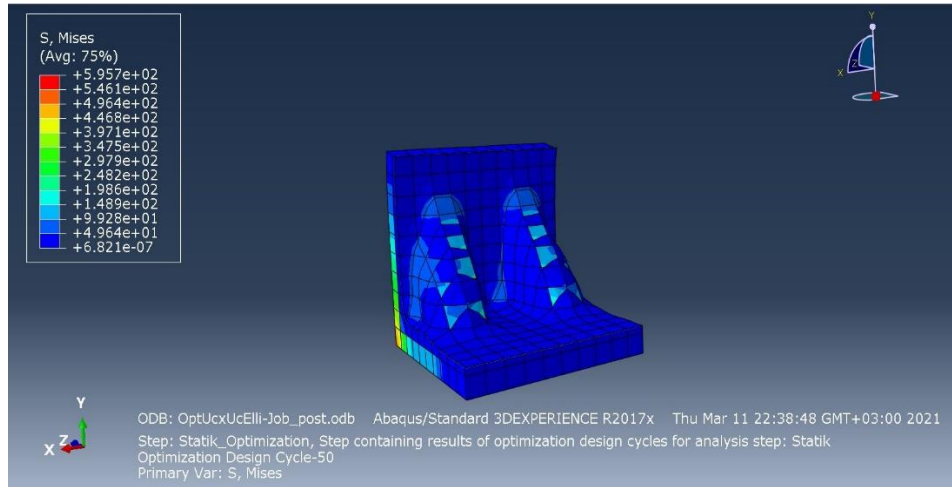
Şekil 3.57’de görüldüğü üzere iterasyon sayısındaki artışa bağlı olarak çıkan parça sayısı artmıştır ve payandalaşma da artmıştır.

Gerilme miktarında otuz iterasyonluk sisteme kıyasla artış gözlenmiştir. Diğer iki model ile kıyas yapıldığında gerilme miktarında azalma gerçekleşmiştir.

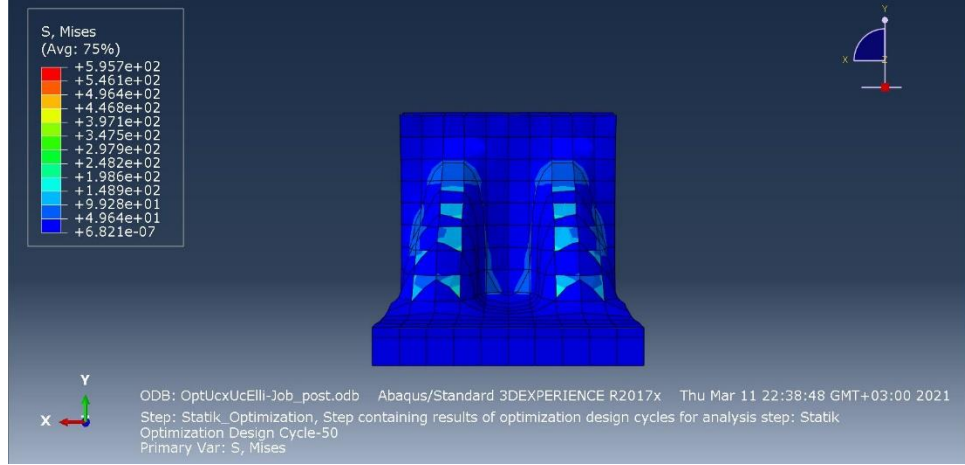


Şekil 3.58. 3x3x3 m model kırk iterasyonluk optimum sistem y-x eksen

Şekil 3.59’da görüldüğü üzere payandaların üzerindeki bazı mavi renkli alanların turkuaz renkli alanlara dönüştüğü gözle görülebilir. Bunun anlamı, yapılan iterasyonlar sonucu çıkarılan parçaların sayısındaki artışa bağlı olarak bu alanlardaki gerilme miktarında artış gözlenmiştir. 5x5x5 m sistem ile kıyaslandığında gerilme miktarında azalma gözlenmiştir.

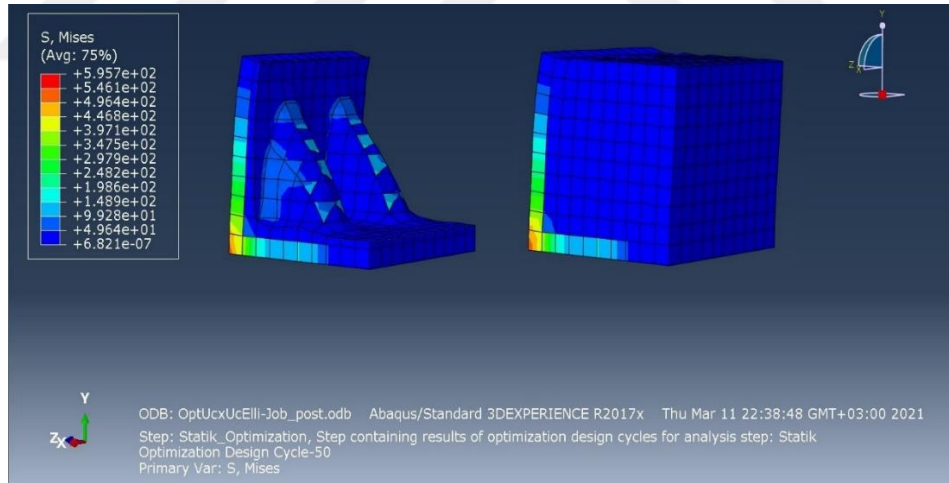


Şekil 3.59. 3x3x3 m model elli iterasyonluk optimum sistem



Şekil 3.60. 3x3x3 m model elli iterasyonluk optimum sistem y-x eksen

Şekil 3.60’da görüldüğü üzere daha önceki iterasyonlarla kıyaslandığında payandaların kalınlığı azalmış ve aralarındaki boşluk artmıştır. Özellikle yirmi dört iterasyonda gösterilen optimum y-x eksen ile arasındaki fark ciddi ölçüde fazladır.



Şekil 3.61. 3x3x3 m model elli iterasyonluk optimum sistem toplam değişim

Şekil 3.61’de görüldüğü üzere ilk tasarım modelimiz ile elli iterasyonluk optimizasyon sonucunda oluşan modelimiz arasında ciddi bir fark vardır. Diğer iki modelle görsel olarak çok benzer olsa da gerilme miktarı olarak daha az bir gerilmeye maruz kalan bir model olmuştur. Bu sisteme ait özellikleri yeni tasarımımızla daha hızlı, daha az malzeme, iş gücü ve para harcayarak karşılayabiliriz.

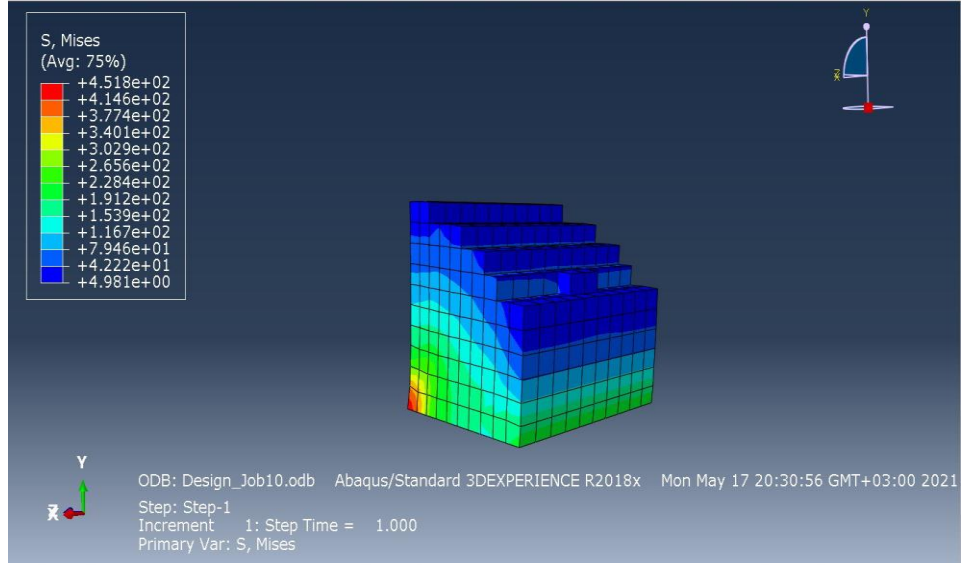
3.4. 5x5x5 m İstinat Duvarının Plastik Durum İçin Optimizasyonu

5x5x5 m istinat duvarının plastik durum için topoloji optimizasyonu Phyton dilinde yüz satır kodluk bir script kullanılarak sağlanmıştır. Tasarlanan sistemin özellikleri, plastik özellikler dışında elastik sistem ile aynıdır.

Tablo 3.1. BS20 beton sınıfı için malzeme özellikleri

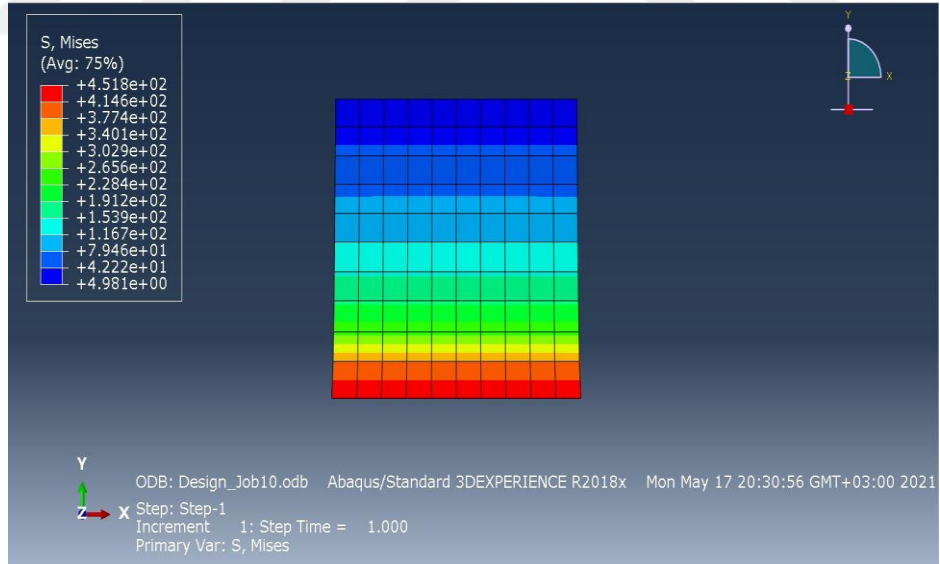
Material's parameters	B20	Plasticity parameters	
		Dilation angle	31
Concrete elasticity		Eccentricity	0.1
E (GPa)	21.2 0.2	fb0/fc0	1.16
		K	0.67
		Viscosity parameter	0
Concrete compressive behavior		Concrete compression damage	
Yield stress (MPa)	Inelastic strain	Damage parameter C	Inelastic strain
10.2	0	0	0
12.8	7.73585E-05	0	7.73585E-05
15	0.000173585	0	0.000173585
16.8	0.000288679	0	0.000288679
18.2	0.000422642	0	0.000422642
19.2	0.000575472	0	0.000575472
19.8	0.00074717	0	0.00074717
20	0.000937736	0	0.000937736
19.8	0.00114717	0.01	0.00114717
19.2	0.001375472	0.04	0.001375472
18.2	0.001622642	0.09	0.001622642
16.8	0.001888679	0.16	0.001888679
15	0.002173585	0.25	0.002173585
12.8	0.002477358	0.36	0.002477358
10.2	0.0028	0.49	0.0028
7.2	0.003141509	0.64	0.003141509
3.8	0.003501887	0.81	0.003501887
Concrete tensile behavior		Concrete tension damage	
Yield stress (MPa)	Cracking strain	Damage parameter T	Cracking strain
2	0	0	0
0.02	0.000943396	0.99	0.000943396

Tablo 3.1’de verilen malzeme özellikleri sisteme Property Modülü kullanılarak tanımlanır. Sistem tamamlandıktan sonra *File* seçeneğinden *Run Script* seçilerek yazılan script ile optimizasyon işlemleri gerçekleştirilir.



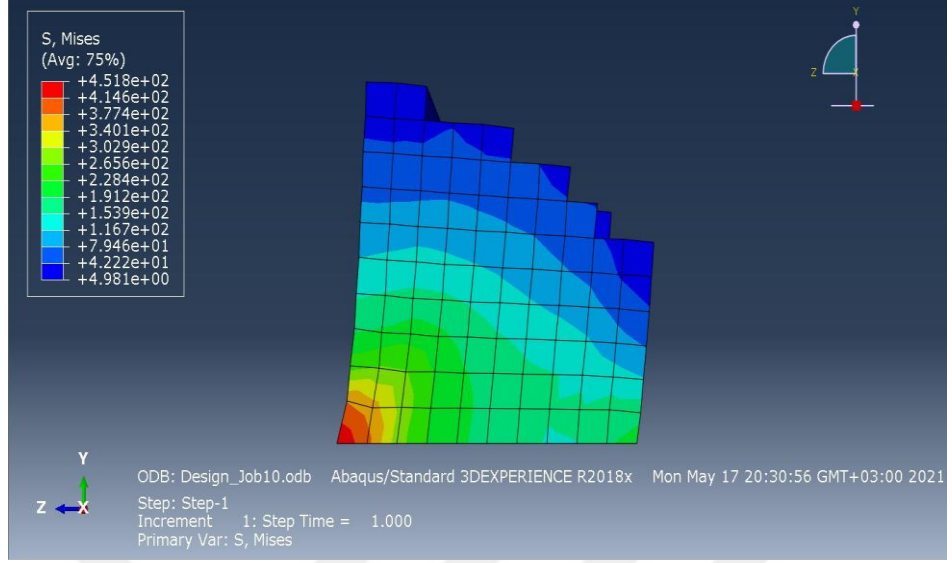
Şekil 3.62. 5x5x5 m plastik model on iterasyonluk optimum sistem

Sistemden gerilme enerjisi düşük parçalar kod yardımı ile on iterasyon sonucunda Şekil 3.62’de görüldüğü gibi sistemden çıkarılmıştır.

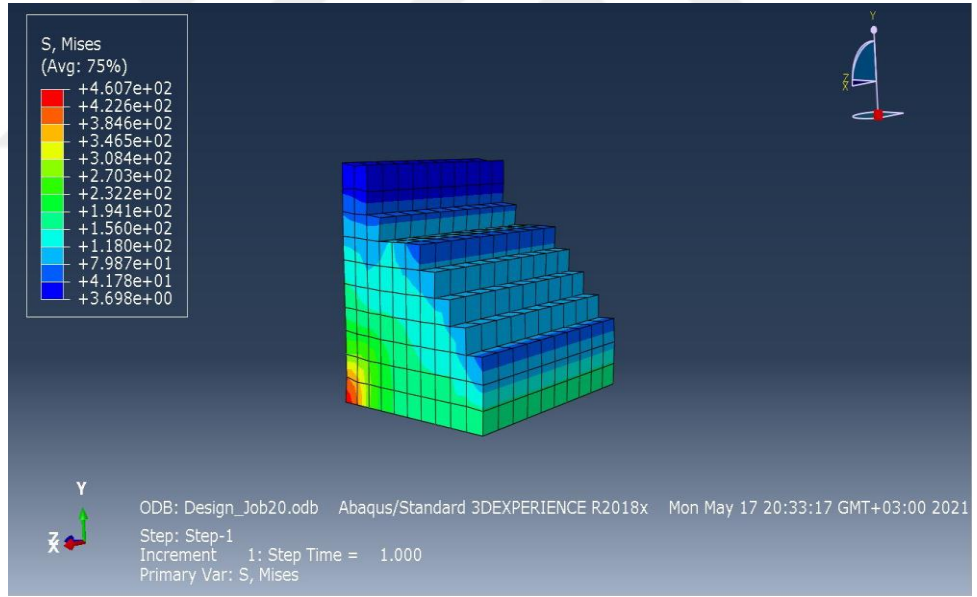


Şekil 3.63. 5x5x5 m on iterasyonluk plastik model arkadan görünüş y-x eksen

Şekil 3.63’de görüldüğü üzere en çok zorlanılan kesit en alt katmandır ve yükseklik boyunca gerilme miktarı renk değişiminden anlaşılacağı üzere azalmıştır. 5x5x5 m on iterasyonluk plastik model y-z eksen Şekil 3.64’de gösterilmiştir.

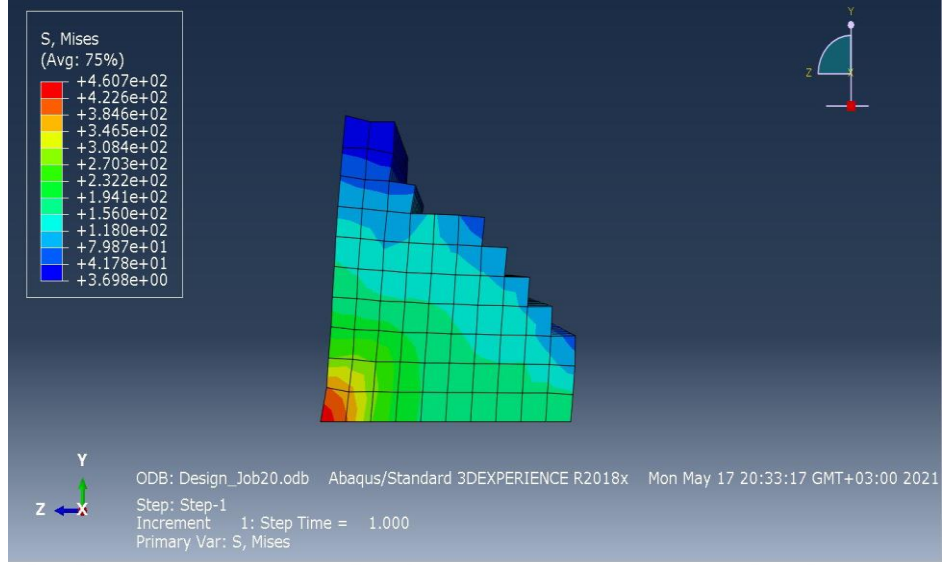


Şekil 3.64. 5x5x5 m on iterasyonluk plastik model y-z eksen



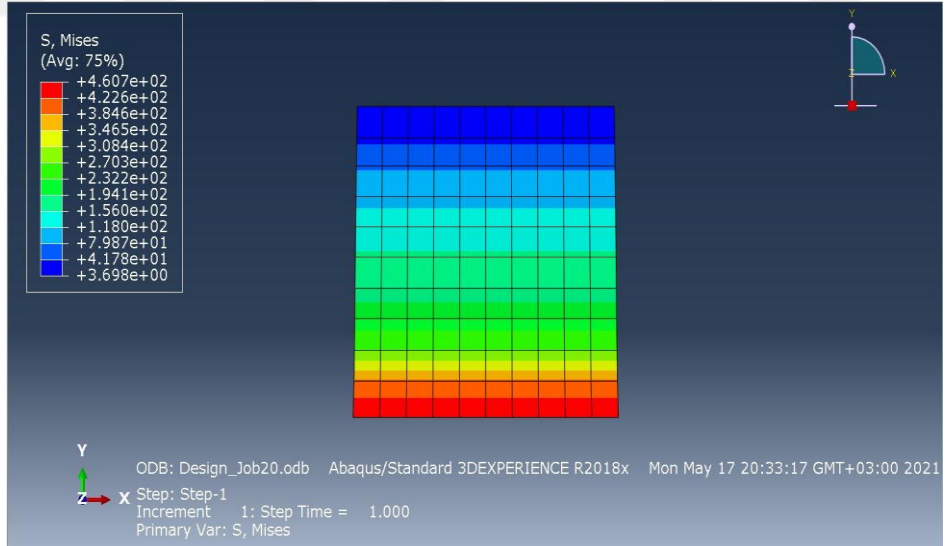
Şekil 3.65. 5x5x5 m plastik model yirmi iterasyonluk optimal sistem

Şekil 3.65’de görüldüğü üzere iterasyon miktarı artıkcı çıkan parça sayısı da artmıştır ve sistem daha optimal hale gelmiştir.



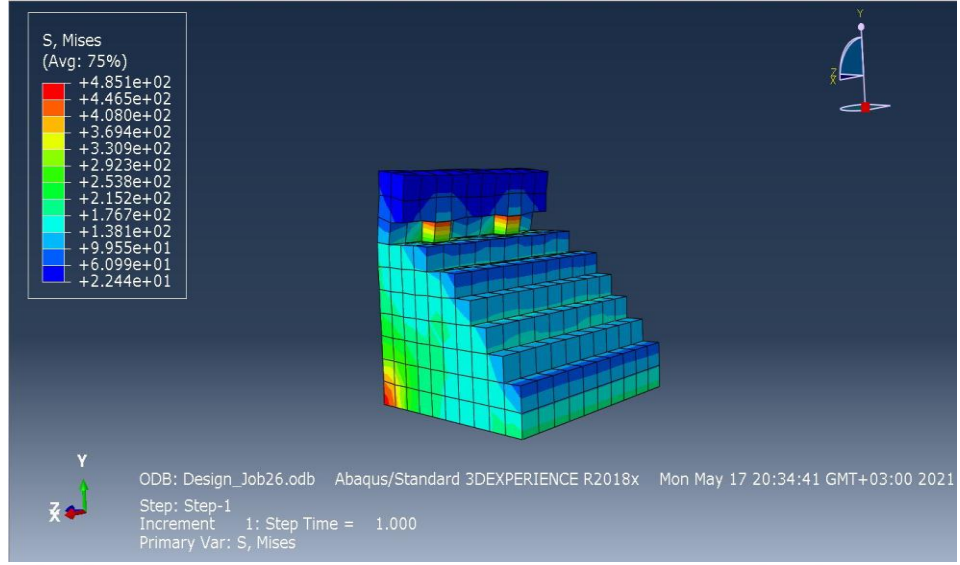
Şekil 3.66. 5x5x5 m yirmi iterasyonluk plastik model y-z eksen

Şekil 3.66’da görüldüğü üzere çıkan parça miktarı artıkça, maksimum gerilmenin değeri de artmıştır.



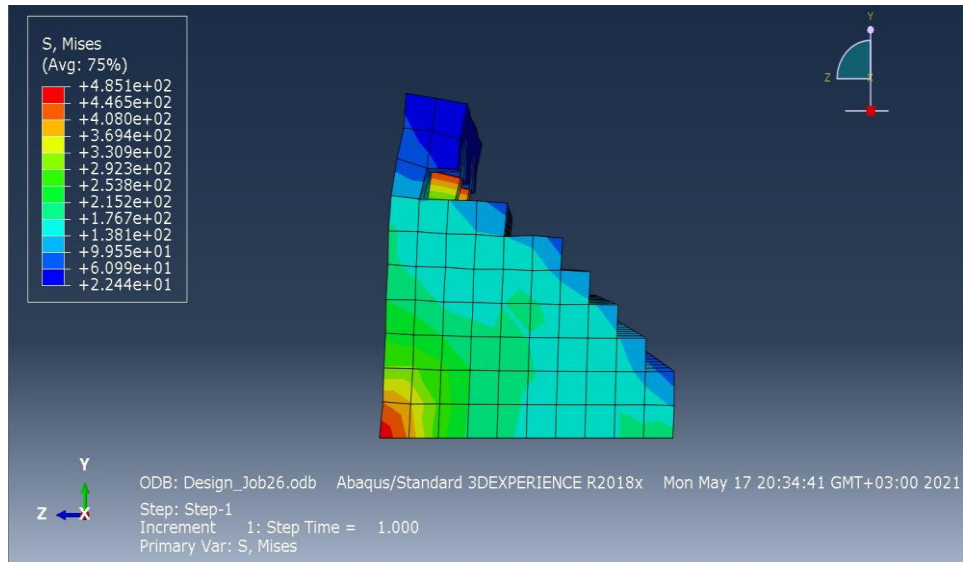
Şekil 3.67. 5x5x5 m yirmi iterasyonluk plastik model y-x eksen

Şekil 3.67’de görüldüğü üzere renk dağılımı ve renk sınırları on iterasyon ile karşılaştığında değişmemiştir. 5x5x5 m plastik model yirmi altı iterasyonluk sistem Şekil 3.68’de gösterilmiştir.



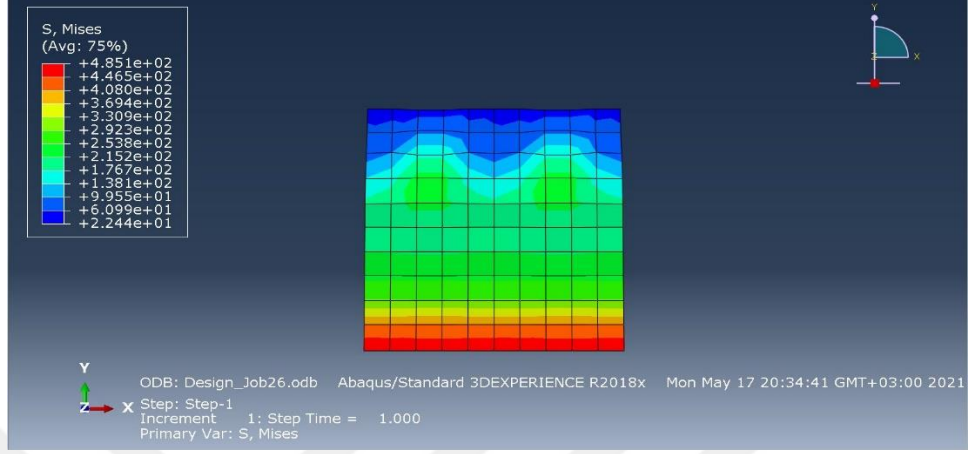
Şekil 3.68. 5x5x5 m plastik model yirmi altı iterasyonluk optimal sistem

İterasyon sayısındaki artışa bağlı olarak çıkan parça sayısı artmıştır. Sistemde 2 tane yeşil-sarı-turuncu renkli kare parçalar gözükmemektedir. Bu parçalar üzerindeki renk değişiminin nedeni etrafındaki parçaların gerilme enerjisi düşük olduğu için çıkarılıp üzerindeki yükü karşılamaya çalışmasından kaynaklanmaktadır.



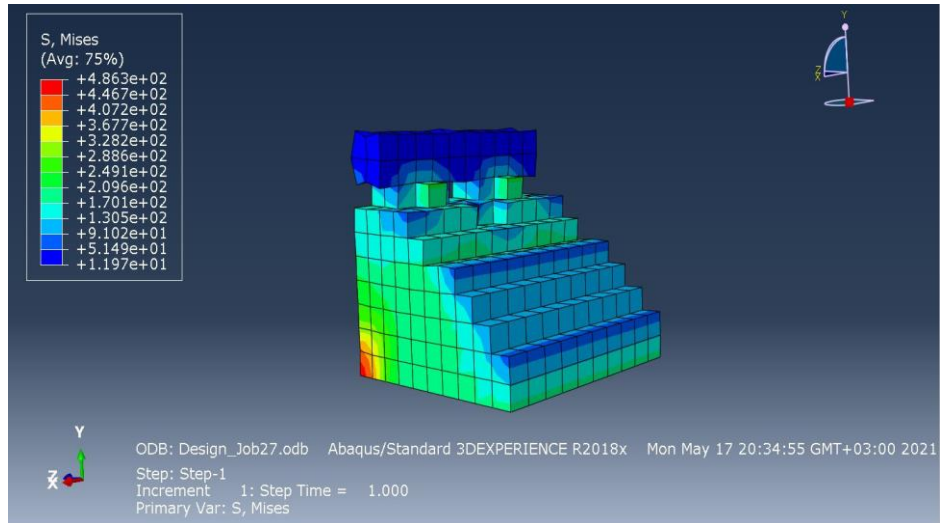
Şekil 3.69. 5x5x5 m yirmi altı iterasyonluk plastik model y-z eksenli

Şekil 3.69’da görülen renk geçişleri gerilmelerin önceki iterasyonlara göre parça bazında artığını ifade etmektedir.



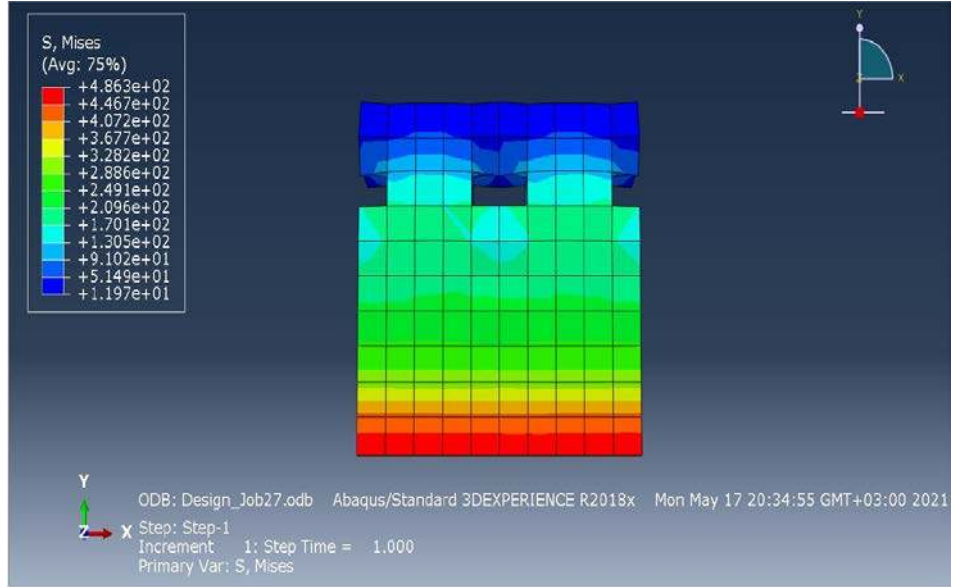
Şekil 3.70. 5x5x5 m yirmi altı iterasyonluk plastik model y-x eksen

Şekil 3.70’de gösterilen yirmi altı iterasyonluk sistem ile on ve yirmi iterasyonluk sistemler y-x eksen kapsamında kıyaslandığında renk çizgilerinin ve sınırlarının çıkan parçalara bağlı olarak değiştiği ve gerilmelerin arttığı görülmektedir.



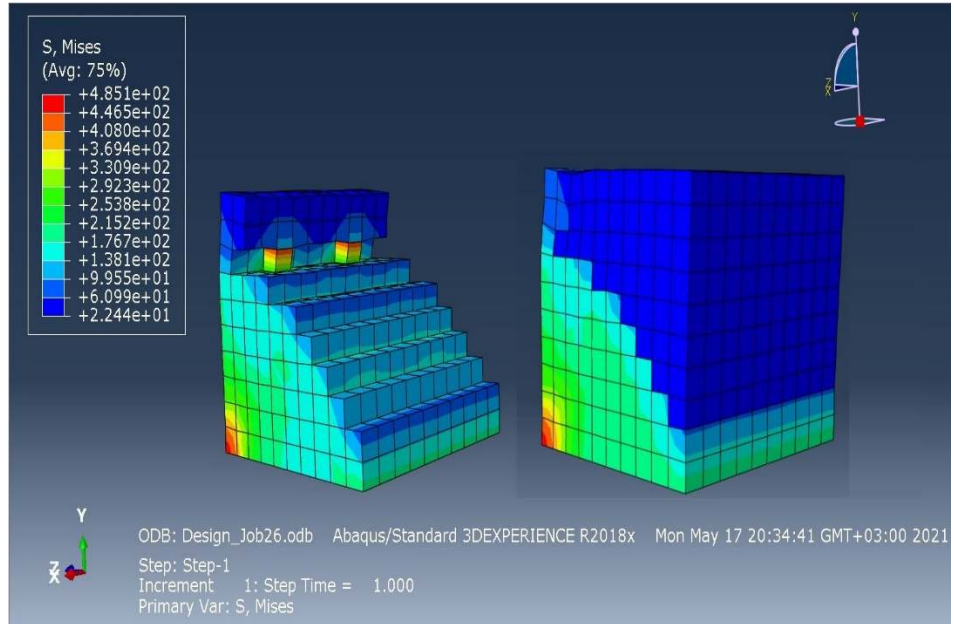
Şekil 3.71. 5x5x5 m yirmi yedi iterasyonluk plastik model optimal sistem

Şekil 3.71’de görüldüğü üzere yükün geldiği yüzeyden parça çıkarımı yapılmıştır.



Şekil 3.72. 5x5x5 m yirmi yedi iterasyonluk plastik model arkadan görünüş

Kullandığımız abaqus komut dosyası ve kodda bu izin verilen bir durum olsa da mühendislik açısından kabul edilebilir bir durum değildir. Bu yüzden yirmi altı iterasyonluk topolojinin optimal olduğu kabul edilir.



Şekil 3.73. 5x5x5 m plastik model yirmi altı iterasyonluk optimum sistem toplam değişim

4. SONUÇLAR

Bir ayrıtı üç, dört ve beş metre olan kare şeklindeki istinat duvarlarına topoloji optimizasyonu ilkeleri benimsenerek ABAQUS/CAE programı ile optimizasyon işlemleri elastik durum için yapılmıştır. Plastik durum için, yüz satırlık bir Phyton kodu ABAQUS/CAE programıyla birlikte kullanılarak bir ayrıtı beş metre olan kare bir istinat duvarının optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Bütün sistemlerde ve durumlarda en çok zorlanan yüzey kuvvetin etki ettiği yüzeydir.
- Elastik durum için, birim ayrıt boyutu küçüldükçe yükün geldiği yüzeyde gerilme miktarlarında da azalma gözlenmiştir.
- Elastik durum için, gerilme çizgileri ve boyutları aynı iterasyonlarda büyük oranda benzerlik gösterir.
- Elastik durumda, ABAQUS programı içinde bulunan optimizasyon modülünde optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bir ayrıtı 5 m olan istinat duvarı için 17. iterasyonda, 4 m olan istinat duvarı için 18. iterasyonda, 3m olan duvar için 19. iterasyonda tabandan kayıp vardır. Bu durum mühendislik açısından kabul edilebilir bir durum olmadığı için yükün geldiği yüzey ve taban yüzeyi optimizasyona kapatılarak optimizayona 50. iterasyona kadar devam edilmiştir.
- Elastik durumda, optimizasyon sonucu ortaya çıkan topoloji günümüzde kullanılan payandalı istinat duvarlarına benzemektedir.
- Plastik durumda, optimizasyon sonucu ortaya çıkan topoloji günümüzde kullanılan ağırlık istinat duvarlarına benzemektedir.
- Plastik durumda, 27. iterasyonda yükün geldiği duvardan parça çıkarılmıştır. Devam eden iterasyonlarda da yükün geldiği yüzeyden ve taban yüzeyinden parça çıkarılmaya devam edildiği için optimum sistem 26. iterasyon olarak kabul edilmiştir.
- Elastik durum ile plastik durum 5x5x5 m olan sistem için karşılaştırıldığında elastik durumda oluşan gerilmeler daha fazladır. Bunun başlıca nedeni çıkarılan parça sayısının elastik sistemde daha fazla olmasıdır.

Elastik durum ve plastik durum için optimizasyon sonu oluşan topolojiye bakıldığında bugün kullandığımız sistemlere büyük ölçüde benzemektedir. Devrilme ve dönme tahkikleri analize dahil edilmediğı göz önünde bulundurularak bu topolojilere bakıldığında, bir tümdengelim yaparsak ABAQUS programı ile yapılan optimizasyonlar inşaat mühendisliğı için kabul edilebilir ve mantıklı ön değerlendirmeler vermektedir.



5. ÖNERİLER

Çalışmada bir ayrıtı üç, dört ve beş metre olan kare şeklindeki istinat duvarlarına topoloji optimizasyonu ilkeleri benimsenerek ABAQUS/CAE programı ile optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bilimin ilerleyişi adına bu konuda önerilebilecekler şu şekilde ifade edilebilir:

- Devrilme ve dönme tahkiki modellemeye dahil edilerek tasarım geliştirilebilir.
- Hazırlanan bu model farklı dinamik, statik, hidrostatik dış etkiler altında yeniden değerlendirilebilir.
- Farklı amaç fonksiyonu ve kısıtlar için yeni optimizasyonlar türetilebilir.
- Optimizasyon yapılabilen yazılım programları kullanılarak karşılaştırmalar yapılabilir.

Optimizasyon, yapay zekadan aldığı destekle her geçen gün yaygınlaşmakta ve ilerlemektedir. Bu konuda yapılacak yeni çalışmalar inşaat mühendisliğinin gelişmesini ve ilerlemesini sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Bendose, M.P. ve Sigmund, O., 2003. Topology Optimization, Theory, Methods and Applications, Second Edition, Berlin: Springer.
- Clayton, C.R.I., 2014. Earth Pressures and Earth Retaining Structures, Third Edition, CRC Press, London and New York.
- Coduto, D.P., 2011. Foundation design, principles and practices, Prentice Hall, New Jersey.
- Day, R.W., 2012. Geotechnical Earthquake Engineering Hand Book, Mc Graw-Hill, New York.
- Howard, A.M., 2007. Computational Design of Shape Changing Structures via Topology Optimization, Master Thesis, University of Colorado.
- Khai, L., 2017. Generative Design with solidThinking Inspire, Arcada University of Applied Sciences, Plastics Technology Msc Thesis.
- Lambe, P.C., 1990. Hansen, L.A., Design and Performance of Earth Retaining Structures, American Society of Civil Engineers Geotechnical Publication No: 25, Washington.
- Lee, K., 1999. Principles of CAD / CAM / CAE Systems, First Edition, Addison Wesley.
- Lee, S., Lee, D., Lee, J., Han, C. ve Hedrick, K., 2007. Integrated process for structural topological configuration design of weight-reduced vehicle components, Finite Elements in Analysis and Design, 43, 620-629.
- Lin, C.Y., Chou ve J.N., 1999. A two-stage approach for structural topology optimization, Advances in Engineering Software, 30, 261–271.
- Lin, C.Y., Chao ve L.S., 2000. Automated image interpretation for integrated topology and shape optimization, Structural Multidisciplinary Optimization, 20, 125–137.
- Önalp, A., 1983. İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi, 1. Baskı, K.T.Ü. Yayınevi, Trabzon.
- Özcan, B., 2007. Yayılı Yük Etkisindeki İstinat Duvarlarına Etkiyen Dinamik Toprak Basınçlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul.
- Rao, S.S., 1984. Optimization: Theory & Applications, Second Edition, Halsted Press.

- Rozvany, G.I.N., 2001. Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer aided topology optimization in structural mechanics, Structural Multidisciplinary Optimization, 21, 90-108.
- Rozvany, G.I.N., 2009. A critical review of established methods of structural topology optimization, Structural Multidisciplinary Optimization, 37, 217-237.
- Sipahi, E., 2004. Dip Klapesinin Ansys ile Dizayn Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Shobeiri, V. ve Ahmadi-Nedushan, B., 2019. Topology optimization of pretensioned concrete beams considering material nonlinearity, Iran University of Science & Technology 9, 4, 629-650.
- Shobeiri, V., 2020. Bidirectional evolutionary structural optimization for nonlinear structures under dynamic loads, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 121, 5, 888-903.
- Tosun, N., 2005. Taş Yapılar ve Taş İstinat Duvarlar, 2. Baskı.
- Yıldız, A.R., Öztürk, N., Kaya N. ve Öztürk, F., 2003. Tasıt Elemanlarının Optimum Topoloji Yaklaşımı ile Tasarımı, Mühendis ve Makine, 516, 23-28.
- Yıldız, A.R., Öztürk, N., Kaya N. ve Öztürk, F., 2003, Integrated optimal topology design and shape optimization using neural networks, Struct Multidisciplinary Optimization, 25, 251-260.
- Zuo, Z. H., Xie, Y. M., 2015. A simple and compact Python code for complex 3D topology optimization, Advances in Engineering Software, 85, 1-11.

ÖZGEÇMİŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde başladığı lisans öğrenimini, onur öğrencisi olarak tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yazar, iyi derecede İngilizce bilmektedir.

