

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DERİN KAZILARDA ZEMİN ÇİVİLİ DESTEK SİSTEMLERİNİN
SONLU ELEMANLAR ANALİZ PROGRAMI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Bureu SEÇKİN HALAT

**HAZİRAN - 2016
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Derin Kazılarda Zemin Çivili Destek Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Analiz Programı ile Değerlendirilmesi” isimli bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’da Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu çalışmayı bana öneren, çalışmamın her aşamasında benimle ilgilenen, bana araştırma ruhunu aşıl原因an, bilgi ve deneyimlerinden her zaman yararlandığım değerli hocam Sayın Doç. Dr. Sabriye Banu İKİZLER’e teşekkür eder, saygılar sunarım.

Tez savunma sınavımda yer alarak tezime değer katan çok değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Tufan ÇAKIR’a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN’a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Öğrenimim boyunca üzerimde emeği olan, öncelikle Geoteknik Anabilim Dalı’ndaki hocalarım Yrd. Doç. Dr. Ahmet ŞENOL ve Yrd. Doç. Dr. Gökhan DEMİR olmak üzere tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen, bana vakit ayıran Arş. Gör. Fatih URİN’e ve Arş. Gör. Fezayil SUNCA’ya, Arş. Gör. Alperen TÜRKAY’a ve manevi desteklerinden dolayı Cumhuriyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ndeki kıymetli hocalarıma ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca hep yanımda olan, her zaman sevgi ve güvenlerini hissettiğim, maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen babam Salih SEÇKİN’e, annem Goncağül SEÇKİN’e, kardeşlerim Burçin SEÇKİN ve Burak SEÇKİN’e teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince desteğini her zaman hissettiren ve varlığıyla güç veren, başarılarımla mutlu olan sırdaşım, arkadaşım, eşim Uğur HALAT’a sevgilerimi sunar, teşekkür ederim.

Burcu SEÇKİN HALAT

Trabzon 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Derin Kazılarda Zemin Çivili Destek Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Analiz Programı İle Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Sabriye Banu İKİZLER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. (14/06/2016)

Burcu SEÇKİN HALAT

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	X
SUMMARY	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Zemin Çivisi Tekniği ile İlgili Önceki Çalışmalar.....	2
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı	9
1.4. Zemin Çivili Duvarların Gelişimi	10
1.5. Zemin Çivili Duvarlarla İlgili Uluslararası Tasarım Çalışmaları	12
1.5.1. Fransız Uygulaması – Clouterre Projesi.....	12
1.5.2. İskandinav Uygulaması – Nordic Handbook.....	13
1.5.3. Birleşik Devletler Uygulaması – FHWA	13
1.5.4. Hong Kong Uygulaması.....	14
1.6. Zemin Çivili Duvarların Tasarımında Zemin Koşullarının Etkisi.....	14
1.6.1. Kohezyonlu Zeminler.....	17
1.6.1.1. Yumuşak Killer ve Siltler.....	17
1.6.1.2. Orta Katı – Katı Killer.....	17
1.6.1.3. Kohezyonlu Zeminlerde Uygulanılan Zemin Çivili Duvarlarda Karşılaşılan Sorunlar	18
1.6.1.3.1. Şişme ve Rötne	18
1.6.1.3.2. Örselenmiş Zemin ve Şevin Stabil Olması.....	18
1.6.1.3.3. Derecelenmenin Etkisi	18
1.6.2. Granüler Zeminler.....	20
1.6.2.1. Granüler Zeminlerde Uygulanılan Zemin Çivili Duvarlarda Karşılaşılan Sorunlar	20

1.6.2.1.1.	Geçici Stabilite Sorunları.....	20
1.6.2.2.	Enjeksiyon Kaybı.....	21
1.6.3.	Zayıf Kayalar	21
1.6.3.1.	Zayıf Kayalarda Uygulanılan Zemin Çivili Duvarlarda Karşılaşılan Sorunlar	21
1.6.3.1.1.	Ters Tabakalanma	21
1.6.3.1.2.	Ayrışma Etkisi	22
1.7.	Zemin Çivisi	22
1.7.1.	Uygulama Alanları.....	22
1.7.2.	Zemin Çivileme Sisteminin Esasları.....	23
1.7.2.1.	Montaj Metodu.....	23
1.7.2.2.	Zemin Çivili Duvar Elemanları	25
1.7.2.2.1.	Çivi Donatıları	26
1.7.2.2.2.	Güçlendirme Konnektörü (Bağlayıcı eleman).....	26
1.7.2.2.3.	Enjeksiyon (Harç)	26
1.7.2.2.4.	Korozyon Önleyiciler	27
1.7.2.2.5.	Çivi Başlığı	27
1.7.2.2.6.	Merkezleyiciler	27
1.7.2.2.7.	Yüzey Kaplamaları.....	28
1.7.2.2.8.	Drenaj Sistemi.....	28
1.7.3.	Avantaj ve Dezavantajları	28
1.7.4.	Çivi Sisteminin Ana Mekanizması.....	29
1.7.5.	İnşaat Adımları.....	31
1.7.5.1.	İlk Yarmanın Açılması	32
1.7.5.2.	Deliklerin Açılması	32
1.7.5.3.	Çivinin Yerleştirilmesi ve Enjeksiyonu	33
1.7.5.4.	Drenaj Sisteminin Yerleştirilmesi.....	34
1.7.5.5.	İşlemin İstenen Kota Kadar Tekrarlanması	35
1.7.5.6.	Son Yüzey Kaplaması	35
1.7.6.	Zemin Çivili Duvarların Davranışı	36
1.7.6.1.	Zemin Çivili Duvarların Olası Göçme Biçimi.....	36
1.7.6.2.	Çivi – Zemin Etkileşimi	39
1.7.6.3.	Çivi-Zemin-Kaplama Etkileşimi.....	40

1.7.6.4.	Çivi Yüklerinin Dağılımı.....	41
1.7.6.5.	Kaplama Yükünün Büyüklüğü ve Dağılımı	45
1.7.6.6.	Şekil Değiştirme Davranışı.....	45
1.7.6.7.	Çivi Eğilmesi ve Kaymanın Rolü	47
1.7.6.8.	Limit Denge Analizi ile Tasarım	47
1.7.6.8.1.	Dayanım Sınır Durumu	47
1.7.6.8.2.	Servis Sınır Durumu.....	49
1.7.6.9.	Genel Gereklilikler ve Güvenlik Katsayıları	49
1.8.	Zemin Çivili Duvar Tasarım Esasları.....	50
1.8.1.	Giriş.....	50
1.8.2.	Tasarım Yaklaşımları	51
1.8.2.1.	Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı (LRFD)	51
1.8.2.2.	Servis Yükü Tasarımı (SLD)	51
1.8.3.	Zemin Çivili Duvarın Duraylılığı	52
1.8.3.1.	Tasarımın Temel Kavramları.....	53
1.8.3.2.	Zemin Çivili Duvar Stabilite Analizleri	58
1.8.3.2.1.	İç Stabilite Analizleri.....	59
1.8.3.2.1.1.	Enjeksiyon – Zemin Bağ Mukavemeti.....	59
1.8.3.2.1.2.	Enjeksiyon - Donatı Bağ Mukavemeti	60
1.8.3.2.1.3.	Donatının Gerilme Dayanımı.....	60
1.8.3.2.2.	Dış Stabilite Analizleri	62
1.8.3.2.2.1.	Toptan Stabilite Analizleri.....	63
1.8.3.2.2.2.	Kayma Stabilesi Analizi	65
1.8.3.2.2.3.	Taşıma Kapasitesi Analizi	67
1.8.3.2.3.	Yüzey Elemanı Stabilite Analizleri.....	67
1.8.3.2.3.1.	Yüzey Elemanı Kırılma Dayanımı.....	67
1.8.3.2.3.2.	Zımbalama Dayanımı	69
1.8.3.2.3.3.	Bağlantı Elemanı Kopma Dayanımı	71
1.8.3.3.	Güncel Zemin Çivisi Tasarım Yöntemleri	72
1.8.3.3.1.	Çivi Tasarımı	72
1.8.3.3.2.	Kaplama Tasarımı	72
1.9.	Zemin Çivili Duvarların Tasarımı.....	72
1.9.1.	Giriş.....	72

1.9.2.	Zemin Çivili Duvarlar Ön Tasarım Esasları.....	73
1.9.2.1.	Duvar Yerleşimi.....	73
1.9.2.2.	Zemin Çivisi Düşey ve Yatay Aralığı.....	74
1.9.2.3.	Zemin Çivisi Düzeni	75
1.9.2.4.	Zemin Çivisi Eğimi	77
1.9.2.5.	Zemin Çivisi Boyu ve Dağılımı.....	79
1.9.2.6.	Diğer Ön Tasarım Esasları.....	81
1.9.3.	Tasarım Abakları ile Ön Tasarım.....	82
1.9.4.	Son Tasarım	83
1.9.4.1.	Dış Göçme Modelleri	83
1.9.4.1.1.	Toptan Göçmeye Karşı Stabilite Kontrolü	83
1.9.4.1.2.	Kaymaya Karşı Stabilite Kontrolü	83
1.9.4.1.3.	Taşıma Gücü Kontrolü	83
1.9.4.2.	İç Göçme Modelleri	84
1.9.4.3.	Kaplama Tasarımı	84
1.9.5.	Diğer Tasarım Esasları	84
1.10.	Zemin Çivili Duvar Tasarımı.....	85
1.10.1.	Servis Yükü Tasarımı.....	85
1.10.1.1.	Kritik Tasarım Kesitlerinin Hazırlanması ve Ön Tasarımının Seçimi.....	85
1.10.1.2.	İzin Verilen Çivi Kafası Yükünün Hesaplanması.....	86
1.10.1.3.	İzin Verilen Minimum Çivi Kafası Servis Yükünün Denetimi	86
1.10.1.4.	İzin Verilen Çivi Yükü Destek Diyagramının Belirlenmesi.....	87
1.10.1.5.	Aralıkların ve Boyların Seçimi	88
1.10.1.6.	Son Zemin Dayanımlarının Belirlenmesi	90
1.10.1.7.	Güvenlik Sayısının Hesaplanması	90
1.10.1.8.	Dış Duraylılık Araştırması.....	90
1.10.1.9.	Sismik Taşıma Duraylılık Araştırması	91
1.11.	Özel Tasarım Gerektiren Durumlar	91
1.11.1.	Heterojen Zemin Profilleri.....	92
1.11.2.	Köprü Kenar Ayakları	92
1.11.3.	Basamaklı Yapılar	93
1.11.4.	Kompozit Yapılar	93
1.11.5.	Değişken Çivi Boyuna Sahip Yapılar	95

1.11.6.	Değişken Çivi Eğimine Sahip Yapılar	95
1.11.7.	Zemin Sızıntı Suyu Kuvvetleri veya YASS' nin Duvar Tabanına Yakın Olması Durumu.....	96
1.11.8.	Sonsuz Şev Koşulu.....	96
1.11.9.	Sismik Yükler Altında Davranış	97
1.12.	Yarma Şevli Duvarların Ön Tasarımı İçin Basitleştirilmiş Tasarım Abakları	97
1.12.1.	Geometrik Değişkenler (Arka Şevin Yatayla Yaptığı Açık 'β' ve Duvar Arkasının Düşeyle Yaptığı Açık 'α')	98
1.12.2.	Dayanım Değişkenleri (Azaltılmış Sürtünme Açısı ϕ_D ve Boyutsuz Kohezyon c_D).....	98
1.12.3.	Boyutsuz Çivi Yükü (T_D)	99
1.12.4.	Ön Çivi Boyutu	99
1.12.5.	Ön Çivi Boyu	101
1.13.	Sonlu Elemanlar Analizi.....	108
1.13.1.	Sonlu Elemanlar Yöntemi	108
1.13.2.	Sonlu Elemanlar Yönteminin Geoteknik Mühendisliği' nde Kullanımı....	109
1.13.3.	PLAXIS Programı	110
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	111
2.1.	Zemin Çivisi Hesap Adımları.....	111
2.1.1.	Zemin Modelleri ve Malzeme Parametrelerinin Seçimi	111
2.1.2.	Zemin, Duvar ve Çivi Parametrelerinin Tanımlanması.....	117
2.1.3.	Zemin Çivisi Destekli Kazılarda Çivi Tasarımı ve Analizleri	120
2.1.4.	Zemin Çivisi Hesap Adımları.....	120
2.1.5.	Zemin Çivili Destek Sistemlerinin Nümerik Analizi	121
3.	BULGULAR VE İRDELEME	135
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	146
5.	KAYNAKLAR	149
6.	EKLER.....	154
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

DERİN KAZILARDA ZEMİN ÇİVİLİ DESTEK SİSTEMLERİNİN
SONLU ELEMANLAR ANALİZ PROGRAMI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Burcu SEÇKİN HALAT

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Sabriye Banu İKİZLER
2016, 153 Sayfa, 120 Ek Sayfa

Son yıllarda büyük şehirlerde ve şehir merkezlerinde kontrolsüz artan nüfus yoğunluğu ile inşaat talebi zamanla karşılanamayacak hale gelecektir. Bu artan talep inşaat sektörünü yüksek katlı yapılara, çok katlı bodrumlara, metro ve tünellere vb. yönlendirmektedir. Derin bir kazı yapılması sırasında zemin çoğu kez kendini tutabilir özelliğe sahip olmamaktadır. Bu durumda, kazı alanında güvenliği sağlamak amacıyla kazının desteklenmesi gerekmektedir. Zemin çivili sistem de bunlardan biridir. Zemin çivili duvarlar ekonomik oluşları, uygulama süresi ve minimum çalışma alanı ihtiyacı ile diğer destekleme sistemlerine göre avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada; derin kazılarda zemin çivili diyafram duvarlar incelenerek, zemin çivili destekleme sistemleri önce klasik analiz yöntemleriyle projelendirilmiş, daha sonra tasarlanan sistemlerin deformasyon davranışları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Farklı rölatif sıklıktaki kum zeminler ve bu kum zeminler için literatürde önerilmiş değerlerden zemin parametreleri seçilmiştir. Nümerik analizlerde incelenen geoteknik modeller $D_r=35\%$ ve $D_r=65\%$ için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Zemin çivili destek sistemleri için PLAXIS 8.2 sonlu elemanlar analiz programı ile nümerik analizler yapılarak, duvarların deplasman değerleri ile toptan göçmeye karşı güvenlik sayıları belirlenmiştir. Sonuç olarak; iki farklı kum zemin için, çivili duvar sisteminin davranışları karşılaştırıldığında; $D_r=65\%$ rölatif sıklıktaki kum zeminde, çivi sayısının artmasıyla yatay ve düşey yerdeğiştirmelerin azaldığı, buna bağılı olarak da güvenlik sayısının arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin çivisi, Şev stabilitesi, Sonlu elemanlar metodu, PLAXIS.

Master Thesis

SUMMARY

EVALUATION OF SOIL NAILING SUPPORT SYSTEM IN DEEP EXCAVATION BY FINITE ELEMENT ANALYSIS PROGRAM

Burcu SEÇKİN HALAT

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Sabriye Banu İKİZLER
2016, 153 Pages, 120 Addition Pages

In recent years, It may be become able to meet the construction demand because of the uncontrolled increasing population at the big cities and city centers. The construction industry is directed to high rise buildings, multi story basements, subway and tunnels, due to this increasing demand. Civil engineers are required to keep in balance the ground on during the deep excavations, since the soil often have not keep itself. Soil must be supported in order to ensure safety at the site of the excavation. For this reason, there are many methods are used and soil nailing system is one of them. Among the types of retaining structure, soil nailed walls prevent due to their advantages such as being economic, shorter application periods and ability to work in restricted areas. Therefore applications are increasing rapidly. In this study, a diaphragm wall with soil nails is modelled on a steep slope, and the effects of the number of different soil nails, different loads and soil types on the diaphragm wall are examined. Soil nail reinforced system is modelled with finite element method (FEM) by using Plaxis 8.2. In this study to ensure stability of the sand soil with different relative densities ($D_r=35$ and $D_r=65$), a diaphragm wall supported by soil nails is analysed numerically. The total, horizontal and vertical displacements of the diaphragm wall are obtained. The computed factor of safety values are found with PLAXIS 8.2 analysis program and are compared results of analysis. Total, vertical, and horizontal displacements for $D_r=65$ soil were smaller than $D_r=35$ soil but factors of safety were higher. Consequently; optimum result was obtained at $D_r=65$ relative density and 6 soil nail case.

Key Words: Soil nail, Slope stability, Finite element method, PLAXIS.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Fransa Notre Dame De Commier barajına ait taşkın savaklarının kesiti.....	10
Şekil 2.	Yeraltı kazılarında kullanılan geleneksel yöntem ile Yeni Avusturya Tünel Metodu karşılaştırması	11
Şekil 3.	Versailles Fransa'daki ilk zemin çivili duvar kesiti.	12
Şekil 5.	Ters tabakalanmaya bağlı stabilite sorunları.....	21
Şekil 6.	Zemin çivili duvarlara ait tipik kesit.....	25
Şekil 7.	Zemin çivisine ait detaylı kesit	26
Şekil 8.	Zemin çivili sistemin modellenmiş iki zonu	30
Şekil 9.	Çivili duvarların inşaat adımları.....	31
Şekil 10.	Zemin çivili sistemin tipik kesiti.....	33
Şekil 11(a).	Geçici zemin çivisi.....	34
Şekil 11(b).	Kalıcı zemin çivisi	35
Şekil 12.	Zemin çivisi davranışı.....	37
Şekil 13.	Zemin çivili şevin şematik gösterim.....	38
Şekil 14.	Zemin çivili duvarların olası göçme biçimleri.....	39
Şekil 15.	Normalize edilmiş ölçülen maksimum çivi yükleri.....	42
Şekil 16.	Dik bir şevin inşaatı süresince kazı aşamalarında zemin çivilerinde oluşan çekme kuvvetleri ve deformasyonun gelişimi.	43
Şekil 17.	Zemin çivisi ile güçlendirilmiş mevcut şevlerde deformasyon oluşumu ve yüklerin mobilize olması.	44
Şekil 18.	Katı killer, rezidüel zeminler ve kumlar için arazide duvarda gözlemlenmiş maksimum yanal hareketler.....	46
Şekil 19.	Zemin çivili duvarlar için dayanım sınır durumunun şematik gösterimi	48
Şekil 20.	Zemin çivili duvarlarda servis sınır durumunun şematik gösterimi.....	49
Şekil 21.	Zemin çivili duvarlarda araştırılacak olası göçme biçimleri.....	53
Şekil 22.	SLD ile zemin çivisi tasarımı, tek donatılı şev.	54
Şekil 23.	LRFD ile zemin çivisi tasarımı, tekil donatılı şev.....	54
Şekil 24.	SLD ve LRFD ile zemin çivisi tasarımı, çoğul donatılı şev.	55
Şekil 25.	Çivi destek diyagramı.	57
Şekil 26.	Zemin çivili duvar stabilite problemleri.....	58
Şekil 27.	Zemin çivisi dayanım diyagramı.....	61

Şekil 28.	Çivi dayanım diyagramının iksa sistemi üzerinde gösterimi	62
Şekil 29.	Zemin çivili duvarın toptan stabilite analizi.	63
Şekil 30.	Zemin çivili duvarın kayma stabilitesi analizi	66
Şekil 31.	Geçici iksalarda zımbalama etkisi.	69
Şekil 32.	Kalıcı iksalarda zımbalama etkisi.	70
Şekil 33.	Duvar yüzü zemin çivisi düzeni.	76
Şekil 34.	Düşey olmayan zeminler için zemin çivisi yerleşimi.....	77
Şekil 35.	Alt yapı elemanlarına bağlı olarak çivi eğilimlerinin değişmesi	78
Şekil 36.	Köşelerde çivi yerleşim planı görünüşü	78
Şekil 37.	Çivi boylarındaki değişimin etkisi	81
Şekil 38.	Tasarım için varsayılan çivi boyu dağılımı.....	89
Şekil 39.	Basamaklı duvarların yapım aşaması	93
Şekil 40.	Kompozit duvar kesiti.....	94
Şekil 41.	Çok sıra ankrajlı kompozit duvar kesiti.....	95
Şekil 42.	Sonsuz şev koşulu/ Tasarım Yaklaşımı	97
Şekil 43.	Ön tasarım abağı 1A / Duvar arkası eğimi = 0°	102
Şekil 44.	Ön tasarım abağı 1B / Duvar arkası eğimi = 0°, Duvar yüzü eğimi=0°.....	102
Şekil 45.	Ön tasarım abağı 1C / Duvar arkası eğimi = 0°, Duvar yüzü eğimi=10°	103
Şekil 46.	Ön tasarım abağı 2A / Duvar arkası eğimi = 10°	103
Şekil 47.	Ön tasarım abağı 2B / Duvar arkası eğimi = 10°, Duvar yüzü eğimi=0°	104
Şekil 48.	Ön tasarım abağı 2C / Duvar arkası eğimi = 10°, Duvar yüzü eğimi=10°....	104
Şekil 49.	Ön tasarım abağı 3A / Duvar arkası eğimi = 20°	105
Şekil 50.	Ön tasarım abağı 3B / Duvar arkası eğimi = 20°, Duvar yüzü eğimi= 0°.....	105
Şekil 51.	Ön tasarım abağı 3C / Duvar arkası eğimi = 20°, Duvar yüzü eğimi= 10° ..	106
Şekil 52.	Ön tasarım abağı 4A / Duvar arkası eğimi = 34°	106
Şekil 53.	Ön tasarım abağı 4B / Duvar arkası eğimi = 34°, Duvar yüzü eğimi= 0°.....	107
Şekil 54.	Ön tasarım abağı 4C / Duvar arkası eğimi = 34°, Duvar yüzü eğimi= 10° ...	107
Şekil 55.	Sürekli Bir Sistemin Sonlu Elemanlara Ayrılması.....	108
Şekil 56.	Deneylerde kullanılan kumun dane çapı dağılım eğrisi.	113
Şekil 57.	Çivisiz ve yüksüz durum için nümerik model.....	122
Şekil 58.	İki çivili durum için nümerik model.....	122
Şekil 59.	Dört çivili durum için nümerik model.....	123
Şekil 60.	Altı çivili durum için nümerik model.....	123

Şekil 61.	Dr=%35 zeminde altı zemin çivili modelde deforme olmuş meshler	124
Şekil 62.	Dr=%35 zeminde altı zemin çivili modelde toplam yerdeğıştirmelerin dağılımı	125
Şekil 63.	Dr=%35 altı çivili modelde deformasyon ağı ve maksimum yatay yerdeğıştirme miktarı	125
Şekil 64.	Dr=%35 altı çivili modelde deformasyon ağı ve maksimum düşey yerdeğıştirme miktarı.....	126
Şekil 65.	Dr=%35 zeminde altı zemin çivili modelde toplam yerdeğıştirme miktarı..	126
Şekil 66.	Dr=%35 zeminde altı zemin çivili modelde toplam gerilmelerin değışimi..	127
Şekil 67.	Duvarın yatay deplasman diyagramı	127
Şekil 68.	Duvarın düşey deplasman diyagramı	128
Şekil 69.	Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı	128
Şekil 70.	Duvarın maksimum moment diyagramı	129
Şekil 71.	Dr=%65 zeminde altı zemin çivili modelde deforme olmuş meshler	129
Şekil 72.	Dr=%65 zeminde altı zemin çivili modelde toplam yerdeğıştirmelerin dağılımı	130
Şekil 73.	Dr=%65 altı çivili modelde deformasyon ağı ve maksimum yatay yerdeğıştirme miktarı	130
Şekil 74.	Dr=%65 altı çivili modelde deformasyon ağı ve maksimum düşey yerdeğıştirme miktarı.....	131
Şekil 75.	Dr=%65 zeminde altı zemin çivili modelde toplam yerdeğıştirme miktarı..	131
Şekil 76.	Dr=%65 zeminde altı zemin çivili modelde toplam gerilmelerin değışimi..	132
Şekil 77.	Duvarın yatay deplasman diyagramı	132
Şekil 78.	Duvarın düşey deplasman diyagramı	133
Şekil 79.	Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı	133
Şekil 80.	Duvarın maksimum moment diyagramı	134
Şekil 81.	Dr=%35 Zemin için iki zemin çivili modelde yük-yerdeğıştirme eğrisi.....	138
Şekil 82.	Dr=%65 Zemin için iki zemin çivili modelde yük-yerdeğıştirme eğrisi.....	138
Şekil 83.	Dr=%35 Zemin için dört zemin çivili modelde yük-yerdeğıştirme eğrisi....	139
Şekil 84.	Dr=%65 zemin için dört zemin çivili modelde yük-yerdeğıştirme eğrisi	139
Şekil 85.	Dr=%35 Zemin için altı zemin çivili modelde yük-yerdeğıştirme eğrisi.....	140
Şekil 86.	Dr=%65 zemin için altı zemin çivili modelde yük-yerdeğıştirme eğrisi.....	140
Şekil 87.	Dr=%35 zeminde iki zemin çivisi, dört zemin çivisi ve altı zemin çivisi için toplam yerdeğıştirme	141
Şekil 88.	Dr=%65 zeminde iki zemin çivisi, dört zemin çivisi ve altı zemin çivisi için toplam yerdeğıştirme	141
Şekil 89.	Dr=%35 zeminde iki zemin çivisi, dört zemin çivisi ve altı zemin çivisi için yatay yerdeğıştirme	142

Şekil 90.	Dr=%65 zeminde iki zemin çivisi, dört zemin çivisi ve altı zemin çivisi için yatay yerdeğiştirme	142
Şekil 91.	Dr=%35 zeminde iki zemin çivisi, dört zemin çivisi ve altı zemin çivisi için düşey yerdeğiştirme.....	143
Şekil 92.	Dr=%65 zeminde iki zemin çivisi, dört zemin çivisi ve altı zemin çivisi için düşey yerdeğiştirme.....	143



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Gözlemlenmiş zemin çivili duvarların özellikleri.....	44
Tablo 2. Zemin çivili duvarlar için tasarım aşamaları.....	73
Tablo 3. AASHTO özelliklerine göre yükleme birleşimleri.....	85
Tablo 4. SLD için çivi kafası dayanım faktörleri (FHWA,1998).....	86
Tablo 5. SLD için dayanım faktörleri ve güvenlik sayıları (F).....	88
Tablo 6. Çivi Boyutları.....	100
Tablo 7. Çivili Duvarların Tasarımında Ön Boyutlandırma.....	101
Tablo 8. Elek analiz sonuçları.....	112
Tablo 9. Kohezyonsuz zeminlerde sıkılık durumu.....	114
Tablo 10. Analizlerde kullanılan $D_r=35$ için zemin özellikleri.....	118
Tablo 11. Analizlerde kullanılan $D_r=65$ için zemin özellikleri.....	118
Tablo 12. Analizlerde kullanılan duvar özellikleri.....	119
Tablo 13. Analizlerde kullanılan çivi özellikleri.....	119
Tablo 14. $H=10$ m için model çivinin ön tasarım hesap değerleri.....	121
Tablo 15. Ön tasarımda hesaplanan çivi boyları.....	121
Tablo 16. $D_r=35$ Rölatif sıkılıkta iki zemin çivisi için analiz sonuçları.....	136
Tablo 17. $D_r=35$ Rölatif sıkılıkta dört zemin çivisi için analiz sonuçları.....	136
Tablo 18. $D_r=35$ Rölatif sıkılıkta altı zemin çivisi için analiz sonuçları.....	136
Tablo 19. $D_r=65$ Rölatif sıkılıkta iki zemin çivisi için analiz sonuçları.....	137
Tablo 20. $D_r=65$ Rölatif sıkılıkta dört zemin çivisi için analiz sonuçları.....	137
Tablo 21. $D_r=65$ Rölatif sıkılıkta altı zemin çivisi için analiz sonuçları.....	137
Tablo 22. $D_r=35$ ve $D_r=65$ rölatif sıkılıktaki zeminde iki zemin çivili modelde PLAXIS 8.2 programı analiz sonuçlarına göre güvenlik sayıları.....	144
Tablo 23. $D_r=35$ ve $D_r=65$ rölatif sıkılıktaki zeminde dört zemin çivili modelde PLAXIS 8.2 programı analiz sonuçlarına göre güvenlik sayıları.....	144
Tablo 24. $D_r=35$ ve $D_r=65$ rölatif sıkılıktaki zeminde altı zemin çivili modelde PLAXIS 8.2 programı analiz sonuçlarına göre güvenlik sayıları.....	144

SEMBOLLER DİZİNİ

A_t	:Donatı kesit alanı
a_{hm}	:Açıklıkta, yatay yönde birim genişlikteki donatı kesit alanı
a_{hn}	:Çivi başında, yatay yönde birim genişlikteki donatı kesit alanı
a_{vm}	:Açıklıkta, düşey yönde birim genişlikteki donatı kesit alanı
a_{vn}	:Çivi başında, düşey yönde birim genişlikteki donatı kesit alanı
c	:Kohezyon
c'	:Efektif kohezyon
c_b	:Tabandaki zeminin kohezyonu
c_F	:Yüzey arasında oluşan zemin basıncı dağılım faktörü
c_U	:Zeminin drenajsız kayma mukavemeti, drenajlı durumda zeminin kohezyonu
D	:Delik çapı
E	:Elastisite modülü
E_{50}^{ref}	:Referans rijitlik modülü
E_{oed}	:Ödometre rijitliği
E_{ur}	:Boşaltma-yükleme rijitliği
E_{ur}^{ref}	:Referans çevre basıncı
EA	:Ağırlık modülü
EI	:Rijitlik modülü
F	:Zeminin kayma dayanımı için genel güvenlik sayısı
F_c	:Zeminin güvenlik sayısı

F_ϕ	:Zeminin güvenlik sayısı
F_y	:Donatı akma dayanımı
H	:Duvar yüksekliği
h	:Yüzey kalınlığı
i	:Çivi eğimi
K_0	:Zemin basıncı katsayısı
L_F	:Kayma yüzeyi uzunluğu
L_p	:Çivi sıyrılma boyu
N	:Normal kuvvet
p^{ref}	:Referans çevre basıncı
Q_d	:İzin verilebilir sıyrılma direnci
Q_U	:Son sıyrılma direnci
Q_u	:Birim boydaki çekme kapasitesi
q_u	:Max bağ mukavemeti
R_F	:Yüzey dayanımı
R_f	:Göçme oranı
R_p	:Sıyrılma dayanımı
R_T	:Çivi gerilme dayanımı
S	:Direnen kayma kuvveti
S_H	:Çivi yatay aralığı
S_V	:Çivi düşey aralığı
T	:İzin verilebilir çivi yükü

T_D	:Boyutsuz çivi taşıma gücü
T_F	:İzin verilebilir çivi kafası yükü
T_{FN}	:Nominal çivi kafası dayanımı
T_N	:İzin verilebilir çivi tendonu yükü
T_{max}	:Maksimum normalize tasarım kuvveti
α	:Duvar yüzü eğimi
β	:Şev açısı
β_{eq}	:Eşdeğer şev açısı
θ	:Duvar yüzünün yatayla yaptığı açı
ϕ	:İçsel sürtünme açısı
ϕ'	:Efektif
ϕ_U	:Zemin danelerinin içsel sürtünme açısı
Φ_C	:Kohezyon direnç faktörü
Φ_F	:Çivi kafası direnç faktörü
Φ_N	:Çivi tendonu direnç faktörü
Φ_Q	:Sıyırılma direnci faktörü
Φ_ϕ	:İçsel sürtünme açısı direnç faktörü
W	:Servis yükü
Γ_w	:Yük faktörü
Ψ	:Kayma yüzeyi eğimi
μ	:Sıyırılma direnci
ν	:Poisson oranı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Zemin çivisi tekniği (soil nailing), çelik çubuklarla yamaçlarda geçici ve kalıcı duraylılığın sağlanmasında, mevcut donatılandırılmış zemin duvarlarının onarılmasında, kara ve demiryollarının yarma kesimleri ile tünellerde geçici destek amaçlı kullanılan yerinde zemin güçlendirme yöntemi olarak isimlendirilmektedir. Çivilemedeki amaç, özellikle kazı sonucu gerilme boşalmasına tabi olan bir ortamda hareketleri minimuma indirmektir. Ayrıca bu yöntemle çivi, bir gerilme alanında sağladığı çekme dayanımı ile olası ötelenmeleri kontrol etmektedir. Çivi, türkçe anlamından farklı olarak çapı, betonarme demirinden 30cm çaplı mini kazığa kadar değişebilen ve işlevi zemine ek kayma direnci sağlamak olan yabancı bir cisim olarak anılmaktadır. Zemin çivileri önceden delinmiş deliklere yerleştirilip enjeksiyonlanarak, delme ve enjeksiyonlama işlemi eş zamanlı yapılarak ya da çakma-sürme ile önceden enjeksiyonlamadan kullanılmaktadır. Genellikle yatayla açı oluşturacak şekilde yerleştirilmektedirler. Düşey yüzeyde esnek ya da esnek olmayan kaplama kullanılmaktadır. Zemin çivisi sistemi zemin dışında yumuşak kaya ve ayrılmış kaya zeminlerde de uygulanmaktadır.

Zemin çivilerine ön germe uygulanmamakta, dolayısıyla şev hareketi olmadığı sürece çivilere herhangi bir yük gelmemektedir. Bu nedenle zemin çivilerine pasif ankraj da denilmektedir. Pasif ankraj zemin çivisinin yanı sıra kaya bulonunu da içermektedir. Zemin çivisi, zeminde yapılan ve auger-odex boru ile delinen pasif ankrajken; kaya bulonu, kayada yapılan ve top hammer veya DTH (down the hole hammer) ile delinen pasif ankraj olarak nitelendirilmektedir. Bu tezde sadece zemin çivileri konu alınmaktadır.

Zemin çivisi tekniği temel olarak zeminin sık aralıklarla yerleştirilmiş pasif ankrajlarla (öngerme yükü almamış zemin ankrajları) kayma direncinin artırılarak ağırlık istinat yapısı haline getirilmesiyle uygulanmaktadır. Bu şekilde yanal basınç ve kazı süresince ve sonrasında oluşacak yanal hareket sınırlandırılmış olmaktadır. Donatılarda oluşan çekme kuvvetleri zemin – donatı arayüzeyinde oluşan sürtünmeye aktarılarak taşınmaktadır.

Zemin çivisi yöntemi genellikle mevcut şevlerin ya da kazıların desteklenmesinde diğer kazı destek sistemlerine göre avantajlı bulunduğu durumlarda tercih edilmektedir. Yöntemin ankrajlı sistemlere karşı en önemli tercih edilme sebepleri ekonomik oluşu, imalat süresini kısaltması ve özellikle şehir içi imalatlarda küçük ekipmanla çalışma olanağı vermesi olarak adlandırılmaktadır. Bunların yanı sıra yeni ve mevcut, yarma ve dolgu şevlerinin stabilize edilmesinde ve mevcut istinat duvarlarının onarılmasında kullanılabilirleriyle avantaj sağlayarak son yıllarda önem kazanan bir yöntem haline gelmektedir.

Zemin çivilerinin nihai taşıma kapasiteleri hesaplanırken ve uygulanırken, emniyetli ve efektif sonuçlar alınması için aşağıdaki sonuçlara dikkat edilmesi gerekmektedir:

- Zemin çivilerinin toprak veya kaya ile aderansı,
- Yatak tabanının durumu ve zemin çivisini çevreleyen toprağın\kayanın nitelikleri,
- Zemin çivisine etkileyen üst tabaka gerilmesi,
- Zemin çivisi ebatları,
- Enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon miktarı,
- Zemindeki suyun durumu ve drenajı.

1.2. Zemin Çivisi Tekniği ile İlgili Önceki Çalışmalar

Zhang vd. (1999), çivilenmiş zemin yapılarının deformasyon analizi için üç boyutlu (3-D) sonlu eleman modeli (FEM) geliştirmişlerdir. Bu modelde, zeminin doğrusal olmayan davranışını ve zemin - çivi etkileşimini esas almışlardır. Deformasyon davranışı üzerinde etkili olan bazı faktörleri araştırmak için parametrik çalışmalar yürütmüşlerdir.

Ng ve Lee (2002), sert kilde zemin hareketlerini azaltan ve tünelin başlık kısmının stabilitesini iyileştiren zemin çivisinin eksenel dayanımı için sistematik parametrik bir çalışma yürütmüşlerdir. Parametrik çalışma, elasto-çiftli plastik-konsolidasyon sonlu elemanlar analizi dizinini içermektedir. Tünel yüzeyinin stabilitesini eksenel dayanımın artması ile geliştirmişlerdir. Tünel yüzeyine uygulanan çivi yoğunluğu için çivinin optimum eksenel dayanımını belirlemişlerdir. Eksenel dayanım optimumuna ulaştığında çivi sisteminin etkisi azalmıştır.

Chu ve Yin (2005), çalışmalarında çimento enjekte edilmiş zemin çivileri ve zemin arasındaki kayma davranışını araştırmışlardır. Bir çok laboratuvar testi yaparak, test sonuçlarına göre zemin ve çimento enjekteli zemin çivisi arasındaki kayma ve çekme davranışlarını tartışmışlardır. Sonuç olarak, zemin-zemin arasındaki kayma gerilmesi-yer değiştirme davranışının zemin-enjekteli zemin arasındaki kayma davranışıyla benzer olduğu fakat çekme davranışından farklı olduğunu göstermişlerdir.

Çakır (2005), çalışmasında donatılı zemin gelişimi, donatılı zeminin üstünlükleri ve sakıncalarını ve donatılı zemin uygulamalarını incelemiştir. Geosentetik donatılı zemin istinat duvarlarının projelendirme adımlarını vermiş ve bir geotekstil donatılı zemin istinat duvarı uygulama örneğini çözümlenmiştir. Ayrıca, geogrid donatılı zemin istinat duvarı ve betonarme konsol istinat duvarı üzerine bir maliyet karşılaştırması yaparak geosentetik donatılı zemin istinat duvarlarının ekonomik açıdan olumlu sonuçlar verdiğini elde etmiştir.

Turner ve Jensen (2005), bu makalede heyelan aktivitelerinin stabilitesi için zemin çivisi kullanmışlardır. Potansiyel olarak duraysız yamaçlar ya da yarmaların stabilizasyonu için zemin çivisi uygulamışlardır. Saha koşullarında tasarım yönleri ve zemin çivisinin yapımını tanımlamışlardır.

Pradhan vd. (2006), gevşek dolgu malzemesinde zemin-çivi çekme etkileşimini araştırmışlardır. Gevşek olarak sıkıştırılmış kumda gömülü zemin çivisinin davranışlarını araştırmışlardır. Düşey basınç değiştirilerek, pik çekme kuvveti ve yük-deplasman davranışı çekme testiyle belirlemişler ve zemin çivisinin hareketini simule etmek için bir model hazırlamışlardır. Bu model basit tek boyutlu bir yay modelidir ve çekme yük-yer değiştirme ilişkisini simule etmek için kullanılabilir olduğunu göstermişlerdir.

Demirkoç (2007), farklı dört zemin türünden ve farklı kazı derinliklerinden oluşan kazı modelleri oluşturarak zemin çivili ve ankrajlı destekleme sistemlerini önce klasik analiz yöntemi ile projelendirip, sonra sonlu elemanlar yöntemi Plaxis 8.5 ile nümerik analiz yapmıştır. Duvarların yatay yerdeğiştirmeleri ve güvenlik sayıları belirlemiştir. Ayrıca limit denge analizi ile çözüm yapan Talren 4 programı ile de çözümlenme yaparak, güvenlik sayılarında karşılaştırma yapmıştır.

Örnek vd. (2007), kum zeminde kazı sonrası duraylılık için Plaxis kullanarak, palplanşlı ve ankrajlı iksa sistemi modellemiştir. Analizlerde ankraj sayısı, ankraj boyu,

ankraj açısı, palplanş boyu, yer altı su seviyesi ve zemindeki yük miktarı gibi parametlerin, iksa sisteminin duraylılığına etkilerini araştırmışlardır.

Su vd. (2007), zemin çivilerinin çekme – kayma dirençleri üzerinde doygunluk derecesinin (Sr) etkilerini çalışmışlar ve tamamen ayrılmış sert zemin içindeki zemin çivilerinin üzerinde laboratuvar çekme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Testler özel olarak tasarlanmış aynı özellikte iki çekme kutusu kullanarak yürütülmüştür. Test sonuçları, zeminin doygunluk derecesinin arttığında zemin-çivi kayma düzleminin zeminde dışarıya doğru gittiğini göstermiştir. Ayrıca zemin çivisinin çekme kuvvetlerinin doygunluk derecesiyle büyük ölçüde etkilendiğini elde etmişlerdir. Çekme-kayma mukavemetinin en yüksek değerlerinin, %50 ve %75 doygunluk derecelerinde olduğunu gözlemlemişlerdir.

Liu vd. (2008), bu makalede şişen zeminlerdeki zemin çivilerinin çekme direncini araştırmışlardır. Elastik bir ortamda silindir şeklinde şişen bir zemin kullanarak zeminin şişmesi nedeniyle çekme gücünü hesaplamışlardır. Ancak çivinin çevresindeki zeminde gevşeme davranışı ile karşılaşmışlardır.

Li vd. (2008), herhangi bir sıkıştırma olmadan oluşturulmuş dolgu şev stabilitesinde zemin çivisi kullanımını çalışmışlardır. Şev 4.75 m yüksekliğinde, 9 m genişliğinde, ve 33° yatay eğimlidir. Beş tane enjekte edilmiş zemin çivisinin iki sırası yatayda 20° eğimle 1.5m×1.5m ızgara şeklinde monte etmişlerdir. Yüzey ızgarasında, ızgaranın orta noktasına altı zemin çivisi kullanmışlardır. Aşırı yükleme ve yaşa maruz kalan çivilenmiş şev performansını yaklaşık altı ay gözlemlemişlerdir. Sonuçlar ızgaralı zemin çivisi yapımının etkili bir yol olduğunu göstermiştir.

Tan vd. (2008), bu teknik makalede, kuru temiz kumda gömülü zemin çivisinin hızlı çekme tepkisini incelemişlerdir. Hızlı çekme testinde, zemin çivisi gerilme dalgası yayılma olgusunun etkisini ortadan kaldırmak için yeterince uzun yükleme süresi ile çekme itme yükü tarafından çekmişlerdir. Bu deneylerin sonuçları, çekme tepkisi üzerinde yükleme oranının etkisi çivi yüzeyinin pürüzlülüğü durumuna bağımlı olduğunu göstermiştir. Pürüzsüz bir çivi için, hızlı ve yarı-statik çekme tepkisi arasında ihmal edilebilir bir fark fark edilmiştir. Sonuç olarak, hızlı bir çekme testinde hareket eden sönümleme direncini nicelleştiren "Gerçek" sönümleme katsayısının sabit olduğunu, ancak çekme yer değiştirmesinde artış ile azalış olmadığını tespit etmişlerdir.

Cheng vd. (2009), Hong Kong ve Korea'de zemin çivisi ile pilot uygulamalar yapmışlardır. Çalışmalarında Manchette enjekte tekniği ile zemin çivisini cam elyaf takviyeli plastik (GFRP) boru kullanarak zemin çivisi inşa etmişlerdir. Bu yeni zemin çivi sistemi ulaşımı zor olan alanlarda kolayca uygulanabilmiştir. Zemin çivileri ve zemin üzerinde arazi testlerinin yanı sıra kapsamlı laboratuvar testleri ve bu alanda sayısal modelleme de yapmışlardır ve sonuçları karşılaştırmışlardır.

Kayabalı ve Selçuk (2009), kayanın tek eksenli basınç dayanımının belirlenmesi için çivi penetrasyon testi, Schmidt çekici geri tepme testi ve tek eksenli basınç deneyi yapmışlardır. Araştırmada 25-60 mm arasında değişen uzunluklarda zemin çivileri ve 130 J gücünde bir gaz çivi tabancası kullanmışlardır. Çalışma materyalini 65 kaya bloğu, jips, tuf, ignimbrit, andezit, kumtaşı, kireçtaşı ve mermer oluşturmuştur. Çivi penetrasyon testi için her bir kaya bloğu üzerinde beş zemin çivisi atışı yapmışlardır. İki ya da üç eksenli kompresyon testlerini her bir numune üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak bu test uygulamalarda kullanılmasını önermişlerdir.

Meenal vd. (2009), zemin çivili kazıların sözde statik analizini yapmışlardır. Statik analiz çivili zeminin dikey (yaklaşık dikey) kazı dengesini incelemek için araştırmalar yapmışlardır. Yatay ve dikey sismik kuvvetler yatay ve dikey deprem katsayılarından alınmıştır. Güvenlik faktörünü moment denge yöntemi kullanarak türetmişlerdir. Sonuçları genellikle uygulamada kullanılan tasarım parametreleri aralıkları dikkate alınarak tablo halinde düzenlemişlerdir. Makalede çivileme süreci süren çivilenmiş kazının tasarımı için tipik bir tablo oluşturmuşlardır. Analitik sonuçları model testlerin sonuçlarıyla karşılaştırmışlar ve oldukça iyi bir uyum gözlemlemişlerdir.

Zhou vd. (2009), ek yükler altında gevşek dolgu şevde zemin çivisinin sayısal modellemesini yapmışlardır. Düzlem-deformasyon sayısal modelini ek yük altında çivilenmiş gevşek şevi taklit etmek için geliştirmişlerdir. Modeli ek yükler altında gevşek dolgu şevlerde zemin çivisi davranışlarını incelemek amacıyla yürütmüşlerdir. Gözenek suyu difüzyon ile birleştiğinde artımlı elasto-plastik analizler ek yüklerin uygulanması esnasında ve sonrasında zemin çivilerinin performansı ve zeminde su içeriği dağıtımı ve iç deformasyon çalışması uygulamışlardır. Çivili eğimin mekanik ve hidrolik özelliklerini tanımlayan model parametrelerini, arazi veya laboratuvar testlerinden elde etmişlerdir. Farklı modelleme teknikleri ve sınır şartlarını, gevşek dolgu malzemesinde zemin-çivi etkileşimini taklit etmek için ele almışlardır.

Cesur (2010), kontrolsüz dolgu zeminde uygulanan zemin çivili duvar örnekleri için tasarıma esas alınan zemin mukavemet parametrelerini ve sahada ölçülen deplasman değerlerini kullanarak zeminin deformasyon parametreleri gerini analiz ile elde etmiştir. Literatüre dayalı deformasyon tahminlerini sahada ölçülen değerler ile karşılaştırmıştır.

Shivashankar vd. (2010), yumuşak zemin üzerine yapılan taş kolonun yük taşıma kapasitesi, direnci ve rijitliğindeki gelişmeleri araştırmak için laboratuvarında plaka yükleme deneyi yapmışlardır. Bu sütunun performansının geliştirilmesi için taş sütunun çevresi boyunca monte edilmiş dikey çivi ile taş sütun takviye edilmesi için yeni bir yöntem önermişlerdir. Testleri iki çeşit yükleme ile gerçekleştirmişlerdir. İlki birim hücre tankındaki tüm alanın yüklenmesi (iyileştirilmiş zeminin sertliğini tahmin etmek için) ve ikincisi sadece taş kolonun yüklenmesi (limit eksenel kapasiteyi belirlemek için)'dir. Flanş çivinin yararı, çivilerin gömme çapı, sayısı ve derinliğinin artmasıyla artmıştır.

Su vd. (2010), üç boyutlu sonlu eleman modelini zemin çivisinin çekme testi simülasyonu için kurmuş ve kullanmışlardır. Sonlu eleman modeli ölçülen verilerle simüle sonuçları karşılaştırarak doğrulamışlardır. Hem ortalama çekme kayma gerilmesi hemde gerilme değişimi açısından deneysel ve simule edilmiş sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu elde etmişlerdir. Simule edilmiş çekme direnci kayma tabakasındaki dilatasyon açısının artışı ile artmıştır.

Wei ve Cheng (2010), farklı koşullar altında zemin çivili bir eğimin detaylı incelemesini yapmışlardır. Genel durumlarda, dayanım azaltma yöntemi (SRM) ve limit denge yöntemi (LEM) arasında güvenlik ve kayma yüzeyleri bakımında önemli bir fark olmadığını saptamışlardır. Çivi yükü düşey gerilme tarafından kontrol ediliyor ise SRM ve LEM arasında kayda değer farklılıkların ancak görülebileceğini elde etmişlerdir. Zemin çivisi boyunca gerilme kuvveti dağılımı eğim durumundan etkilendiğini kabul etmişlerdir.

Babu ve Singh (2011), yük ve güvenlik tasarım faktörünün kullanımıyla zemin çivili duvar tasarımını amaçlamışlar ve 10 m yüksekliğinde zemin çivili duvar referans alınarak mukavemet sınır durumları için dayanım faktörleri önermişlerdir. Her bir sınır durumu için farklı kısmi faktörler için gerekenleri önermişler ve önerilen faktörleri, literatürde mevcut olanlar ile karşılaştırmışlardır.

He vd. (2011), zemin çivisi takviyeli eğimin sismik stabilitesini limit analizinin kinematik teoremini kullanarak analiz etmişlerdir. Log-spiral göçme mekanizmasını

dikkate almışlar ve analitik ifadelerle ilgili kritik sismik verim ivme katsayısını hesaplamak için türetmişlerdir. Hesaplamalar dizisini çivi takviyeli eğimin stabilitesi üzerindeki atalet kuvvetinin etkisini göstermek için gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada zemin çivisinin karakteristik parametrelerinin kritik sismik verim ivme katsayısının yanı sıra eğimin mukavemet ve geometrisini de göstermişlerdir.

Zhu vd. (2011), bu çalışmada şev stabilitesi için cam elyaf takviyeli polimer zemin çivisi kullanmışlardır. GFRP boru içeren GFRP zemin çivi sistemini çift enjeksiyon tekniği ile yüklemişlerdir. Çekme testleri yapmışlar ve test sonuçlarına dayanarak bir hiperbolik kayma gerilme-deformasyon ilişkisinin kullanıldığı basit bir model GFRP zemin çivisinin çekme performansını tanımlamak için geliştirmişlerdir. GFRP zemin çivisinin çekme davranışını etkileyen çivinin çapı, zemin – harç ara yüzünün kayma direnci ve Young modülü kesme katsayısı oranı gibi bazı faktörleri içeren parametrik bir model hazırlamışlardır. Sonuç olarak, GFRP zemin çivisinin aşırı çekme deplasmanı gösterdiğini göstermişlerdir.

Zhou vd. (2011), çalışmalarında farklı örtü ve enjeksiyon basınçlarında bir zemin çivisinin çekme davranışını simüle etmek için üç boyutlu (3D) sonlu eleman (FE) modeli geliştirilmişlerdir. FE modeli sıkıştırılmış ve doymuş tamamen ayrılmış sert zeminde enjekte edilmiş zemin çivisinin çekme davranışını simüle etmiştir. Üç eksenli deney verileri toprak parametrelerini kalibre etmek için kullanılmıştır. Delme, derz dolgusu, doygunluk ve çekme boyunca zemin çivisi çevresindeki zemin gerilme değişimlerini FE modelleme ile simüle ederek mevcut test verileri ile karşılaştırmışlardır. Modelleme ve deneysel veriler arasındaki karşılaştırmalar FE modelinin zemin kütlesi içindeki zemin çivisinin çekme davranışını en iyi şekilde simüle ettiğini göstermiştir.

Hong vd. (2012), bir zemin çivisinin aşamalı çekme tepkisini araştırmak için analitik bir çalışma sürdürmüşlerdir. Çekme sürecini üç aşamaya bölmüşlerdir. (1) ilk saf elastik faz boyunca zemin çivisi doğrusal elastik gerilme-deplasman ilişkisini izler; (2) elastik-plastik faz boyunca elastik ve plastik bölgeleri ayıran geçiş bölgesi hazırlanır; (3) ve son faz plastik fazdır. Hesaplama ve laboratuvar test verileri arasında karşılaştırma çalışmasını, yöntemin etkinliğini incelemek için oluşturmuşlardır. Zemin çivisinin çekilme direnci üzerinde zemin çivisinin uzunluğu ve çapı, plastik zon uzunluğu, elastik modülü etkisini değerlendirmek için kapsamlı parametrik bir çalışma yapmışlardır.

Yin vd. (2012), çivi-zemin ara yüzünün maksimum kayma gerilmesinin hesaplanması için basitleştirilmiş analitik yöntem geliştirmişlerdir. Önceki yayınlardan sistematik test sonuçlarını önerilen yöntemin doğruluğunu kontrol etmek için kullanmışlardır. Ayrıca çivi-zemin ara yüzünün maksimum kayma gerilmesi belirlemek için Hong Kong tasarım yöntemi kullanmışlardır. Bu analizlerle deneysel verilerin önerilen analitik metodun tahmininden daha doğru olduğunu kanıtlamışlardır. Maksimum kayma gerilmesi üzerine birkaç anahtar parametrelerin etkilerini incelemek amacıyla kapsamlı parametrik bir çalışma yürütmüşlerdir.

Bildik (2013), donatısız ve geogrid donatılı zemine gömülü boruların davranışını düşey basın kuvvetleri altında laboratuvar model deneyleri yaparak araştırmıştır. Çalışmada, donatısız zemine oturan temellerin, PLAXIS bilgisayar yazılımı kullanılarak, 2 boyutlu ve düzlem-şekil değiştirme koşullarında sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal çözümü yapmıştır. Elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılarak temel mühendisliği uygulamalarında kullanılmak üzere tasarım parametreleri önermiştir.

Gurpersaud vd. (2013), doymuş ve doymamış şartlarda sıkıştırılmış kumda enjeksiyonlu zemin çivilerinin çekme kapasitelerinin tahmini için yarı ampirik metod geliştirmişlerdir. Çekme testleri, özellikle dizayn edilmiş test kutularında 15°'lik eğime uygun olarak yatay ve dikey yönlerde uygulamışlardır. Literatür bilgilerinin yanı sıra bu program sonuçlarını kullanarak zemin çivisinin çekme kapasitesinin hesaplanması ve tahmini arasında uyum olduğunu kanıtlamışlardır.

Kim vd. (2013), basınç-enjekteli zemin çivisinin çekme davranışını simüle etmek için iki boyutlu bir aksel simetrik sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Bu modeli gravity-enjekteli zemin çivisi ile karşılaştırarak, basınç-enjekteli zemin çivisi çekme testi sonucu ile doğrulamışlardır. Analize dayanarak, üç boyutlu sonlu eleman modelini, kayma direncini azaltma yöntemini kullanarak basınç-enjekteli zemin çivisi ile güçlendirilmiş bir şevin stabilite analizi için önermişlerdir. Çalışmalarının sonucu olarak, basınç-enjekteli zemin çivisi çivili şev sisteminin sertliğini artırarak bir şevin yüzde elli oranında emniyet faktörünü artırmış olduğunu elde etmişlerdir.

Pei vd. (2013), Fiber Bragg Grating (FBG) algılama teknolojisi kullanarak laboratuvar çekme testi sırasında cam elyaf takviyeli polimer bar (GFRP) zemin çivisinin performansını izlemişlerdir. Hem deneysel çalışma hem de sayısal modelleme yapmışlardır. Çekme testinde çimento harcını, tamamen ayrılmış sert zemin kütlesi

içindeki zemin çivisi ile delinmiş sondaj kuyusuna enjekte etmişlerdir. Sonuçlara göre (GFRP) zemin çivisinin çekme test sonuçlarının sayısal hesaplama sonuçları ile uyduğu gözlenmiştir. Test sonuçları ayrıca FBG algılama sisteminin farklı yükleme aşamaları altında tüm ölçülen noktalarda gerilme değişimini ölçmek için güvenilir olduğunu göstermiştir.

Xue vd. (2013), kullandıkları Goodman eleman modeli jeoteknik iletişim problemlerinde yaygın olarak kullanılan arabirim öğelerinden biridir. Bu makalede araştırmacılar, Goodman eleman modelini iki dönme serbestlik derecesi ekleyerek modifiye etmişlerdir. Sonra, modifiye edilmiş Goodman eleman modeline bağlı kalarak bir sonlu eleman programı yazmışlar ve bir temel çukuru analizinde uygulamışlardır.

Ghareh (2015), çalışmasında kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde, zemin çivilerinin kopmasının ve sürşarj yük miktarının etkilerini araştırmıştır. Sonuçlar zemin çivisinin fiziksel özelliklerinin yükü direkt olarak etkilediğini göstermiştir.

Rabie (2016), zemin çivili istinat duvarlarının daha ekonomik tasarımı üzerine çalışmıştır. Plaxis 2D sonlu elemanlar analizi programında Mohr-Coulomb ve Hardening Soil zemin modellerini kullanarak analizler yapmıştır. Daha sonra limit denge analiz programı Snap ile de analizler yaparak iki programı karşılaştırmıştır.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Literatür araştırması sonucu zemin çivili duvar sistemleri üzerinde yapılan çalışmaların çoğunlukla uygun zemin koşullarında, farklı yükseklikteki duvarlarda performansların farklı sonlu elemanlar analiz programları ve limit denge analiz yöntemleriyle değerlendirilmesi üzerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Ancak bu çalışmalarda, diğer zeminlere göre daha az zemin çivisi uygulaması yapılan kum zeminlerde çalışma yapılmadığı tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında; ilk olarak zemin çivili duvarların tarihi, çeşitleri, uygulama alanları ve yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmış, hesap yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Yapılan çalışmalar kısmında; $D_r=35\%$ ve $D_r=65\%$ rölatif sıklılıklardaki iki farklı kum zemin üzerinde modellenen diyafram duvarlarda klasik yöntemlerle ön tasarım yapılarak çivi boyları hesaplanmıştır. Bulunan değerlerle farklı yük, farklı zemin koşulları ve farklı zemin çivisi sayılarında

modeller oluşturularak, PLAXIS 8.2 analiz programı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın son kısmında ise; duvarın yatay, düşey ve vektörel olarak toplam deplasman değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, PLAXIS 8.2 analiz programında ϕ -c reduction adımı ile duvarın toptan göçmeye karşı güvenlik sayıları elde edilmiştir. Çivi sayısı, zemin türü ve farklı yükler için analiz sonuçları karşılaştırılmış, zemin çivili duvarlar tasarım ve analizleri için bir takım önerilerde bulunulmuştur.

1.4. Zemin Çivili Duvarların Gelişimi

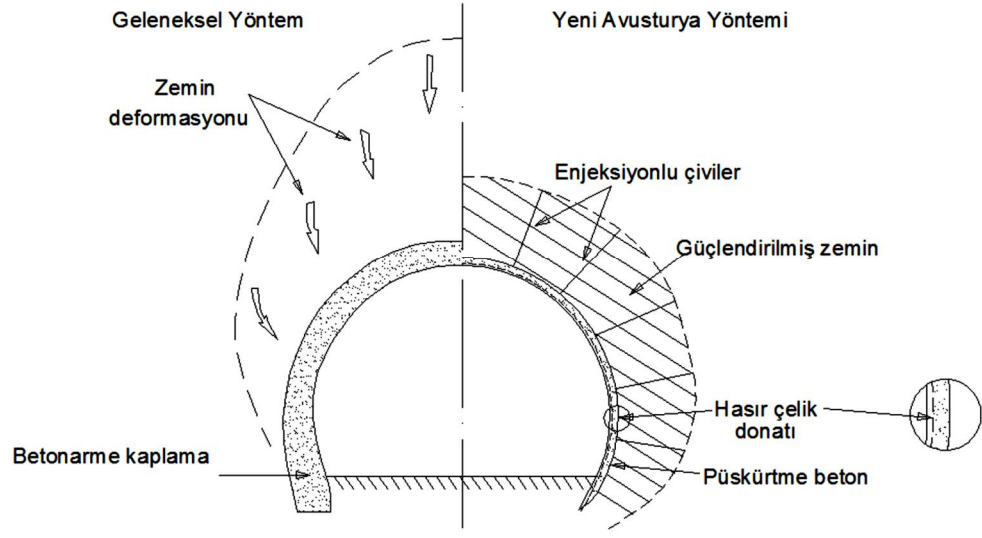
Zemin çivisi teknolojisi 1960'ların başlarında kısmen kaya ankrajları ve multi-ankraj sistemlerinden, kısmen de dolguyla güçlendirme teknolojilerinden geliştirilmiştir (Clouterre, 1991; FWHA, 1998). 1961 yılında Fransa'da Notre Dame de Commier barajının şist zeminde inşa edilen taşkın savakları şevlerinin stabilize edilmesi için enjeksiyonlanmış pasif ankrajlar ve betonarme ön yüz kaplamasından oluşan bir sistem inşa edilmiştir (Bonazzi ve Colombet, 1984). Kullanılan tip kesit Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Fransa Notre Dame De Commier barajına ait taşkın savaklarının kesiti (Bonazzi ve Colombet, 1961).

1964 yılında Rabcewicz tünel ve yeraltı galerini desteklemek amacıyla Yeni Avusturya Tünel Metod'unu (NATM) geliştirmiştir. Bu yöntem kazı aynasının kazılmasından sonra zeminin pasif ankarajlarla güçlendirilmesinden oluşmaktadır.

Bu şekilde Rabcewicz 3m – 6m arasında değişen boylarda çiviler kullanarak son kaplama betonunun miktarında önemli bir azalma sağlamıştır. Geleneksel Metod ve Yeni Avusturya Metodunun arasındaki farkı gösteren ayrıntılı bir kesit Şekil 2’de verilmektedir. Zemin çivili sistemler bu metodun bir uygulaması sayılabilmektedirler.



Şekil 2. Yeraltı kazılarında kullanılan geleneksel yöntem ile Yeni Avusturya Tünel Metodu karşılaştırması (Bruce ve Jewell, 1986).

Yeni Avusturya Tünel Metodu ile benzer tekniğin yumuşak kaya ve zemin şevler geçici ve kalıcı kazı destek sistemi olarak kullanılabilceği düşünülmüştür. Kayıtlara göre ilk zemin çivili duvar 1972 Fransa Versailles’de demiryolu genişletme çalışmalarında karşılaşılan yarma kesitlerde uygulanmıştır (Rabejac ve Toudic, 1974). Şekil 3’de şekli verilen 18m’lik bu geçici iksa sisteminde 4m – 6m boyundaki zemin çivileri düşeyde sık aralıklarla sıkı, iyi derecelenmiş Fontainebleau kumunda imal edilmiştir.

tasarım teorisi ve imalat aşamaları ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Geniş kapsamlı bir doküman olmasına rağmen sadece püskürtme beton rijit kaplamalı düşey duvarlar ve dik şevlerin tasarım ve uygulaması anlatılmaktadır (Ciria, 2005).

1.5.2. İskandinav Uygulaması – Nordic Handbook

İsveç, Norveç, Finlandiya ve Danimarka'dan bir grup geoteknik uzmanın hazırladığı Nordic Handbook of Reinforced Soils and Fills (Rogbeck ve diğ., 2002) 2002 yılında Nordic Geosynthetic Group tarafından basılmıştır. Bu dokümanda zemin çivili duvarlar dışında güçlendirilmiş zemin ve yumuşak zeminler üzerinde imal edilen dolguların tasarım ve uygulamaları anlatılmaktadır. ENV 1997 (1994 ve 1999) ile birlikte bu tekniklerin tasarımı için yararlı bir kaynak oluşturmaktadır. Aynı zamanda dik bir yarmada uygulanan zemin çivili duvar ve mevcut bir şevin iyileştirilmesiyle ilgili uygulama örnekleri içermektedir (Ciria, 2005).

1.5.3. Birleşik Devletler Uygulaması – FHWA

2003 yılına kadar Birleşik Devletler'de otoyol işlerinde zemin çivili duvar uygulamaları Federal Highway Administration (FHWA) tarafından 1996 yılında basılan ve 1998 yılında revize edilen “Manual for design and construction monitoring of soil nail walls” ile tanımlanan tasarım ve uygulama açıklamaları ile yapılmıştır. Bu tasarım dokümanı zemin çivili duvarların inşaat ve ulaştırma altyapıları bakımı için kullanılması kavramını açıklamaktadır. Zemin çivili duvarların tüm kavramlarıyla ilgili seçim, tasarım, ayrıntılandırma ve inşaat konularına kılavuzluk edecek bir rehber oluşturmaktadır. FHWA tarafından 2003 yılında Geotechnical Engineering Circular No 7 basılarak söz konusu dokümanda yer alan bilgiler güncelleştirilmiştir. Birleşik Devletlerde zemin çivili duvarlar ile ilgili inşaat kontrol sistemi yine FHWA tarafından 1994 yılında basılan Soil nailing field inspectors' manual ile sağlamaktadır. Bu bahsedilen üç doküman zemin çivili duvarlar hakkında geniş kapsamlı bilgi sağlamasına rağmen uygulama alanları Clouterre gibi püskürtme beton kaplamalı düşey duvarlar ve dik şevler ile kısıtlı kalmaktadır (Ciria, 2005).

1.5.4. Hong Kong Uygulaması

Hong Kong'da imal edilen zemin çivili duvarların genel uygulama konusu mevcut şevlerin iyileştirilmesidir. 1970 ve 1980'lerde felakete sebep olan birçok şev kayması olayı yaşanmıştır. Bu olayların önüne geçmek amacı ile Landslip Preventative Measures Programme dahilinde pek çok deney ve çalışma yapılmıştır. Günümüzde zemin çivisi tekniği çoğunlukla bu çalışmalar kapsamında devlet arazilerinde oluşturulan standartların altındaki şevlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Hong Kong'da güncel şev mühendisliği çalışmaları Geoteknik Kontrol Ofisi tarafından 1984 yılında basılan Geotechnical Manual for Slopes adlı doküman üzerinden yapılmaktadır. Zemin çivileri üzerine olan güncel çalışmalar ise Watkins ve Powell tarafından 1992 yılında yayınlanan Soil Nailing to Existing Slopes as Landslip Preventative Works adlı dokümana dayanmaktadır. Watkins ve Powell şev stabilitesi analizi ve zemin çivisi tasarım yöntemlerini güvenlik sayıları ile birlikte özetlemiştir (Ciria, 2005).

1.6. Zemin Çivili Duvarların Tasarımında Zemin Koşullarının Etkisi

Zemin çivili duvarlar çok sayıda zemin türü ve koşullarında uygulanabilmektedir. Edinilen tecrübeler uygun zemin koşullarında zemin çivisi uygulamalarının diğer yöntemlere göre daha ekonomik olduğunu göstermektedir. Ancak bazı zemin koşulları zemin çivili duvarların imalatı için uygun olmamaktadır. Böyle zeminlerde zemin çivili duvarların uygulanması imalat aşamasında ya da uzun dönemde ekonomik ve güvenli olmayan çözümler yaratabilmektedir. Bu durumun önceden belirlenmesi proje açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple projelendirme aşamasından önce detaylı saha araştırması yapılarak sahanın jeolojik özelliklerinin belirlenmesine özen gösterilmelidir.

Zemin çivisi tekniğinin ekonomik olarak cazip ve teknik açıdan uygun olduğu koşullar şu şekilde sıralanabilir;

- Zemin, 1-2 m'lik kazı kademelerinde bir veya iki gün desteklenmeden kendini tutabilmelidir (Zeminde buna imkan sağlayacak yeterli görünür kohezyon ya da çimentolaşma mevcut olmalıdır).
- Tüm zemin çivileri yeraltı su seviyesinin üzerinde yer almalıdır.

- Eğer zemin çivileri yeraltı su seviyesinin altında ise; yeraltı suyunun, kazı yüzeyi, enjeksiyon ile zemin ara yüzü veya uzun dönem zemin çivisi bütünlüğü açısından ters bir etkisi olmadığı söylenebilir (zeminin kimyasal karakteristiği korozyonu desteklememektedir).

Zemin çivili duvar tasarımında çivi ile zemin arasında bağ kuvvetlerinin oluşması gerekmektedir. Zemin çivili duvar uygulamalarının ekonomik hale gelmesi için ise bu bağın yeterli dayanıma sahip olması gerekmektedir. Mevcut bir şevin dikleştirilmesinde ya da zemin çivileri ile yeni bir duvar oluşturulmasında kademeli kazılar yapılmaktadır (Cesur, 2010).

Bu kriterler dikkate alınarak zemin çivisi tekniği için uygunluk gösteren zemin koşulları aşağıda sıralanmıştır.

- Katıdan serte ince daneli zeminler: Sert killer, siltli killer, killi silt, kumlu silt kombinasyonları ($SPT N \geq 9$ ve $PI < 15$)
- Sıkı-çok sıkı granüler zeminler: $SPT N > 30$ ve ince daneli zemin oranı %10-15'i geçmeyen zeminler
- Ayrışmış kayalar: Elverişsiz süreksizlik düzlemi bulunmayan ayrışmış kayalar
- Buzul toprağı: İnce dane oranı sınırlı, sıkı, iyi derecelenmiş granüler zeminler zemin çivisi uygulamaları için oldukça uygun olmaktadır.

Zemin çivisi tekniğinin uygulamasının ekonomik olmadığı elverişsiz zemin koşulları ise şu şekilde sıralanmıştır:

- Kuru, kötü derecelenmiş kohezyonsuz zeminler: Kötü derecelenmiş zeminler kuru olduğu ve ince dane içermediği durumda doğal çimentolanma göstermez. Bu durum dik ve dike yakın kazı yapılmasını zorlaştırmaktadır.
- Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu zeminler: Zemin çivili duvar arkasındaki suyun, zeminin stabilizasyonunun sağlanması için drene edilmesi gerekmektedir. Büyük miktarda yeraltı suyu içeren gevşek granüler zeminlerde zemin çivisi uygulaması oldukça maliyetli olmaktadır. Kazı yüzeyinden sızan su püskürtme beton uygulamasını da zorlaştırmaktadır.
- İri çakıllı ve kaya bloklu zeminler: Bu tip zeminlerde delgi yapılması oldukça güç olmakta ve maliyeti artırıcı rol oynamaktadır. Birkaç kaya bloğunun olduğu

durumlarda delgi metodu modifiye edilebilir ancak çok sayıda bloklı malzeme içeren zeminlerde bu durum uygulamayı sınırlamaktadır.

- Yumuşak-çok yumuşak-ince daneli zeminler: Bu tip zeminlerde (SPT $N < 4$) enjeksiyon ile zemin arasındaki aderans oldukça düşük olmaktadır. Bu durum gerekli dayanımın sağlanması için anlamsız derecede uzun çivi boylarının yapılmasına neden olabilmektedir. Yüksek plastisiteli killerde, zeminin uzun dönem deformasyonları endişe yaratmaktadır. Bu tip zeminler şişme eğilimi göstermekte, bu durum kazı yüzeyinde ilave lokal basınçların oluşmasına sebep olabilmektedir.
- Organik zeminler: Organik silt ve killerin kayma mukavemeti dolayısı ile aderansları çok düşük olmakta, bu durum ekonomik olmayan çivi boylarına sebep olmaktadır. Ayrıca organik zeminler, inorganik zeminlere oranla daha fazla korozyona sebep olmaktadır.
- Yüksek korozif zeminler
- Elverişsiz süreksizlik düzlemi bulunan ayrıışmış kayalar: Ayrıışmış kayalardaki çatlak, kırık, fay gibi süreksizlikler kazı sırasında stabilite problemleri yaratabilmektedir. Ayrıca kaya içindeki büyük açıklıklar, zemin çivisi uygulamalarında enjeksiyon kaybına sebep olacağı için uygulamayı zor ve pahalı kılmaktadır.
- Lös: Bu tip zeminler kuru olduğunda mukavemet gösterebilir ancak su alması halinde duvar arkasındaki zeminin kayma mukavemeti düşmekte ve göçme meydana gelmektedir.
- Tekrarlanan donma-çözünme etkisine maruz kalan zeminler: Bu durumda enjeksiyon ile zemin ve püskürtme beton ile zemin yüzeyi arasındaki aderans zayıflamaktadır. Önlem olarak katkılı uygun püskürtme beton karışımı tercih edilmektedir.
- Sıvılaşma potansiyeli yüksek-gevşek-çok gevşek granüler zeminler(Cesur, 2010).

Zeminin mühendislik özellikleri açısından çok uygun olmayan ancak zemin çivisi tekniğinin uygulanabildiği ara zemin koşulları şunlardır:

- İyi derecelenmiş granüler zeminler (en az %90) ile düşük plastisiteli ($PI < 15$) ince daneli zeminlerin karışımından oluşan dolgular
- Ana kayanın yerinde ayrıışması sonucu oluşmuş rezidüel zeminlerdir.

Doğal veya üniform, agresif olmayan malzemedan seçilmiş, dikkatle sıkıştırılarak yukarıda anlatılan zeminlere benzer doğal zemin özellikleri kazandırılmış mühendislik dolguları zemin çivili duvar uygulamaları için uygun olmaktadır. Değişken zemin özellikleri gösteren, agresif, ayrışabilir, göçme ve farklı oturma davranışı göstermeye yatkın kontrolsüz dolgular ise zemin çivili duvar uygulamaları için daha az uygun olmaktadır. Eğer dolgu malzemesi zemin çivili duvar uygulaması için uygun ise göçme ve farklı oturmaları engellemek amacı ile enjeksiyonlama, vibro-taş kolon veya dinamik kompaksiyon gibi zemin iyileştirme yöntemleri uygulandıktan sonra zemin çivisi uygulaması yapılabilmektedir.

1.6.1. Kohezyonlu Zeminler

1.6.1.1. Yumuşak Killer ve Siltler

Kesme dayanımı düşük olan yumuşak killer ve siltlerde zemin çivili duvar uygulamaları genellikle uygun olmamaktadır. Bu durum imalat için açılan yarmanın stabilitesinde sorun oluşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca zemin çivisi ile zemin arasında oluşan bağ kuvveti zayıf olacağı için zemin çivisi yerleşimi çok sık olacaktır. Son olarak oluşacak deformasyonların kabul edilebilir sınırların üzerinde olması beklenmektedir (Cesur, 2010).

1.6.1.2. Orta Katı – Katı Killer

50 kPa'dan daha büyük drenajsız kesme dayanımı olan orta katı – katı killer genel olarak zemin çivili duvarlar için daha uygun olmaktadır. Kuru oldukları durumlarda imalat için gerekli olan süre boyunca desteksiz stabilitelerini koruyabilmektedirler. Ayrıca çivi delgisinde muhafaza borusu gerektirmemekte ve yeterli stabilite sağlanmaktadır. Çivilerdeki çekme kuvvetlerinin az olduğu durumlarda genellikle yeterli bağ kuvveti oluşmaktadır (Cesur, 2010).

1.6.1.3. Kohezyonlu Zeminlerde Uygulanan Zemin Çivili Duvarlarda Karşılaşılan Sorunlar

1.6.1.3.1. Şişme ve Rötne

Yüksek plastisiteli, aşırı konsolide killere ıslanma ve kuruma gibi olaylarla bünyelerindeki su muhtevasının değişmesine bağlı olarak hacim değişimi göstermeye yatkın olmaktadır. Bu tür zemin koşullarında imal edilen zemin çivili duvarlarda tekrarlı mevsimsel ıslanma ve kuruma çevrimleri killerde şişme ve rötne oluşmasına sebep olmaktadır. Bu olaylar sonucu özellikle şev üstü ve/veya kaplamada parçalanmalar oluşabilmektedir. Ayrıca çivi yüklerinde değişiklikler ve dalgalanmalar oluşabilmekte ve şev yüzünde bölgesel oturmalar gözlenebilmektedir. Su püskürtmeli delgi killerde yumuşamaya sebep olabileceği için tercih edilmemelidir. Düşük plastisiteli killerde ise smektit kil minerallerinin (montmorillonite) daha az görülmesi şişme ve rötne davranışını azaltmaktadır. Yüksek plastisiteli killerin mevsimsel şişme/rötne davranışları bitkilendirme ve ağaçlandırma ile daha büyük zararlar oluşturacak durumlara gelebilmektedir. Bitki ve ağaç kökleri killerin daha çok su almasına yardımcı olacaktır. Bu gibi durumlarda özellikle esnek kaplamalı zemin çivili duvarların uygulanması uygun olmayacaktır. Çivi aralıkları, çivi kafası plakasının boyutları ve kaplama rijitliğinin yeterli olmadığı durumlarda ilerleyen durum göçmeye sebep olabilmektedir (Cesur, 2010).

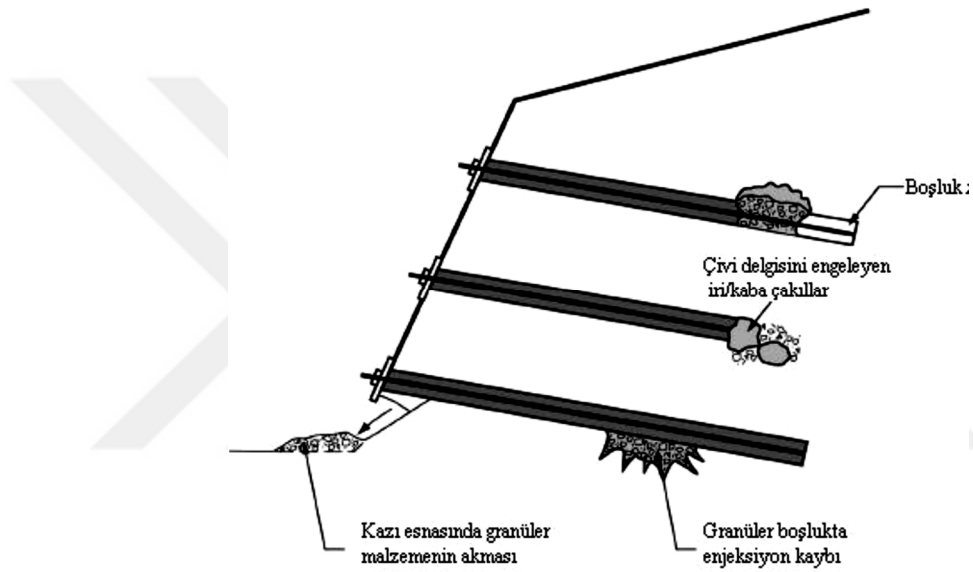
1.6.1.3.2. Örselenmiş Zemin ve Şevin Stabil Olması

Yüksek plastisiteli killere diğerlerine göre daha duyarlı olmaktadır. Rezidüel ya da yeniden yoğrulmuş numunelerin pik dayanımları örselenmemiş numunelere göre daha düşük olmaktadır. Duyarlı killerin tasarıma esas kesme dayanımı parametrelerinin seçiminde daha önceki örselenmelerini öngörmek gerekmektedir (Cesur, 2010).

1.6.1.3.3. Derecelenmenin Etkisi

Kohezyonlu zemin içerisinde gözlenen kaba daneli malzeme zemin çivili duvarların imalatında ve uzun dönem performansı açısından sorun yaratabilmektedir. Tabakalı killerin boşluk suyu basıncı değişimine tepkisi çok daha hızlı olmakta; özellikle tabakaların ince

olduğu bölgelerde ve kısa dönem davranışlarında drenajlı şartlar elde edilebilmektedir. Bu durum geçici kazı stabilitesini etkileyebilmektedir. İnce malzemelerin aralarında kaba malzemelere de rastlamak mümkün olmaktadır. Zemin çivili sistemler ince ve kaba malzemenin bir arada görüldüğü zemin türlerinde uygulamaya yönelik sistemler olmakta; kaba malzemenin varlığı ise bazı şekillerde delgi stabilite kayıplar oluşmasına ve buna bağlı düşük bağ kuvvetlerinin elde edilmesine sebep olabilmektedir. Örnek durumlar Şekil 4'te gösterilmektedir (Cesur, 2010).



Şekil 4. Delgide karşılaşılabilecek stabilite kayıpları (Ciria, 2005).

Yer altı suyunun sızma etkisine bağlı olarak zemindeki ince malzeme yıkanabilmekte, yine sızmaya bağlı olarak kohezyonlu birimde yumuşama oluşabilmektedir. Bu iki durum da delgi stabilitesinin kaybı ile sonuçlanmakta ve delgide göçme oluşabilmektedir. Böyle durumlarda öngörülen çivi boyu enjeksiyonlanamamakta ve düşük bağ kuvvetleri elde edilmektedir. İri ve kaba çakıllar öngörülen delgi boyuna ulaşmasını engelleyebilmekte, sürme çivi uygulamalarında ise çivilerde eğilmeye sebep olabilmektedir. Yine yer altı suyunun sızma hareketi ile enjeksiyon karşılaşılan granüler boşluklara doğru yıkanabilmekte ve öngörülen bağ kuvvetlerinin elde edilememesine sebep olmaktadır. İnce malzeme içermeyen, temiz granüler birimlerde yapılan kazılarda yüzeysel malzeme akması ile karşılaşılabilmektedir (Cesur, 2010).

1.6.2. Granüler Zeminler

Doğal yollarla oluşmuş granüler birimlerin çoğu zemin çivili duvar uygulamaları için uygun olmaktadır. Yüksek kesme dayanımı açısına sahip ve oluşan bağ kuvvetleri yüksek olmaktadır. Granüler birimlerin zemin çivilere tam uygunluğu sağlaması için kısa dönem stabilitesi sağlamaları gerekmektedir. Gerekli geçici stabilite ince malzemenin varlığı ile oluşan kohezyon ile sağlanmaktadır. Görünür kohezyon aynı zamanda daneler arasındaki kapiler çekme ile oluşabilmektedir. İnce malzeme içermeyen granüler birimlerde sadece kapiler çekme kuvvetleri yarma stabilitesini koruma açısından yeterli olmamaktadır. SPT N sayısı 10'dan küçük ve görelî sıklıkları %30'dan az olan gevşek, temiz granüler birimler, zemin çivili duvar uygulamaları için uygun olmamaktadırlar. Yeterli süre boyunca yarma stabilitesini sağlayamazlar ve zemin/çivi arayüzünde oluşan bağ kuvveti düşük olmaktadır (FHWA, 1998).

1.6.2.1. Granüler Zeminlerde Uygulanılan Zemin Çivili Duvarlarda Karşılaşılan Sorunlar

1.6.2.1.1. Geçici Stabilite Sorunları

Görünür kohezyon olmadığı durumlarda muhafazalı delgi yapılması gerekmektedir. Görünür kohezyon yeraltı suyu ile yok olabilmektedir. Yeraltı su seviyesinin üzerinde bile tünek suyun sızması ile bu olay oluşabilmektedir. İmalat aşamasında zeminin su muhtevasının değişmemesi sağlanmalıdır. Çok sıkı olmayan üniform boylanmış granüler zeminlerde, kazı yüzeyinde bozulma ve akmlar oluşmasına meyilli olmaktadır. Bu tür zeminlerde 40 - 45 'den daha dik şevlerin elde edilmesi için dar anolar tercih edilmelidir. Anolar arasında oluşan kemerlenme etkisi şev stabilitesine katkıda bulunacaktır. Alternatif olacak şev kazısından hemen sonra püskürtme beton uygulanması şev stabilitesine katkıda bulunacaktır (Cesur, 2010).

1.6.2.2. Enjeksiyon Kaybı

Temiz kaba granüler birimlerde zemin çivili duvar uygulamalarında, çivi enjeksiyonlanması esnasında, ince malzeme olmaması durumunda enjeksiyonun boşluklarda kaybolmasına sebep olabilmektedir. Bunun önüne geçmek için viskozitesi yüksek enjeksiyon kullanılması gerekmektedir. (Cesur, 2010).

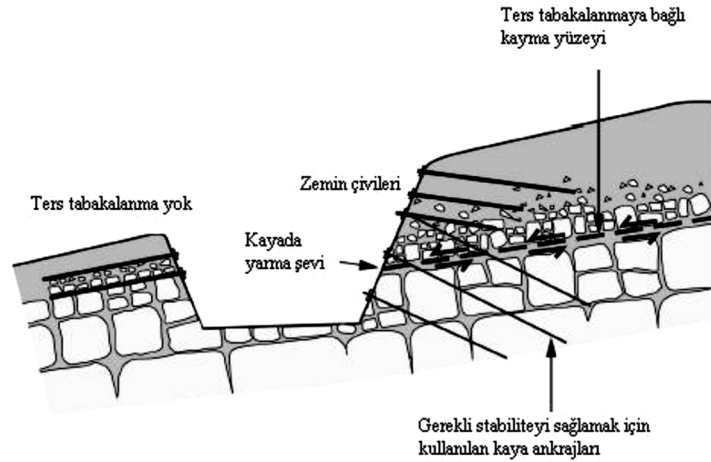
1.6.3. Zayıf Kayalar

Zayıf ya da ayrıışmış kayalar zemin çivili uygulamalar için gerekli uygun koşullara sahip olmaktadır. Uygulamada tabakaların değişen sertliklerine uygun delgi metodu seçilmelidir. Genellikle yüksek bağ kuvvetleri elde edilmektedir (Cesur, 2010).

1.6.3.1. Zayıf Kayalarda Uygulanan Zemin Çivili Duvarlarda Karşılaşılan Sorunlar

1.6.3.1.1. Ters Tabakalanma

Tabakalanma yüzeylerinin düşük mukavemetli ince malzeme içermesi durumunda ters tabakalanma ile karşılaşılan ayrıışmış kayaçlarda uygulanan zemin çivili duvarların kısa ve uzun dönemli davranışlarında stabilite sorunları gözlenmektedir. Bu durum Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Ters tabakalanmaya bağlı stabilite sorunları (Ciria, 2005).

1.6.3.1.2. Ayrışma Etkisi

Aşırı ayrılmış kayalar ve zayıf kayalar ince malzemeye doğru ayrılmakta ve bunun sonucunda ince malzemelerle aynı avantaj ve dezavantajları göstermektedirler.

1.7. Zemin Çivisi

Zemin çivisi, Avrupa ve Kuzey Amerika'da yamaçların kalıcı ve geçici duraylılığında, eski dayanma yapılarının yenilenmesinde, bünyesinde bulunan paslanmaz çelik donatıların korozyona uğraması yüzünden onarılması gereken mekanik olarak duraylandırılmış toprak (MSE) duvarlarda, yer altı kazılarında geçici dayanma yapısı oluşturmada, kara ve demiryollarının yarma kesimleri ile tünellerde geçici destek amaçlı kullanılmaktadır.

Zemin çivileme tekniğinin temel düşüncesi zemine sık aralıklarla donatılar yerleştirilerek kazı süresince ve sonrasında oluşan deplasmanları engellemek ve yanıl basıncı sınırlamaktır. Donatılarda oluşan çekme kuvvetlerinin zemin-donatı arayüzeyinde oluşan sürtünmeye transfer edilerek karşı konulması amaçlanmaktadır. Bu teknik aslında Rabcewicz (1965) tarafından geliştirilen Yeni Avusturya Tünel Metodunun bir uygulaması olmaktadır.

1.7.1. Uygulama Alanları

Zemin araştırması yapılırken bazı olumsuz jeolojik özellikler göz önüne alındığında, lokal olumsuz zemin ve zemin suyu için daha yoğun tasarım çözümleri önerilmektedir. Desteklenmeyen geniş ölçekli yarmaların, özellikle hayati ve büyük ekonomik önemi olan, yapımından mümkün olduğu kadar kaçınılmalıdır. Kuvvet eksikliğinden dolayı, olumsuz zemin ve zemin suyu fark edilmediğinde böyle yarmalar büyük ölçüde zedelenmektedir. Geleneksel limit denge analizlerine dayanan farklı tasarım güvenlik faktörleri hesaplanırsa bile, pozitif şev destekleme ve güçlendirme sistemleri (gereken yüzey ve yeraltı drenaj önlemleri ile takviye eden sistemler) genellikle tercih edilmektedir. Çivili bir zemin sistemi gerilmelerin tamamen dağıtıldığı zeminde lokal zayıflıkları geçersiz kılabilir (Geoguide 7 – Guide to Soil Nail Design and Construction).

1.7.2. Zemin Çivileme Sisteminin Esasları

1.7.2.1. Montaj Metodu

Farklı zemin çivisi montaj metotları olmakta ve montaj metodunun seçimi maliyet, araziye erişim, çalışma alanı, zemin ve zemin suyu şartları gibi birçok faktöre bağlanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan zemin çivisi montaj metotları aşağıda tanımlanmaktadır (FHWA, 2003).

Drill- Grout zemin çivileri: En yaygın montaj metodu olmaktadır. Temel zemininde yaklaşık olarak 100-200 mm çapında çivi delikleri delinmekte ve bu delikler arasında 1.5 m (5ft) aralık bulunmaktadır. Bu metotta, takviye elemanı deliğe yerleştirilmekte ve delik çimento harcıyla doldurulmaktadır. Çivi deliklerinin açımında izlenecek yol, kullanılacak ekipman ve yararlanılacak malzemeler direkt olarak zemin çivisi imalatının yapılacağı zemindeki toprak ve kaya özellikleriyle ilintilidir. Bu tür teknik bilgilerin toplanıp irdelenmesi sonunda aşağıda listelenen delgi metotlarından birinin kullanılmasına karar verilmektedir.

- a) Burgu (auger) kullanarak delgi (Hava gerekebilir.)
- b) Kaya matkabı (rock bit) ile delgi (Hava veya su gereklidir.)
- c) Üstten vurmali çekiç (top hammer) ile delgi (Hava gereklidir.)
- d) İçten vurmali çekiç (down the hole hammer) ile delgi (Hava veya köpük gereklidir. Kayayı delmede kullanılır.)
- e) Odex ile delgi (Aşırı yüklenmiş zeminlerde uygulanabilir. Üstten vurmali çekiç ve DTH çekiç versiyonları mevcuttur.)
- f) Sondaj kılavuzu borusu (muhafaza borusu, casing) ile delgi (Bu sistemde muhafaza borusu delik çeperlerindeki olası bir çökmeyi engellediği gibi ayrıca da matkap/burgu ucunun ilerlemesini kolaylaştırmaktadır. Kılavuz zarf borunun dönüş istikameti, döner matkap ucunun dönüş istikametinin tersinedir. Çivi için açılmış olan sondaj deliklerinde kök kısmının ayrıca büyütülmesi ve düzenlenmesi işlemi daha sonra uygulanan bir delgi işlemidir. Bu metot killi zonlarda zemine aktarılan çivi gerilme kuvvetini pekiştirmek için kullanılır.)

Bu metodun avantajı zeminin altındaki engellerin üstesinden gelebilmesi ve sondajdan elde edilen malzemenin zemin hakkında bize bilgi vermesidir. Ayrıca uzun

zemin çivileri bu metot kullanılarak monte edilebilmektedir. Eğer gerekirse, deliklerin boyutları ve sıralamaları takviye elemanı yerleştirilmeden önce kontrol edilmelidir. Ancak delme ve harç doldurma metodu deliklerin çökmesiyle sonlanabilmektedir. Bir kılıf ile bu problemin üstesinden gelinebilmekte; ayrıca delme ve harç doldurma süreci zeminde bozukluklara yol açabilmektedir (FHWA, 2003).

Self-Drilling zemin çivileri: Drill- grout metoduyla karşılaştırıldığında yeni bir metottur. Numune bir matkap ucu kullanılarak çivi takviye elemanı zeminin içine doğrudan sokulmalı, delme ve çimentolama işlemi aynı anda ve hızlı yapılmalıdır. Hava ve su kullanmak yerine, çimento fişkirtılarak kullanılmaktadır. Merkezleyici ve harç borusuna gerek olmamakta ve genellikle kılıf (çerçeve) da kullanılmamaktadır. Ancak bu metot, yoğunlukla kaya olan ve penetre edilemeyen zeminlerde uygulanamamaktadır. Esnekliğinden dolayı uzun zemin çivilerinin hizalanmasını sağlamak zor olabilmektedir (FHWA, 2003).

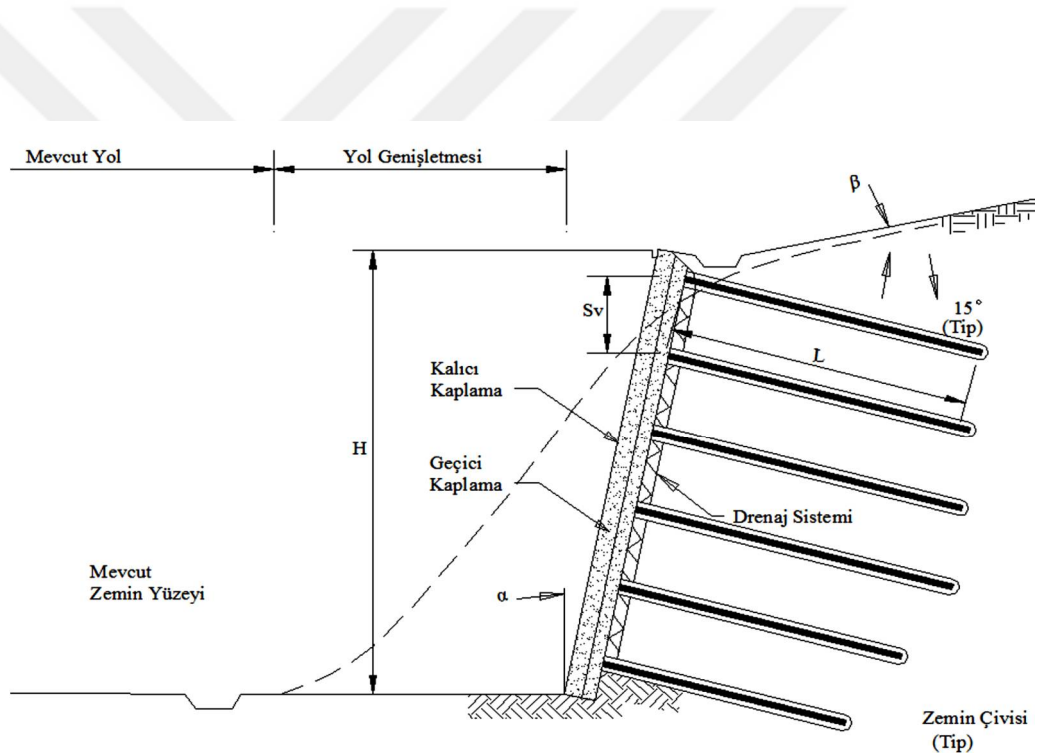
Driven zemin çivileri: Bu zemin çivileri 19-25mm çaplarında oldukça küçük deliklere uygulanmaktadırlar. Yaklaşık olarak 1-1.2m aralıklarla delikler oluşturulmaktadır. Drill-grout metoduna göre daha hızlı uygulanmakta, ancak iyi bir korozyon koruması sağlayamamaktadır. Bu nedenle daha çok geçici yapılarda uygulanan bir yöntemdir (FHWA, 2003).

Jet- grout zemin çivileri: Zemini aşındırmak için uygulanmakta ve çivi için zeminde delikler oluşturulmaktadır. Harç merkez çubuk için korozyon koruması sağlamaktadır. İkinci adımda çubuklar vibro-percussion delme metoduyla montajlanmaktadır (FHWA, 2003).

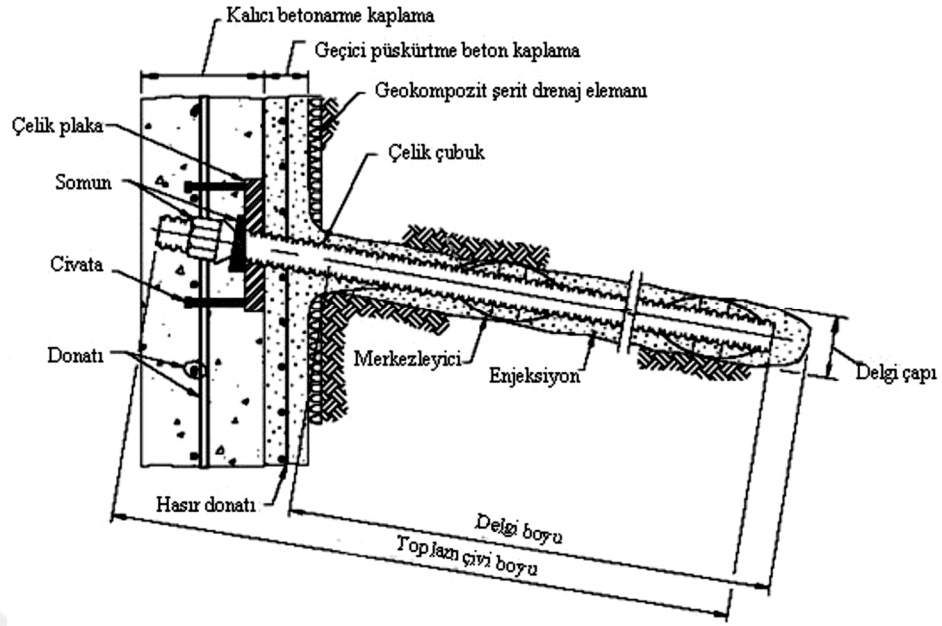
Launched (fırlatma) zemin çivileri: Bu yöntem, sıkıştırılmış hava içeren bir ateşleme mekanizması kullanılarak, yalın çubukların zemine çok hızlı bir şekilde fırlatılmasıyla yapılmaktadır. Çubuklar 19-25mm çapında ve 8m uzunluğundadır ve proje alanına küçük darbelerle hızlı montaj yapılmaktadır. Ancak zemine penetre edilen çivilerin uzunluk kontrolleri zor olabilmektedir (FHWA, 2003).

1.7.2.2. Zemin Çivili Duvar Elemanları

Uygulamada farklı sistemlerle karşılaşılsa da en yaygın imalat şekli delme - enjeksiyonlama yöntemidir. Bu yöntem önceden delinen zemine çelik donatının yerleştirilmesi ve daha sonra enjeksiyonlanmasından oluşmaktadır. Delme – enjeksiyonlama yöntemi ile imal edilen zemin çivili duvarlara ait tipik kesit Şekil 6’da verilmektedir. Zemin çivili duvarları oluşturan elemanlar temel olarak zemin çivileri, drenaj sistemi ve kaplamadan oluşmaktadır. Zemin çivileri ise Şekil 7’de görüldüğü gibi çelik donatı, enjeksiyon, çivi kafası, somun, sızdırmazlık contası, çivi başlığı, merkezleyici ve kalıcı zemin çivili duvar uygulamalarında kullanılan korozyon önleyici kılıflardan oluşmaktadır (FHWA, 2003).



Şekil 6. Zemin çivili duvarlara ait tipik kesit (FHWA, 2003).



Şekil 7. Zemin çivisine ait detaylı kesit

1.7.2.2.1. Çivi Donatıları

Güçlendirme elemanı sistemin ana elemanıdır. Temel fonksiyonu gerilme direnci sağlamaktır. Güçlendirme elemanları, sert esnek çelik çubuklardan oluşmaktadır. Bazen polimerle güçlendirilmiş elyaflar da zemin çivisi güçlendirme elemanı olarak kullanılabilir. Alt seviyelerdeki kazı işlemleri sırasında oluşan deformasyon sebebiyle oluşan çekme gerilmesi çivilere pasif olarak aktarılmaktadır (FHWA, 2003).

1.7.2.2.2. Güçlendirme Konnektörü (Bağlayıcı eleman)

Konnektörler güçlendirme elemanlarını birbirine bağlamak için kullanılmaktadırlar (FHWA, 2003).

1.7.2.2.3. Enjeksiyon (Harç)

Zemin çivilerinin zemine bağlanmasında (yapışmasında) en gelişmiş ve en efektif metot zemin çivi donatısı çeperine çimento enjeksiyonu püskürtülmesidir. Enjeksiyon,

zemin çivisi için korozyona karşı güvenilir bir koruma hem de yeterli derecede bir tutunma mukavemeti sağlamaktadır. En temel enjeksiyon malzemeleri PÇ42.5/32.5 portland çimentosu ve su olmakta, zemin yüzeyi ile çivi arasına çoğunlukla sade çimento harcı tercih edilmektedir. Ayrıca ekonomik nedenlerden dolayı bazı durumlarda kum-çimento kullanımına rastlanılmaktadır. Enjeksiyon karışımı $\frac{1}{2}$ oranında (50kg su/ 100kg çimento) olduğunca yüksek kıvamlı hazırlanmalı ve uygulanmalıdır (FHWA, 2003).

1.7.2.2.4. Korozyon Önleyiciler

Dizayn ömrü ve zemin şartlarına göre korozyon önleyiciler farklılık gösterebilmektedirler. Korozyon önleyicilerin en yaygın tipleri sıcak daldırma galvaniz ve oluklu plastik kaplama olmaktadır. Polietilen malzemeden yapılmış ısıyla büzülen bilezik ve anti-korozyon dolgu macunları da konektörleri korumak için kullanılan korozyon önleyiciler olarak nitelendirilmektedirler (FHWA, 2003).

1.7.2.2.5. Çivi Başlığı

Çivi başlığı zemin çivisinin duvar kaplamasından dışarı çıkan kısmı olmakta ve çivi başlığı başlık plakası, somun, sızdırmazlık contası ve saplama kısımlarından oluşmaktadır. Bu bölümler Şekil 7’de gösterilmektedirler. Çivi başlığının amacı, her bir çivi için gerilme kuvvetinin hareketlenmesini sağlamak ve çivi sonundaki kuvvetin geçici püskürtme betonu kaplamaya ve kaplamanın arkasındaki zemine yayılmasını sağlamaktır. Ayrıca zemin çivileri arasındaki ve kayma yüzeyleri yanındaki zeminin lokal stabilitesini desteklemektir (FHWA, 2003).

1.7.2.2.6. Merkezleyiciler

PVC’den yapılan merkezleyiciler genellikle 2.50 m’den fazla olmayan aralıklarla başlangıç ve son uçtan 0.50 m uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmektedirler (FHWA, 2003).

1.7.2.2.7. Yüzey Kaplamaları

Kaplamanın ana görevi zemin çivilerinin arasındaki zeminin duraylılığını sağlamaktır. Aynı zamanda erozyona karşı koruma sağlanmaktadır. Üç çeşit yüzey kaplaması mevcuttur:

- Yumuşak kaplamalar
- Esnek kaplamalar
- Sert yapısal kaplamalar (FHWA, 2003).

1.7.2.2.8. Drenaj Sistemi

Duvar kaplaması arkasında su basıncı oluşmasını engellemek için kazı ile geçici kaplama yüzeyi arasına prefabrike sentetik drenaj altlıklar, düşey şeritler halinde çivi başlıkları arasına yerleştirilmektedir (FHWA, 1998).

1.7.3. Avantaj ve Dezavantajları

Zemin çivisi teknolojisi alternatif dizayn çözümlerini tercih etmektedir. Yapı, maliyet ve performansla ilgili zemin çivisi teknolojisinin avantajları;

- a) Zor ulaşılabilen sıkışık yerler için uygundur, çünkü çivi montajı için gereken yapı malzemeleri küçük ve hareketlidir.
- b) Yapım sırasında karşılaşılan zemin şartlarındaki değişim ve zorlukların üstesinden kolayca gelebilir (örneğin; arazi şartlarına uyması için zemin çivisinin boyunun ve yerinin ayarlanması gibi).
- c) Yapım süresi boyunca, çevresel sorunlara (ağaç kesilmesi gibi) daha az neden olur.
- d) İstinat duvarlarının (geçici) geleneksel teknolojileriyle karşılaştırıldığında zaman ve maliyet kazancı sağlar (Berilgen, 2012).

Zemin çivi teknolojisinin dezavantajları;

- a) Elektrik, su vb. tesisatlar, altyapı ya da gömülmüş engeller zemin çivisinin boyunu ve düzenlemesini sınırlandırır.
- b) Zemin çivilerinin bulunduğu tabaka sterilize edilir.
- c) Yüksek zemin suyu tabakasının varlığı delik delme-harç doldurma ve zemin çivili kazılarda şev yüzeyi dengesizlik problemlerinde zorluklara neden olabilir.
- d) Geçirgen zeminlerin varlığı (kaldırım taşı, aşınmış kaya parçaları, oldukça çatlamış kayalar, birleşimlerdeki açıklıklar ya da boşlukların olması gibi) harç sızıntı problemlerine yol açabilir.
- e) İnce zemin taneleri içeren zeminlerin varlığı zemin ve çivi arasında kayma problemlerine yol açabilir.
- f) Uzun zemin çivilerinin montajı zordur ve bu yüzden zemin çivisi teknolojisi heyelanlar ve büyük şevler için uygun olmayabilir.
- g) Zemin çivisi kuvvetlerinin hareketi zemin deformasyonlarına yol açacaktır, çünkü zemin çivileri öngerilmesizdir. Birleşik yapılar, tesisler ve servisler üzerindeki etkileri özellikle dikkate alınmalıdır.
- h) Zemin çivilerinin yüksek erozyon potansiyeli olan alanlarda stabiliteyi sağlama konusunda etkisi yoktur (Berilgen, 2012).

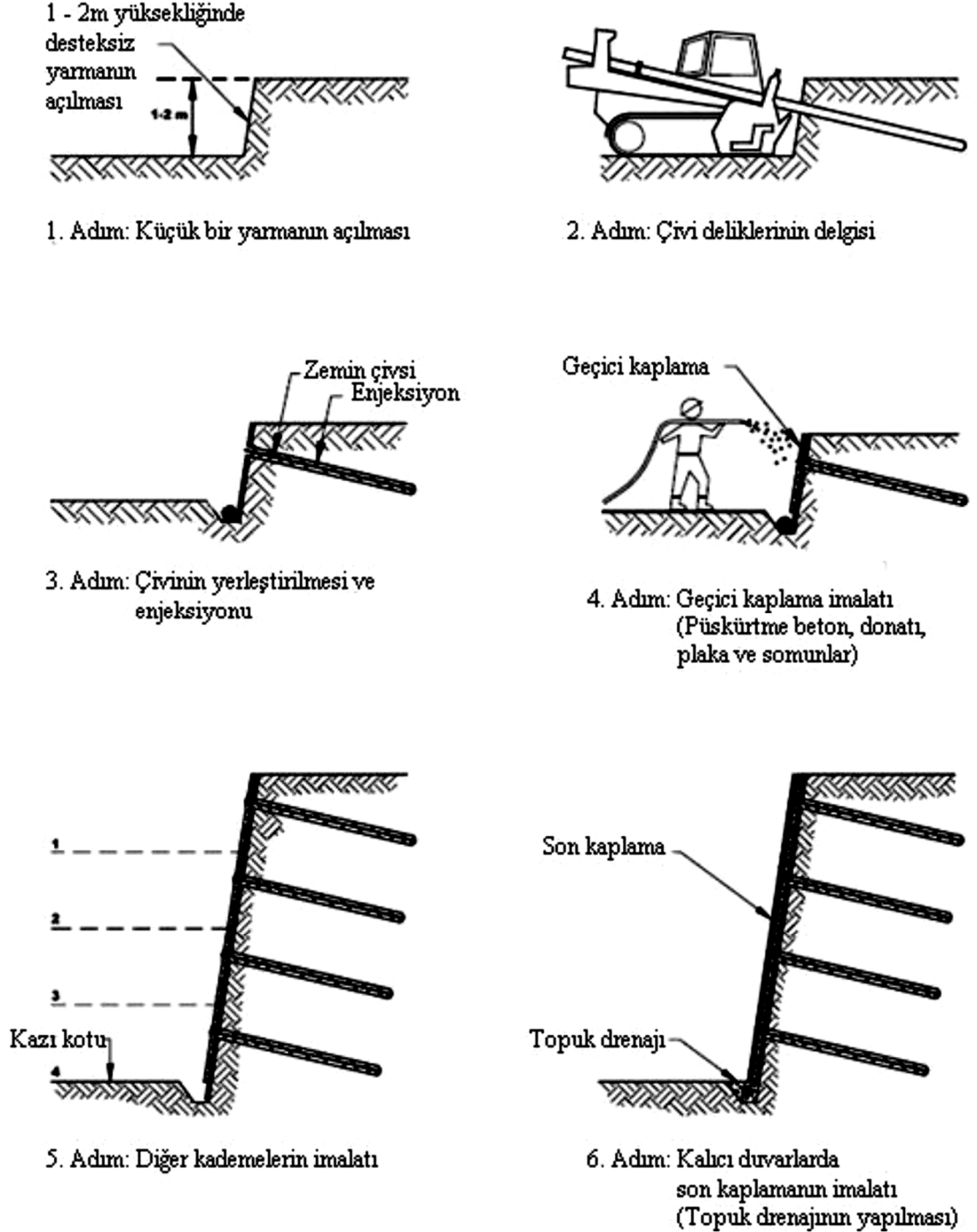
Yukarıda zemin çivisi uygulamalarının avantaj ve dezavantajları sıralanmıştır. Tasarımcılar mühendislik kurallarına uymak koşuluyla en iyi dizayn metodunu kullanarak uygulayabilirler.

1.7.4. Çivi Sisteminin Ana Mekanizması

Zemin çivileme tekniği prensip olarak, çivilerdeki gerilme hareketleri boyunca şevlerin, istinat duvarlarının ve kazıların stabilitesini artırmaktadır. Çivi başlığı/yüzeyi ile ortaya çıkan reaksiyonların yanı sıra, öncelikle zeminle çivi arasındaki sürtünme etkileşimi zemin çivilerinde ortaya çıkarılmaktadır. Zemin çivilerindeki gerilme kuvvetleri kesme yüklerini destekleyerek ve normal gerilmeleri artırarak zemini direkt olarak güçlendirmektedir. Ayrıca zemin çivi başlıkları ve yüzeyleri şev yüzeylerinde zemin

1.7.5. İnşaat Adımları

Zemin çivili duvarların inşaatında en çok karşılaşılan yöntem olan delme – enjeksiyonlama yöntemi Şekil 9’da gösterilmektedir.



Şekil 9. Çivili duvarların inşaat adımları (FHWA, 2003).

1.7.5.1. İlk Yarmanın Açılması

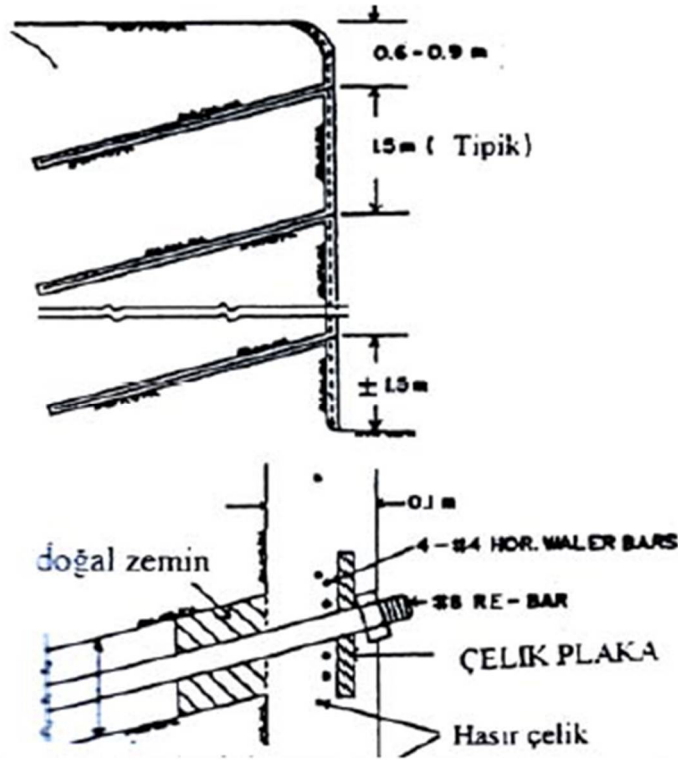
Kazıya başlamadan önce, inşaatın tüm adımları boyunca yüzey sularının kontrolü sağlanmalıdır. Bu da genellikle toplama hendekleri ile sağlanmaktadır. Bu şekilde yüzey suları inşaatı zarar vermeden kontrollü biçimde toplanmış ve uzaklaştırılmış olmaktadır. İlk yarma işlemi birinci sıra çivinin biraz altına kadar açılmaktadır. Bu yarma derinliği zeminin 24 ile 48 saat içinde kendini desteksiz tutabilme yeteneği ile doğrudan ilgilidir ve 1-2 m'dir. Bu süre içerisinde alın duraylılığının sorunlu olduğu yerlerde çivi yerleştirilip fazlalığının kesilmesi tamamlanılana dek yarma kademeli şekilde açılıp bırakılabilmektedir. Duraylılık, yarma altına püskürtme beton ile bir örtü katmanı oluşturularak da sağlanabilmektedir. Duraylılık sorunları daha çok bozulmuş ve örselenmiş malzemenin yüzeye yakın olduğu ilk birkaç kat kazı aşamasında yaşanmaktadır. Gevşek dolgu ve gömülü eski eserler bu sıkıntının doğmasına neden olan diğer etkenlerden bazılarıdır.

Zeminin olabildiğince az örselenmesi ve alındaki gevşemiş bölgenin püskürtme betonun dökülmesinden önce kaldırılması gerekmektedir. Kazılmış yüzey olabildiğince düzgün olmalıdır. Bu şekilde dökülecek püskürtme betonun miktarında azalma sağlanabilmektedir. Çalışma alanı olarak 10 m genişlikteki bir bölge, delgi aygıtının yerleşmesi ve çalışabilmesi için yeterli olmaktadır (Demirkoç, 2007).

1.7.5.2. Deliklerin Açılması

Çivi delikleri önceden belirlenen yerlerde belirli uzunluk ve eğimde zemine uygun delme yöntemi kullanılarak açılmaktadır. Bu yöntemler kılıfsız ve kılıflı yöntemler olarak adlandırılmaktadır. Kılıflı yöntemlerde kullanılan aletler kılıfsız olanlardan daha üstün niteliklere sahiptir. Kılıfsız delgiler; döner veya basınçlı hava ve kuru burgu kullanarak döner-kırma aletleriyle yapılırken, kılıflı delgiler daha fazla duraylılık sorunu yaşayan yerlerde tekil ince borulu, su/hava akım ile çift yönde döner aletler veya içi boş boru şeklindeki burgular kullanılarak yapılmaktadır. Tipik çivi yerleşiminde düşeyde ve yatayda 1-2 m aralık bırakılmaktadır. Çivi uzunluğu da genelde duvar yüksekliğinin % 70 – 100 katıdır. Çivilerin yatayla yapmış olduğu açı enjeksiyonu kolaylaştırmak amacı ile genelde 15° olarak tasarlanmaktadır. Genellikle duvar üstünden 0.6-0.9 m'den sonra çivi

yerleştirilmeye başlanmakta ve çivi aralıkları düşeyde 1.5 m olarak alınmaktadır. Şekil 10'da zemin çivili bir sistemin tipik kesiti gösterilmektedir (Demirkoç, 2007).



Şekil 10. Zemin çivili sistemin tipik kesiti (Demirkoç, 2007).

1.7.5.3. Çivinin Yerleştirilmesi ve Enjeksiyonu

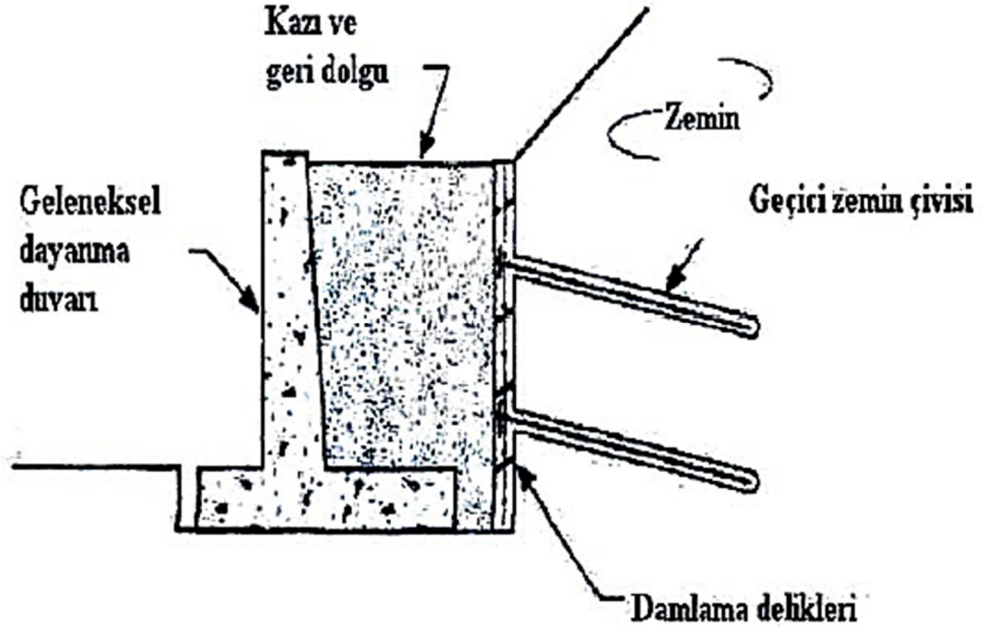
Çivinin delik içinde merkezine yerleştirilmesi için genellikle plastik merkezleyiciler kullanılmaktadır. Bununla birlikte çivilerin içi boş burgularla yerleştirildiği uygulamalarda merkezleyiciler genellikle etkisiz kalırken, çökme değeri 200 mm'den az olan enjeksiyon karışımı çivinin yerleşiminde büyük rol oynamakta ve çivinin delik tabanına kadar inmesini engellemektedir. Çiviler genelde çapı 19 – 35 mm ve akma dayanımı da 420 – 500 N/mm² arasında değişen çelikten oluşmaktadır. Delik içine yerleştirilen çivinin çevresine zeminle kendisi arasında bağlayıcılığı sağlayan çimento şerbeti enjekte edilmektedir. Çivilemede su / çimento oranı (w/c) 0.4-0.5 olan çimento şerbeti

kullanılmaktadır. Enjeksiyon; yerçekimi veya delgi içindeki aşağıdan yukarı doğru uygulanan düşük basınç yardımıyla gerçekleştirilmektedir.

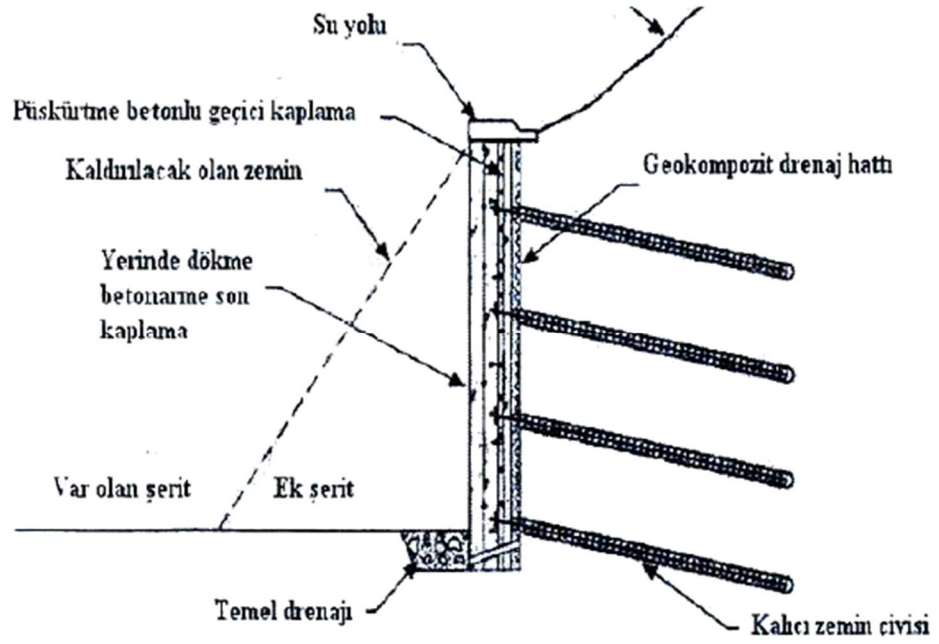
Kalıcı çivilerde korozyon korunması ya kalın epoksi kaplamasıyla ya da içi enjeksiyonla doldurulan oluklu plastik kılıfla sağlanmaktadır (Demirkoç, 2007).

1.7.5.4. Drenaj Sisteminin Yerleştirilmesi

Püskürtme beton işlemine geçilmeden önce duvar arkasındaki drenajı sağlaması amacıyla 400 mm genişliğindeki prefabrike sentetik drenaj altlıklar düşey şeritler halinde yatayı da ona eşit olacak şekilde çivi başları arasına yerleştirilmektedir. Drenaj şeritleri her kazı aşamasında duvarın tabanına kadar uzatılmakta ve son olarak ya doğrudan taban drenine ya da duvarın içinden dışarı çıkan sızdırma deliklerine (barbakan) bağlanmaktadır. Zemin çivili duvarlar su seviyesi üzerindeki uygulamalar için çok iyi sonuçlar vermektedir. Şekil 11(a)'da geçici zemin çivisi (FHWA, 1998) uygulaması, Şekil 11(b)'de ise kalıcı zemin çivisi (FHWA, 1998) uygulaması gösterilmektedir.



Şekil 11(a). Geçici zemin çivisi (FHWA, 1998).



Şekil 11(b). Kalıcı zemin çivisi (FHWA, 1998).

1.7.5.5. İşlemin İstenen Kota Kadar Tekrarlanması

Kazı, çivi ve drenaj sisteminin yerleştirilmesi ve yüzey kaplamasının oluşturulması aşamaları istenilen kota ulaşıncaya dek tekrarlanmaktadır. Püskürtme betonla yüzey kaplaması oluşturulması özellikle alın duraylılığının söz konusu olduğu yerlerde delgi ve çivi yerleştirilmesi işleminden daha önce yapılabilmektedir.

1.7.5.6. Son Yüzey Kaplaması

Uzun dönemde yapısal dayanıklılık nedenleri ile kalıcı zemin çivili ulaştırma uygulamalarında kullanılan en yaygın son kaplama türü yerinde dökme beton kaplamasıdır. Yerinde dökme beton kaplama çivi başlarına taşıyıcı plakaların üstüne kaynaklanmış civatalar yardımıyla yapısal olarak bağlanmaktadır. Kazının tamamlanmasıyla birlikte son kaplama olarak ikinci bir kat püskürtme beton kullanılabilir. Zemin çivili duvarlarda son kaplama olarak prekast beton paneller de kullanılmaktadır.

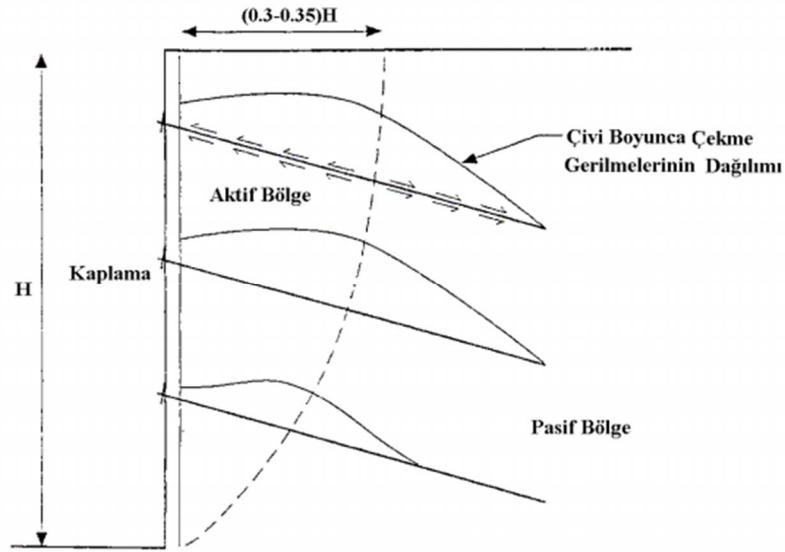
1.7.6. Zemin Çivili Duvarların Davranışı

1.7.6.1. Zemin Çivili Duvarların Olası Göçme Biçimi

Zemin çivili dayanma yapılarındaki temel mekanizma pasif ankraj adı da verilen donatıda kendisine bağlı duvarda oluşan yanal şekil değiştirme sonucunda oluşan çekme gerilmesi temeline dayanmaktadır. Yukarıdan aşağı doğru inşa edilen bir çivili duvarda donatılandırılmış bölgenin yanal genişlemesi yanal desteğin ortadan kaldırılması ile ilgilidir. Desteksiz zemini göçertecek olan gerilme ve birim şekil değiştirmeyi karşılamak için donatı ile zemin birbirini etkilemektedir. Bu donatılar, zemin içinde oluşan maksimum birim şekil değiştirme ile aynı yönde olacak şekilde yerleştirilmelidir. Böylelikle çekme gerilmeleri diğer etkenlere göre baskın duruma gelecektir (Demirkoç, 2007).

Zemin çivilerinde oluşan yük aslında çivi ile zemin arasındaki sürtünme etkileşimi sonucunda ortaya çıkmaktadır. İkinci etken de zemin ile kaplama arasındaki zemin – yapı etkileşimi olmaktadır. En son olarak çivi başında, kaplamayla çivi arasında oluşan gerilme etken olarak sayılabilmektedir. Kafada oluşan bu gerilme maksimum çivi yükünün bir kısmıdır. Her çivide oluşan maksimum gerilme yükü, donatılandırılmış zemin kesiminin içinde oluşmaktadır. Bu kesim duvardaki çivinin düşeydeki yerine bağlı olarak kaplamadan uzak bir bölgede yer almaktadır. Çivideki maksimum gerilme yükünün çoğu kez zemin kütlelerini iki ayrı bölgeye ayırdığı kabul edilmektedir.

Kaplamaya yakın olan tarafta yer alan ve “aktif bölge” olarak adlandırılan bölgede zemin tarafından donatı üzerinde oluşturulan kayma gerilmeleri zemin dışına yönlendirilmiş durumdadır. Bunlar aynı zamanda donatıyı da zeminin dışına çekmeye çalışmaktadır. Dirençli bölgede ise kayma gerilmeleri içe doğru yönelmiş ve donatıyı da çekme etkisine karşı tutmaktadır. Bu davranış aşağıdaki Şekil 12 ve Şekil 13’de görülmektedir. Donatı aktif bölgeyi direnç bölgesine bağlamaya çalışmaktadır. Duraylılığın sağlanması için çivinin gerilme dayanımının aktif bloğun duraylılığını sağlayacak destek büyüklüğünde olması gerekmektedir. Ayrıca sıyırılma göçmesi gerçekleşmemesi için çiviler dirençli bölgenin içine yeteri kadar yerleştirilmiş olmalıdır. Kısacası, kaplama ya da bağlantı sisteminin dayanımı tarafından belirlenen çivi kafa dayanımı ile alın-kayma yüzeyi arasındaki çivi uzunluğunun sıyırılma dayanımının bileşkesi kayma yüzeyinde gerekli çivi gerilmesini sağlamaya elverişli olmalıdır.

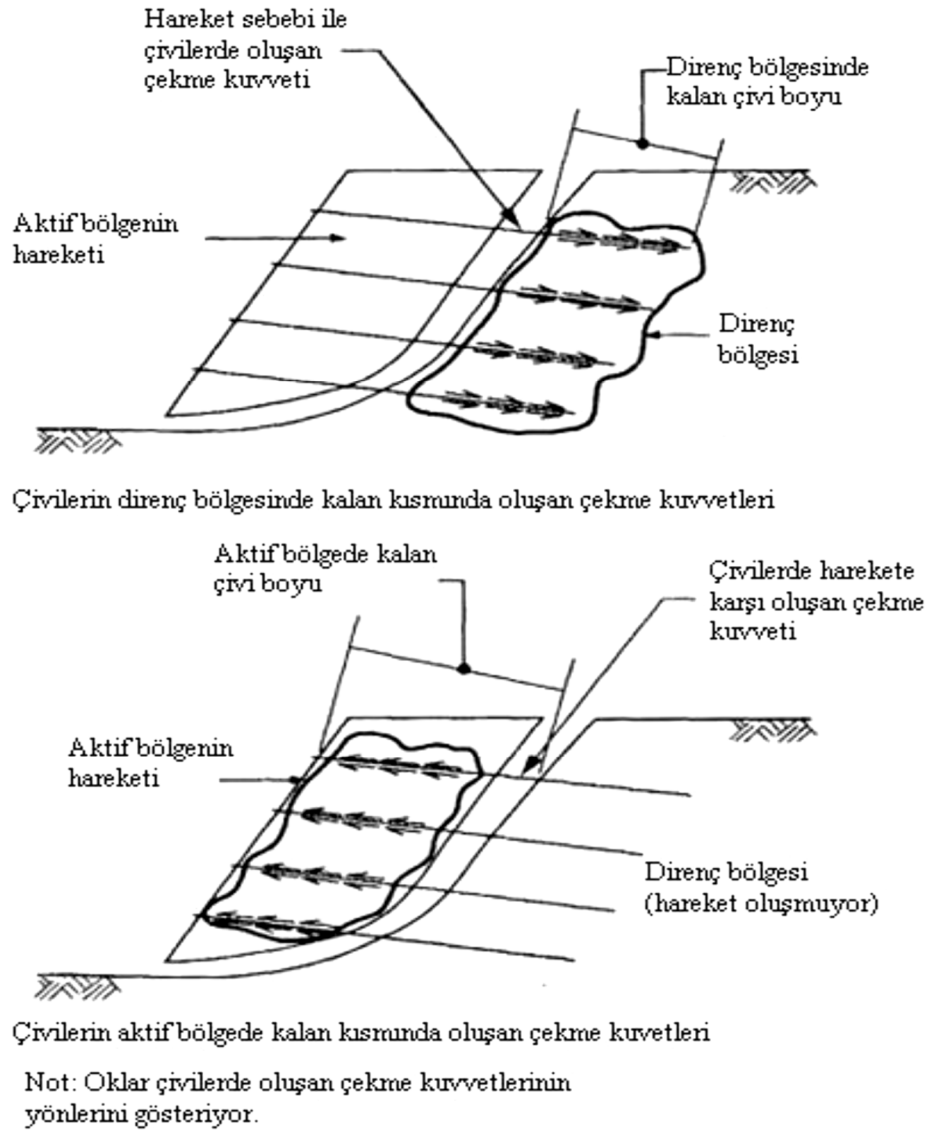


Şekil 12. Zemin çivisi davranışı (FHWA, 1998).

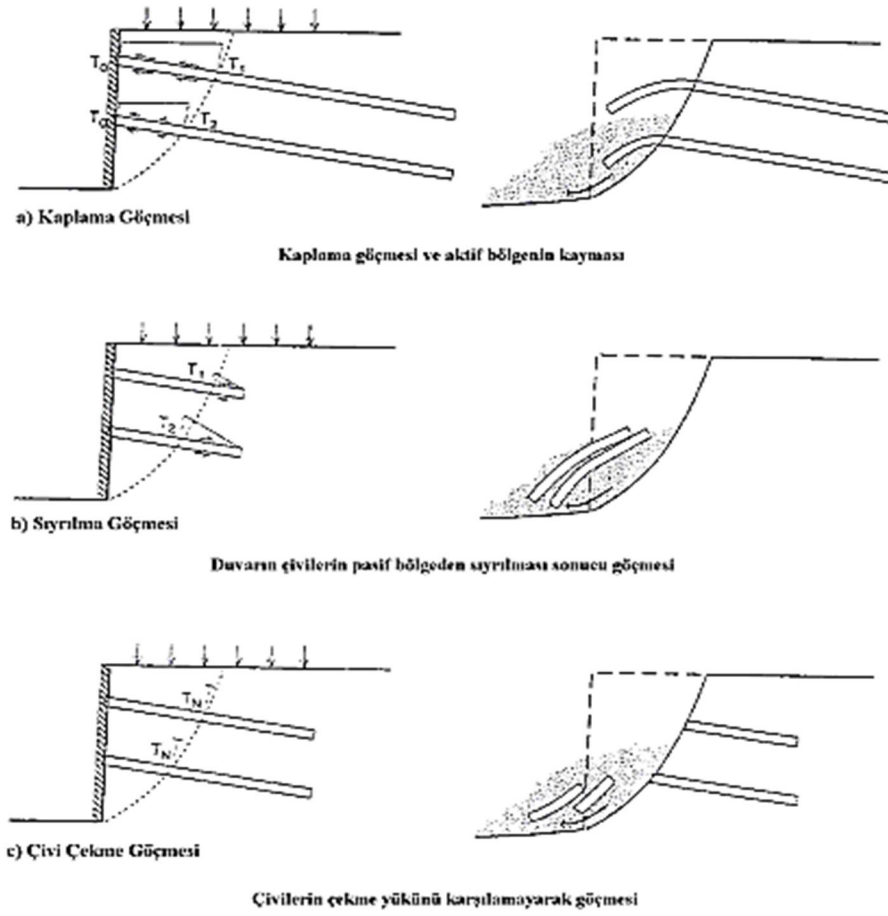
Şekil 14(a)'da donatı boyu uzun, gerilme dayanımı da yüksek tutulmuş olan bir çivili duvar görülmektedir. Göçme, dayanımı donatısına göre daha az olan kaplamada veya bağlantılardaki göçme ile gerçekleşmektedir. Bu tür göçmede daha sonra donatılandırılmış zemin kütleindeki aktif bölgede yer alan çiviler boyunca sıyrılma göçmesi yaşanmakta ve öndeki aktif bölge aşağıya kaymaktadır. Yüksek çivi gerilme dayanımı nedeniyle çivide bir kopma yaşanmazken, boyunun uzun olması çivinin aktif blok arkasındaki dirençli bölgeden sıyrılmasını engellemektedir.

Şekil 14(b)'de donatı boyu biraz sınırlandırılmış ancak gerilme dayanımı yüksek tutulmuş olan bir çivili duvar görülmektedir. Karşılaşılan göçme türü çivinin dirençli bölgeden sıyrılmasıdır. Aktif bloğu desteklemesi için var olan çivi kuvveti potansiyel kayma yüzeyinin arkasında kalan çivi uzunluğuna ve zeminle çivi arasındaki birim sıyrılma dayanımının sınırına bağlı olmaktadır. Bu tür göçmede dirençli bölgedeki sıyrılma dayanımı, çivinin gerilme dayanımından ve kaplama dayanımı/aktif bölgedeki sıyrılma dayanımından daha az olmaktadır.

Şekil 14(c)'de düşük gerilme dayanımı olan, uzun boylu donatılarla bir çivili duvar oluşturulmuş ancak kaplamanın dayanımı çok yüksek tutulmuştur. Bu uygulamada alın dayanımı aşılmadan veya dirençli bölgede sıyrılma oluşmadan önce çivide kopma gerçekleşmektedir.



Şekil 13. Zemin çivili şevnin şematik gösterimi (Barley vd., 1997).



Şekil 14. Zemin çivili duvarların olası göçme biçimleri (FHWA, 1998).

1.7.6.2. Çivi – Zemin Etkileşimi

Çivi ile zemin arasındaki temel etkileşim çivi-zemin arakesitinde zeminin kazı alanına doğru yaptığı hareket ve buna çivinin karşı koymak istemesi sonucunda oluşan kayma gerilmesi ile gerçekleşmektedir. Çivi boyunca gerilme ve ara kesitteki kaymanın dağılımı zeminin yükü boşaltma rijitliğine, ilk gerilme alanına, çivinin düşeydeki yerine, çivi boyuna, çivi eğimine, çivinin gerilme dayanımına ve zemin-çivi ara kesitinin rijitliğine bağlı olmaktadır. Zemin içindeki donatılandırılmış bir kesitin yerel dengesi, çivi boyunca gerilmede gözlenen değişim oranının birim boyda mobilize olmuş kayma kuvvetine bu noktada eşit olduğunu göstermektedir. Bu eşitlik (1)'de tanımlanmaktadır (Demirkoç, 2007).

$$\frac{\partial T}{\partial L} = \pi \times D \times \tau = Q \quad (1)$$

Bu eşitlikte:

$\partial T : \partial L$ boyunca çivi gerilmesindeki değişim

D : Çivi deliğinin dış çapı (çelik donatı ve enjeksiyon)

τ : Enjeksiyon – zemin ara kesitinde mobilize olmuş kayma gerilmesi

Q : Birim çivi boyunca mobilize olmuş kayma kuvveti (sıyırılma direnci)

Dayanım açısından çivi – zemin ara kesitindeki son sıyırılma direnci (birim boydaki kuvvet), zemin çivili sistemin davranışı için önemli bir parametredir. Son sıyırılma direnci, kontrol edilebilen bir değer olan çivi deliğinin çapına ve ara kesitte kayma olmadan önce oluşan kayma gerilmesine bağlıdır. Son sıyırılma direnci sadece zemin türünün bir fonksiyonu olmakla kalmayıp aynı zamanda çivinin yerleştirilme yöntemiyle de yakından ilgilidir (Demirkoç, 2007).

Son kenetlenmenin veya adhezyonun mobilizasyonu için çivi ile bitişiğindeki zemin arasında çok az bir yer değiştirme yeterli olacaktır. Son sıyırılma direncine ulaşmak için çok sayıda deney yapılmış ve bunlarda gerekli göreceli hareketin 1-2 mm mertebesinde olduğu ortaya çıkmıştır. Donatıların tendon kopmasını önleyecek kadar dayanıklı ve zemin – çivi son sıyırılma direncinin çivinin sıyırılmasını önleyecek kadar büyük olması yeterli değildir. Bununla birlikte donatı yüklerinin artı şekil değiştirmeler olmaksızın oluşması için çivi enjeksiyonu – zemin ara kesitinin de yeteri kadar sıkı olması gerekmektedir.

1.7.6.3. Çivi-Zemin-Kaplama Etkileşimi

Zemin çivili donatılandırma sistemlerinde her ne kadar yapısal anlamda bir kaplama kullanılsa da yapım kaplaması adı verilen ilk kat kaplama, kazı aşaması ve çivilerin yerleştirilmesinin ardından yapısal olarak çivilere bağlanmaktadır. Bu yüzden, kazı devam edip yanal şekil değiştirmeler meydana geldikçe zemin – kaplama ara kesitinde toprak basınçları ortaya çıkmaktadır. Oluşan bu basınçlar, çivi başlarında kendilerine eşit miktarda ancak zıt yönde oluşan gerilmeler tarafından dengelenmektedir. Çivi kafasında

oluşan gerilme yükünün büyüklüğü çivinin yerleştirilme zamanına, zeminin sıklık özelliklerine, çivinin gerilme dayanımına, zemin – çivi ara kesitinin rijitliğine, çivi enjeksiyonu – zemin ara kesitinin rijitliğine ve de kaplamanın rijitliğine bağlı olmaktadır.

Zemin çivisi tekniğinin belki de en çekici yönü, yapım kaplamasının diğer kaplama türlerine oranla daha basit olmasıdır. İnşaat yöntemi ve kaplamaya kadar çevresindeki zeminle tümüyle yapışık olan donatının varlığı aktif dayanma sistemlerindeki (ankrajlı) veya geleneksel dayanma yapılarındakinden daha az kaplama gerilmelerini oluşturmaktadır.

Kaplama tasarımı ve kaplamanın tüm zemin çivili sistemlere sağladığı katkının belirlenmesi;

- Servis yükü altında oluşan kaplama yükünün büyüklüğü,
- Dayanma yapısının ve son kaplamanın dayanımı,

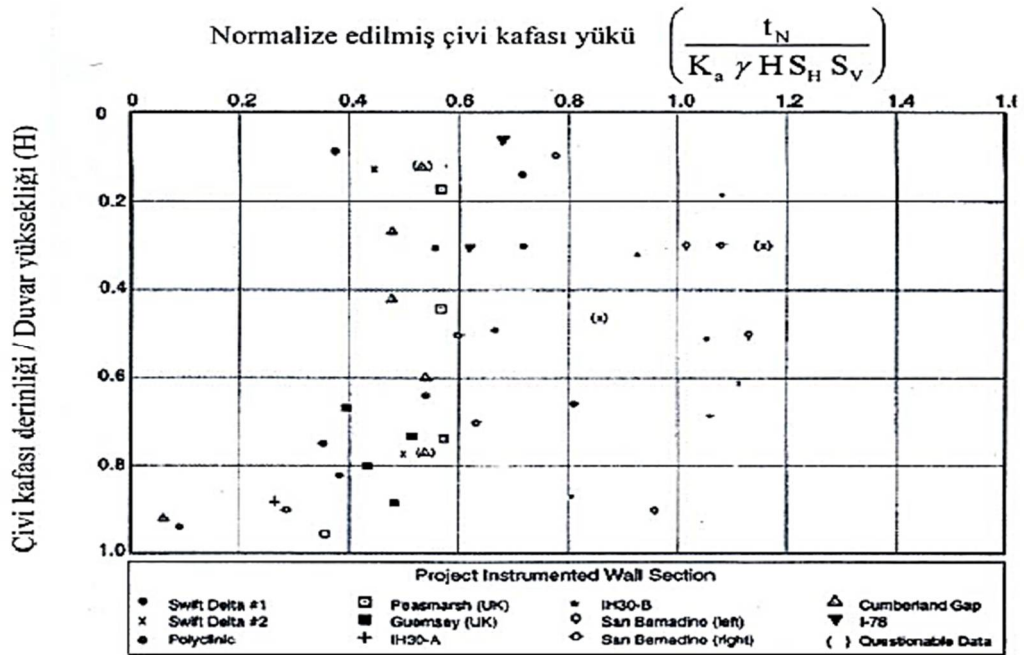
konularını kapsamaktadır (Demirkoç, 2007).

1.7.6.4. Çivi Yüklerinin Dağılımı

Şekil 13’de şev arkası yatay olan bir zemin çivili duvarda çivi yüklerinin dağılımı gösterilmektedir. Herhangi bir çivi boyunca maksimum çivi yükü genellikle orta noktada oluşmaktadır. Bu nokta herhangi bir geometri için duvardaki çivinin nerede olduğuna bağlı olarak değişmektedir. Düşeye yakın, şev arkası yatay olan duvarlarda donatılandırılmış bölgedeki maksimum gerilme çizgisi eğrisel olmakta ve duvar arkasından yüksekliğin yaklaşık % 30 – 35’i uzaklıkta yüzeyle kesişmektedir. Çivi boylarının, yüksekliğin % 70 – 100’ü kadar olduğu düşünülürse üstteki donatılandırılmış bölgede maksimum gerilmenin çivi boyunun ortalarında bir yerde oluştuğu söylenebilmektedir. Alttaki donatılandırılmış bölgelerde ise, zeminin şekil değiştirdiği bölge temel malzemesine oldukça yakın olmasından ötürü zorlandıkça maksimum gerilmenin oluştuğu nokta duvar arkasına doğru yaklaşmaktadır. Kaplama yüzündeki gerilme çoğunlukla maksimum çivi gerilmesinden az olmaktadır. Ayrıca çivi kafası yükünün maksimum yüke oranı, inşaat devam edip çivi yükleri gitgide artıkça azalma eğilimine girmektedir. Çivi gerilmeleri kazı işlemi sürdükçe ve çiviler yerleştirildikçe yavaş yavaş artmaktadır. İnşaat sırasında yapılan gözlemler çivi

gerilmelerinin büyük bölümü ilk üç kazı adımını ve bunları izleyen yerleştirme işlerinin ardından oluştuğunu göstermektedir. Daha alt kısımda yer alan çiviler duvarın tamamlanmasıyla birlikte daha az yüklenmiş olacaktır. Zira bu kesimlerde çivi gerilmesini mobilize edecek kayma kuvvetlerini (çivi – zemin ara kesitinde) oluşturacak zemin şekil değiştirmeleri yetersiz kalmaktadır. Duvarın tamamlanmasından sonra bütünüyle yük almayan en alt sıradaki çiviler ancak uzun zaman sonra zeminde oluşabilecek şekil değiştirmeler sonucunda yük alacaktır. Duvardaki çivi derinliğinin bir fonksiyonu olarak, ölçülen maksimum çivi yüklerinin (t_N) toplamı Şekil 15’de görülmektedir (FHWA, 1998).

Şekil 15’de zeminin birim hacim ağırlığı (γ), çivinin düşey ve yataydaki yeri, duvar yüksekliği (H) ve aktif toprak basıncı katsayısı (K_a) gözönüne alınarak çivi yükü normalize edilmiştir. Aktif toprak basıncı katsayısı, soruna uygun bir şekilde geometri ve sınırlandırılmış yük şartları ile duvar tasarımcısı tarafından belirtilen zeminin içsel sürtünme açısı doğrultusunda hesaplanmıştır. Şekil 15’e bakıldığında maksimum çivi yükünün donatılandırılmış bölgedeki derinliğin bir fonksiyonu olduğu görülmektedir. Duvar yüksekliğinin üst 2/3 – 3/4’lük kısmında maksimum çivi yükü derinlikle neredeyse sabit görülmekteyken, normalize edilmiş çivi yükü $\left(\frac{t_N}{\gamma \times H \times K_a \times S_H \times S_V} \right)$ 0.4 ila 1.0’ın üzerinde bir aralıkta değişmektedir (FHWA, 1998).

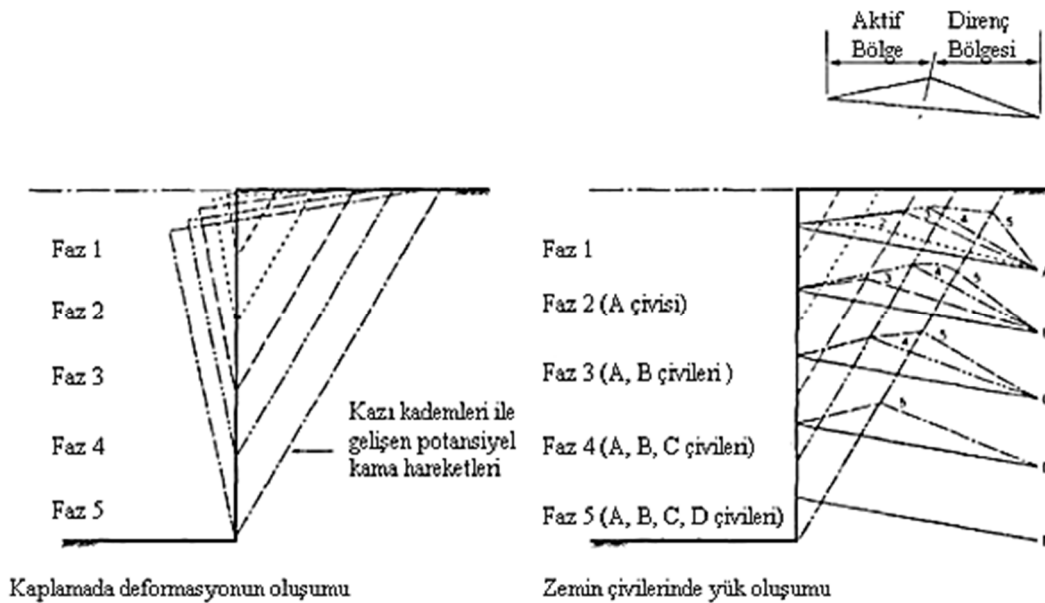


Şekil 15. Normalize edilmiş ölçülen maksimum çivi yükleri (FHWA, 1998).

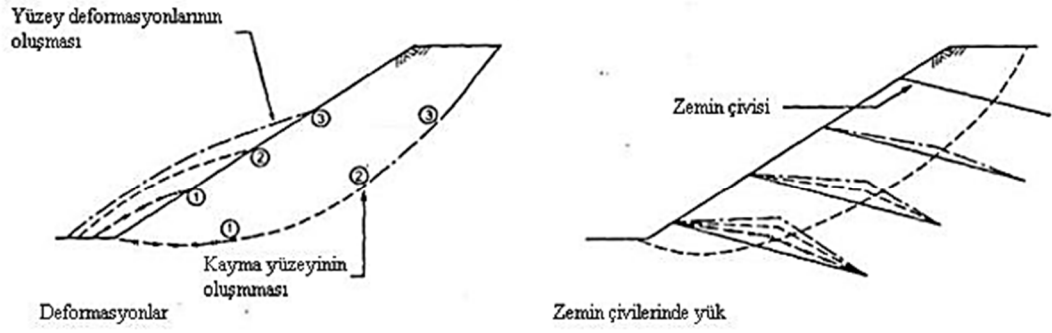
Normaliz edilmiş maksimum yükteki bu geniş değişim aralığı, büyük olasılıkla doğal çeşitliliğin bir göstergesi olmaktadır. Tasarımcılar tarafından kabul edilip kullanılan olası yanlış zemin dayanımı parametreleriyle birlikte enjeksiyonun karşıladığı yükün tahmininde kullanılan kapsamlı malzeme verilerine ve büyük ölçüde basitleştirilmiş modellere özgü yanlışlar da bu değişim aralığına etki etmektedir. Ortalama normalize edilmiş maksimum çivi yükü duvarın üst kısımları için 0.75 dolaylarında olmaktadır.

Duvarın yükseklik bakımından alttan 1/4 – 1/3' lük kısmında maksimum çivi yükü belirgin ölçüde azalmakta ve duvarın üst kısmında yukarıda belirtilen maksimum değerini alıp duvar tabanına doğru sıfır değerini alan bir eğri çizmektedir (FHWA, 1998).

Şekil 16 ve Şekil 17'de yük oluşumu ve deformasyonlar gösterilmektedir.



Şekil 16. Dik bir şevin inşaatı süresince kazı aşamalarında zemin çivilerinde oluşan çekme kuvvetleri ve deformasyonun gelişimi (Pedley vd., 1990).



Şekil 17. Zemin çivisi ile güçlendirilmiş mevcut şevlerde deformasyon oluşumu ve yüklerin mobilize olması (Phear vd., 2005).

Çivi yükleri gerilme rozeti ile Tablo 1’de belirtilmiş çeşitli uygulamalarda yapılan gözlemlerden yararlanılarak tahmin edilmiştir.

Tablo 1. Gözlemlenmiş zemin çivili duvarların özellikleri (FHWA, 1998).

	Swift Delta Station-1	Swift Delta Station-1	Polyclinic	Peasmarsh	Guernsey
Yükseklik(m)	5.3	5.6	16.8	11	20
Alın eğimi(°)	0	0	0	20	30
Arka eğim(°)	55 kN/m ² sürşarj	27	0	0	0
Kaplama türü	Püskürtme beton	Püskürtme beton	Püskürtme beton	Geogrid	Geogrid
Çivi boyu(m)	6.4	5.2	10.7	6-7	10
Çivi eğimi(°)	15	15	15	20	20
Çelik çapı (mm)	29	29	36	25	25
Aralık,H×V (m)	1.4×1.0	1.4×1.0	1.8×1.8	1.5×1.5	1.5×1.25

1.7.6.5. Kaplama Yükünün Büyüklüğü ve Dağılımı

Saha gözlemlerinden elde edilen verilerdeki kalitenin azlığı nedeniyle; kaplamaya gelen yükün büyüklüğü hakkındaki bilgiler, çivinin kendisinde oluşan yük hakkındaki bilgilerden daha az olmaktadır. Çivi kafasına gelen yükün bulunmasına en güvenilir yöntem çivinin kafasında yük hücresi kullanılmasıdır (Demirkoç, 2007).

1.7.6.6. Şekil Değiştirme Davranışı

Zemin çivili duvarın üstten alta doğru inşaatı sırasında donatılan bölge, duvarın topuk kısmında çivideki gerilme yüklerinin mobilize olmasından ötürü dışarı doğru dönmek istemektedir. Bu nedenle maksimum yatay hareketler duvarın en üst noktasında olur ve topuğa inildikçe belirgin şekilde azalmaktadır. Kaplamadaki yer değiştirmeler aşağıdaki etkenlere bağlıdır:

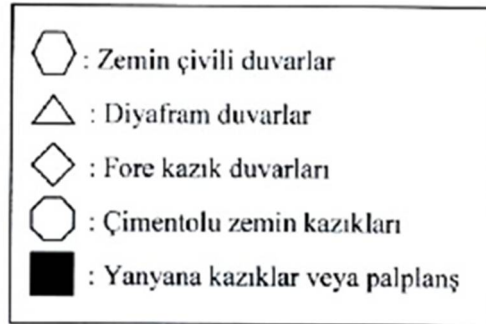
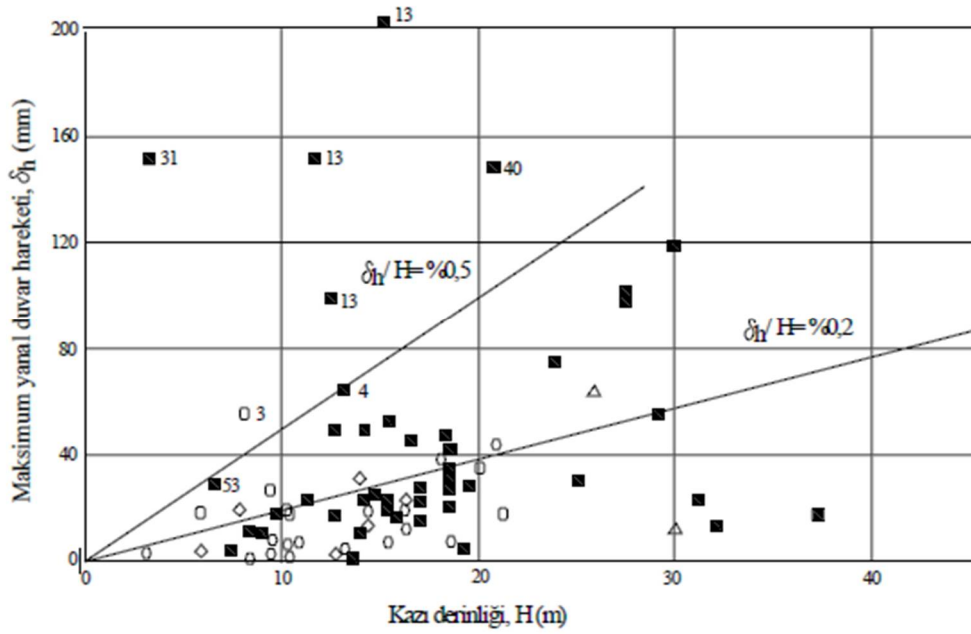
- Kazı derinliği
- Çivi aralıkları ve kazı yüksekliği
- Çivi ve zemin esnekliği
- Genel güvenlik sayısı
- Çivi eğimi (Donatı etkisinin daha az verimli olması yüzünden büyük açılarda büyük şekil değiştirmeler yaşanır)
- Temel zemininin taşıma gücü
- Sürşarj yüklerinin büyüklüğü

Çivi boyu/Duvar yüksekliği oranı kullanılan düşey zemin çivili duvarlar, göz ardı edilmeyen sürşarj yükleri ve mantıklı bir güvenlik sayısı ile yapılan tasarımlar için pik duvar yer değiştirmesi en üst noktada aşağıdaki değerleri alabilmektedir:

- Aşınmış kaya ve sıkı zeminlerde duvar yüksekliğinin (H) % 0,1'i veya daha azı
- Granüler zeminlerde duvar yüksekliğinin (H) % 0,2'si
- İnce daneli killi zeminlerde duvar yüksekliğinin (H) % 0,4'ü

Zemin çivili duvarlarda gözlenen yer değiştirmeler diğer dayanma yapılarındakilerle karşılaştırılmış ve Şekil 18'deki sonuçlar elde edilmiştir.

İnşaat sonrası duvar yer değiştirmesi için yapılan gözlemler devam eden hareketlerin zemin cinsine bağlı olarak zamanla oluşabileceğini ve özellikle duvar tabanına yakın çivilerde ek gerilmeler doğabileceğini göstermiştir. Birçok örnekte, çivilerde devam eden birim şekil değiştirmenin aslında çivi yükünün krip görülen enjeksiyon halkasından çelik tendona doğru yeniden dağılması ile yakından ilgili olduğu eğim ölçer ölçümleri sonucunda ortaya çıkmıştır (Demirkoç, 2007).



Şekil 18. Katı killer, rezidüel zeminler ve kumlar için arazide duvarda gözlemlenmiş maksimum yanal hareketler (FHWA, 1998).

1.7.6.7. Çivi Eğilmesi ve Kaymanın Rolü

Servis yükü koşullarında, çiviler kendi gerilmelerini çivi – zemin ara kesitinde oluşan kayma gerilmeleri yoluyla yaratmaktadır. Yanal yüklü çivi altındaki pasif taşıma basıncının mobilizasyonu için gerekli minimum yer değiştirme, enjeksiyon – zemin arasındaki son adhezyonun mobilizasyonu için gerekli minimum yer değiştirmeden daha büyük olmaktadır. Bu nedenle çivilerin kayma ve eğilmesi tasarım için önemli sayılmamaktadır.

Yaklaşık 100 mm kalınlığında püskürtme betondan oluşan kaplamaların kullanıldığı zemin çivili uygulamalarda, çiviler kaplamanın kendi ağırlığını kaplama-zemin-taşıyıcı plaka arasındaki bir sürtünme birlikteliği yardımıyla tekil çivilerin çevresindeki zemine karşı destekleyebilmektedir. Daha kalın püskürtme betonlu kaplamalar için (kalıcı çivili uygulamalarda) daha olumsuz zemin koşullarında kaplamanın kendi ağırlığının çiviler tarafından duvarda aşağı ve dışarı doğru bir hareket gerçekleşmeden karşılanması olanaksızdır. Bu durumlarda destek çivisi veya zemin dikişi kullanılarak ek düşey destek sağlanabilmektedir. Destek çivileri kısa boyda ve yatayla büyük açı yapan çiviler olup, sıkışma sırasında çalışmaları için başlangıç çivilerinin arasına yerleştirilmektedir. Zemin dikişleri ise kısa tamamlayıcı çiviler olup, kayma ve eğilmede rol oynayarak kaplamaya ek düşey destek sağlamaktadır (Demirkoç, 2007).

1.7.6.8. Limit Denge Analizi ile Tasarım

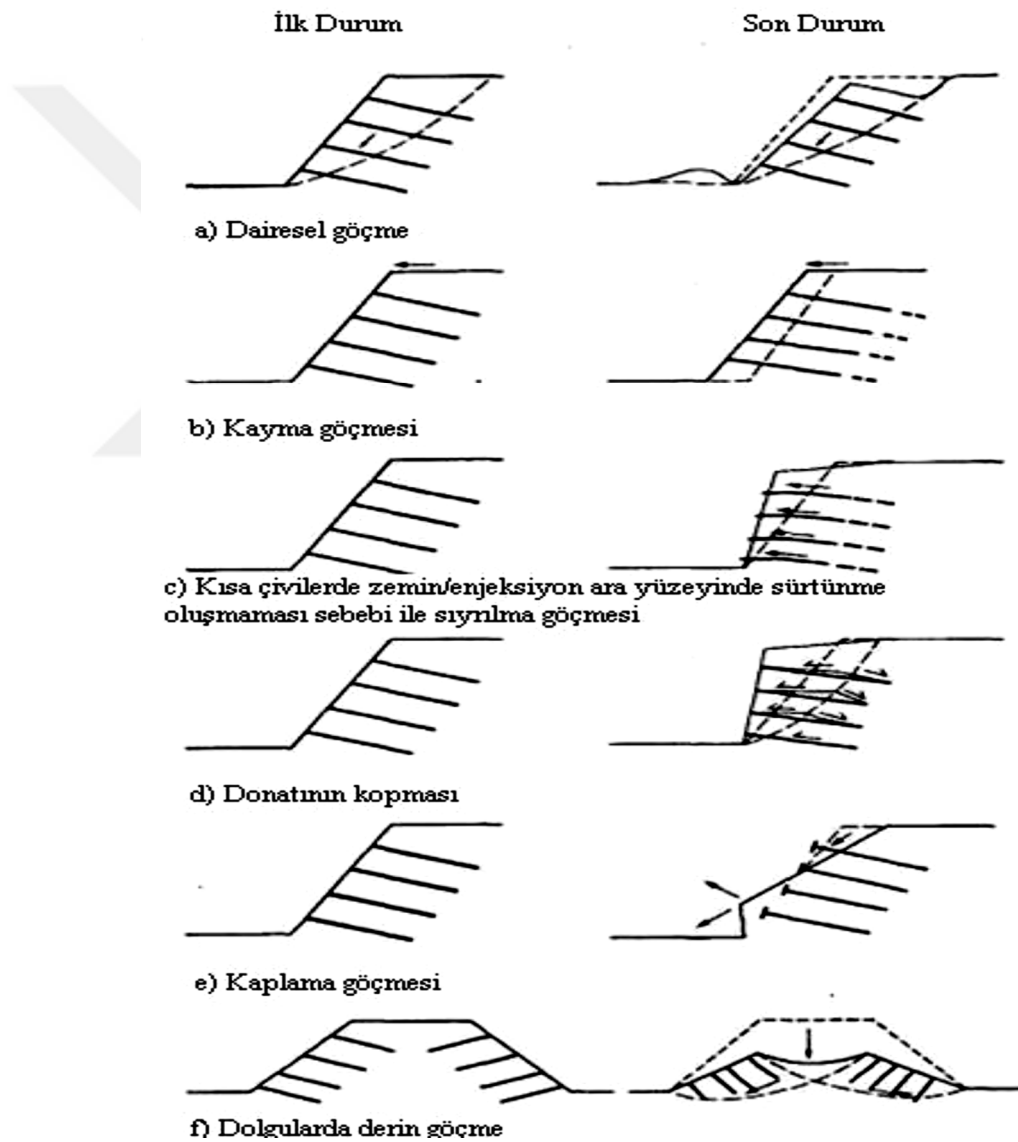
Zemin çivili bir şev ya da duvar performans kriterlerini karşılayamadığı durumda limit denge durumuna ulaştığı kabul edilmektedir. Bir çok dayanım sınır durumu ve servis sınır durumu tasarım aşamasında düşünülmekte ve bunların oluşması önlenmektedir. Zemin çivili duvar ve şevlerin deformasyonlarını tasarım aşamasında belirlemek güç olmaktadır. Yeterli güvenlik faktörlerinin uygulandığı durumda ve uygun imalat yapılması durumunda deformasyonların güvenli sınırlar içerisinde kalacaktır (Cesur, 2010).

1.7.6.8.1. Dayanım Sınır Durumu

Dayanım sınır durumu zemin çivili sistemde ya da sistemin temel elemanlarında göçme oluşabilmesi durumu olarak açıklanabilmektedir. Ayrıca iksa sistemi ile desteklenen diğer yapıların durumu değerlendirilmelidir.

Tasarım ön deformasyonların oluşmasına izin vermeyen ani gelişebilecek gevrek göçmeyi engelleyecek şekilde olmalıdır. İksa sistemi göçmenin oluşabileceğini belirten işaretleri verecek yeterli süneklığe sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır.

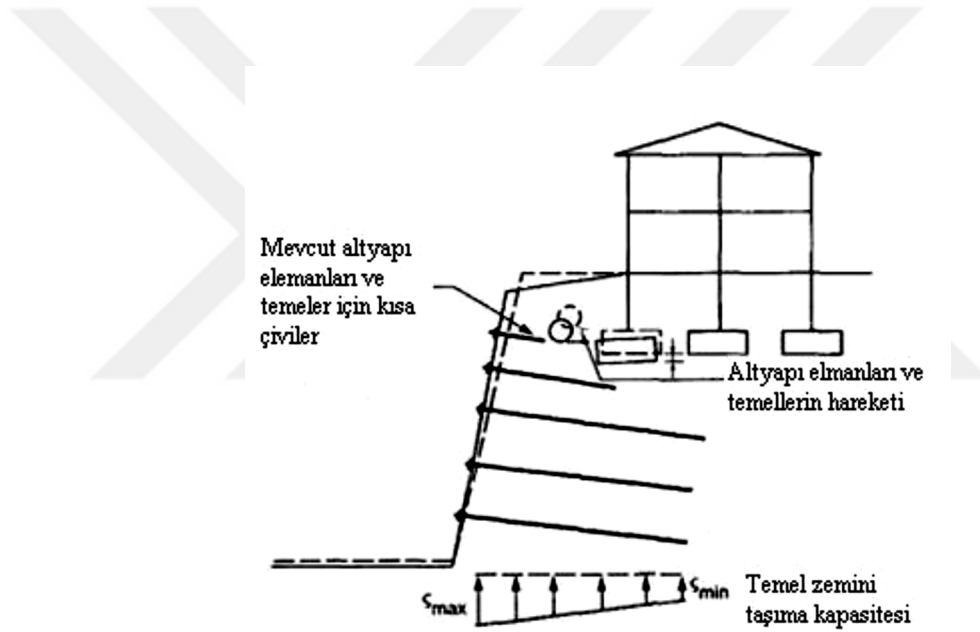
Zemin çivili şev ve duvarlar için dayanım sınır durumunun gösterildiği durum Şekil 19'da verilmektedir. Her kademedede dış stabilite kayıpları dönme, kayma ve temel taşıma gücü göçmeleridir. İç stabilite kayıpları zemin/çivi arayüzünde sıyrılmaya oluşması, zemin çivisinin kopması, kaplamanın devrilmesi, kaplamada eğilme ya da zımbalama oluşması, çivi başlık plakalarında zımbalama ve taşıma gücü göçmeleridir.



Şekil 19. Zemin çivili duvarlar için dayanım sınır durumunun şematik gösterimi (Phear vd., 2005).

1.7.6.8.2. Servis Sınır Durumu

Zemin çivili şev ya da duvarda meydana gelen aşırı deformasyon sonucu sistemin servis durumunda oluşan kayıplara denilmektedir. Ayrıca iksa sistemi ile desteklenen diğer yapıların durumu değerlendirilmelidir. Tasarım süresi servis koşullarının karşılandığı zaman aralığı olmaktadır. Genel servis sınır durumları Şekil 20’de gösterilmektedir. Aşırı gerilme veya deformasyon sonucu kaplamada meydana gelen çatlamlar gibi görsel sorunlara sebep olabilmektedir. Ayrıca şev üzerinde yada altında toplam ya da farklı oturmalara sebep olarak çevre binaların ya da altyapıların servis durumunu etkileyecek öngörülemez sorunlara sebep olabilmektedir (Cesur, 2010).



Şekil 20. Zemin çivili duvarlarda servis sınır durumunun şematik gösterimi (Phear vd., 2010).

1.7.6.9. Genel Gereklilikler ve Güvenlik Katsayıları

Genel şev stabilite ve istinat duvarları yöntemleri eşdeğer yayılı zemin yüküne karşılık dayanacak kuvvetin oluşturulmasına dayanmaktadır. Zemin çivili duvar sistemlerinde karşı koyan kuvvet karşı koyan bölge içinde zemin mukavemetine bağlı olarak mobilize olmuş çivi çekme kuvvetlerinin toplamı olmaktadır. Karşı koyan kuvvetlerin mobilize olması için gerekli hareket genellikle dikkate alınmamaktadır. Bu

yaklaşım basit güvenlik katsayısı tanımına dayanmakta ve karşı koyan kuvvet ya da momentlerin yayılı kuvvet ya da momentlere oranı olarak tanımlanmaktadır (Cesur, 2010).

1.8. Zemin Çivili Duvar Tasarım Esasları

1.8.1. Giriş

‘FHWA – Zemin Çivili Duvar Tasarımı Yöntemi’ ile önerilen tasarım yöntemi, tam ve gerçekçi bir yaklaşım sağlamaktadır. Bu yöntemin esasları aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- Kayma yüzeyi sınırlı denge kavramına dayanmaktadır.
- Çivinin donatı etkisi gözönünde bulundurulur. Çivi kafasının kaplamayla bağlantısı, tendonun kendi dayanımı ve zemin-enjeksiyon ara kesitindeki sıyrılma direnci gözönüne alınmaktadır.
- Kaplamanın ve çivi/kaplama bağlantı sisteminin nominal dayanımının belirlenmesinde gerçekçi bir yaklaşım sergilenmektedir.
- Varolan yapıların gözlemi ve zemin-yapı arasındaki etkileşimine dayanılarak kaplama ve çivi kafası sistemlerinde kullanılan tasarım toprak basınçları önerilmektedir.
- ‘Servis Yüğü Tasarımı’ (SLD) ile ‘Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı’ (LRFD) olarak iki ayrı tasarım olanağı sunulmaktadır.
- SLD’de; zemin dayanımına uygulanması önerilen güvenlik katsayılarıyla birlikte izin verilebilen tendon yükü, çivi kafası sistemi ve sıyrılma direnci elde edilmektedir.
- LRFD’de; tendon, çivi kafası, sıyrılma direnci ve zemin dayanımı için önerilen tasarım dayanımlarını (nominal veya son dayanıma uygulanacak olan direnç faktörleri) ve yük faktörlerini vermektedir. Bu öneriler kritik yapılar ve geçici yapıım koşulları için hem olağan servis yükü hem de aşırı (sismik) yük açısından ayrı ayrı getirilmiştir.
- Duraylılık ve sınır duvar şekil değiştirmelerini sağlamak amacıyla yerleştirilen çelik donatının uygun bir şekilde dağıtılmasını sağlamaktadır.

- Kaplama ve tüm çivili duvar yapısında kullanılan donatının ayrıntılarını tanımlamaktadır.
- Zemin çivilerinin ve duvar kaplamasının zemin çivili duvar sistemi olarak birleştirilip tasarımı yapılmaktadır.

1.8.2. Tasarım Yaklaşımları

Zemin çivili duvarların tasarımında yaygın olarak limit denge analizlerine dayanan Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı (LRFD) ve Servis Yüğü Tasarımı (SLD) yöntemleri kullanılmaktadır.

1.8.2.1. Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı (LRFD)

Dayanım sınır durumu gözönüne alınarak zemine ve zemin çivisine ait tasarım dayanımlarının uygulanan yüklerden fazla olması şartı sağlanmaktadır. Bu dayanım değerleri, yüklerin kesinliliğinin derecesine uygun olarak yük faktörleri ile çarpılmaktadır. Gerçek dayanımlardaki değişkenliği anlatmak amacıyla tasarım dayanımları, nominal ve son dayanımlara belirli direnç faktörleri uygulanarak belirlenmektedir. Çivilerin direnç kapasiteleri hem yapısal (tendonun tasarım dayanımı) hem de geoteknik (tasarım sıyrıлма direnci) açıdan belirlenmektedir. Zeminin direnç kapasitesi de son zemin dayanımına bir direnç faktörü uygulanarak belirlenmektedir. Servis sınır durumu ise duvarın, donatılandırılmış ve desteklenmiş zeminin genel yer değiştirmesi ile araştırılmaktadır.

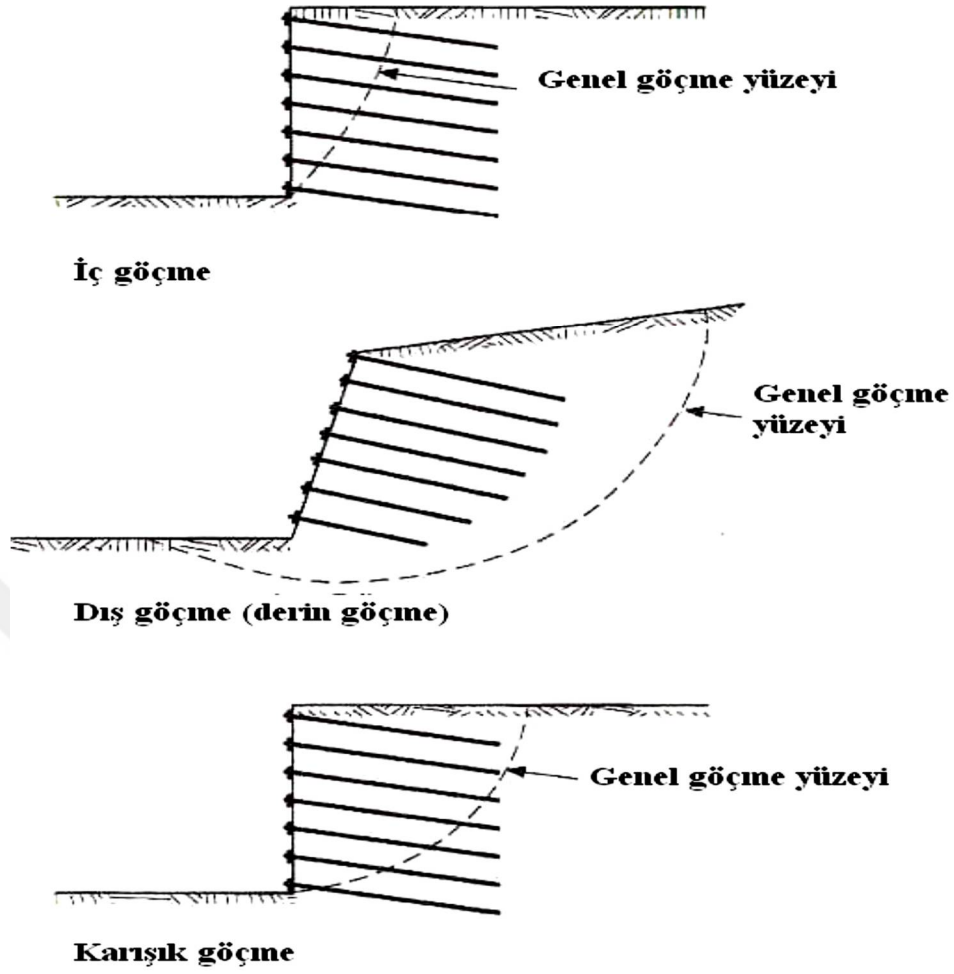
1.8.2.2. Servis Yüğü Tasarımı (SLD)

Genel olarak Yük ve Direnç Faktörü Tasarım yöntemi ile benzer bir yöntemdir. İzin verilen çivi yükünün ve azaltılmış zemin dayanımının uygulanan yükten fazla olmasını gerektirmektedir. İzin verilen çivi yükleri hem yapısal (izin verilen tendon gerilmesi yükü) hem de geoteknik (izin verilen sıyrıлма direnci) açıdan belirlenmektedir. Azaltılmış zemin dayanımı son zemin dayanımına bir güvenlik sayısı uygulanarak belirlenmektedir. Servis sınır durumu LRFD'de olduğu gibi duvarın, donatılandırılmış ve desteklenmiş zeminin genel yer değiştirmesi ile araştırılmaktadır.

1.8.3. Zemin Çivili Duvarın Duraylılığı

Zemin çivili bir dayanma yapısında dayanım sınır durumunu belirlemek için tüm göçme biçimlerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu göçme biçimleri; dış göçme biçimleri (donatılarla özellikle kesişmeyen), iç göçme biçimleri (donatı tendonlarının, kaplamanın veya her ikisinin birden göçmesi), karışık göçme biçimleri (donatılanmış bölgedeki içsel göçme) olarak adlandırılmaktadır. İç ve karışık göçme biçimlerinde çivinin akması veya kopması, sıyrılması, duvar kaplamasının veya duvarın çiviye olan bağlantısının göçmesi gözden geçirilmelidir.

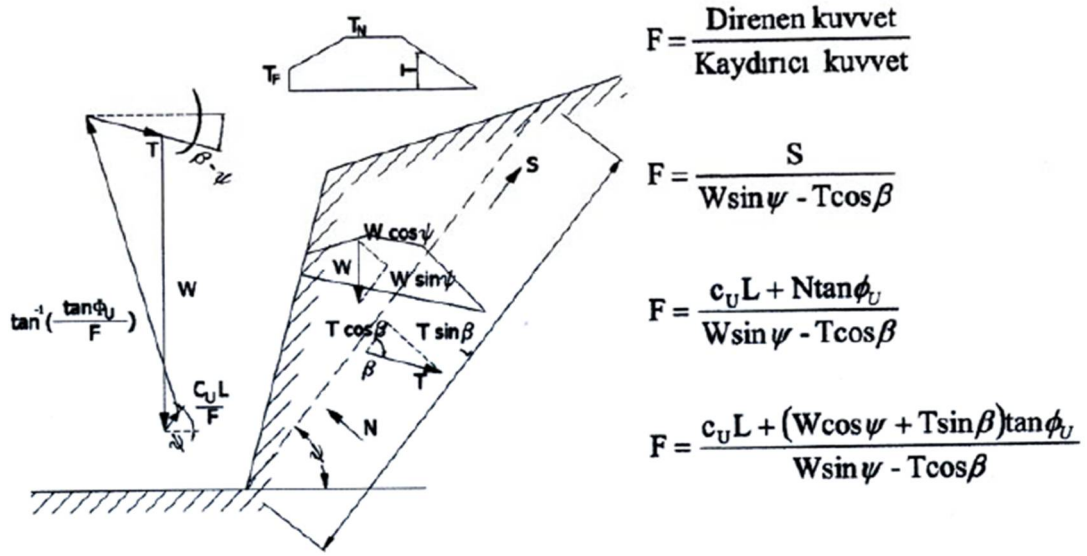
Kazı sırasında yarma alnının yerel duraylılığı, zemin çivili duvarların yapımında özen gösterilmesi gereken önemli noktalardan biri olmaktadır. Bu göçme biçimi geleneksel duraylılık araştırmasından bağımsız olmakla birlikte, tasarım sırasında arazi deney kazısı yardımıyla belirlenebilmektedir. Bilindiği gibi bu arazi deneyinde alnın çivi yerleştirilmesi ve yapım kaplamasının hazırlanmasına ne kadar süre izin vereceği araştırılmaktadır. Alındaki yerel ayrılmalar çok ani olabilir ve bu gibi durumlara sığ derinliklerde yaygın olarak rastlanmaktadır. Nedeni ise, gevşek dolgu veya çevre koşullarından etkilenmiş malzemelerle bu tür bölgelerde daha çok karşılaşılmıştır (FHWA, 1998).



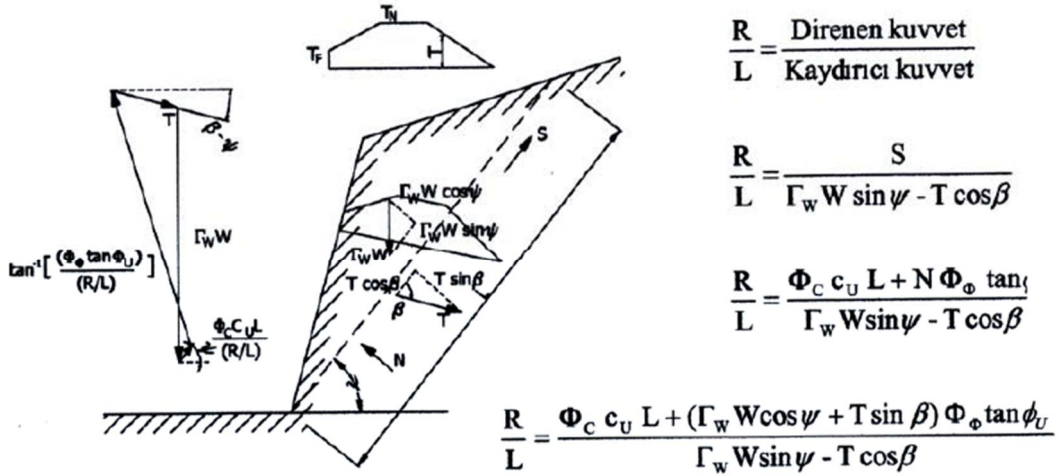
Şekil 21. Zemin çivili duvarlarda araştırılacak olası göçme biçimleri (FHWA,1998).

1.8.3.1. Tasarımın Temel Kavramları

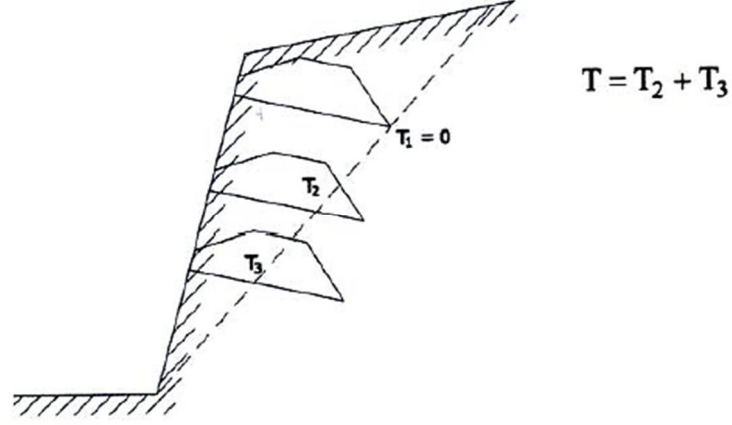
Zemin çivili duvarın sınır durumu tasarımı için yapılan sınır denge yaklaşımı tekil donatılı durum için Şekil 22 ve Şekil 23'te, çoğul donatılı durum için Şekil 24'de gösterilmektedir.



Şekil 22. SLD ile zemin çivisi tasarımı, tek donatılı şev (FHWA,1998).



Şekil 23. LRFD ile zemin çivisi tasarımı, tekil donatılı şev (FHWA, 1998).



Şekil 24. SLD ve LRFD ile zemin çivisi tasarımı, çoğul donatılı şev (FHWA, 1998).

Yöntem, karşı koyan kuvvetlerin, kaydırıcı kuvvetlere oranının genel bir güvenlik sayısı olarak alındığı bir olası düzlemsel kayma yüzeyinde denenmiştir. Şekil 22’ de tekil zemin çivili bir şev görülmektedir. Çivinin amacı, güvenlik sayısını veya kayan bloktaki duraylılığı artırmaktır. Genel güvenlik sayısı serbest kütle diyagramından veya kuvvetler poligonundan türetilerek bulunabilmektedir. Donatılandırmanın etkisi;

- normal kuvveti, dolayısıyla granüler zeminlerde kayma yüzeyi boyunca kayma direncini artırarak
- hem granüler ve hem de kohezyonlu zeminlerde kayma yüzeyi boyunca kaydırıcı kuvvetleri azaltarak duraylılığı artırmaktır.

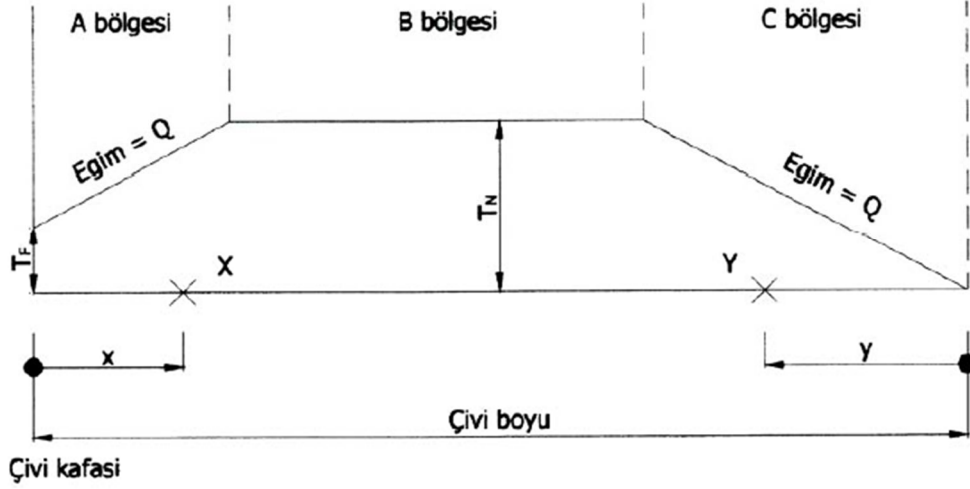
SLD için kullanılan terimler :

- W : Servis yükü
- c_U : Zeminin drenajsız kayma mukavemeti, drenajlı durumda zeminin kohezyonu
- ϕ_U : Zemin danelerinin içsel sürtünme açısı
- F : Zeminin kayma dayanımı için genel güvenlik sayısı
- T_{FN} : Nominal çivi kafası dayanımı
- $T_F = \alpha_F \times T_{FN}$: İzin verilebilir çivi kafası yükü
- $T_N = \alpha_N \times T_{NN}$: İzin verilebilir çivi tendonu yükü

- Q_U : Son sıyrılma direnci
- $Q_d = \alpha_Q \times Q_u$: İzin verilebilir sıyrılma direnci
- T : İzin verilebilir çivi yükü
- S : Direnen kayma kuvveti
- N : Normal kuvvet

LRFD için kullanılan terimler:

- W : Servis yükü
- Γ_W : Yük faktörü
- c_U : Zeminin drenajsız kayma mukavemeti, drenajlı durumda zeminin kohezyonu
- ϕ_U : Zemin danelerinin içsel sürtünme açısı
- Φ_C : Kohezyon direnç faktörü
- Φ_ϕ : İçsel sürtünme açısı direnç faktörü
- $c = \Phi_C \times c_U$: Zeminin tasarım kohezyonu
- $\emptyset = \tan^{-1} (\Phi_\phi \times \tan\phi_U)$: Zemin danelerinin tasarım içsel sürtünme açısı
- R/L : Genel direncin yüke oranı
- T_{FN} : Nominal çivi kafa dayanımı
- Φ_F : Çivi kafası direnç faktörü
- $T_F = \Phi_F \times T_{FN}$: Tasarım çivi kafası dayanımı
- T_{NN} : Nominal çivi tendonu dayanımı
- Φ_N : Çivi tendonu direnç faktörü
- $T_N = \Phi_N \times T_{NN}$: Tasarım çivi tendonu dayanımı
- Q_U : Son sıyrılma direnci
- Φ_Q : Sıyrılma direnci faktörü
- $Q_d = \Phi_Q \times Q_u$: Tasarım sıyrılma direnci
- T : İzin verilebilir çivi yükü
- S : Direnen kayma kuvveti
- N : Normal kuvvet



Şekil 25. Çivi destek diyagramı (FHWA,1998).

Şekil 25' te çivi dayanım diyagramının şekli görülmektedir. Herhangi bir kayma kaması için çivinin donatılandırmaya katkısı ilgili kayma yüzeyiyle çivinin kesişme noktasının bir fonksiyonudur. Çivi dayanımı tendondaki gerilme göçmesi, çivi sıyrılması veya kaplama/çivi kafası bağlantı sistemindeki yapısal göçme ile sınırlandırılmış olabilir. Kayan bloğun duraylılığında herhangi bir çivinin en az çivi gerilme dayanımı kadar veya kayma yüzeyinin ardındaki boyun sıyrılma direnci kadar ya da çivi kafası dayanımı ve kayma yüzeyi ile duvar arasındaki boyda oluşan sıyrılma dayanımı kadar katkısı olmalıdır.

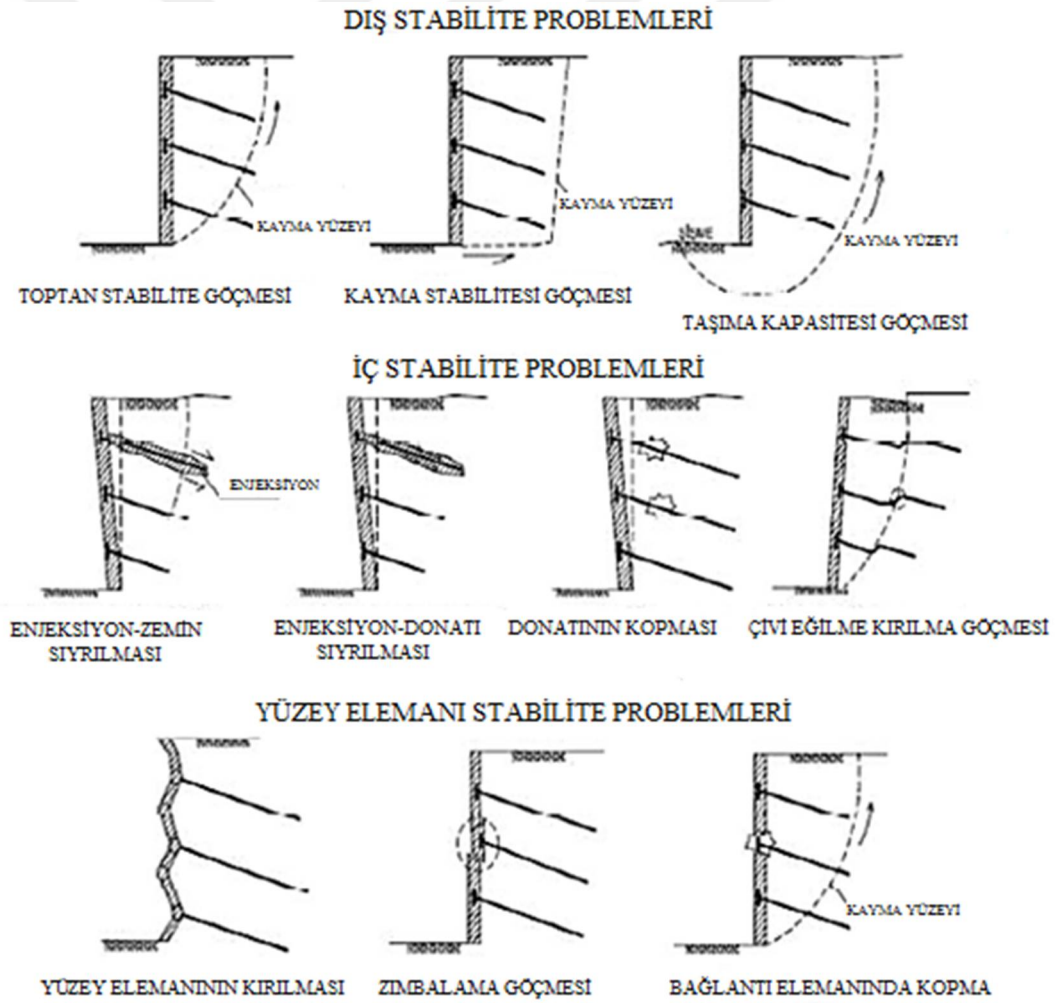
Şekil 25' te A bölgesinde X gibi bir noktada kayma yüzeyi ile kesişen bir çivinin desteği $X = (T_F + Qx)$ olacaktır. B bölgesi için $B = T_N$ ve C bölgesindeki Y noktası için de $Y = (Qy)$ olacaktır. T_F çivi kafası kaplama bağlantısının dayanımı olup, SLD için izin verilebilir çivi kafa yükü; LRFD için de tasarım çivi kafa dayanımı olarak tanımlanmaktadır. T_N çivi tendonu gerilme dayanımı olup, SLD için izin verilebilir çivi tendon yükü; LRFD için de tasarım çivi tendon dayanımı olarak tanımlanmaktadır. Q ise çivi – zemin sıyrılma direnci olup, SLD için izin verilebilir sıyrılma direnci; LRFD için de tasarım sıyrılma direnci olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 24'de belirli bir kayma yüzeyi için en üstteki çivi kayma yüzeyi ile kesişmediğinden bloğun duraylılığına herhangi bir katkı sağlayamamaktadır. Ancak en üstteki çivi daha sığ kayma yüzeyleri için katkıda bulunacaktır. Ortadaki çivi T_2 desteğini

sağlarken, bu değer kayma yüzeyi arkasında kalan çivi boyunun sıyrılma direncine eşit olmaktadır. En alttaki çivi T_3 desteğini sağlamakta ve bu T_3 değeri de çivi kafası dayanımıyla birlikte kayma yüzeyi ile kaplama arasındaki çivi boyunca elde edilen sıyrılma direncine eşit olmaktadır.

1.8.3.2. Zemin Çivili Duvar Stabilite Analizleri

Zemin çivili iksa sistemlerinde stabilite analizleri, iç stabilite, dış stabilite ve yüzey elemanı stabilite analizleri olmak üzere üç başlık altında incelenmektedir. Şekil 26' da zemin çivili duvarlarda meydana gelebilecek stabilite problemleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 26. Zemin çivili duvar stabilite problemleri (FHWA, 2003).

1.8.3.2.1. İç Stabilité Analizleri

Zemin çivili duvarın iç stabilitesi, zemin, çivi ve enjeksiyon arasındaki yük aktarım mekanizması ile ilişkilidir. İç stabilite analizlerinde, enjeksiyon-zemin bağ mukavemeti, enjeksiyon-donatı bağ mukavemeti ve donatının gerilme dayanımı incelenmektedir. Ayrıca deplasmanların beklenenin üzerinde olması durumu göz önünde bulundurularak kayma/eğilme etkisi ile oluşacak gerilmelerin de kontrol edilmesi gerekmektedir. Bazı araştırmacılar, çivinin kayma/eğilme dayanımının toplam stabiliteye %10' dan daha fazla bir katkı sağlamadığı görüşündedirler, bununla birlikte iç stabilite analizleri daha çok çivinin gerilme ve sıyırılma dayanımları üzerinde yoğunlaşmaktadır (FHWA, 2003).

1.8.3.2.1.1. Enjeksiyon – Zemin Bağ Mukavemeti

Enjeksiyon-zemin bağ mukavemeti, enjeksiyonlanmış zemin çivisinin, zeminden sıyırılma kapasitesi ile ilişkilidir. Bu tip bir göçme durumu, ya çivinin yeterli sıyırılma dayanımı göstermemesi ya da yeterli çivi boyunun olmaması sonucu meydana gelmektedir. Sıyırılma kapasitesi, zemin ile enjeksiyon ara yüzündeki adezyona bağlı olmaktadır. Önceki bölümlerde çivi-zemin etkileşimi başlığı altında incelendiği üzere, zemin özellikleri, delgi metodu ve enjeksiyonun niteliği adezyonu etkileyen faktörler arasındadır. Sıyırılma kapasitesi, T_{maks} , çivinin maksimum adezyona ulaştığında sahip olduğu değerdir.

$$T_{maks} = Q_u \times L_p \quad (2)$$

$$Q_u = \pi \times q_u \times D \quad (3)$$

Denklem (2) ve (3)' de yer alan;

Q_u : Birim boydaki çekme kapasitesi

q_u : Maksimum bağ mukavemeti

L_p : Çivi sıyırılma boyu

D : Delgi çapı

şeklinde ifade edilmiştir. Tasarımda, emniyetli sıyırılma dayanımının belirlenmesi için maksimum adezyona ya da hesaplanan sıyırılma kapasitesine güvenlik katsayısı uygulamak

gerekmektedir. Genel olarak minimum güvenlik faktörü 2 olmak üzere güvenli sıyırılma kapasitesi denklem (4) ve (5)' te verildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$q_{all} = \frac{q_u}{GS} \quad (4)$$

$$T_{all} = \frac{T_{maks}}{GS} \quad (5)$$

1.8.3.2.1.2. Enjeksiyon - Donatı Bağ Mukavemeti

Birim çivi boyundaki yük açısından değerlendirildiğinde, enjeksiyon – donatı arasındaki bağ mukavemeti, zemin – enjeksiyon arasındaki bağ mukavemetinden daha büyük olmaktadır. Zemin çivisi uygulamalarında, uygun enjeksiyon karışımı ve uygulama tekniği gerçekleştirildiği sürece enjeksiyon ile donatı arasındaki bağ mukavemetinin kritik olmadığı söylenebilmektedir. En kritik durumda donatının enjeksiyonun içinden sıyırılması şeklinde sonuçlanır ki bu pek karşılaşılan bir durum olmamaktadır. Uygulama öncesi donatının havayla teması sonucu oluşan pas tozlarının enjeksiyon – donatı bağ mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi yoktur (FHWA, 1998).

1.8.3.2.1.3. Donatının Gerilme Dayanımı

Uygulanan çivi yükünün, donatının yapısal dayanımından daha büyük olması durumunda, demir donatıda akma ve beraberinde kopma meydana gelmektedir. Donatının gerilme dayanımı sistemi göçmeye zorlayan çok sayıda deneysel çalışmaya konu olmuştur. Zemin çivili sistemlerde, çivinin zeminden sıyırılma kapasitesinin deneysel olarak modellenmesi ise daha zordur. Donatının gerilme dayanımı denklem 6' da verildiği üzere belirlenebilmektedir.

$$R_T = \frac{A_t}{F_y} \quad (6)$$

β : Şev açısı

Φ' : Zeminin efektif içsel sürtünme açısı

c' : Zeminin efektif kohezyonu

ψ : Kayma yüzeyi eğimi

i : Çivi eğimi

L_F : Kayma yüzeyi uzunluğu

W : Kayan kütleinin ağırlığı

Q_T : Sürşarj yükü

T_{EQ} : Eşdeğer çivi yükü

N_F : Kayma yüzeyindeki normal kuvvet

S_F : Kayma yüzeyindeki kesme kuvveti

R_c : Kesme kuvvetinin kohezif bileşeni

R_ϕ : Kesme kuvvetinin sürtünme bileşeni

olarak ifade edilmektedir. Toptan stabilite analizinde güvenlik sayısı şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$GS_G = \frac{\sum \text{Destekleyici Kuvvetler}}{\sum \text{Devirici Kuvvetler}} \quad (8)$$

Burada destekleyici kuvvetler, kesme kuvveti (S_F) ve eşdeğer çivi yükü (T_{EQ}) iken, devirici kuvvetler, kayan kütleinin ağırlığı (W) ve sürşarj yükü (Q_T) olarak ifade edilmektedir.

Kayma yüzeyinde etkili normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri ise;

$$N_F = (W + Q_T) \cos \psi + T_{EQ} \cos(\psi - i) \quad (9)$$

$$S_F = (W + Q_T) \sin \psi - T_{EQ} \sin(\psi - i) \quad (10)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada;

$$S_F = R_C + R_F = c_m L_s + N_F \tan \phi_m \quad (11)$$

$$\tan \phi_m = \frac{\tan \phi'}{GS_G} \quad (12)$$

$$c_m = \frac{c'}{GS_G} \quad (13)$$

olarak ifade edilmektedir.

1.8.3.2.2.2. Kayma Stabilitesi Analizi

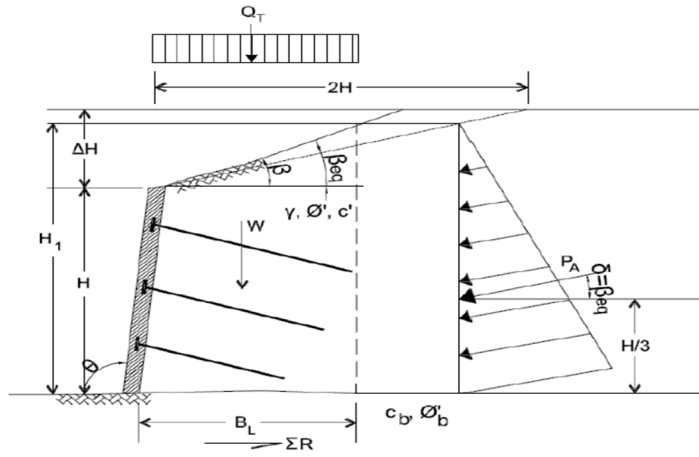
Zemin çivili duvar kayma göçmesi, kazı sırasında duvar arkasında oluşan ilave toprak basınçlarının sistemin kayma dayanımını aşması sonucu meydana gelmektedir. Kayma stabilitesi analizinde, minimum güvenlik sayısı, istinat yapılarında olduğu gibi yanal destek kuvvetlerinin, devirici yanal kuvvetlere oranı şeklinde hesaplanmaktadır (Şekil 30).

$$GS_{SL} = \frac{\sum R}{\sum D} \quad (14)$$

$$\sum R = c_b B_L + (W + Q_D + P_A \sin \beta) \tan \phi_b \quad (15)$$

$$\sum D = P_A \cos \beta \quad (16)$$

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma H_1^2 K_A \quad (17)$$



Şekil 30. Zemin çivili duvarın kayma stabilitesi analizi (FHWA, 2003)

Burada;

H: Duvar yüksekliği

β : Şev açısı

β_{eq} : Eşdeğer şev açısı

α : Duvar yüzü eğimi

θ : Duvar yüzünün yatayla yaptığı açı ($\theta = \alpha + 90^\circ$)

c_b : Tabandaki zeminin kohezyonu

B_L : Yatay kayma yüzü uzunluğu

W: Zemin çivili kütleinin ağırlığı

Q_D : Sürşarj yükünün kalıcı etkisi

Φ'_b : Tabandaki efektif içsel sürtünme açısı

Φ' : Zemin çivili duvarın gerisindeki zeminin efektif içsel sürtünme açısı

δ : Zemin-duvar ara yüzü sürtünme açısı

γ : Zeminin birim hacim ağırlığı

H_1 : Toprak basıncının etkidiği yükseklik

K_A : Aktif toprak basıncı katsayısı

olarak ifade edilmektedir.

1.8.3.2.2.3. Taşıma Kapasitesi Analizi

Zemin çivili duvarlarda çok sık görülmemekle birlikte, ince daneli, yumuşak zeminlerde yapılan kazılarda, dengesiz yüklenme sonucu kazı tabanında şişme ve bunu tetikleyen taşıma kapasitesi göçmesi meydana gelebilmektedir. Genellikle zemin çivili duvarlar bu tip zeminlerde inşa edilemediği için taşıma kapasitesi göçmesi kritik görülmemektedir. Taşıma kapasitesi analizinde minimum güvenlik sayısı, GS_H , geçici yapılar için 2.5, kalıcı yapılar için 3 olarak kabul edilebilmektedir (FHWA, 2003).

1.8.3.2.3. Yüzey Elemanı Stabilite Analizleri

Zemin çivili duvarlarda, yüzey elemanı stabilite analizleri, yüzey elemanının kırılma dayanımı, zımbalama dayanımı ve bağlantı elemanının kopma dayanımı şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bağlantı elemanının kopması yalnızca kalıcı yüzeyler için analiz edilirken, yüzey elemanında kırılma ve zımbalama göçmesi kalıcı ve geçici yapılar için analiz edilmelidir (FHWA, 2003).

1.8.3.2.3.1. Yüzey Elemanı Kırılma Dayanımı

Zemin çivili duvar yüzeyi, donatılı bir beton yüzey gibi düşünülebilir. Yüzeye etkileyen yanal toprak basınçları neticesinde çivilerde oluşan reaksiyon kuvvetleri eğilme momentlerini oluşturmaktadır. Pozitif momentler çiviler arası açıklığın ortasında, negatif momentler çivilerin etrafında oluşmaktadır. Momentlerin, yüzey elemanının kapasitesini aşması durumunda yüzeyde kırılma meydana gelmektedir (FHWA, 2003).

Bu durum pek çok etkene bağlı olmaktadır. Bunlar; yanal toprak basıncı, yatay ve düşey çivi aralığı, yüzey kalınlığı, plaka boyutları ve beton dayanımı olarak

sıralanabilmektedir. Yüzey elemanının kırılma dayanımı, R_{FF} , şu şekilde hesaplanabilmektedir;

$$R_{FF} [\text{kN}] = c_F (a_{vn} + a_{vm}) \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2} \right] \left(\frac{s_h h [\text{m}]}{s_v} \right) \frac{f_y}{265} [\text{MPa}] \quad (18)$$

$$R_{FF} [\text{kN}] = c_F (a_{hn} + a_{hm}) \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2} \right] \left(\frac{s_v h [\text{m}]}{s_h} \right) \frac{f_y}{265} [\text{MPa}] \quad (19)$$

Burada;

c_F : Yüzey arkasında oluşan zemin basıncı dağılım faktörü

h : Yüzey kalınlığı

a_{vn} : Çivi başında, düşey yönde birim genişlikteki donatı kesit alanı

a_{vm} : Açıklıkta, düşey yönde birim genişlikteki donatı kesit alanı

a_{hn} : Çivi başında, yatay yönde birim genişlikteki donatı kesit alanı

a_{hm} : Açıklıkta, yatay yönde birim genişlikteki donatı kesit alanı

S_H : Çivi yatay aralığı

S_V : Çivi düşey aralığı

f_y : Donatı akma dayanımı

olarak ifade edilmektedir.

Pratikte, yatayda ve düşeyde donatı kesit alanı ($a_{hn}=a_{vn}$ ve $a_{hm}=a_{vm}$) birbirine eşit kabul edilmektedir. Donatı akma dayanımının, f_y , 420 MPa alındığı, yatayda ve düşeyde eşit çivi aralıkları için yüzey elemanının kırılma dayanımı, Denklem (20) ve Denklem (21)'de verildiği gibi basitleştirilebilmektedir.

$$R_{FF} [\text{kN}] = 1.6 c_F (a_{vn} + a_{vm}) \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2} \right] h [\text{m}] \quad (20)$$

Buna göre yüzey kırılma dayanımı minimum güvenlik sayısı, GS_{FF} ;

$$GS_{FF} = \frac{R_{FF}}{T_0} \quad (21)$$

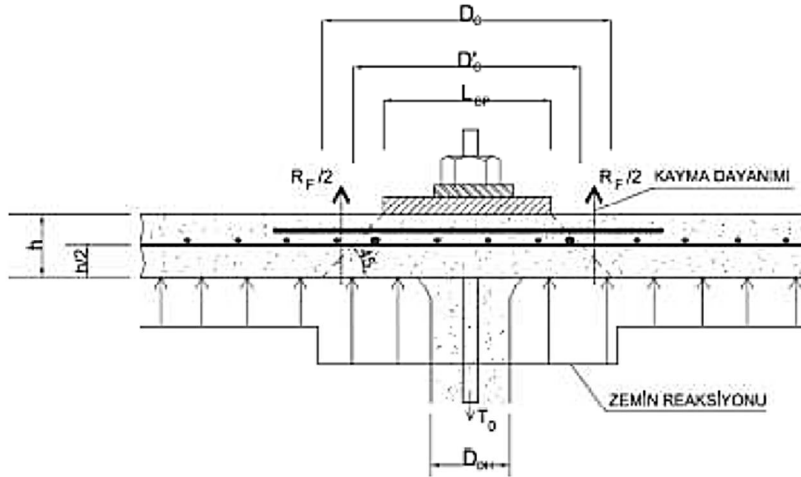
T_0 : Çivi başında oluşan gerilme kuvvetidir.

Zemin çivili duvarın gerisinde oluşan toprak basıncı dağılımı üniform değildir. Duvarın yüzey kalınlığı ve buna bağlı rijitliği arttıkça, toprak basıncı dağılımı üniforma yaklaşmaktadır (FHWA, 2003).

1.8.3.2.3.2. Zımbalama Dayanımı

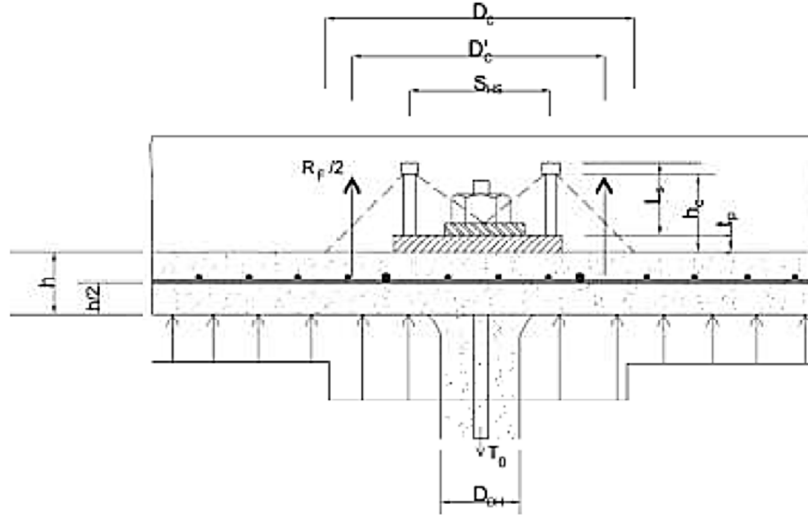
Zemin çivili iksalarda zımbalama dayanımı, püskürtme beton yüzeyi kalınlığı ve yüzey bağlantı elemanı (bağlantı plakası veya başlık bağlantı elemanı) ile ilişkilidir.

Şekil 31’de geçici iksalar için yüzey elemanı bağlantı detayları ile zımbalama biçimleri verilmektedir.



Şekil 31. Geçici iksalarda zımbalama etkisi (FHWA,2003).

Şekil 32’de ise kalıcı iksalar için yüzey elemanı bağlantı detayları ile zımbalama biçimleri verilmektedir.



Şekil 32. Kalıcı iksalarda zımbalama etkisi (FHWA, 2003).

Zımbalama dayanımı şu şekilde hesaplanabilir;

$$R_{FP} = C_P V_F \quad (22)$$

$$V_F \text{ [kN]} = 330 \sqrt{f'_c} \text{ [MPa]} \pi D'_c \text{ [m]} h_c \text{ [m]} \quad (23)$$

Burada;

V_F : Zımbalama kuvveti

C_P : Toprak basıncı düzeltme faktörü

Pratikte düzeltme faktörü ihmal edilerek 1.0 kabul edilir, zemin reaksiyonu söz konusu edildiğinde 1.15 alınabilir (FHWA,2003).

D'_c : Efektif çap

Geçici yüzeyler için;

$$D'_c = L_{BP} + h \quad (24)$$

Kalıcı yüzeyler için;

$$D'_c = S_{HS} + h_c \quad (25)$$

h_c : Efektif yükseklik

olarak ifade edilmektedir.

Zımbalama dayanımı güvenlik faktörü, GS_{FP} , şu şekilde hesaplanır;

$$GS_{FP} = \frac{R_{FP}}{T_0} \quad (26)$$

1.8.3.2.3.3. Bağlantı Elemanı Kopma Dayanımı

Bağlantı elemanının kopma dayanımı, R_{HT} , şu şekilde hesaplanabilir;

$$R_{HT} = N_H A_{SH} f_{yk} \quad (27)$$

Burada;

N_H : Bağlantı elemanı adedi (genellikle 4 adet)

A_{SH} : Bağlantı elemanı kesit alanı

f_y : Akma dayanımı

olarak ifade edilmektedir.

Buna göre, kalıcı iksalarda bağlantı elemanı kopma dayanımı güvenlik sayısı, GS_{HT} , şu şekilde hesaplanır;

$$GS_{HT} = \frac{R_{HT}}{T_0} \quad (28)$$

Yüzey elemanının kırılma ve zımbalama dayanımı çiviler arası yatay mesafe genişledikçe azalmaktadır. İnce püskürtme beton yüzeyi ve geniş çivi aralıkları söz konusu olduğunda yüzey kırılma dayanımı düşer, bu durum çivi başlık dayanımını kontrol eder (FHWA, 2003).

1.8.3.3. Güncel Zemin Çivisi Tasarım Yöntemleri

1.8.3.3.1. Çivi Tasarımı

Zemin çivili istinat yapılarının güncel tasarım yöntemleri, donatılar tarafından oluşturulan ek direnç gerilme kuvvetlerini kapsamaları için geliştirilen geleneksel şev stabilite analiz yöntemlerinden türetilmiştir. Bu analiz yöntemleri varsayılan göçme yüzeyleri boyunca genel güvenlik sayısını değerlendirmektedir.

1.8.3.3.2. Kaplama Tasarımı

Kaplamanın, zemin çivili yapılarda bir çok işlevi vardır. Çiviler arasındaki zemine yanal bir sınırlandırma getirir ve dekoratif amaçlı paneller gibi dış yükleri taşıyabilmektedir. Zemin yerel olarak her çivi arasında desteklenmektedir. Çiviler aralıksız olarak dizilmiş olursa kaplama arkasında zemin basıncı olmayacağından zeminin desteklenmesine de gerek kalmayacaktır. Bir başka açıdan bakıldığında, çivi aralıkları büyük tutulursa desteklenen toprak basınçlarının hepsi kaplama tarafından karşılanmak zorunda kalacak ve dolayısıyla kaplama kalınlığı çok olacaktır. Çiviler arası kaplama üzerindeki toprak basınçlarının dağılımı üniform değildir. Çivi – kaplama bağlantıları dolayısıyla gerilme yoğunlaşmasına neden olan düşey ve yatay kemerlenme etkileri oluşmaktadır. Bu etkiler zemin çivili duvarlar için geçerli olan esnek kaplamalar açısından büyük önem taşımaktadır.

1.9. Zemin Çivili Duvarların Tasarımı

1.9.1. Giriş

Bu bölümde zemin çivili duvar tasarımı hesap yöntemleri sırasıyla anlatılmıştır. Tasarımın 5 ana bölümü ve bunlara bağlı alt bölümler Tablo 2’de gösterilmiştir. Bölümün devamında başlıklar ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır.

Tablo 2. Zemin çivili duvarlar için tasarım aşamaları (FHWA, 2003).

1. Zemin Çivili Duvarlar Ön Tasarım Esasları
A. Duvar yerleşimi
B. Zemin çivisi düşey ve yatay aralığı
C. Zemin çivisi düzeni
D. Zemin çivisi eğimi
E. Zemin çivisi boyu ve dağılımı
F. Diğer ön tasarım esasları
2. Tasarım Abakları ile Ön Tasarım
3. Son Tasarım
A. Dış göçme nedenleri
✓ Toptan göçmeye karşı stabilite kontrolü
✓ Kaymaya karşı stabilite kontrolü
✓ Taşıma gücü stabilite kontrolü
B. İç göçme modelleri
C. Kaplama tasarımı
4. Diğer Tasarım Esasları

Tablo 2’de verilen aşamaların tasarımına başlanmadan önce proje kısıtlamaları (topoğrafya, saha giriş – çıkış yolları, arazi sınırları, mevcut altyapı tesisleri, komşu binalar) başta olmak üzere inşaat gereklilikleri ve performans şartları (deformasyon, stabilite, kalıcılık) belirlenmelidir.

Tasarım tamamlandıktan sonra zemin çivili duvar şartnamesi ve deformasyon gözlem planı hazırlanmalıdır (FHWA, 2003).

1.9.2. Zemin Çivili Duvarlar Ön Tasarım Esasları

1.9.2.1. Duvar Yerleşimi

Duvar yüksekliği, duvar cephe uzunluğu ve duvar yüzü eğimi belirlenerek duvar yerleşimi belirlenmektedir. Duvar eğimi genellikle 0° ile 10° arasındadır. Duvar

yerleşiminin belirlenmesi sırasında ayrıca duvarın boy profili çıkartılmakta, trafik bariyerleri, altyapı elemanları ve drenaj sistemi gibi detaylar tespit edilmekte ve arazi sınırları belirlenmektedir. Duvar yüzünün eğimli seçilmesi geçici kazı yüzeyi stabilitesini arttırmakta ve eğimli bir yüzeyde duvara daha düşük kuvvetler etkiyeceği için daha kısa zemin çivilerinin seçilebilmesine olanak sağlamaktadır. Malzeme tasarrufu ile sağlanan kazanç eğimli yüzeyin kazısında artan yarma maliyetini dengeleyecektir. 10° 'den düşük eğimler genellikle estetik sebeplerle tercih edilmekte ve muhtemelen geçici kazı yüzeyi stabilitesini arttırmaktadırlar. 10° 'den büyük duvar eğimlerinde stabilitenin artmasını sağlamaktadır (FHWA, 2003).

1.9.2.2. Zemin Çivisi Düşey ve Yatay Aralığı

Klasik delme ve enjeksiyonlama yöntemi ile imal edilen zemin çivisi aralıkları 1,25 m ile 2 m arasındadır. Sürme yöntemi ile imal edilen zemin çivilerinde yatay ve düşey aralıklar 0,5 m'ye kadar düşebilmektedir. Sürme yöntemi ile imal edilen zemin çivilerinde seçilen düşük yerleşim aralıklarının sebebi klasik delme ve enjeksiyonlama yöntemi ile imal edilen zemin çivilerine göre düşük bağ kuvvetleri almalarından kaynaklanmaktadır. Klasik delme ve enjeksiyonlama yöntemi ile imal edilen zemin çivilerinde genel olarak 1,5 m yatay ve düşey aralık tercih edilmektedir. Zemin çivisi aralıkları altyapı tesislerinin varlığı ile değişebilmektedir.

Yatay ve düşey zemin çivisi aralıkları seçilirken her zemin çivisinin etki alanı $S_H \times S_V \leq 4 \text{ m}^2$ olmalıdır. Tasarım aşamasında minimum yatay zemin çivisi aralığı 1 m seçilmelidir. Toptan göçme analizi ve kaplama tasarımındaki çivi tasarım kuvvetleri zemin çivisi aralıklarından etkilenmektedir. Genel olarak çiviler arası mesafe ile zemin çivisi tasarım kuvvetleri artmaktadır. Minimum zemin çivisi aralığının sınırlandırılması ardışık zemin çivileri arasında delgide oluşabilecek sapmalar ve kesişmeye bağlı grup etkisinin azaltılması amacına bağlıdır. Grup etkisi birim çivi başına düşen yük taşıma kapasitesinin azalmasına sebep olmaktadır. Maksimum zemin çivisi aralığı da belirlenmiştir. Maksimum zemin çivisi aralığı (genellikle 2 m) zemin çivili sistemin görece kolay imalatının sağlanması ve yatay toprak basınçları ve etkiyen sürşarj yüklerinin efektif bir şekilde desteklenmesi amacı ile belirlenmiştir (FHWA, 2003).

1.9.2.3. Zemin Çivisi Düzeni

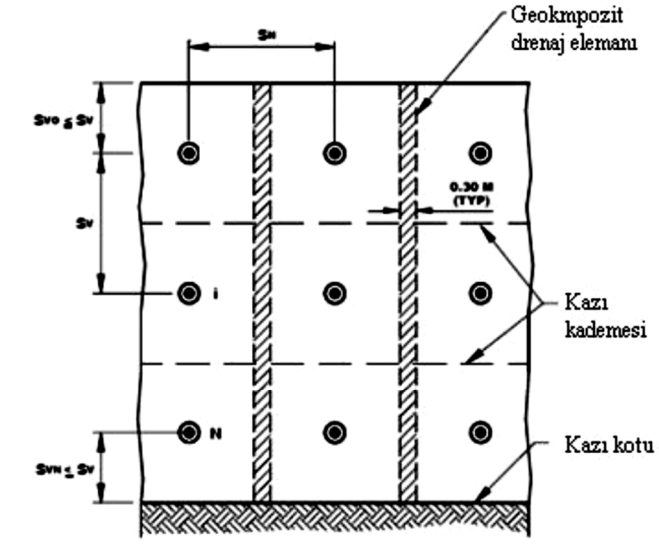
Zemin çivileri genel olarak;

- Kare
- Şaşırtmalı
- Düzensiz (Sınır bölgelerde) şekillerde dizayn edilir.

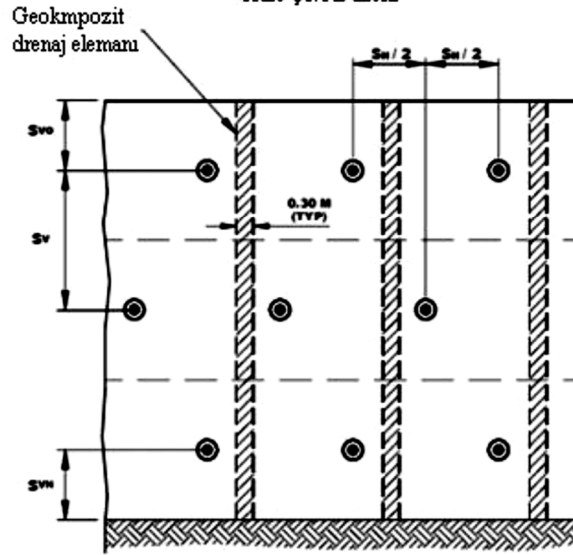
Kare çivi düzeni ile düşeyde zemin çivisi kolonları elde edilmekte ve düşey birleşimlerle püskürtme beton kaplama veya prekast beton kaplama elemanların imalatı kolaylaşmaktadır. Kare çivi düzeni aynı zamanda sürekli düşeyde geokompozit drenaj elemanlarının sürekli olarak kaplama arkasında imal edilmesini kolaylaştırmaktadır. Uygulamada kare çivi düzeni sıklıkla kullanılmaktadır (FHWA, 2003).

Şaşırtmalı zemin çivisi düzeni toprak basınçlarının daha düzenli dağılımını sağlamaktadır. Bu etki sayesinde zeminde kemerlenme oluşmaktadır. Çivi dağılımında oluşan üçgen düzen düşey geokompozit drenaj elemanların imalatını zorlaştırmaktadır. Özellikle yüksek duvarlarda duvar temelinde bulunan ana drenaja ulaşacak düşey drenaj elemanlarının imalatı zorlaşmaktadır (FHWA, 2003).

Sabit çivi aralığı seçimi imalat ve kalite kontrolü kolaylaştırmaktadır. Fakat proje bazlı geometrik kısıtlar zemin çivisi aralıklarının bölgesel olarak düzensizleşmesine sebep olabilmektedir. Örneğin; zemin çivili duvar üst ve/veya alt kotlarının sabit olmadığı durumlarda zemin çivilerinin aralıkları duvar geometrisine bağlı olarak değişebilmektedir. Böyle durumlarda yatay olmayan kenara paralel bir yada iki sıra zemin çivisi yerleştirilmesinden sonra bir geçiş bölgesiyle düzenli dizilime geçilmekte, geçiş bölgesinde yatay sıraya ulaşınca kadar zemin çivileri düşeyde daha sık yerleştirilebilmektedir. Aynı şekilde köşe bölgelerde zemin çivisi yatay aralıkları azaltılarak geçiş bölgeleri oluşturulabilmektedir. Şekil 33 ve Şekil 34'de zemin çivisi yerleşimleri örneklenmektedir (FHWA, 2003).

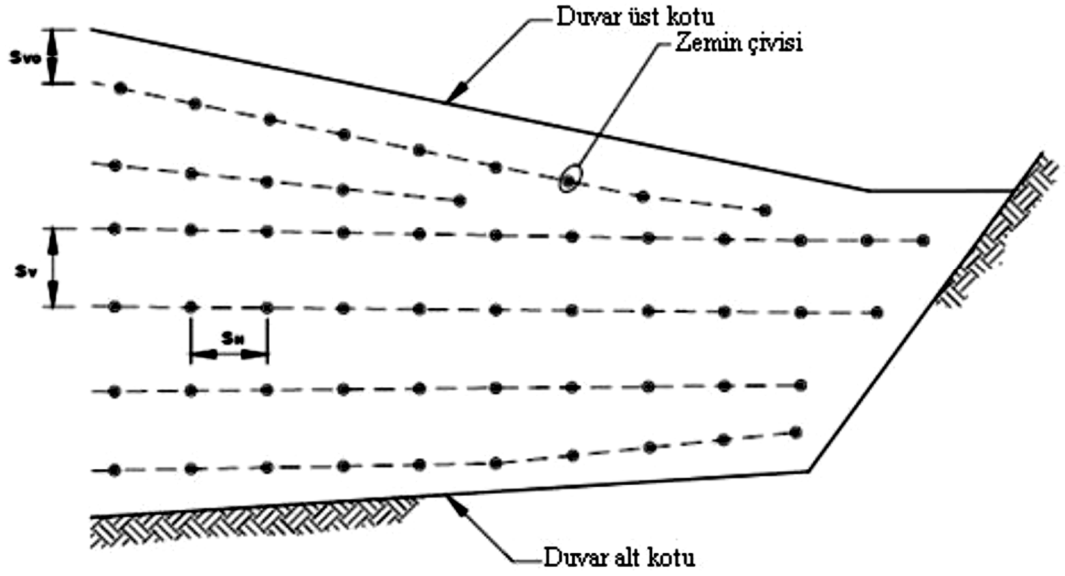


Kare Çivî Düzeni



Şaşırtmah Çivî Düzeni

Şekil 33. Duvar yüzü zemin çivisi düzeni (FHWA, 2003).



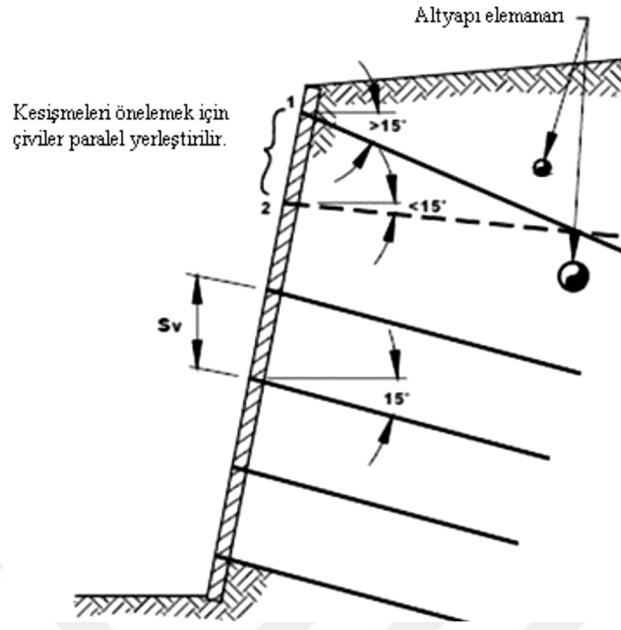
Şekil 34. Düşey olmayan zeminler için zemin çivisi yerleşimi
(FHWA, 2003)

1.9.2.4. Zemin Çivisi Eğimi

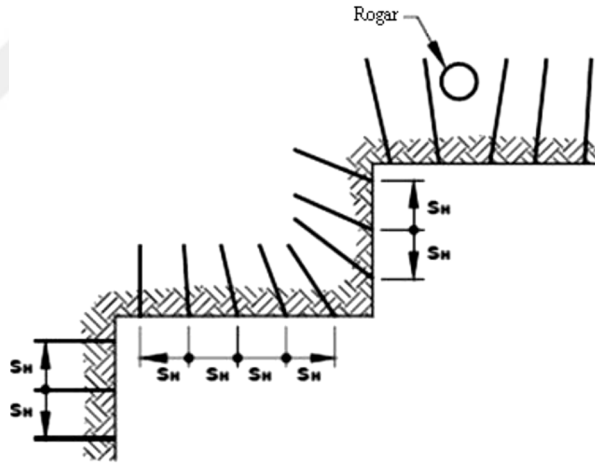
Zemin çivileri yatay ile 10° - 20° açı yapacak şekilde, çoğunlukla 15° , yerleştirilmektedir. Açı aralıkları delgi çapı, zemin çivi boyutları ve klasik enjeksiyon karışımları için enjeksiyonun delgi dibinden yukarı doğru düzgün yerleşmesine olanak sağlamaktadır.

10° 'den daha düşük açılarla imal edilen zemin çivilerinde enjeksiyonlama esnasında boşluk oluşma olasılığı yükselmektedir. Enjeksiyondaki boşluklar zemin çivisinin yük kapasitesini düşürmekte ayrıca enjeksiyon ile sağlanan toplam korozyon korumasını azaltmaktadır.

Proje özelliklerine göre farklı çivi eğimleri kullanılabilir. Şekil 35'de öngörülen zemin çivisi bölgesinde mevcut altyapı tesisleri gösterilmektedir. Bu durum genellikle üst 1 veya 2 sıra için söz konusu olmaktadır. Aynı zamanda dış duvar köşelerinde kalan zemin çivilerinin kesişmelerini önlemek amacı ile bir cephede kalan zemin çivileri farklı açılarla imal edilebilmektedir (FHWA, 2003).



Şekil 35. Alt yapı elemanlarına bağlı olarak çivi eğilimlerinin değişmesi



Şekil 36. Köşelerde çivi yerleşim planı görünüşü (FHWA, 2003).

Şekil 36'da dış duvar köşesinde kalan zemin çivilerinin kesişmesini önlemek için planda yaptıkları açının değiştirildiği durum gösterilmektedir. Çivi eğiminin etkisi zemin çivili duvarların toptan göçme ve yerel stabilite analizinde değerlendirilmelidir. Duvarın üst bölgesinde yapılan kayma kaması analizlerinde çivinin yatayla yaptığı açının artması ile güvenlik sayıları önemli şekilde azalmaktadır (FHWA, 2003).

1.9.2.5. Zemin Çivisi Boyu ve Dağılımı

Zemin çivisi boyları sabit yada düşeyde her çivi sırası için farklılık gösterecek şekilde seçilebilmektedir.

Sabit Çivi Boyu: Zemin çivili duvarda oluşacak toplam deformasyonun önemli olmadığı sağlam zeminlerde ya da çevresinde komşu yapılar olmayan alanlarda uygulanacak zemin çivili duvarlarda sabit çivi boyu dağılımı uygulanması imalatı ve kalite kontrolü kolaylaştırmaktadır. Sabit çivi boyu düzeni ile az da olsa daha kısa toplam çivi boyu kullanılmaktadır. Bu düzen genel olarak kaymaya karşı stabilite güvenliğini yükseltmektedir. Bu sebeplerle birçok projede tercih edilmektedir.

Değişken Çivi Boyu: Zemin çivili duvar deformasyonlarının kontrol altına alınması istenen durumlarda değişken çivi boyu dağılımı tercih edilmektedir. Toplam denge özellikleri ve deformasyon davranışı sabit çivi boyu kullanılan sistemlerden farklıdır. Uygulaması yapılan zemin çivili duvarlardan alınan saha ölçümleri zemin çivili duvarların 2H/3'lük bölgesinde alt kısma göre daha uzun zemin çivisi kullanılmasının oluşan deformasyonları azalttığını göstermektedir. Duvar üst bölgesinde ek donatı kullanılması duvar hareketine karşı ek dayanım sağlayacaktır. Alt zemin çivilerinin daha kısa olması kaymaya karşı stabilite güvenlik sayısının düşeceğini göstermektedir.

Şekil 37'de aynı yükseklikteki zemin çivili duvarların 1,35 güvenli tasarımda farklı zemin çivisi boyu dağılımları gösterilmektedir. (a) durumunda çözüm yapılırken sabit çivi boyu kullanılmıştır. Değişen çivi boyu ile tasarım yapılan (d) durumunda (a) durumuna göre toplam çivi boyunun %12 daha fazla hesaplandığı görülmektedir. Bu örneklerden karşılaştırılmasından anlaşılacağı gibi güvenlik katsayısı derinlikle çivi boyu değişiminden etkilenmemektedir. Benzer tasarım güvenliğinde farklı çivi boyu dağılımlarında duvar deformasyonlarında belirgin farklılık görülmektedir. Bazı çivi boyu dağılımlarında duvar alt bölgesinde çok kısa çivilerin olması kayma göçmesine sebep olabilecek durumdadır (FHWA, 2003).

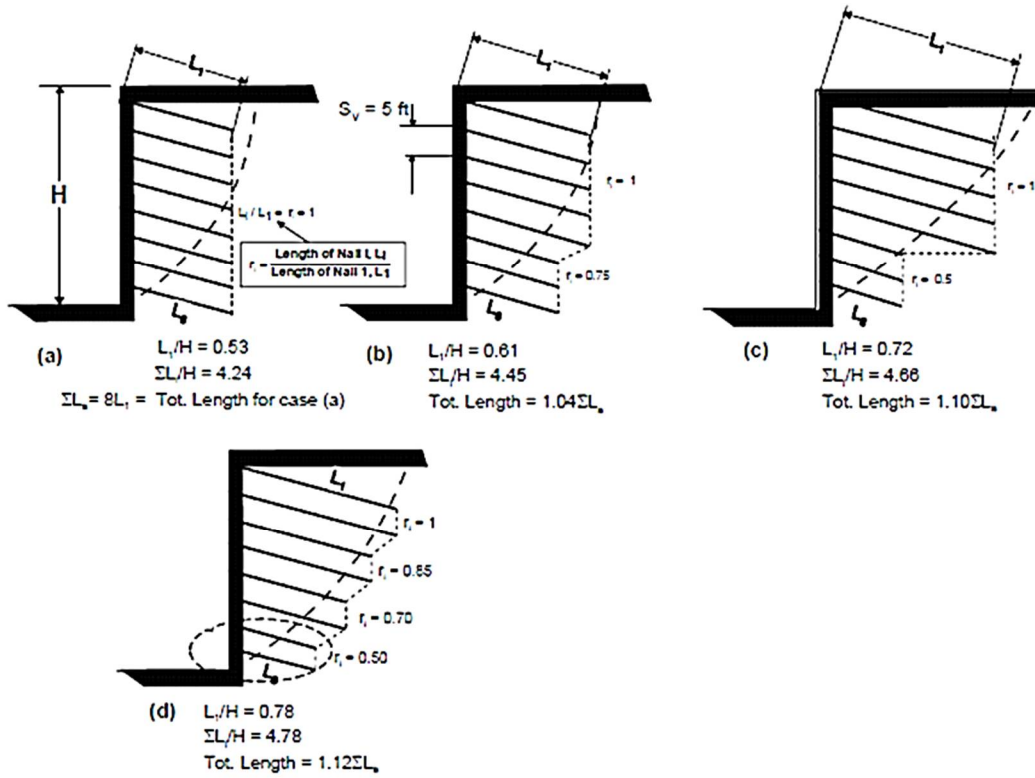
Duvar üst bölgesinde yer alan çivilerin kısa olduğu durumların analizinde zemin çivili duvar performansında yüksek deformasyonlar gözlenmiştir. Zemin çivili duvar üst bölgesi için seçilen çivi boylarının toptan göçme analizi sonucunda elde edilen boylardan daha uzun tercih edilmesi durumunda duvar deformasyonları belirgin şekilde azalmaktadır. Genel olarak daha büyük toptan göçme güvenliği değerleri için daha düşük duvar

deformasyonu beklenmektedir. Fakat tüm diğer değişkenlerin eşit olduğu Şekil 37'deki durumlar incelendiğinde (c) ve (d) durumlarında duvar üst bölgesinde daha düşük deformasyonları elde edilmiştir (FHWA, 2003).

Sıkı kohezyonsuz zeminlerde duvar yüksekliğinin üçte – ikisinden dörtte – üçüne kadar sabit boyda çivilerin uygulandığı ve duvar alt bölgesinde duvar yüksekliğinin yarısından kısa olmamak üzere kısaltılmış çivilerin uygulandığı duvarların kaymaya karşı güvenliği daha yüksek bulunmuştur. Uygulamada duvar alt bölgesi için seçilen çivi boyları duvar yüksekliğinin yarısından kısa olmamalıdır. Duvar yüksekliğinin yarısından kısa çiviler kaymaya karşı stabilite gerekliliklerini karşılamamaktadır. Örnek olarak (d) durumunda kaymaya karşı yeterli güvenlik sağlanamamıştır. Tüm durumlarda ve özellikle zemin çivisi boylarının duvar alt bölgesinde kısaltıldığı durumlarda stabilite analizleri yapılmalıdır.

Genel olarak değişken çivi boyları uygulamaları daha komplike hale getirmekte ve daha fazla fireye sebep olmaktadır. Fakat sözleşmelerin performans şartını öne çıkarmasıyla birlikte deformasyonları kontrol altına almak amacı ile uygulamada duvar üst bölgesinde daha uzun çivi boyları tercih edilmektedir.

- Zemin çivisi boyu ve dağılımı ile ilgili tartışılan konuları şu şekilde özetleyebiliriz; Mümkün oldukça sabit çivi boyu tercih edilmelidir.
- Duvar üst bölgesinde toptan göçme analizinde bulunan çivi boylarının uzatılması duvar deformasyonlarını azaltmaktadır.
- Duvar üst bölgesinde kısa çivi kullanılmamalıdır.
- Duvar alt bölgesinde duvar yüksekliğinin yarısından kısa çivi kullanılmamalıdır.
- Daha kısa çivilerin kullanıldığı durumlarda kaymaya karşı güvenlik sağlanamamaktadır.
- Farklı zemin koşullarıyla karşılaşıldığı durumlarda değişen boyda zemin çivileri tercih edilebilir.



Şekil 37. Çivi boylarındaki değişimin etkisi (FHWA, 2003)

Fizibilite çalışmalarında ön değerlendirme olarak çivi boyları duvar yüksekliğinin %70 olarak kabul edilebilmektedir. Duvar yüksekliğinin 10 m'den fazla ve/veya sürşaj yükünün mevcut olduğu durumlarda çivi boyları duvar yüksekliğinin %70'inden fazla olacaktır (FHWA, 2003).

1.9.2.6. Diğer Ön Tasarım Esasları

- Korozyon riski değerlendirilmelidir.
- Toplam bağ kuvveti delgi tipine bağlı olacağı için imalatçı ile olası delgi methodları değerlendirilmelidir.
- Aynı zeminde daha önce yapılan uygulama deneyimleri ve korozyon koruması gibi proje kısıtları değerlendirilerek delgi çağı belirlenmelidir.
- Farklı göçme modelleri için güvenlik katsayıları belirlenmelidir.
- Yükler belirlenmelidir.

1.9.3. Tasarım Abakları ile Ön Tasarım

Zemin çivili duvarın dış ve iç stabilitesi çivi boyu, çapı ve aralığı tarafından kontrol edilmektedir. Tüm dış ve iç stabilite gereklilikleri sağlana kadar bu parametrelerin değiştirildiği bir çok çözüm yapılabilmektedir. FHWA tarafından ön çivi boyu ve maksimum çivi çekme kuvvetini belirlemekte kullanılacak tasarım abakları hazırlanmıştır.

Bu abaklar farklı duvar yüzü açıları (α), duvar üstü şev açıları (β), efektif sürtünme açıları (ϕ') ve bağ kuvvetleri (q_u) için geliştirilmiştir. Toptan göçmeye karşı güvenlik katsayısı 1.35 kabul edilmiştir. İlk tip abakta gerekli çivi boyu (L) normalize izin verilebilir sıyırılma direncinin (μ) bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. İzin verilebilir normalize sıyırılma direnci Denklem 29 ile hesaplanmaktadır (FHWA, 2003).

$$\mu = \frac{q_u D_{DH}}{FS_p \gamma S_H S_V} \quad (29)$$

q_u : Son sıyırılma direnci

D_{DH} : Delgi çapı

FS_p : Sıyırılma direnci güvenlik katsayısı

S_H : Yatay çivi aralığı

S_V : Düşey çivi aralığı

γ : Zeminin birim hacim ağırlığı

Çivi boyları seçilen geometri için en kritik toptan göçme kayma kaması için belirlenmektedir. Çivi ve/veya kaplamada göçme durumları bu aşamada göz önüne alınmaz ileriki aşamalarda ayrıca hesaplanmaktadır.

Diğer abakta tüm çiviler için maksimum normalize tasarım çekme kuvveti ($T_{\max-s}$) izin verilebilir normalize sıyırılma direncinin (μ) bir fonksiyonu olarak toptan güvenlik katsayısı 1,0 için verilmektedir. Maksimum normalize tasarım kuvveti Denklem 30 ile hesaplanmaktadır (FHWA, 2003).

$$t_{\max-s} = \frac{T_{\max-s}}{\gamma H S_H S_V} \quad (30)$$

Seçilecek çivi kesiti Denklem (31) ile bulunmaktadır:

$$A_t = \frac{T_{\max-s} \cdot FS_T}{f_y} \quad (31)$$

A_t : Gerekli çivi kesit alanı

$T_{\max-s}$: Maksimum normalize tasarım kuvveti

FS_T : Çivi çekme kuvveti için güvenlik faktörü

f_y : Çivi akma dayanımı

1.9.4. Son Tasarım

1.9.4.1. Dış Göçme Modelleri

1.9.4.1.1. Toptan Göçmeye Karşı Stabilite Kontrolü

Heterojen zemin koşulları, yer altı suyu, genel yükleme koşulları, sismik kuvvetler ve çivi özelliklerinin modellenbildiği bir bilgisayar programı ile yapılmalıdır.

1.9.4.1.2. Kaymaya Karşı Stabilite Kontrolü

Çivilerle donatılmış zeminin bir blok olarak arkasından etkiyen yanal toprak basıncına direnmektedir. Bu donatılı bloğun temel zemini üzerinde kaymaya karşı kendi ağırlığı ile dayanması araştırılmalıdır. Donatılmış zemin bloğu için yapılacak kayma analizi esasları bir ağırlık yapısı için gerekli kayma analizi ile aynı olmaktadır.

1.9.4.1.3. Taşıma Gücü Kontrolü

Zemin çivili duvarın yumuşak zemin koşullarında imal edilmesi durumunda temel zemininin taşıma gücü açısından yeterliliği araştırılmalıdır.

1.9.4.2. İç Göçme Modelleri

İç göçmeye karşı stabilite çivi sıyrılma dayanımı ve çivi yapısal gerilme dayanımının kontrolü ile sağlanmaktadır.

1.9.4.3. Kaplama Tasarımı

Çivi kafasında oluşan çekme kuvveti (T_0) Denklem (32) ile hesaplanmaktadır (FHWA, 2003).

$$T_0 = T_{\max-s} [0.6 + 0.2(S_V - 1)] \quad (32)$$

Zemin çivili duvarın geçici veya kalıcı kullanım amacına yönelik kaplama kalınlığı belirlenmektedir. Geçici zemin çivili duvarların kaplama kalınlığı genellikle 100 mm – 200 mm arasındadır, kalıcı zemin çivili duvarlar kaplama kalınlığı en az 200 mm seçilmektedir. Uygulamada sağladığı hız ve kolaylık sebebi ile kaplamalarda hasır donatı ve püskürtme beton tercih edilmektedir.

1.9.5. Diğer Tasarım Esasları

Sahada imalata başlamadan önce yer altı suyunun varlığı ve seviyesi tespit edilmelidir. Yer üstü suları kanallar, yer altı suları ise drenler yardımı ile kontrol altına alınmaya çalışılmalıdır. Kontrol altına alınmamış yer üstü ya da yer altı suları imalat aşamasında zorluklara sebep olacaktır ve uzun dönem performansı etkileyecektir. Sahadaki suların kontrol altına alınmadığı koşullarda uzun dönemli tasarımlarda su yükleri analizlerde değerlendirilmelidir.

Sahada çevre yapılardan veya yollardan kaynaklanabilecek yük koşulları belirlenmelidir. Duvar arkasında meydana gelebilecek depolama veya ağır iş ekipmanları düşünülerek 15 kPa büyüklüğünde yük durumu kalıcı koşullarda değerlendirilmelidir.

100 mm'den kalın geçici kaplamalarda zemin çivilerinin kaplamanın zati ağırlığını çivi kesme ve duvar kaplama arası oluşan sürtünme kuvvetleri ile karşılanabildiği kontrol

edilmelidir. Çivilerin yetersiz kaldığı durumlarda ek kısa çivilerin dik açılarla kaplama destek sistemi oluşturacak şekilde uygulanması önerilmektedir (FHWA, 2003).

1.10. Zemin Çivili Duvar Tasarımı

Tasarım yöntemleri SLD ve LRFD' ye göre olup bu tezde SLD değerlendirmeye alınmaktadır.

1.10.1. Servis Yüğü Tasarımı

1.10.1.1. Kritik Tasarım Kesitlerinin Hazırlanması ve Ön Tasarımının Seçimi

Tasarım geometrisi ve yükleme koşulları için bir deneme tasarımı seçilmektedir. Tasarım kesiti, çeşitli yeraltı katmanları ve duvar temelini altında olması gereken tasarım su seviyesinin yeri ile zeminin kendi ağırlığı ve yüzeydeki sürşarj yükü gibi uygulanan tüm ağırlıklar için son zemin dayanımı özelliklerini göstermektedir. Gözönüne alınması gerek yükleme koşulları Tablo 3' de görölmektedir.

Tablo 3. AASHTO özelliklerine göre yükleme birleşimleri (AASHTO, 1992)

Grup	D	L	E	B	RST	EQ	%
I	1	1	1	1	0	0	100
IV	1	1	1	1	1	0	125
VII	1	0	1	1	0	1	133

D: Ölü yük, L: Hareketli yük, E: Zemin Basıncı, B: Yüzdürme Kuvveti, RST: Çubuk kısalması, rötne ve sıcaklık, EQ: Deprem

1.10.1.2. İzin Verilen Çivi Kafası Yükünün Hesaplanması

Çivi kafası yükünün hesabı aşağıdaki faktörlere göre belirlenmektedir. Kaplama ve bağlantı sistemindeki her olası göçme biçimine göre nominal çivi kafası dayanımı belirlenmektedir. Tablo 3’de görülen olası her göçme türü için izin verilen çivi kafası yükü, kendisine karşılık gelen nominal kafa dayanımının bir oranı olarak belirlenmektedir. Tablo 4’deki sütun 2, 3 ve 4 çeşitli göçme türleri için hesaplanan en küçük değerdir (FHWA, 1998).

Tablo 4. SLD için çivi kafası dayanım faktörleri (FHWA,1998)

Göçme Türü	Çivi Kafası Dayanım Faktörü (I.Grup) α_F	Çivi Kafası Dayanım Faktörü (IV.Grup)	Çivi Kafası Dayanım Faktörü (VII.Grup)(Sismik)
Kaplamanın eğilmesi	0.67	$1.25 \times 0.67 = 0.83$	$1.33 \times 0.67 = 0.89$
Kaplamanın zımbalanması	0.67	$1.25 \times 0.67 = 0.83$	$1.33 \times 0.67 = 0.89$
Başlıklı civatanın gerilmeden dolayı kırılması	0.50	$1.25 \times 0.50 = 0.63$	$1.33 \times 0.50 = 0.67$
ASTM A307 civata malzemesi	0.59	$1.25 \times 0.59 = 0.74$	$1.33 \times 0.59 = 0.78$
ASTM A325 civata malzemesi			

1.10.1.3. İzin Verilen Minimum Çivi Kafası Servis Yükünün Denetimi

Deneme kaplaması tasarımı için izin verilen minimum çivi kafası servis yükü denetlenmektedir. Bu ampirik denetimde, hesaplanmış izin verilen çivi kafası yükünün gerçekte zemin-yapı etkileşimi sonucunda oluşabilecek olan tahmin edilen çivi kafası servis yükünü aştığı gösterilmektedir. Oluşan çivi kafası servis yükü aşağıdaki ampirik ifade yardımıyla tahmin edilebilmektedir:

$$t_F = F_F K_a \gamma H S_H S_V \quad (33)$$

Eğer dizaynı gerçekleştiren benzer zeminlerde yapılmış duvarlara ait saha gözlemlerinden elde edilen bilgilere sahip değilse, FHWA tarafından tasarımda çivi kafası servis yükü faktörünü (F_F) için 0.50 alınması önerilmektedir. Değişken zemin katmanlarının, karmaşık duvar geometrisinin ve sürşarj yükü dağılımının olduğu daha karışık durumlarda ise, çivi kafası servis yükü aşağıdaki ifade ile belirlenebilmektedir:

$$t_F = \frac{2F_F P_A S_H S_V}{H} \quad (34)$$

Aktif yük olan P_A , Coloumb türü kayma yüzeyi hesaplamaları kullanılarak belirlenebilmektedir. Hesaplanan bu izin verilen çivi kafası yükü ampirik olarak tahmin edilen çivi kafası servis yükünden az çıkarsa, deneme kaplama/bağlantı tasarımının değişimi ve ikinci aşamanın yinelenmesi gerekmektedir. Bu konuda özen gösterilmesi gereken diğer bir nokta da sözü geçen denetimin sismik yükleme durumu için geçerli olmamasıdır. Bunun nedeni sismik koşullar için servis yükü verisinin ve bu tür bir yükleme altında zayıf kalıcı kaplamanın davranışına ait bir kanıtın elde olmamasıdır (FHWA, 1998).

1.10.1.4. İzin Verilen Çivi Yükü Destek Diyagramının Belirlenmesi

Çivi boyunca yerin bir fonksiyonu olarak her çivi için izin verilen çivi yükü belirlenmektedir. İzin verilen çivi yükü çivi uzunluğu boyunca farklılık göstermekte ve izin verilen çivi kafası yükü, izin verilen çivi tendon yükü ve izin verilen çivi – zemin sıyrılma direncine göre değişmektedir. Tablo 4’de görüldüğü gibi, çivi tendonu akma dayanımı, çivi tendon dayanımı faktörü ile çarpılarak izin verilen çivi tendon yükü bulunmaktadır.

- İzin verilen çivi kafası yükü (T_F) = $\alpha_F \times$ (Nominal çivi kafası dayanımı) = $\alpha_F T_{FN}$
- İzin verilen çivi tendon yükü (T_N) = $\alpha_N \times$ (Tendon akma dayanımı) = $\alpha_N T_{NN}$
- İzin verilen sıyrılma direnci (Q) = $\alpha_Q \times$ (Son sıyrılma direnci) = $\alpha_Q Q_U$

Tablo 5. SLD için dayanım faktörleri ve güvenlik sayıları (F) (FHWA, 1998).

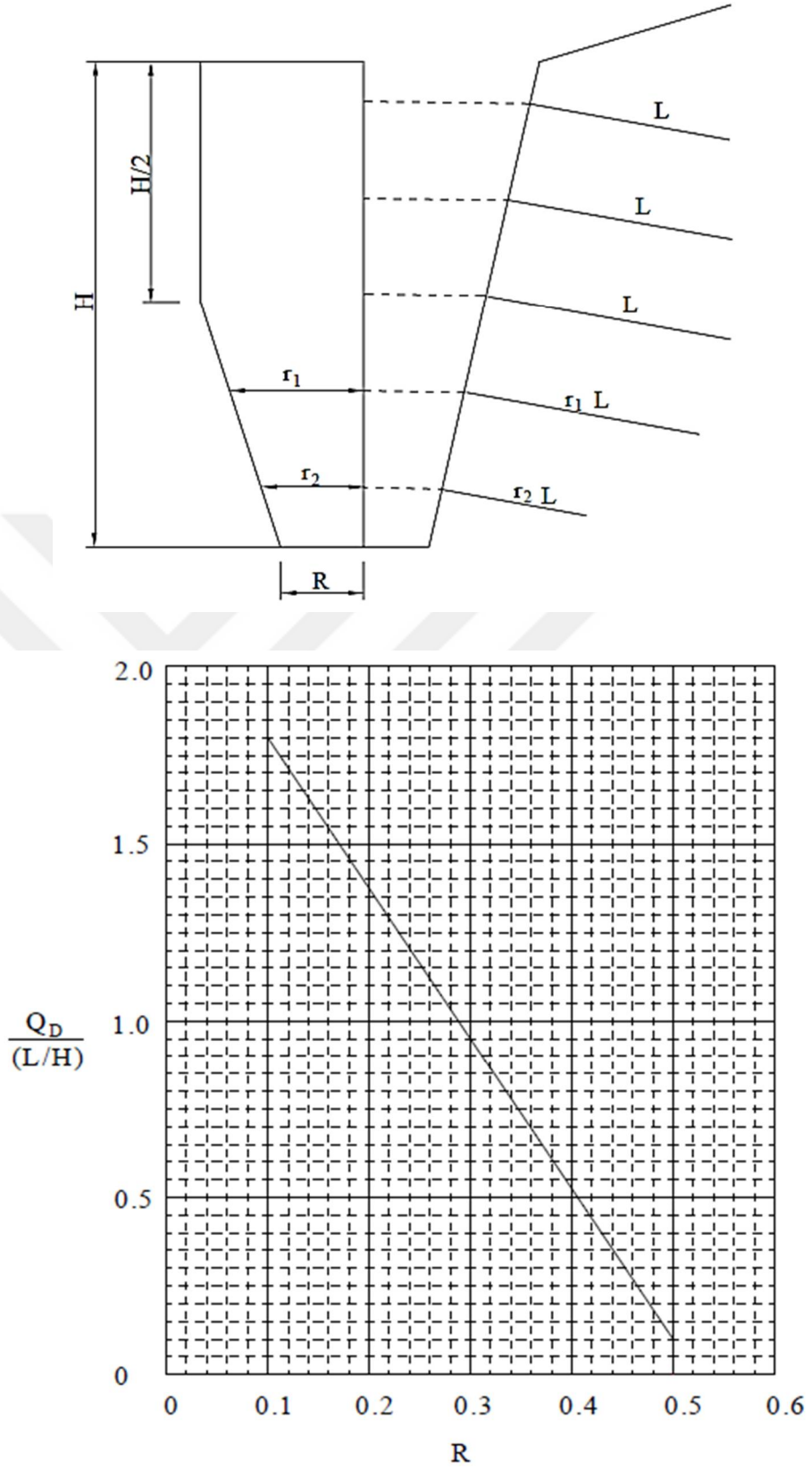
Eleman	Dayanım faktörü (I.Grup yükleme) α_F	Dayanım faktörü (IV.Grup yükleme)	Dayanım faktörü (VII.Grup yükleme) (Sismik)
Çivi Kafası Dayanımı	$\alpha_F = \text{Tablo 3}$	$\alpha_F = \text{Tablo 3}$	$\alpha_F = \text{Tablo 3}$
Çivi Tendonu Gerilme Dayanımı	$\alpha_N = 0.55$	$1.25 \times 0.55 = 0.69$	$1.33 \times 0.55 = 0.73$
Zemin – Enjeksiyon Sıyırılma Direnci	$\alpha_Q = 0.55$	$1.25 \times 0.55 = 0.69$	$1.33 \times 0.50 = 0.67$
Zemin	$F = 1.35 (1.50)^*$	$1.08 (1.20)^*$	$1.01 (1.13)^*$
Zemin (Geçici yapım koşulları)	$F = 1.35 (1.50)^*$	Yok	Yok

- I.Grup için gerekli minimum genel zemin güvenlik sayısı $F = 1.35$ ($= 1.20 \sim$ kritik yapılarda)
- IV. Grup için gerekli minimum genel zemin güvenlik sayısı $F = 1.35/1.25 = 1.08$ ($= 1.20 \sim$ kritik yapılarda)
- VII. Grup için gerekli minimum genel zemin güvenlik sayısı $F = 1.35/1.33 = 1.01$ ($= 1.13 \sim$ kritik yapılarda)
- Geçici yapım koşulları için gerekli minimum genel zemin güvenlik sayısı $F = 1.20$ ($= 1.35 \sim$ kritik yapılarda)

Kullanılan donatının minimum No [19] (İngiliz Standartlarına göre No 6) olması önerilmektedir. Ancak No [25]' ten küçük çubukların orta ile uzun boylarda düşük rijitliklerden dolayı yerleştirmede sorun çıkardığını unutmamak gerekmektedir (FHWA, 1998).

1.10.1.5. Aralıkların ve Boyların Seçimi

Uygun bir çivi düzeni için ek sınırlamalara gerekmektedir. Sınır denge tasarım hesapları yapılırken kullanılması amacıyla aşağıdaki ampirik sınırlamaların tasarım çivi boyu düzeni analizi üzerinde yapılması FHWA tarafından önerilmektedir.



Şekil 38. Tasarım için varsayılan çivi boyu dağılımı (FHWA, 1998)

Tasarım boyları aşağıdaki kurallara göre belirlenmektedir.

- Kafası duvar yüksekliğinin üst yarısında kalan çivilerin boyları üniform olmalıdır.
- Kafası duvar yüksekliğinin alt yarısında kalan çivilerin boyları Şekil 38'e uygun biçimde kısaltılmalıdır.

Zemin çivili duvarda yapımın üstten alta doğru olması nedeniyle özellikle üst kısımdaki çivilerin alttakilere oranla daha fazla yük aldığı ve şekil değiştirmelere karşı daha fazla direndiği ortaya çıkmıştır. Ancak yerleştirilen çivi boyları her zaman tasarım çivi boylarına eşit olmayabilir. Yapımı kolaylaştırmak için genellikle üniform boyda çiviler tercih edilmektedir (FHWA, 1998).

1.10.1.6. Son Zemin Dayanımlarının Belirlenmesi

Analiz için son zemin dayanımları belirlenmektedir. Bu aşamada tasarımda büyük rol oynadığı için zemine ait bilgiler titizlikle toplanmalıdır (FHWA, 1998).

1.10.1.7. Güvenlik Sayısının Hesaplanması

Çivilerin deneme düzeni ile oluşan ek duraylandırıcı kuvvetler göz önünde bulundurulurken her olası kayma yüzeyi için sınır denge güvenlik sayısı hesaplanmaktadır. Kritik olmayan yapılarda minimum genel zemin güvenlik sayısının 1.35 alınması önerilirken izin verilen çivi yükleri ve son zemin dayanımları göz önüne alınmaktadır. 1.35 olan bu genel zemin güvenlik sayısı Tablo 3'deki I. Grup yük birleşimi için geçerlidir. Diğer yük birleşimleri için Tablo 5'deki genel zemin güvenlik sayısı, Tablo 3'ün son sütununun yüzdelik oranına uygun olarak azalmaktadır (FHWA, 1998).

1.10.1.8. Dış Duraylılık Araştırması

Olası dış göçme türleri için duraylılık analizleri yapılmaktadır. Kayma yüzeyi yönteminin gözönüne alınmasını gerektiren olası dış göçme biçimleri, dıştan çivilenmiş kütleyle olan genel şev göçmesini kapsamaktadır. Bu göçme içinde, yanal yük altındaki

zemin çivili ağırlık duvarına ait temelin taşıma gücünü yitirmesi de vardır. Bu tür göçme türlerinin analizinde kullanılacak yöntemler herhangi bir ağırlık dayanma yapısı için kullanılanlara eşit olmaktadır.

Genel şev duraylılığında I. Grup yükleme için gereken güvenlik sayısı 1.3' tür (zemin çivili duvarların üstünde desteklenen son köprü ayakları için bu değer 1.5' tir). Genel şev duraylılığı denetimi yaparken daha çok duvar temelinin altından geçip şev veya temel pabucunun önünden çıkan olası kayma yüzeyleri üzerinde odaklanılmalıdır (FHWA, 2003).

1.10.1.9. Sismik Taşıma Duraylılık Araştırması

Yapım kaplaması sınırlı bir süre boyunca hizmet edeceği için herhangi bir sismik hesap gerektirmemektedir. Sismik yükleme, sismik bir katsayının statik benzeşimli atalet kuvveti olarak uygulanması sonucunda elde edilmektedir. Uygun bir sismik katsayının saptanmasına yardım eden etkenler;

- Tasarım deprem pik zemin ivmesi A_{PK} seçilir. Araziye ait veri veya yerel sismik harita olmaması durumunda bu A_{PK} değeri yönetmeliklerden alınabilir.
- Doğal durumda asıl olarak içte kalan (donatılarla kesişen) kayma yüzeyleri için tasarım fiktif sismik katsayısı A hesaplanır.

$$A=(1.45-A_{PK})A_{PK} \quad (35)$$

Donatılandırılmış zemin bloğunun sismik taşıma duraylılığında tasarım sismik katsayısının $0.5A_{PK}$ alınması önerilmektedir (FHWA, 1998).

1.11. Özel Tasarım Gerektiren Durumlar

Zemin çivili duvarların en basit halinde duvar düşey ya da eğimli olup, arkasında sabit uzunlukta ve yerleşimde çivilerle donatılmış homojen zemin vardır. Heterojen zemin koşullarını içeren, değişik çivi uzunluklarının ve yerleşiminin olduğu, donatılandırılan zeminin ağırlığından başka duvar yüklerinin de bulunduğu daha karmaşık koşullarla çok olmasa da karşılaşılmaktadır.

1.11.1. Heterojen Zemin Profilleri

Zemin çivisi tekniği denetimli dolgulardan çok zemini yerinde donatılmadığıyla ilgili olduğundan ağırlık, zemin dayanımı ve çivi sıyrılma direnci dışında heterojen koşullarla da karşılaşmaktadır. Bu koşullar özde kayma yüzeyi sınır dengesi yönteminde hesap açısından herhangi bir zorluk çıkarmamakla birlikte yine de aşağıdakilere özen gösterilmesi gerekmektedir.

Zemin çivili bilgisayar tasarım kurallarının bazıları tekil üniform zemin türü veya sadece yatayda bulunan katmanlı sistemler gibi basit zemin profili heterojenliğini kapsamaktadır.

Herhangi bir heterojenlik olması durumunda kritik kayma yüzeyi duvarın topuk bölgesi civarından geçemeyebilir ve dolayısıyla daha kapsamlı bir araştırma gerekebilir. Buna bir örnek; zayıf zemin katmanının ona göre daha kuvvetli zemin üzerinde yer alması olabilir. Bu örnekte kritik kayma yüzeyi duvarın topuğu yerine zayıf zemin – kuvvetli zemin etkileşiminin olduğu noktadaki duvar kaplamasından geçecektir.

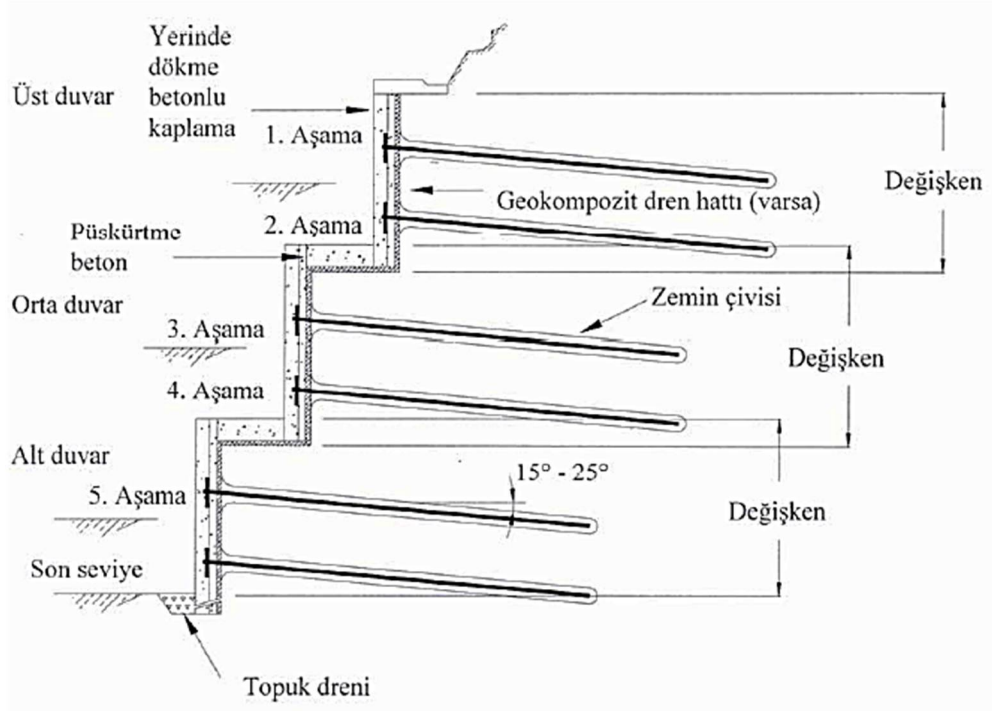
1.11.2. Köprü Kenar Ayakları

Ulaştırma dalında zemin çivili uygulamalardan çoğunlukla köprü son ayaklarında ek şerit yapımında yararlanılmaktadır. Bu da köprü temeli dolaylarında kenar ayak çevresindeki şevin kaldırılması nedeniyle yanal direncin ortadan kaldırılması ve yerine zemin çivili duvarla yanal olarak desteklenmiş bir yapının oluşturulması anlamına gelmektedir.

Köprü ayaklarının, düşey/eğimli kazıklar veya ayaklar üzerindeki derin temellerle taşındığı yerlerde derin temel, şevin kaldırılması ve duvar yapımı yüzünden taşıma gücünün önemli ölçüde etkilenmeyeceği şekilde duvar tabanının altına dek uzanıyorsa derin temel ile zemin çivili dayanma yapısının bağımsız sistemler olarak alınması önerilmektedir (FHWA, 1998). Örneğin köprünün düşey yükleri büyük ölçüde derin temel tarafından karşılanırken diğer ölü ve hareketli yüklerle birlikte yaklaşım dolgusundan gelen sürşarj yükleri belli bir oranda zemin çivili dayanma yapısı tarafından taşınacaktır. Tasarım problemi alışlagelmiş yarma uygulamalarından farklı olmayacaktır.

1.11.3. Basamaklı Yapılar

Zemin çivili duvarlarda estetik nedeniyle kaplama basamaklı olarak tasarlanabilmektedir. Basamakların üstü genellikle yeşillendirilmektedir. Yatay kısımların düşeyden büyük (1.5 kat) olması durumunda, basamak üstleri birbirlerinden bütünüyle bağımsız duvarlar olarak çalışacaktır (FHWA, 2003).

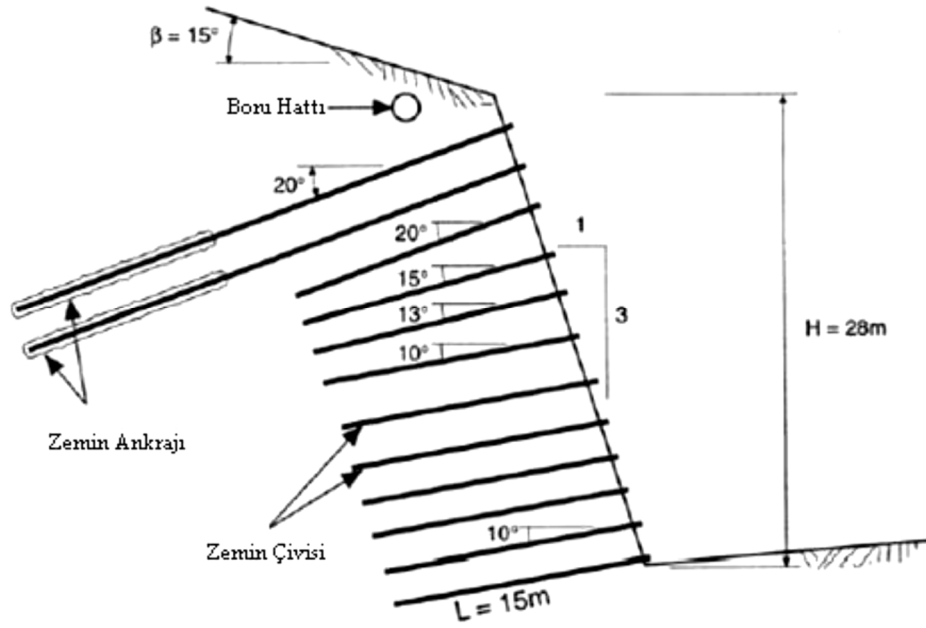


Şekil 39. Basamaklı duvarların yapım aşaması (FHWA, 1998)

1.11.4. Kompozit Yapılar

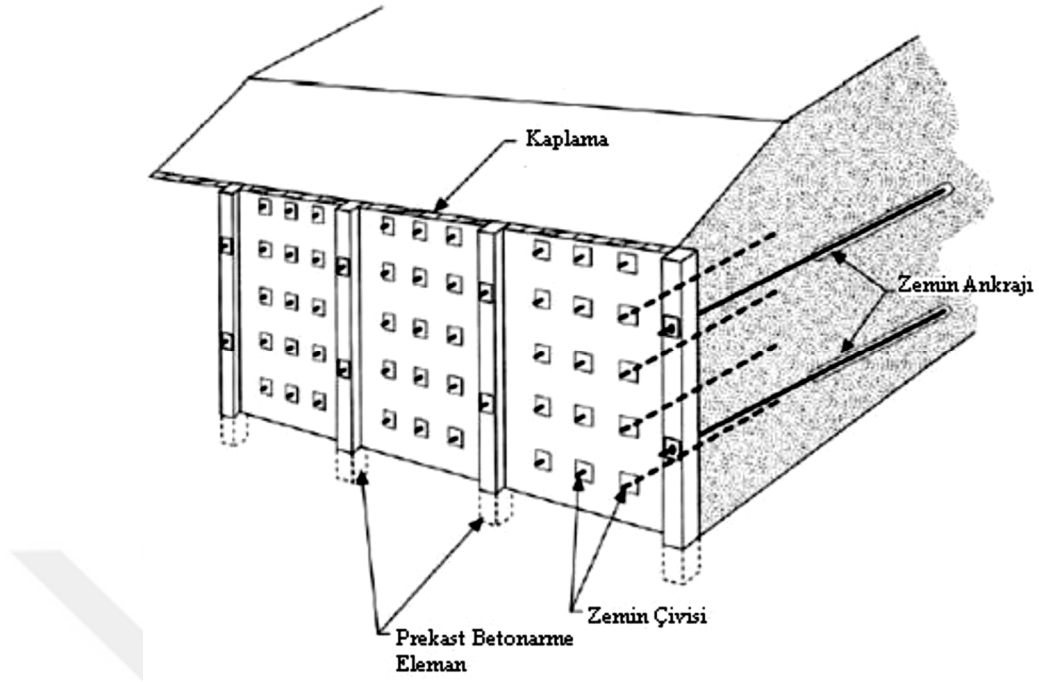
Kompozit yapılar söylemi ile zemin çivili duvarların bir başka zemin stabilizasyon methoduyla birlikte kullanılması anlaşılmalıdır. Bu bölümde zemin çivili duvarların ön germeli zemin ankrajlarıyla beraber kullanıldığı bir örnek anlatılmaktadır. Örnek bir tip kesit Şekil 40'da verilmiştir. Yukarıdan aşağı doğru imalat devam ettikçe zemin çivileri ile birlikte zemin ankrajları da yerleştirilmektedir. Zemin ankrajlarının kullanılmasının asıl amacı toplam stabilitenin artırılmasıdır. Ayrıca zemin ankrajlarının duvarın üst bölümünde uygulanması ile duvar deformasyonları belirgin şekilde azaltılmış olacaktır.

Zemin ankrajları destekleyecek betonarme elemanların teşkil edilmesi ile düşeyde duvar boyunca da uygulanabilmektedir. Düşeyde çok sıra ankrajla desteklenmiş bir sistem örneği Şekil 41'de gösterilmiştir. Bu şekilde imal edilen kompozit sistemlerle 25 m yüksekliğindeki duvarlar desteklenebilmektedir.



Şekil 40. Kompozit duvar kesiti (Byrne vd., 1998)

Tasarım yöntemi destek sisteminin yapısına, çivi ve ankrajların dağılımı, boyu ve fonksiyonuna bağlı olarak değişmektedir. Örnek olarak Şekil 40 incelenirse duvar yüzüne yakın geçecek sığ kayma kamalarına çivi kuvvetleri karşı koyarken, derin kayma kamalarını ankraj kuvvetleri karşı koyacaktır. Duvarın 1,5 çivi boyu kadar gerisinden geçmesi beklenen kayma kamaları sığ kayma kamaları olarak alınabilmektedir. Bu durumda tasarımın zemin çivili duvar tasarımı şeklinde ilerlemesi toptan göçme analizinde sistemin zemin çivileri ve ankrajlar için ayrı ayrı değerlendirilmesi önerilmektedir. Zemin çivili bölgenin blok olarak hareket edeceği kabulü ile zemin ankrajlarının boyu zemin çivili bölgenin stabilitesini etkileyen ve daha derin bölgelerden geçen kayma kamalarına göre belirlenecektir (Cesur, 2010).



Şekil 41. Çok sıra ankrajlı kompozit duvar kesiti (Byrne vd., 1998)

1.11.5. Değişken Çivi Boyuna Sahip Yapılar

Tasarımda her ne kadar çivi boylarının değişkenliğine bir kısıtlama getirilmiş olsa da servis yükü gözlemleri çivi boylarının özellikle duvarın üst 2/3 veya 3/4'lük bölümünde üniform olması durumunda, duvardaki yer değiştirmelerin en aza indirgeneceğine işaret etmektedir. Duvarın en alt kısmında ise çivi boylarının kısaltılmasına izin verilmektedir. Bu bölgede zemin- çivi etkileşimi maksimum çivi yükünün çivi kafasının yakınına aktarılması anlamına gelmektedir.

En üst çivilerin boylarını kısaltmak, bunların tüm duvar yüksekliği gibi daha büyük zemin kütlelerinin duraylılığına sağlayacakları katkıyı bir bakıma sınırlamak anlamına gelmektedir. En üst sıra çivilerin sağladığı yüzey yer değiştirmelerin denetimi de azaltılmış olacaktır (Demirkoç, 2007).

1.11.6. Değişken Çivi Eğimine Sahip Yapılar

Çivilerin donatı etkisinin artırılması ve duvar yer değiştirmelerinin sınırlandırılması açısından bakıldığında çivilerin olanaklı olduğu sürece yataya yakın biçimde

yerleştirilmesi tercih edilmektedir. Çivilerin yatayla yaptığı açı 15° yi geçmemektedir. Bu değer aynı zamanda yerçekimi veya düşük basınç altında enjeksiyonlama için gereken minimum eğime karşılık gelmektedir. Değişken çivi boyları için, en üst sıradaki çivileri yatayla $20^\circ - 25^\circ$ açı yapacak şekilde yerleştirmek gerektiğinde alt sıralarda bulunan çivilerle etkileşimi önlemek için aralarında düşeyde normalden farklı bir uzaklık bırakılmalıdır (Demirkoç, 2007).

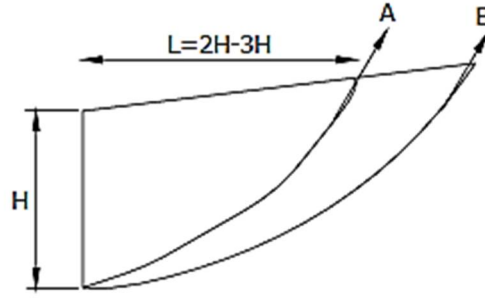
1.11.7. Zemin Sızıntı Suyu Kuvvetleri veya YASS' nin Duvar Tabanına Yakın Olması Durumu

Şev duraylılığı problemlerinde zemin suyu ve ilgili sızıntı kuvvetleri zemin çivisi yapısını duraylılığını büyük ölçüde etkilemektedir. YASS' nin altında zemin çivisi uygulanması genelde önerilmemektedir (Demirkoç, 2007).

1.11.8. Sonsuz Şev Koşulu

Zemin çivili duvarın uzun (sonsuz) bir şevin ucunda yapılması ve bu şev için hesaplanan güvenlik sayısının duvarın kendisi için gerekenden az çıkması durumunda tasarımın yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir. Bunun nedeni; zemin çivili duvarın tasarımında göz önüne alınan olası kayma yüzeylerinin sınırlandırılmaması durumunda tüm şevi kapsayan çok daha büyük göçme zonlarının göz önüne alınması gerekeceğidir. Analiz sonucunda çok uzun, yüksek kapasitedeki çivilerin sonsuz şevin uç kısmındaki bölgeye yerleştirileceği çıkmaktadır. Bu da dayanma yapısı için istenmeyen tarzda bir tasarım olacaktır. Bu tür durumlarda;

- Şevin tüm duraylılığı bağımsız olarak belirlenmeli ve gerekirse başka yöntemlerle iyileştirilmelidir.
- Zemin çivili duvar, olası kayma yüzeyleri alanları duvarın kendi alanına kadar sınırlandırılarak tasarlanmalıdır. Örneğin; olası kayma yüzeyleri amaçlanan duvarın üst noktasından yarma yüksekliğinin 2-3 katı kadar geride olabilir.



Şekil 42. Sonsuz şev koşulu/ Tasarım Yaklaşımı

A türü kayma yüzeyi, duvar arkasında $L \leq (2\sim 3) H$ uzaklığından yüzeye çıkan kayma yüzeyleriyle sınırlandırılmıştır.

B türü kayma yüzeyi, daha derin göçen kayma yüzeylerini içerir ve tüm şevin duraylılığıyla tutarlı bir güvenlik sayısını gerektirmektedir (Demirkoç, 2007).

1.11.9. Sismik Yükler Altında Davranış

Yapılan deneyler zemin çivili duvarların sismik yükler altında güvenli davranabileceğini göstermektedir. FHWA tarafından getirilen öneride, statik tasarımın ötesinde ek tasarımın pik zemin ivmesinin (0.25-0.30) g' den büyük değerler için gerektiği belirtilmektedir (FHWA, 2003).

1.12. Yarma Şevli Duvarların Ön Tasarımı İçin Basitleştirilmiş Tasarım Abakları

Çivi boyunun son tasarımında iterasyondan yararlanılmaktadır. Ünliform zemin şartlarındaki 15° lik çivi eğiminde, kritik olmayan yerleşimlerde güvenlik sayısının (F) SLD için 1.35; LRFD için de direnç faktörünün (ϕ) 0.9 alındığı uygulamalar için abaklar geliştirilmiştir. Boyutsuz olarak kullanılan abaklar kullanılmadan önce aşağıdaki değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu tezde SLD ile tasarım yapıldığı için aşağıda verilen tüm formüller bu yöntemeye aittir.

1.12.1. Geometrik Değişkenler (Arka Şevin Yatayla Yaptığı Açı 'β' ve Duvar Arkasının Düşeyle Yaptığı Açı 'α')

Her biri kendi içinde 3 tane olan 4 farklı takım abak bulunmaktadır. Her takımında 0°, 10°, 20° ve 34°'lik arka şev eğimi için değerler bulunmaktadır. Ara arka şev eğimi değerleri için bu abaklar arasında enterpolasyon yapılabilmektedir. Her arka şev için duvar yüzü eğimi iki farklı açıyla (0° ve 10°) ele alınmıştır. Ara değerler için yine enterpolasyon yapılabilmektedir (Berilgen, 2012).

1.12.2. Dayanım Değişkenleri (Azaltılmış Sürtünme Açısı ϕ_D ve Boyutsuz Kohezyon c_D)

Boyutsuz kohezyon (c_D), zemin kohezyonunun zeminin birim hacim ağırlığı ve yarmanın yüksekliği dikkate alınarak normalize edilmiş bir değerdir.

$$c_D = \frac{c_u}{F_c \gamma H} \quad (36)$$

Burada;

F_c : Zeminin güvenlik sayısı (Ön tahmin için 1.35 alınır.)

c_u : Zeminin kohezyonu

Boyutsuz kohezyon her şev geometrisi için üç farklı parametre olarak görülmektedir. Bu değerler 0.01, 0.03 ve 0.05' tir. Ara değerler için enterpolasyon yapılabilmektedir.

Zeminin güvenlik uygulanmış içsel sürtünme açısı tanjantı aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$\text{tg } \phi_D = \frac{\text{tg } \phi_u}{F_\phi} \quad (37)$$

Burada;

F_ϕ : Zeminin güvenlik sayısı (Ön tahmin için 1.35 alınır)

ϕ_u : Zeminin içsel sürtünme açısı

(Berilgen,2012).

1.12.3. Boyutsuz Çivi Yüğü (T_D)

Uygun abak takımı üzerinde ilk abağın düşey ekseninden boyutsuz çivi yüğü (T_D) bulunmaktadır. Boyutsuz çivi yüğü, azaltılmış nominal çivi dayanımının zeminin birim hacim ağırlığı (γ), şev yüksekliği (H) ve çivi aralıkları (S_V , S_H) dikkate alınarak normalize edilmiş değeridir.

$$T_D = \frac{\alpha_N T_{NN}}{\gamma H S_V S_H} \quad (38)$$

Burada;

T_{NN} : Gerekli nominal çivi tendon dayanımı (kN)

α_N : 0.55 alınması önerilen çivi tendon dayanım faktörü

Duvar arkası eğimine (0° , 10° , 20° , 34°), duvar yüzü eğimine (0° ve 10°), boyutsuz kohezyon (c_D) ve $\tan\phi_D$ değerine göre Şekil 43, 46, 49, 52' den T_D okunmaktadır (Berilgen, 2012).

1.12.4. Ön Çivi Boyutu

Çivinin kesit alanı (A_N) aşağıdaki eşitlik yardımıyla bulunmaktadır.

$$A_N = \frac{T_{NN}}{F_y} \quad (39)$$

F_y : Çelik mukavemetidir, genelde 420 kN/mm^2 alınmaktadır.

Tablo 6. Çivi Boyutları (Berilgen, 2012).

Çivi Tasarım No	Çivi Çapı, in [mm]	Çivi Alanı, in ² [mm ²]
3 [10]	0.375 [9.6]	0.11 [71]
4 [13]	0.500 [12.7]	0.20 [129]
5 [16]	0.625 [15.9]	0.31 [199]
6 [19]	0.750 [19.1]	0.44 [284]
7 [22]	0.875 [22.2]	0.60 [387]
8 [25]	1.000 [25.4]	0.79 [510]
9 [29]	1.128 [28.7]	1.00 [645]
10 [32]	1.270 [32.3]	1.27 [819]
11 [36]	1.410 [35.8]	1.56 [1006]
14 [43]	1.693 [43.0]	2.25 [1452]
18 [57]	2.257 [57.3]	4.00 [2581]

Boyutsuz sıyrılma direnci (Q_D) azaltılmış son sıyrılma direnci (çivinin birim boyundaki kuvvet olarak tanımlanır) olup, zeminin birim hacim ağırlığı ve çivi aralıkları göz önüne alınarak normalize edilmiştir.

$$Q_D = \frac{\alpha_Q Q_U}{\gamma S_V S_H} \quad (40)$$

Burada;

Q_U : Tendonun 1m boyu için taşınabilecek son sıyrılma yükü (deneyle bulunması önerilir.) (kN/m)

α_Q : 0.50 alınması önerilen sıyrılma faktörü

Abak takımlarının ikinci ve üçüncüsü üzerindeki yatay ekseninde T_D/Q_D oranı içinde boyutsuz sıyrılma direnci dahil edilmiştir (Berilgen, 2012).

1.12.5. Ön Çivi Boyu

Q_D değeri ve T_D/Q_D oranı hesaplanır. Duvar arkası eğimine (0° , 10° , 20° , 34°), duvar yüzü eğimine (0° ve 10°), boyutsuz kohezyon (c_D) ve $\tan\phi_D$ değerine göre T_D/Q_D eşitliğine bağlı olarak Şekil 43, 44, 46, 47, 49, 50, 52 ve 53'den L/H okunmaktadır. Yarmanın yüksekliği (H) belli olduğu için ön çivi boyu (L) kolaylıkla bulunmaktadır.

Bazı durumlarda ön boyutlandırma için Tablo 7' den yararlanılabilmektedir (Bruce ve Jewell, 1987).

Tablo 7. Çivili Duvarların Tasarımında Ön Boyutlandırma

Çivi Türü ve Zemin	L/H	DL/S	d^2/S
Granüler zeminlerde enjeksiyonlu çivi	0.5-0.8	0.5-0.6	$(4-8)\times 10^{-4}$
Granüler zeminde çakma çivi	0.5-0.6	0.6-1.1	$(13-19)\times 10^{-4}$
Moren ve Marnda çivi	0.5-1.0	0.15-0.2	$(1-2.5)\times 10^{-4}$

Burada;

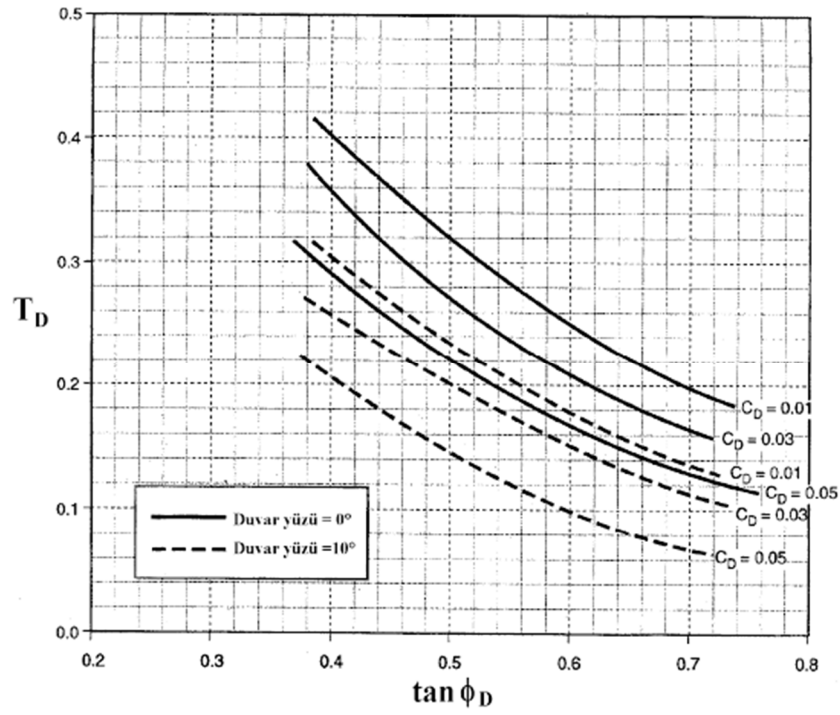
L: Çivi boyu,

H: Duvar yüksekliği,

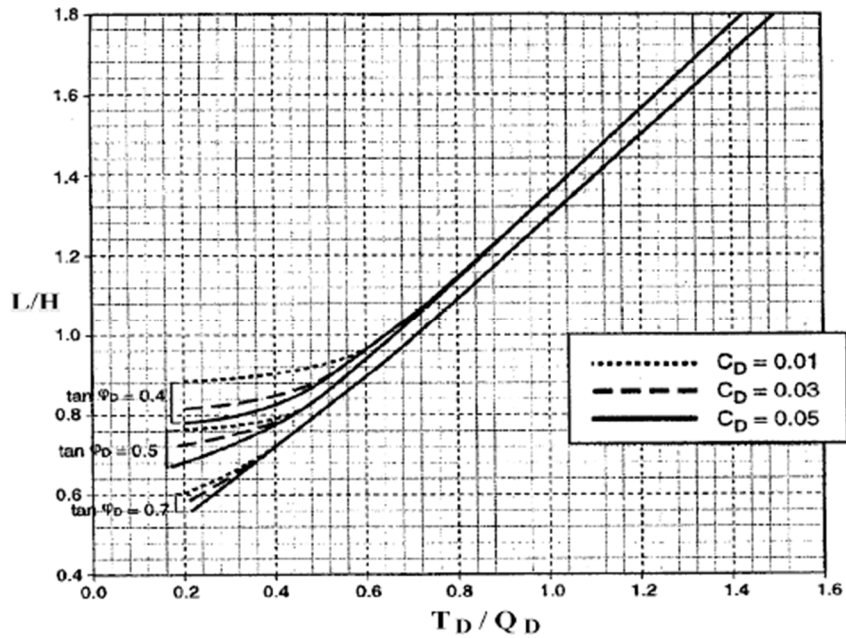
D: Delik çapı,

d: Çivi çapı,

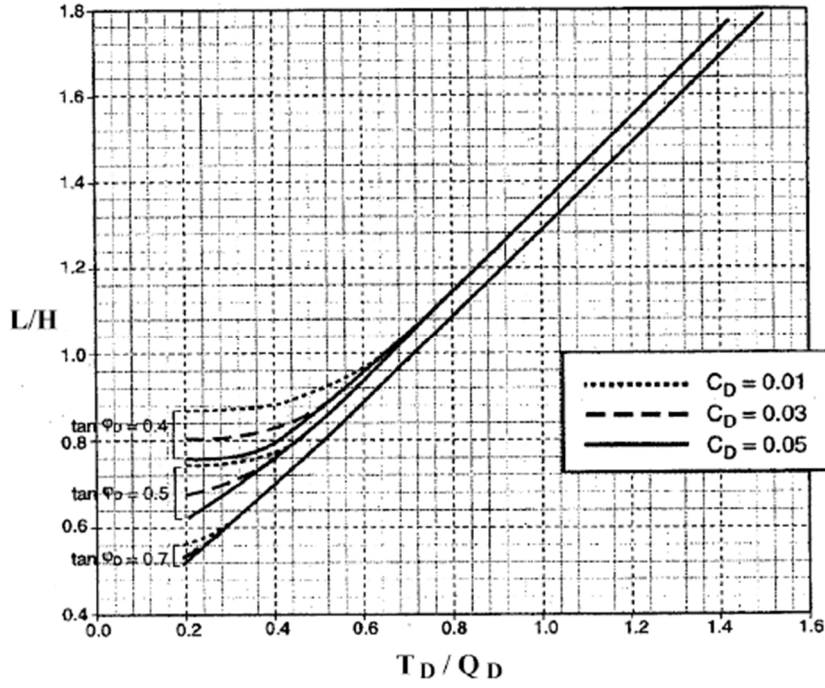
S: Çivi başına düşen alan.



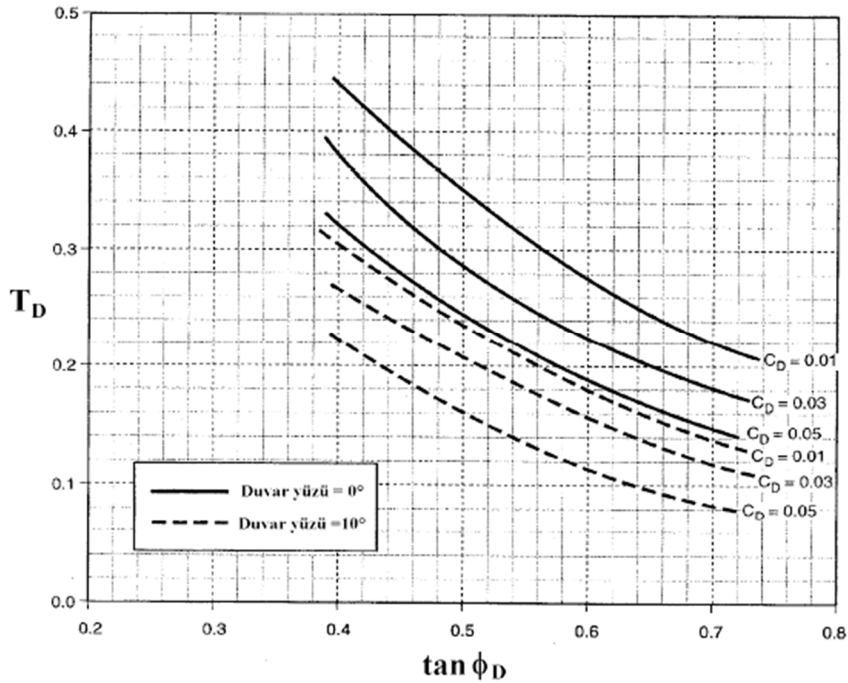
Şekil 43. Ön tasarım abağı 1A / Duvar arkası eğimi = 0° (FHWA, 1998).



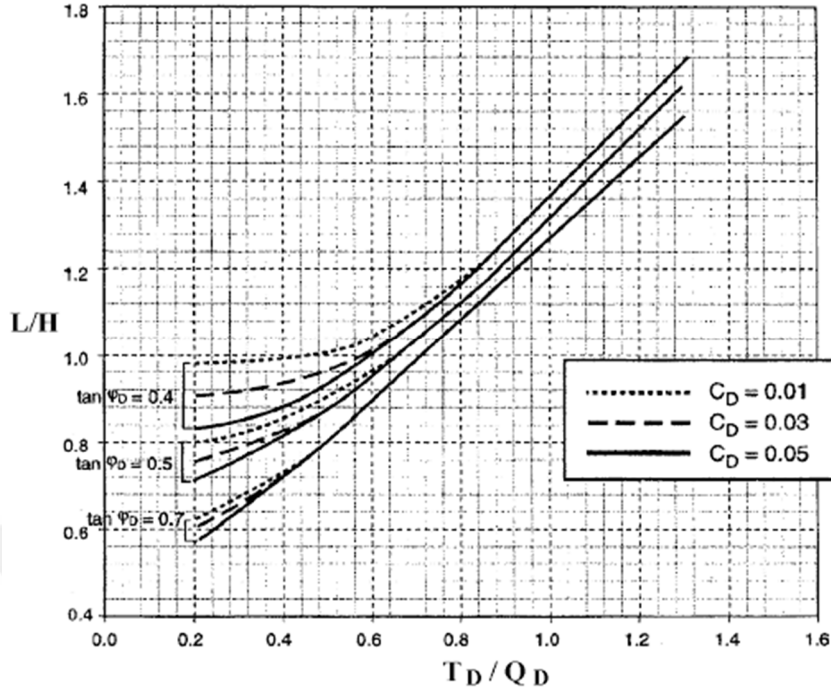
Şekil 44. Ön tasarım abağı 1B / Duvar arkası eğimi = 0° , Duvar yüzü eğimi = 0° (FHWA, 1998).



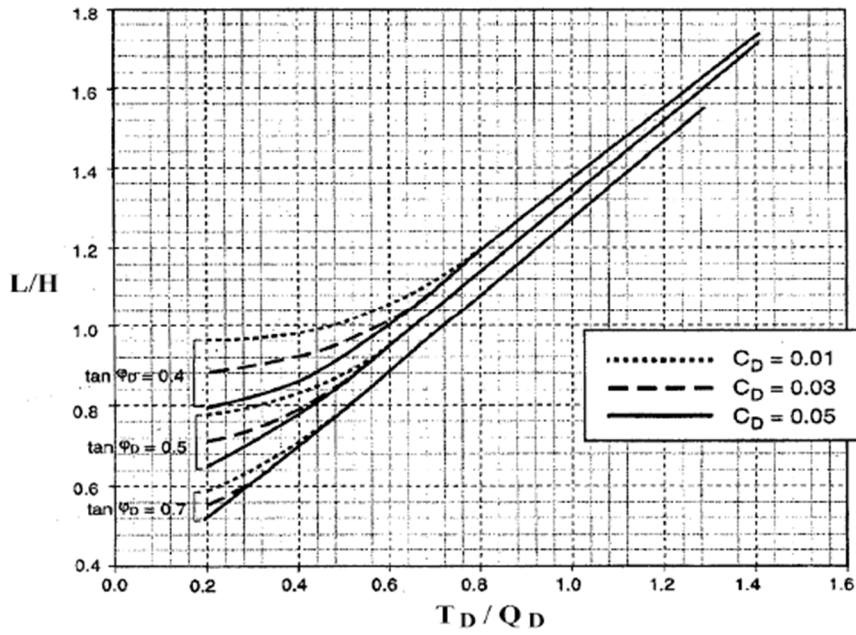
Şekil 45. Ön tasarım abağı 1C / Duvar arkası eğimi = 0° , Duvar yüzü eğimi = 10° (FHWA, 1998).



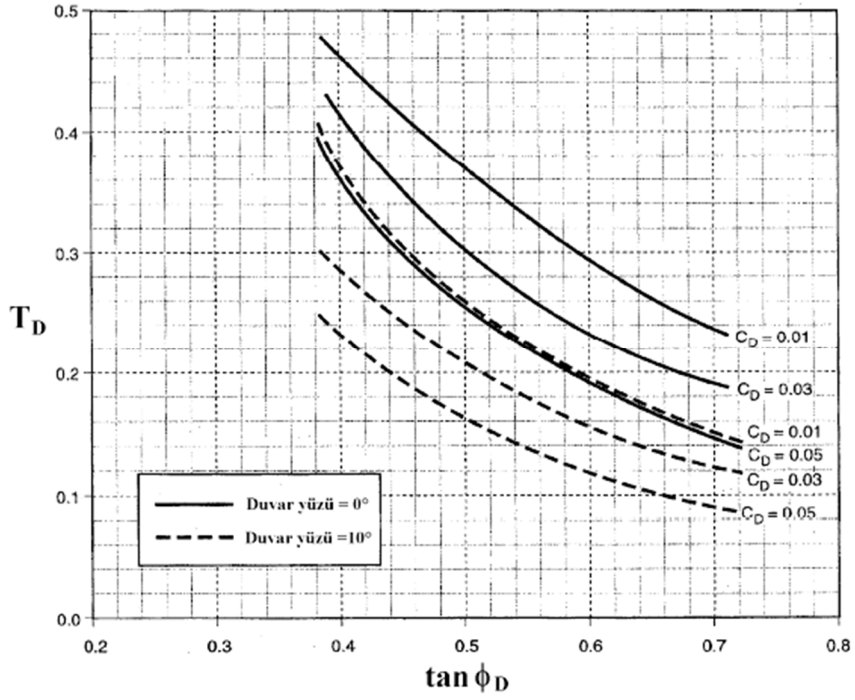
Şekil 46. Ön tasarım abağı 2A / Duvar arkası eğimi = 10° (FHWA, 1998).



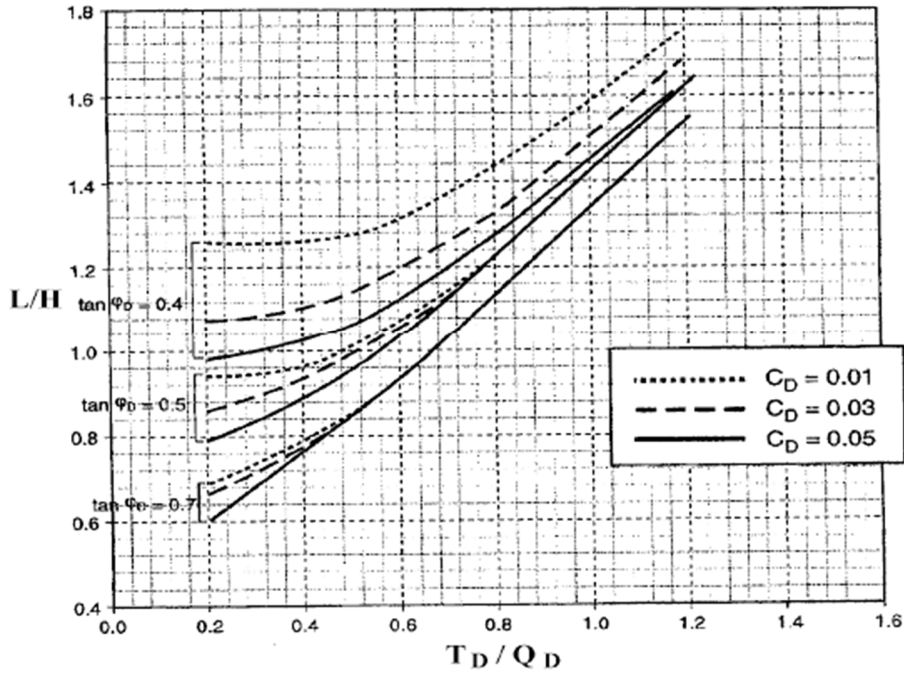
Şekil 47. Ön tasarım abağı 2B / Duvar arkası eğimi = 10° , Duvar yüzü eğimi = 0° (FHWA, 1998).



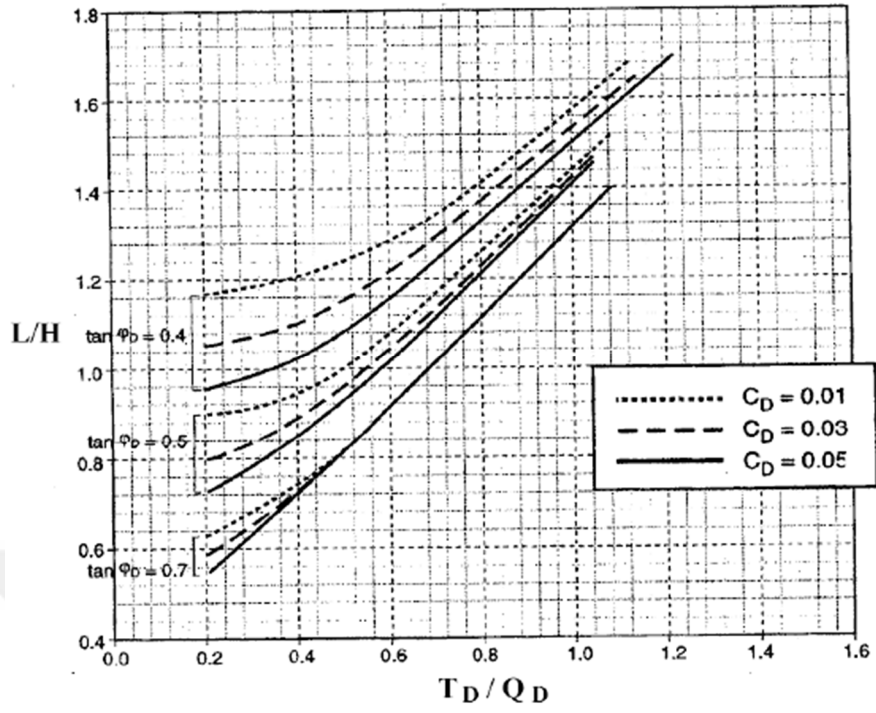
Şekil 48. Ön tasarım abağı 2C / Duvar arkası eğimi = 10° , Duvar yüzü eğimi = 10° (FHWA, 1998).



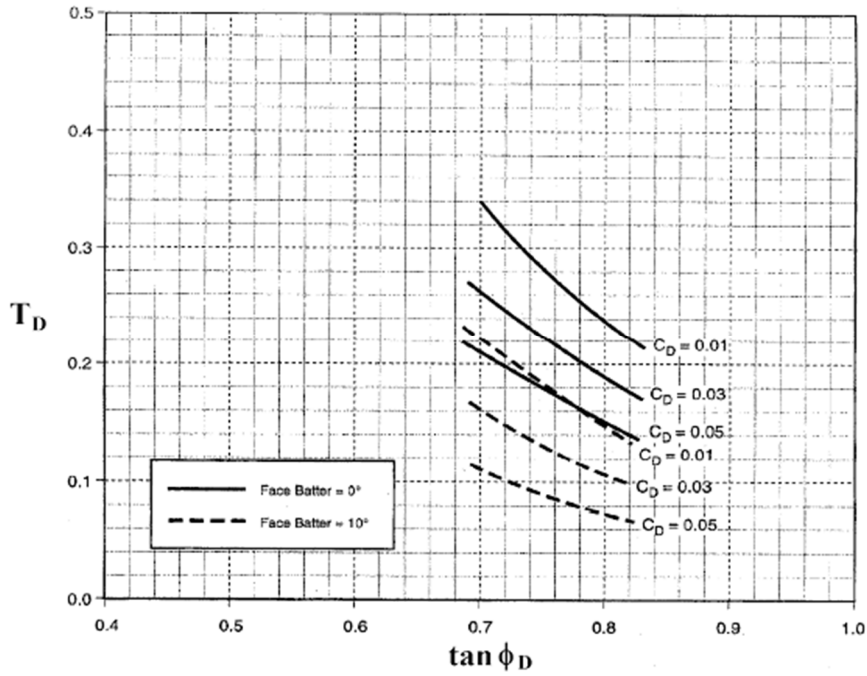
Şekil 49. Ön tasarım abağı 3A / Duvar arkası eğimi = 20° (FHWA, 1998).



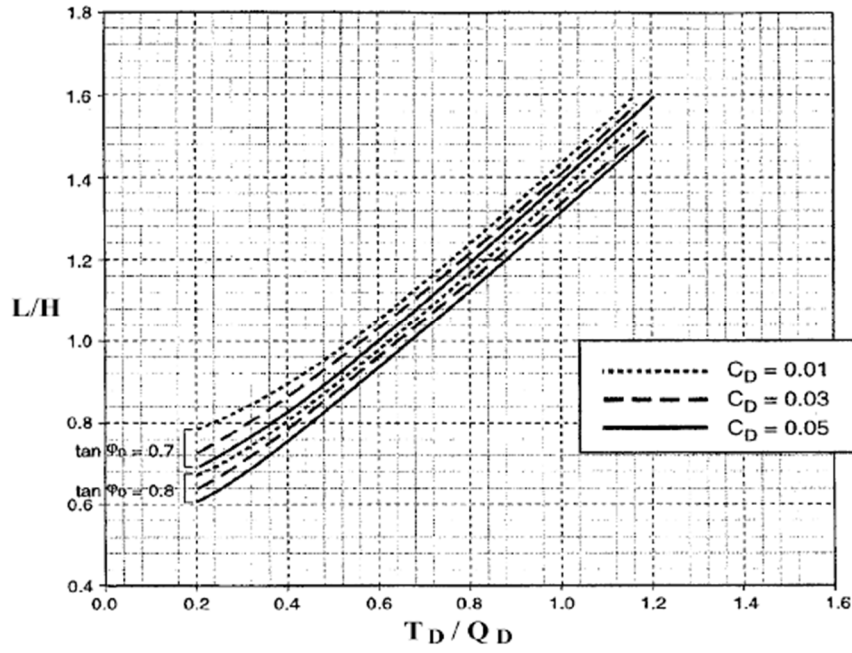
Şekil 50. Ön tasarım abağı 3B / Duvar arkası eğimi = 20°, Duvar yüzü eğimi = 0° (FHWA, 1998).



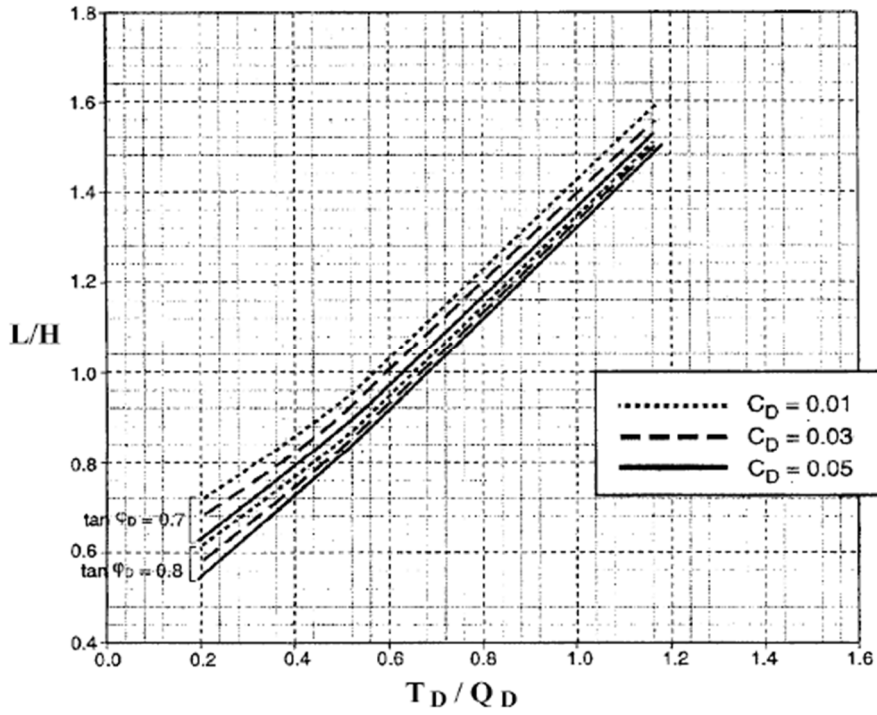
Şekil 51. Ön tasarım abağı 3C / Duvar arkası eğimi = 20° , Duvar yüzü eğimi = 10° (FHWA, 1998).



Şekil 52. Ön tasarım abağı 4A / Duvar arkası eğimi = 34° (FHWA, 1998).



Şekil 53. Ön tasarım abağı 4B / Duvar arkası eğimi = 34° , Duvar yüzü eğimi = 0° (FHWA, 1998).



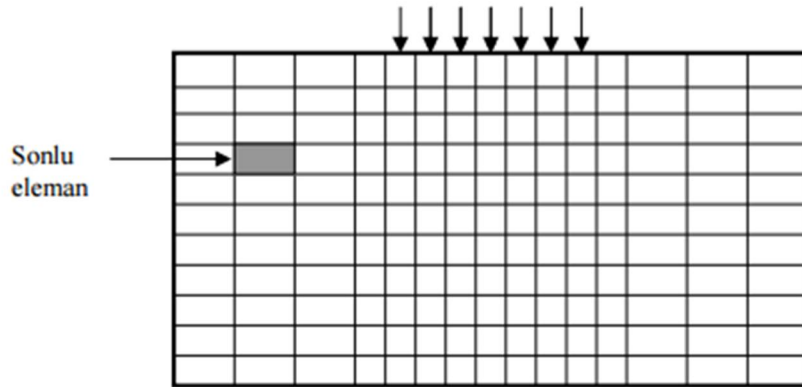
Şekil 54. Ön tasarım abağı 4C / Duvar arkası eğimi = 34° , Duvar yüzü eğimi = 10° (FHWA, 1998)

1.13. Sonlu Elemanlar Analizi

1.13.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Zeminlerin davranışının incelenmesinde, çeşitli teorik ve ampirik yöntemler kullanılmaktadır. Geliştirilen bu yöntemlerde zemin karmaşık yapısı ve birçok etkene bağlı olan davranış özellikleri nedeniyle, lineer-elastik ve homojen bir ortam gibi düşünülmemekte ve basitleştirici kabuller yapılarak çözüme gidilmektedir. Bu yaklaşım, pratik uygulamalarda genellikle yaklaşık sonuçlar vermesine rağmen zeminlerin heterojen yapısı, anizotropi, lineer olmayan, zamana ve ortama bağlı davranışı gibi karmaşık özellikleri nedeniyle gerçekçi çözümlere ulaşılmasına imkan vermemektedir. Bilgisayar teknolojisindeki hızlı ilerleme, diğer mühendislik problemlerinde olduğu gibi, geoteknik problemlerin sayısal yöntemlerle kısa sürede çözümünü olanaklı hale getirmiştir. Bu yöntemlerde, diferansiyel denklemlerle ifade edilen sürekli fiziki sistemlerin davranışı sayısal yöntemlerle analiz edilmektedir.

Geliştirilen bu sayısal yöntemlerden en efektif ve sistematik olanı Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) olarak ortaya çıkmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile sürekli bir sistemi matematiksel olarak modellemek mümkün olmaktadır. Yöntemde, sürekli bir sistem, kendi içinde sonlu sayıda bileşen veya elemanlardan ve bu elemanları birleştiren düğüm noktalarından oluşan ayrık bir sistem olarak modellenmektedir. Yani, sistem sonlu elemanlara bölünerek, denklemler bir eleman için yazılmakta ve integre edilerek sistem denklemleri elde edilmektedir. Sonuçta sürekli bir ortam için göz önüne alınan diferansiyel denklem lineer bir denklem takımına indirgenmektedir (Bildik, 2013).



Şekil 55. Sürekli Bir Sistemin Sonlu Elemanlara Ayrılması

1.13.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Geoteknik Mühendisliği' nde Kullanımı

Sonlu elemanlar yöntemi, herhangi bir lineer-elastik ortama uygulanabilmektedir. Fakat yöntemin geoteknik mühendisliği problemlerinde uygulanması birçok sınırlandırmalar gerektirmekte ve ek iyileştirmeler yapılmaksızın sadece kısıtlı sayıda problemler çözülebilmektedir. Yöntemde malzeme davranışı, toplam gerilme ve şekil değiştirmeler arasındaki değişimlerle ilişkilendirilerek formüle edilirken, geoteknik problemlerinde toplam gerilme tensörü, efektif gerilmeler ve boşluk suyu basınçlarına ayrılmakta ve malzeme davranışı genellikle efektif gerilmeler cinsinden ifade edilmektedir. Geoteknik problemlerin birçoğunda yapı ile zemin etkileşim içerisinde olmaktadır. Buna bağlı olarak, bu tip problemlerin analizinde, yapı ile zemin arasında ara yüzey (interface) kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, lineer-elastik teoriden farklı olarak, doğru bir çözüm elde etmek için daha geniş bir aralıkta sınır koşullarına ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak, sonlu elemanlar yönteminin geoteknik mühendisliğinde gerçekçi bir biçimde uygulanabilmesi için bazı değişiklikler yapmak zorunlu olmaktadır (Potts ve Zdravković, 1999).

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında, sonlu elemanlar analizi, gerçek durumumu modelleyebilmek amacıyla adım adım (aşamalı yükleme, aşamalı kazı) yapılmaktadır. Analizin adımlar halinde gerçekleştirilebilmesi iki avantaj sağlamaktadır:

a) Analizlerde dolgu yerleştirilmesi veya kaldırılması durumunda, geometri her bir adımda değişmektedir. Geometrideki değişim sonlu elemanlar ağına eleman ekleyerek veya kaldırarak modellenabilmektedir.

b) Analizlerde, zemin kütlesi içinde gerilmelerin değişimi sonucu her bir yükleme kademesinde zemin özellikleri değişmektedir.

Geoteknik mühendisliği problemlerinde sonlu elemanlar analizleri sonucunda gerilmeler, yanal ve düşey hareketler, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışı vb. belirlenmektedir. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı non-lineer olduğundan analizlerde bu davranışın modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapımdan önceki başlangıç gerilme durumu, zeminin non-lineer gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri ile, yükleme aşamaları arasındaki bekleme süreleri analizlerde gerçek duruma yakın olarak belirlenmelidir (Kılıç, 2000).

1.13.3. PLAXIS Programı

PLAXIS (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis), değişik geoteknik problemleri için, sonlu elemanlar yöntemiyle, deformasyon ve stabilite analizleri gerçekleştirebilen bir bilgisayar programıdır. İlk olarak 1987 yılında Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından yumuşak zemin üzerindeki nehir dolgularının sonlu elemanlar yöntemi ile kolay bir şekilde analiz edilebilmesi için tasarlanmıştır. Sonraki yıllarda ise, geoteknik mühendisliğinin diğer uygulama alanlarını da kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Program, geoteknik mühendisliği projelerinin tasarımında ihtiyaç duyulan, zemin-yapı etkileşimi, gerilme – şekil değiştirme, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği konularında ve malzeme farklılığı olan durumlarda kullanılabilmekte ve pratikte uygulanabilir sonuçlar vermektedir. Program, geoteknik mühendisliği uygulamalarına yönelik olarak geliştirilmiştir. Analizlerde, problemler 2 boyutlu olarak eksenel simetrik veya düzlem şekil değiştirme geometri koşullarında statik ve dinamik olarak analiz edilmektedir. Programda, malzemenin gerilme deformasyon davranışı lineer olmayan çözüm teknikleri ile modellenmektedir. PLAXIS, çok yönlü ve karmaşık bir yapı arz eden geoteknik uygulamaların analizi için önemli özelliklerle donatılmıştır (Bildik, 2013).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Zemin çivilerinin mühendislik amaçları için kullanımı dünyada ve ülkemizde hızla artan ve kabul gören bir gerçektir. Son zamanlarda şev stabilitesinde ön plana çıkan zemin çivilerinin kullanımı bazen ekonomik nedenlere bazen de zorunlu nedenlere dayanmaktadır. Bu amaçla, çalışmanın bu bölümünde zemin çivili şev stabilizasyonu için projelendirme yöntemi tanıtılmış ve iki farklı rölatif sıklıktaki kum zeminde farklı çivi sayıları, çivi boyları, sürşarj yükleri uygulanarak zemin çivili diyafram duvarlar projelendirilmiş, Plaxis 8.2 sonlu elemanlar programı ile analizleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2.1. Zemin Çivisi Hesap Adımları

Çivili duvarlarda yatay ve düşey çivi aralıkları 1.5 m seçilmiştir. Çiviler zemine 15°'lik açıyla yerleştirilmiştir. Duvar yüksekliği 10 m tasarlanmıştır. Çivi boyları servis yük tasarımına (SLD) göre boyutlandırılmıştır. Kullanılan zemin parametreleri aşağıda tablo olarak verilmiştir. Çivili duvarlarda çiviler arası zemin duraylılığı 20 cm'lik çelik ağla donatılmış püskürtme betonla sağlanmıştır. Bu bölümde $D_r=35\%$ ve $D_r=65\%$ rölatif sıklıklardaki iki ayrı kum zemin için yapılan zemin çivisi ön tasarım hesapları ve sonuçları gösterilmiştir.

2.1.1. Zemin Modelleri ve Malzeme Parametrelerinin Seçimi

Bu çalışmada, zemin çivili kazıların nümerik olarak modellenerek deplasman analizlerinin yapılmasında, farklı rölatif sıklıktaki kum zeminler ve bu kum zeminler için literatürde önerilmiş değerlerden zemin parametreleri seçilmiştir. Nümerik analizlerde incelenen geoteknik modeller $D_r=35\%$ ve $D_r=65\%$ için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Zemin çivili destek sistemleri için nümerik analizler yapılarak, duvarların deplasman değerleri ile toptan göçmeye karşı güvenlik sayıları belirlenmiştir. Böylece iki farklı kum zeminde çivili

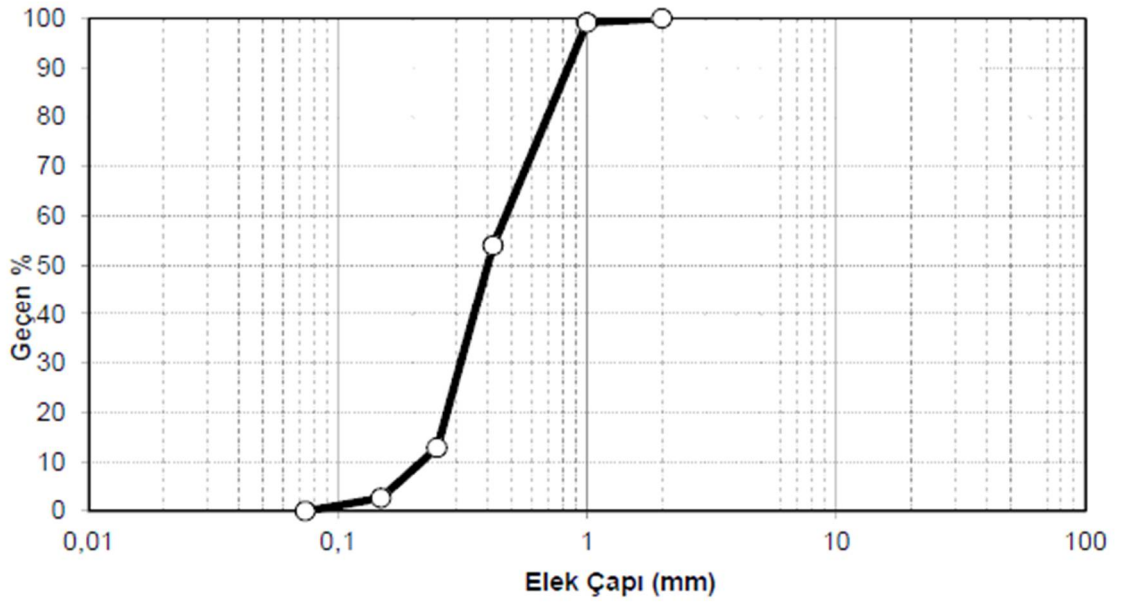
duvar sisteminin benzer zemin koşullarında davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu tezde kullanılan $D_r=35\%$ ve $D_r=65\%$ rölatif sıklıklarındaki kuma ait geoteknik özellikler Bildik (2013)'den alınmış olup, yapılan deneyler ve sonuçları anlatılmıştır.

Deneysel çalışmada, zemin olarak Çukurova Bölgesi, Seyhan Nehri Çakıt Deresi yatağından getirilen kum numuneler kullanılmıştır. Kum numuneler Ç.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölüm Laboratuvarı'nda ASTM (American Standards of Testing Materials) Standartlarına göre 18 No'lu (1 mm çaplı) ve 200 No'lu (0.074 mm çaplı) eleklerden yıkanarak elenmiştir. Eleme işlemi sonunda, dane çapı dağılımı elde edilmiş ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre dane çapı dağılım eğrisinden, zemin sınıfı, kötü derecelenmiş ince ve temiz kum (SP) olarak bulunmuştur. Elek Analizi deney sonuçları Tablo 8'de verilmiştir (Bildik, 2013).

Tablo 8. Elek analiz sonuçları (Bildik, 2013).

Granülometri Parametreleri	Birim	Değer
Kaba kum yüzdesi	%	0.0
Orta kum yüzdesi	%	45.90
İnce kum yüzdesi	%	54.10
Efektif dane çapı, D_{10}	mm	0.20
D_{30}	mm	0.30
D_{60}	mm	0.50
Üniformluk katsayısı, C_u	-	2.50
Derecelenme katsayısı, C_c	-	0.90
Zemin sınıfı	-	SP



Şekil 56. Deneysel olarak kullanılan kumun dane çapı dağılım eğrisi (Bildik,2013).

Deneysel kumunun dane birim hacim ağırlığını belirlemek için yapılan piknometre deneyi sonucu $\gamma_s=26.8 \text{ kN/m}^3$ olarak elde edilmiştir.

Kum zeminlerde, zeminin sıkılık durumunu yansıtan sıkılık derecesi (D_r), boşluk oranı cinsinden,

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (41)$$

birim hacim ağırlık cinsinden

$$D_r = \frac{\gamma_{k\max}}{\gamma_k} \times \frac{\gamma_k - \gamma_{k\min}}{\gamma_{k\max} - \gamma_{k\min}} \quad (42)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, e_{\max} ve e_{\min} sırasıyla zeminin en gevşek ve en sıkı durumundaki boşluk oranları, e zeminin rölatif sıkılığının belirlenmek istendiği durumundaki boşluk oranını göstermektedir. $\gamma_{k\max}$ ve $\gamma_{k\min}$ maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlığı, γ_k ise, rölatif sıkılığının belirlenmek istendiği durumundaki kuru birim hacim ağırlığıdır. Kohezyonsuz zeminler, D_r değerlerine göre sınıflandırılmaktadırlar.

Tablo 9. Kohezyonsuz zeminlerde sıklık durumu (Uzuner, 2007)

Rölatif sıklık (D_r),%	Sıklık durumu
0-15	Çok gevşek
15-35	Gevşek
35-65	Orta sıkı
65-85	Sıkı
85-100	Çok sıkı

Deneyleerde kullanılan kumun kayma mukavemetini belirlemek amacıyla kum numuneler üzerinde kesme kutusu ve konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Kum numuneler, 6×6 cm² boyutlarındaki kare kesitli kesme kutusuna yüksekliği 38 mm ve sıklık derecesi D_r =%35 ve D_r =%65 olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deneyleerde kum numuneler, σ_1 =30 kPa, 60 kPa ve 120 kPa normal gerilmeler altında yatay yönde kesmeye tabi tutulmuştur. Gevşek zemin için deney kumunun kayma mukavemet açısı ϕ =39.05° ve kohezyon değeri c =0 kN/m² olarak bulunmuştur. Orta sıkı zemin için kayma mukavemet açısı ϕ =42.28° ve kohezyon değeri c =0 kN/m² olarak bulunmuştur (Bildik, 2013).

D_r =%35 ve D_r =%65 sıklık derecelerinde hazırlanan kum numuneler üzerinde, konsolidasyonlu – drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneyleerde numunelere σ_3 =100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa değerlerinde hücre basınçları uygulanmıştır. Üç eksenli basınç deneyleerinden D_r =%35 sıklık durumu için kayma mukavemeti açısı ϕ =39° ve kohezyon değeri c =0 kN/m² olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde D_r =%65 sıklık durumu için kayma mukavemeti açısı ϕ =41.5° ve kohezyon değeri c =0 kN/m² olarak elde edilmiştir. Programda kohezyon değerinin c =0 alınması durumunda analizlerde formülasyondan dolayı sıkıntılar doğabileceği ve bu yüzden c değerinin en az 0.2 kN/m² den büyük alınması önerilmektedir. Kohezyon değeri olarak c =0.5kN/m² değeri seçilmiştir. (Bildik, 2013).

PLAXIS 8.2 sonlu elemanlar formülasyonunda deplasman (yerdeğiştirme)yöntemi kullanılmıştır. Deplasmanların esas bilinmeyen olarak kabul edildiği, sürekli ortam birçok elemana ayrılmaktadır. Sonlu elemanlar ağının oluşturulmasında üçgen elemanlar

kullanılmıştır. Bu elemanlar 6 veya 15 düğüm noktalı olarak seçilebilmektedir. Bu tezde 15 düğüm noktalı analiz yapılmıştır.

PLAXIS' de zemin ve diğer ortamların davranışını modellemek için 6 farklı model kullanılmaktadır. Bu modeller;

- Lineer Elastik Model (LE)
- Mohr-Coulomb Model (MC)
- Jointed-Rock Model (JR)
- Soft Soil Model (SS)
- Soft Soil Creep Model (SSC)
- Hardening Soil Model (HS)' dir.

Bu tezde Hardening Soil Model'e göre analizler gerçekleştirilmiştir. Hardening Soil modeli, farklı tiplerdeki yumuşak ve sert zeminlerin davranışını modellemekte kullanılan bir zemin modelidir. HS model gerilme bağımlı rijitlik modülünü dikkate almaktadır. Diğer bir deyişle, zemin rijitliği basınçla beraber artmaktadır. HS model parametrelerini bulmak için $D_r=35\%$ ve $D_r=65\%$ sıklık oranlarında hazırlanan deney kumu üzerinde CD-üç eksenli basınç deneyleri Bildik tarafından yapılmıştır.

Modelin bazı temel karakteristik özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Gerilme bağımlı rijitlik (m),
- Deviatörük yükleme nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar (E_{50}^{ref}),
- Sıkışma nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar (E_{oed}^{ref}),
- Elastik boşaltma/yükleme (E_{ur}^{ref}, ν_{ur}),
- Mohr-Coulomb modeline göre göçme (c, ϕ, ψ parametreleri).

HS modelde, referans basınç değeriyle, p^{ref} , tanımlanan üç eksenli yükleme rijitliği, E_{50} , kullanılmaktadır. Analizlerde, programda default olarak verilen $p^{ref}=100\text{kN/m}^2$ değeri kullanılmış ve üç eksenli yükleme rijitliği, E_{50} , değeri buna göre hesaplanmıştır. Burada E_{50}^{ref} parametresi ilk yükleme sırasındaki gerilmeye bağlı rijitlik modülüdür.

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma_3' \sin \phi}{c \cos \phi - p^{\text{ref}} \sin \phi} \right)^m \quad (43)$$

Buradaki E_{50}^{ref} , referans çevre basıncı, p^{ref} , değerine karşılık gelen referans rijitlik modülüdür. Rijitlik modülü, üç eksenli basınç deneyindeki çevre basıncı olan küçük asal gerilme, σ_3' , değerine bağlıdır. Basınç olması nedeniyle σ_3' değerinin işareti negatiftir. Modelde gerilme seviyesi ise üs değeri m ile kontrol edilmektedir. Göçme anındaki deviatörük gerilme, q_f , ve deviatörük gerilmenin asimptot kaldığı q_a değeri modelde aşağıdaki bağıntılarla tanımlanmaktadır:

$$q_f = (c \cot \phi - \sigma_3') \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (44)$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (45)$$

q_f değeri, c ve ϕ değerleri kullanılarak Mohr-Coulomb göçme kriterinden hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, $q = q_f$ olduğunda Mohr-Coulomb modeline göre göçme meydana gelmekte ve tam plastik akma oluşur. q_f ve q_a arasındaki oran ise, göçme oranı, R_f , olarak tanımlanmaktadır. R_f değerinin her zaman için 1'den küçük olduğu açıkça görülmektedir.

Modelde boşaltma-yükleme rijitlik modülü için ise, aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır:

$$E_{\text{ur}} = E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma_3' \sin \phi}{c \cos \phi + p^{\text{ref}} \sin \phi} \right)^m \quad (46)$$

Ayrıca analizlerde kullanılan, üç eksenli boşaltma-yükleme rijitliği, E_{ur} ve ödometre rijitliği E_{oed} , değerleri, PLAXIS tarafından önerilen $E_{oed}=E_{50}$ ve $E_{ur}=3E_{50}$ bağıntıları kurularak elde edilmektedir.

E_{ur}^{ref} , referans çevre basıncı, p^{ref} , değerindeki referans Young modülüdür.

HS modelde, zeminin gerilme bağımlılığının miktarını ifade etmek için, gerilme seviyesine bağlı rijitlik üs değeri, m , parametresi kullanılmaktadır. Janbu (1963), m değerlerinin Norveç kumu ve silti için 0.50 civarında, Von Soos (1980) ise $0.50 < m < 1.00$ aralığında olduğunu ifade etmişlerdir. Analizlerde programda default olarak verilen $m=0.50$ değeri kullanılmıştır.

Sınır koşulları olarak, modele PLAXIS'de mevcut standart sınır koşulları uygulanmıştır. Standart sınır koşullarında, geometrik modelin tabanında hem düşey hem yatay deplasmanlar engellenmekte ($u_x=0$, $u_y=0$), geometrik modelin düşey kenarlarında ise, sadece düşey harekete izin verilmektedir ($u_x=0$, $u_y=serbest$). Bu sınır koşulları geoteknik problemlerin birçoğunda geçerli olmaktadır.

Ayrıca güvenlik faktörünün hesaplanması amacıyla geliştirilmiş Phi-c reduction seçeneği kullanılarak zemin mukavemet parametrelerinin (ϕ ve c) değerleri kademeli olarak azaltılarak göçme analizi yapılabilmektedir.

2.1.2. Zemin, Duvar ve Çivi Parametrelerinin Tanımlanması

Zemin çivili destek sistemlerinin karşılaştırılması amacıyla gerçekleştirilen analizlerde incelenen iki farklı rölatif sıklıktaki kum zemin için parametreler seçilmiştir.

$D_r=35\%$ ve $D_r=65\%$ için deneylerle elde edilen sonuçlar Tablo 10 ve Tablo 11'de sunulmaktadır.

Tablo 10. Analizlerde kullanılan $D_r=35\%$ için zemin özellikleri (Bildik,2013)

Dr=35			
Parametre adı	Simge	Birimi	Değeri
Birim hacim ağırlığı	γ_n	[kN/m ³]	15.4
Üç eksenli yükleme rijitliği	E_{50}	[kN/m ²]	21600
Ödometre yükleme rijitliği	E_{oed}	[kN/m ²]	21600
Üç eksenli boşaltma-yükleme rijitliği	E_{ur}	[kN/m ²]	64800
Kohezyon	c	[kN/m ²]	0.50
Kayma mukavemet açısı	Φ	[°]	39
Poisson oranı	N	-	0.25
Referans basınç değeri	p_{ref}	[kN/m ²]	100
Göçme oranı	R_f	-	0.90
Dilatasyon açısı	Ψ	[°]	9
Zemin basıncı katsayısı	K_0	-	0.37
Gerilme seviyesine bağlı rijitlik için üs değeri	m	-	0.50

$D_r=35\%$ rölaf sıklıktaki kum zeminde $c=0.50$ kN/m² ve $\phi=39^\circ$ olarak alınmıştır.

Tablo 11. Analizlerde kullanılan $D_r=65\%$ için zemin özellikleri (Bildik,2013)

Dr=65			
Parametre adı	Simge	Birimi	Değeri
Birim hacim ağırlığı	γ_n	[kN/m ³]	17.0
Üç eksenli yükleme rijitliği	E_{50}	[kN/m ²]	28000
Ödometre yükleme rijitliği	E_{oed}	[kN/m ²]	28000
Üç eksenli boşaltma-yükleme rijitliği	E_{ur}	[kN/m ²]	84000
Kohezyon	c	[kN/m ²]	0.50
Kayma mukavemet açısı	ϕ	[°]	41.5

Tablo 11' in devamı

Poisson oranı	ν	-	0.25
Referans basınç değeri	p_{ref}	[kN/m ²]	100
Göçme oranı	R_f	-	0.90
Dilatasyon açısı	ψ	[°]	11.5
Zemin basıncı katsayısı	K_0	-	0.33
Gerilme seviyesine bağlı rijitlik için üs değeri	m	-	0.50

$D_r = 65\%$ rölatif sıklıktaki kum zeminde $c = 0.50$ kN/m² ve $\phi = 41.5^\circ$ olarak alınmıştır.

Bu tezde seçilen diyafram duvar ve zemin çivisine ait malzeme özellikleri Tablo 12 ve Tablo 13' de sunulmuştur.

Tablo 12. Analizlerde kullanılan duvar özellikleri

Parametre adı	Simge	Birimi	Değeri
Duvar kalınlığı	d	m	0.20
Duvar yüksekliği	H	m	10
Elastisite modülü	E	kPa	30.000.000
Ağırlık modülü	EA	kN/m	6.000.000
Rijitlik modülü	EI	kNm ² /m	20.000
Duvarın 1 metresinin ağırlığı	w	kN/m/m	2.80
Poisson oranı	ν		0.15

Tablo 13. Analizlerde kullanılan çivi özellikleri

Parametre adı	Parametre	Birimi	Değeri
Elastisite modülü	E	kPa	30.000.000
Ağırlık modülü	EA	kN/m	235.500

2.1.3. Zemin Çivisi Destekli Kazılarda Çivi Tasarımı ve Analizleri

Zemin çivili destekleme sistemi önce klasik analiz yöntemleri ile projelendirilmiş, daha sonra tasarlanan sistemlerin deformasyon davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Derin kazıların zemin çivisi ile desteklenmesi hesap adımları ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Çalışma kapsamında seçilen derin kazı modellerinin nümerik analizlerinin yapılabilmesi için öncelikle anlatıldığı üzere Servis Yük Tasarımı (SLD) yöntemine göre çivi boyları hesaplanmıştır. Herbir model için zemin çivilerinin adedi, boyu ve aralıkları belirlendikten sonra PLAXIS 8.2 programında her kesit nümerik olarak modellenmiş ve deformasyon ve stabilite analizleri yapılmıştır. Bu analizlerden toplam, yatay ve düşey yerdeğiştirmeler ile toptan göçme durumundaki güvenlik sayıları belirlenmiştir. Nümerik analizlerde perde yüzeyleri geçirimsiz olarak alınmıştır. Zemin taneleri ile perde yüzeyi arasında sürtünmeyi modelleyebilmek için ara yüzey elemanları kullanılmıştır. PLAXIS 8.2 ile yapılan sonlu elemanlar analizlerinde drenajsız malzeme parametreleri kullanılmıştır. Programda 15 düğüm noktalı sonlu eleman ağı seçilmiştir ve geometrik modeller yaklaşık 350 sonlu elemana bölünmüştür. Zemin çivilerinin tasarımı geogrid malzeme parametresi kullanılarak yapılmıştır. Modellenen destek sistemleri çivisiz, 2 çivili, 4 çivili ve 6 çivili destek sistemleri olarak tasarlanmıştır. Her destek sisteminde yüksüz ve 50 kN/m², 100 kN/m², 150 kN/m² yükler altında analizler gerçekleştirilmiştir.

2.1.4. Zemin Çivisi Hesap Adımları

10 m yüksekliğinde çivili duvar sistemlerinde çiviler arası zemin duraylılığı 20 cm'lik çelik ağı ile donatılan püskürtme beton ile sağlanmıştır. Duvar arkası eğimi $\alpha=0^\circ$ ve duvar yüzü eğimi $\beta=0^\circ$ olarak tasarlanmıştır. Yatay ve düşey çivi aralıkları $S_V=S_H=1.5$ m seçilmiştir. Yüzeyde çivi şekilleri üniformdur. Çiviler zemine 15° 'lik açı ile yerleştirilmiştir. Çivi boyları Servis Yük Tasarımına (SLD) göre boyutlandırılmıştır. Kullanılan zemin malzeme parametreleri Tablo 10 ve Tablo 11' de verilmiştir. Ön tasarımlar sonucu elde edilen hesap sonuçları Tablo 14' de ve çivi boyları ise Tablo 15' de sunulmuştur.

Tablo 14. H=10 m için model çivinin ön tasarım hesap değerleri

Zemin türü	c_D	$tg\phi_D$	T_D	T_{NN} (kN)	A_N (mm ²)	Çivi çapı(mm)	Q_u (kN/m)	Q_D	T_D/Q_D	L/H
Dr=%35 (kum)	0.01	0.60	0.25	157.5	562.5	29	50	0.226	1.106	1.38
Dr=%65 (kum)	0.01	0.65	0.22	153	546	29	80	0.328	0.67	0.99

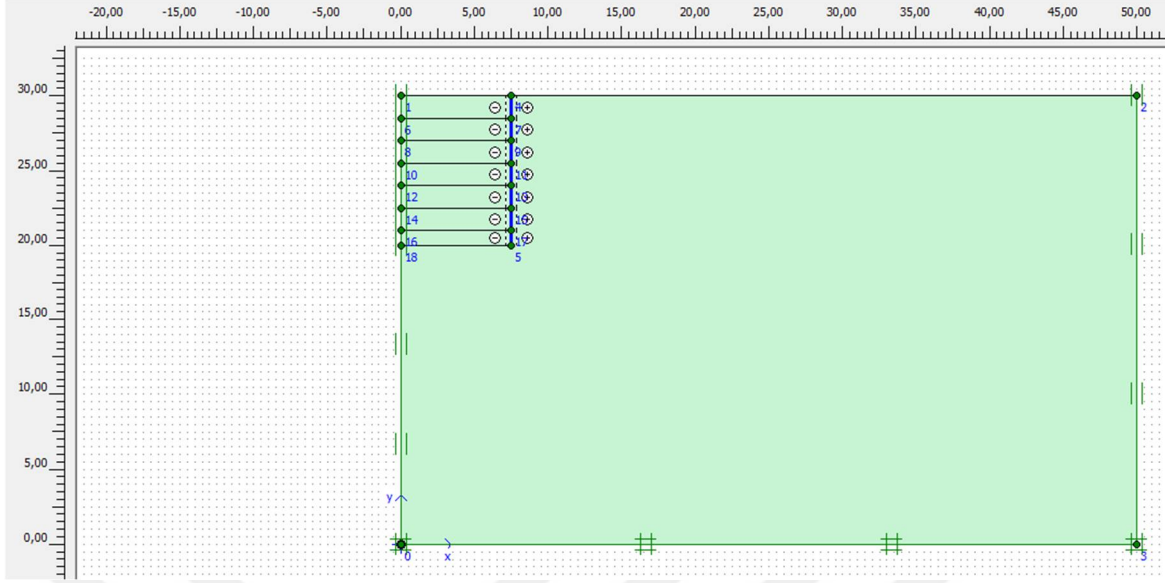
Tablo 15. Ön tasarımda hesaplanan çivi boyları

SLD'ye göre Dr=%35 için hesaplanan çivi boyu	$L_1 = 14$ m
SLD'ye göre Dr=%65 için hesaplanan çivi boyu	$L_2 = 10$ m

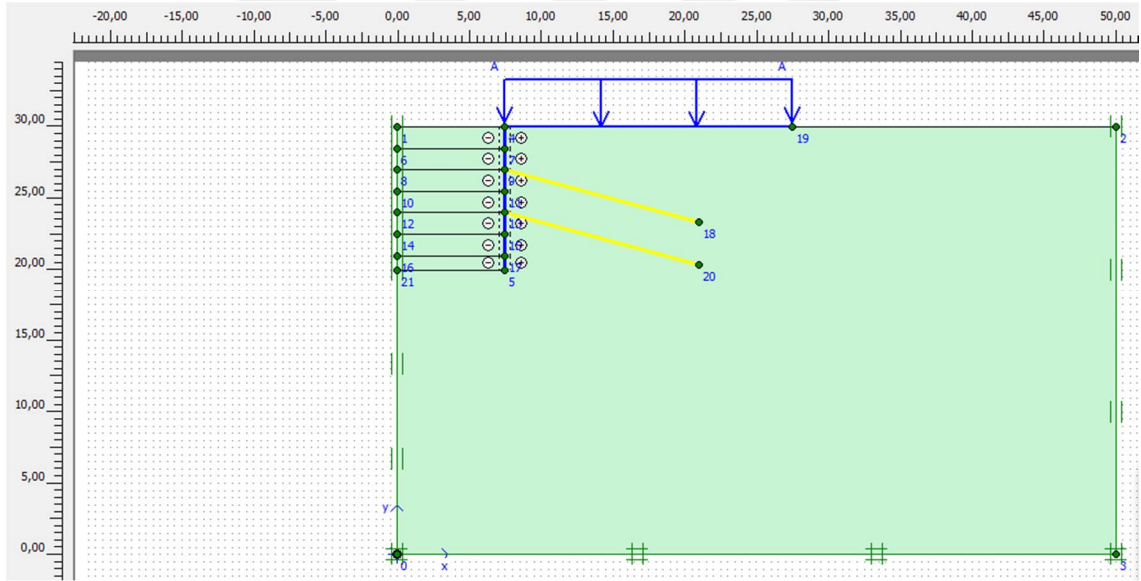
2.1.5. Zemin Çivili Destek Sistemlerinin Nümerik Analizi

İki farklı rölatif sıklıkta tasarlanan zemin modelleri için zemin çivilerinin adedi, boyu ve aralıkları belirlendikten sonra PLAXIS 8.2 Programı kullanılarak herbir kesit nümerik olarak modellenmiş ve analizler yapılmıştır.

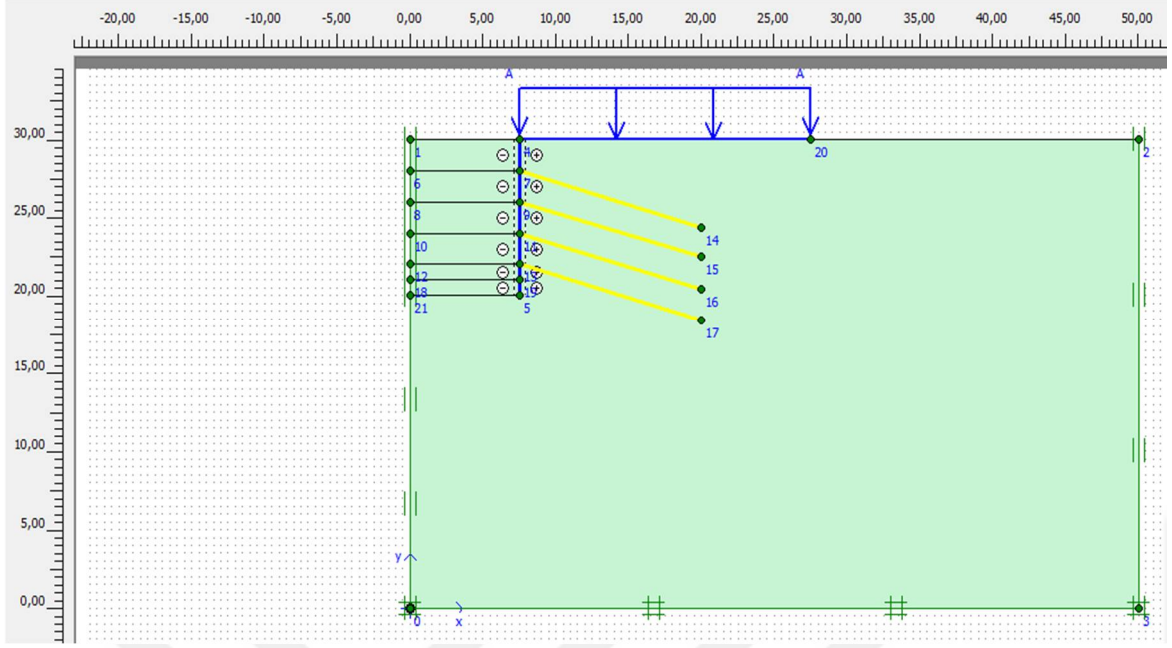
Analizlerde ilk olarak zeminin kendi ağırlığı sebebiyle oluşan deplasmanlar hesaplanarak sıfırlanmıştır. Sonra diyafram duvar yerleştirilmiştir. Duvarın önündeki zemin aşama aşama kaldırılarak zemin çivileri yerleştirilmiş ve deformasyon analizleri yapılmıştır. Şekil 57 , Şekil 58, Şekil 59 ve Şekil 60'da nümerik analizler için sonlu elemanlar programında tasarlanan modeller verilmiştir.



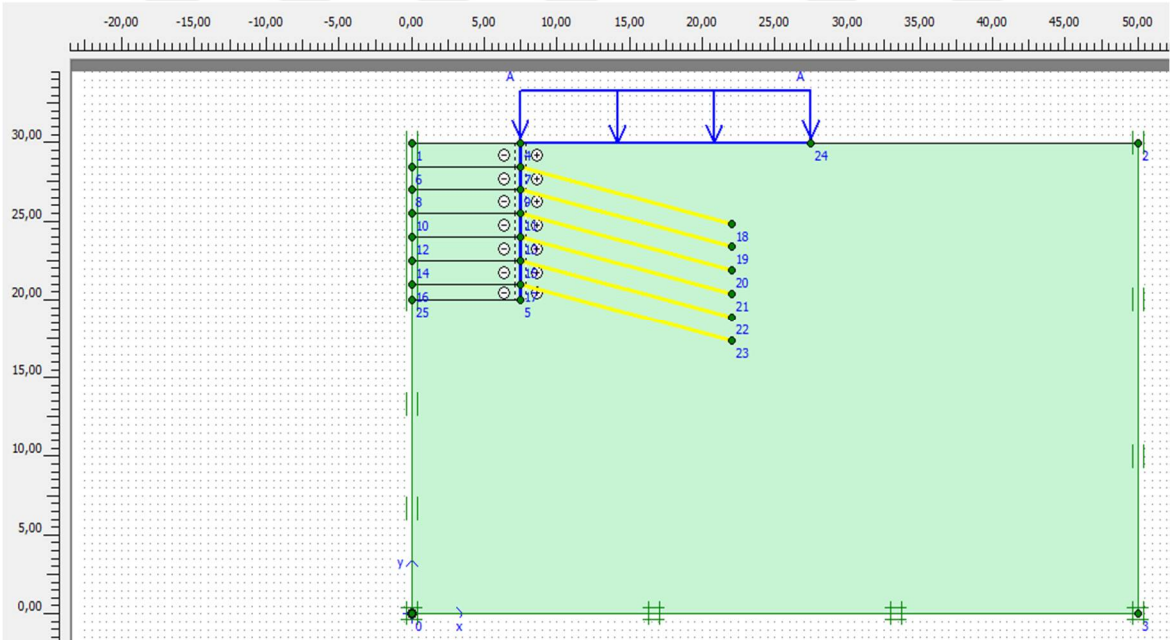
Şekil 57. Çivisiz ve yüksüz durum için nümerik model



Şekil 58. İki çivili durum için nümerik model



Şekil 59. Dört çivili durum için nümerik model

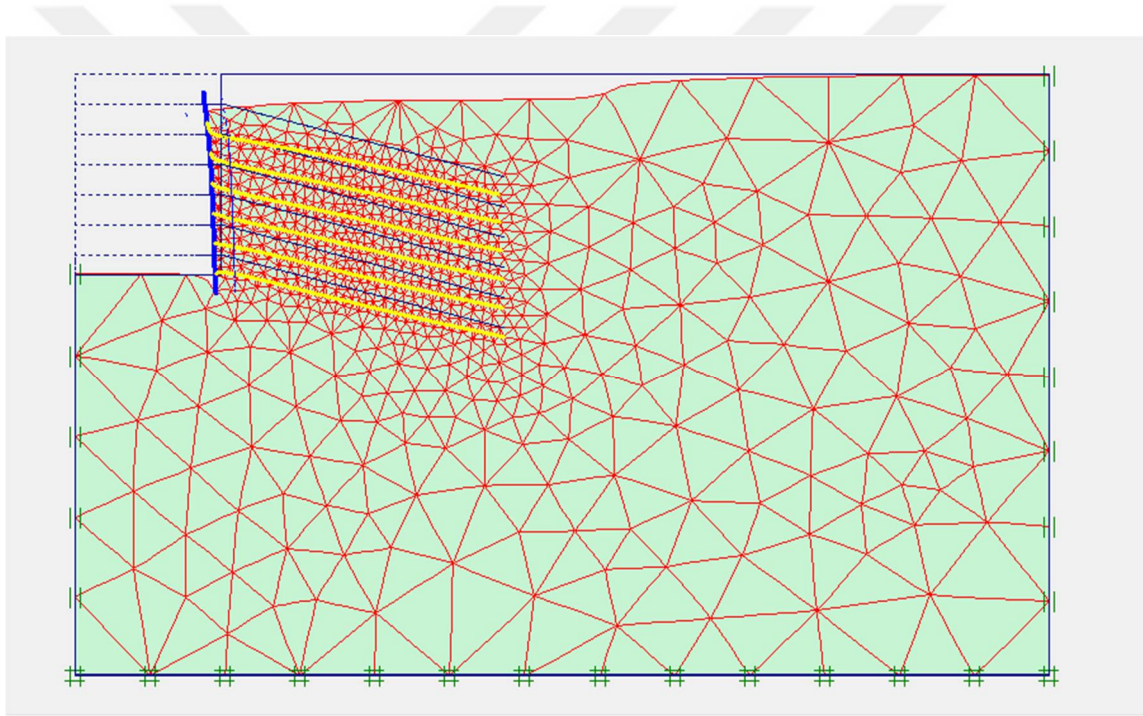


Şekil 60. Altı çivili durum için nümerik model

İlk olarak çivisiz ve yüksüz sistem, daha sonra iki, dört, altı zemin çivili destek sistemleri modellenmiştir. Çivili sistemlerde yüksüz ve 50kN/m^2 , 100kN/m^2 ve 150kN/m^2 yükler uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir.

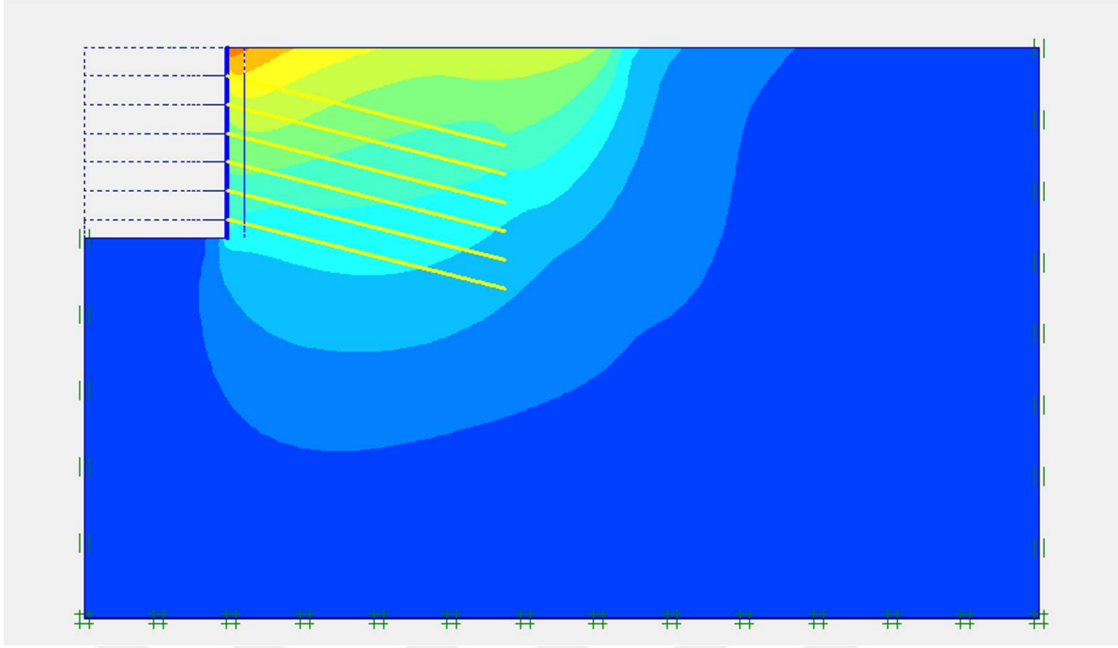
Kazı işlemi tamamlandıktan sonraki deforme olmuş sonlu elemanlar ağı ve meydana gelen yatay yerdeğiştirme değerleri, düşey yerdeğiştirme değerleri ve toplam yerdeğiştirme değerleri sunulmaktadır.

$D_r=35\%$ rölatif sıkılıktaki zeminde altı çivili sistem için hazırlanan modeller için nümerik analiz sonuçları aşağıda sunulmaktadır.



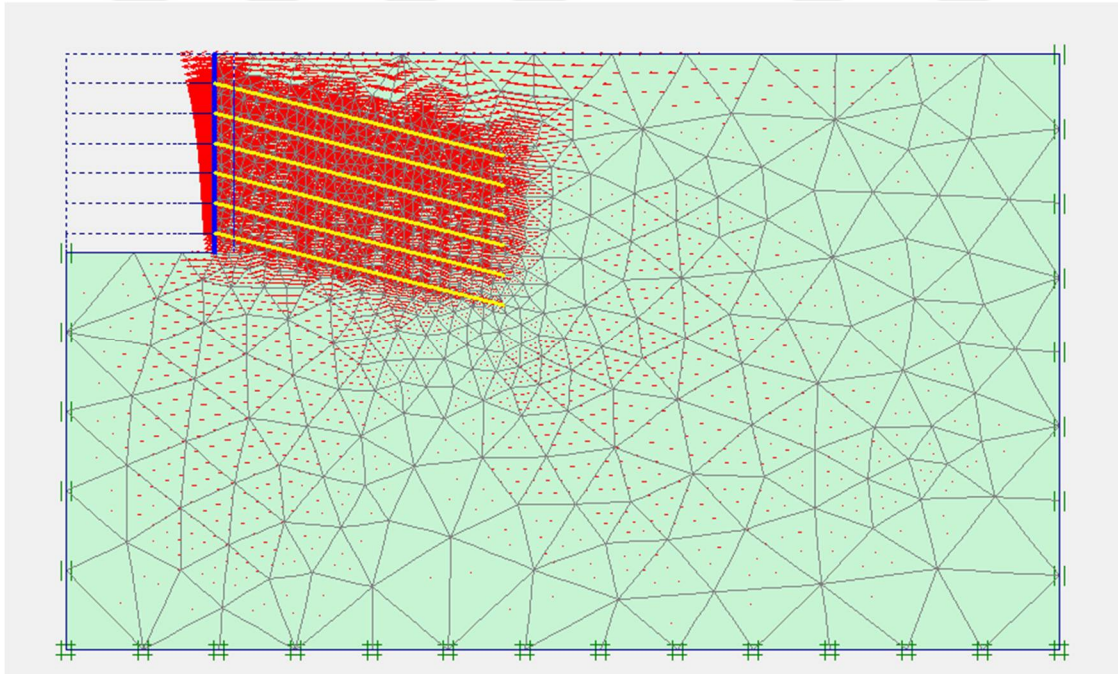
$$\delta_{\text{maksimum}}=201.17 \times 10^{-3}\text{m}$$

Şekil 61. $D_r=35\%$ zeminde altı zemin çivili modelde deforme olmuş meshler



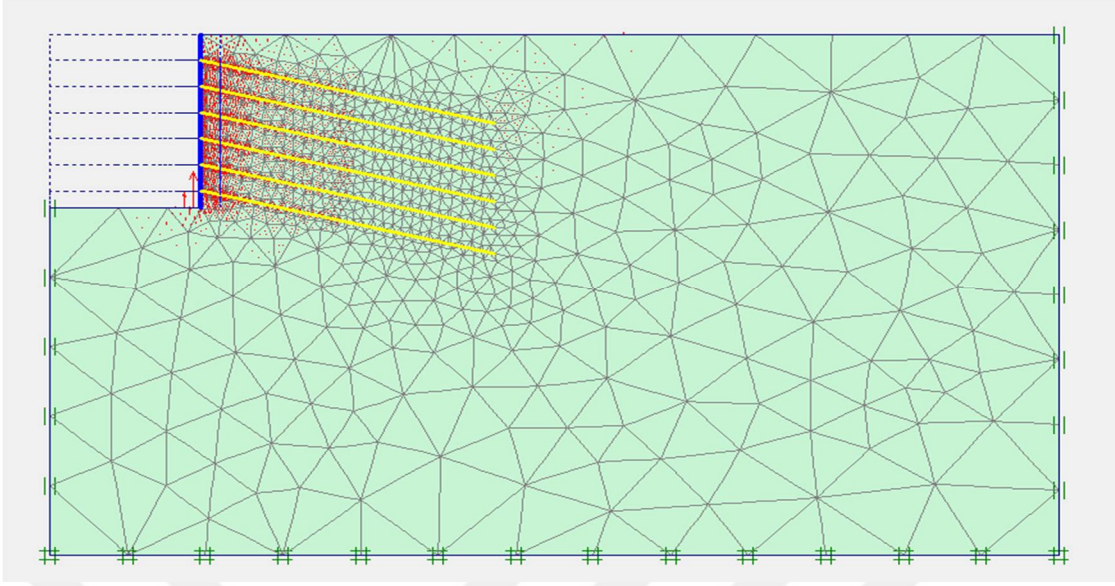
$$\delta_{\text{maksimum}} = 201.17 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Şekil 62. $D_r = 35\%$ zeminde altı zemin çivili modelde duvarın toplam yerdeğiştirme dağılımı



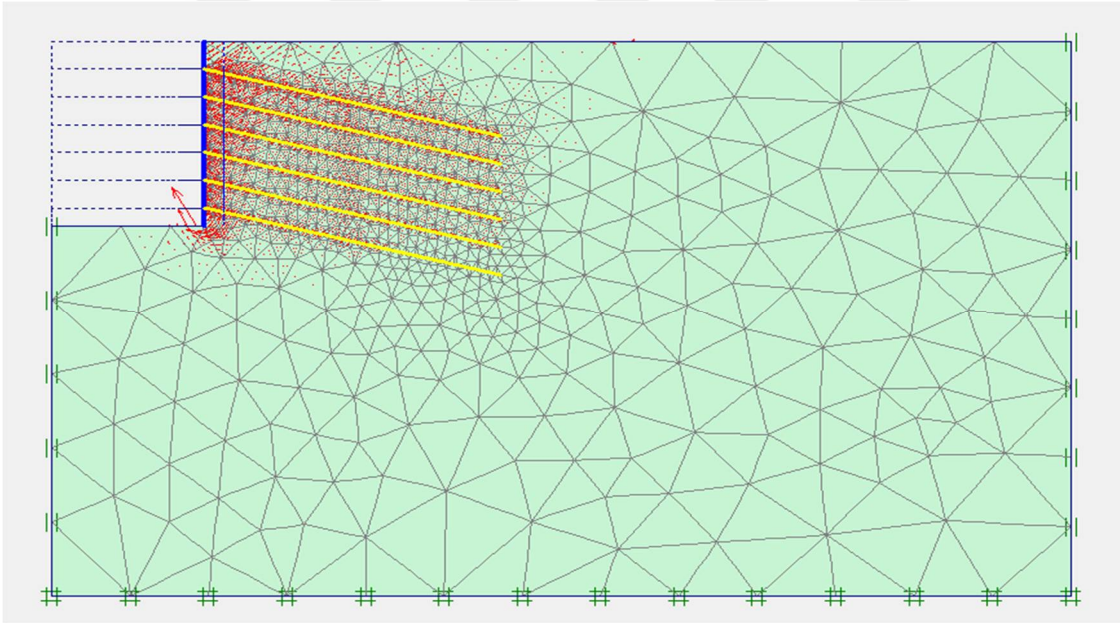
$$\delta_{\text{maksimum yatay}} = 92.06 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Şekil 63. $D_r = 35\%$ altı çivili modelde deformasyon ağı ve duvarın maksimum yatay yerdeğiştirme miktarı



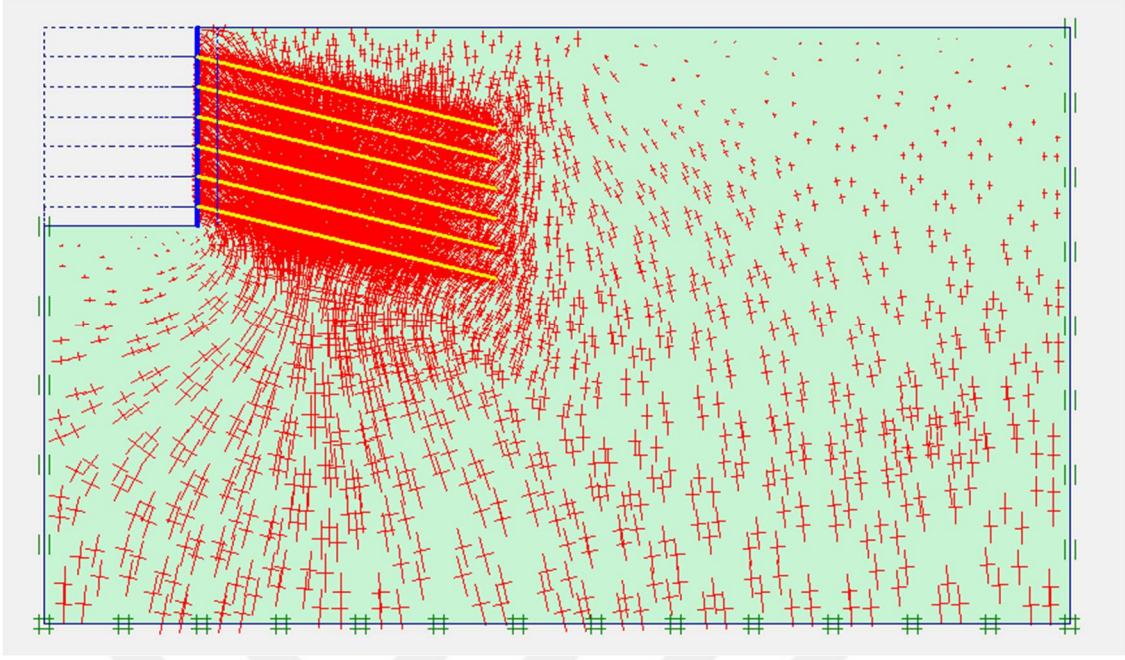
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 185.33 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Şekil 64. $D_r = \%35$ altı çivili modelde deformasyon ağı ve duvarın maksimum düşey yerdeğiştirme miktarı



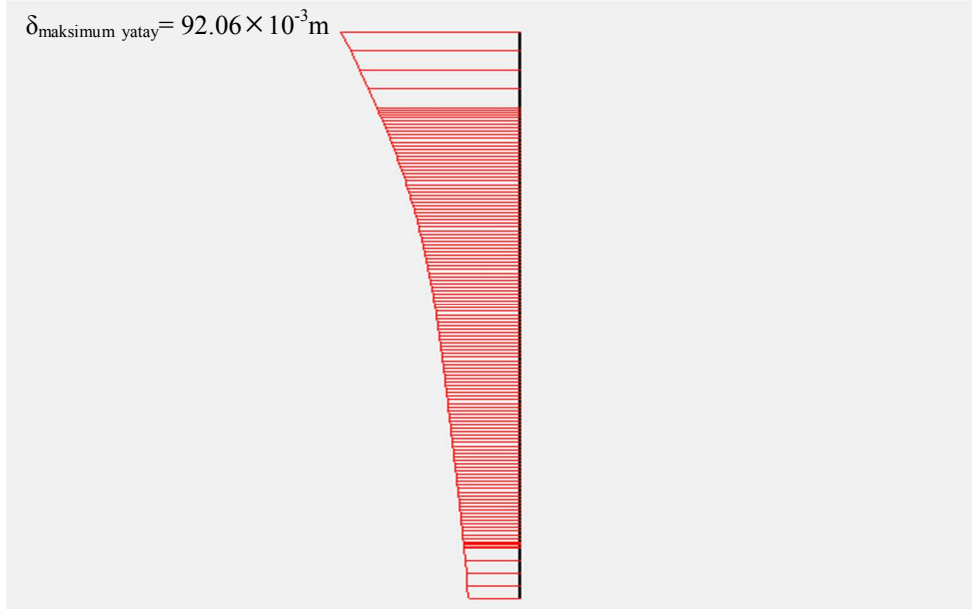
$$\delta_{\text{maksimum}} = 201.17 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Şekil 65. $D_r = \%35$ zeminde altı zemin çivili modelde duvarın toplam yerdeğiştirme miktarı

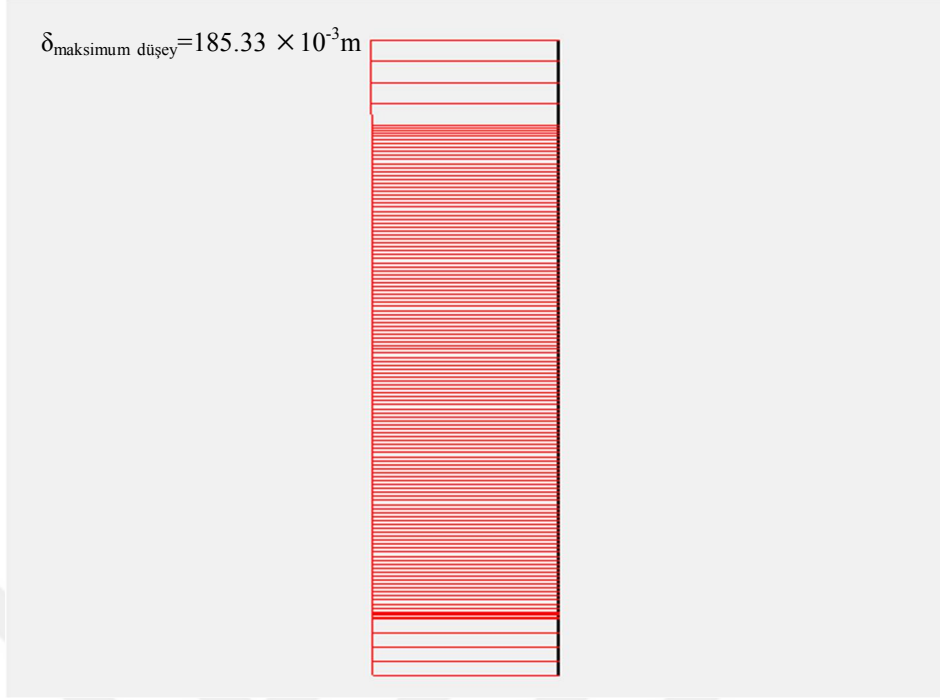


Maksimum Toplam Gerilme -841.40 kN/m^2

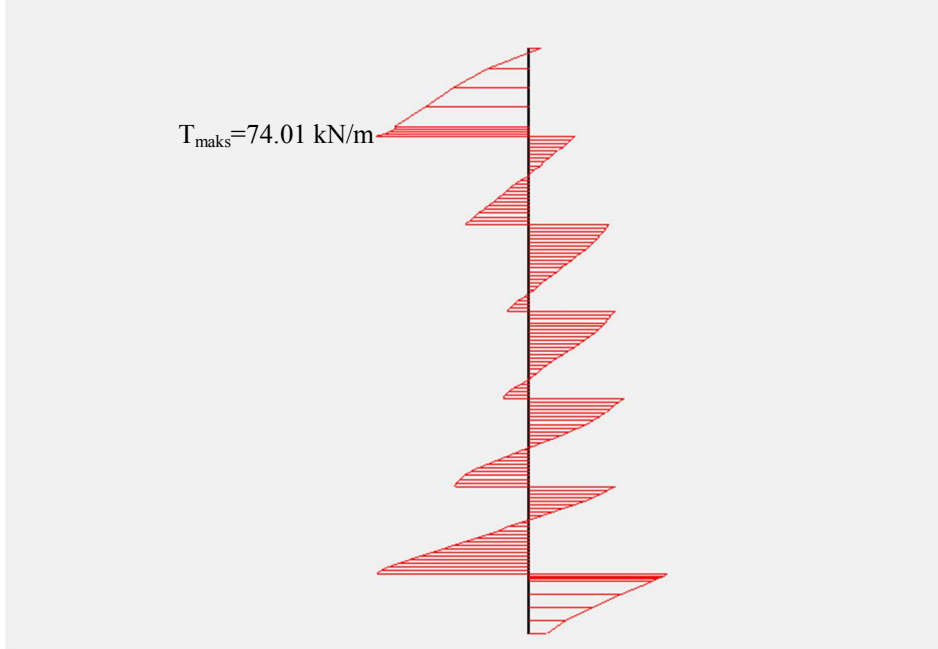
Şekil 66. $D_r = 35\%$ zeminde altı zemin çivili modelde toplam gerilmelerin değişimi



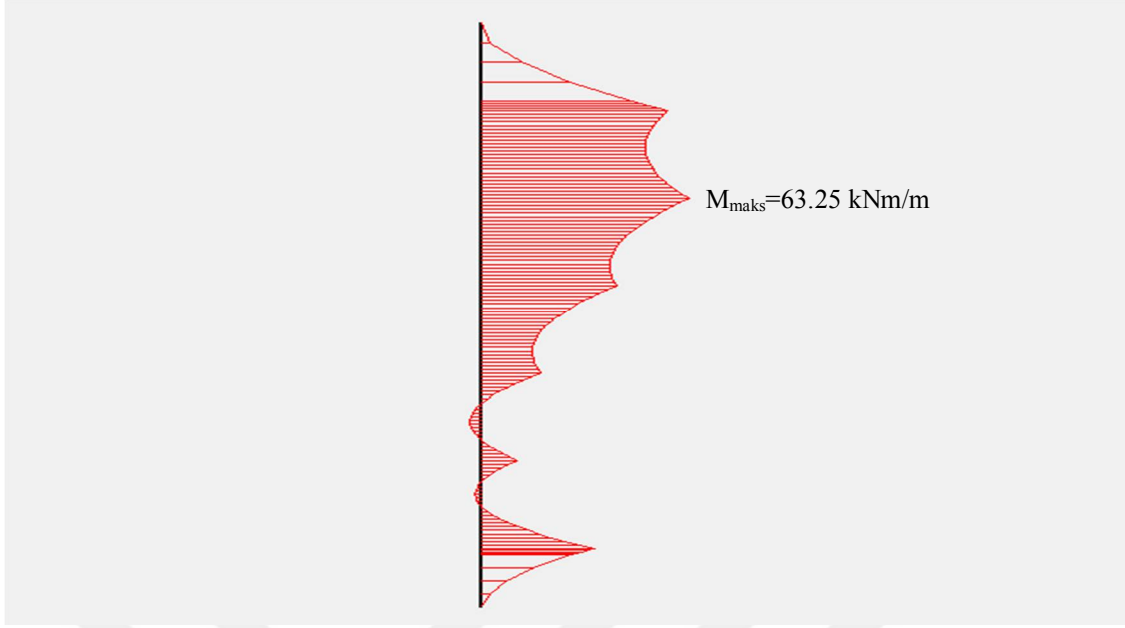
Şekil 67. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Şekil 68. Duvarın düşey deplasman diyagramı

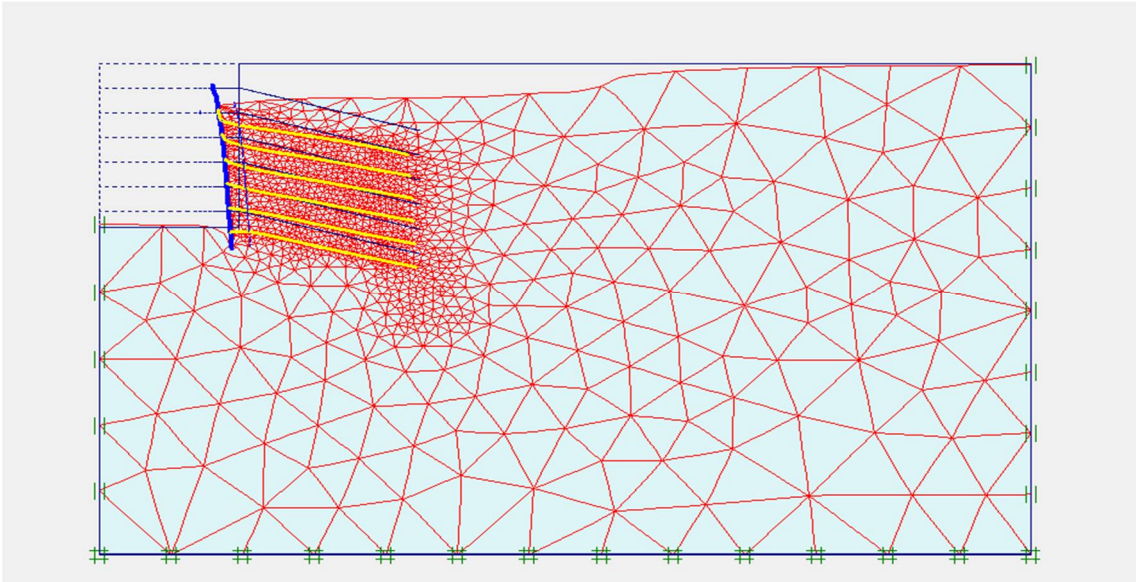


Şekil 69. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



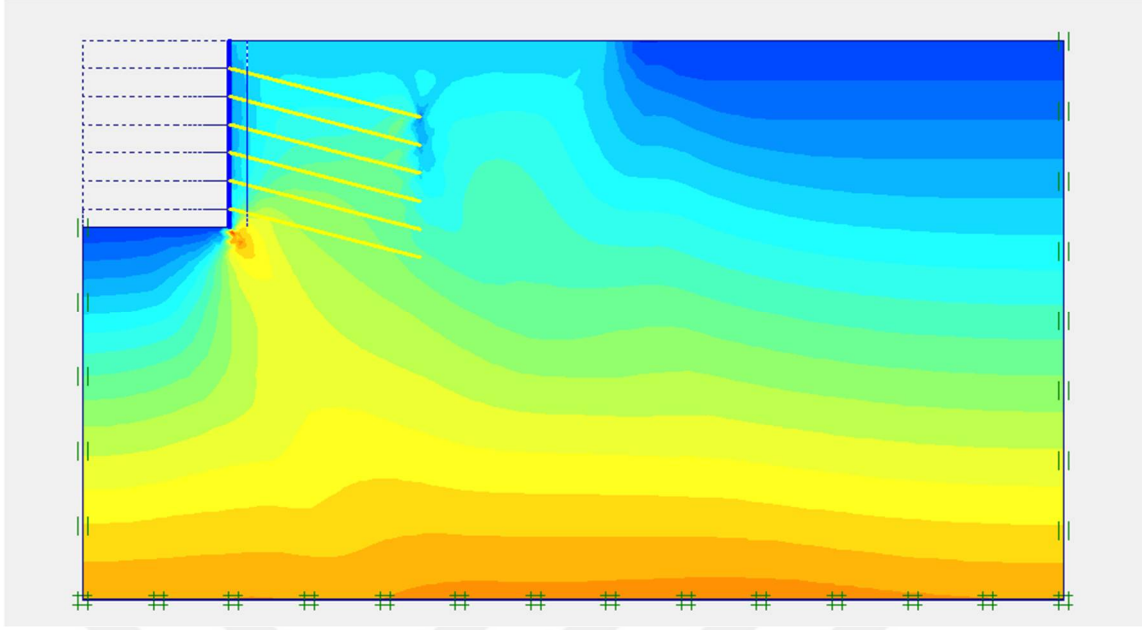
Şekil 70. Duvarın maksimum moment diyagramı

$D_r=65\%$ rölaf sıklıktaki zeminde altı çivili sistem için hazırlanan modeller için nümerik analiz sonuçları aşağıda sunulmuştur. Diğer modellenen sistemler için analiz sonuçları ekte verilmiştir.



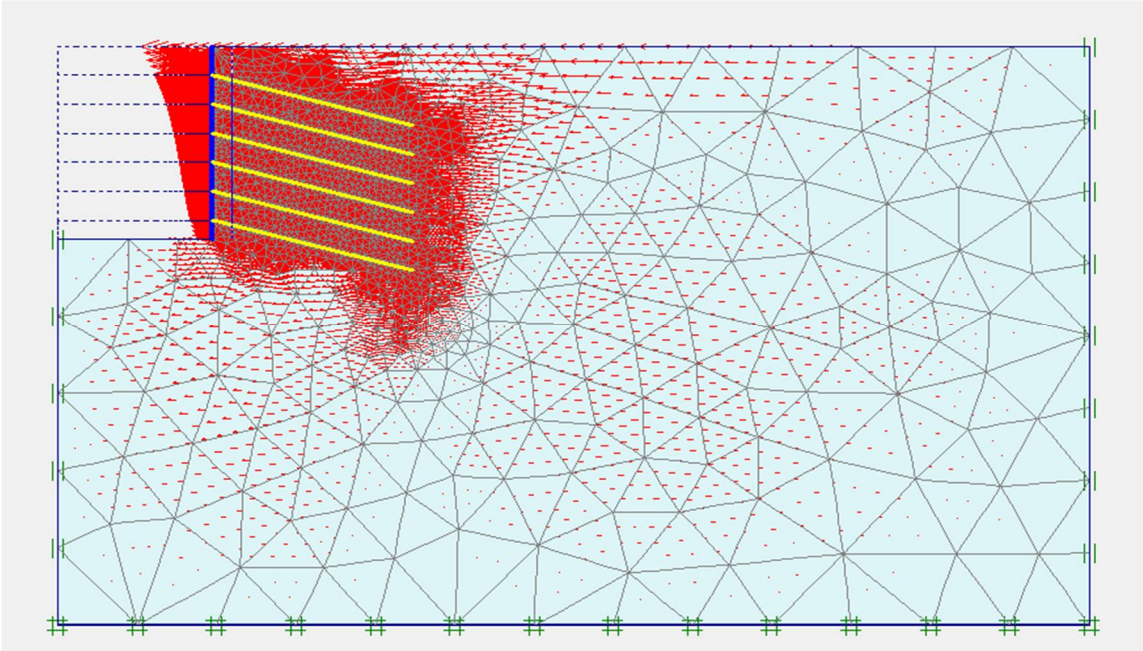
$$\delta_{maksimum}=242.41 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Şekil 71. $D_r=65\%$ zeminde altı zemin çivili modelde deforme olmuş meshler



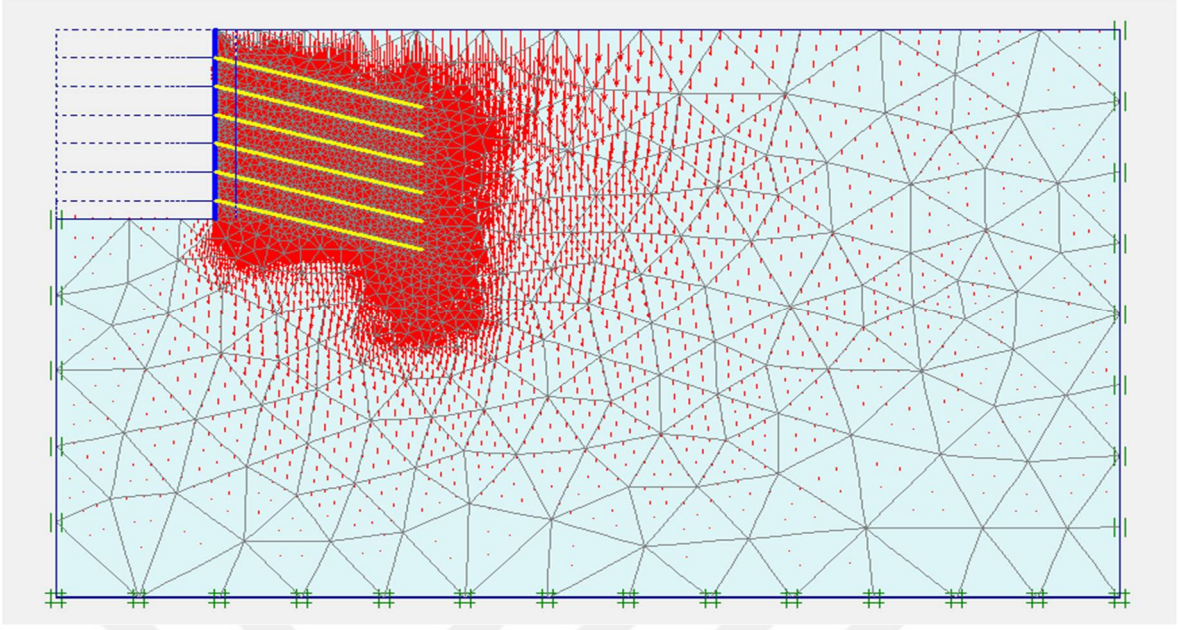
$$\delta_{\text{maksimum}} = 242.41 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Şekil 72. $D_r = 65\%$ zeminde altı zemin çivili modelde duvarın toplam yerdeğiştirme dağılımı



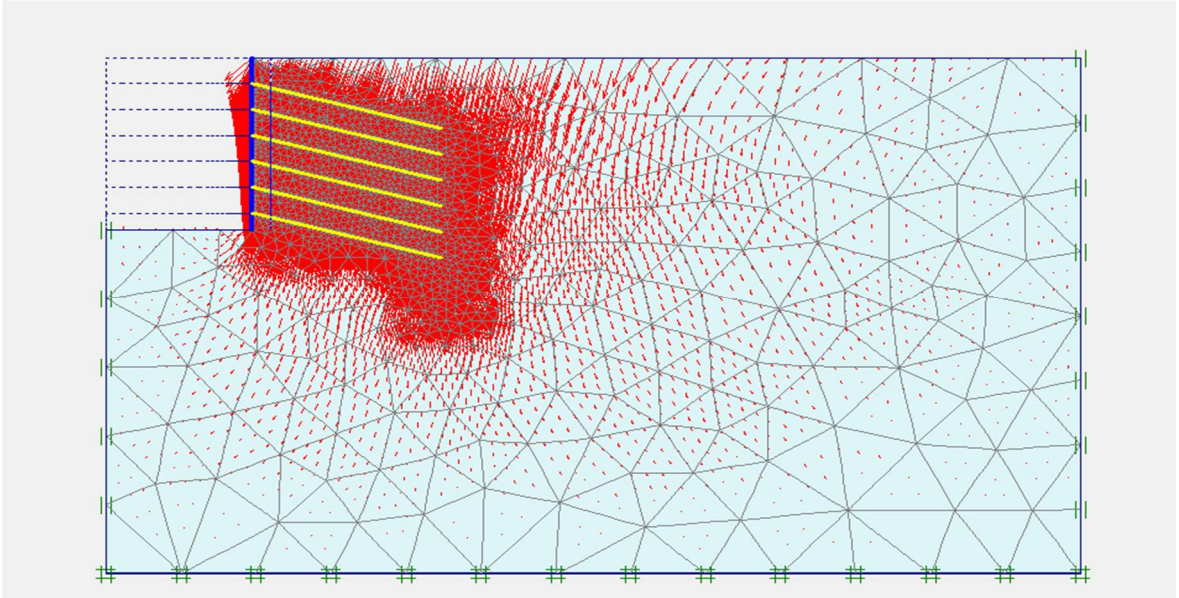
$$\delta_{\text{maksimum yatay}} = 70.57 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Şekil 73. $D_r = 65\%$ altı çivili modelde deformasyon ağı ve duvarın maksimum yatay yerdeğiştirme miktarı



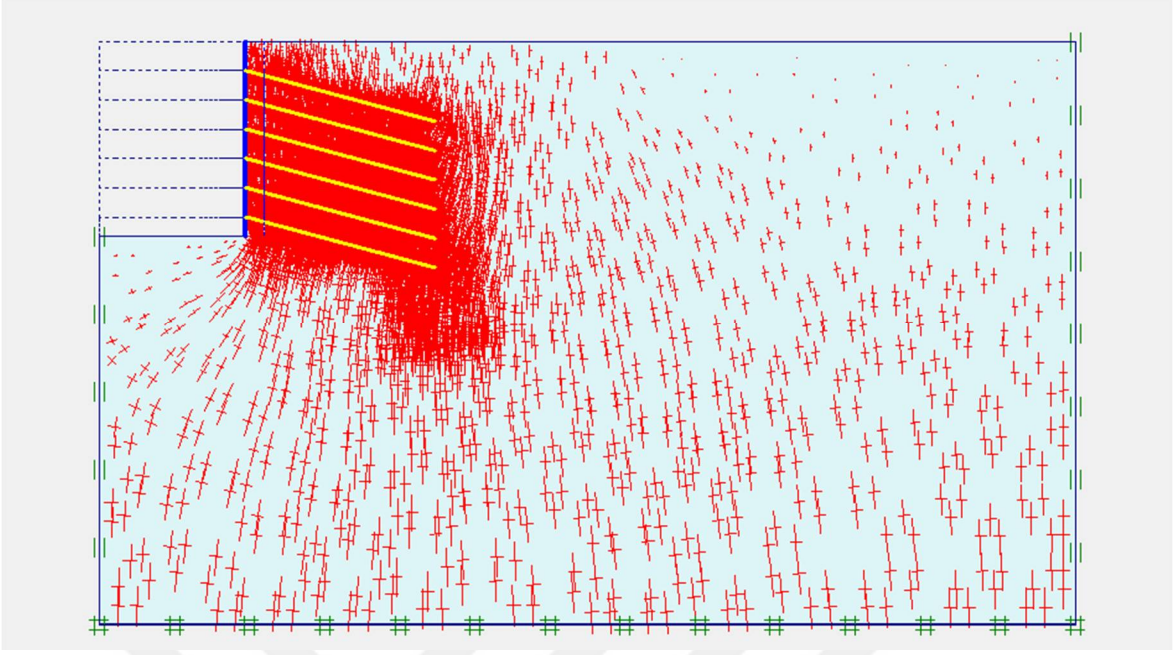
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 129.9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Şekil 74. $D_r = \%65$ altı çivili modelde deformasyon ağı ve duvarın maksimum düşey yerdeğiştirme miktarı



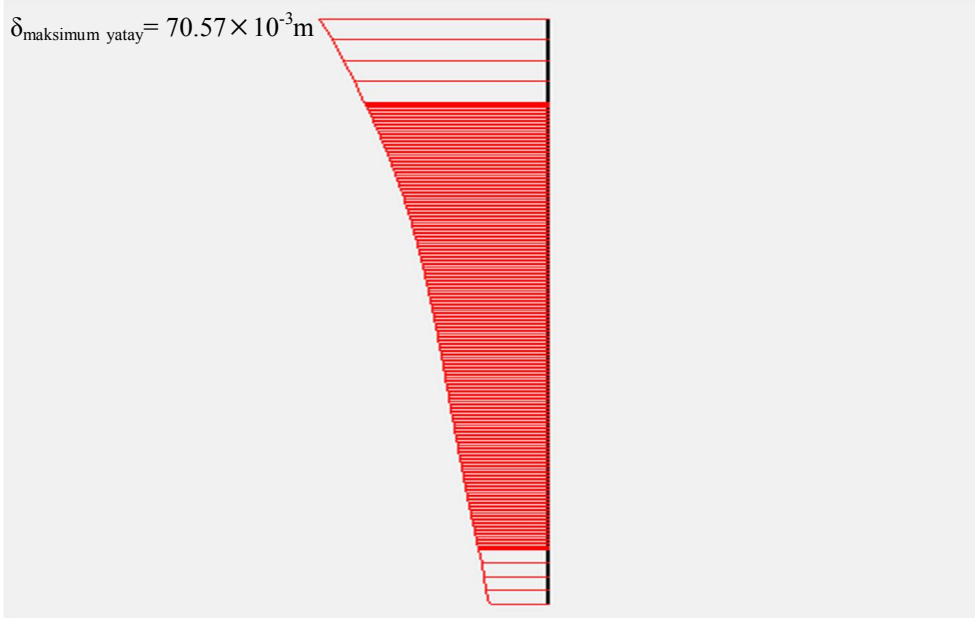
$$\delta_{\text{maksimum}} = 242.41 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Şekil 75. $D_r = \%65$ zeminde altı zemin çivili modelde duvarın toplam yerdeğiştirme miktarı

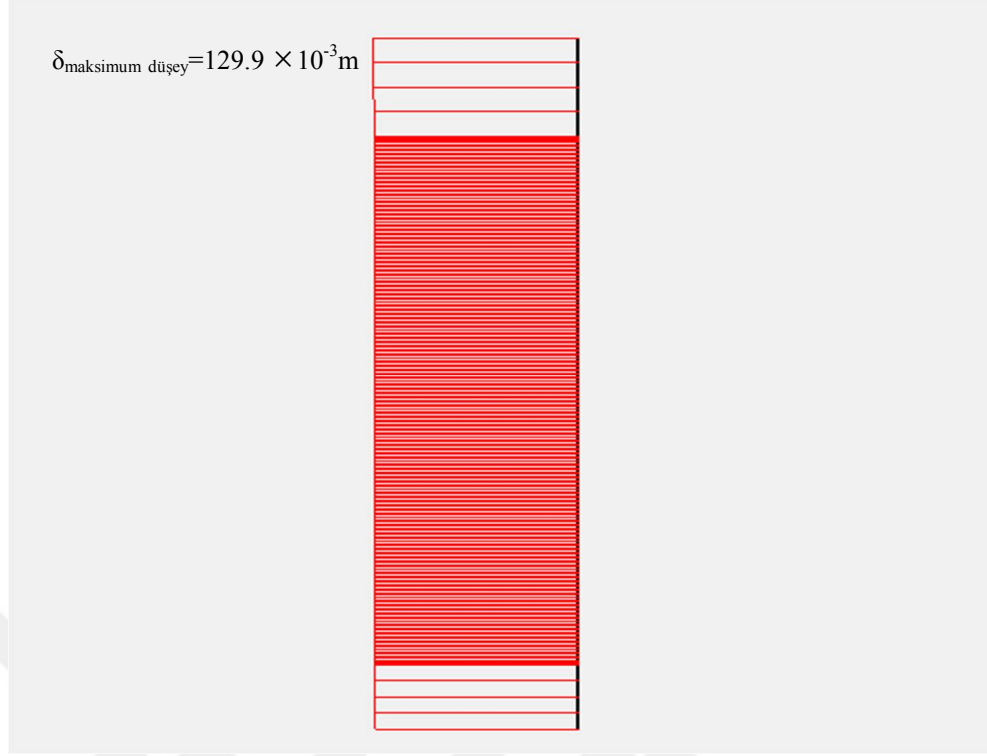


Maksimum Toplam Gerilme 936.62 kN/m^2

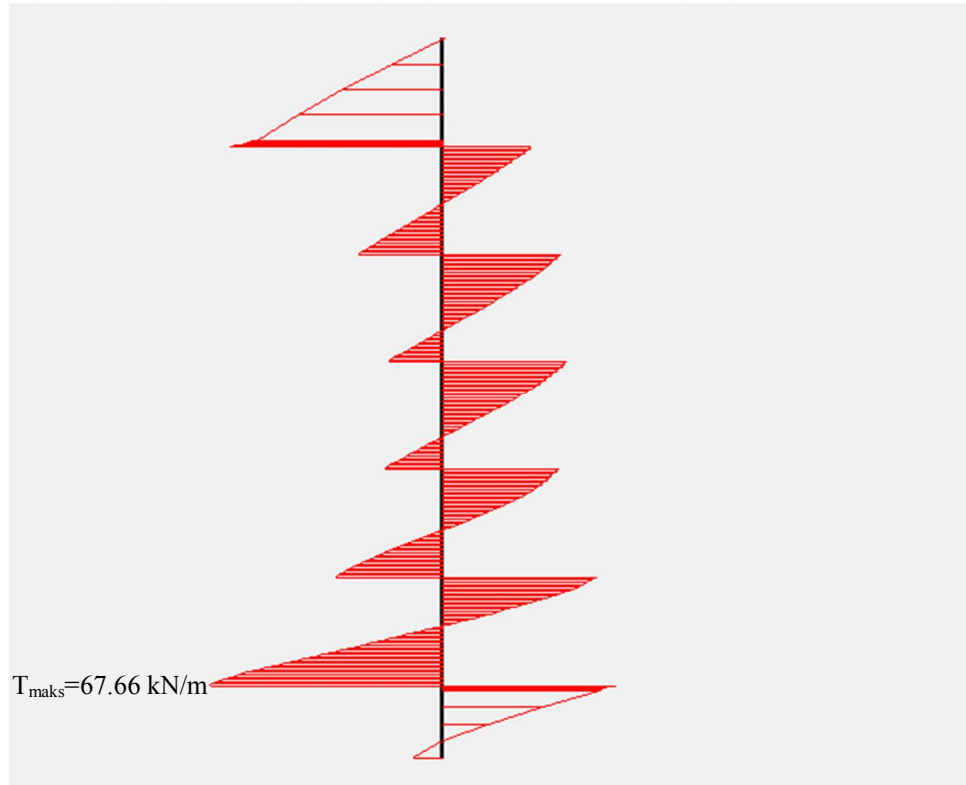
Şekil 76. $D_r=65\%$ zeminde altı zemin çivili modelde toplam gerilmelerin değişimi



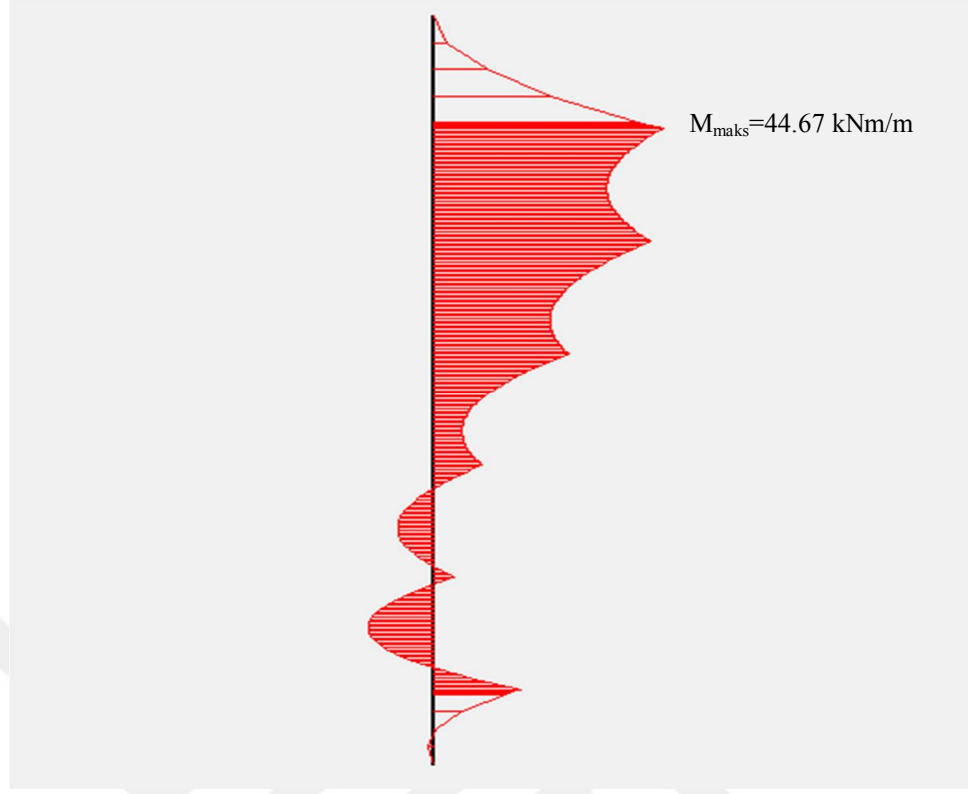
Şekil 77. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Şekil 78. Duvarın d\u00fcsey deplasman diyagramı



Şekil 79. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



Şekil 80. Duvarın maksimum moment diyagramı

3. BULGULAR VE İRDELEME

Derin bir kazı yapılması sırasında zemin çoğu kez kendini tutabilir özelliğe sahip olmamaktadır. Bu durumlarda, kazı alanında güvenliği sağlamak amacıyla kazının desteklenmesi gerekmektedir. Zemin çivili sistemler de bunlardan biridir.

Bu çalışmada; derin kazılarda zemin çivili diyafram duvarlar incelenerek, zemin çivili destekleme sistemleri önce klasik analiz yöntemleriyle projelendirilmiş, daha sonra tasarlanan sistemlerin deformasyon davranışları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

Zemin çivili duvarlarda çivi sayısının etkisi incelendiğinde çivisiz ve yüksüz durumda bile sistemde göçme meydana gelmiştir. Bu yüzden çivisiz durumda diğer yükler denenmemiştir. Çivi sayılarının artmasıyla toplam, yatay ve düşey yerdeğiştirmeler azalmıştır. $D_r=35$ için 6 çivili durumda 2 çivili duruma göre toplam, yatay ve düşey yerdeğiştirmeler sırasıyla %42, %69 ve %37 oranlarında azalırken, $D_r=65$ için ise 6 çivili durumda 2 çivili duruma göre toplam, yatay ve düşey yerdeğiştirmeler sırasıyla %47, %75 ve %40 oranlarında azalmıştır.

Diğer parametreler sabit tutularak 0 kN/m², 50 kN/m², 100 kN/m², 150 kN/m²'luk değişen sürşarj yüklerinin sisteme etkileri incelendiğinde yük artışıyla düşey ve yatay hareketlerin arttığı gözlenmiştir. $D_r=35$ ve 6 çivili durum için 150 kN yük durumunda yüksüz duruma göre toplam, yatay ve düşey yerdeğiştirmeler sırasıyla %492, %1014, %445 oranlarında artma görülmüştür. $D_r=65$ ve 6 çivili durum için ise 150kN yük durumunda yüksüz duruma göre toplam, yatay ve düşey yerdeğiştirmeler sırasıyla %385, %950, %342 oranlarında artma görülmüştür.

Farklı sayıda zemin çivileriyle farklı yükler altında yapılan PLAXIS 8.2 sonlu elemanlar analiz sonuçları Tablo 16 ve Tablo 17' de verilmiştir.

Tablo 16. Dr=%35 Rölatif sıklıkta iki zemin çivisi için analiz sonuçları

İKİ ZEMİN ÇİVİSİ (DR=%35)			
YÜK	TOPLAM YERDEĞİŞTİRME (mm)	YATAY YERDEĞİŞTİRME (mm)	DÜŞEY YERDEĞİŞTİRME (mm)
0 kN/m ²	37,13	26,71	36,12
50 kN/m ²	126,6	82,55	103,62
100 kN/m ²	232,83	152,42	191,18
150 kN/m ²	342,22	229,04	278,29

Tablo 17. Dr=%35 Rölatif sıklıkta dört zemin çivisi için analiz sonuçları

DÖRT ZEMİN ÇİVİSİ (DR=%35)			
YÜK	TOPLAM YERDEĞİŞTİRME (mm)	YATAY YERDEĞİŞTİRME (mm)	DÜŞEY YERDEĞİŞTİRME (mm)
0 kN/m ²	34,01	13,18	34,01
50 kN/m ²	95,35	51,88	83,22
100 kN/m ²	170,99	91,98	150,55
150 kN/m ²	234,8	126,78	207,16

Tablo 18. Dr=%35 Rölatif sıklıkta altı zemin çivisi için analiz sonuçları

ALTI ZEMİN ÇİVİSİ (DR=%35)			
YÜK	TOPLAM YERDEĞİŞTİRME (mm)	YATAY YERDEĞİŞTİRME (mm)	DÜŞEY YERDEĞİŞTİRME (mm)
0 kN/m ²	33,97	8,26	33,97
50 kN/m ²	70,58	31,19	65,27
100 kN/m ²	135,42	59,38	125,64
150 kN/m ²	201,17	92,06	185,33

Tablo 19. $D_r=65\%$ Rölatif sıklıkta iki zemin çivisi için analiz sonuçları

İKİ ZEMİN ÇİVİSİ ($D_r=65\%$)			
YÜK	TOPLAM YERDEĞİŞTİRME (mm)	YATAY YERDEĞİŞTİRME (mm)	DÜŞEY YERDEĞİŞTİRME (mm)
0 kN/m ²	30,78	26,55	29,66
50 kN/m ²	103,33	72,61	81,5
100 kN/m ²	170,73	118,38	137,72
150 kN/m ²	262,96	184,84	209,58

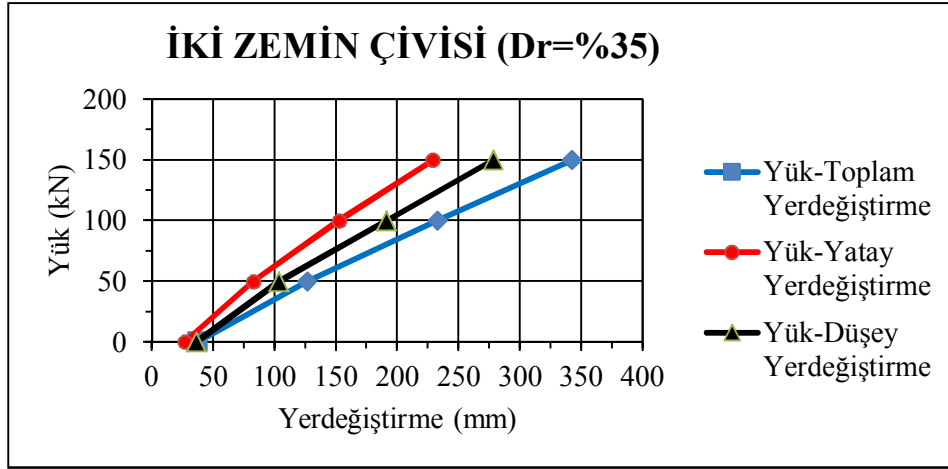
Tablo 20. $D_r=65\%$ Rölatif sıklıkta dört zemin çivisi için analiz sonuçları

DÖRT ZEMİN ÇİVİSİ ($D_r=65\%$)			
YÜK	TOPLAM YERDEĞİŞTİRME (mm)	YATAY YERDEĞİŞTİRME (mm)	DÜŞEY YERDEĞİŞTİRME (mm)
0 kN/m ²	29,53	11,64	29,53
50 kN/m ²	70,23	41,64	59,96
100 kN/m ²	125,37	72,48	108,76
150 kN/m ²	175,04	100,73	152,45

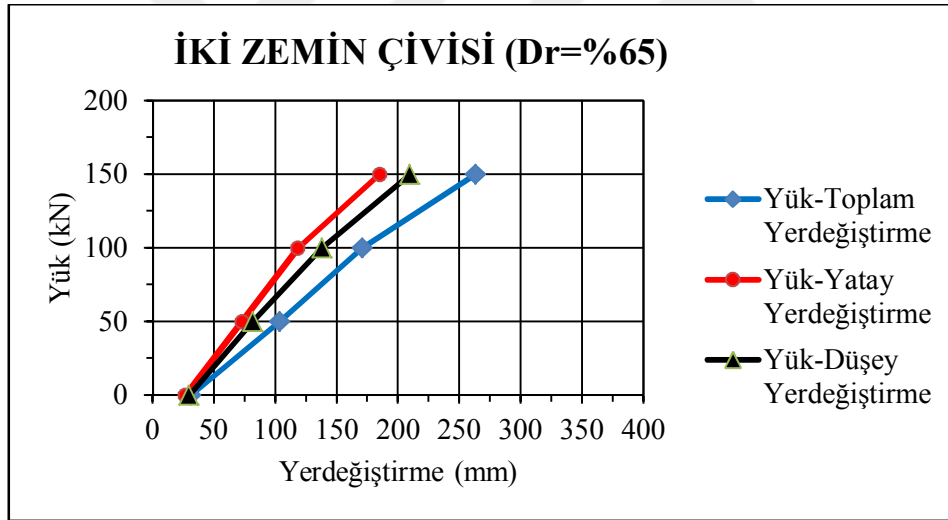
Tablo 21. $D_r=65\%$ Rölatif sıklıkta altı zemin çivisi için analiz sonuçları

ALTI ZEMİN ÇİVİSİ ($D_r=65\%$)			
YÜK	TOPLAM YERDEĞİŞTİRME (mm)	YATAY YERDEĞİŞTİRME (mm)	DÜŞEY YERDEĞİŞTİRME (mm)
0 kN/m ²	29,34	6,72	29,34
50 kN/m ²	54,78	28,56	49,02
100 kN/m ²	93,81	44,63	86,55
150 kN/m ²	142,41	70,57	129,9

Analizlerde elde edilen sonuçlar aşağıda grafikler halinde sunulmuştur.

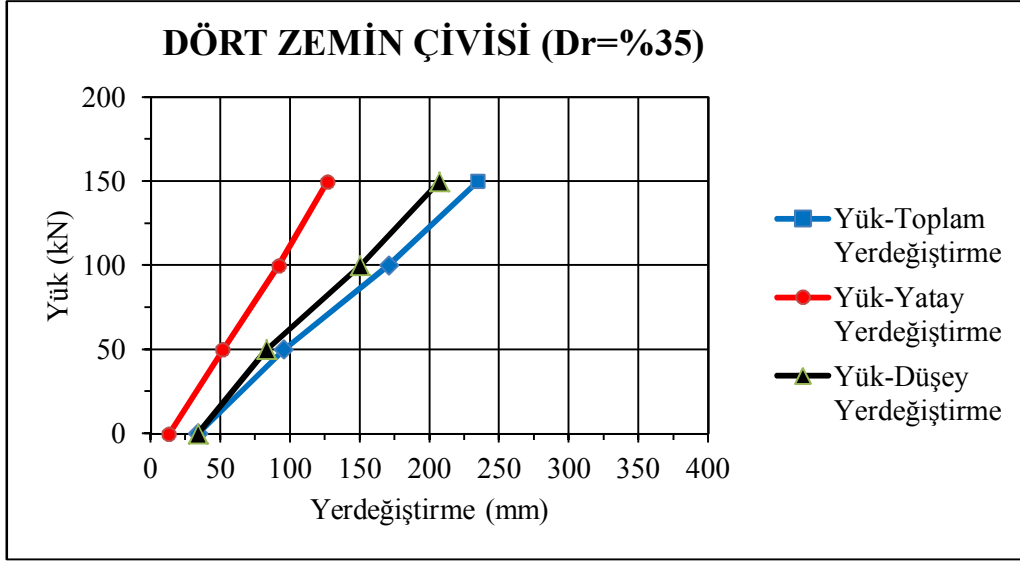


Şekil 81. Dr=%35 Zemin için iki zemin çivili modelde yük-yerdeğiştirme eğrisi

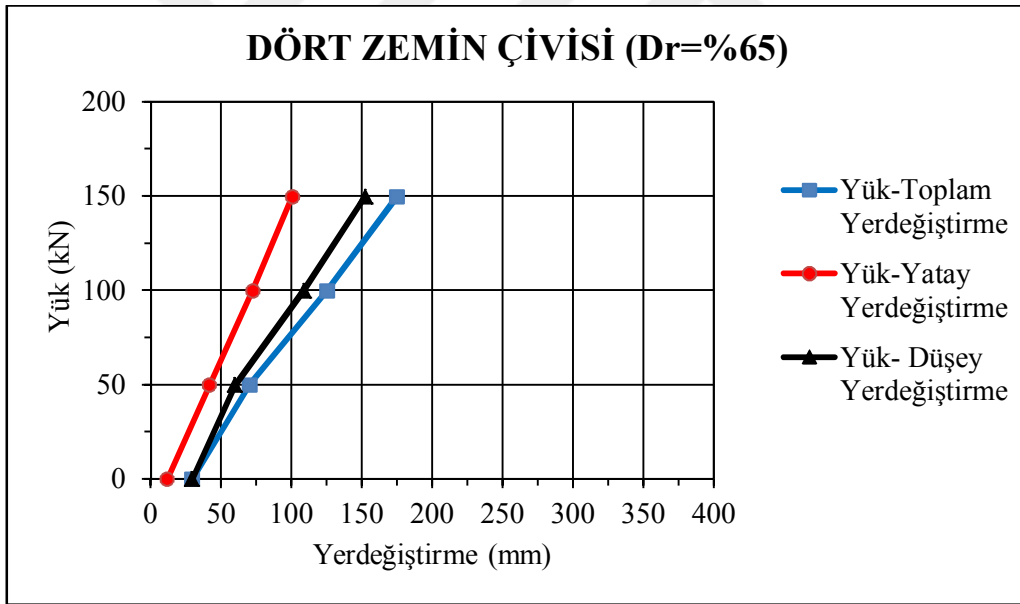


Şekil 82. Dr=%65 Zemin için iki zemin çivili modelde yük-yerdeğiştirme eğrisi

İki çivili durumda Dr=%35 zemin için 150 kN/m^2 yük uygulandığında sistemin toplam yer değiştirme 342.22 mm iken Dr=%65 zemin için 262.96 mm' ye kadar inmiştir. Ayrıca Dr=%35 için yatay ve düşey deplasmanlar sırasıyla 229.04 mm ve 278.29 mm iken; Dr=%65 zemin için yatay ve düşey deplasmanlar sırasıyla 184.84 mm ve 209.58 mm olarak analiz edilmiştir.

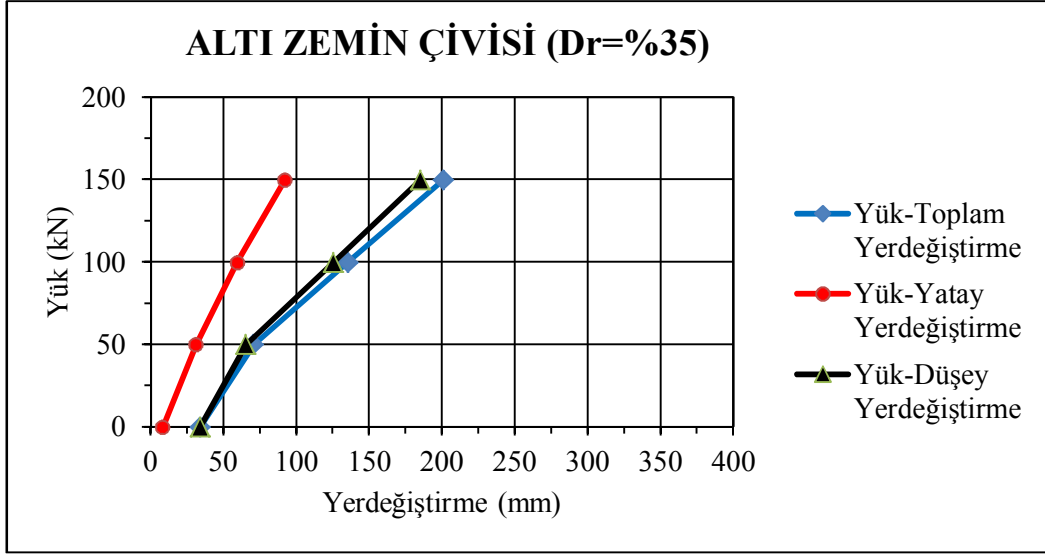


Şekil 83. Dr=%35 Zemin için dört zemin çivili modelde yük-yerdeğiştirme eğrisi

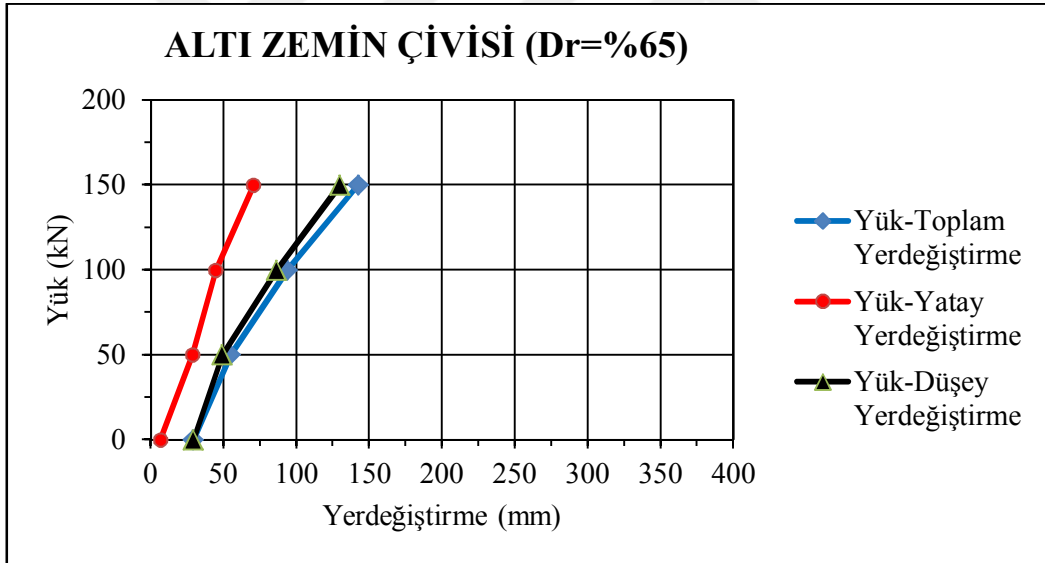


Şekil 84. Dr=%65 zemin için dört zemin çivili modelde yük-yerdeğiştirme eğrisi

Dört çivili durum ele alındığında Dr=%35 zemin için 150 kN/m² yük uygulandığında sistemin toplam yer değiştirmesi 234.8 mm iken Dr=%65 zemin için 175.04 mm' ye kadar azalmıştır. Ayrıca Dr=%35 için yatay ve düşey deplasmanlar sırasıyla 126.78 mm ve 207.15 mm iken; Dr=%65 zemin için yatay ve düşey deplasmanlar sırasıyla 100.73 mm ve 152.45 mm olarak analiz edilmiştir.

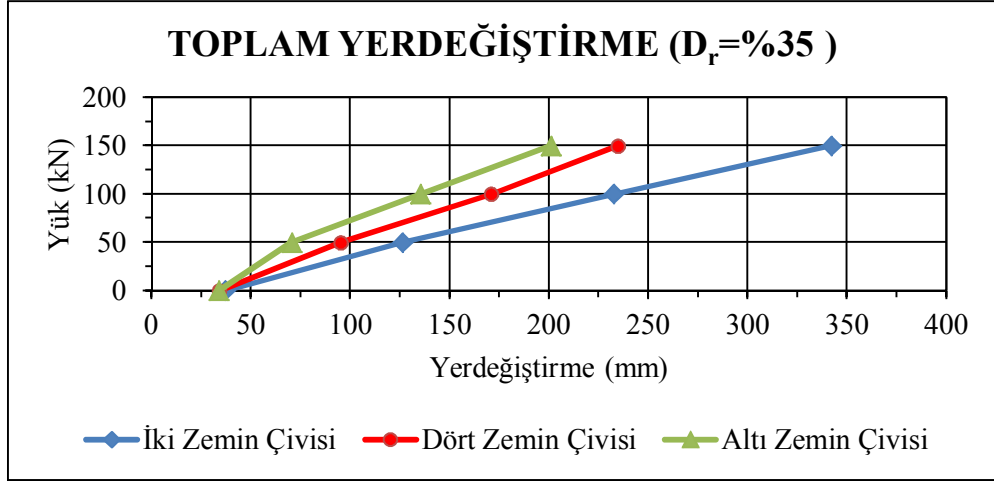


Şekil 85. Dr=%35 Zemin için altı zemin çivili modelde yük-yerdeğiştirme eğrisi

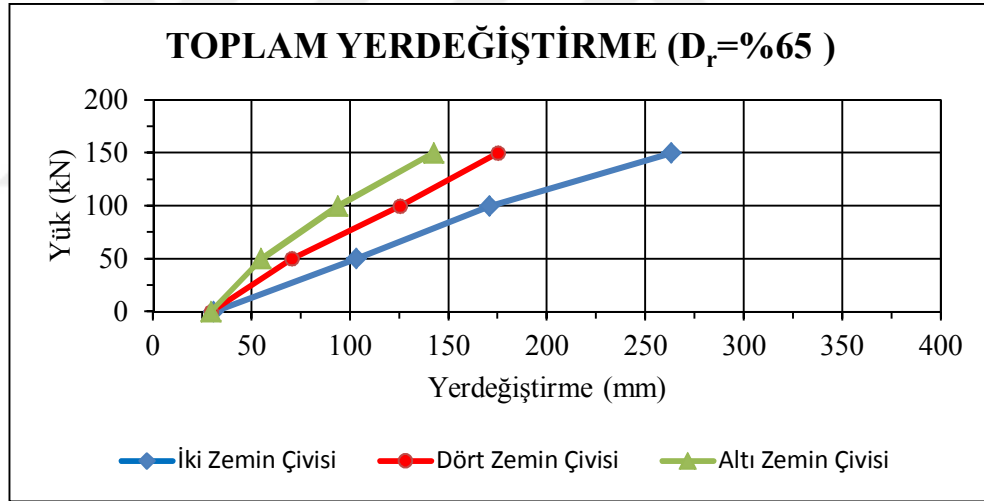


Şekil 86. Dr=%65 zemin için altı zemin çivili modelde yük-yerdeğiştirme eğrisi

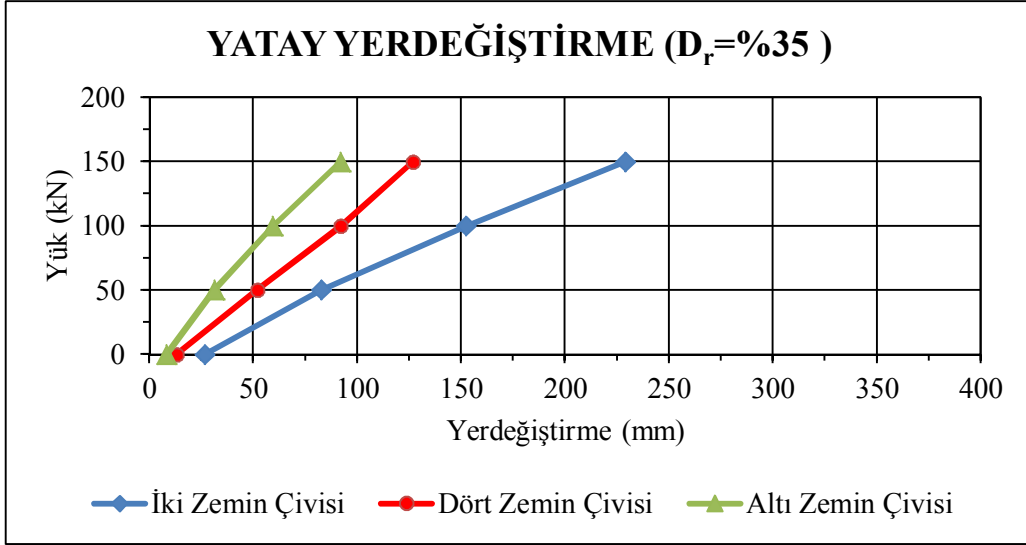
Altı çivili durumda ise Dr=%35 zemin için 150 kN/m^2 yük uygulandığında sistemin toplam yer değiştirmesi 201.17 mm iken Dr=%65 zemin için 142.41 mm ' ye kadar azalmıştır. Ayrıca Dr=%35 için yatay ve düşey deplasmanlar sırasıyla 92.06 mm ve 185.33 mm iken; Dr=%65 zemin için yatay ve düşey deplasmanlar sırasıyla 70.57 mm ve 129.9 mm olarak analiz edilmiştir. En düşük deplasman değerleri Dr=%65 ve 6 çivili durumda elde edilmiştir.



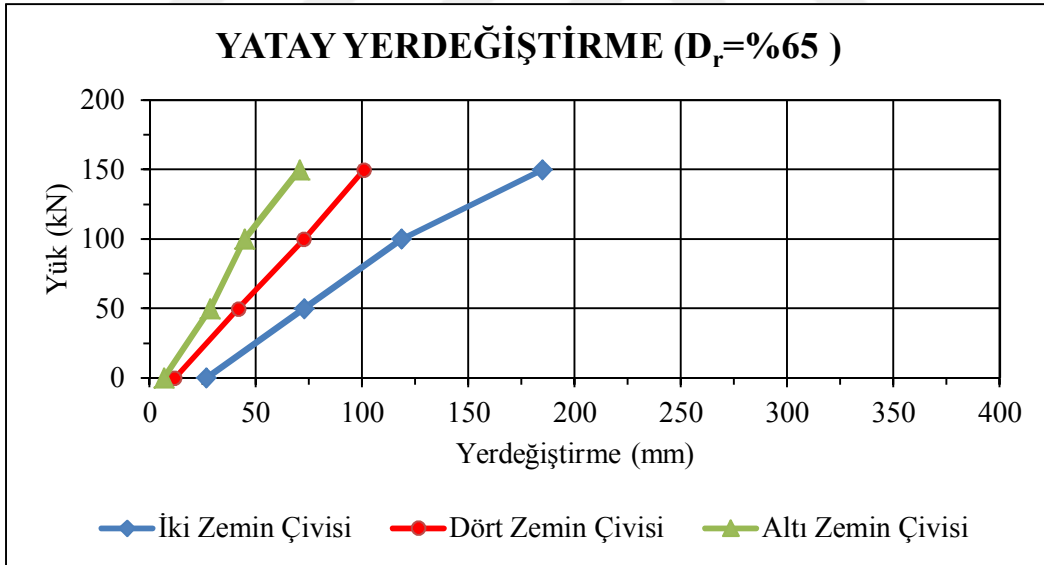
Şekil 87. $D_r = \%35$ zeminde iki zemin çivisi, dört zemin çivisi ve altı zemin çivisi için toplam yerdeğiştirme



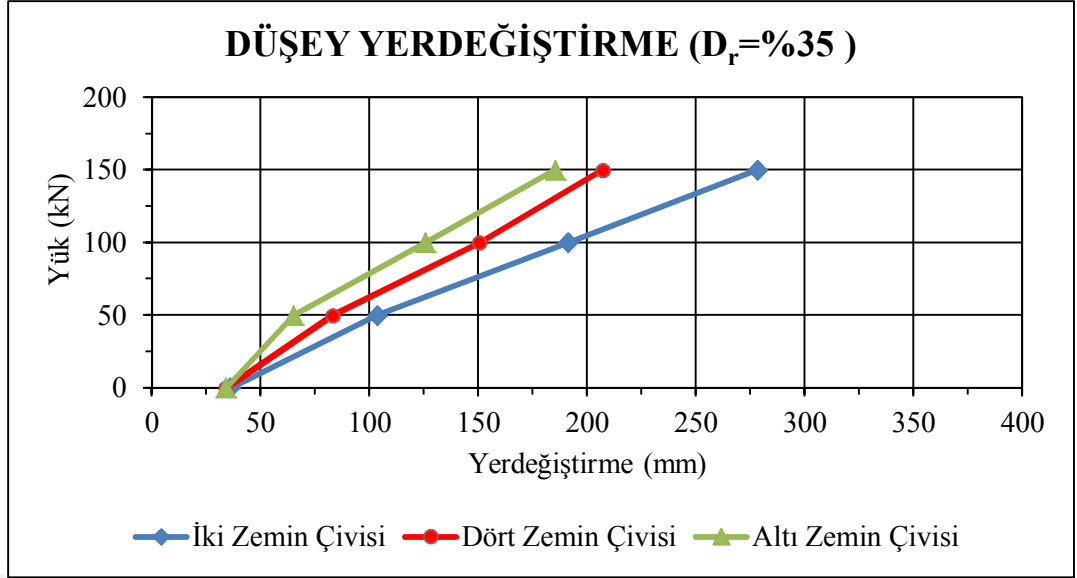
Şekil 88. $D_r = \%65$ zeminde iki zemin çivisi, dört zemin çivisi ve altı zemin çivisi için toplam yerdeğiştirme



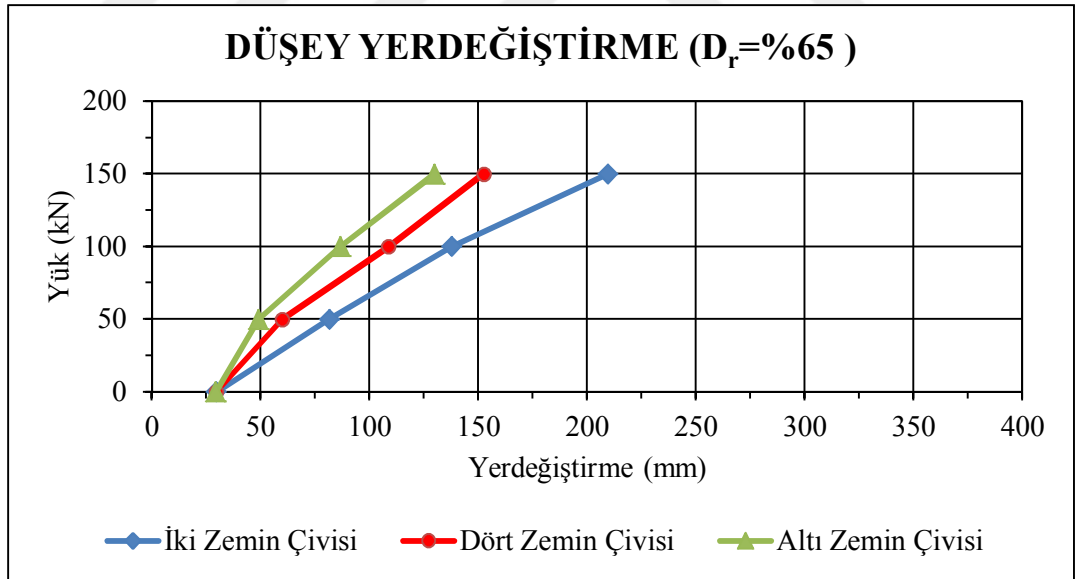
Şekil 89. $D_r = \%35$ zeminde iki zemin çivisi, dört zemin çivisi ve altı zemin çivisi için yatay yerdeğiştirme



Şekil 90. $D_r = \%65$ zeminde iki zemin çivisi, dört zemin çivisi ve altı zemin çivisi için yatay yerdeğiştirme



Şekil 91. $D_r = \%35$ zeminde iki zemin çivisi, dört zemin çivisi ve altı zemin çivisi için düşey yerdeğiştirme



Şekil 92. $D_r = \%65$ zeminde iki zemin çivisi, dört zemin çivisi ve altı zemin çivisi için düşey yerdeğiştirme

Tablo 22. $Dr=35\%$ ve $Dr=65\%$ rölatif sıklıktaki zeminde iki zemin çivili modelde PLAXIS 8.2 programı analiz sonuçlarına göre güvenlik sayıları

İKİ ZEMİN ÇİVİLİ MODELDE GÜVENLİK SAYILARI		
YÜK	Dr=35%	Dr=65%
0 kN/m ²	1.83	1.88
50 kN/m ²	1.67	1.72
100 kN/m ²	1.46	1.56
150 kN/m ²	1.38	1.41

Tablo 23. $Dr=35\%$ ve $Dr=65\%$ rölatif sıklıktaki zeminde dört zemin çivili modelde PLAXIS 8.2 programı analiz sonuçlarına göre güvenlik sayıları

DÖRT ZEMİN ÇİVİLİ MODELDE GÜVENLİK SAYILARI		
YÜK	Dr=35%	Dr=65%
0 kN/m ²	2.04	2.23
50 kN/m ²	1.88	1.93
100 kN/m ²	1.76	1.83
150 kN/m ²	1.65	1.69

Tablo 24. $Dr=35\%$ ve $Dr=65\%$ rölatif sıklıktaki zeminde altı zemin çivili modelde PLAXIS 8.2 programı analiz sonuçlarına göre güvenlik sayıları

ALTI ZEMİN ÇİVİLİ MODELDE GÜVENLİK SAYILARI		
YÜK	Dr=35%	Dr=65%
0 kN/m ²	2.15	2.33
50 kN/m ²	2.02	2.04
100 kN/m ²	1.79	1.98
150 kN/m ²	1.75	1.86

Tüm çivi sayılarında, $D_r=65$ rölâtif sıkılıktaki zeminin $D_r=35$ rölâtif sıkılıktaki zeminden daha büyük güvenlik sayılarına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca çivi sayıları arttıkça güvenlik sayıları da artmıştır.



4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Derin kazılar günümüz şehirciliğinde mühendislik açısından önemli bir yer tutmaktadır. Yüksek katlı yapıların yerleşimini sağlayabilmek, metro tünel gibi yapıları hayata geçirebilmek için inşaat mühendisleri derin kazılar sırasında zemini denge halinde tutmak zorundadırlar.

Zemin çivili duvarlar ekonomik oluşları, uygulama süresi ve minimum çalışma alanı ihtiyacı ile diğer destekleme sistemlerine göre avantaj sağlamaktadır. Sağladığı avantajlar sayesinde uygulama alanları hızla artış göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında seçilen derin kazı modellerinin nümerik analizlerinin yapılabilmesi için öncelikle Servis Yük Tasarımı (SLD) yöntemine göre çivi boyları hesaplanmıştır. Herbir model için zemin çivilerinin adedi, boyu ve aralıkları belirlendikten sonra, zemin çivili kazıların nümerik olarak modellenerek deplasman analizlerinin yapılmasında, farklı rölatif sıklıktaki kum zeminler ve bu kum zeminler için literatürde önerilmiş değerlerden zemin parametreleri seçilmiştir. Geoteknik modeller, $D_r=35\%$ ve $D_r=65\%$ için PLAXIS 8.2 sonlu elemanlar analiz programında nümerik olarak modellenerek deformasyon ve stabilite analizleri yapılmıştır. Bu analizlerden toplam, yatay ve düşey yerdeğiştirmeler ile toptan göçme durumundaki güvenlik sayıları belirlenmiştir. Zemin taneleri ile perde yüzeyi arasında sürtünmeyi modelleyebilmek için ara yüzey elemanları kullanılmıştır. Programda 15 düğüm noktalı sonlu eleman ağı seçilmiştir ve geometrik modeller yaklaşık 350 sonlu elemana bölünmüştür. Zemin çivilerinin tasarımı geogrid malzeme parametresi kullanılarak yapılmıştır. Modellenen destek sistemleri çivisiz, 2 çivili, 4 çivili ve 6 çivili destek sistemleri olarak tasarlanmıştır. Her destek sisteminde yüksüz ve 50 kN/m², 100 kN/m², 150 kN/m² yükler altında analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece iki farklı kum zeminde çivili duvar sisteminin benzer zemin koşullarında davranışları incelendiğinde;

- İki çivili durumda $D_r=35\%$ zemin için 150 kN/m² yük uygulandığında sistemin toplam yer değıştirmesi 342.22 mm iken $D_r=65\%$ zemin için 262.96 mm' ye kadar inmiştir. Ayrıca $D_r=35\%$ için yatay ve düşey deplasmanlar sırasıyla 229.04 mm ve

278.29 mm iken; $D_r=65$ zemin için yatay ve düşey deplasmanlar sırasıyla 184.84 mm ve 209.58 mm olarak analiz edilmiştir.

- Dört çivili durum ele alındığında $D_r=35$ zemin için 150 kN/m^2 yük uygulandığında sistemin toplam yer değiştirmesi 234.8 mm iken $D_r=65$ zemin için 175.04 mm' ye kadar azalmıştır. Ayrıca $D_r=35$ için yatay ve düşey deplasmanlar sırasıyla 126.78 mm ve 207.15 mm iken; $D_r=65$ zemin için yatay ve düşey deplasmanlar sırasıyla 100.73 mm ve 152.45 mm olarak analiz edilmiştir.
- Altı çivili durumda ise $D_r=35$ zemin için 150 kN/m^2 yük uygulandığında sistemin toplam yer değiştirmesi 201.17 mm iken $D_r=65$ zemin için 142.41 mm' ye kadar azalmıştır. Ayrıca $D_r=35$ için yatay ve düşey deplasmanlar sırasıyla 92.06 mm ve 185.33 mm iken; $D_r=65$ zemin için yatay ve düşey deplasmanlar sırasıyla 70.57 mm ve 129.9 mm olarak analiz edilmiştir. En düşük deplasman değerleri $D_r=65$ ve 6 çivili durumda elde edilmiştir.

Diğer parametreler sabit tutularak rölatif sıkılığın etkisi dikkate alındığında $D_r=65$ ' in $D_r=35$ ' e göre daha olumlu sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

- $D_r=35$ ' e göre $D_r=65$, 150kN yük ve 2 çivili durumda toplam, yatay ve düşey yerdeğıştirmeler sırasıyla %23, %19, %25 oranlarında,
- $D_r=35$ ' e göre $D_r=65$, 150kN yük ve 4 çivili durumda toplam, yatay ve düşey yerdeğıştirmeler sırasıyla %26, %21, %26 oranlarında,
- $D_r=35$ ' e göre $D_r=65$, 150kN yük ve 6 çivili durumda toplam, yatay ve düşey yerdeğıştirmeler sırasıyla %29, %23, %30 oranlarında azalmalar meydana geldiği görülmüştür.

Analizler sonucu elde edilen güvenlik sayıları karşılaştırıldığında;

- Artan yüklerle güvenlik sayılarının azaldığı gözlemlenmiştir.
- $D_r=65$ rölatif sıkılıktaki zeminin $D_r=35$ rölatif sıkılıktaki zeminden daha büyük güvenlik sayılarına sahip olduğu görülmüştür.
- Çivi sayıları arttıkça güvenlik sayıları da artmıştır.

Güvenlik sayıları dikkate alındığında; $D_r=65$ ' in $D_r=35$ ' e göre daha olumlu sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak; çalışma verileri ve analizler dikkate alınarak iki zemin koşulu karşılaştırıldığında, $D_r=65$ rölatif sıkılıktaki zeminde ve 6 çivili durumda diğer durumlara göre daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan analiz ve incelemelerden elde edilen sonuçlar ışığında;

- Değişik çivi boyları ve düzenleri kullanılarak deprem ivmeleri nedeniyle yapının göçmesine neden olacak deformasyonlar belirlenebilir.
- Kil, silt ve kum zeminlerde farklı çivi sayılarıyla duvar deplasman analizleri yapılabilir.
- Değişik malzeme modelleri kullanılarak sonlu elemanlar analiz programları ile boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışları gözönüne alınarak yatay, düşey ve toplam deplasmanlar araştırılabilir.
- Çivili duvar üzerinde sismik etkiler araştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

- AASHTO, 1992. Standard Specifications for Highway bridges, 15th edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- Babu G., L., S. ve Singh V., P., 2011. Reliability-based load and resistance factors for soil-nail walls, Can. Geotech. J., 48, 915–930.
- Barley, A., D., Davies, M., C., R. ve Jones A., M., 1997. Review of current field testing methods for soil nailing, Proceedings of the Third International Conference on Ground Improvement Geosystems, London, United Kingdom.
- Berilgen, S., 2012. Zemin Çivisi, Zemin Çivili Duvarların Ön Tasarımı, Zemin Çivili ve Ankrajlı Duvarların Karşılaştırılması, Ders Notu, YTÜ, İstanbul.
- Bildik, S., 2013. Farklı Zemin ve Yükleme Koşullarındaki Gömülü Boru Sistemlerinin Davranışının Araştırılması, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Bonazzi, D. ve G., Colombet, 1961. Reajustement et entretien des ouvrages de talus, Proc Colloque Renforcement En Place Des Sols Et Des Roches, Paris, France.
- Bowles J., E, 1998. Foundation Analysis and Design, McGraw Hill.
- Bruce, D., A. ve R., A., Jewell, 1986. Soil Nailing: Application and Practice - Part 1, Ground Engineering, 10-15.
- Bruce, D., A. ve R., A., Jewell, 1987. Soil Nailing: Application and Practice - Part 2, Ground Engineering, 21-23.
- Byrne, R., J., Cotton, D., Porterfield, J., Wolschlang, C., ve Ueblacker, G., 1998. Manuel for design and construction of soil nail wall, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Cesur A. S., 2010. Zemin Çivili Duvar Performanslarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cheng, Y., M., Choi, Y., Yeung, A., T., Tham, L., G., Au, A., S., K., Wei, W., B. ve Chen, J., 2009. New Soil Nail Material—Pilot Study of Grouted GFRP Pipe Nails in Korea and Hong Kong, Journal of Materials in Civil Engineering.
- Chu, L., M., Yin, J., H., 2005. Comparison of Interface Shear Strength of Soil Nails Measured by Both Direct Shear Box Tests and Pullout Tests, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- Cria C623, 2005. Standarts for The Repair of Buildings Following Flooding.

- Çakır, T., 2005. Donatılı Zemin Dayanma Duvarlarının Projelendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Demirkoç, A., 2007. Derin Kazılarda Zemin Çivisi ile Ankrajlı Destek Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demirkoç, A., Özaydın, K. ve Kılıç, H., 2007. Zemin Çivisi ile Ankrajlı Destek Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sempozyumu, 99-105.
- Duncan, M. ve Chang, C., Y., 1970. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation, 96, 1629-1653.
- FHWA, 1998. Manual for design and construction monitoring of soil nail walls, US Department of Transportation, Washington, D.C., USA.
- FHWA, 2003. Soil Nail Walls, Geotechnical Circular No: 7, US Department of Transportation, Washington, D.C., USA.
- French National Research Project Clouterre, 1993. Recommendations Clouterre 1991, English Translation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA.
- Gässler, G. ve G., Gudehus, 1981. Soil nailing – some aspects of a new technique, Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden.
- Geoquide 7, 2008. Guide to soil nail design and construction, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, Civil Engineering and Development Building, Kowloon, Hong Kong.
- Ghareh S., 2015. Parametric Assessment of Soil-Nailing Retaining Structures in Cohesive and Cohesionless Soils, Measurement, 73, 341-351.
- Gurpersaud, N., Vanapalli, S., K. ve Sivathayalan, S., 2013. Semiempirical Method for Estimation of Pullout Capacity of Grouted Soil Nails in Saturated and Unsaturated Soil Environments, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- He, S., Ouyang, C., Luo, Y., 2011. Seismic stability analysis of soil nail reinforced slope using kinematic approach of limit analysis, Environ Earth Sci, 66, 319–326.
- Hong – Kong Institution of Engineers, 2003. Soil nails in loose fill slopes, a preliminary study, HKIE Geotechnical Division, Hong – Kong.
- Hong, C., Y., Yin, J., H., Zhou, W., H. ve Pei, H., F., 2012. Analytical Study on Progressive Pullout Behavior of a Soil Nail, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- Janbu, J., 1963. Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests, Proc. ECSMFE Wiesbaden.

- Kayabali, K., Selçuk, L., 2009. Nail penetration test for determining the uniaxial compressive strength of rock', International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 47, 265–271.
- Kılıç, H., 2000. Yumuşak Zeminler Üzerine Oturan Dolgu Barajlarda Deformasyonların Deneysel ve Nümerik Yöntemlerle Belirlenmesi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 278s.
- Kim, Y., Lee, S., Jeong, S., Kim, J., 2013. The Effect of Pressure-Grouted Soil Nails on The Stability of Weathered Soil Slopes, Computers and Geotechnics, 49, 253–263.
- Li, J., Tham, L., G. , Junaideen, S., M., Yue, Z., Q. ve Lee, C., F., 2008. Loose Fill Slope Stabilization with Soil Nails: Full-Scale Test, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- Liu, F., T., Fan, Y., H., Jiang, S., W., 2008. A Simple Mathematical Model for Soil Nail and Soil Interaction Analysis.
- Meenal, G., Saran, S., Mittal, S., 2009. Pseudo-Static Analysis of Soil Nailed Excavations, Springer Science+Business Media B.V.
- Ng, C., W., W., Lee, G., T., K., 2002. A Three-Dimensional Parametric Study of the Use of Soil Nails for Stabilising Tunnel Faces, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.
- Pei, H., Yin, J., Zhu, H. ve Hong, C., 2013. Performance Monitoring of a Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Soil Nail during Laboratory Pullout Test Using FBG Sensing Technology, International Journal of Geomechanics.
- Pedley, M.J., Jewell, R.A. ve G.W.E. Milligan, 1990. A large scale experimental study of soil – reinforcement interaction, Ground Engineering, 44-48.
- Pedley, M.J., 2000. Examples of the use of temporary works soil nailing in the UK and Ireland, Proc. 25th Annual Meeting and 8th Conf of the Deep Foundation Institute, New York, USA.
- Phear, A., Dew, C., Özsoy, B., Wharmby, N.J., Judge, K. ve Barley, A.D., 2005. Soil Nailing - Best Practice Guidance, CIRIA, London, United Kingdom.
- PLAXIS, 2015. User Manual. 2D version8, (Edited by Brinkgreve, R.J.B.), Delft University of Technology&PLAXIS b.v., The Netherlands.
- Porterfield, J., A., Cotton, D., M., ve Byrne, R., J., , 1994. Soil nailing Field Inspectors Manual, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA.
- Potts, D., M. and Zdravković, L., T., 1999. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory. Thomas Telford, London, UK.
- Pradhan, B., Tham, L., G., Yue, Z., Q., Junaideen, S., M. ve Lee, C., F., 2006. Soil–Nail Pullout Interaction in Loose Fill Materials, International Journal of Geomechanics.

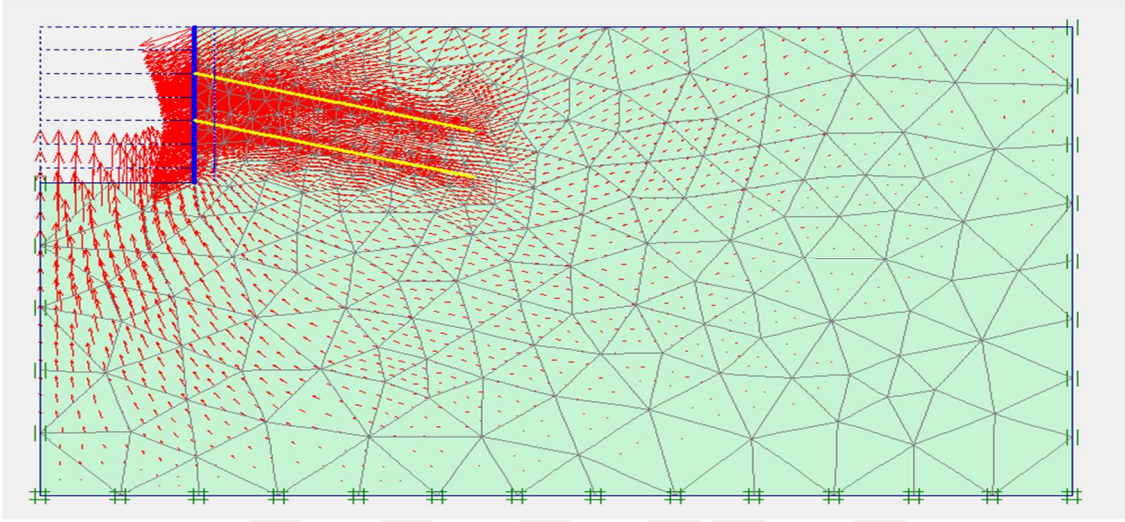
- Rabejac, S. ve P., Toudic, 1974. Construction of a retaining wall between Versailles Chantiers, Revue Generale des Chemins de Fer, 232-237.
- Rabie, M., 2016. Performance of hybrid MSE/Soil Nail walls using numerical analysis and limit equilibrium approaches, HBRC Journal, 63-70.
- Schlosser, F., ve P., Unterreiner, 1991. Soil Nailing in France: Research and Practice, Proceedings of the Transportation Research Board, Annual Meeting, Washington, D.C., USA.
- Shivashankar, R., Babu, M., R., D., Nayak, S., Manjunath, R., 2010. Stone Columns with Vertical Circumferential Nails: Laboratory Model Study, Geotech Geol Eng, 28, 695–706.
- Skempton, A., W., 1996. Embankments and cuttings on the early railways, Construction History, 33-39.
- Su, L., Yin, J., Zhou, W., 2010. Influences of overburden pressure and soil dilation on soil nail pull-out resistance, Computers and Geotechnics, 37, 555–564.
- Su, L., J., Chan, T., C., F., Shiu, Y., K., Cheung, T. ve Yin, J., H., 2007. Influence of Degree of Saturation on Soil Nail Pull-out Resistance in Compacted Completely Decomposed Granite Fill.
- Tan, S., A., Ooi, P., H., Park, T., S. ve Cheang, W., L., 2008. Rapid Pullout Test of Soil Nail, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., 1967, Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons, Newyork.
- Turner, J., P., ve Jensen, W., G., 2005. Landslide Stabilization Using Soil Nail and Mechanically Stabilized Earth Walls: Case Study, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- Uzuner, B., 2007. Temel Zemin Mekaniği, Derya Kitabevi, Trabzon.
- Von Soos, P., 1980. Properties of Soil and Rock (in german) In: Grundbautaschenbuch, Part 4, Edition 4, Ernst&Sohn, Berlin.
- Wei, W., B., Cheng, Y., M., 2010. Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods, Computers and Geotechnics, 37, 602–618.
- Xue, X., Yang X., Liu E., 2013. Application of the Modified Goodman Model in Soil Nailing, International Journal of Geomechanics.
- Yin, J., H., Hong, C., Y. ve Zhou, W. H., 2012. Simplified Analytical Method for Calculating the Maximum Shear Stress of Nail-Soil Interface, International Journal of Geomechanics, 309.
- Zhang, M., Song, E., Chen, Z., 1999. Ground Movement Analysis of Soil Nailing Construction by Three-Dimensional (3-D) Finite Element Modeling (FEM), Computers and Geotechnics, 191-204.

- Zhou, Y., D., Cheuk, C., Y., Tham, L., G., 2009. Numerical Modelling of Soil Nails in Loose Fill slope Under Surcharge Loading, Computers and Geotechnics, 36, 837–850.
- Zhu H., Yin, J., Yeung, A., T. ve Jin, W., 2011. Field Pullout Testing and Performance Evaluation of GFRP Soil Nails, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- Zhou, W., Yin, J., Hong, C., 2011. Finite Element Modelling of Pullout Testing on a Soil Nail in a Pullout Box Under Different Overburden and Grouting Pressures, NRC Research Press.



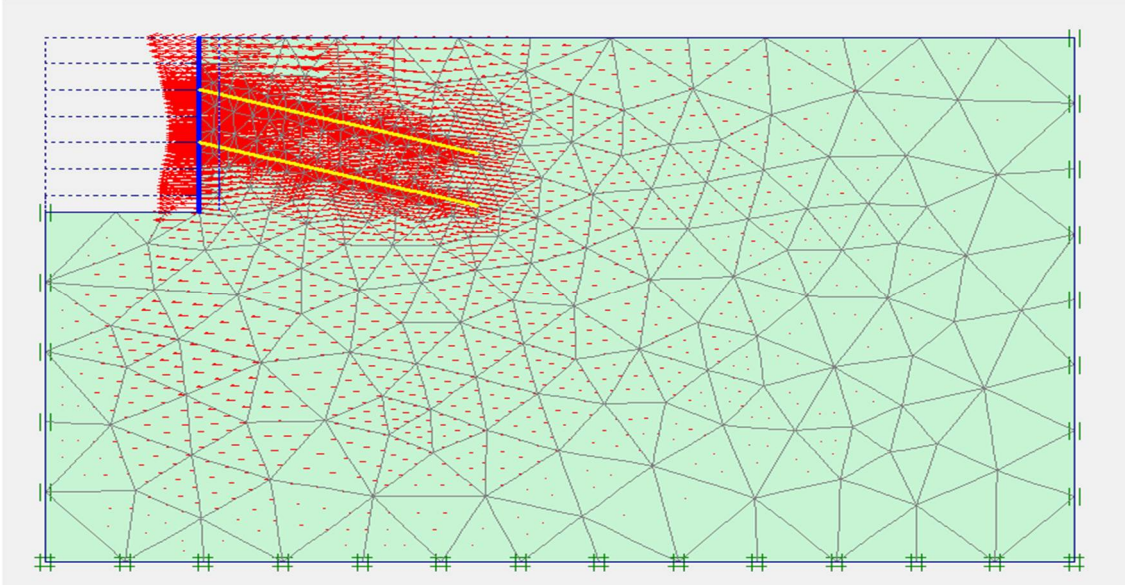
6.EKLER

Ek 1. $D_r=35\%$ Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için İki Zemin Çivili 0 kN/m^2 Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



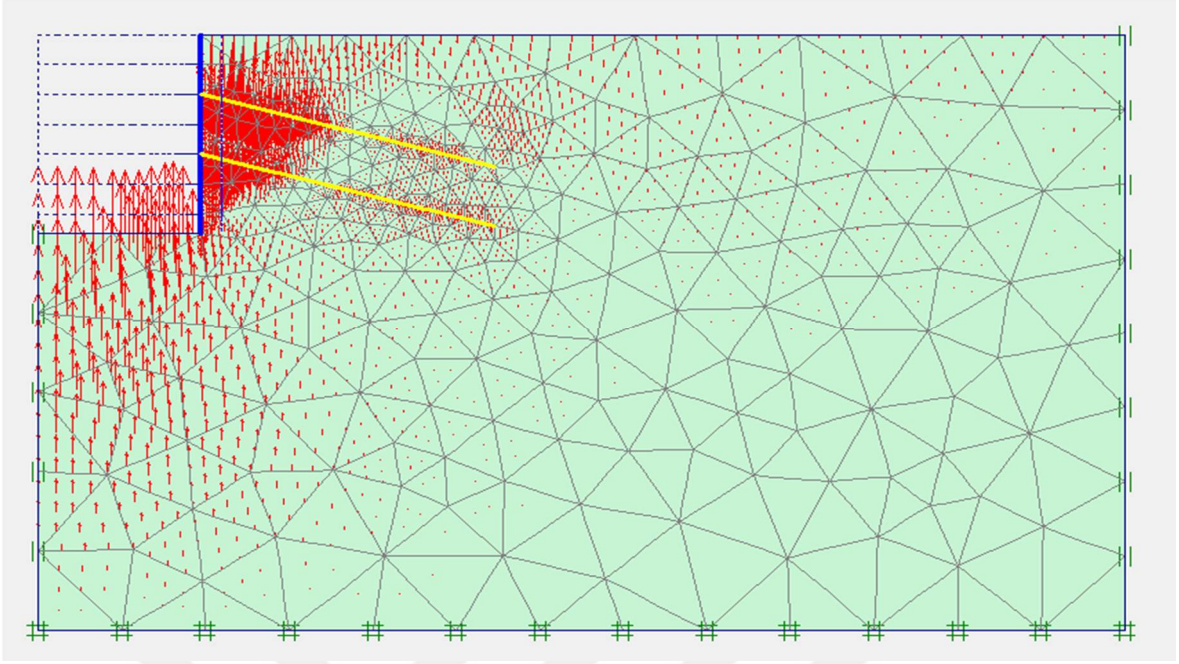
$$\delta_{\text{maksimum}}=37.13 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 1.1. 0 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



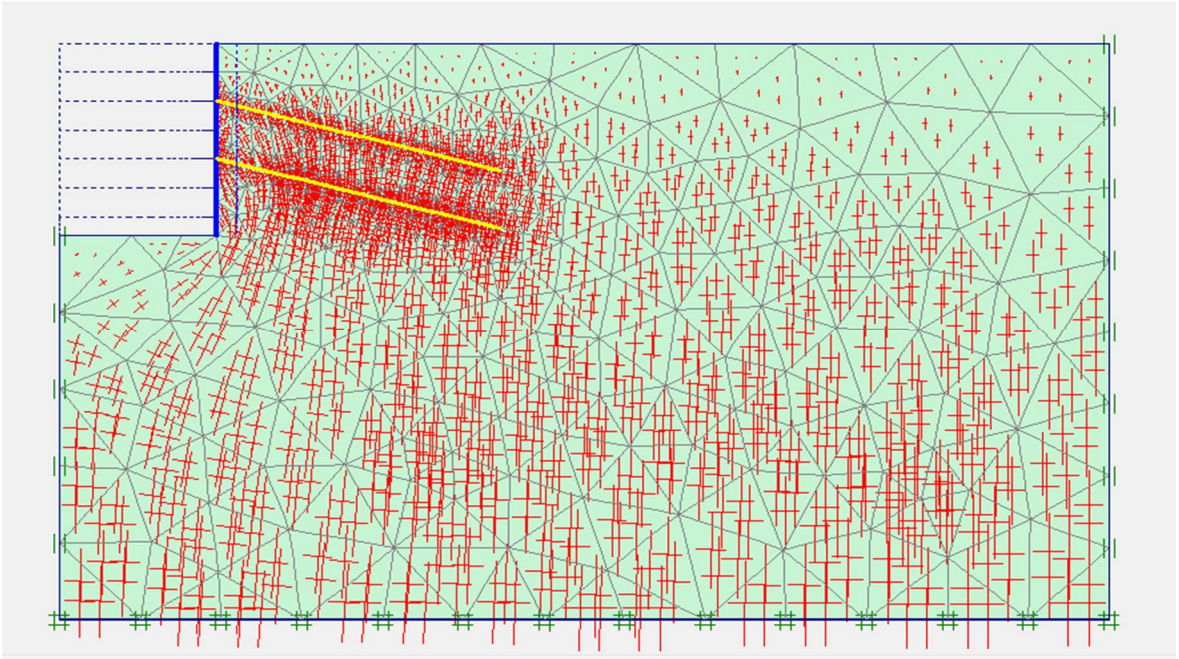
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}= 26.71 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 1.2. 0 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



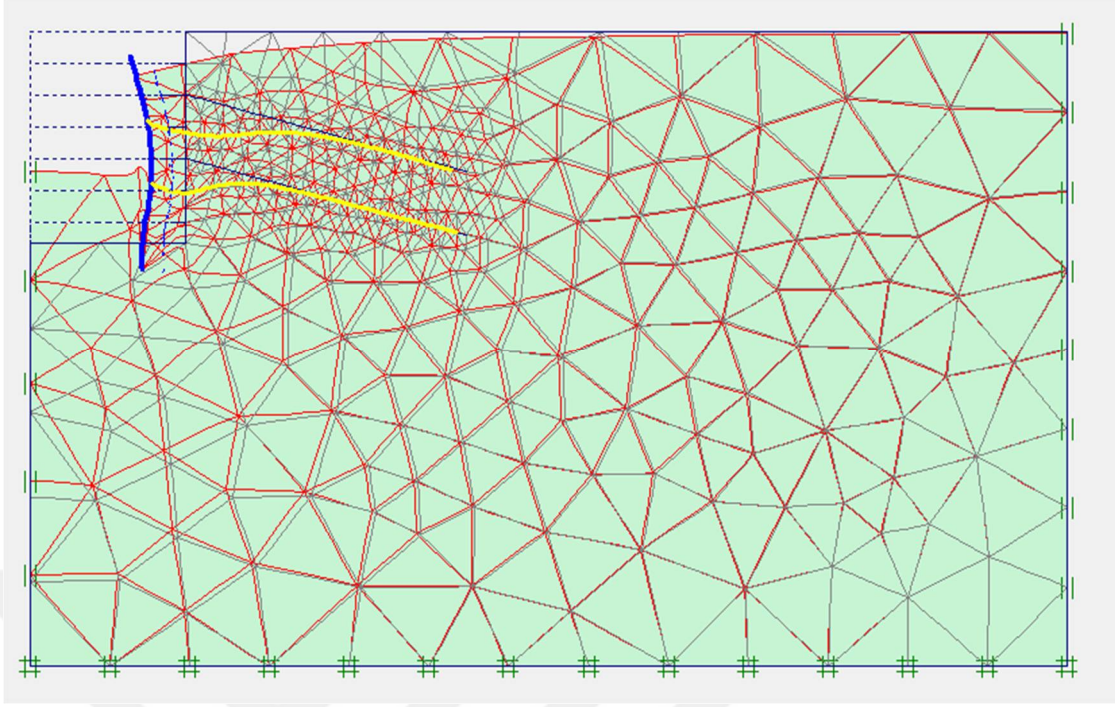
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 36.12 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 1.3. 0 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



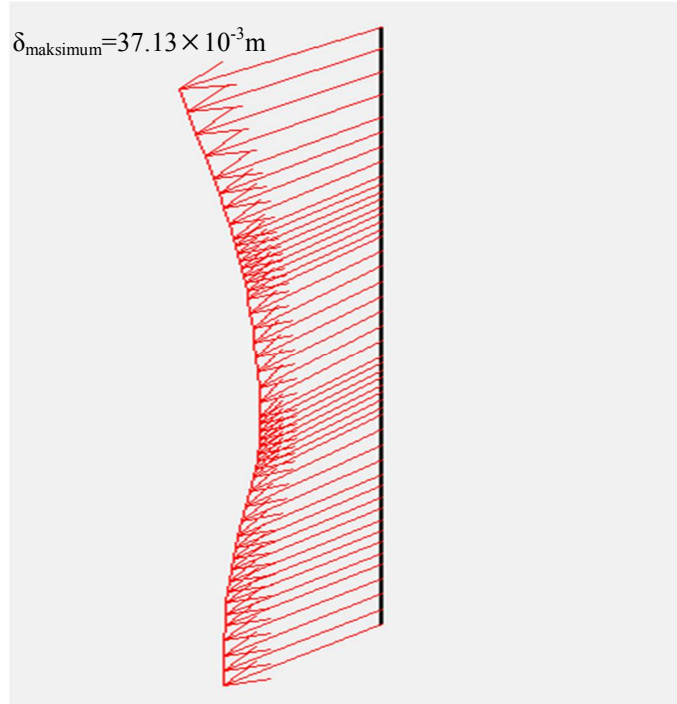
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -457.90 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 1.4. 0 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değışimi

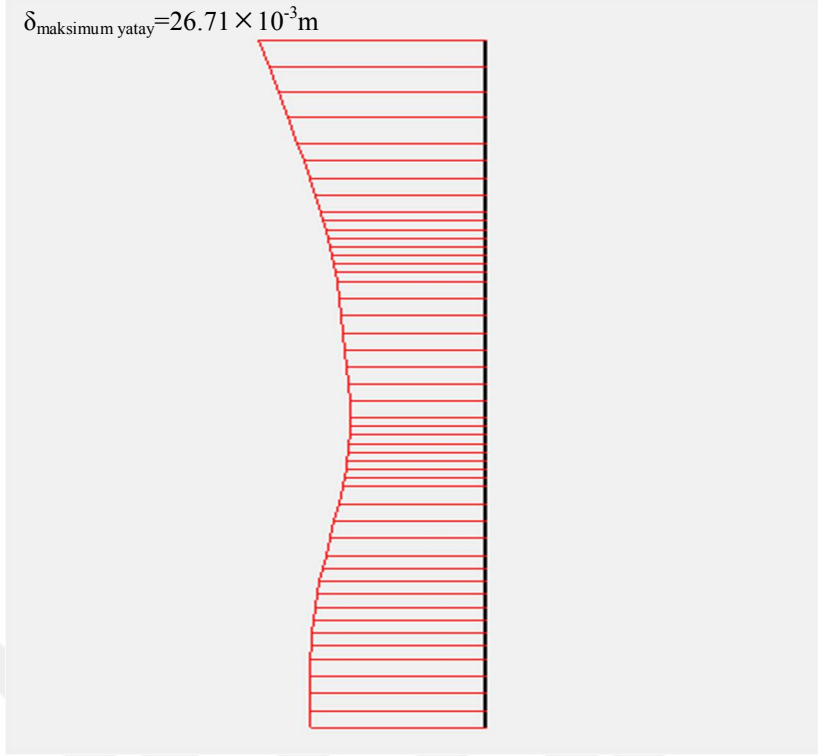


$$\delta_{\text{maksimum}}=37.13 \times 10^{-3} \text{m}$$

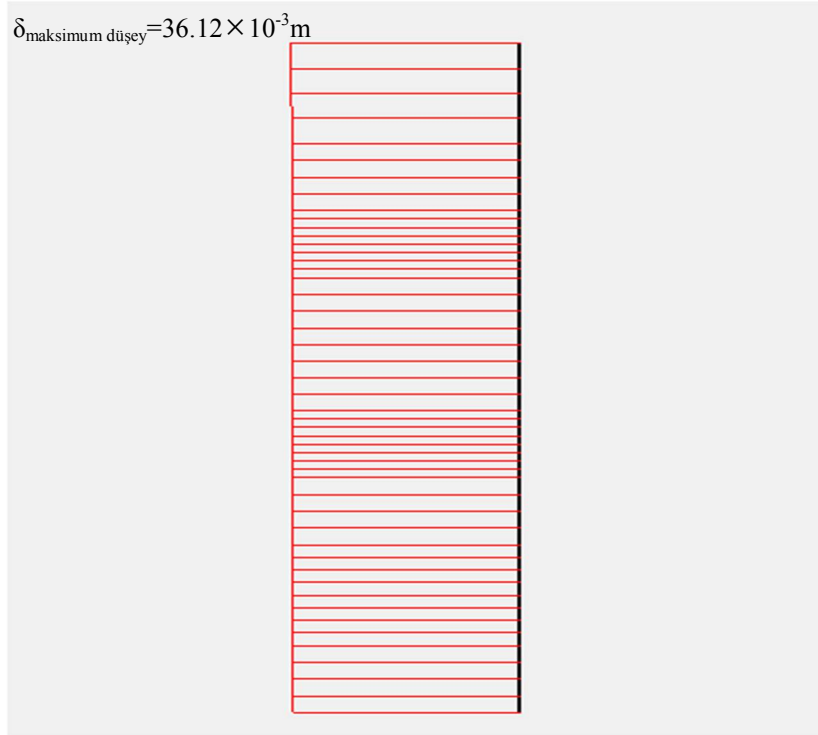
Ek Şekil 1.5. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



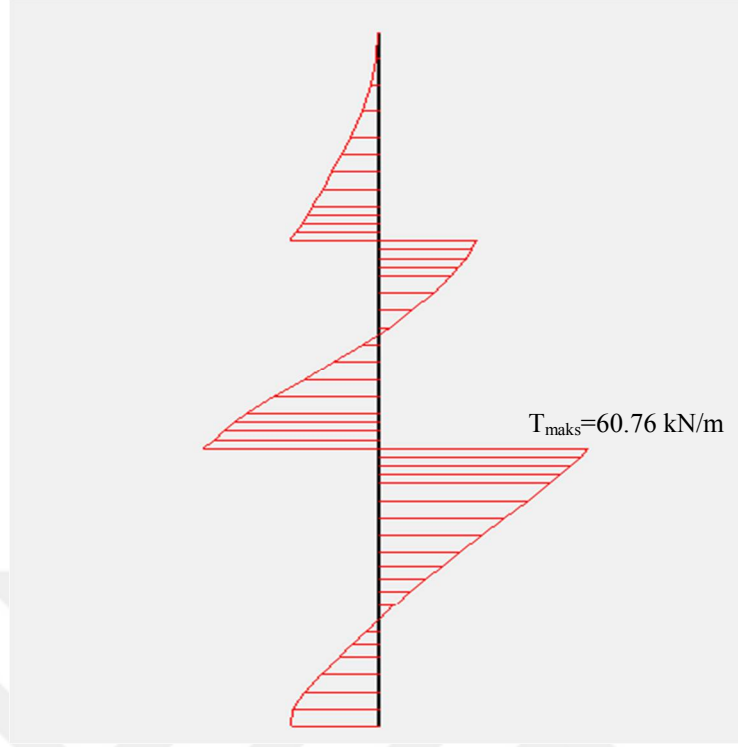
Ek Şekil 1.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



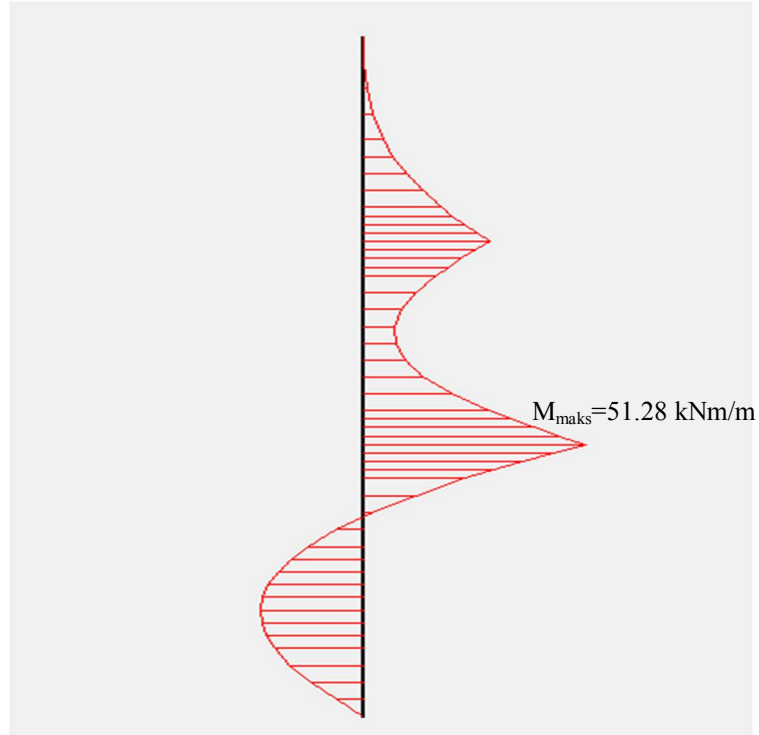
Ek Şekil 1.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 1.8. Duvarın düşey deplasmanlar diyagramı

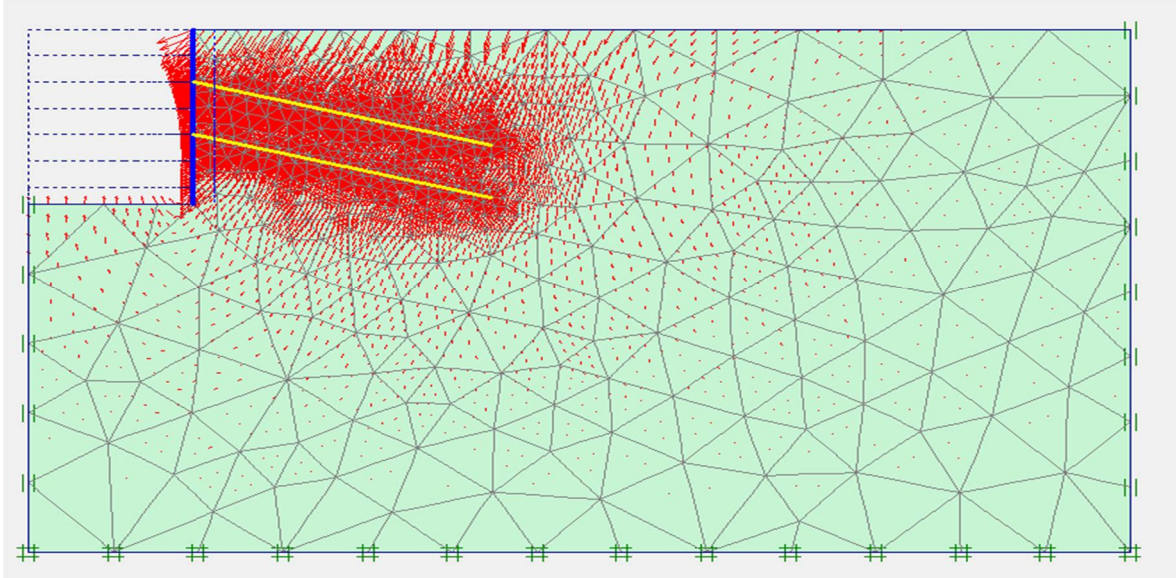


Ek Şekil 1.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



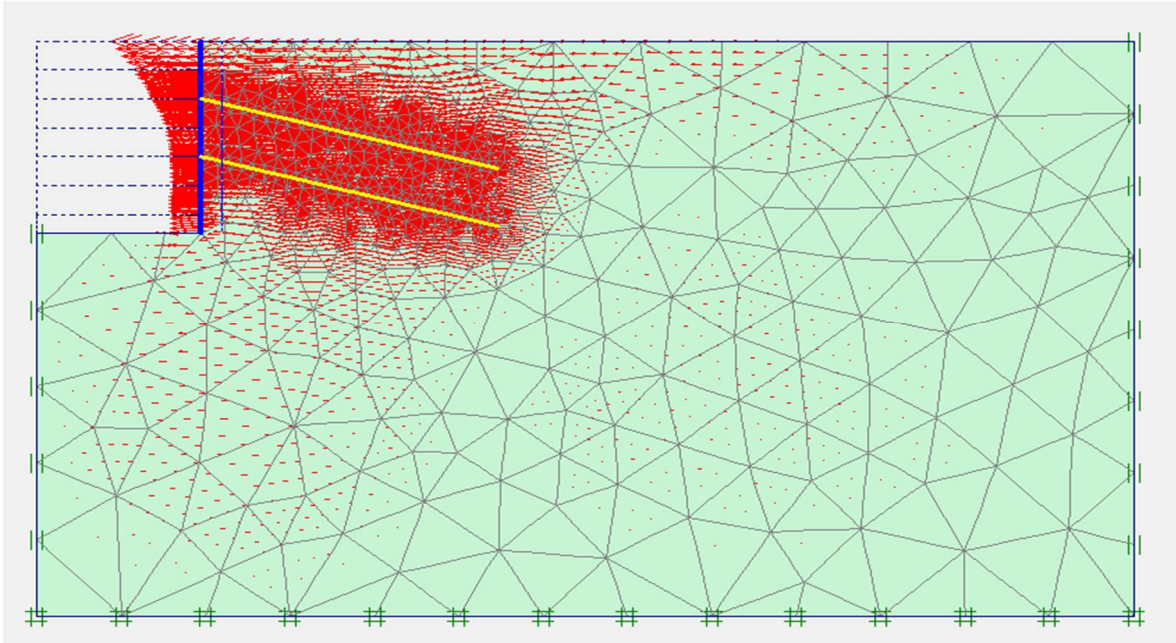
Ek Şekil 1.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 2. $D_r=35\%$ Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için İki Zemin Çivili 50 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



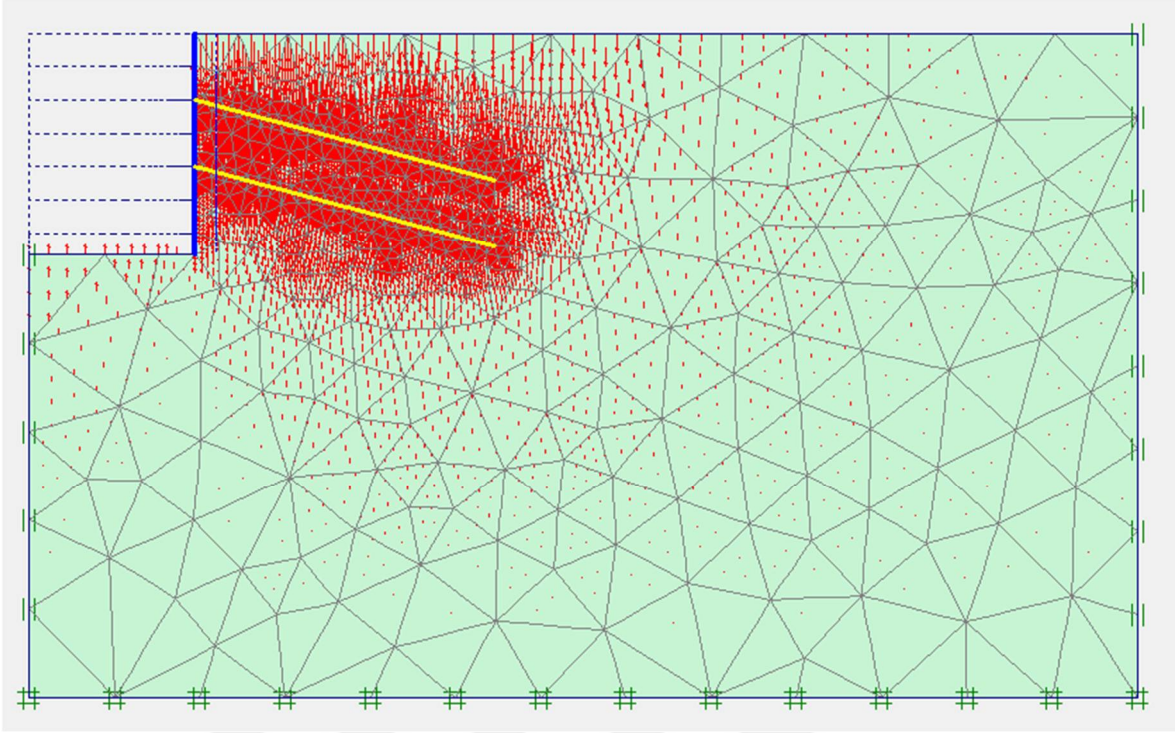
$$\delta_{\text{maksimum}}=126.6 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 2.1. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



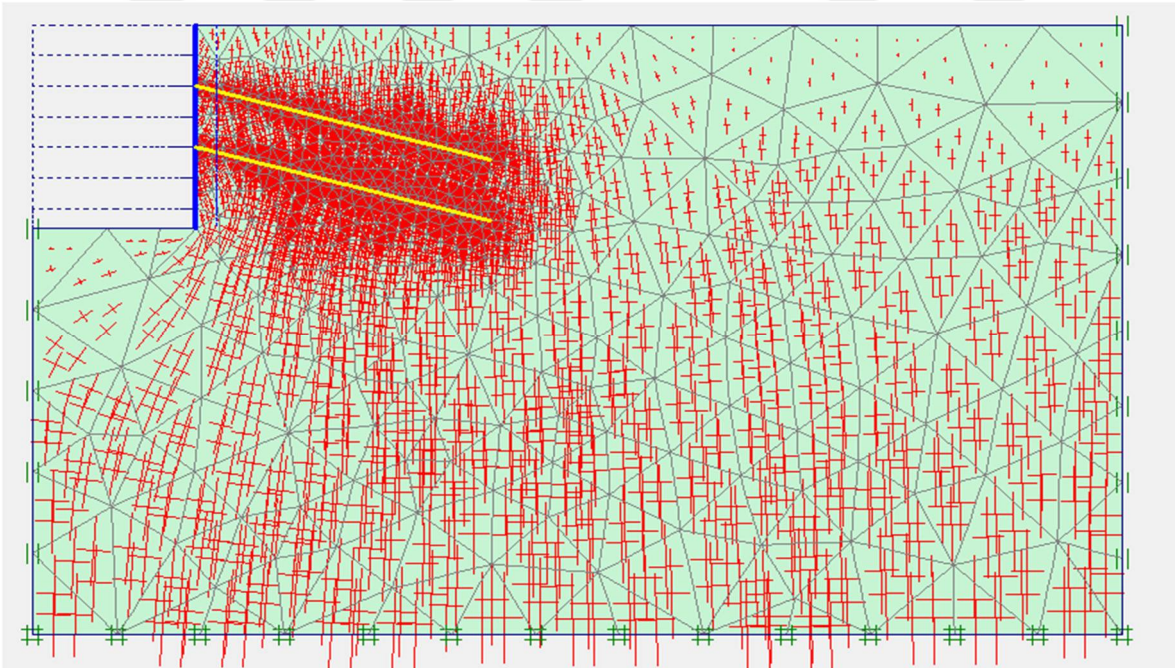
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}= 82.55 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 2.2. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



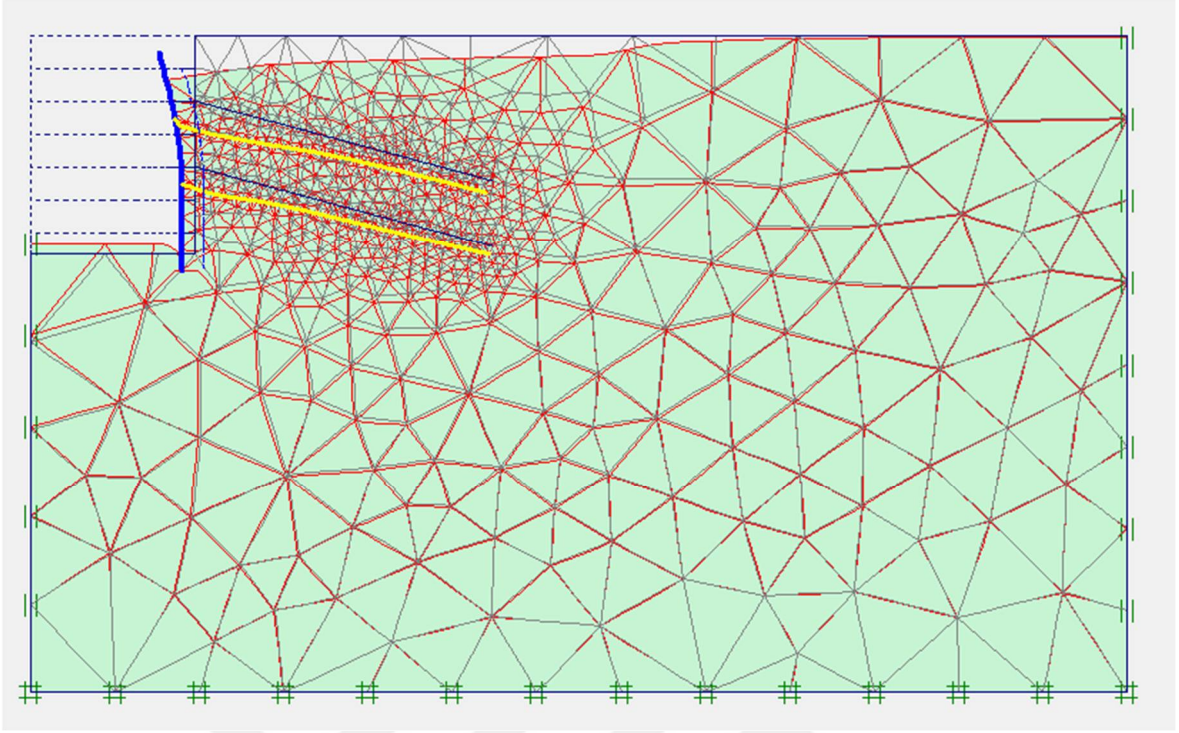
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 103.62 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 2.3. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



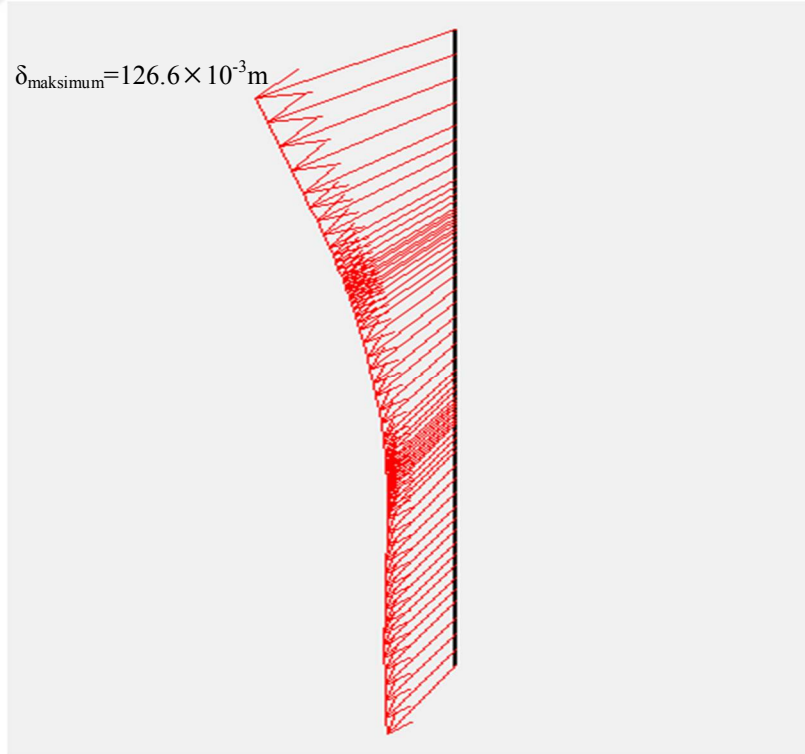
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -630.43 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 2.4. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değışimi

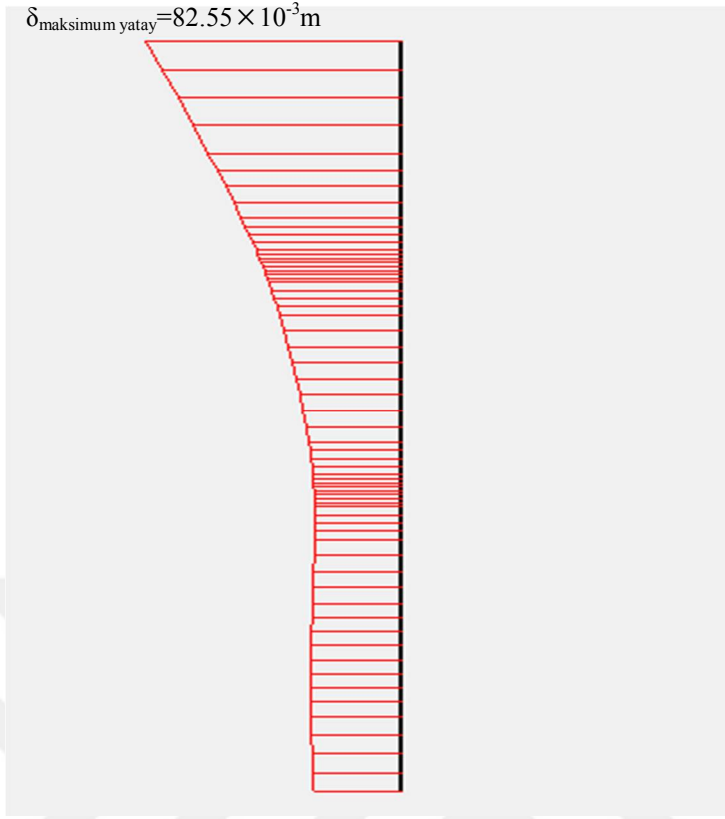


$$\delta_{\text{maksimum}} = 126.60 \times 10^{-3} \text{ m}$$

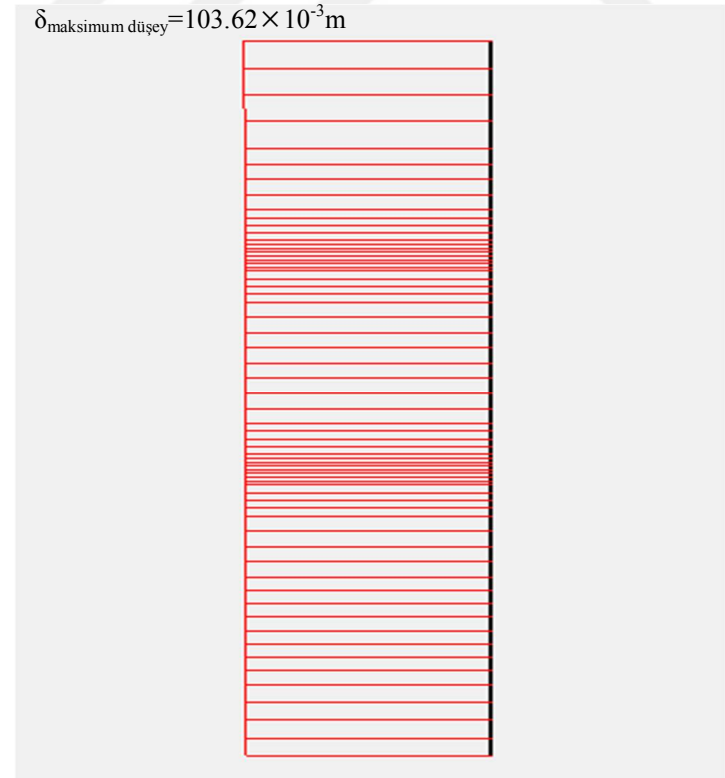
Ek Şekil 2.5. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



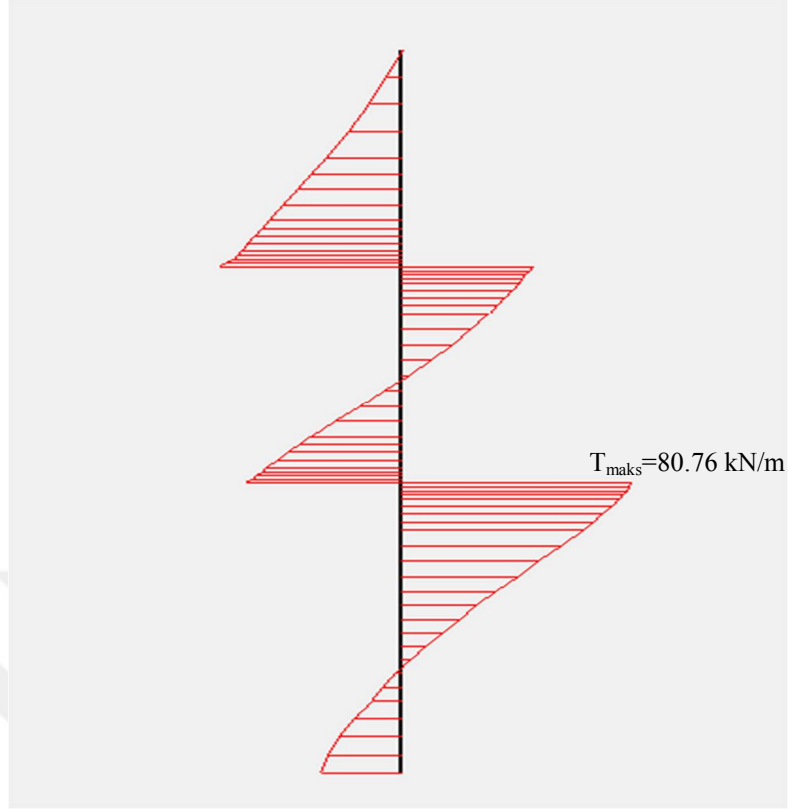
Ek Şekil 2.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



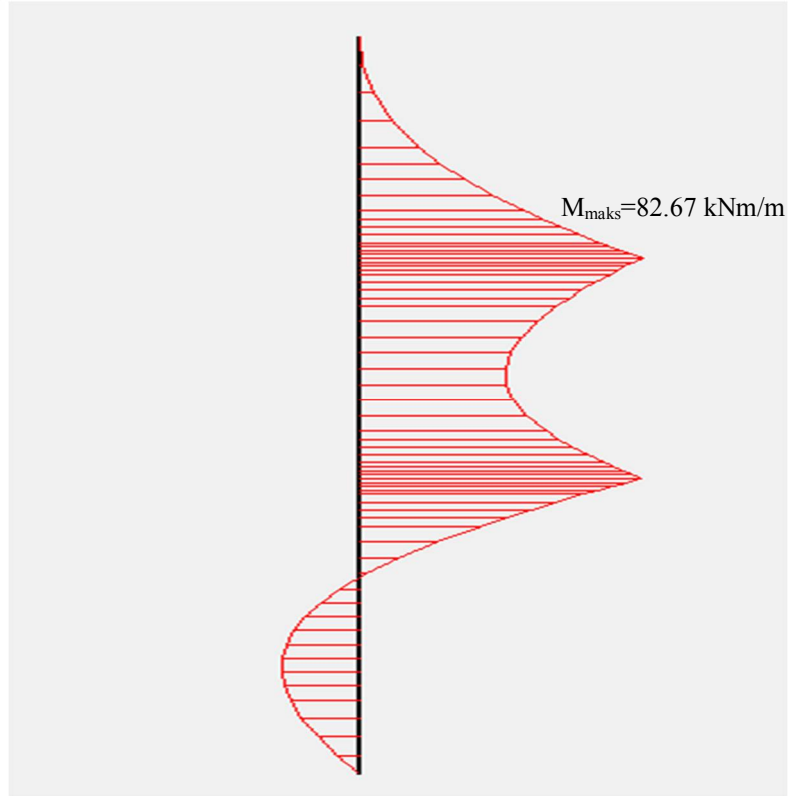
Ek Şekil 2.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 2.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

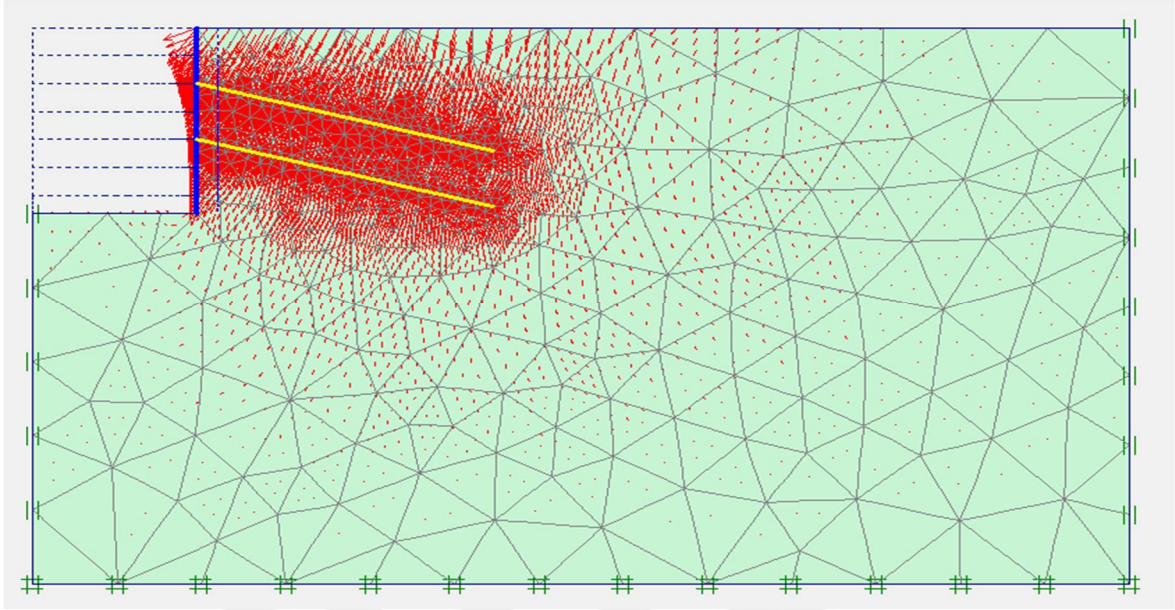


Ek Şekil 2.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



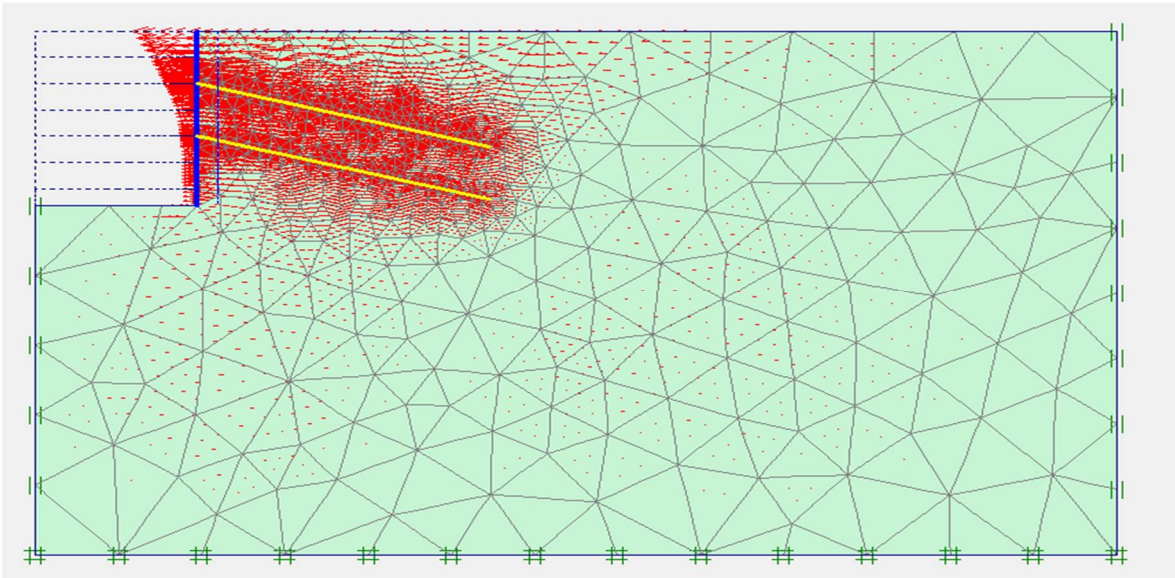
Ek Şekil 2.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 3. Dr=%35 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için İki Zemin Çivili 100 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



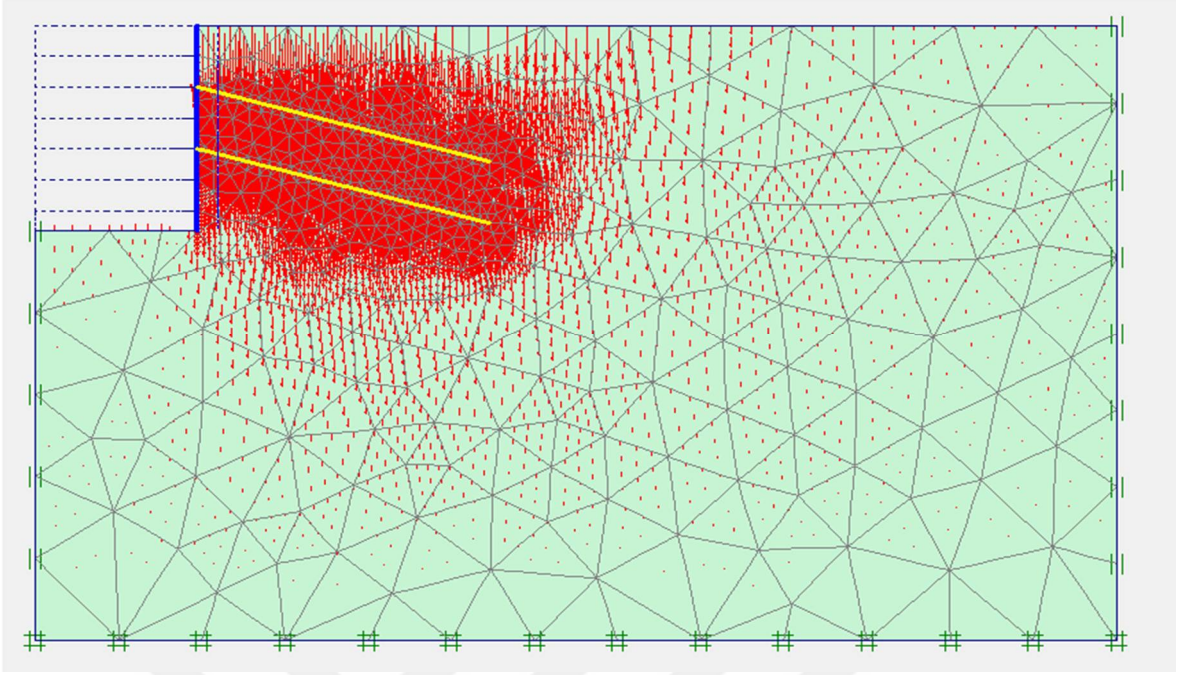
$$\delta_{\text{maksimum}} = 232.83 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 3.1. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



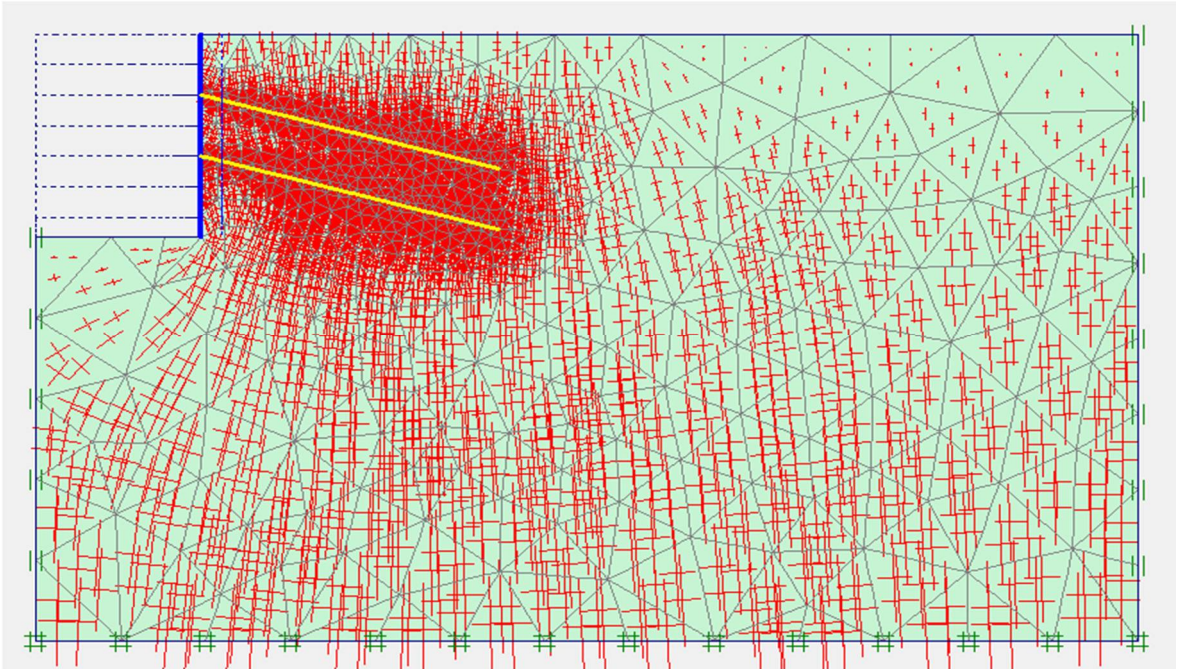
$$\delta_{\text{maksimum yatay}} = 152.42 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 3.2. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



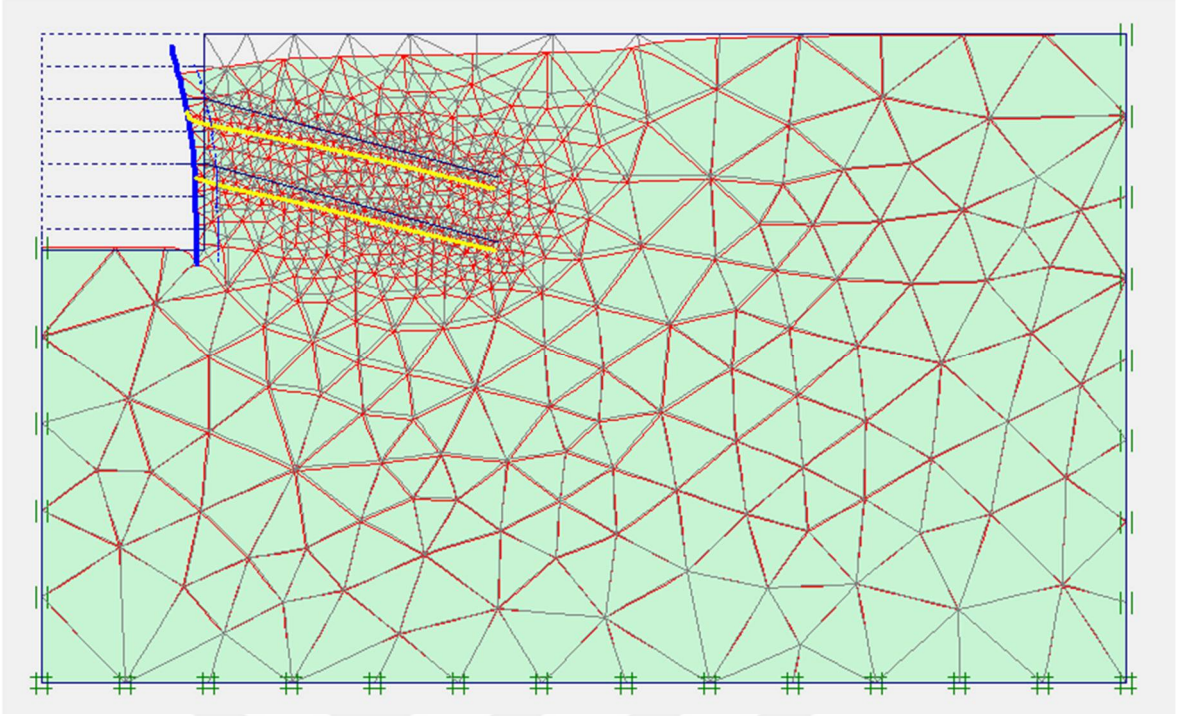
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 191.18 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 3.3. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



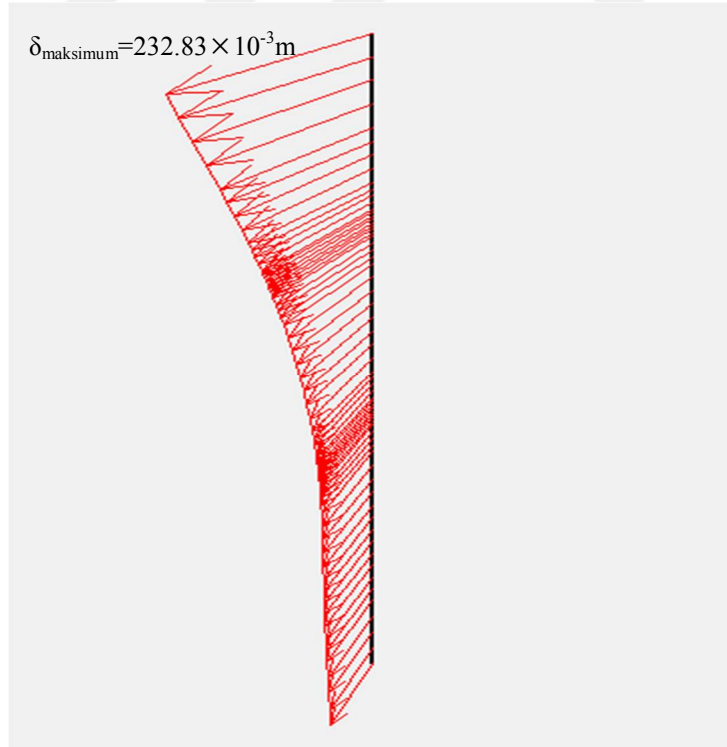
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -767.97 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 3.4. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

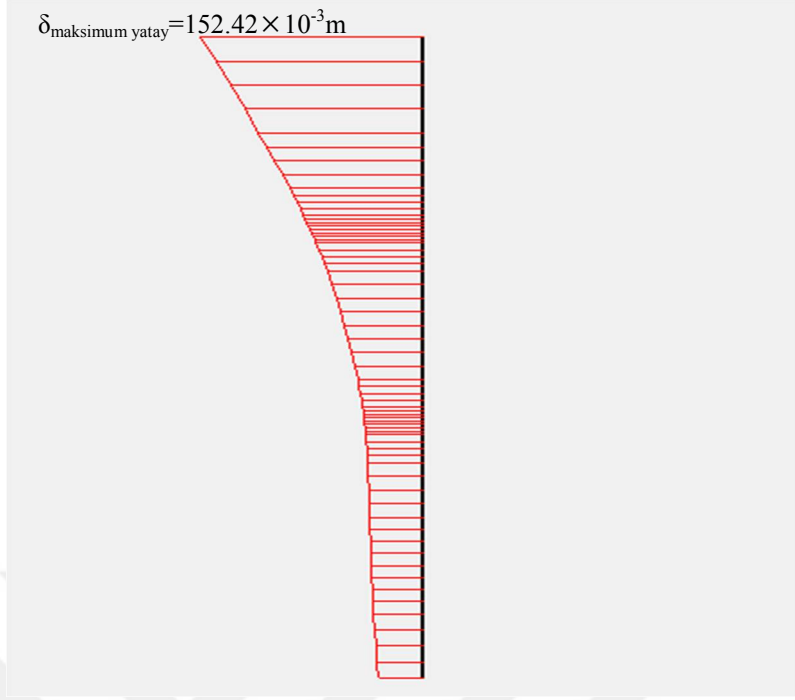


$$\delta_{maksimum} = 232.83 \times 10^{-3} \text{ m}$$

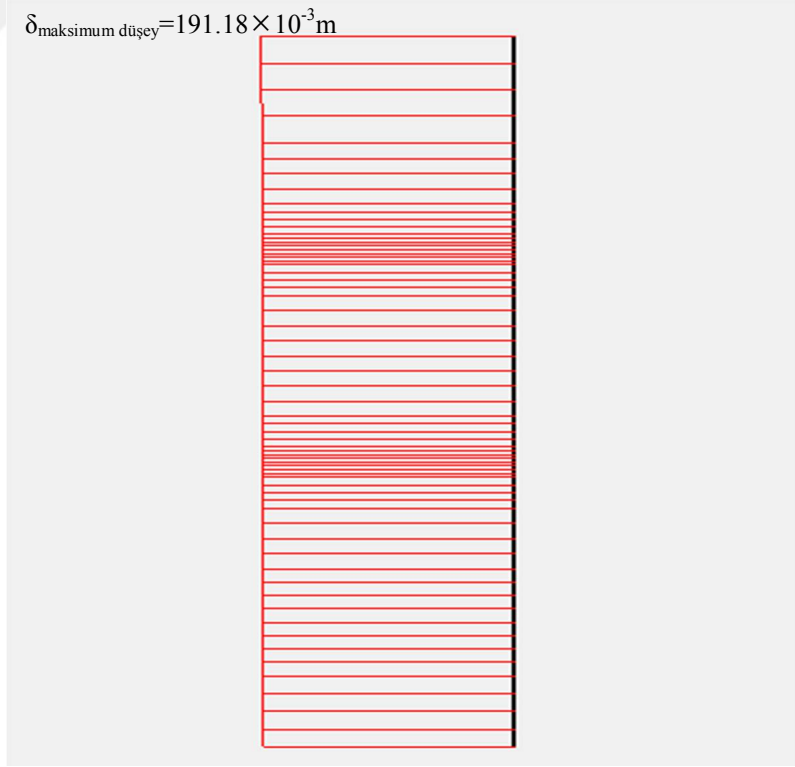
Ek Şekil 3.5. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



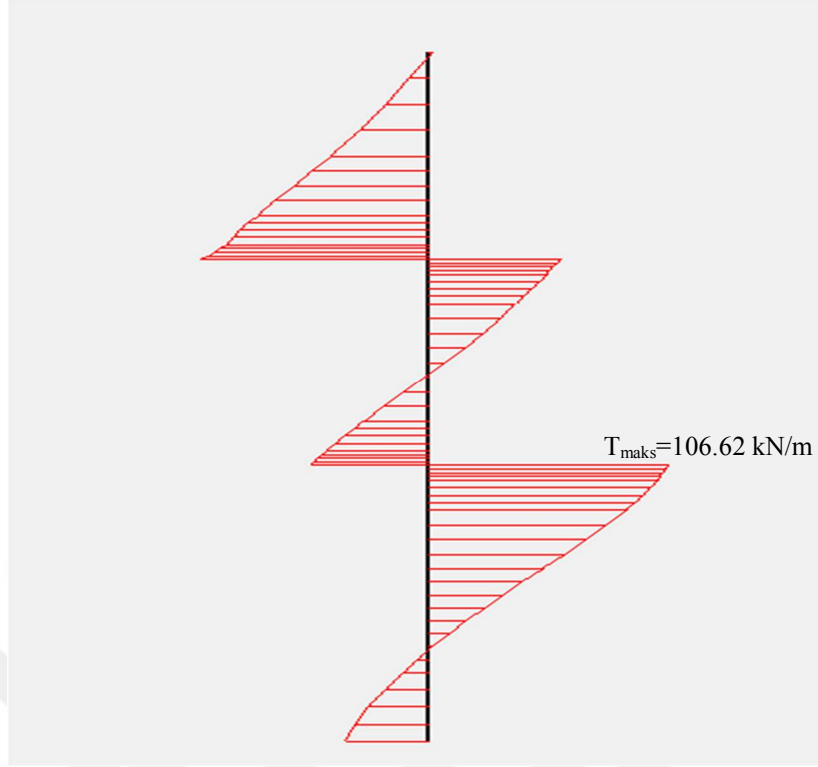
Ek Şekil 3.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



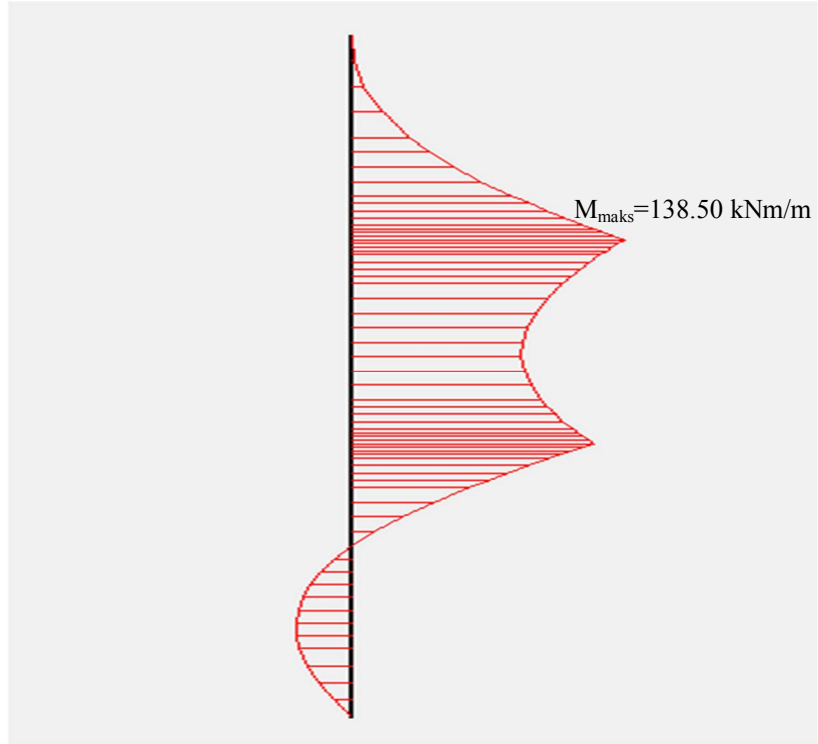
Ek Şekil 3.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 3.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

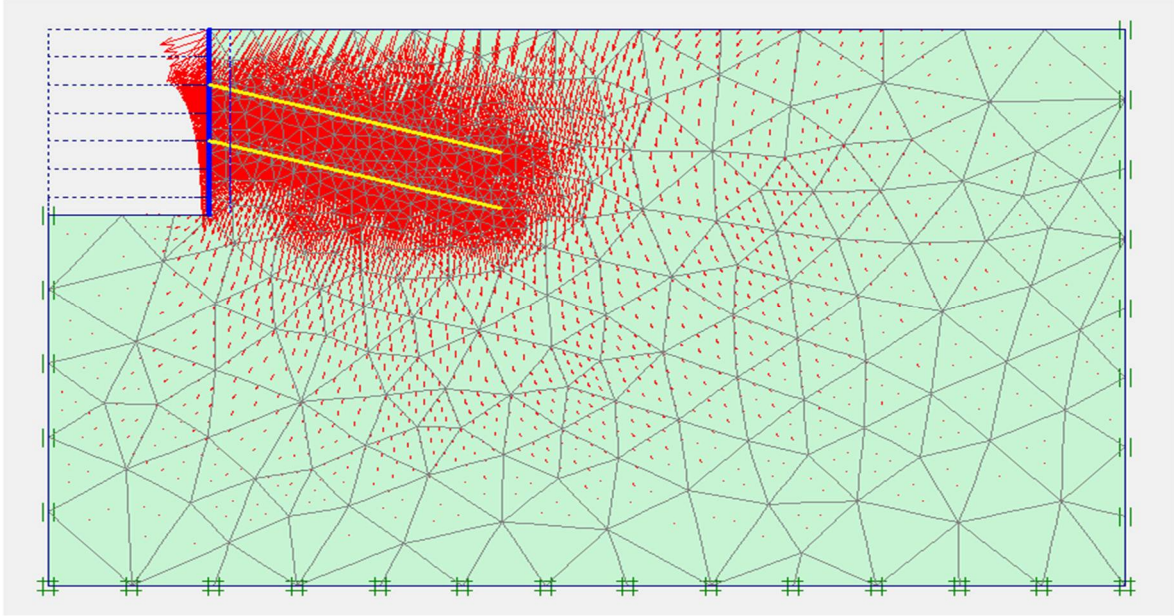


Ek Şekil 3.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



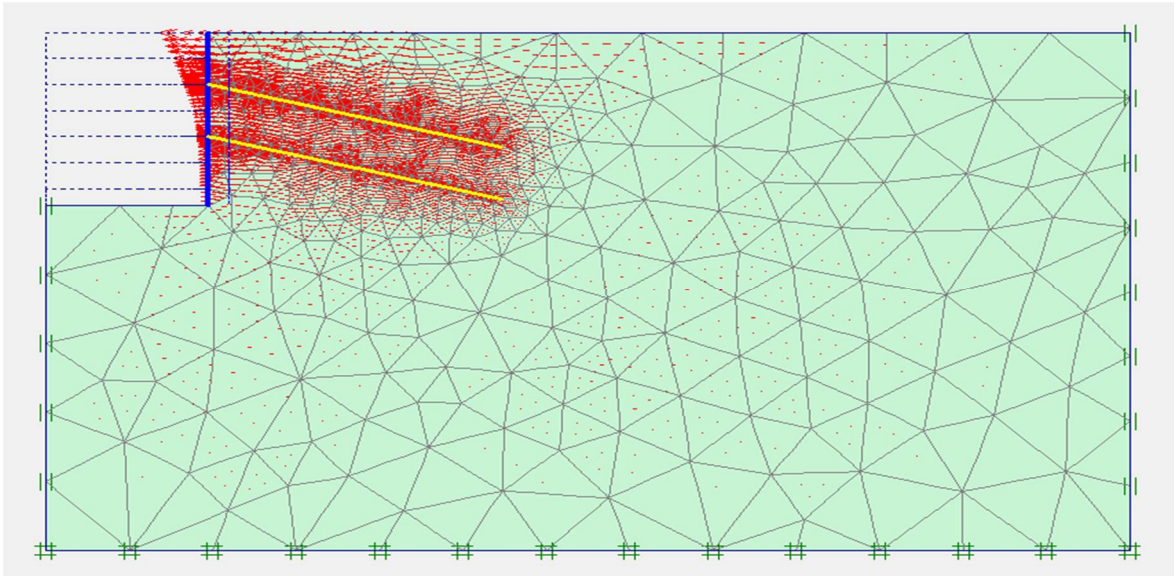
Ek Şekil 3.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 4. Dr=%35 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için İki Zemin Çivili 150 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



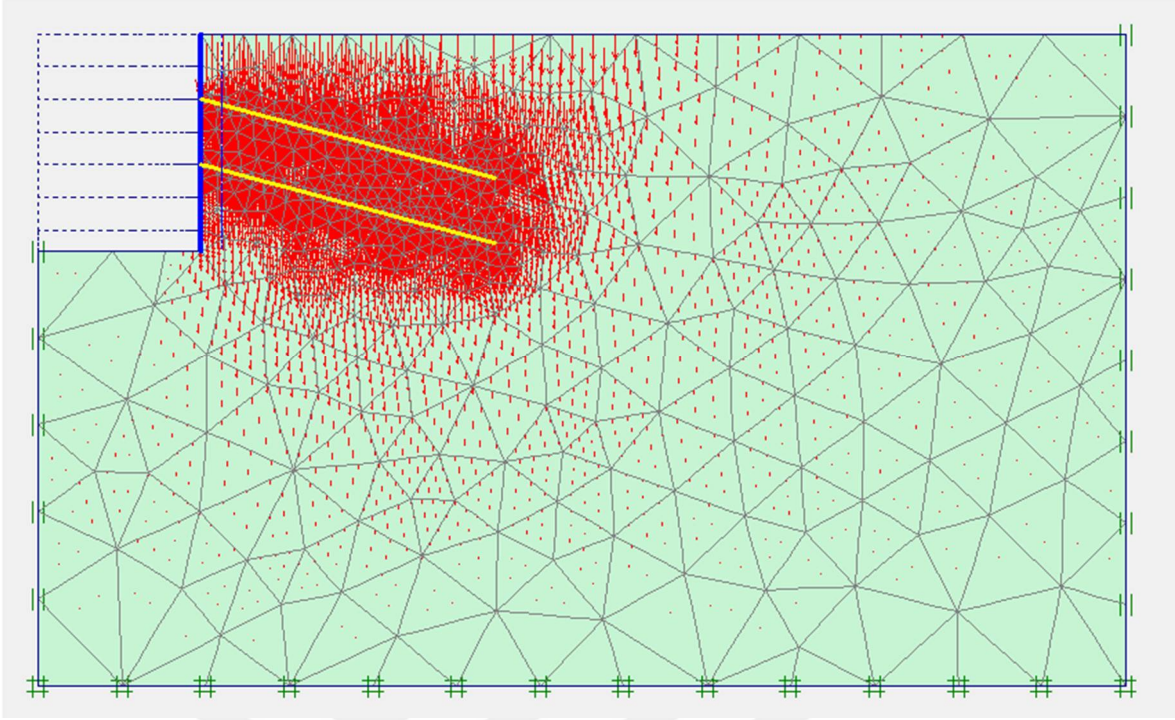
$$\delta_{\text{maksimum}}=342.22 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 4.1. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



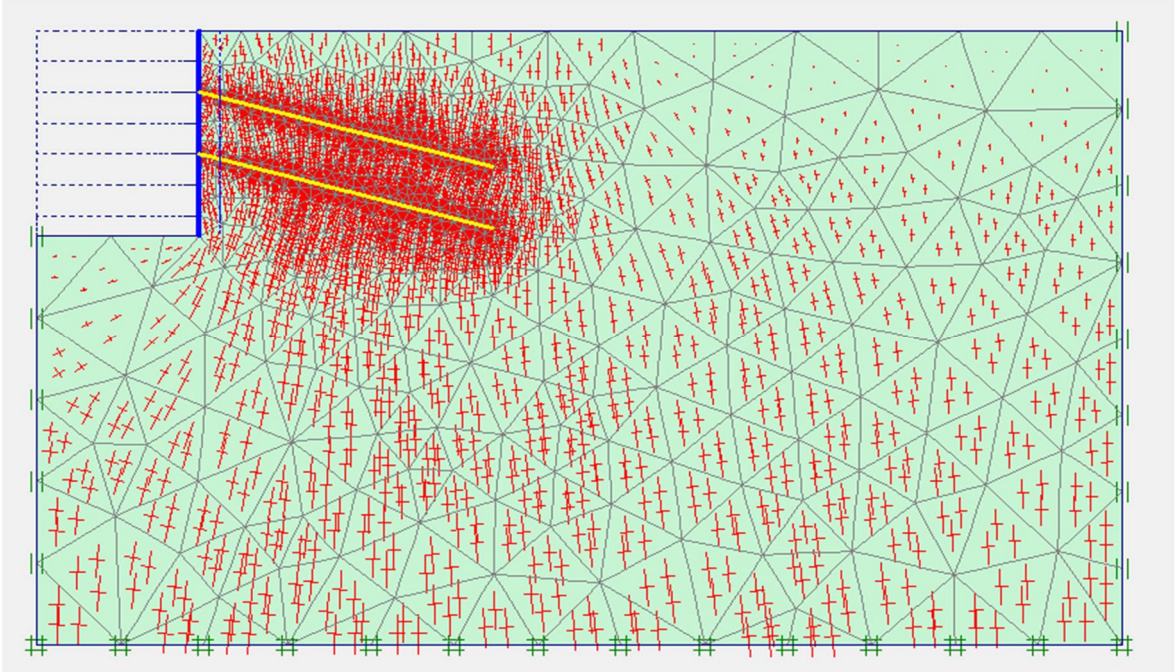
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}=229.04 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 4.2. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



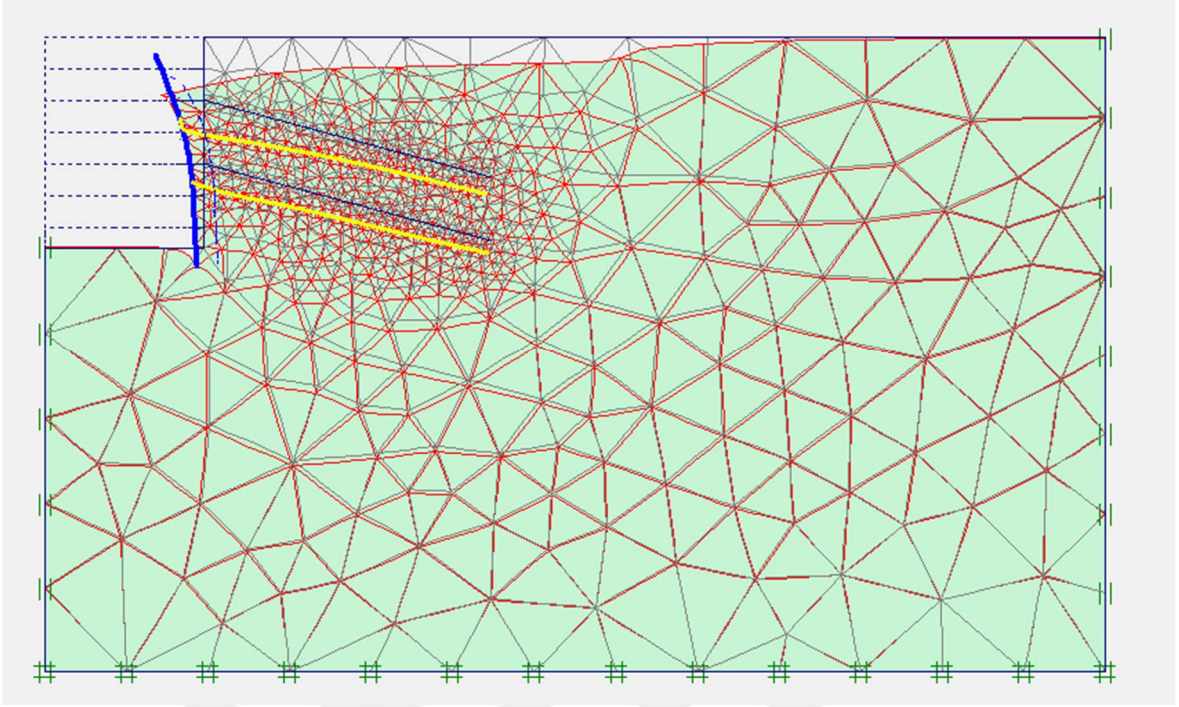
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 278.29 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 4.3. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



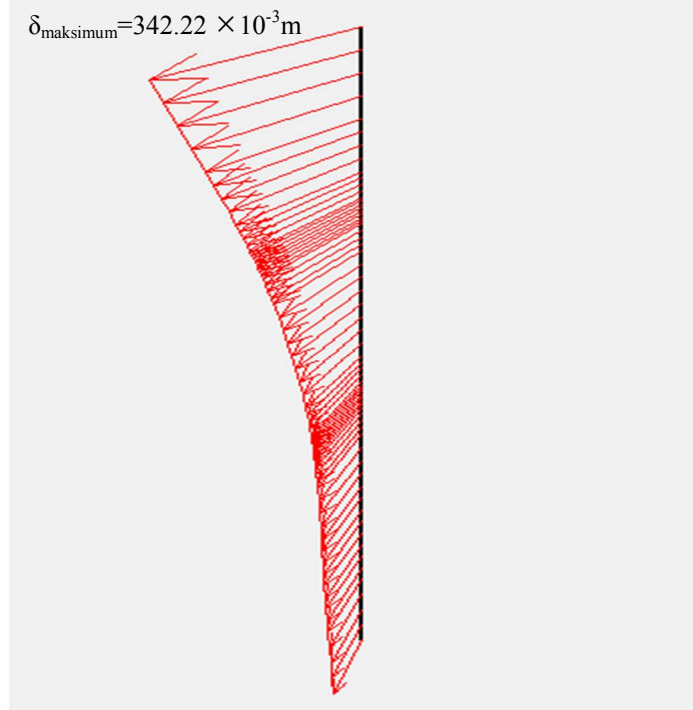
$$\text{Maksimum toplam gerilmeler } -901.38 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 4.4. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

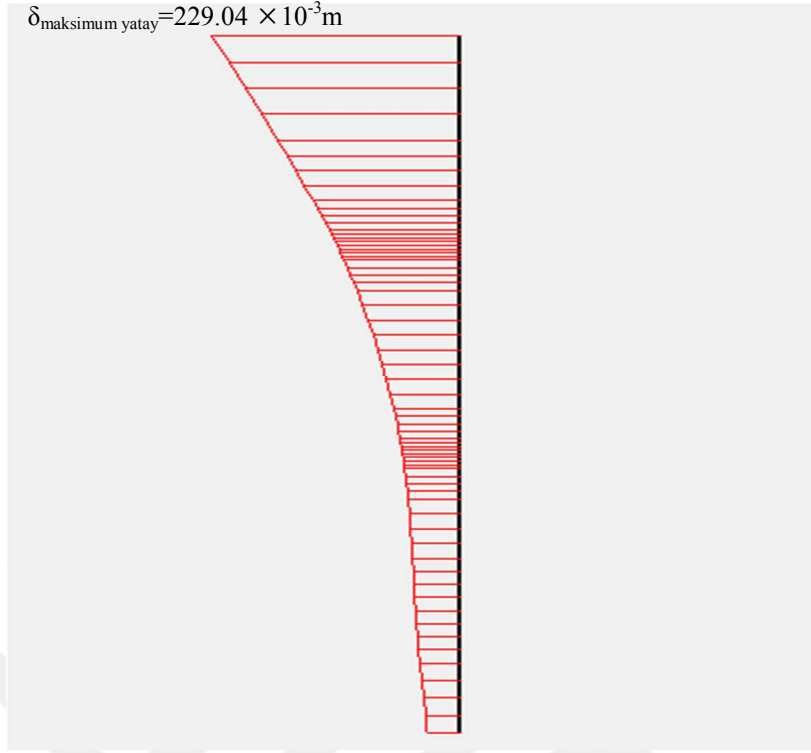


$$\delta_{maksimum} = 342.22 \times 10^{-3} \text{ m}$$

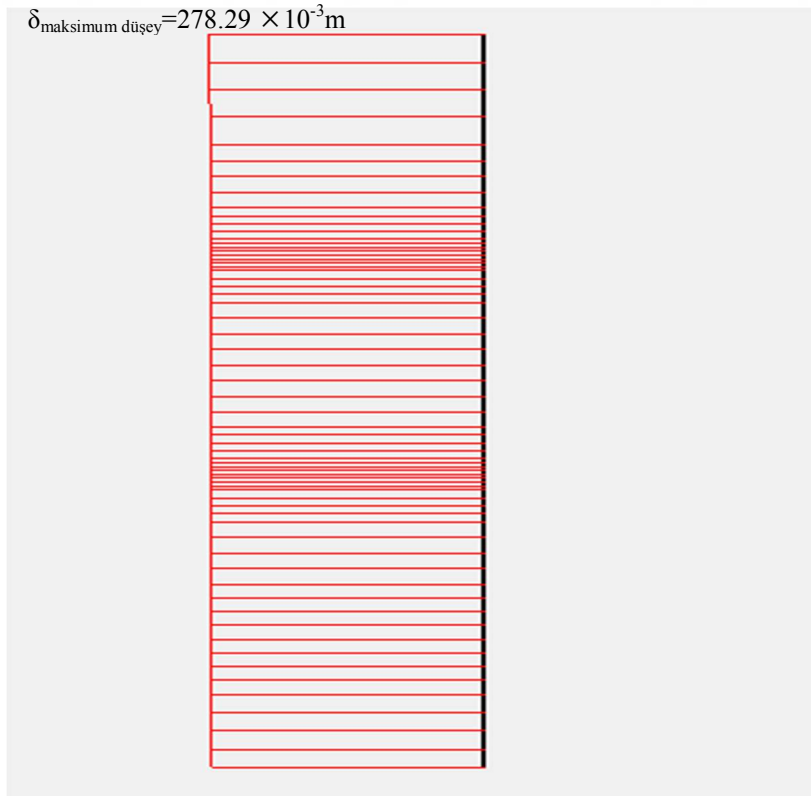
Ek Şekil 4.5. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



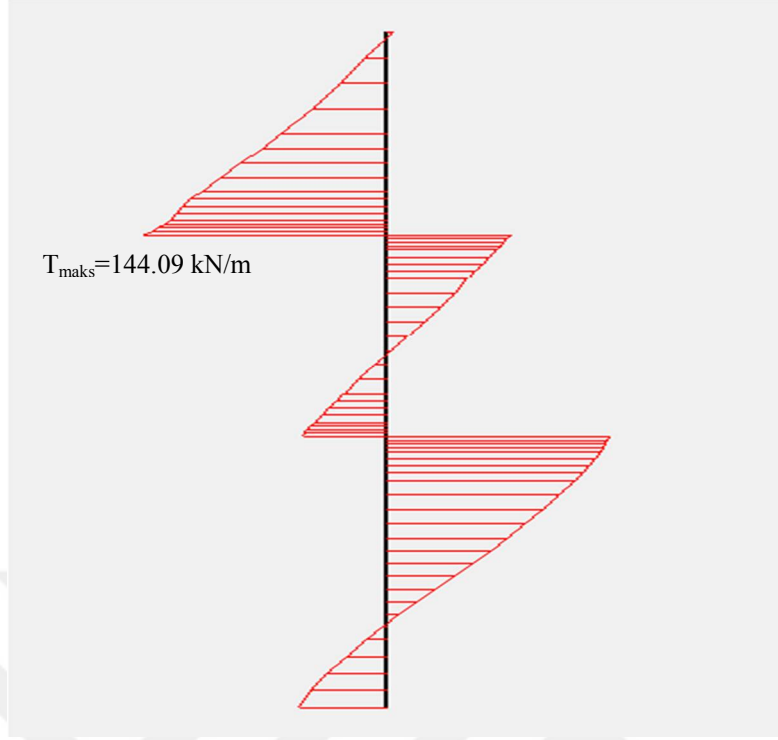
Ek Şekil 4.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



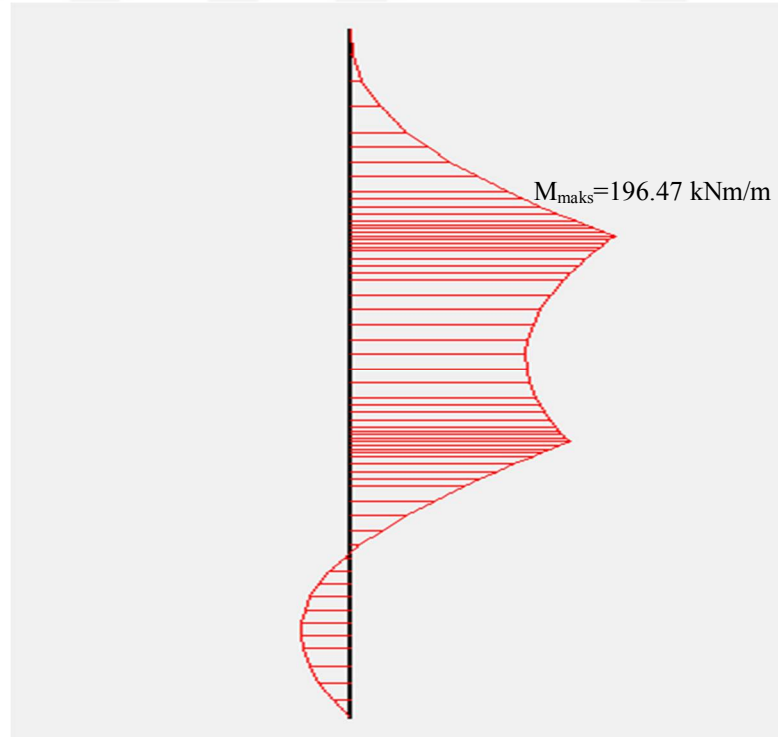
Ek Şekil 4.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 4.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

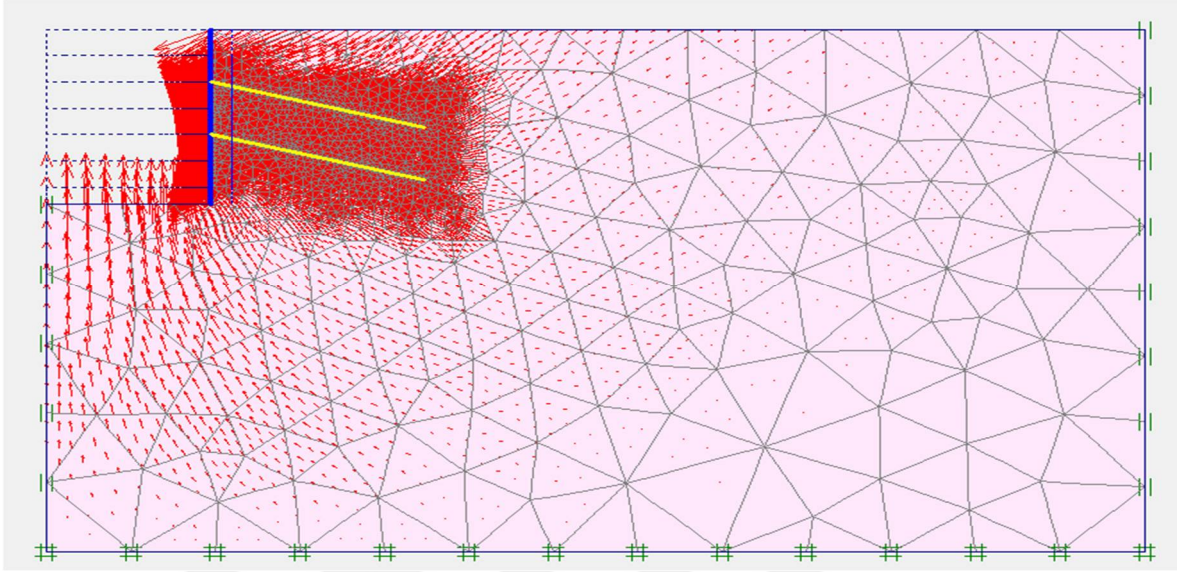


Ek Şekil 4.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



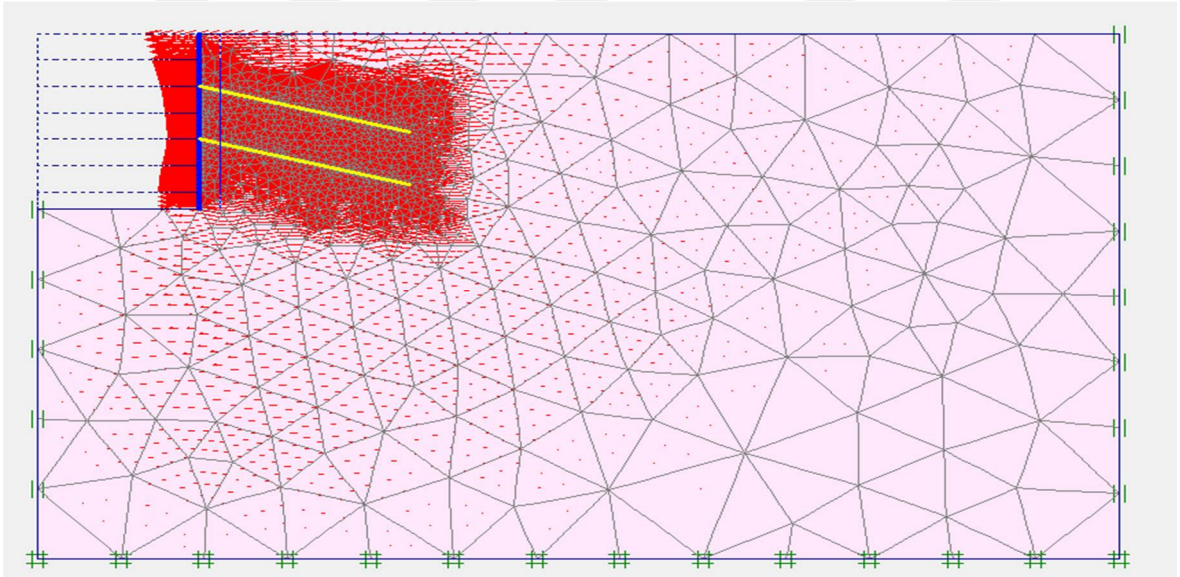
Ek Şekil 4.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 5. Dr=%65 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için İki Zemin Çivili 0 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



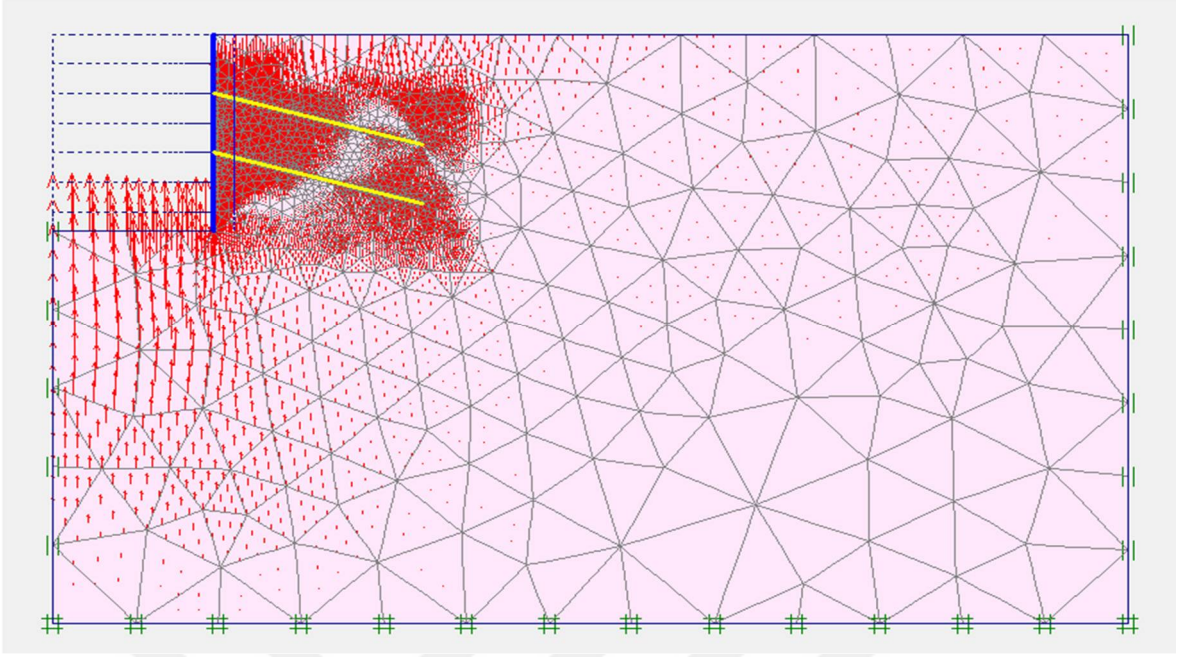
$$\delta_{\text{maksimum}} = 30.78 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 5.1. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



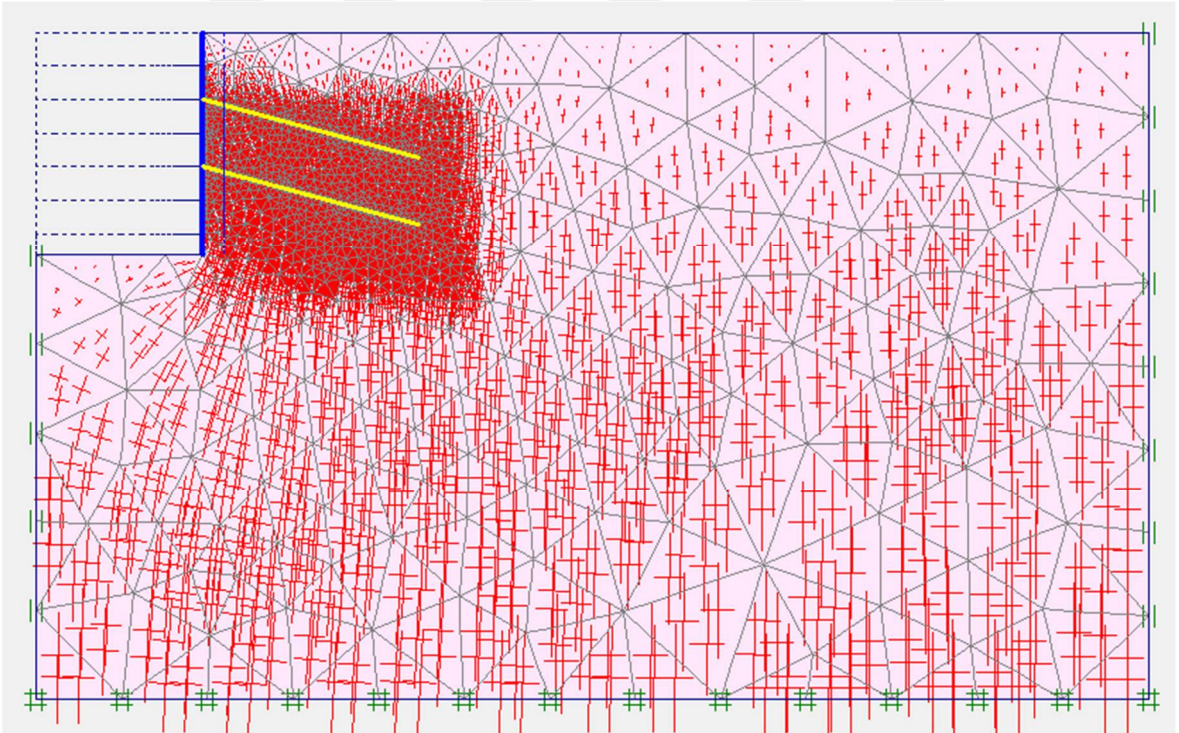
$$\delta_{\text{maksimum yatay}} = 26.55 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 5.2. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



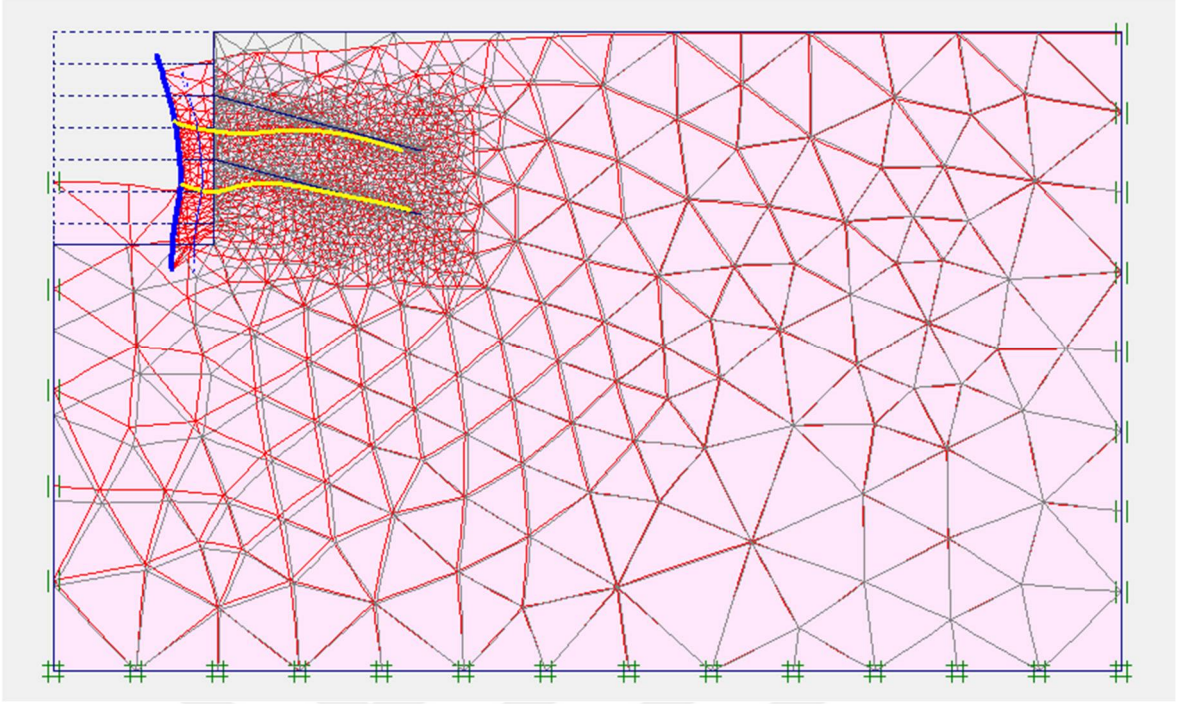
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 29.66 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 5.3. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



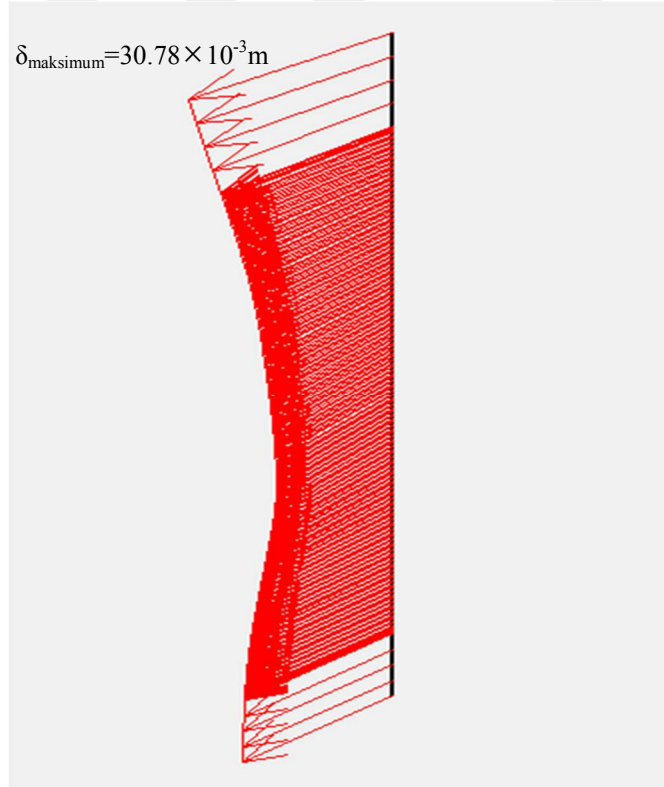
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -655.77 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 5.4. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

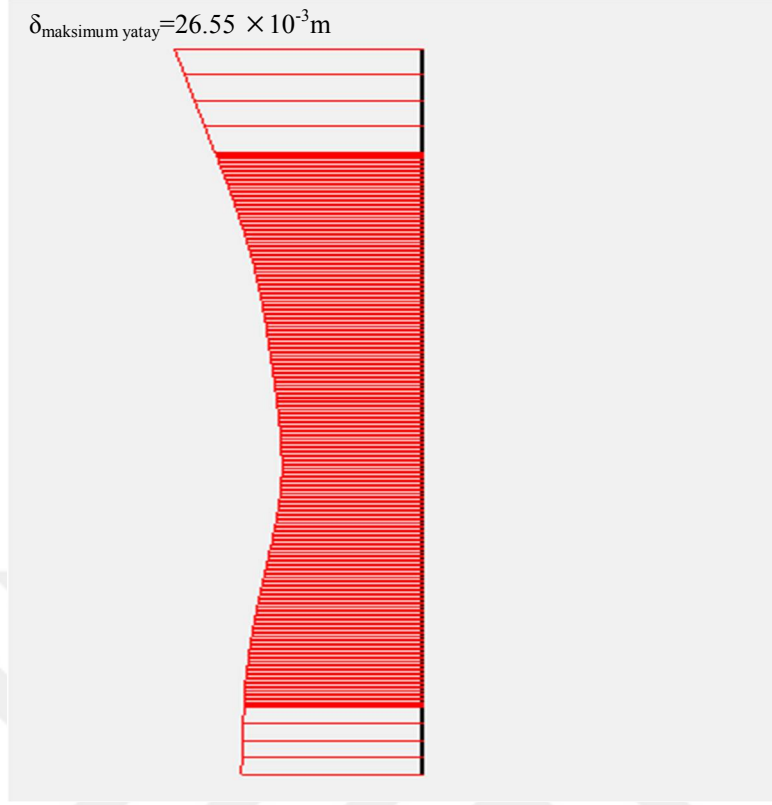


$$\delta_{\text{maksimum}} = 30.78 \times 10^{-3} \text{ m}$$

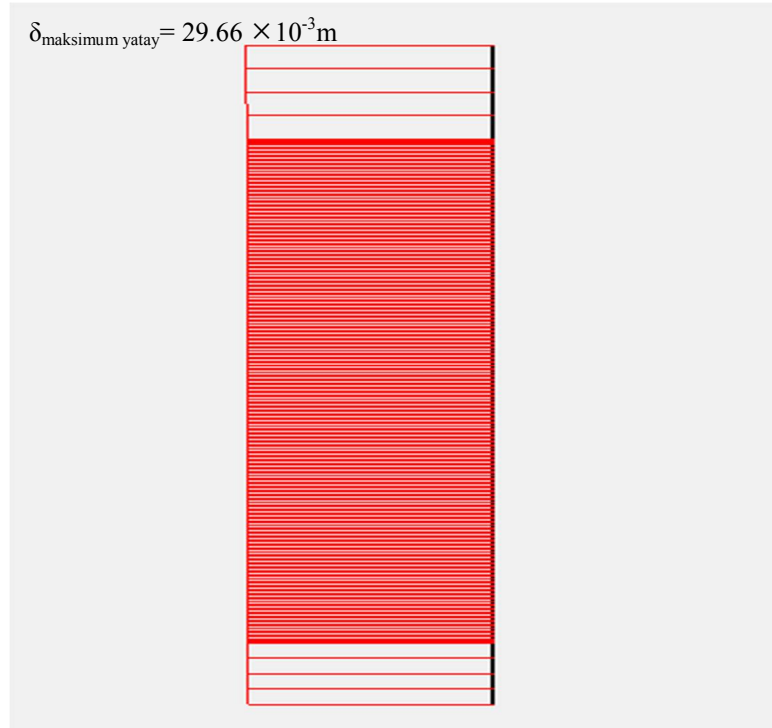
Ek Şekil 5.5. 0 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



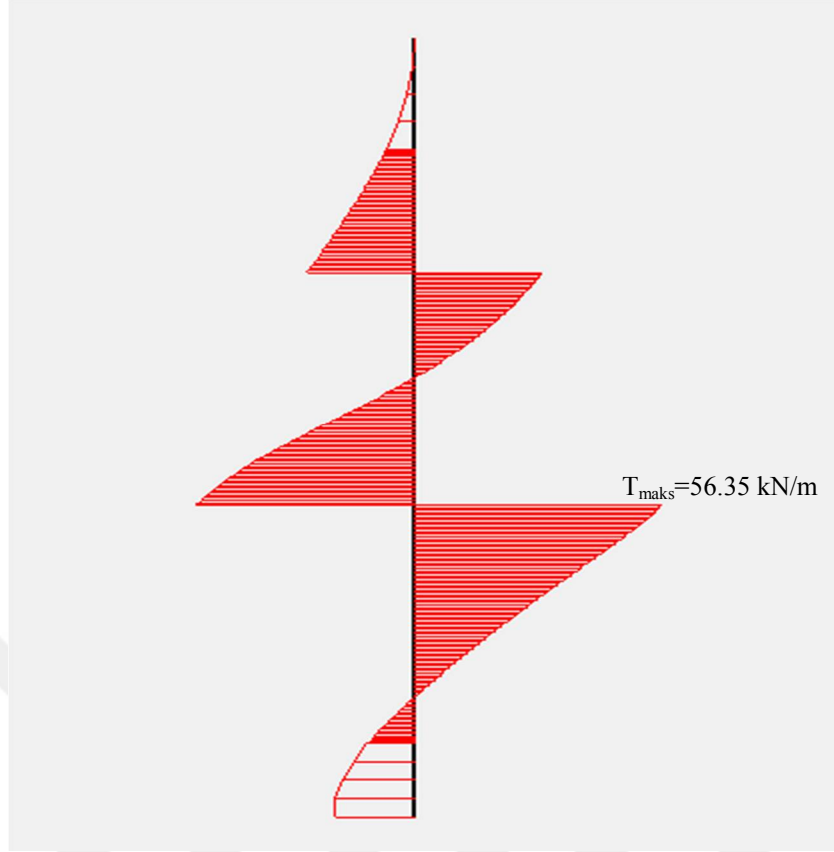
Ek Şekil 5.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



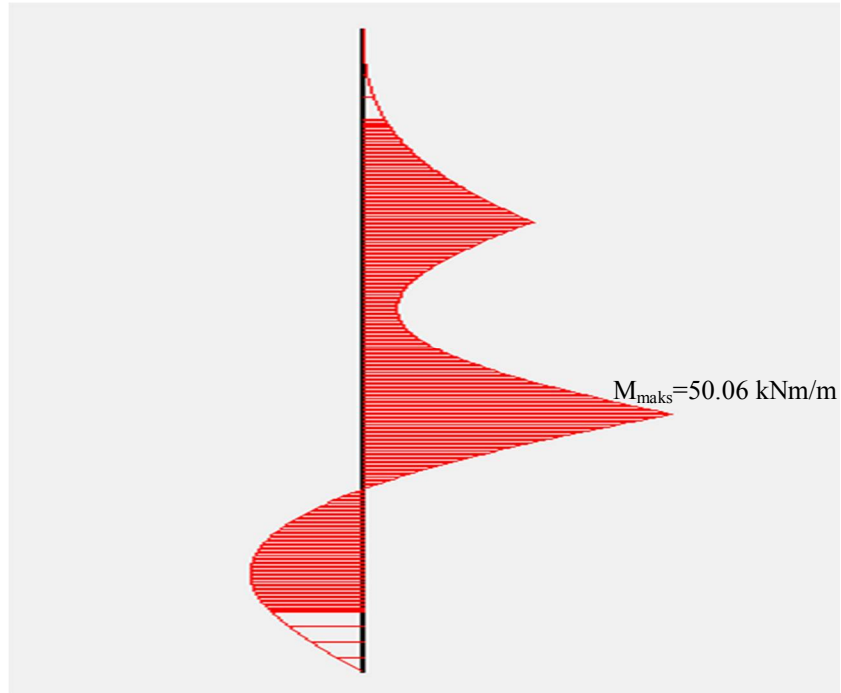
Ek Şekil 5.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 5.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

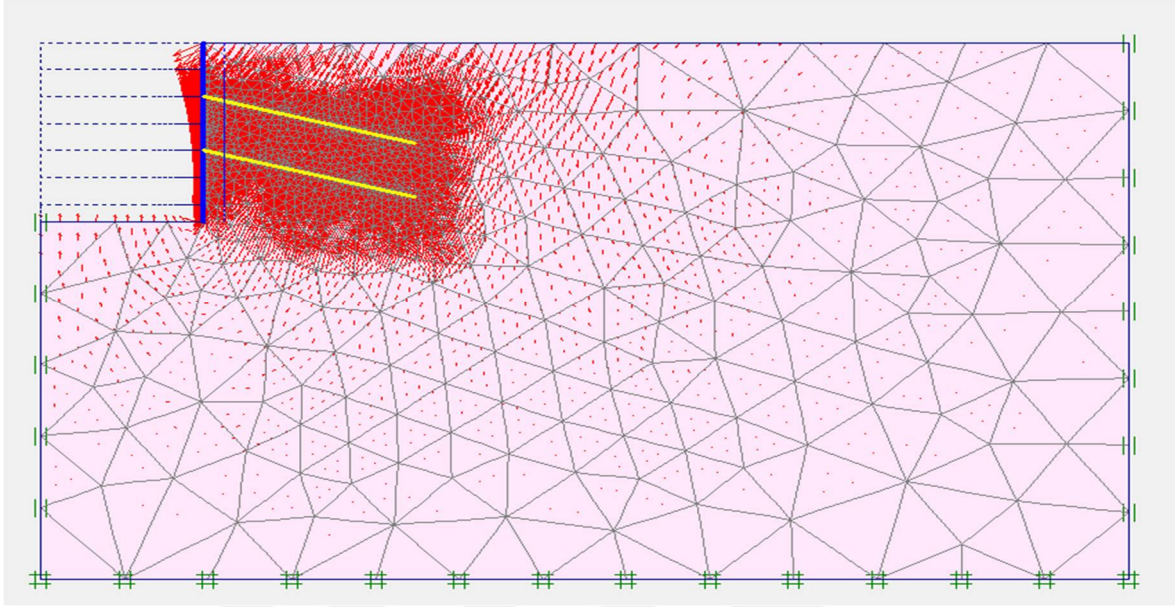


Ek Şekil 5.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



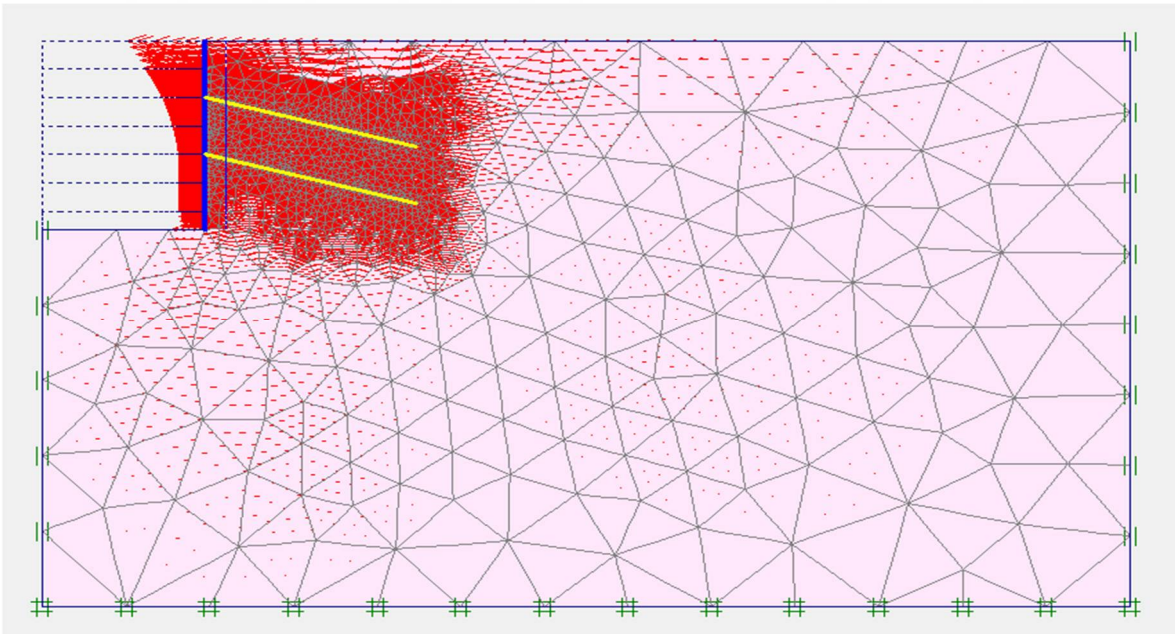
Ek Şekil 5.10. Duvarın max moment -50.06 kNm/m

Ek 6. Dr=%65 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için İki Zemin Çivili 50 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



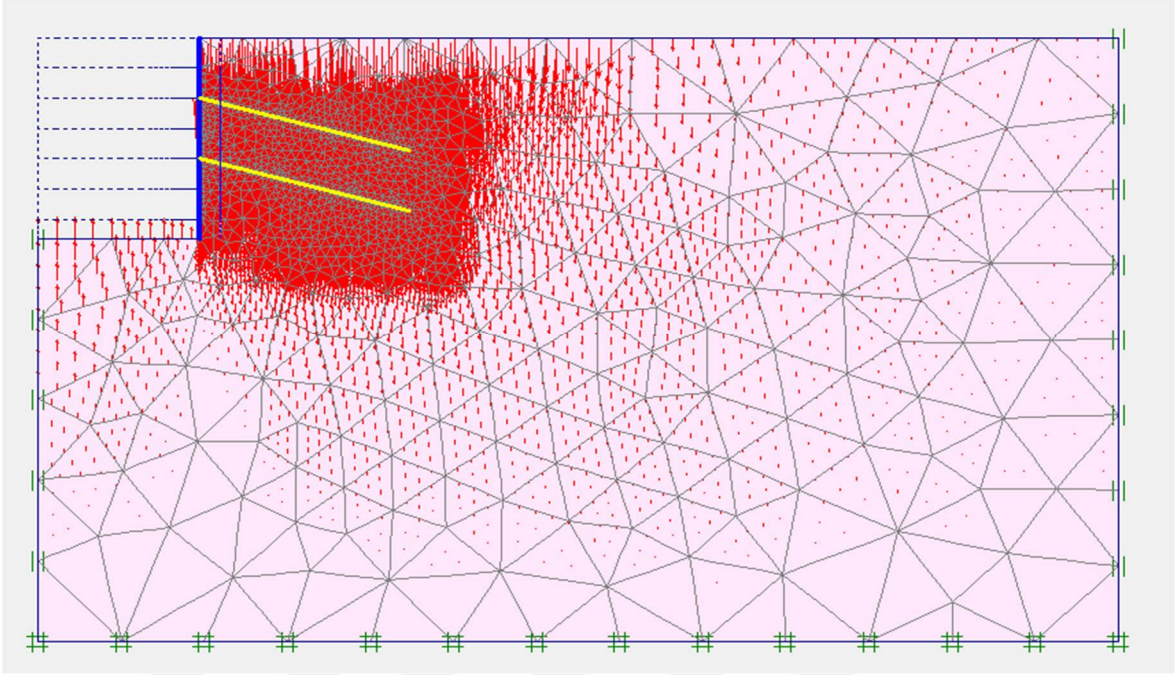
$$\delta_{\text{maksimum}} = 103.33 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 6.1. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



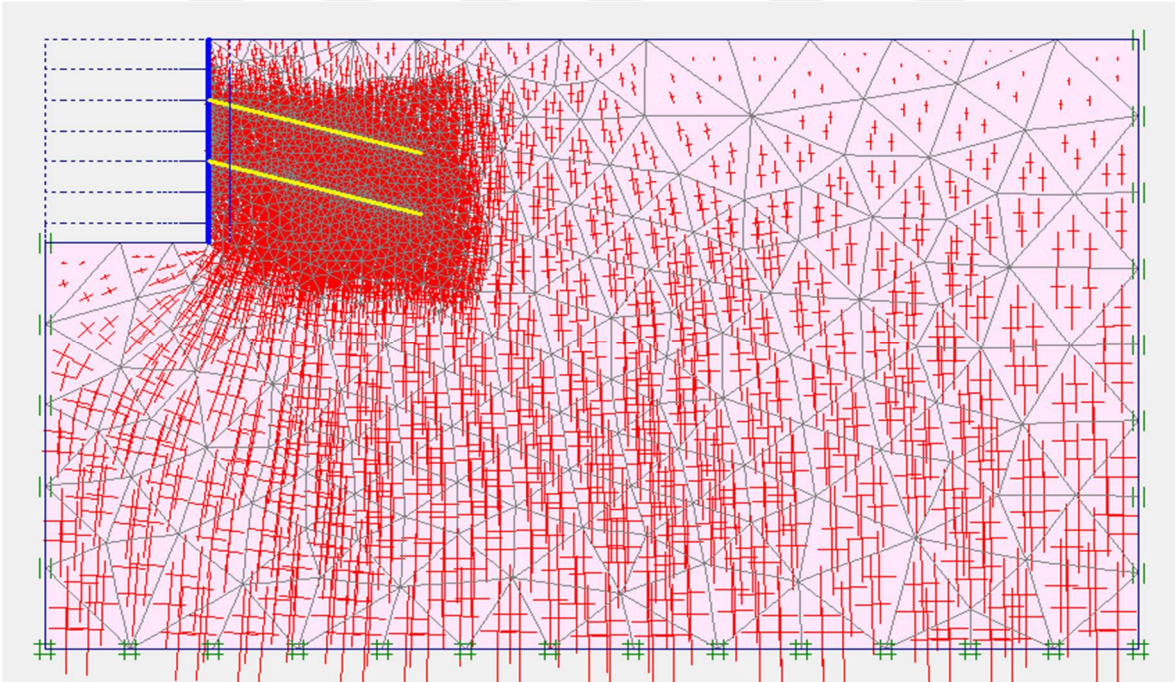
$$\delta_{\text{maksimum yatay}} = 72.61 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 6.2. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



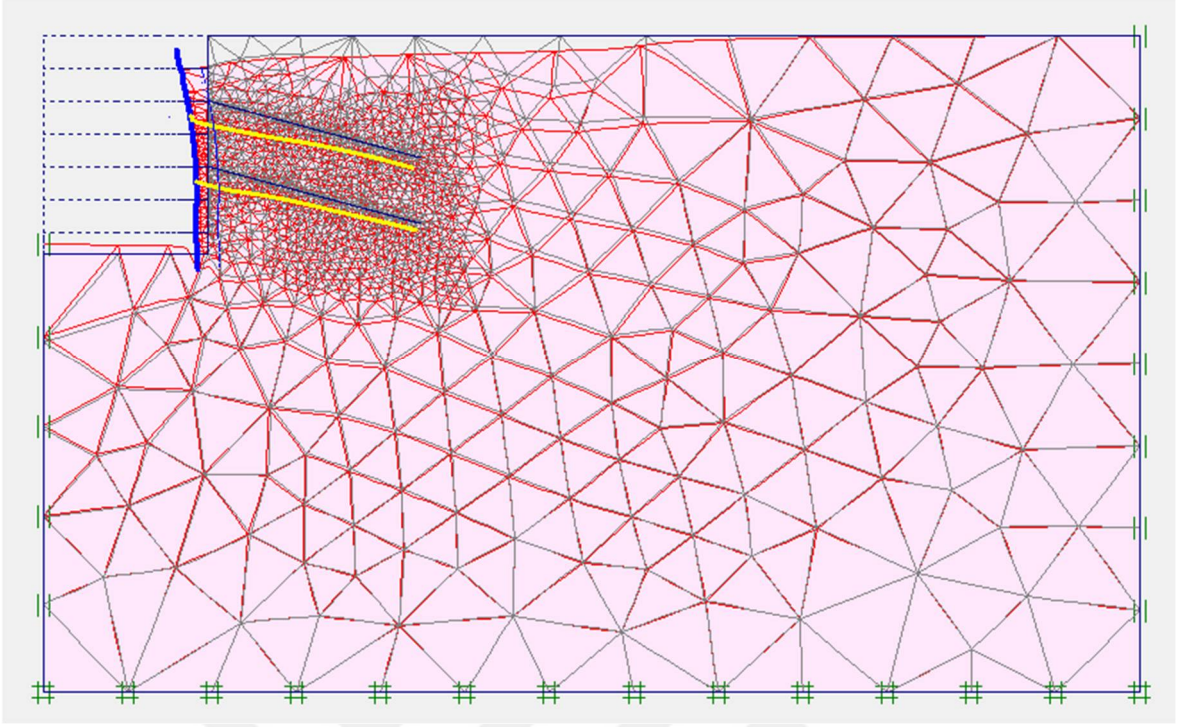
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 81.5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 6.3. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



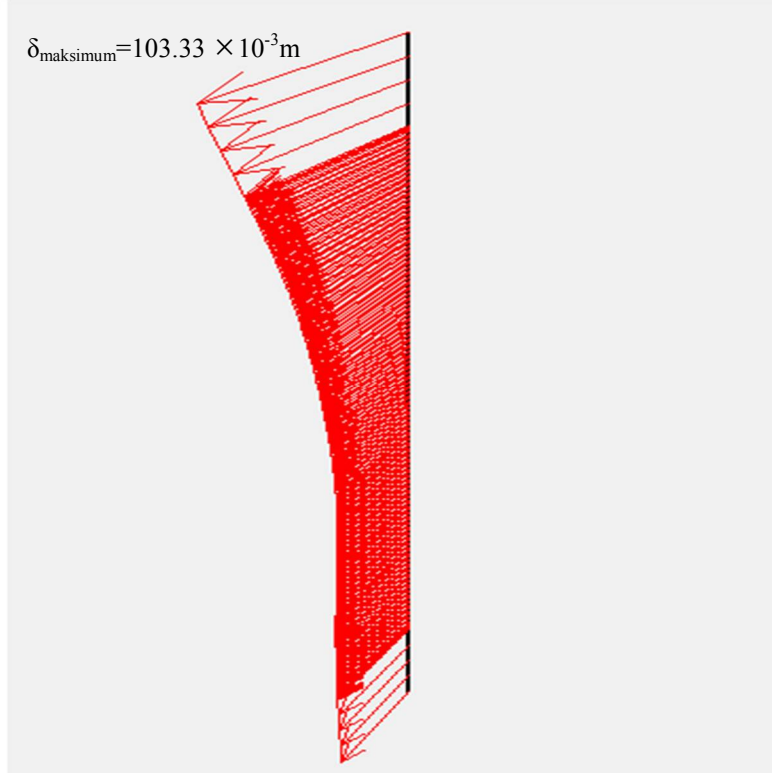
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -807.30 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 6.4. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

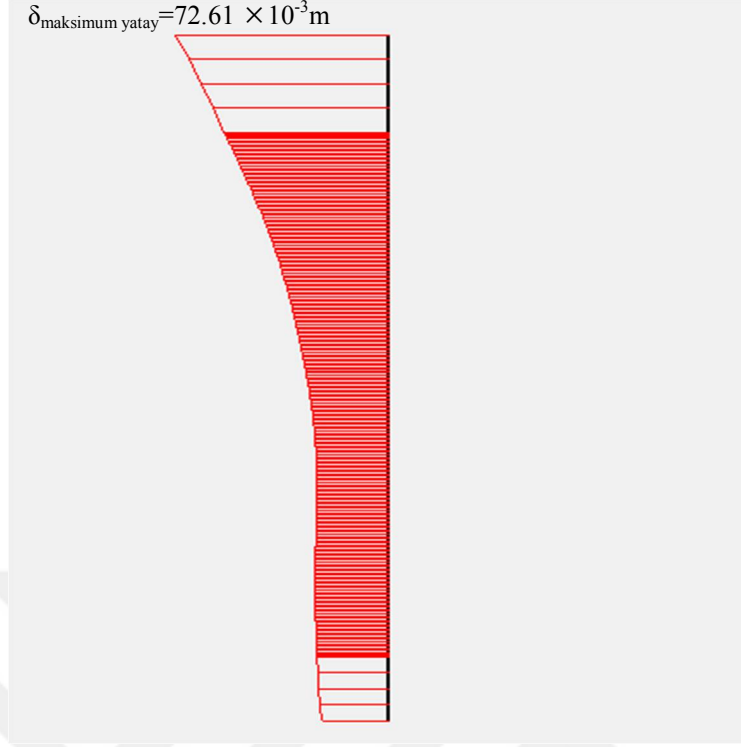


$$\delta_{\text{maksimum}} = 103.33 \times 10^{-3} \text{ m}$$

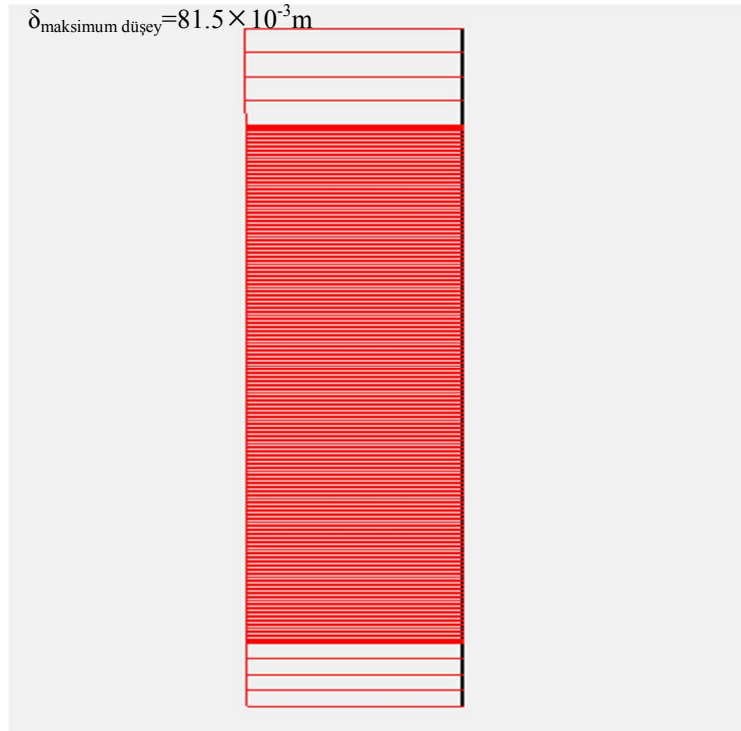
Ek Şekil 6.5. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



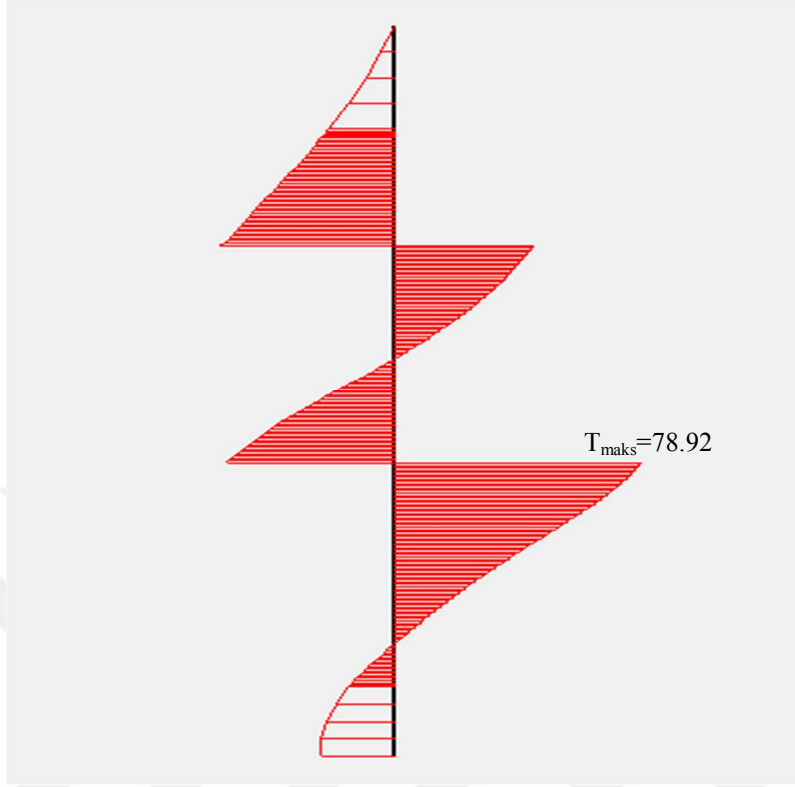
Ek Şekil 6.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



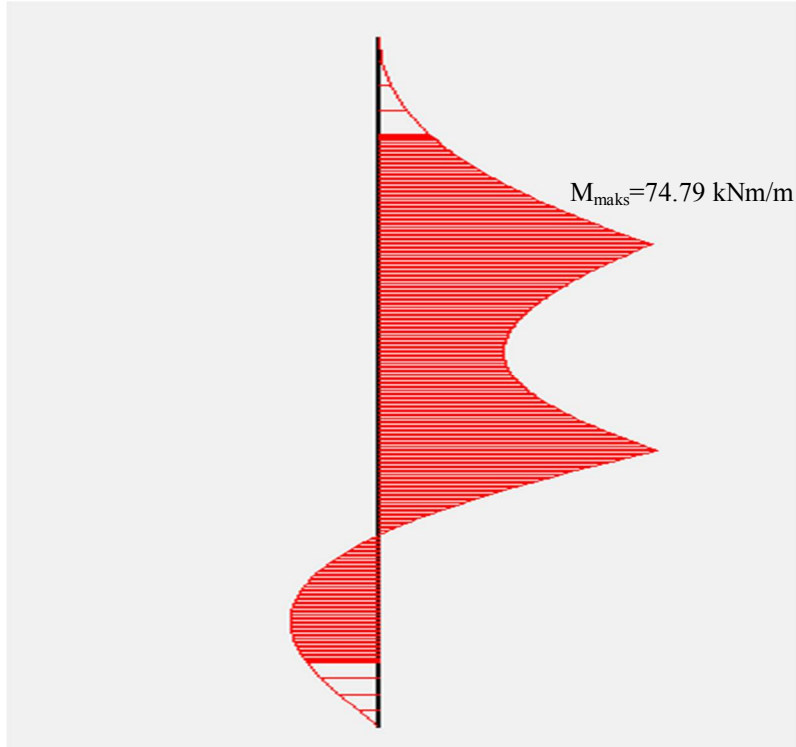
Ek Şekil 6.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 6.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

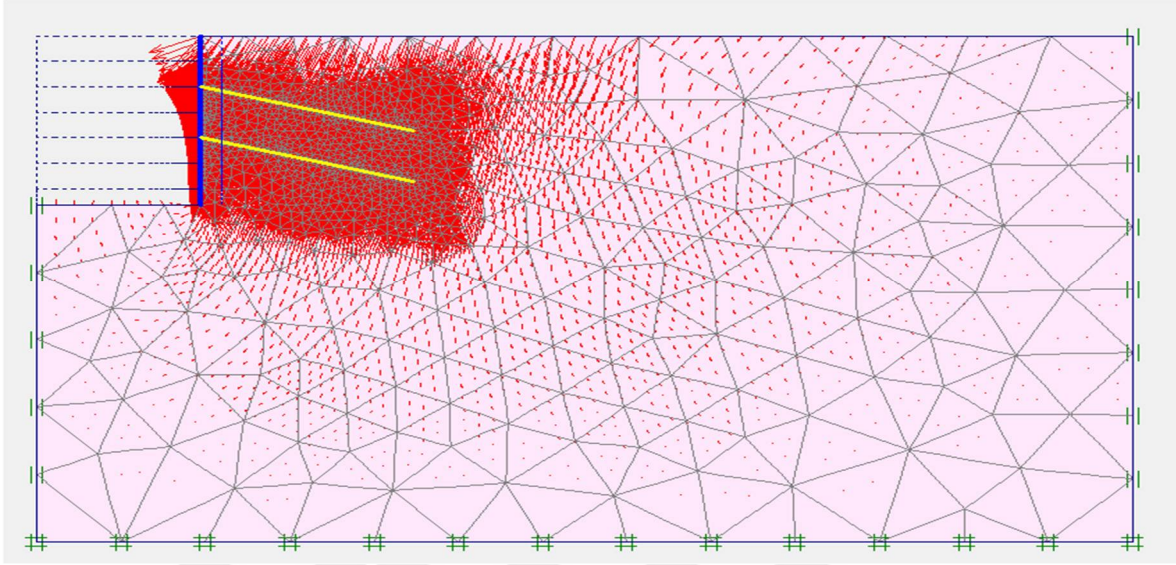


Ek Şekil 6.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



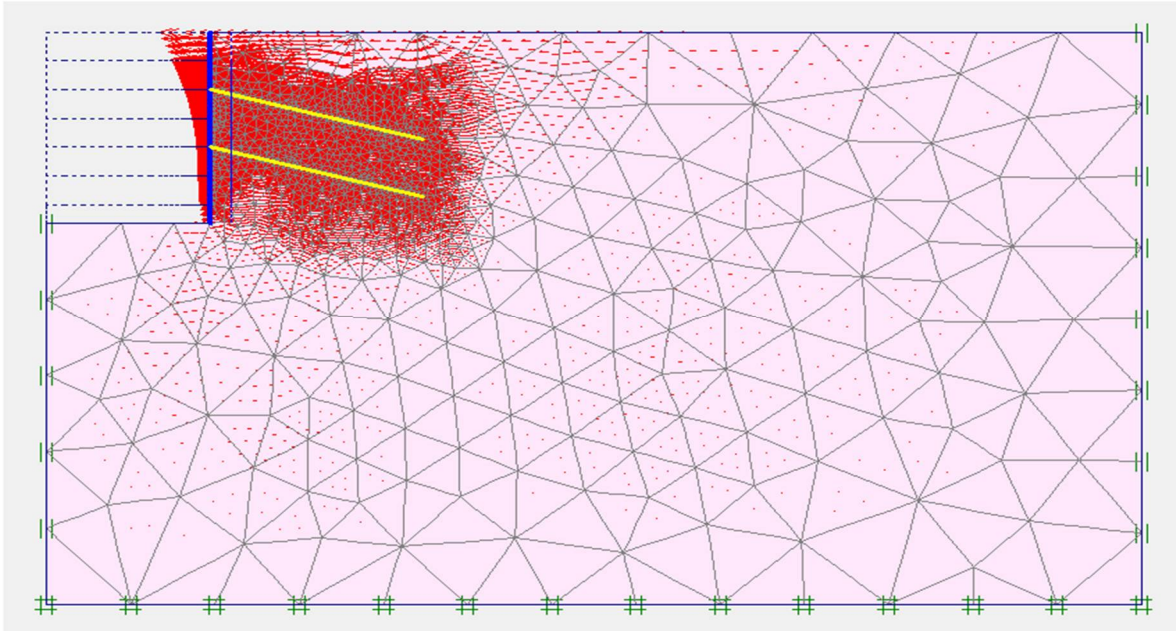
Ek Şekil 6.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 7. Dr=%65 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için İki Zemin Çivili 100 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



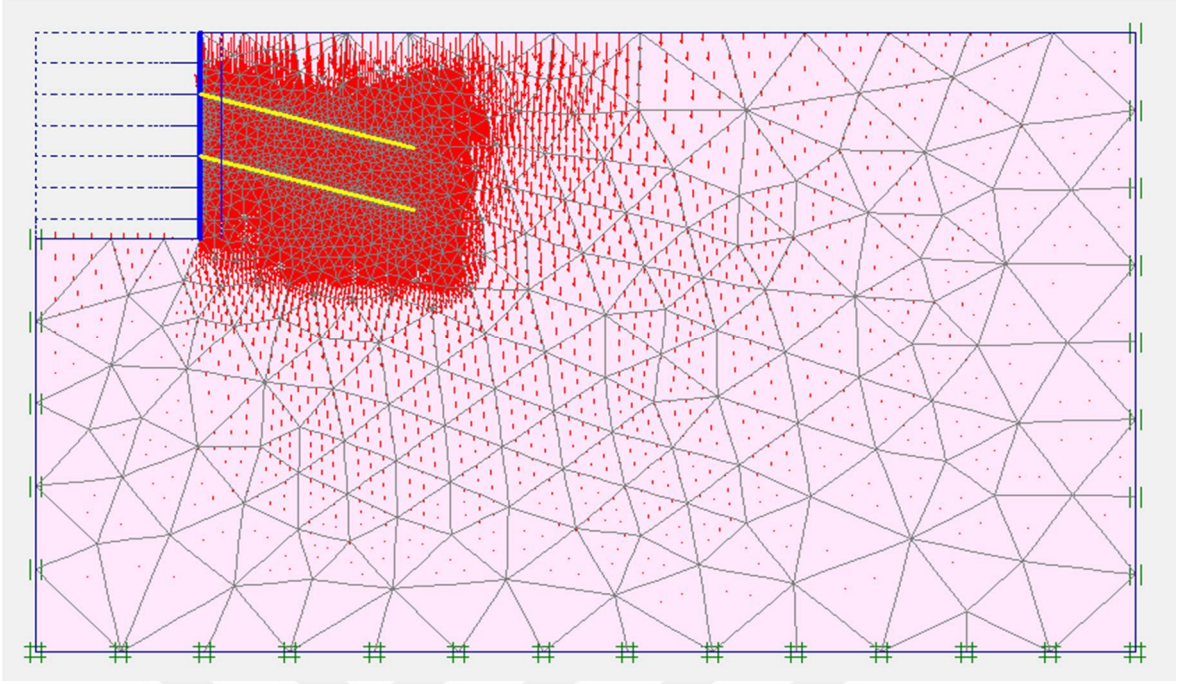
$$\delta_{\text{maksimum}} = 170.73 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 7.1. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



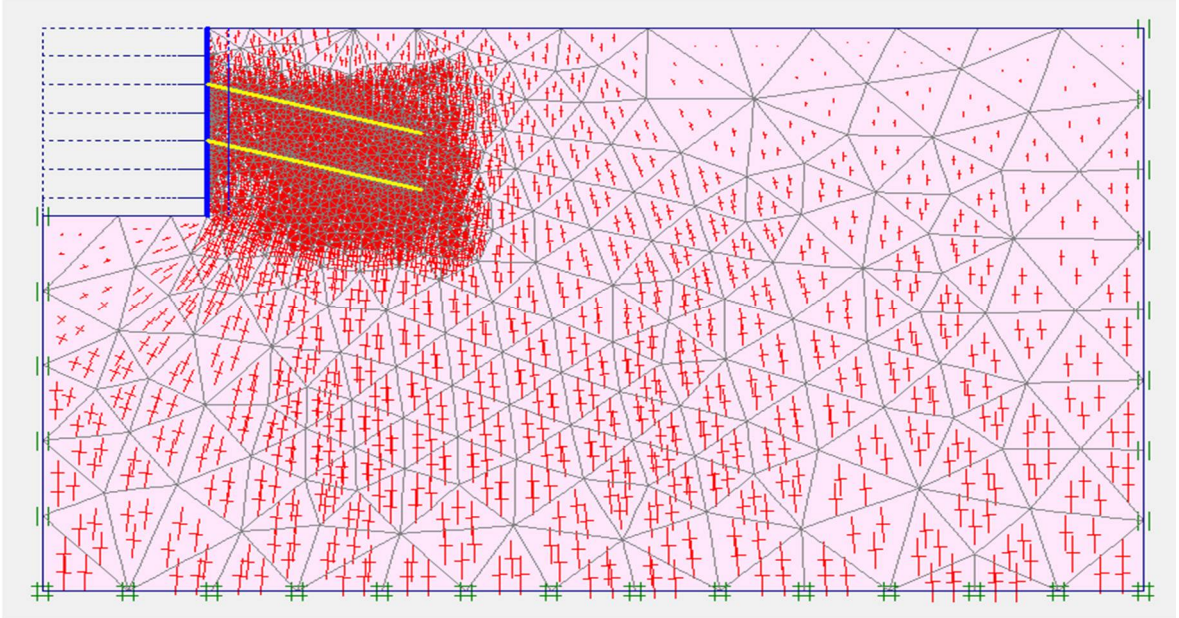
$$\delta_{\text{maksimum yatay}} = 118.38 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 7.2. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



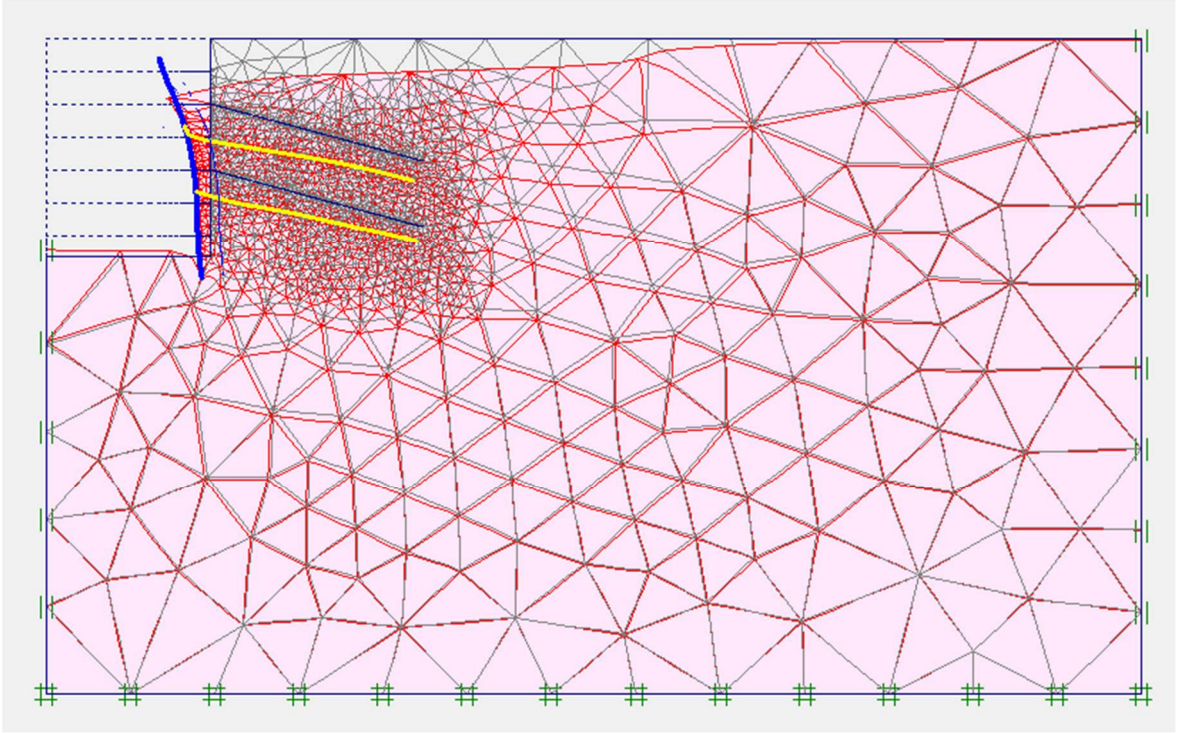
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 137.72 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 7.3. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



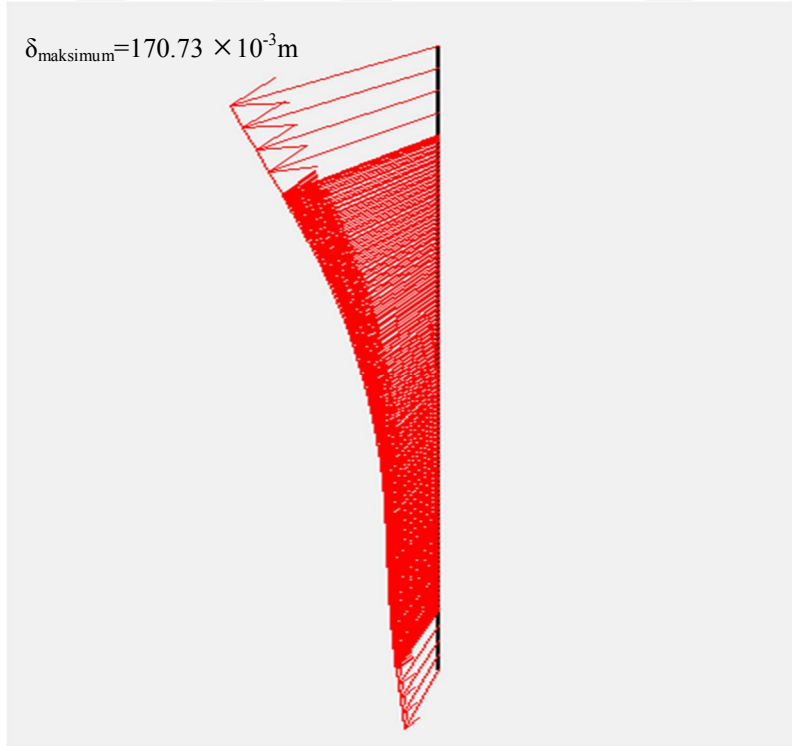
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -965.37 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 7.4. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

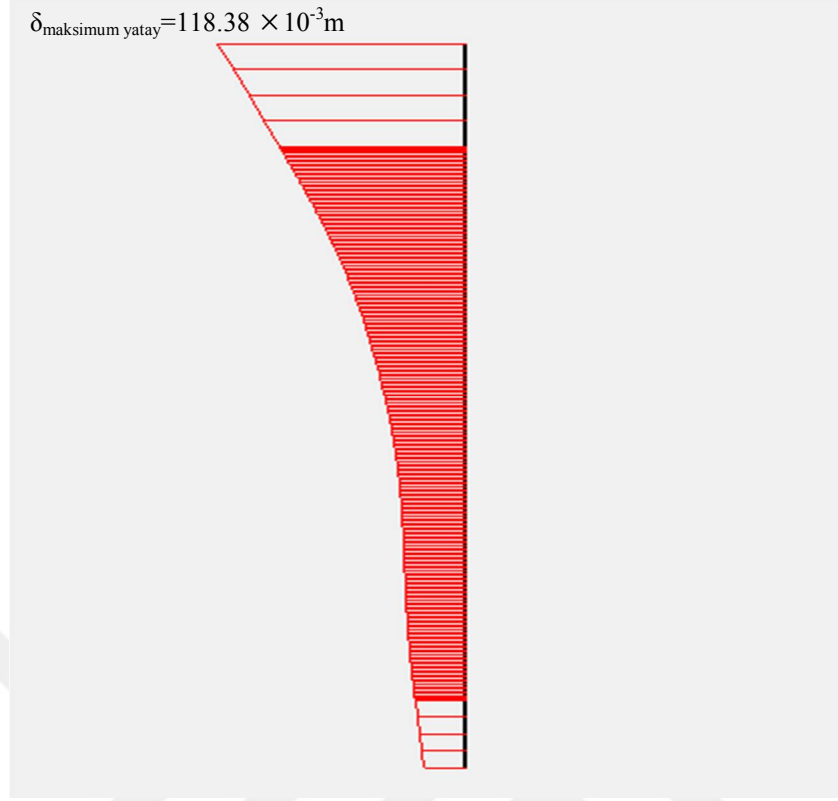


$$\delta_{\text{maksimum}}=170.73 \times 10^{-3} \text{ m}$$

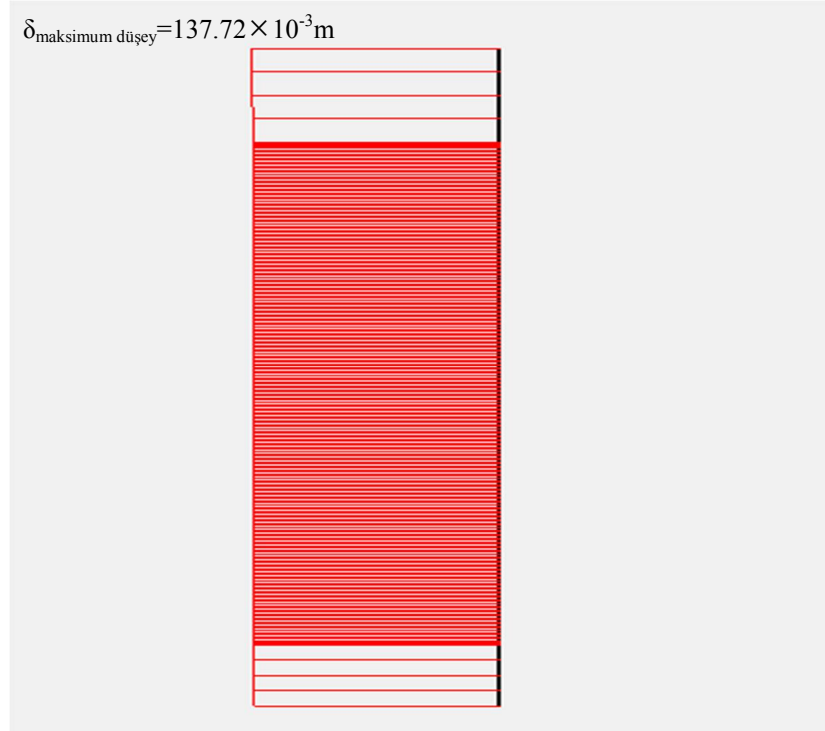
Ek Şekil 7.5. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



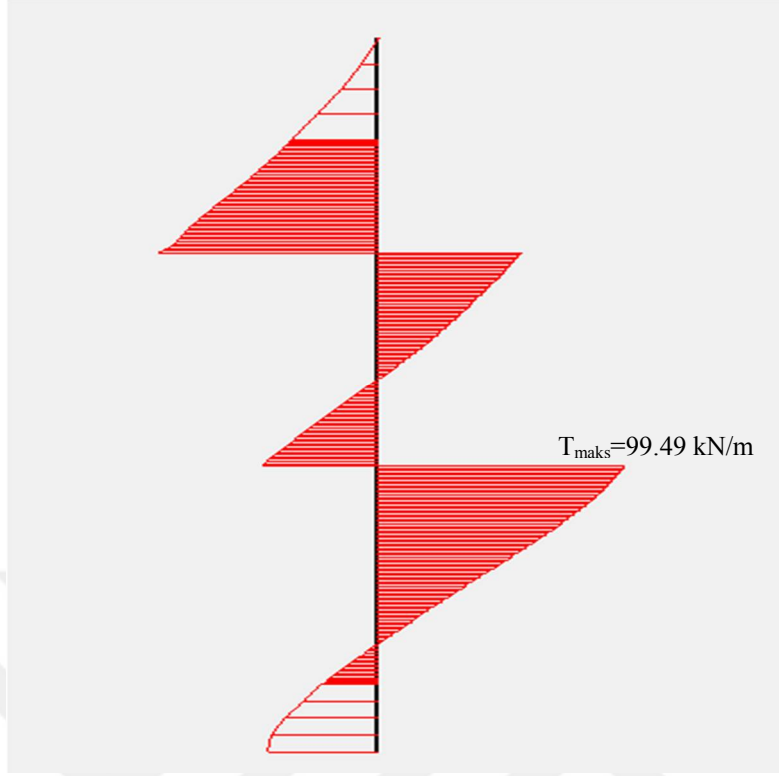
Ek Şekil 7.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



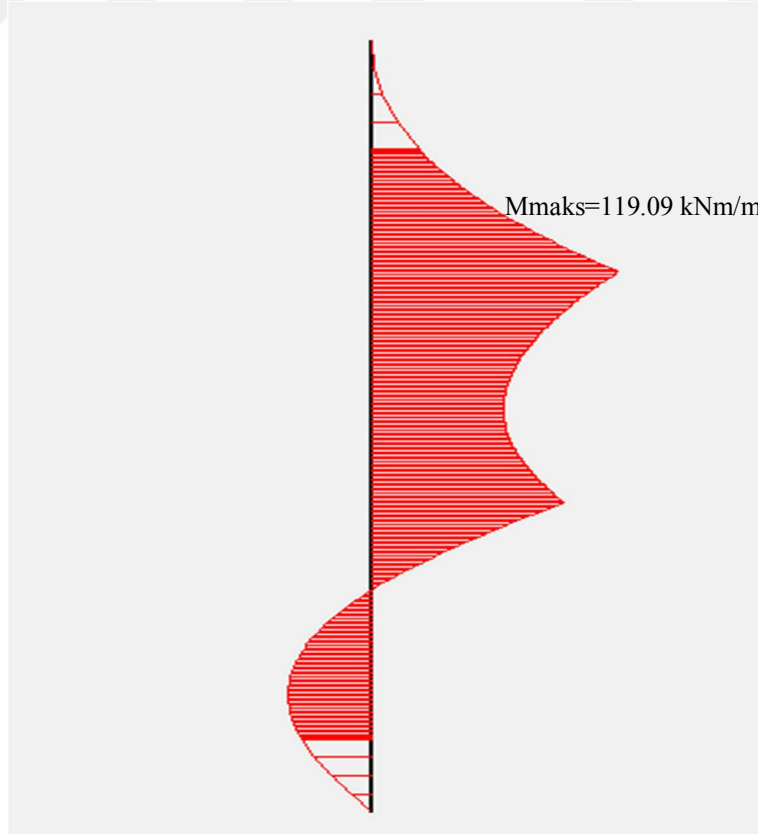
Ek Şekil 7.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 7.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

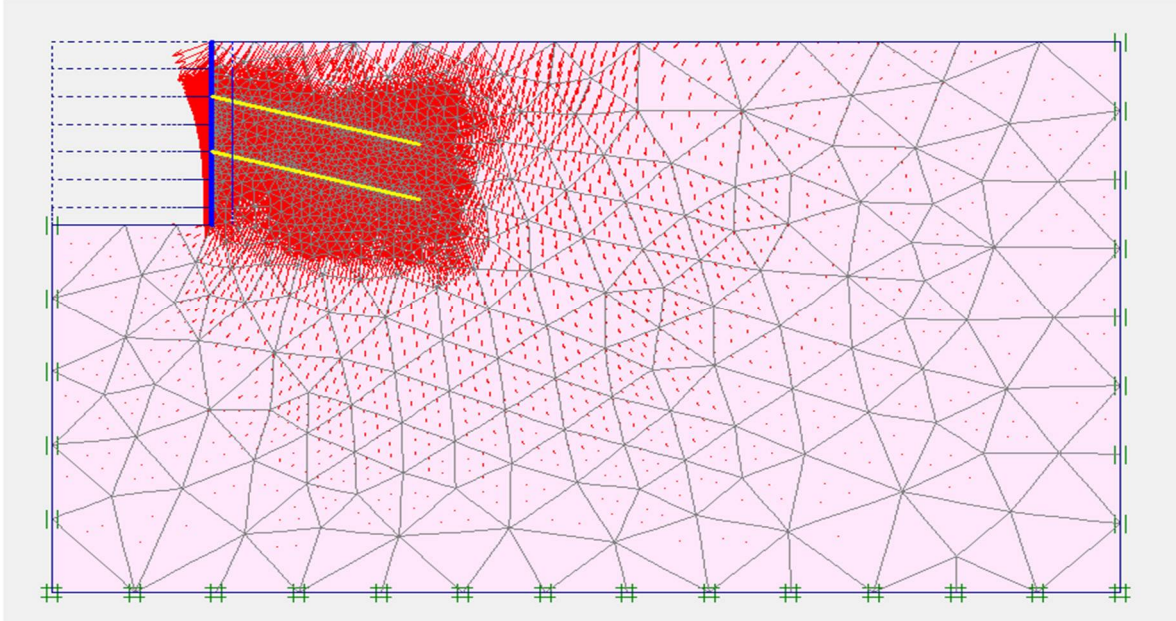


Ek Şekil 7.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



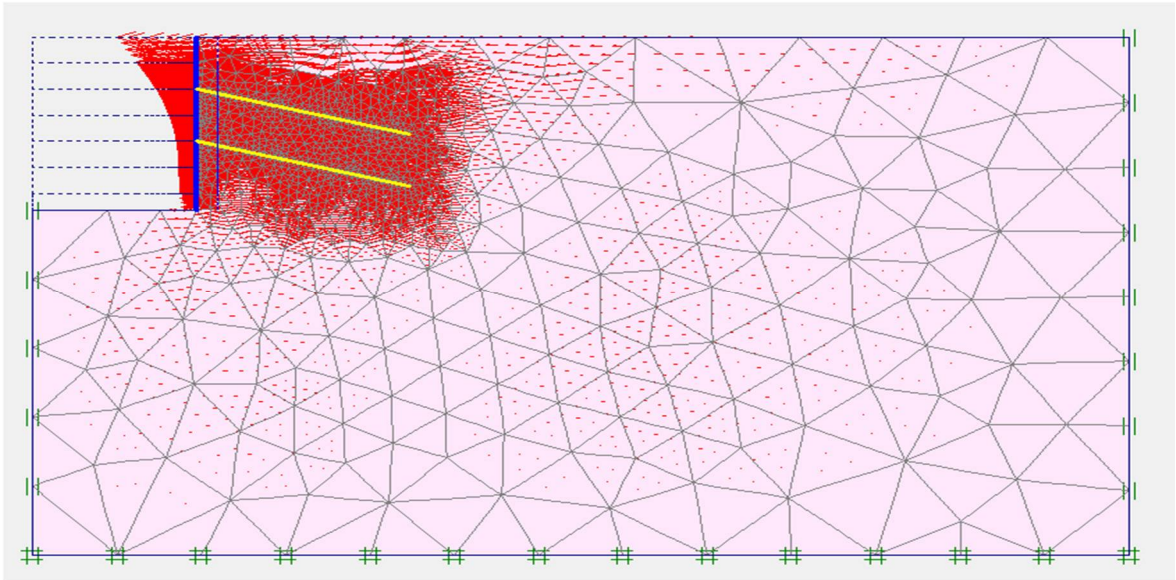
Ek Şekil 7.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 8. $D_r=65\%$ Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için İki Zemin Çivili 150 kN/m^2 Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



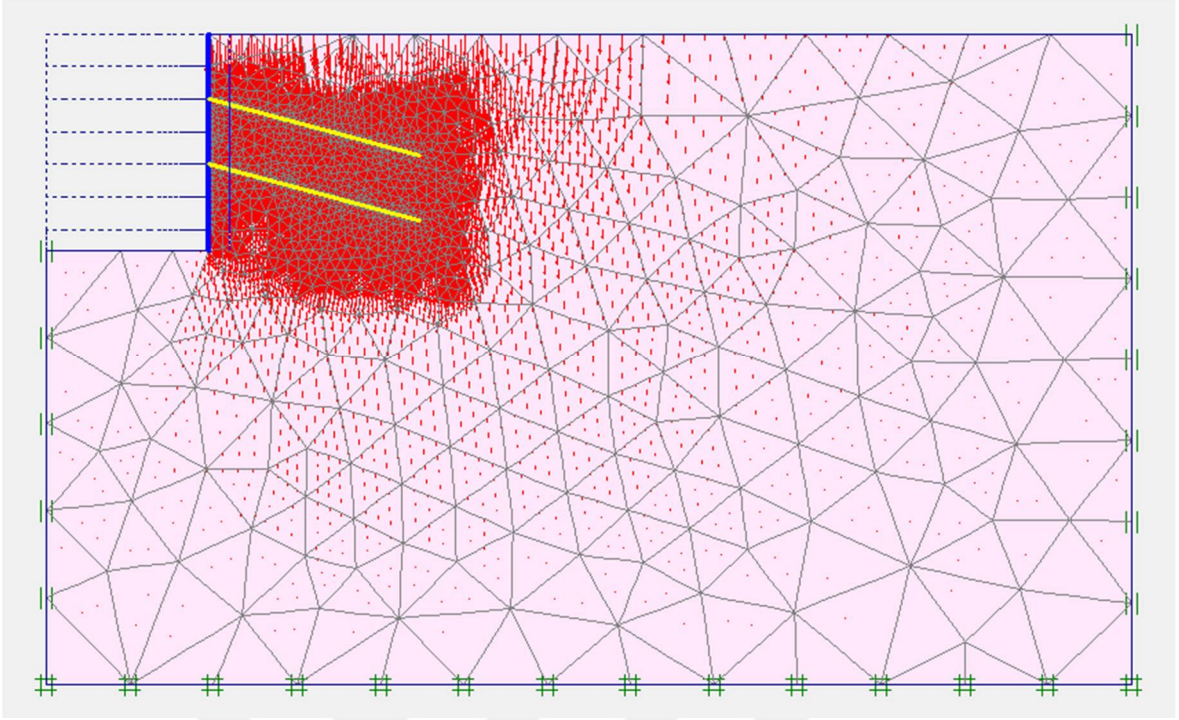
$$\delta_{\text{maksimum}}=262.96 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 8.1. 150 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



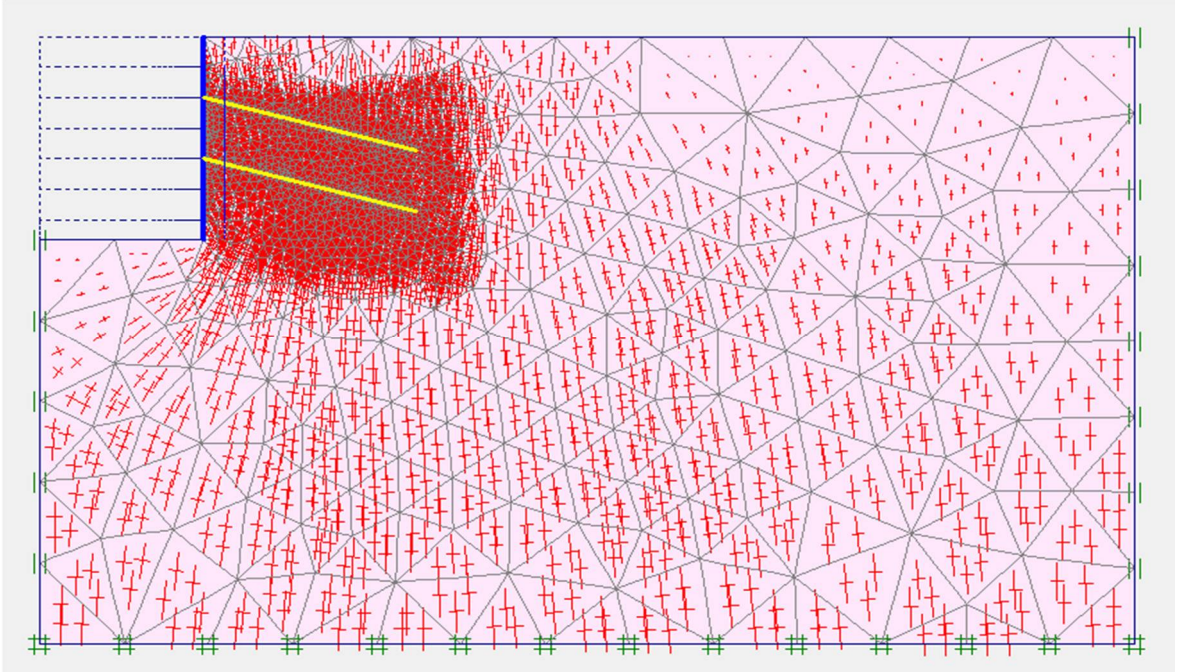
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}=184.84 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 8.2. 150 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



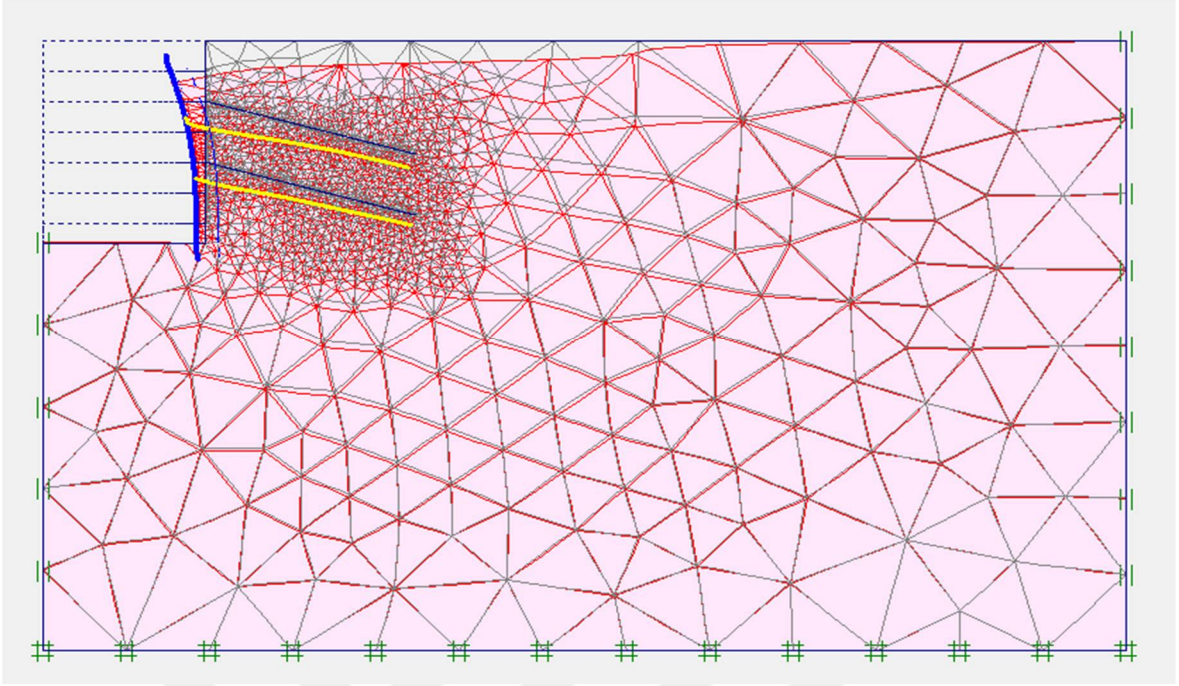
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 209.58 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 8.3. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



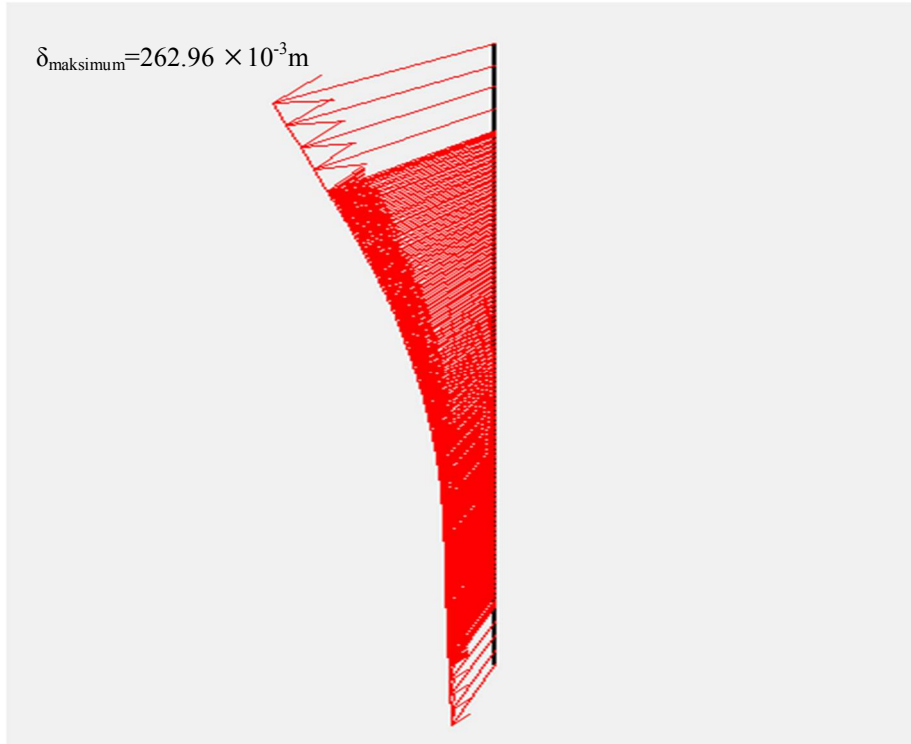
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -1290 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 8.4. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

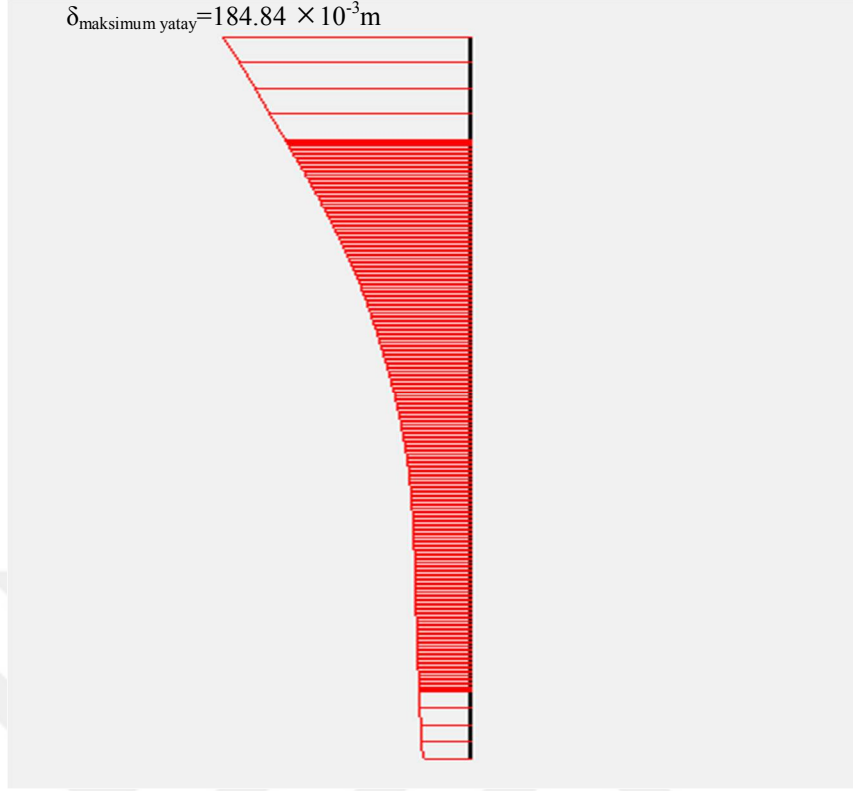


$$\delta_{\text{maksimum}} = 262.96 \times 10^{-3} \text{ m}$$

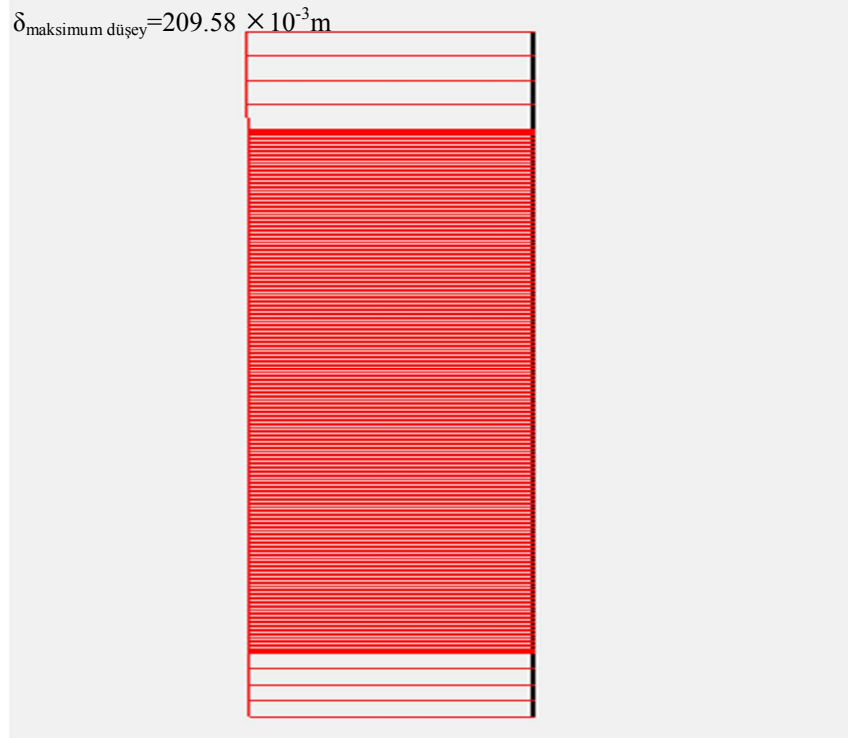
Ek Şekil 8.5. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



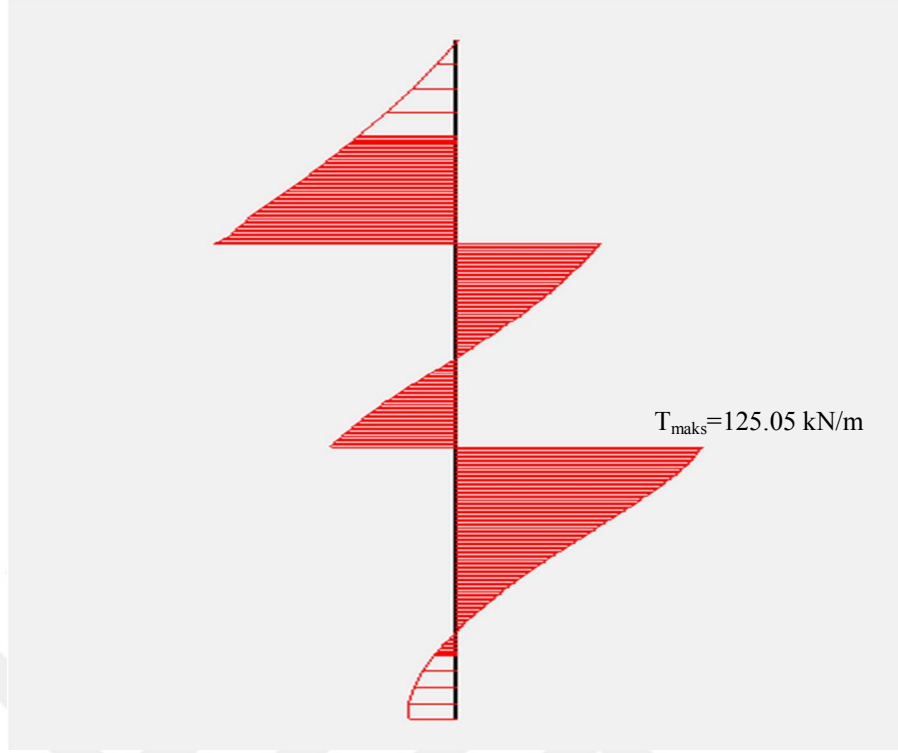
Ek Şekil 8.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



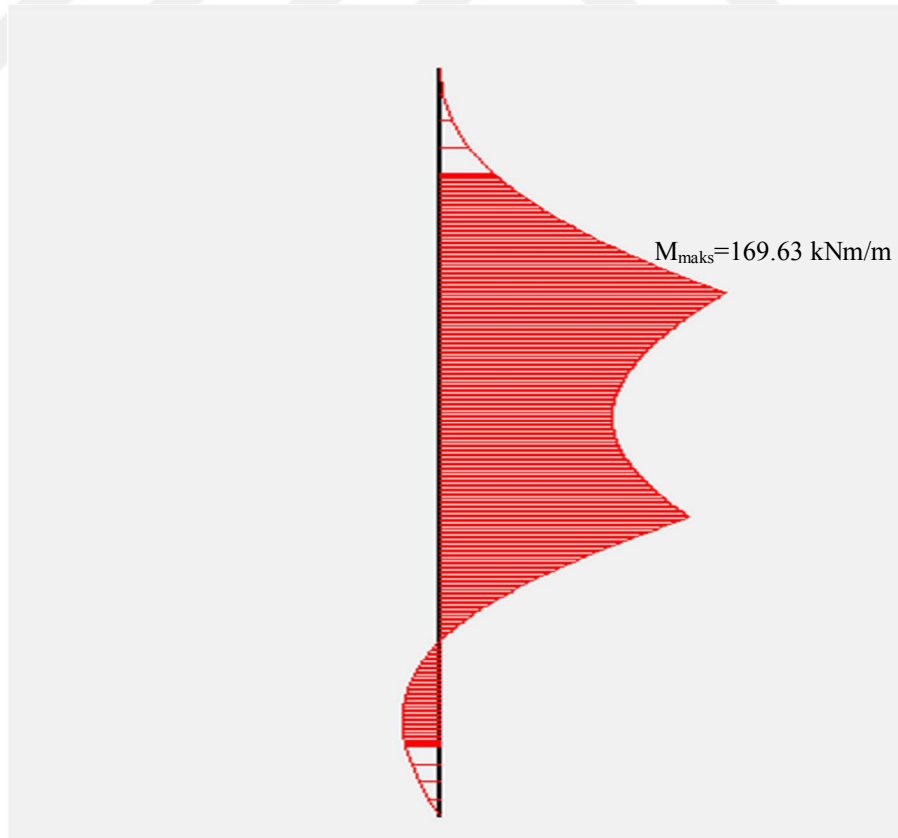
Ek Şekil 8.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 8.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

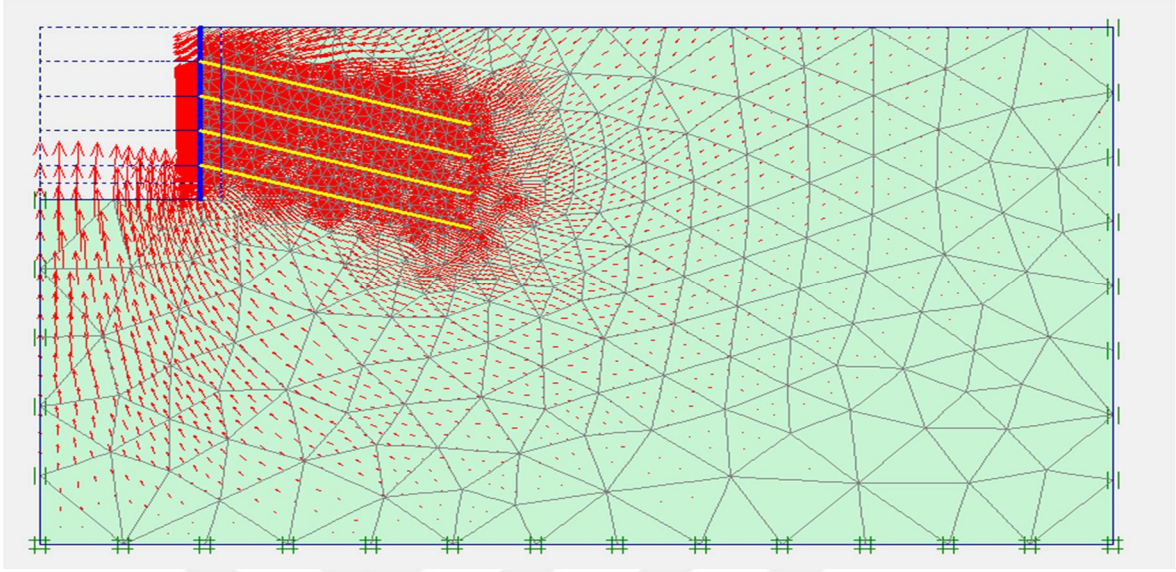


Ek Şekil 8.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



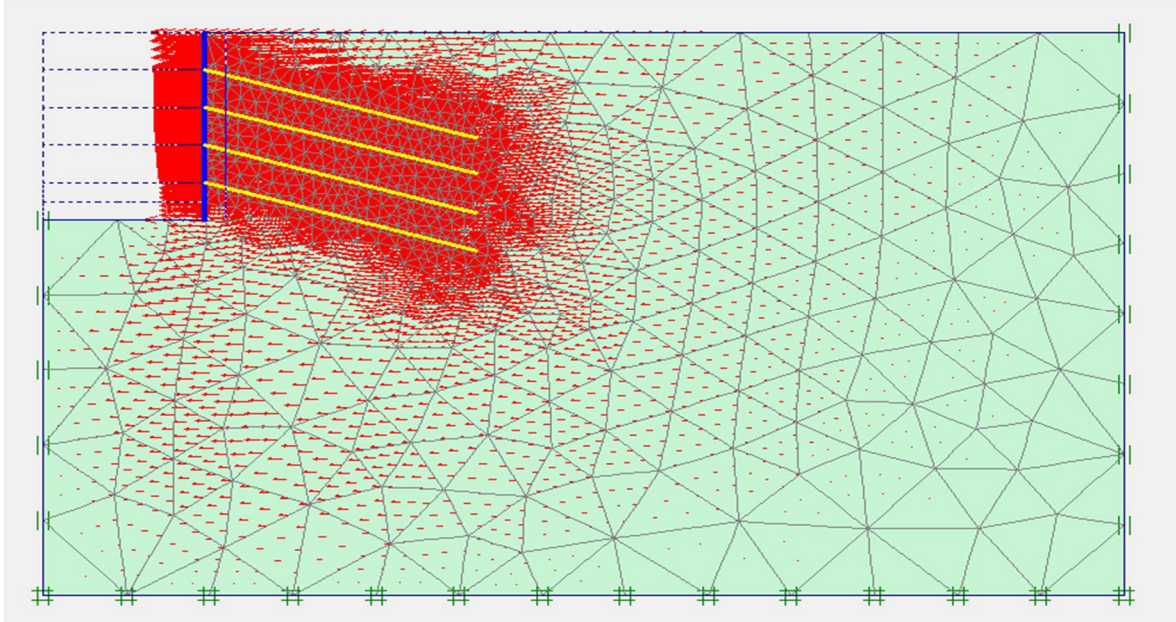
Ek Şekil 8.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 9. Dr=%35 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için Dört Zemin Çivili 0 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



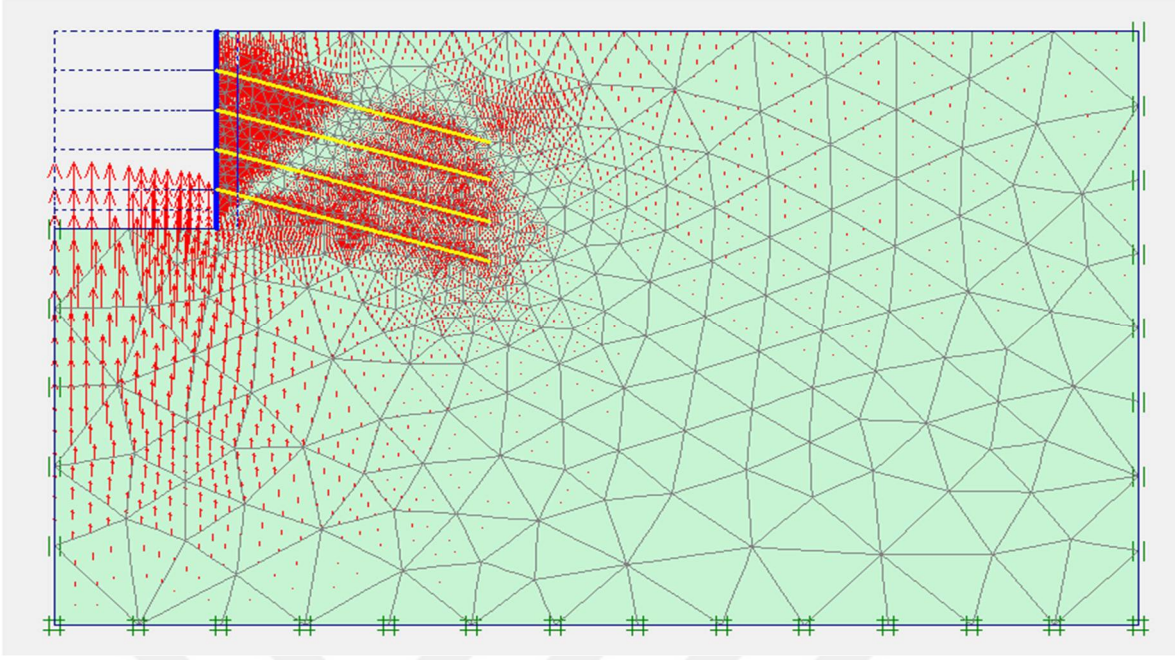
$$\delta_{\text{maksimum}}=34.01 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 9.1. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



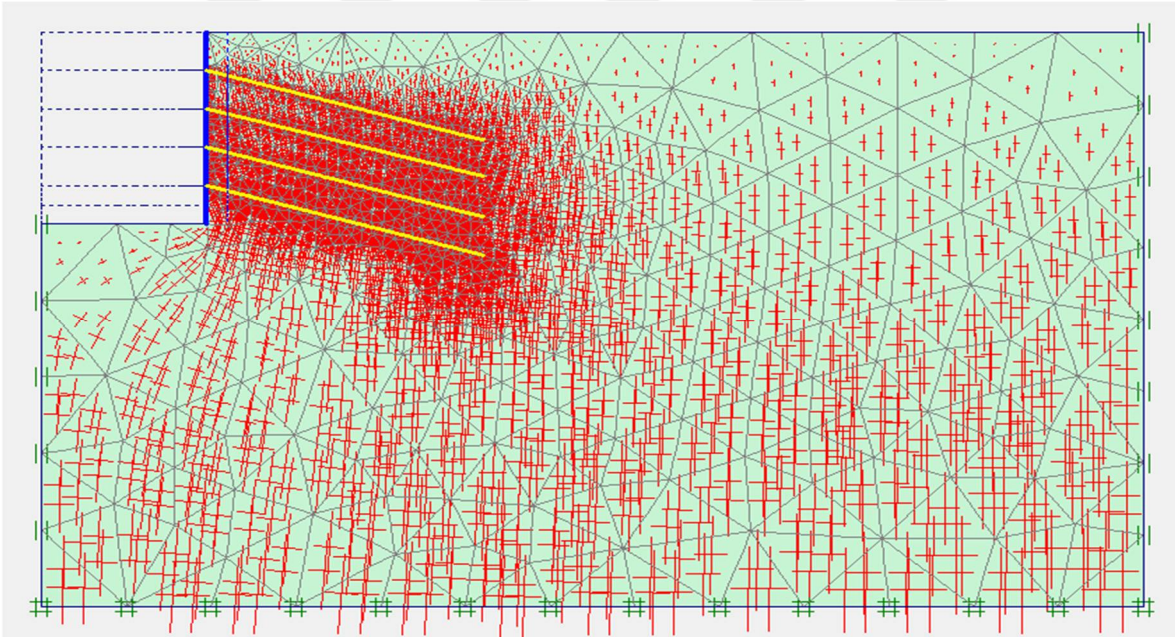
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}=13.18 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 9.2. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



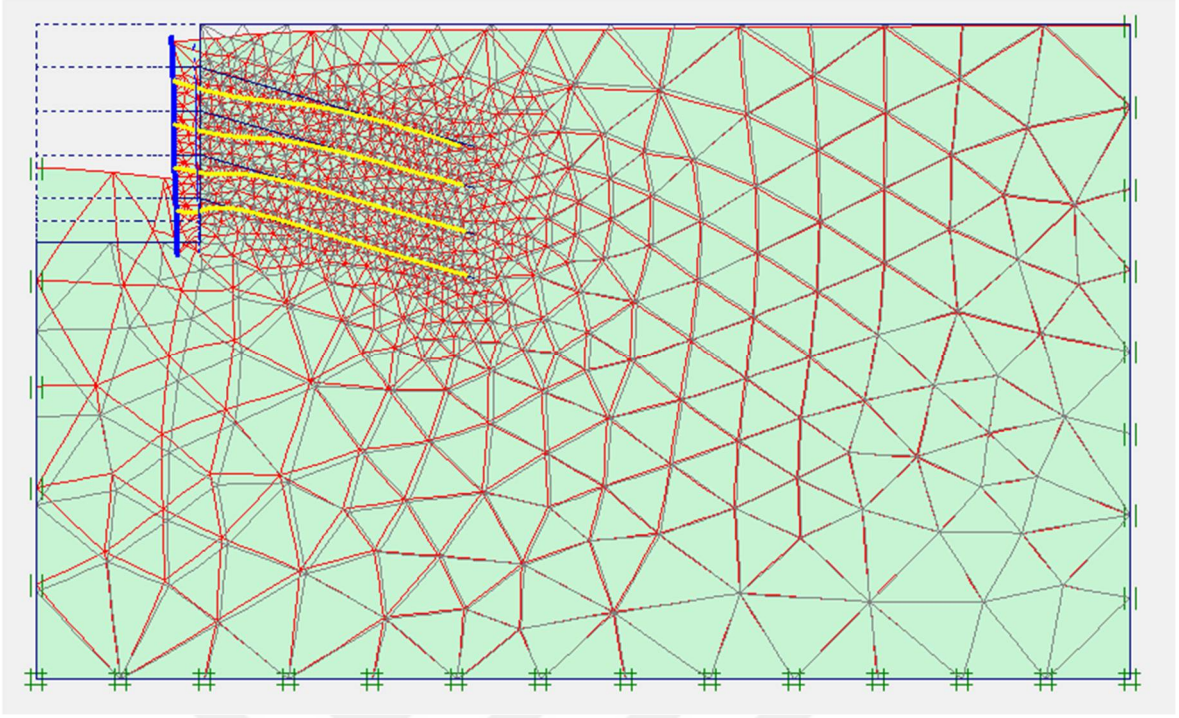
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 34.01 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 9.3. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



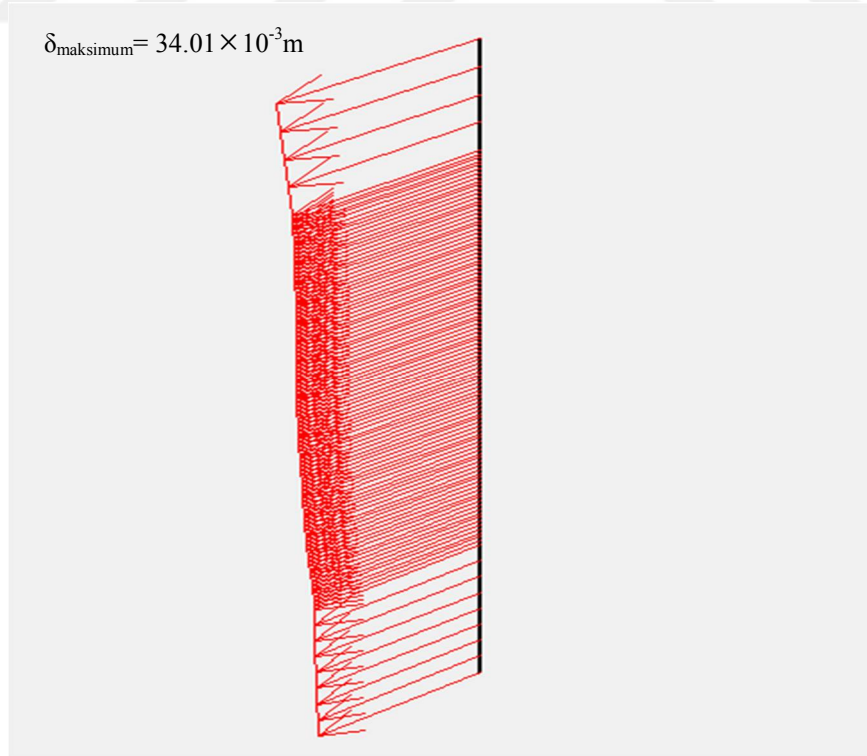
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -458.10 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 9.4. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

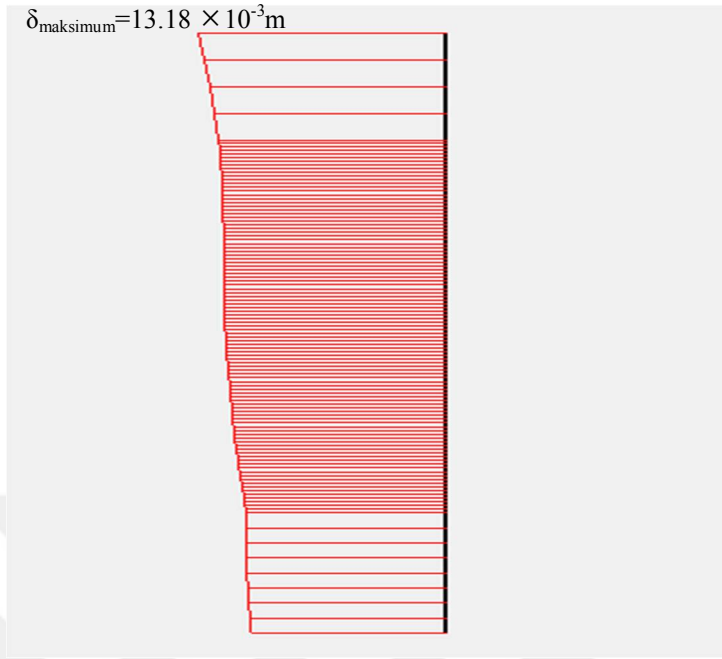


$$\delta_{\text{maksimum}} = 34.01 \times 10^{-3} \text{ m}$$

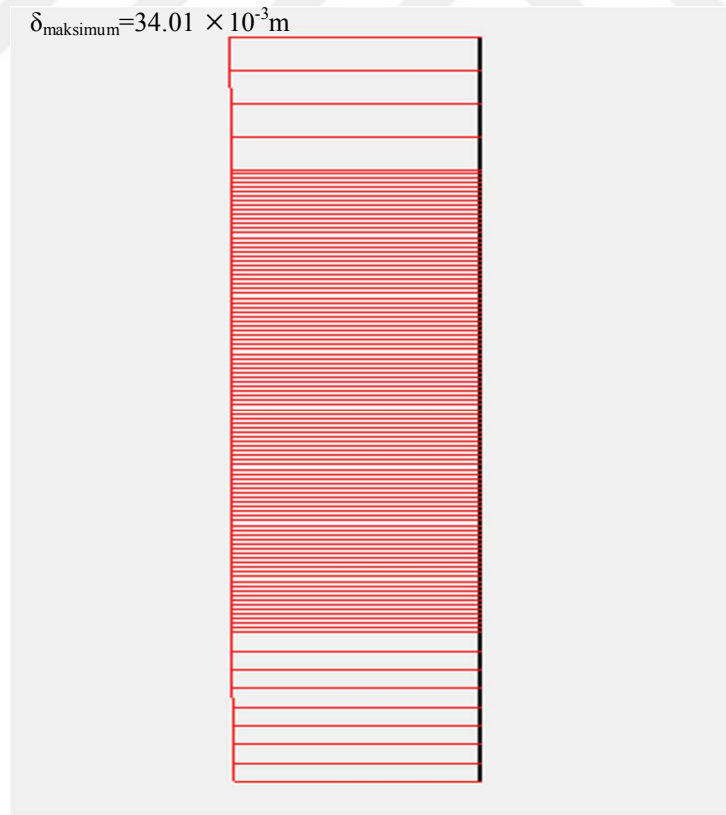
Ek Şekil 9.5. 0 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



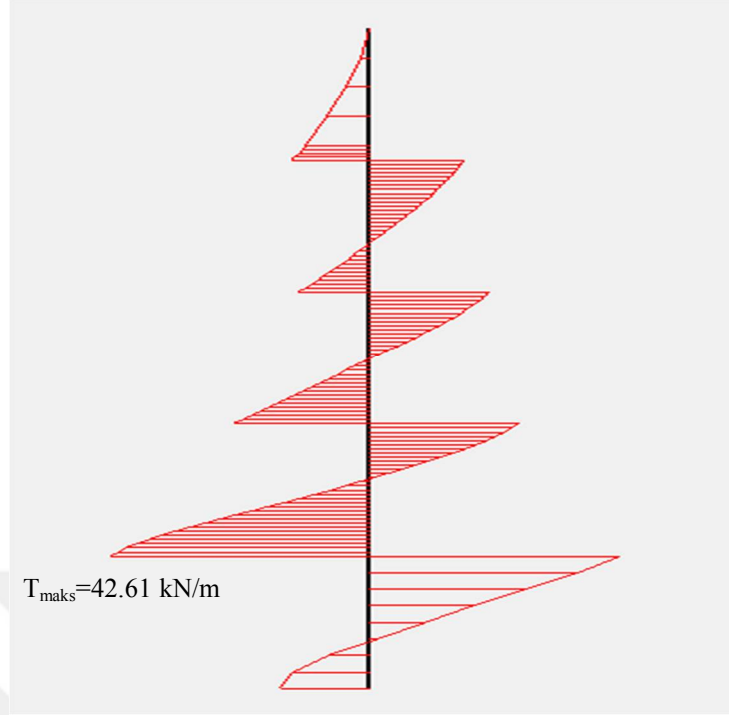
Ek Şekil 9.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



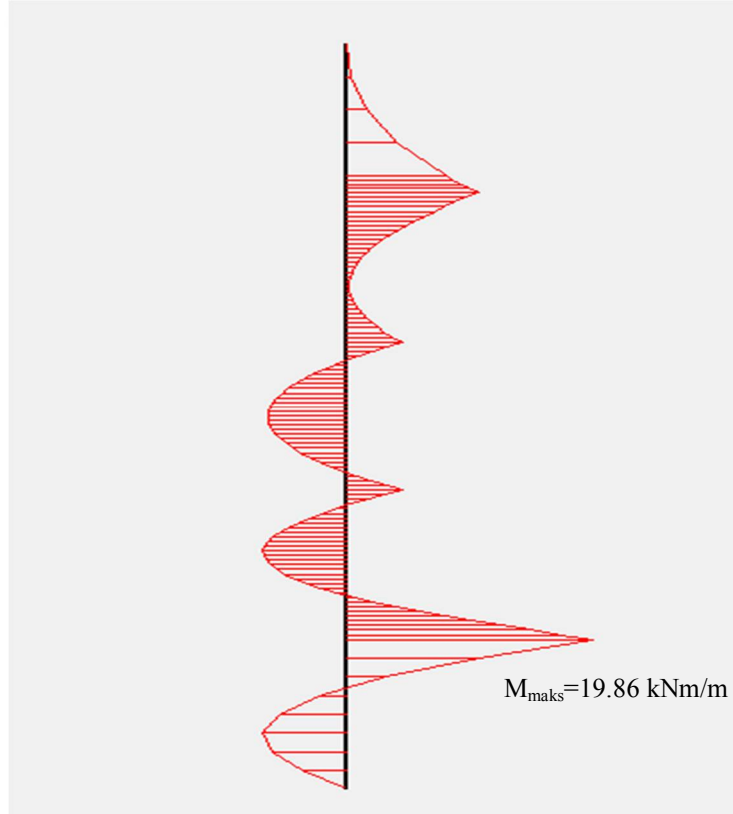
Ek Şekil 9.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 9.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı



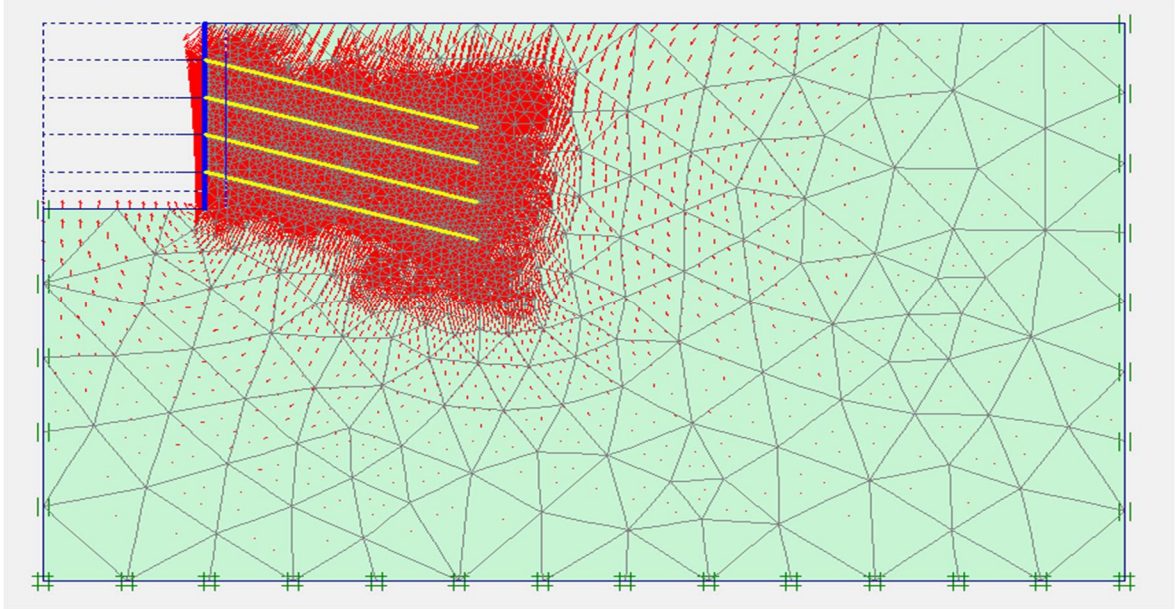
Ek Şekil 9.9. Duvarın max kesme kuvveti diyagramı



Ek Şekil 9.10. Duvarın max moment diyagramı

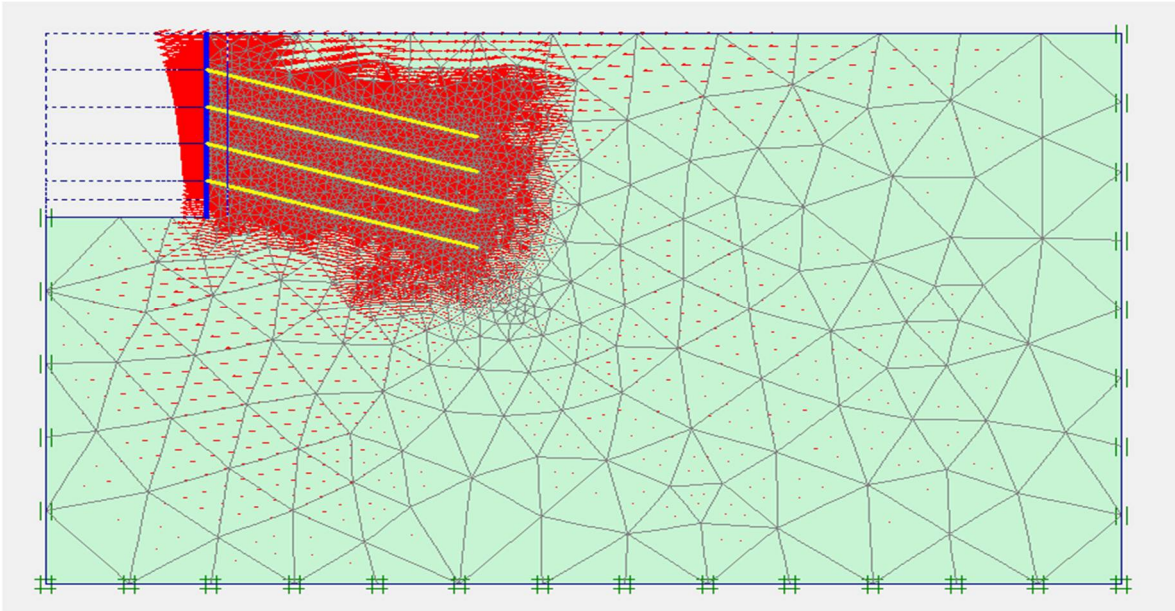
Ek 10. Dr=%35 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için Dört Zemin Çivili

50 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



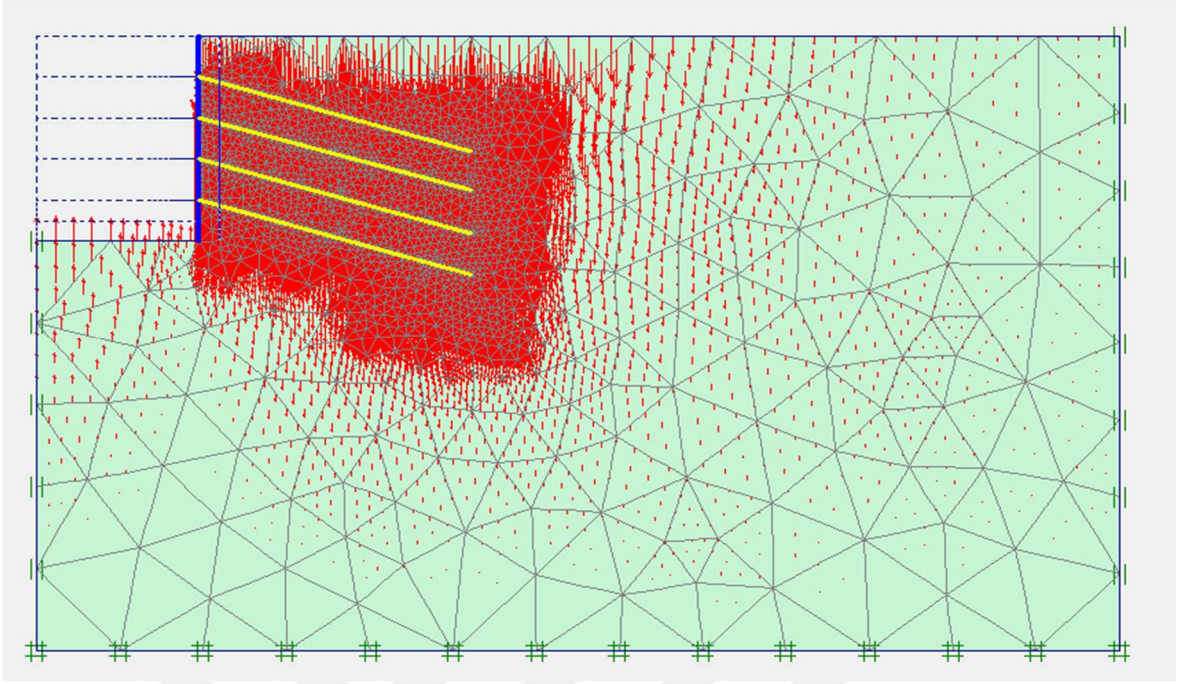
$$\delta_{\text{maksimum}} = 95.35 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 10.1. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



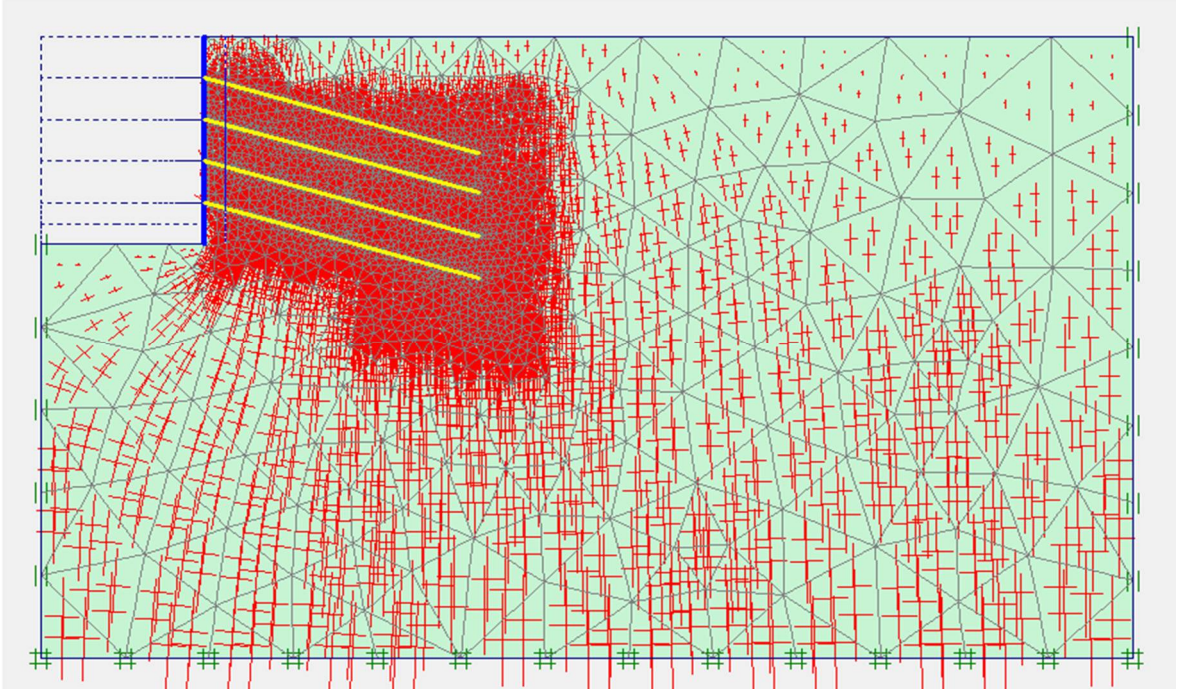
$$\delta_{\text{maksimum yatay}} = 51.88 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 10.2. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



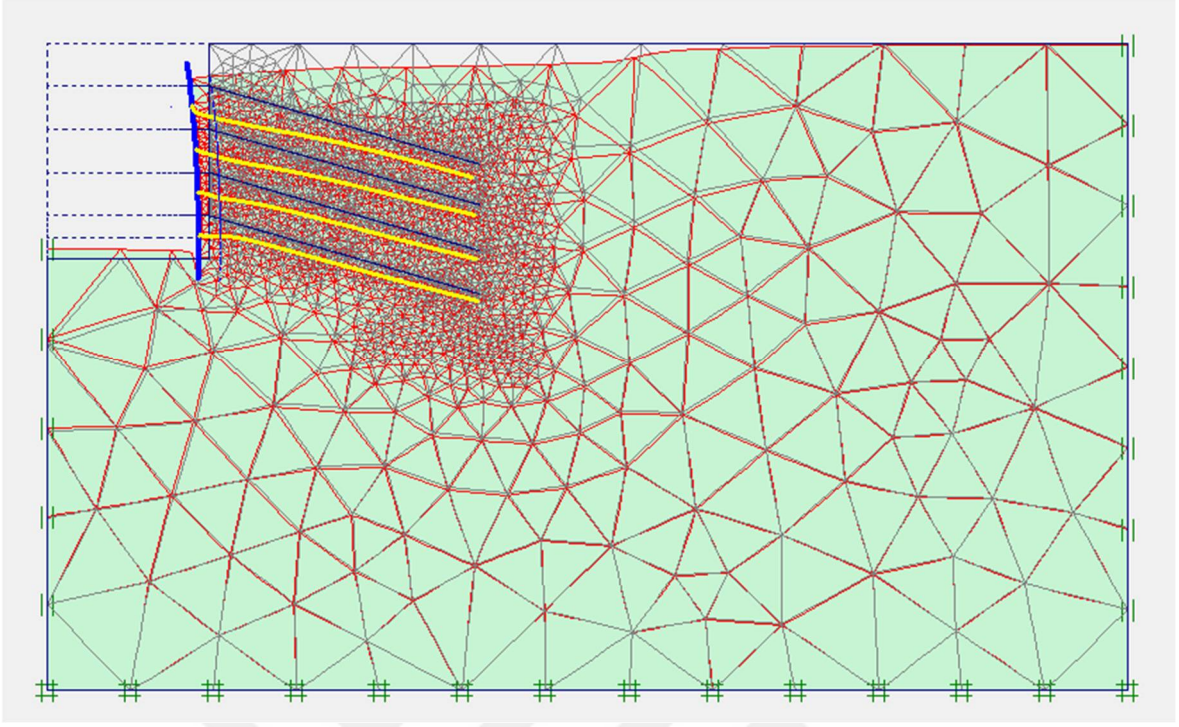
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 83.22 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 10.3. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



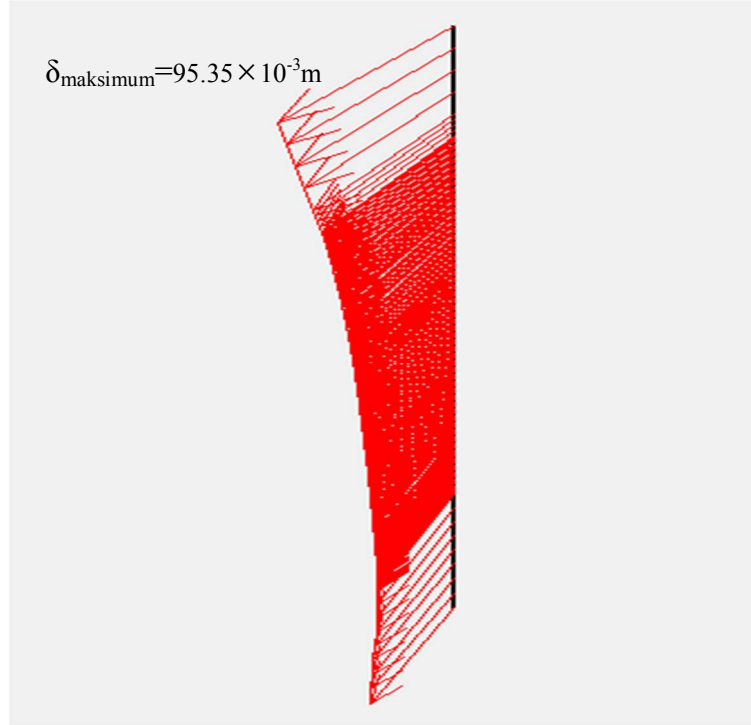
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -687.04 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 10.4. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

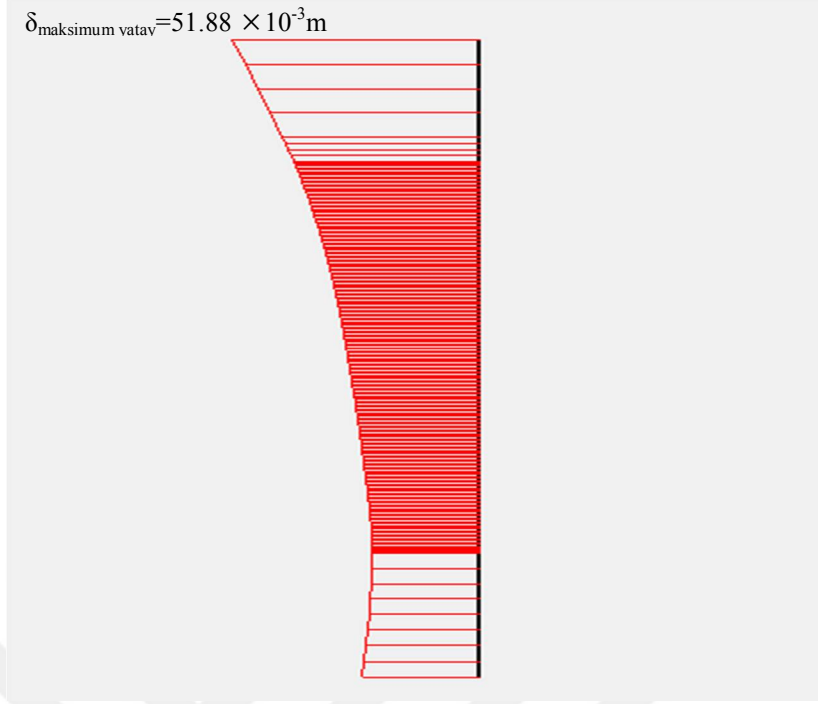


$$\delta_{\text{maksimum}}=95.35 \times 10^{-3} \text{m}$$

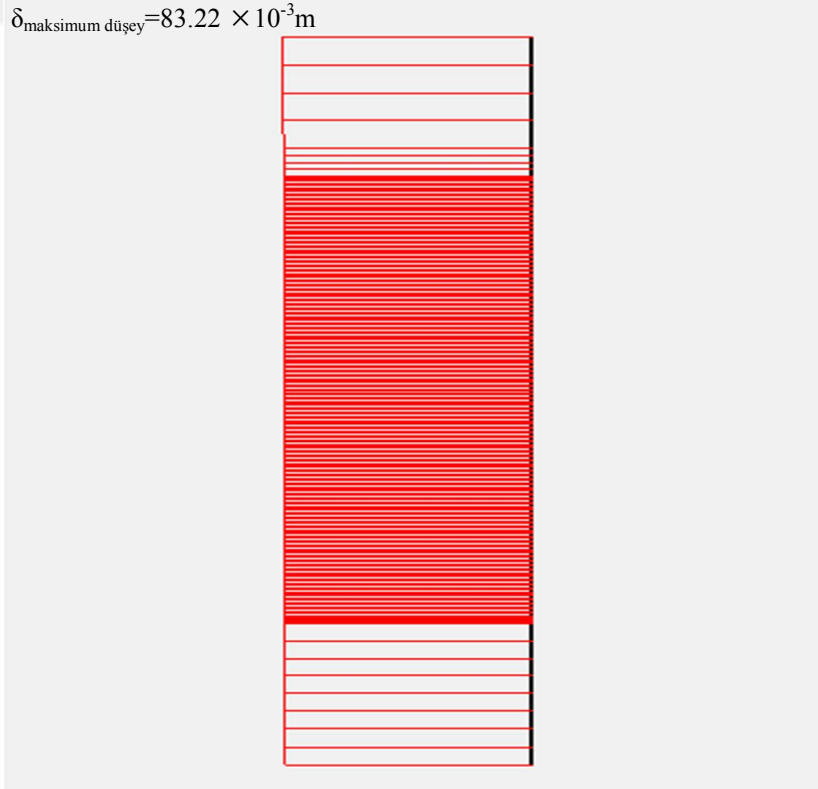
Ek Şekil 10.5. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



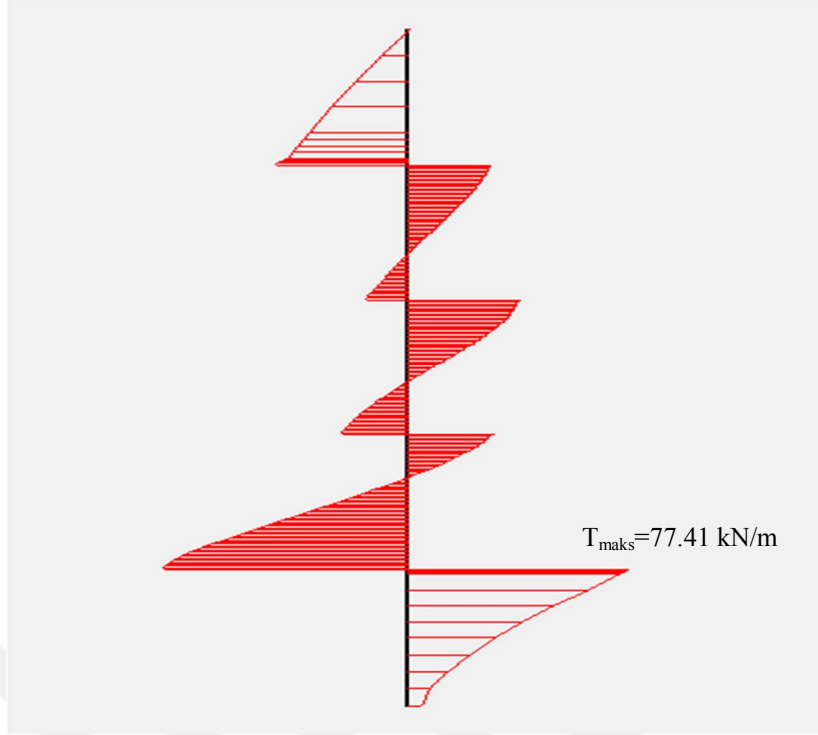
Ek Şekil 10.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



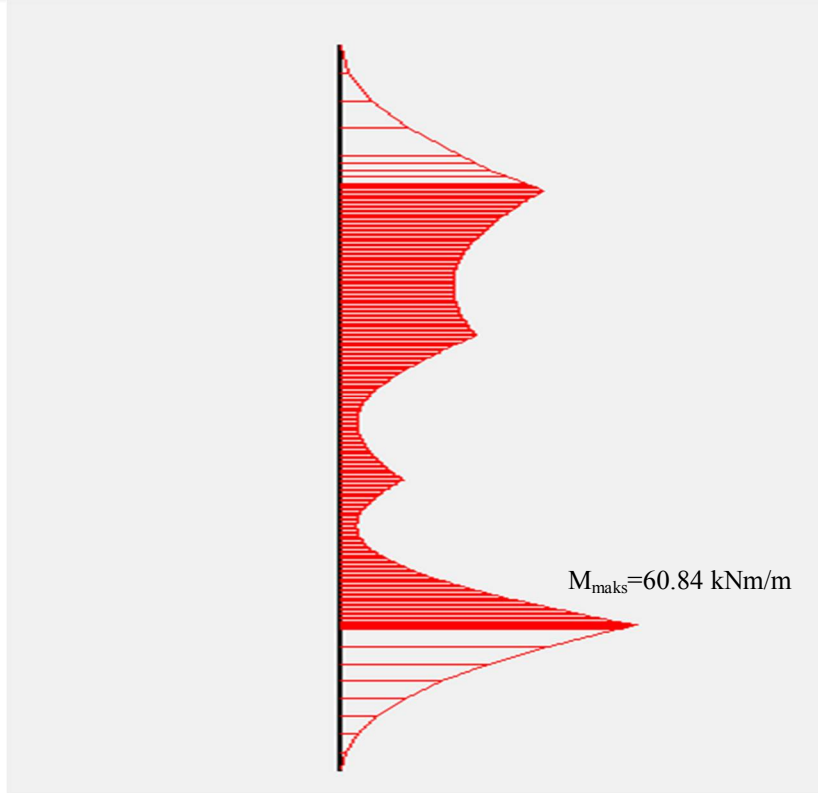
Ek Şekil 10.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 10.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

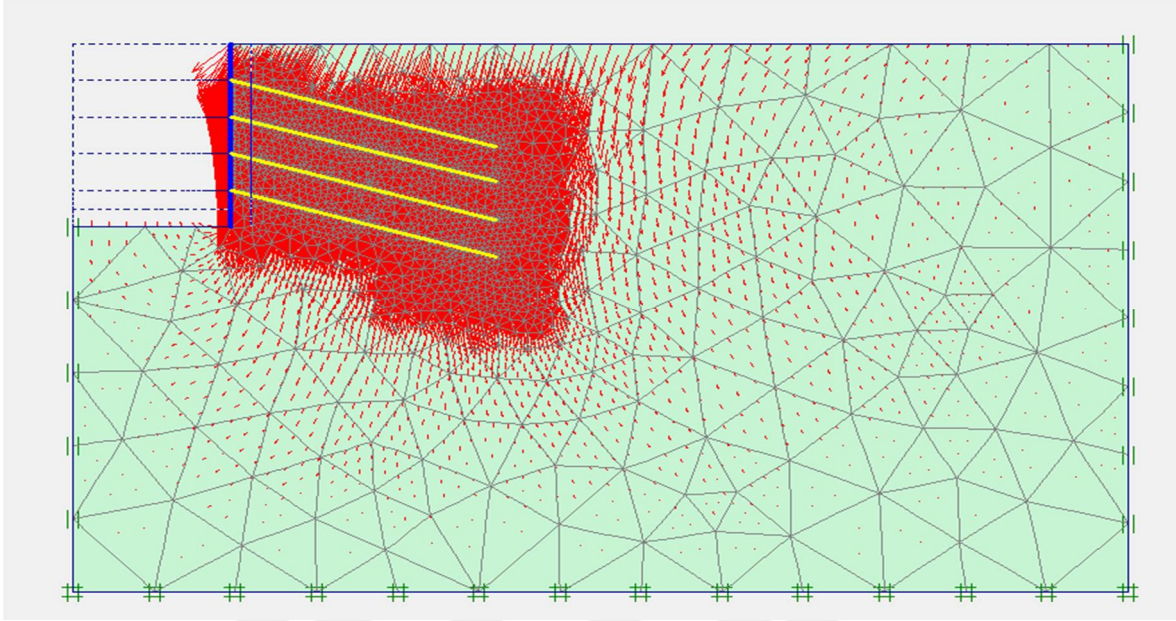


Ek Şekil 10.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



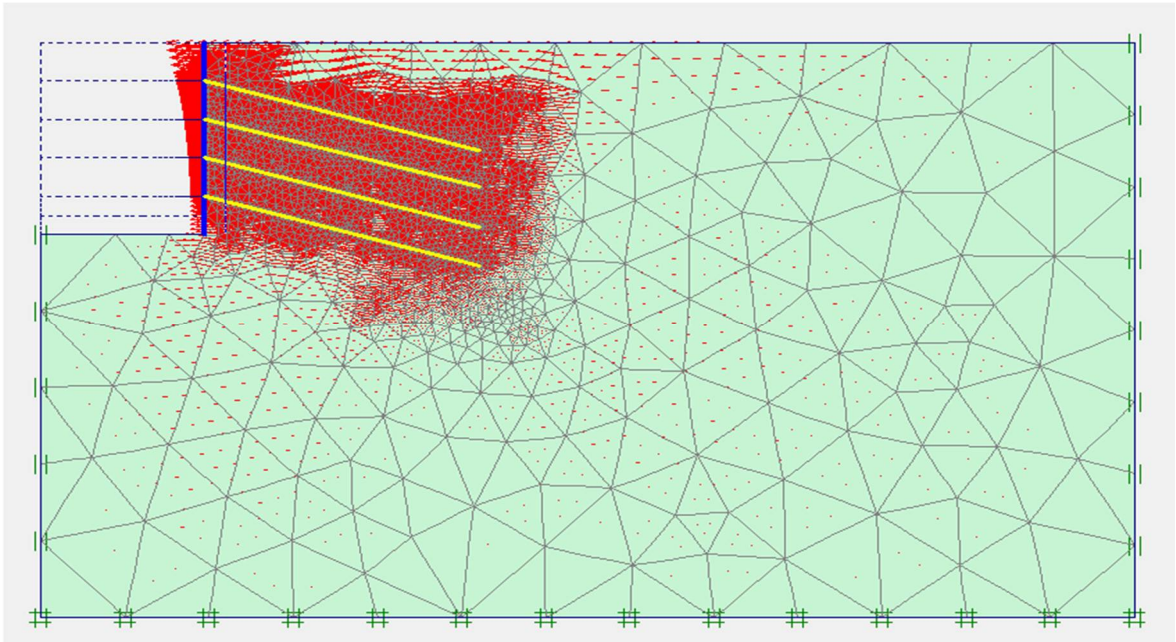
Ek Şekil 10.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 11. Dr=%35 Rölâtif Sıklıktaki Kum Zemin için Dört Zemin Çivili 100 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



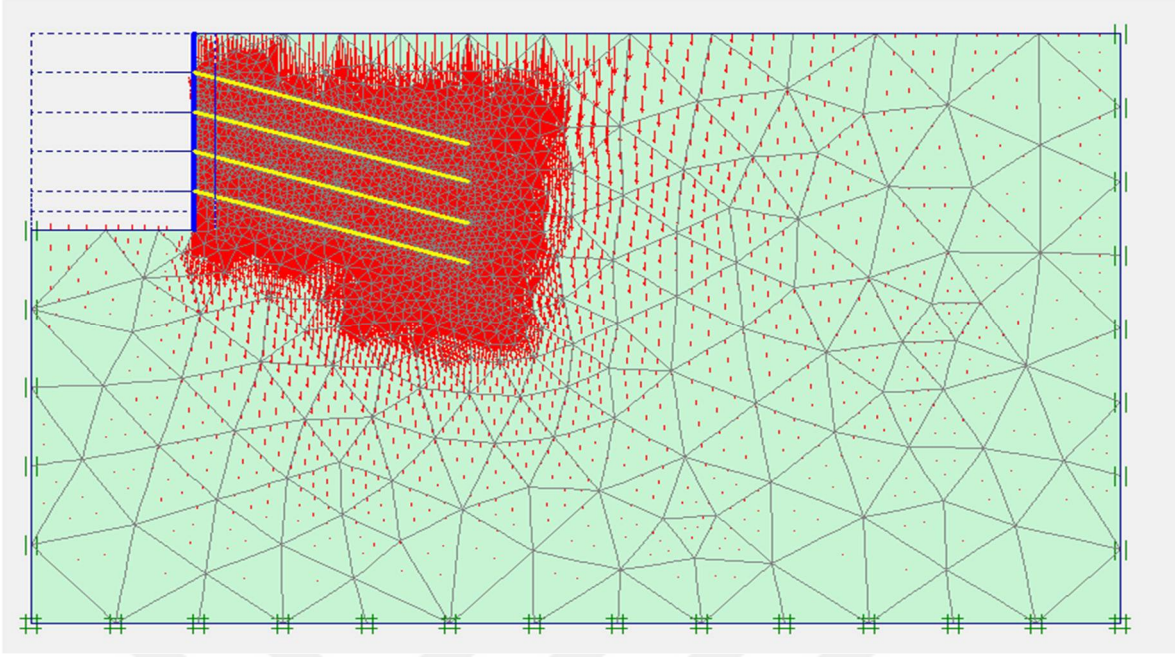
$$\delta_{\text{maksimum}}=170.99 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 11.1. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



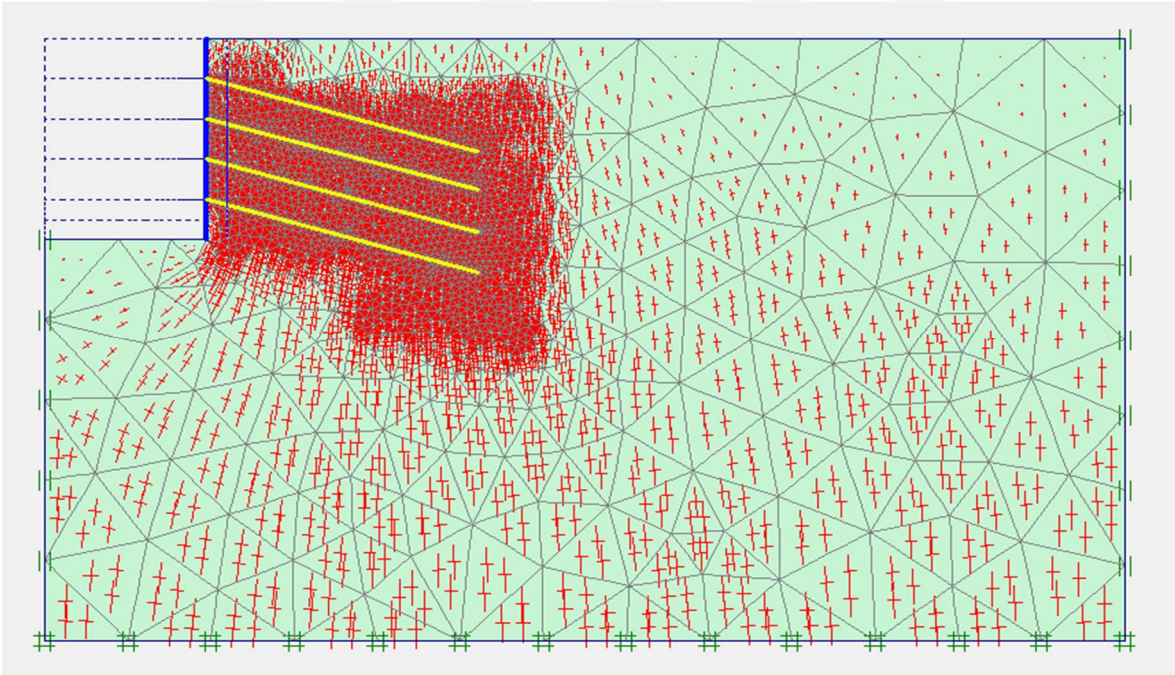
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}=91.98 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 11.2. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



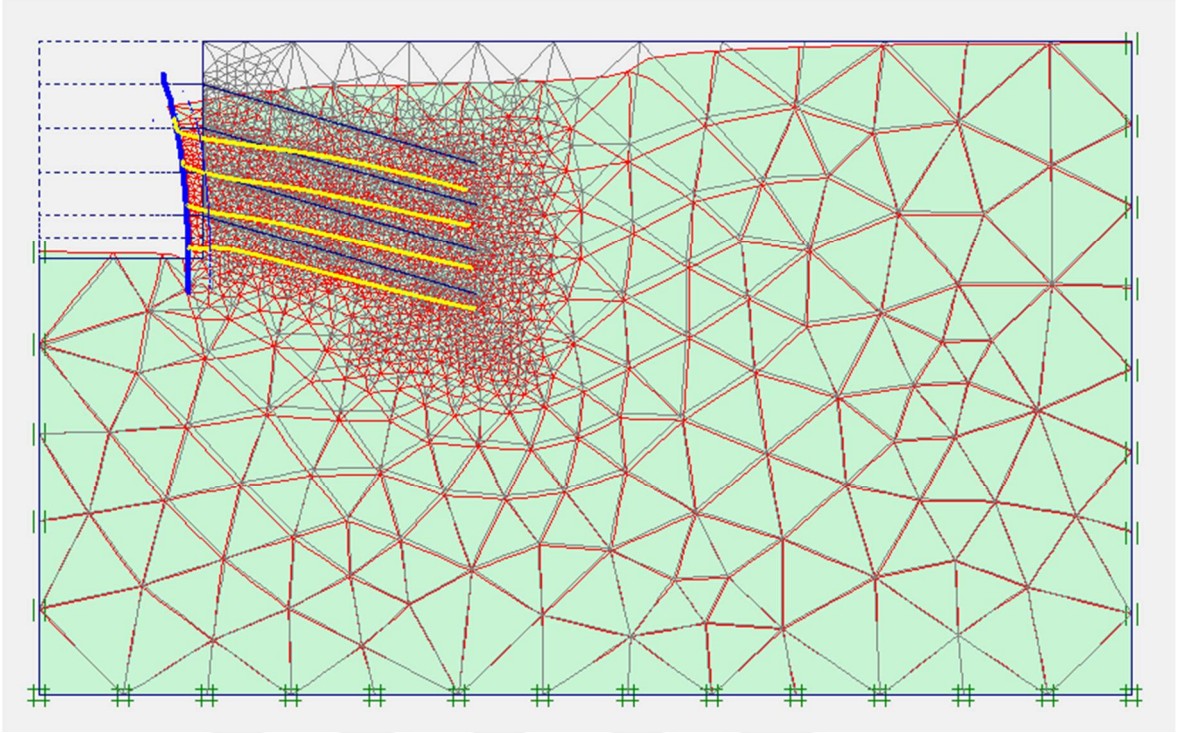
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 150.55 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 11.3. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



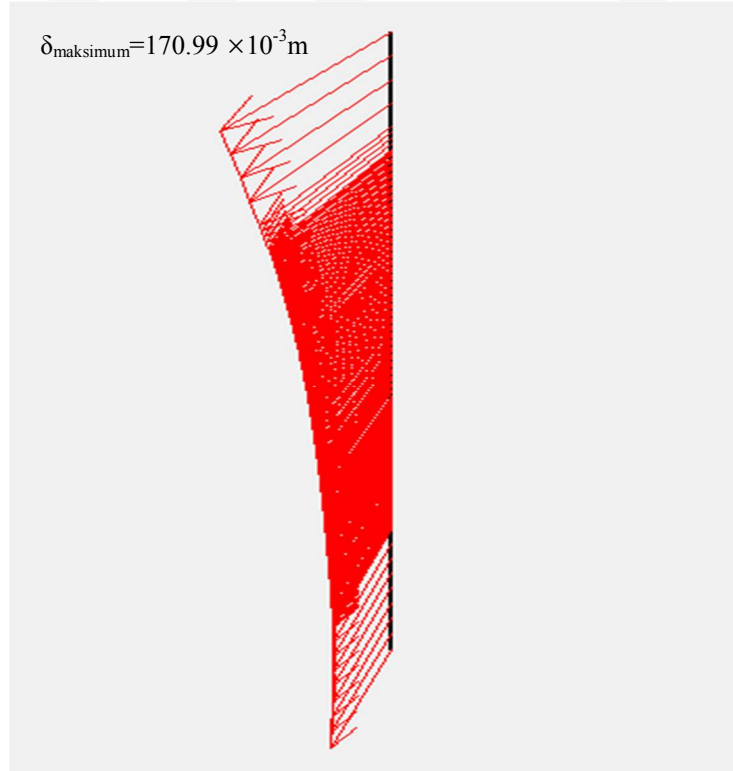
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -899.56 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 11.4. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

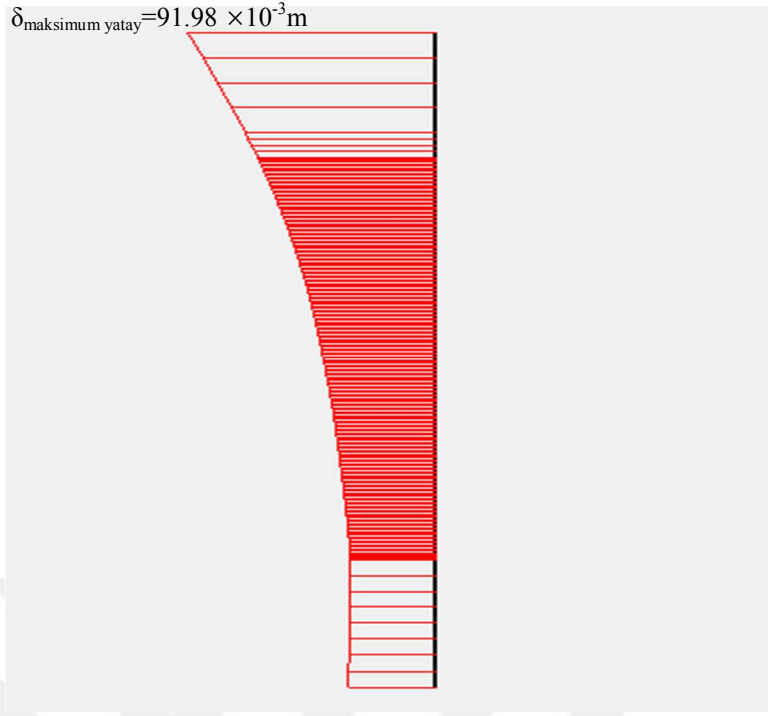


$$\delta_{\text{maksimum}}=170.99 \times 10^{-3} \text{ m}$$

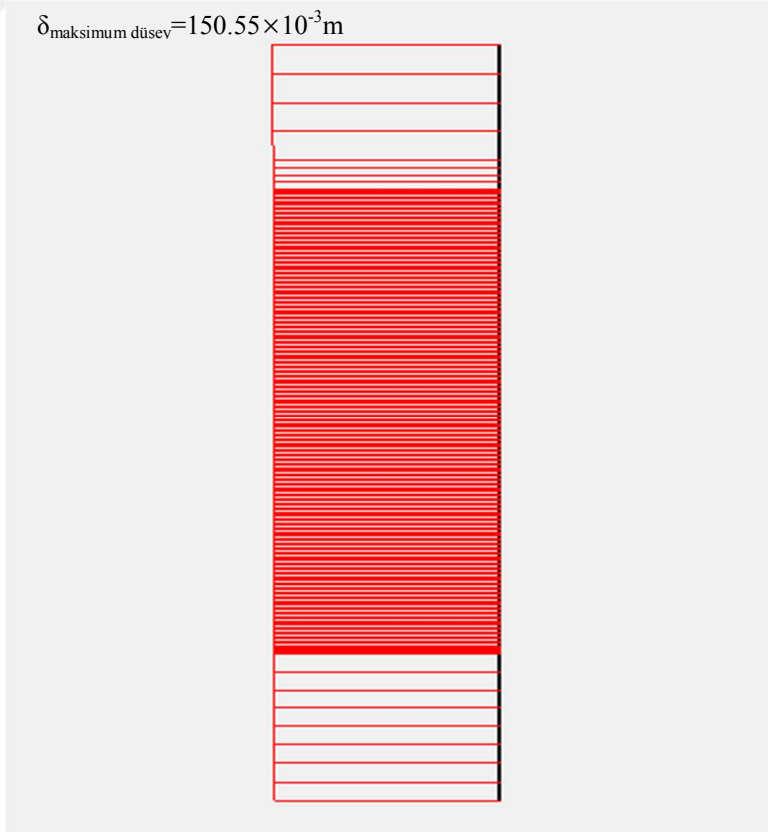
Ek Şekil 11.5. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



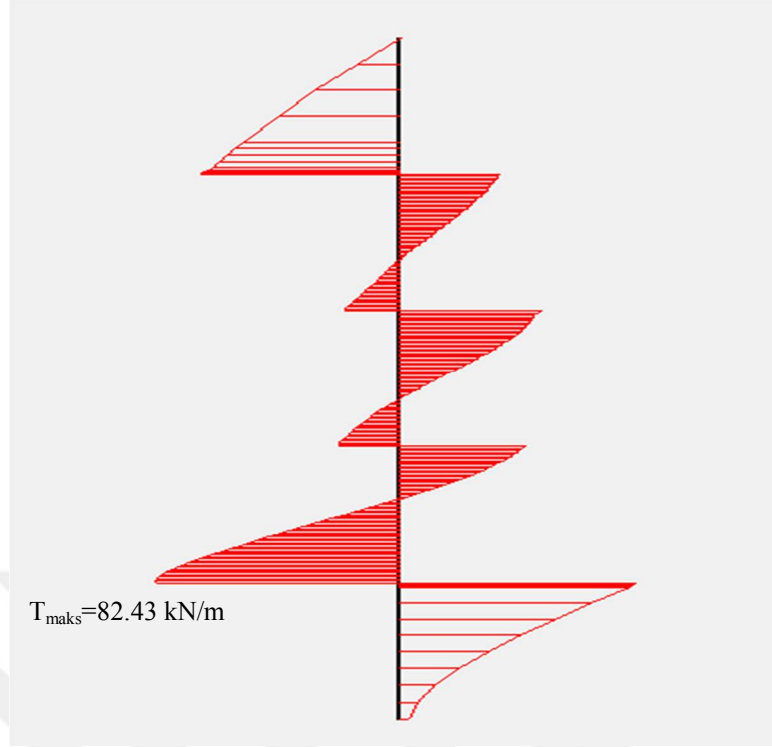
Ek Şekil 11.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



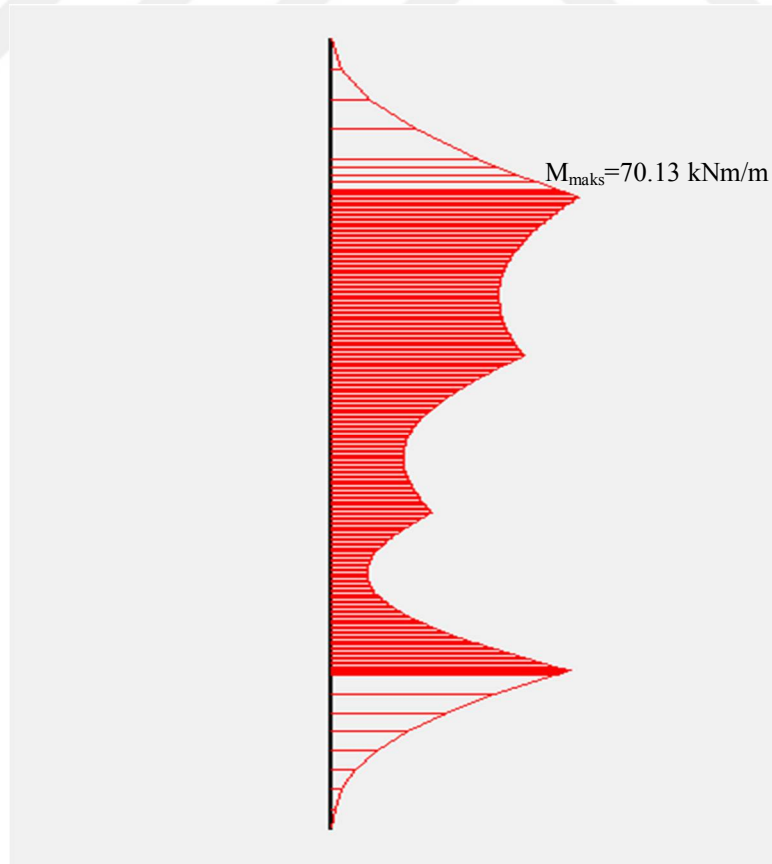
Ek Şekil 11.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 11.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

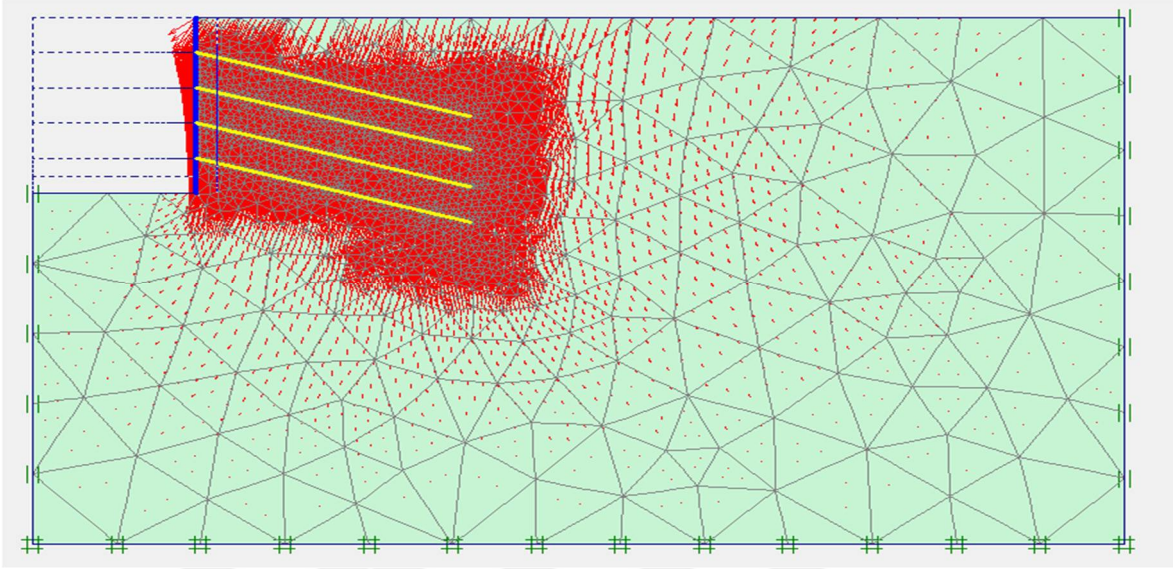


Ek Şekil 11.9. Duvarın max kesme kuvveti diyagramı



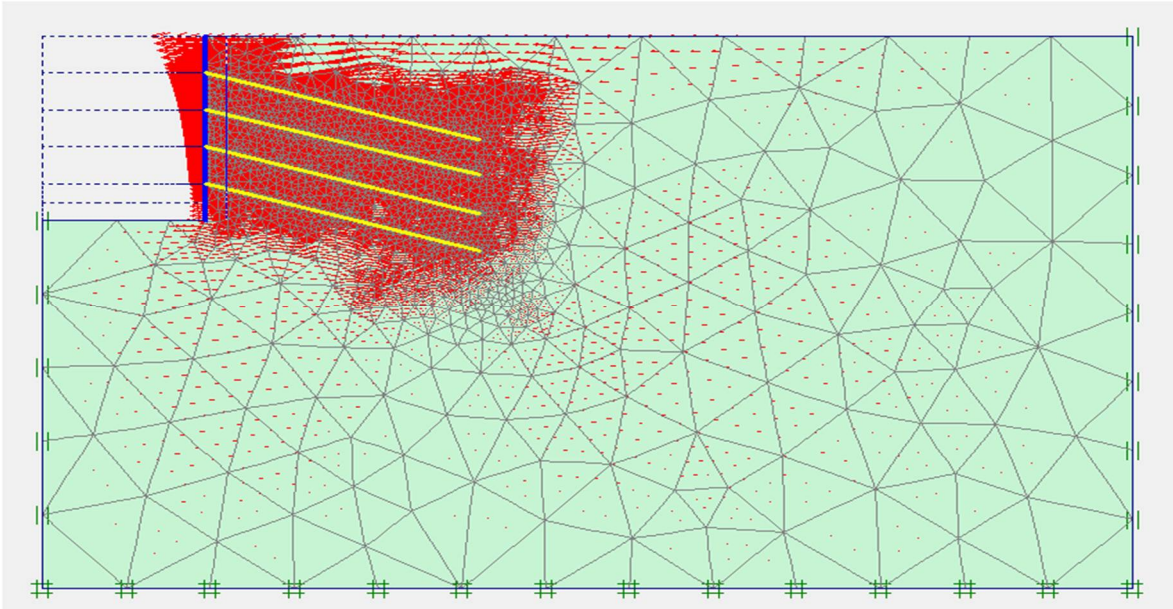
Ek Şekil 11.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 12. Dr=%35 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için Dört Zemin Çivili 150 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



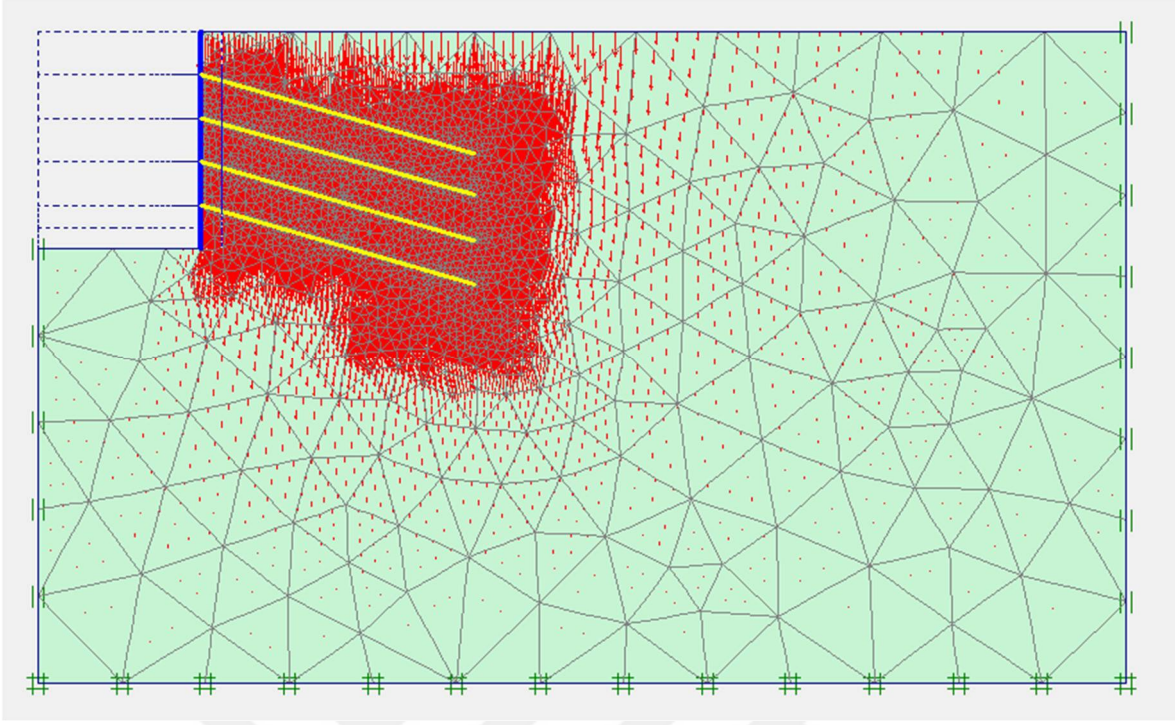
$$\delta_{\text{maksimum}}=234.8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 12.1. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



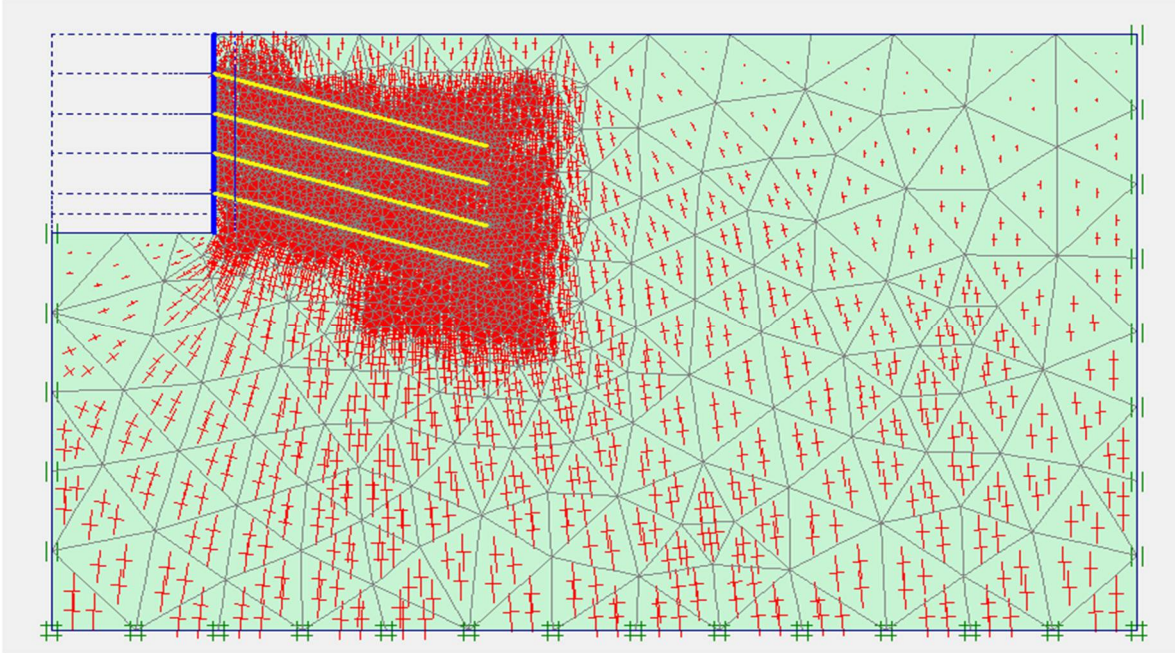
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}=126.78 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 12.2.150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



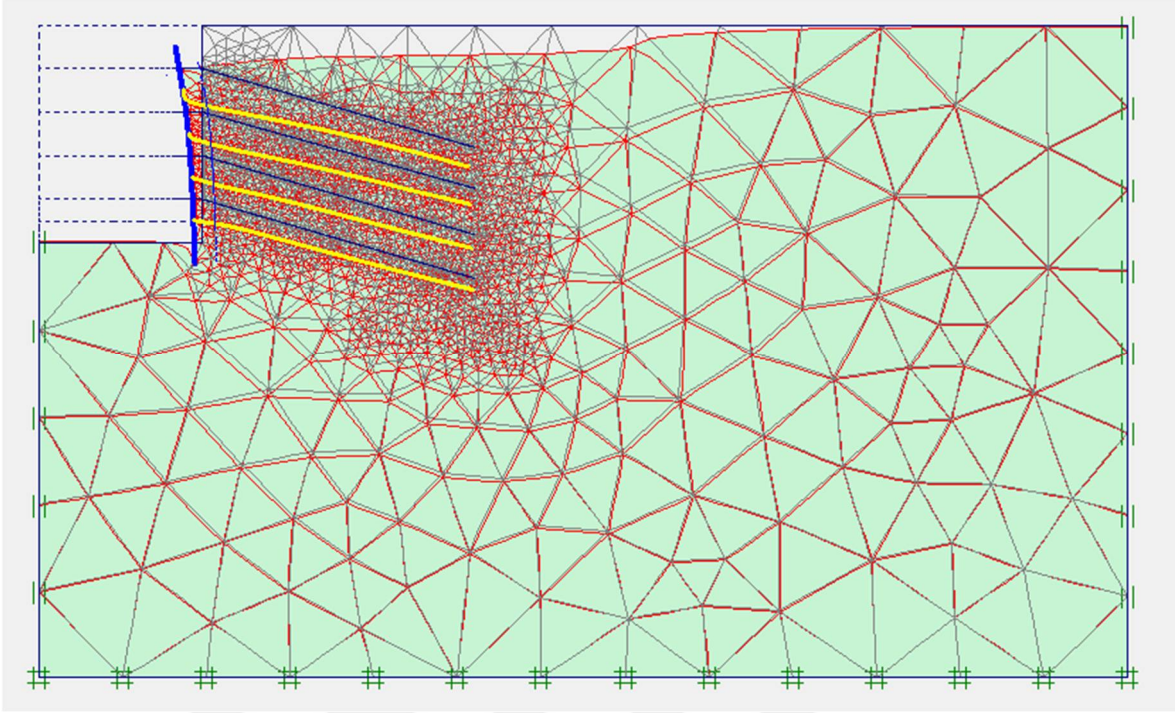
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 207.16 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 12.3. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



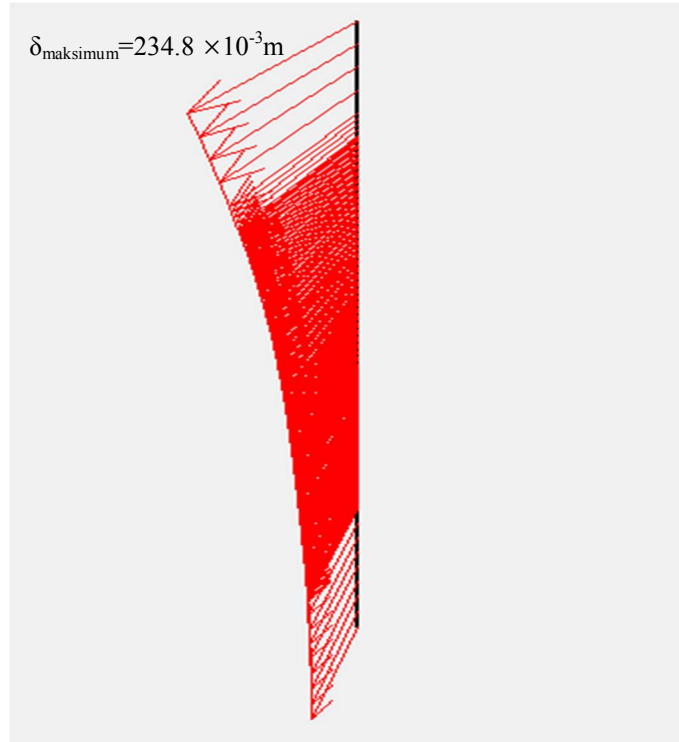
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -966.35 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 12.4. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değışimi

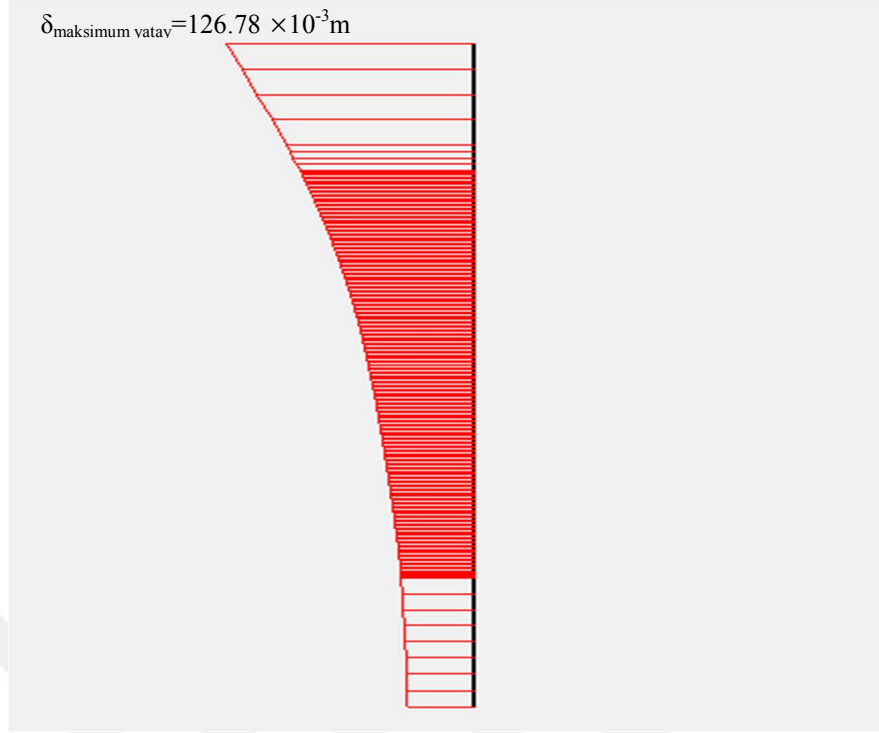


$$\delta_{\text{maksimum}}=234.80 \times 10^{-3} \text{ m}$$

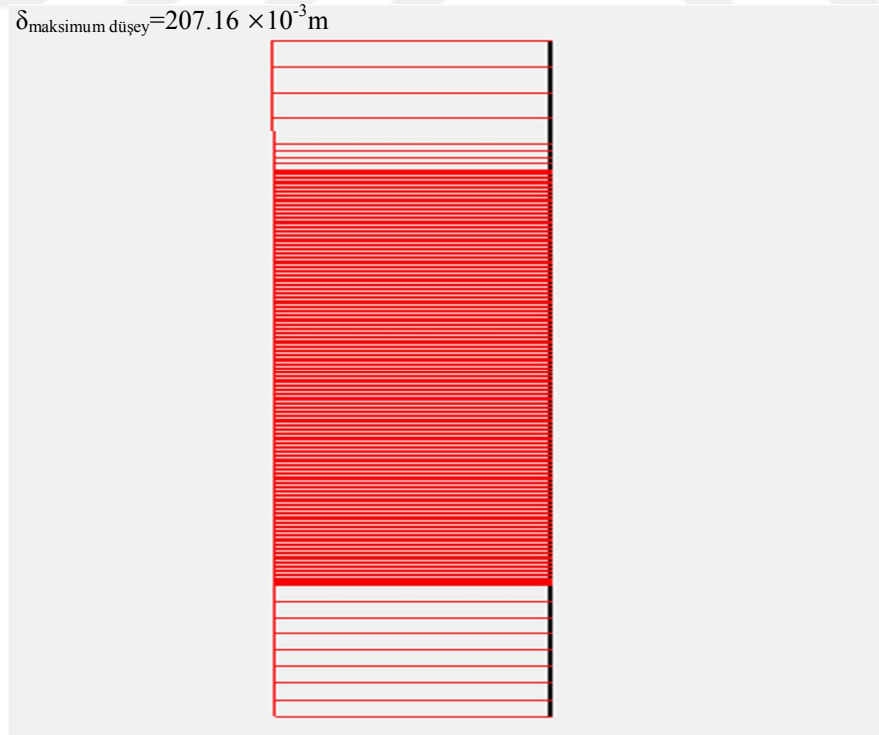
Ek Şekil 12.5.150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



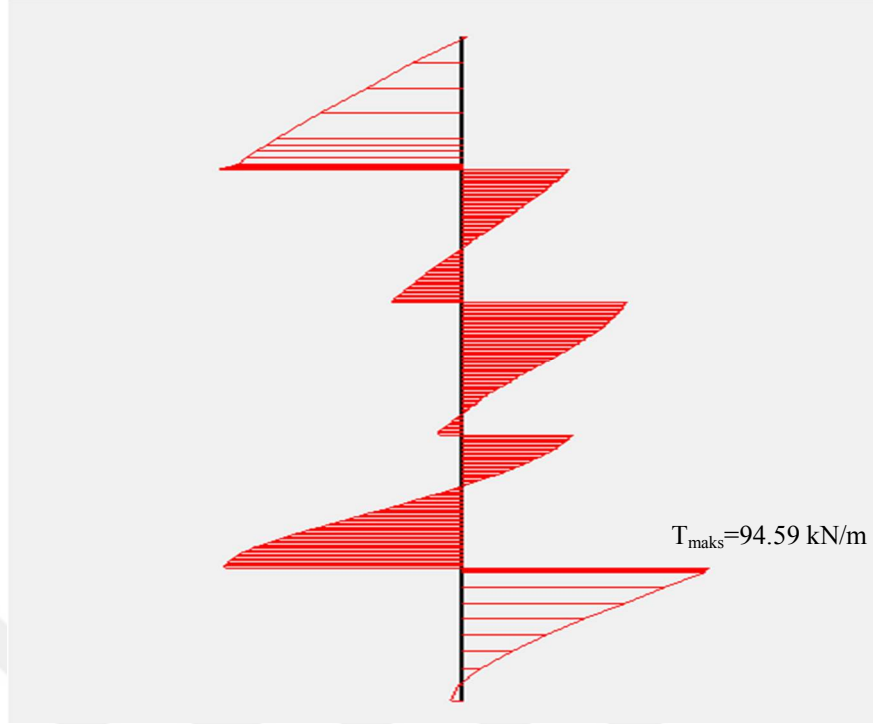
Ek Şekil 12.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



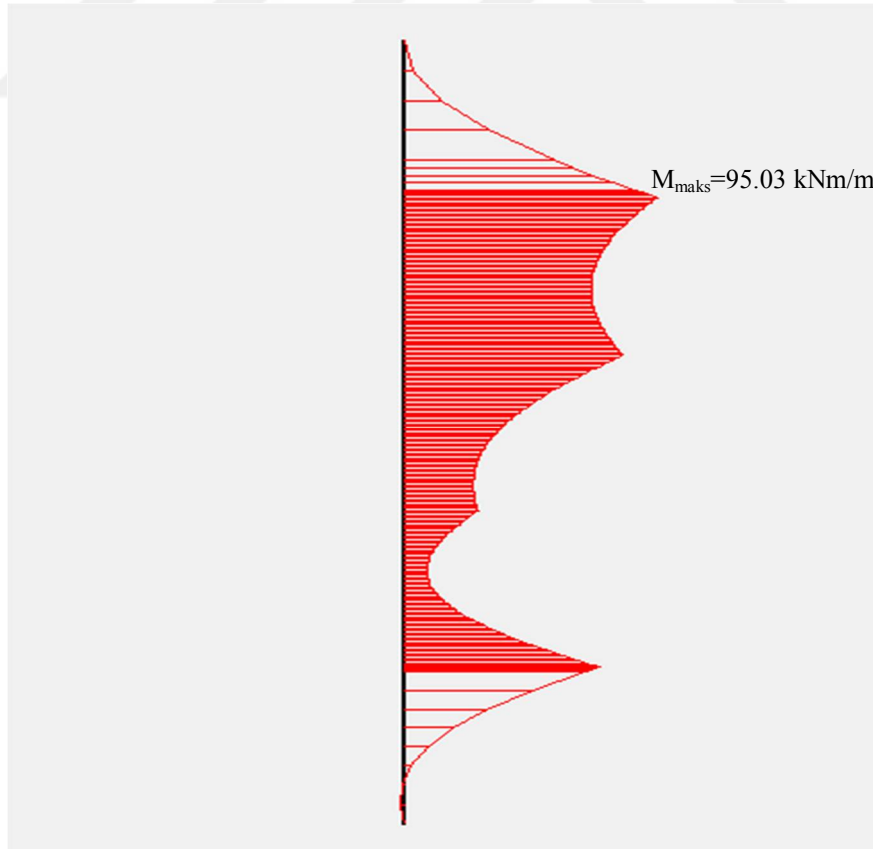
Ek Şekil 12.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 12.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

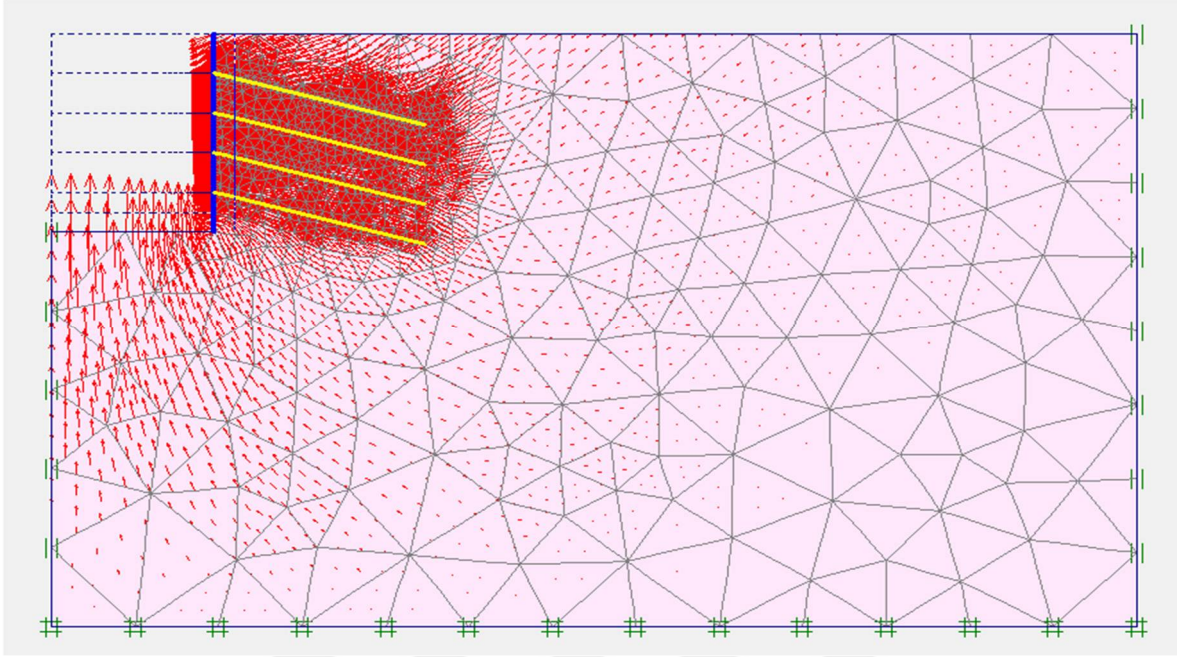


Ek Şekil 12.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



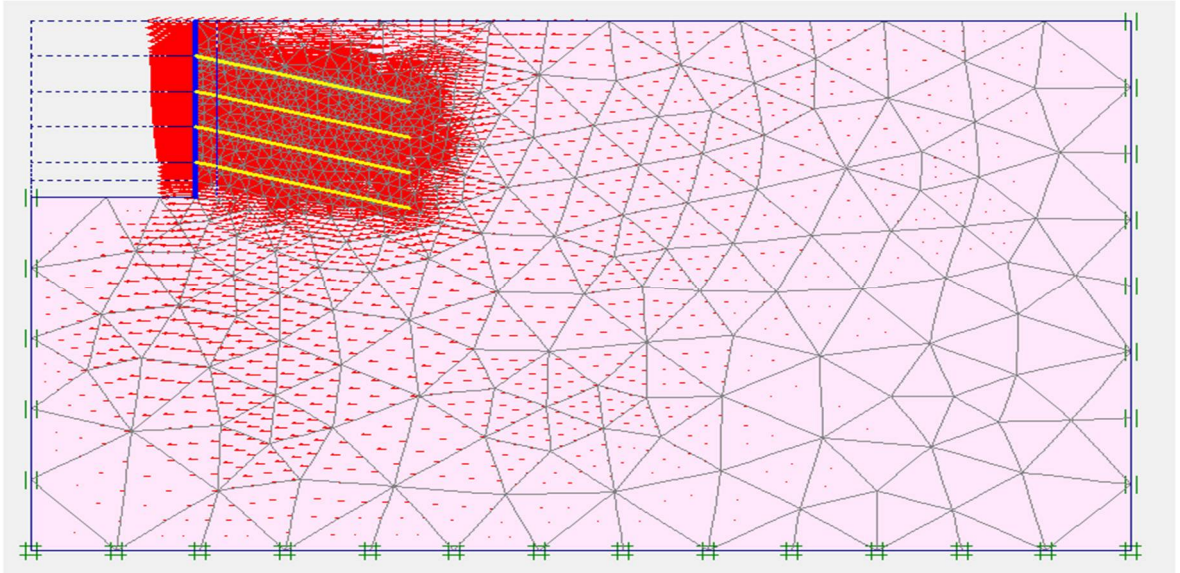
Ek Şekil 12.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 13. Dr=%65 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için Dört Zemin Çivili 0 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



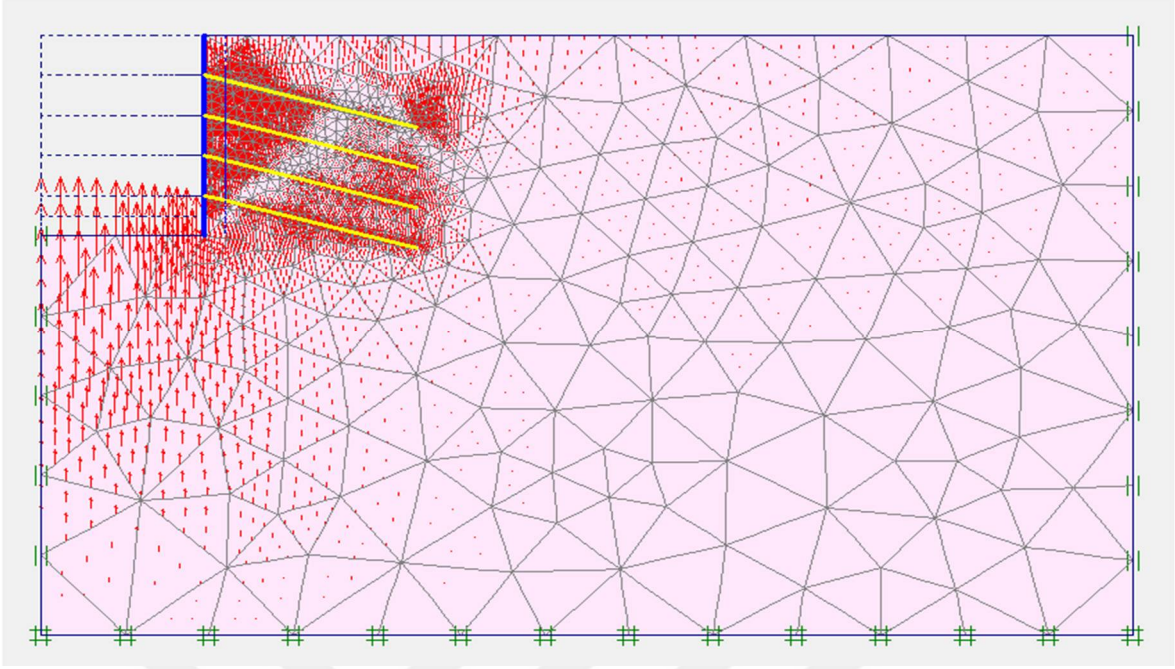
$$\delta_{\text{maksimum}}=29.53 \times 10^{-3}\text{m}$$

Ek Şekil 13.1. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



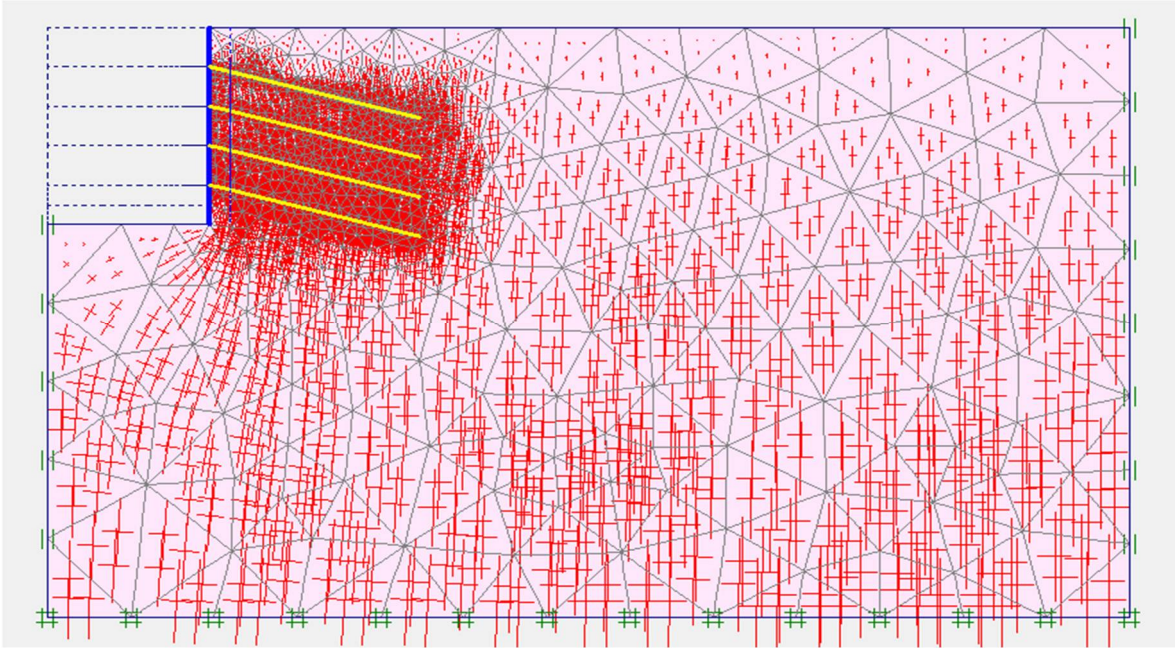
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}=11.64 \times 10^{-3}\text{m}$$

Ek Şekil 13.2. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



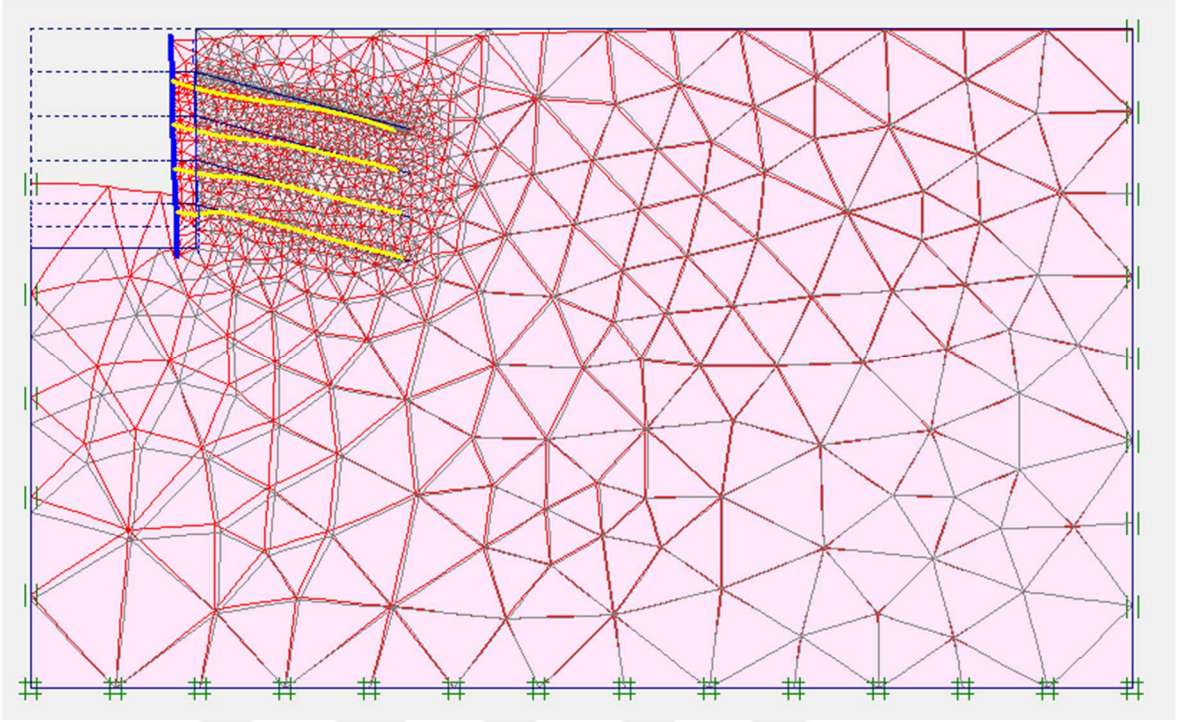
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 29.53 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 13.3. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



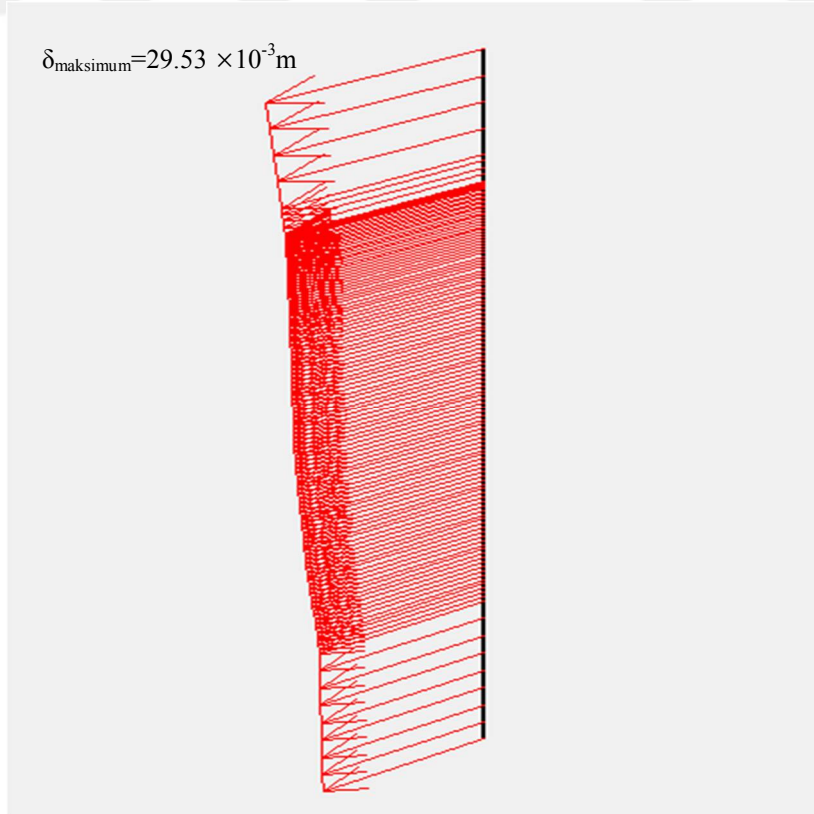
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -507.24 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 13.4. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değışim

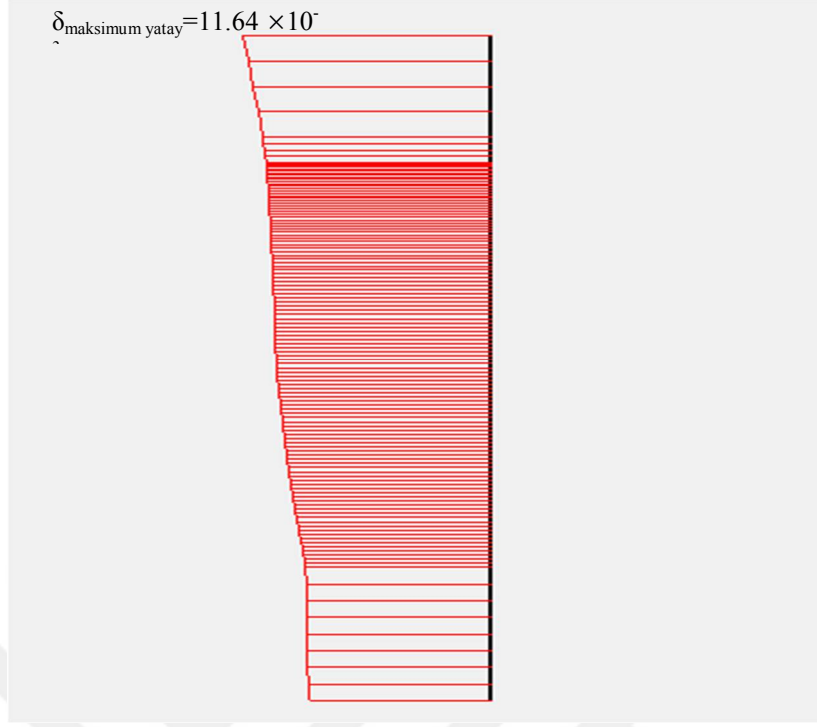


$$\delta_{\text{maksimum}} = 29.53 \times 10^{-3} \text{ m}$$

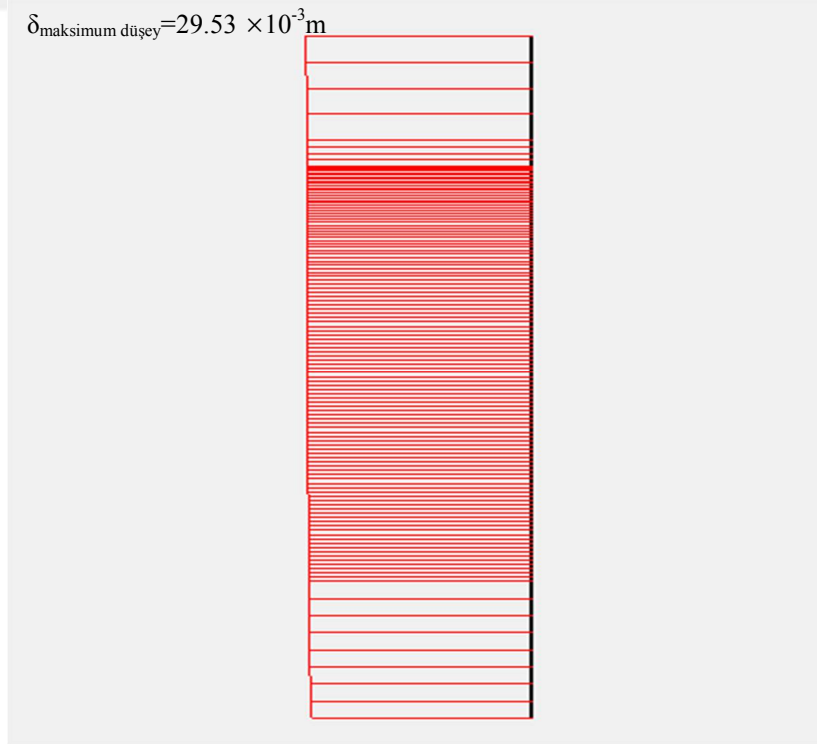
Ek Şekil 13.5. 0 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



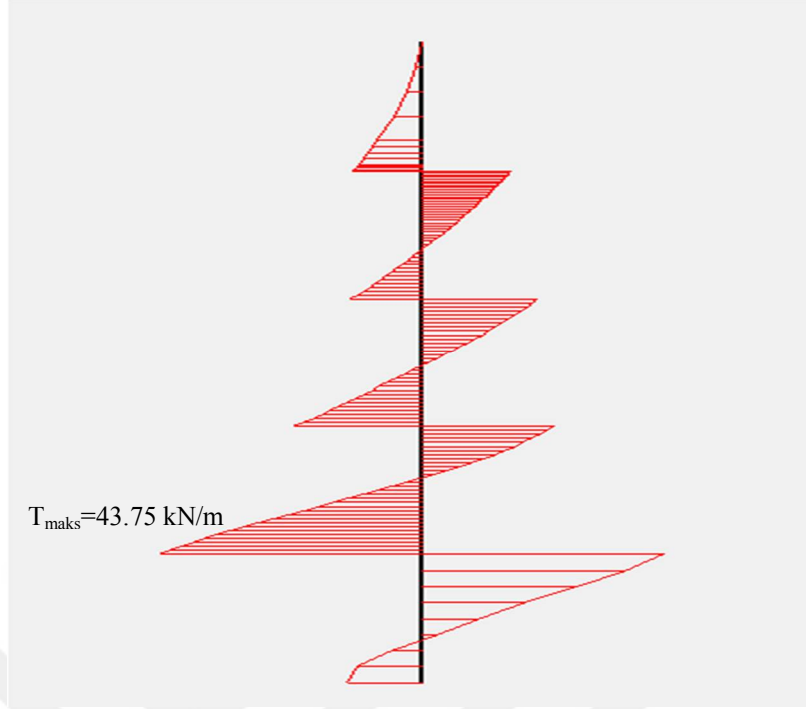
Ek Şekil 13.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



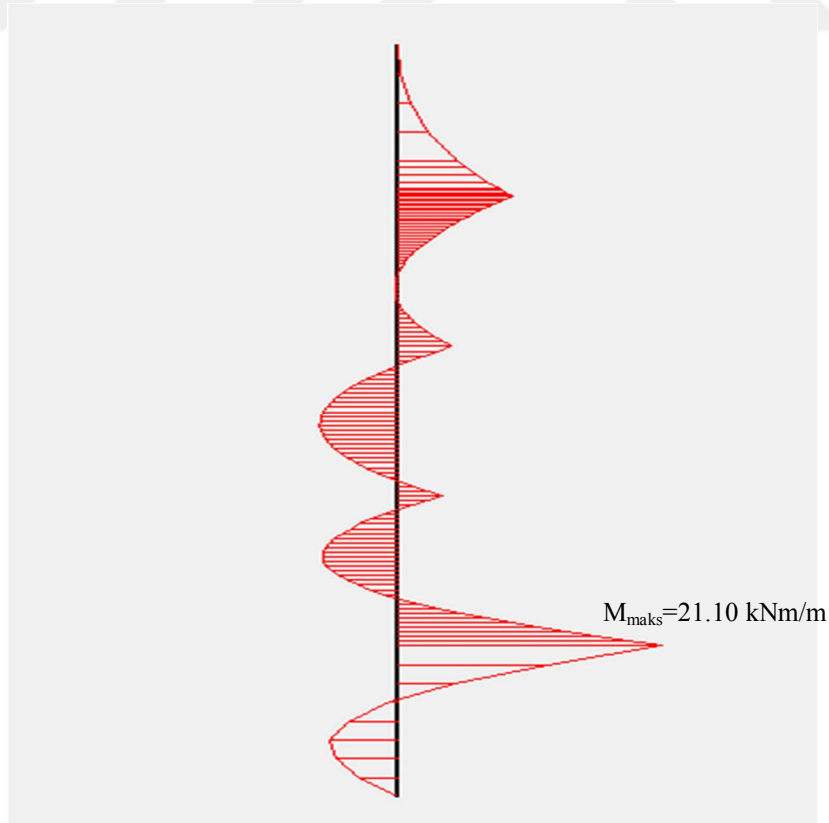
Ek Şekil 13.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 13.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

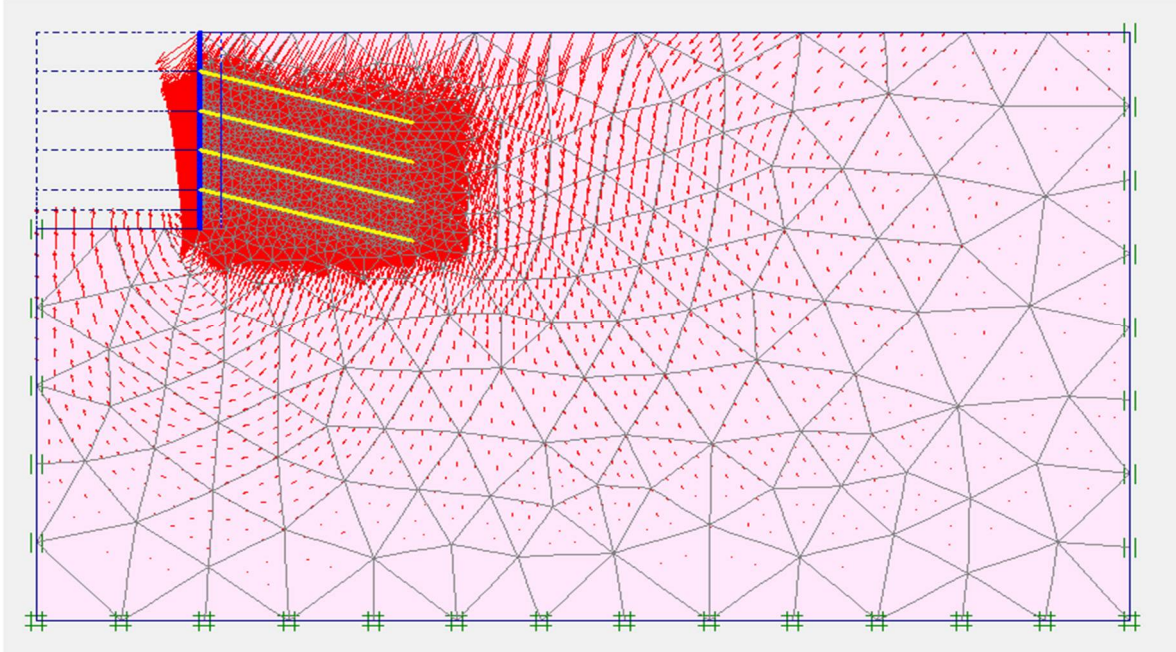


Ek Şekil 13.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



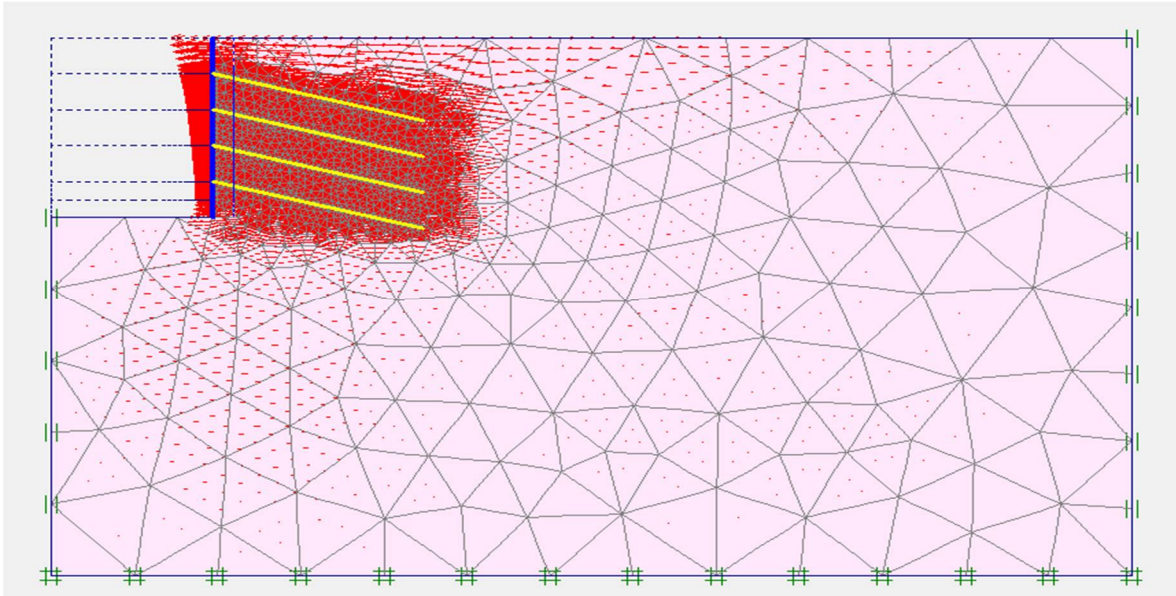
Ek Şekil 13.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 14. $D_r=65\%$ Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için Dört Zemin Çivili 50 kN/m^2 Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



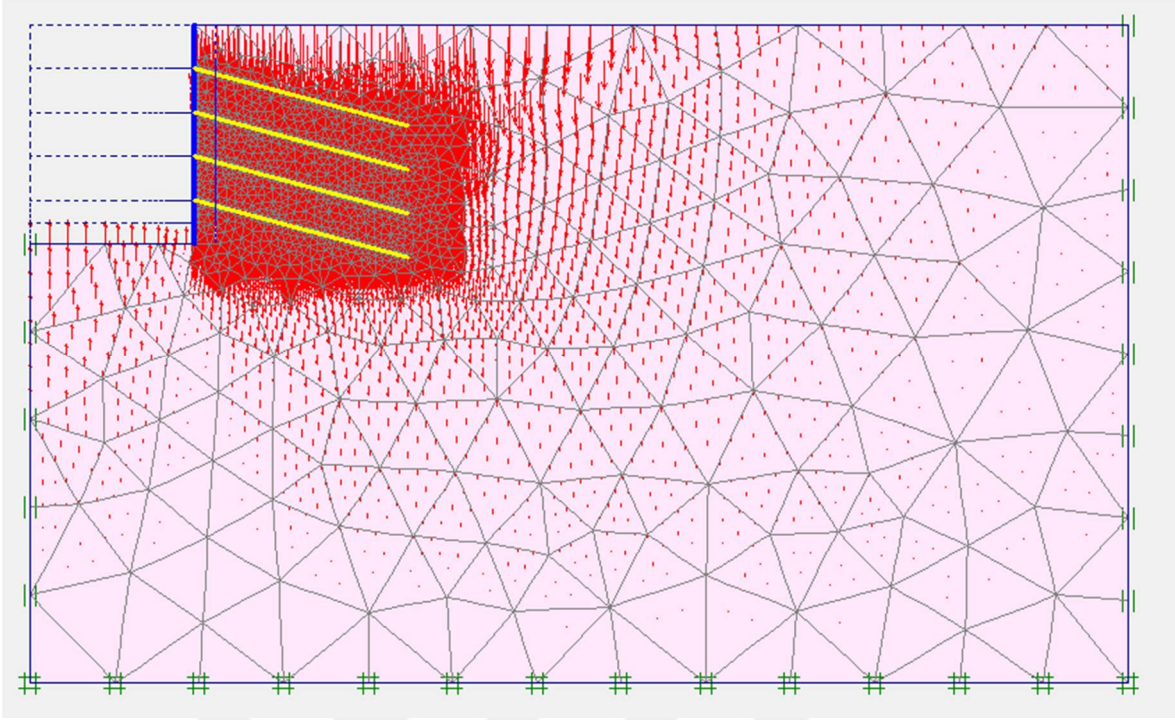
$$\delta_{\text{maksimum}}=70.23 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 14.1. 50 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



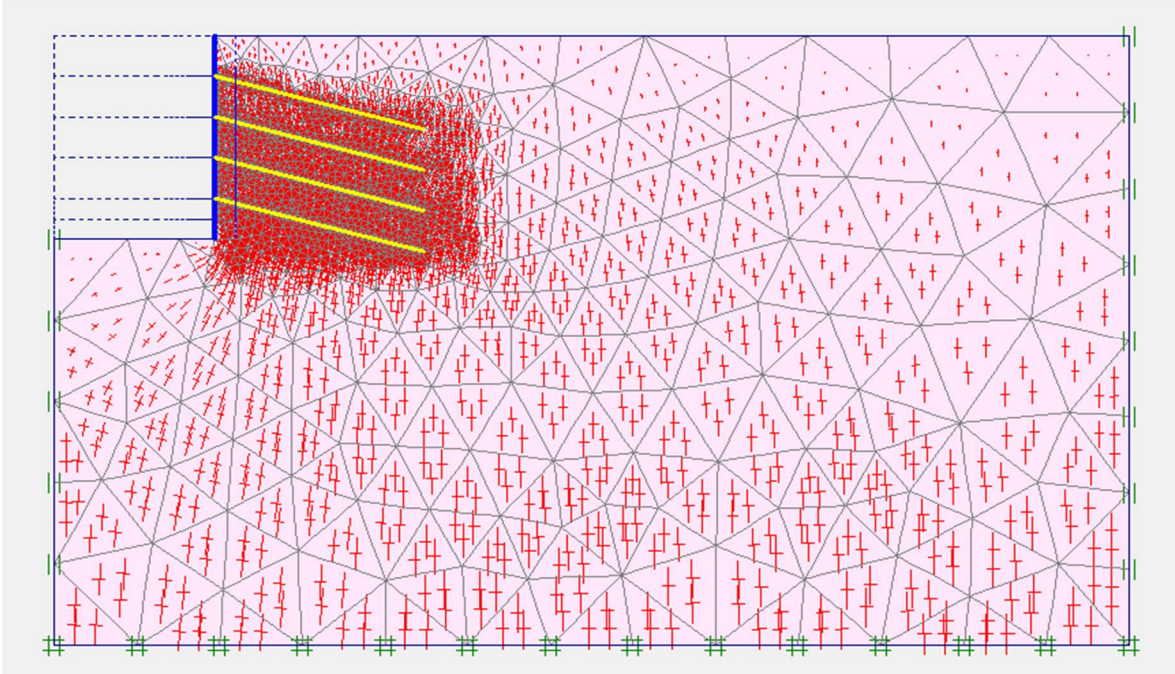
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}=41.64 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 14.2. 50 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



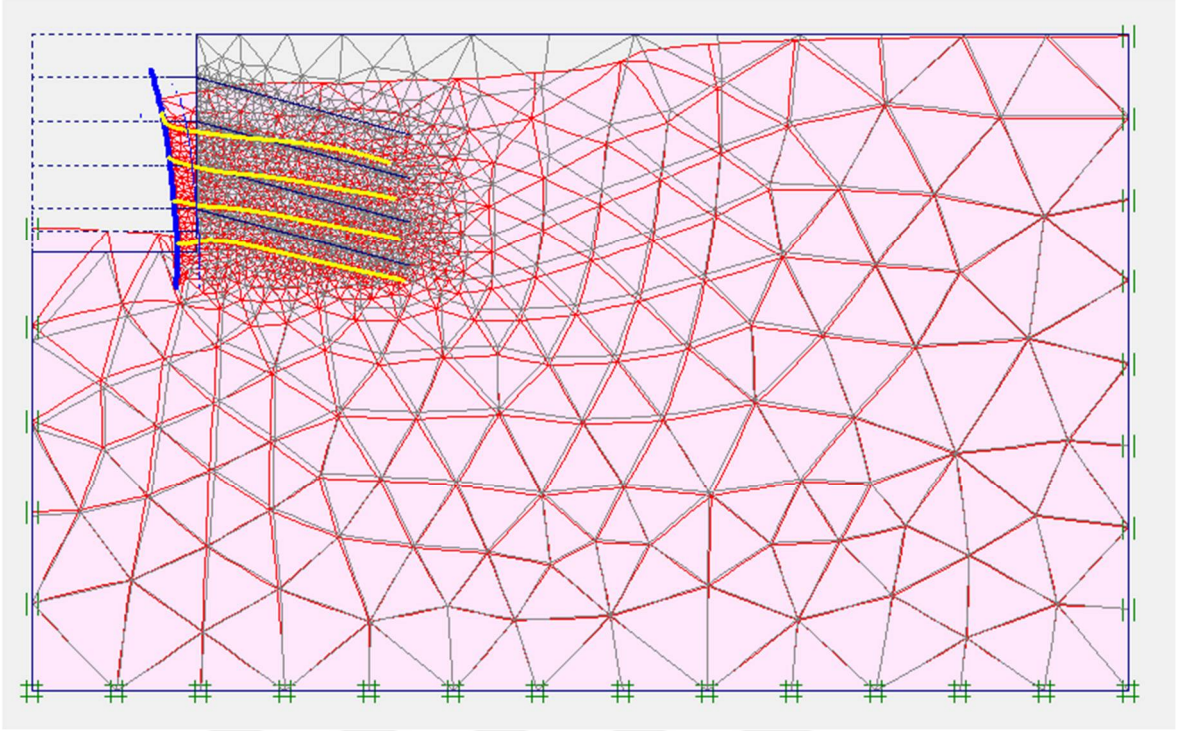
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 59.96 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 14.3. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



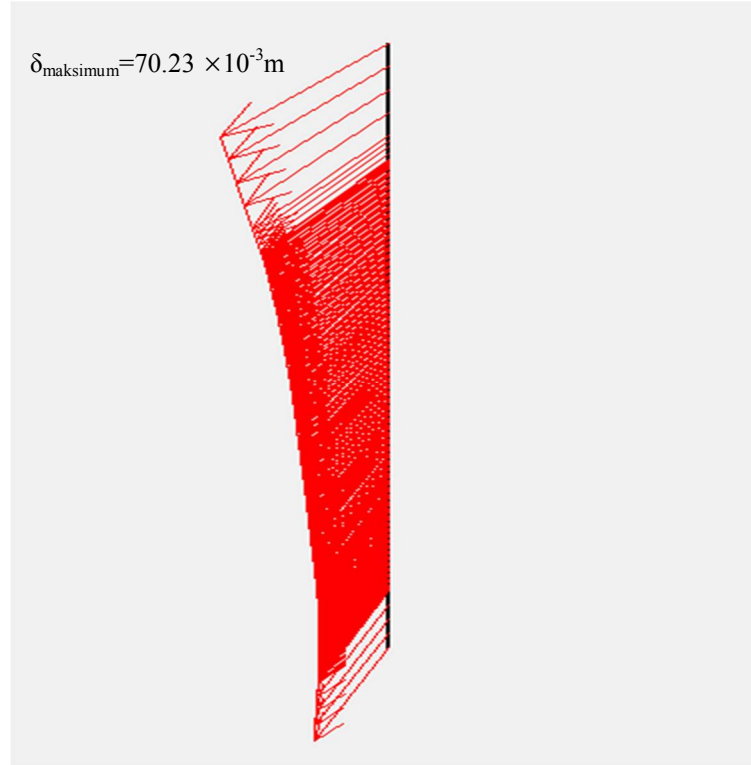
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -982.82 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 14.4. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

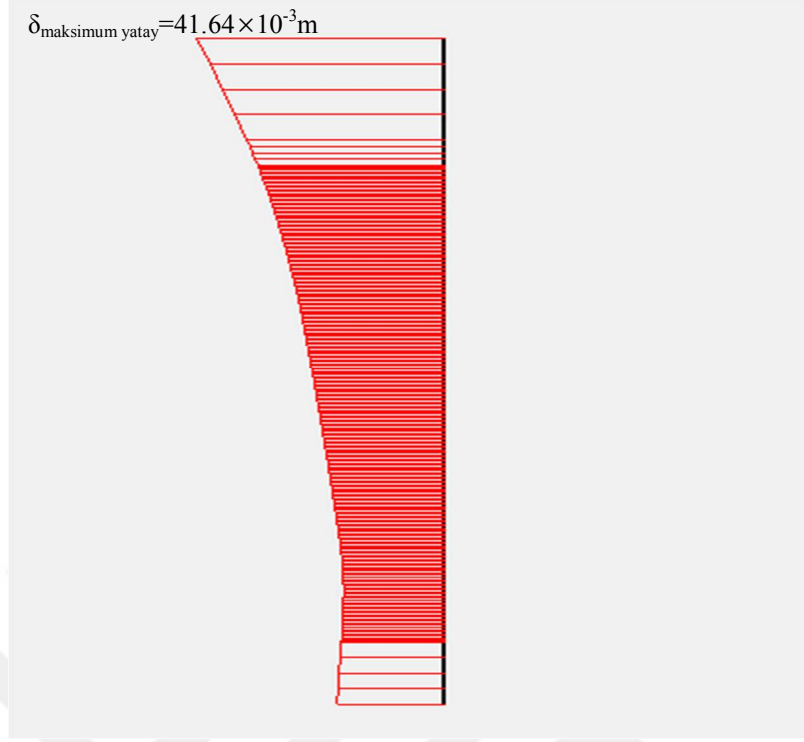


$$\delta_{\text{maksimum}} = 70.23 \times 10^{-3} \text{ m}$$

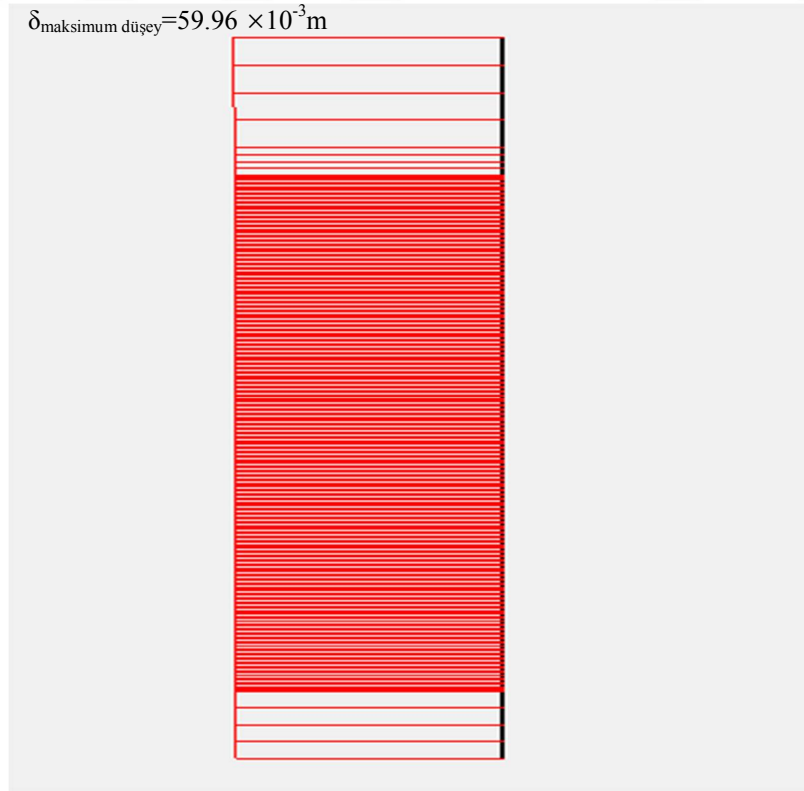
Ek Şekil 14.5. 50 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



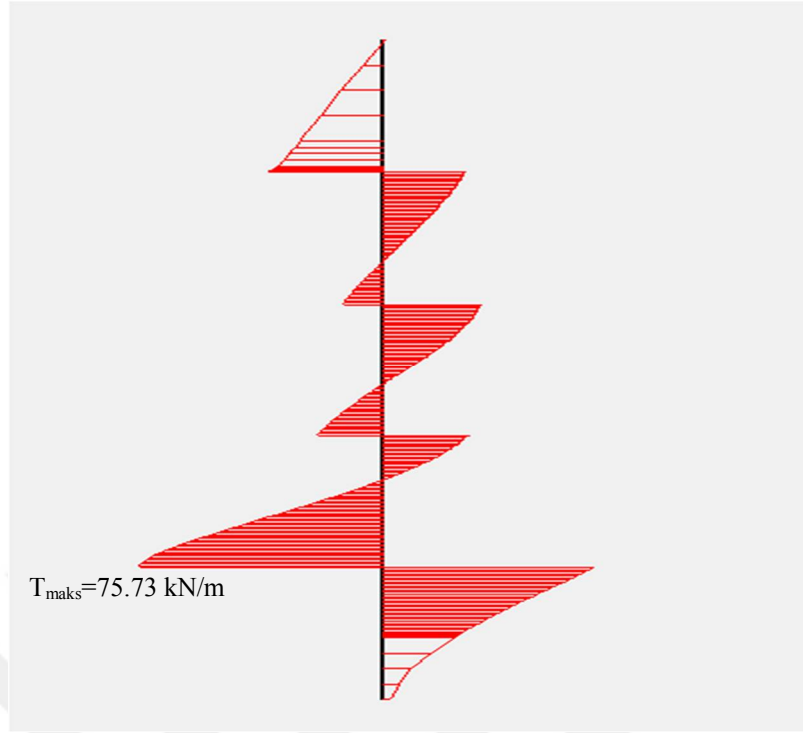
Ek Şekil 14.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



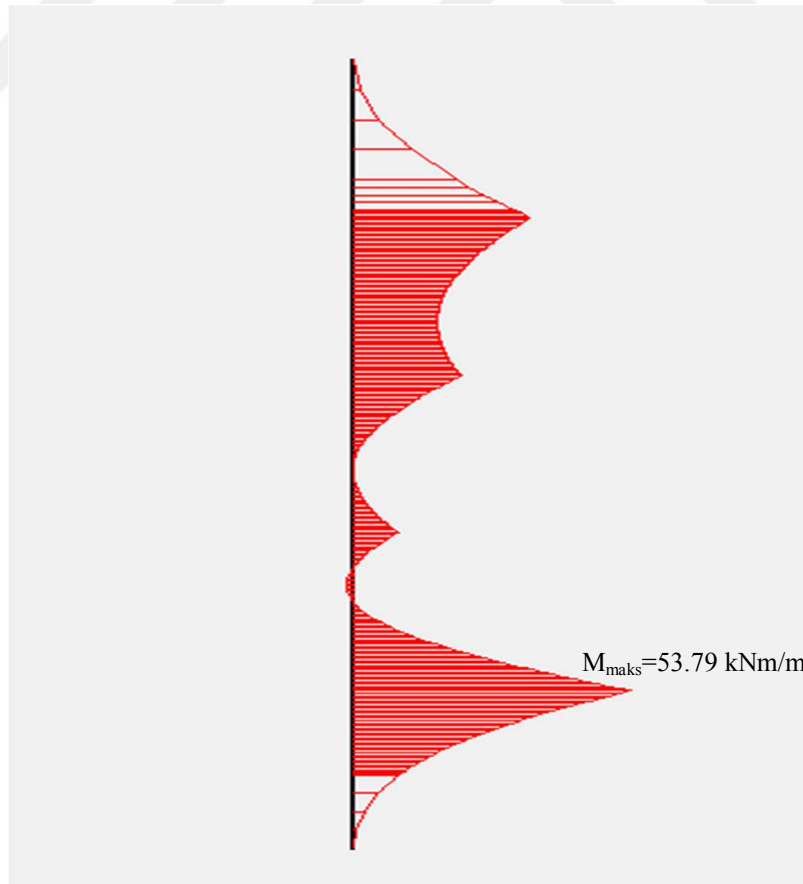
Ek Şekil 14.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 14.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

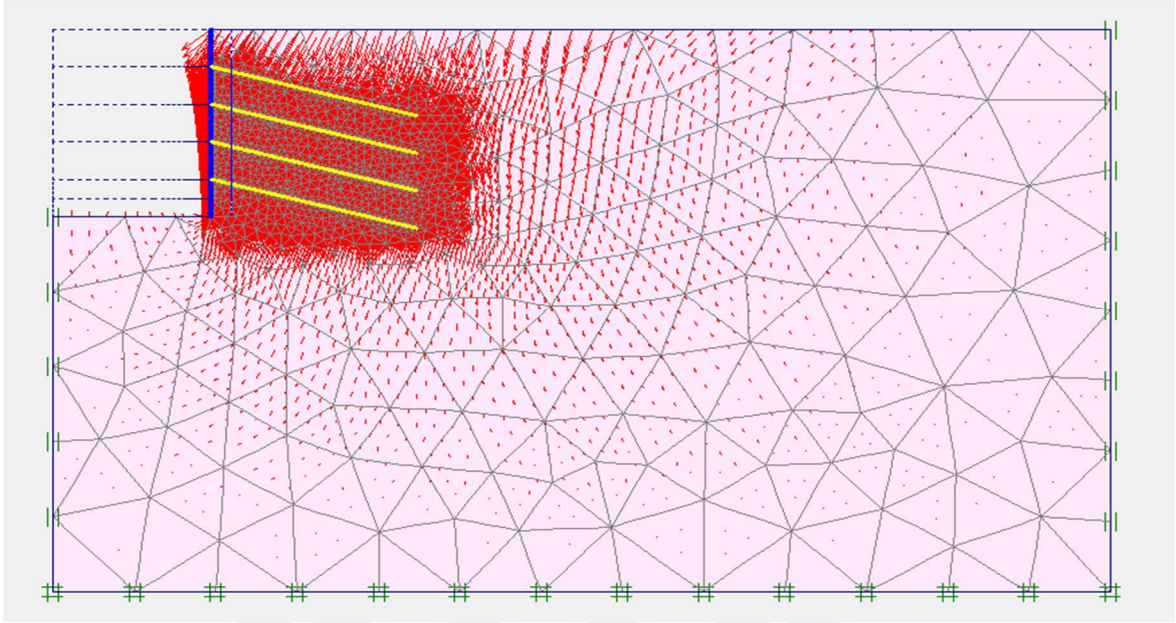


Ek Şekil 14.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



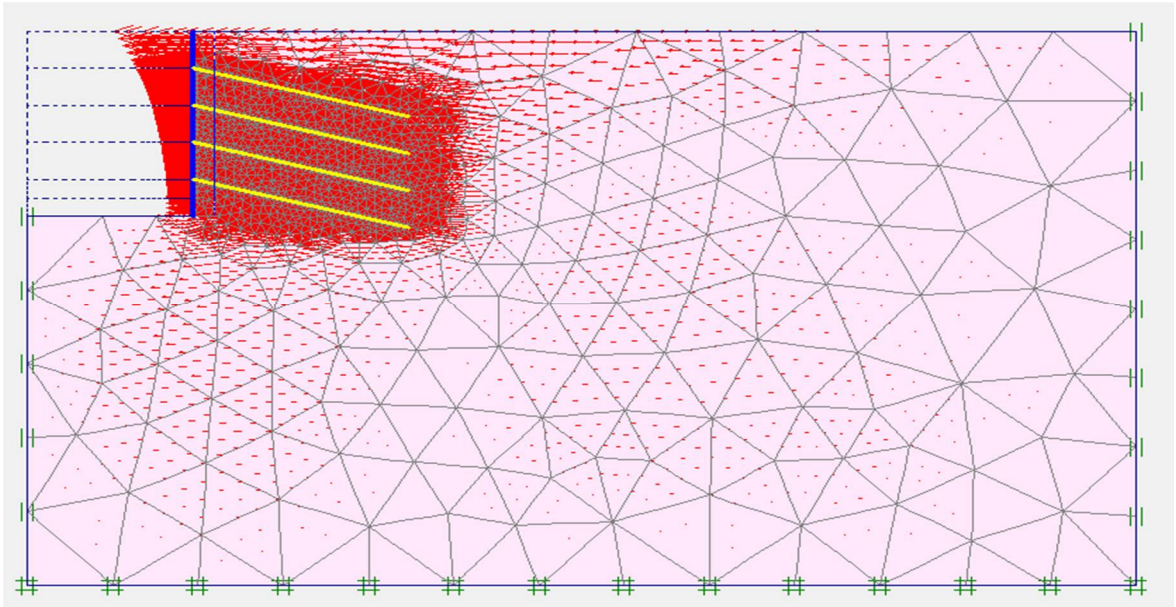
Ek Şekil 14.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 15. Dr=%65 Rölâtit Sıklıktaki Kum Zemin için Dört Zemin Çivili 100 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



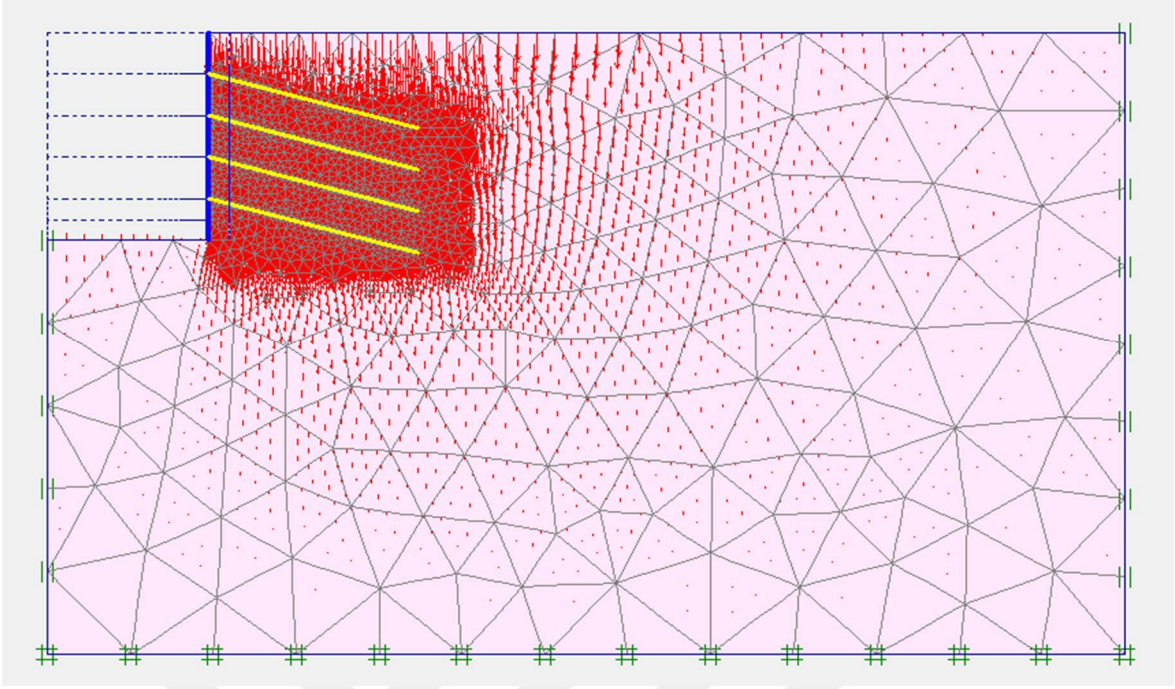
$$\delta_{\text{maksimum}} = 125.37 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 15.1. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



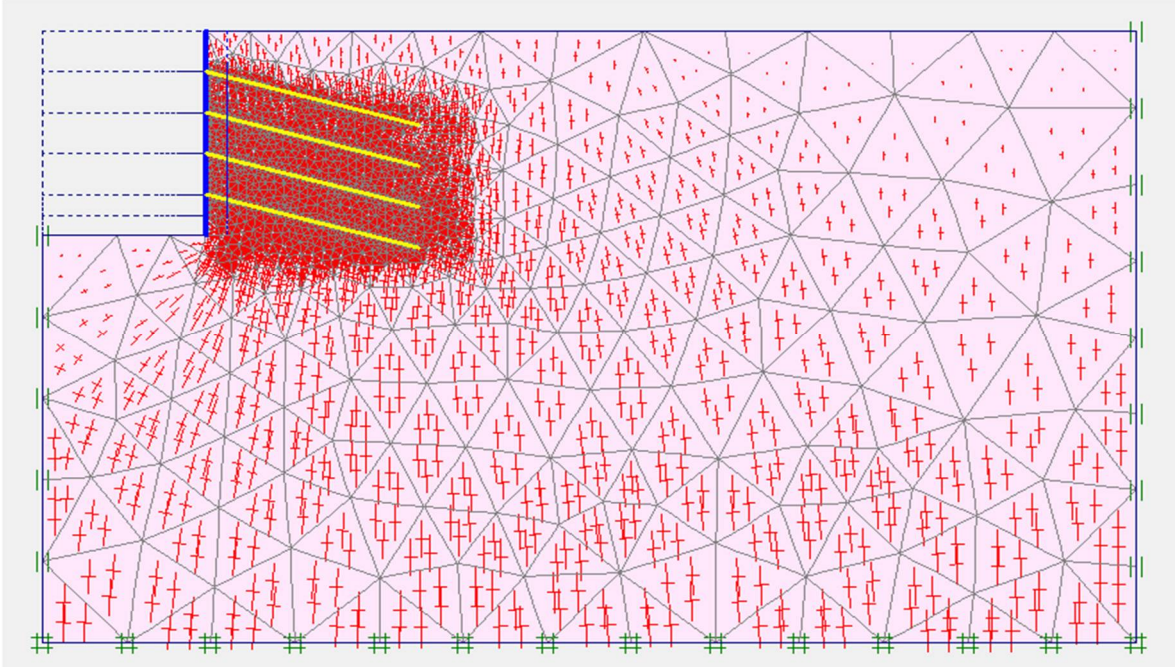
$$\delta_{\text{maksimum yatay}} = 72.48 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 15.2. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



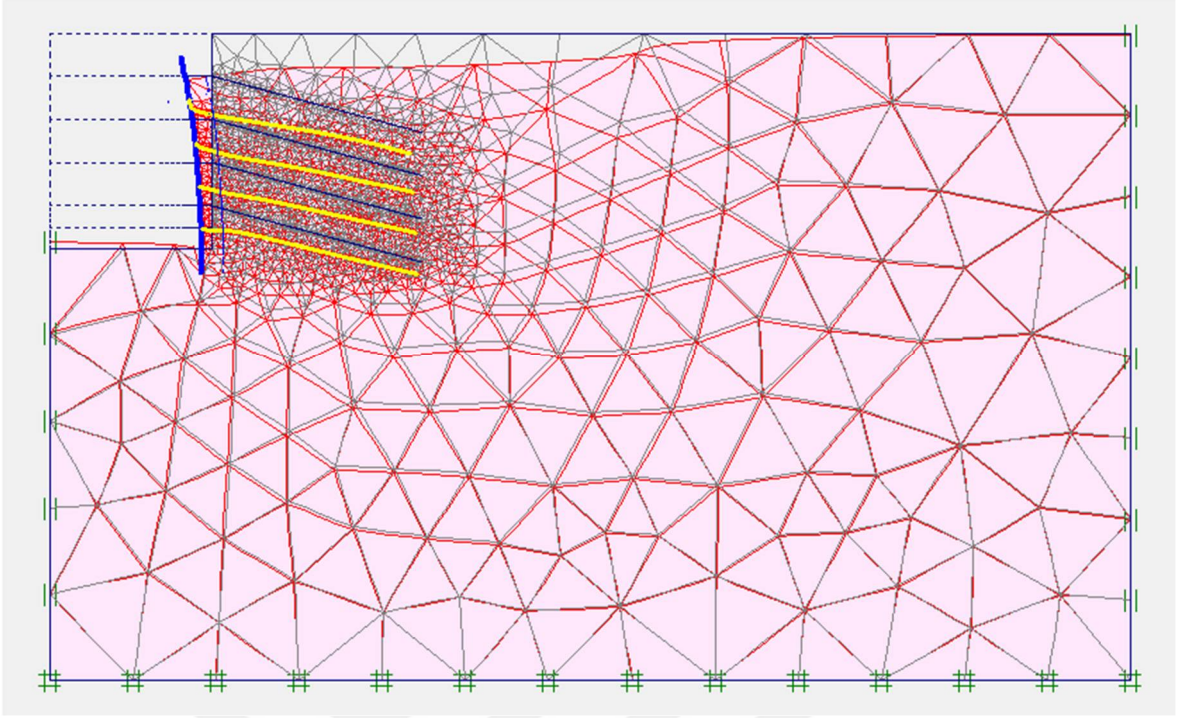
$$\delta_{\text{maksimum dusey}} = 108.76 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 15.3. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



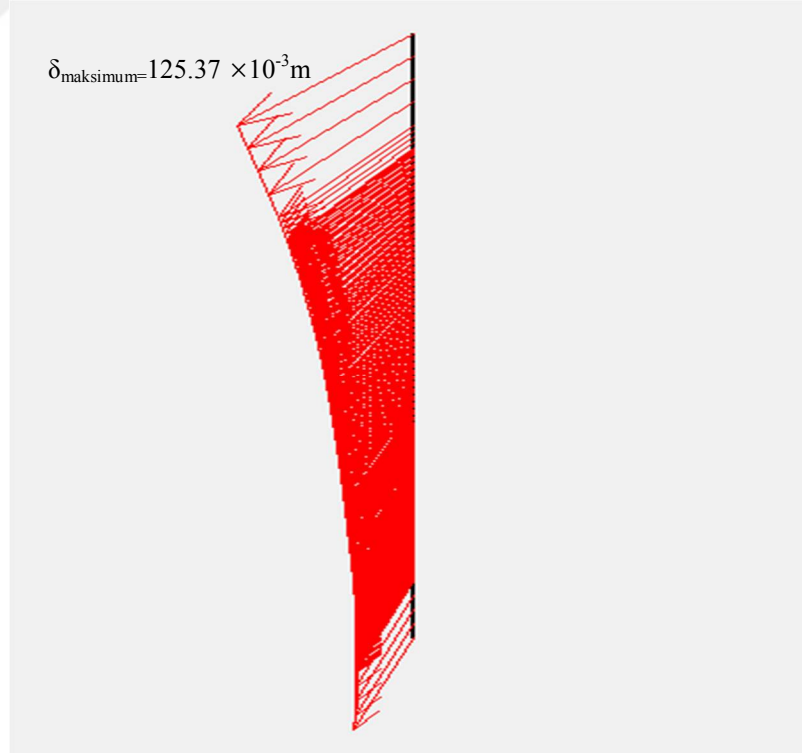
$$\text{Maksimum toplam gerilme } -1270 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 15.4. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değışimi

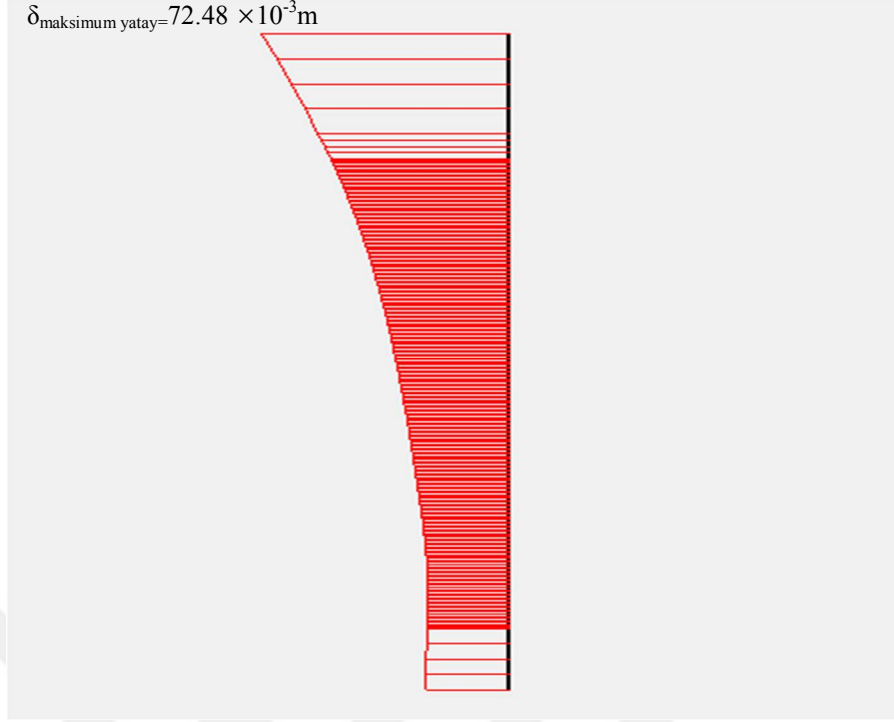


$$\delta_{\text{maksimum}}=125.37 \times 10^{-3} \text{ m}$$

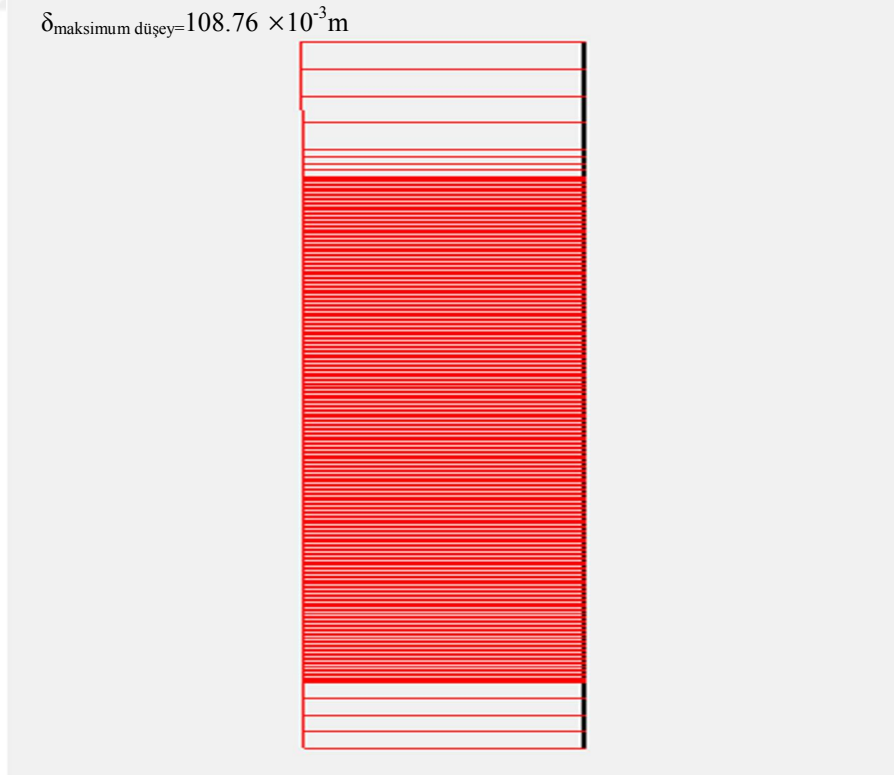
Ek Şekil 15.5. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



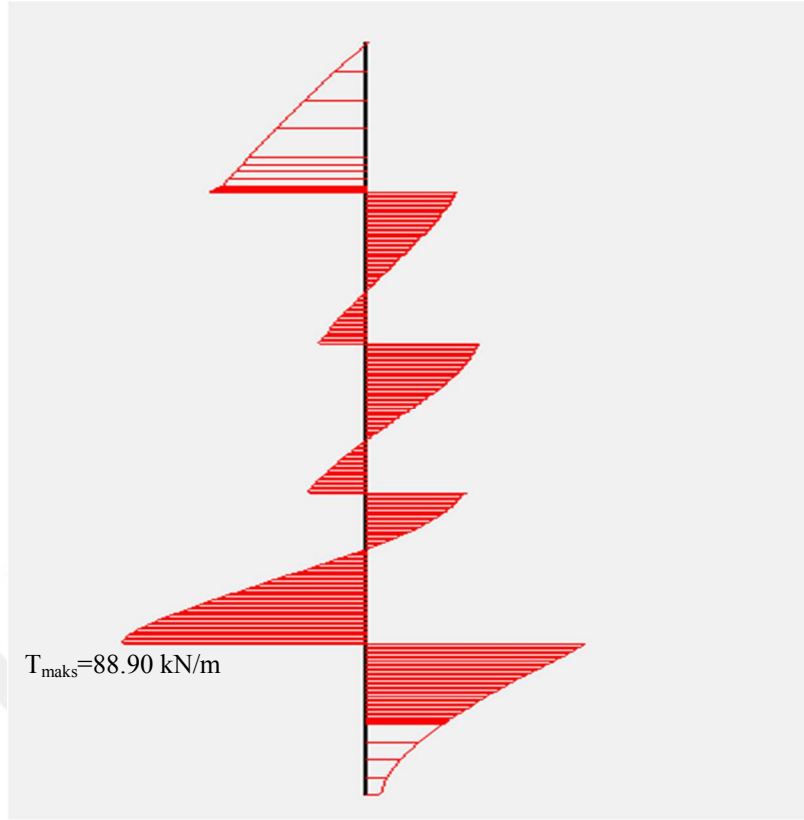
Ek Şekil 15.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



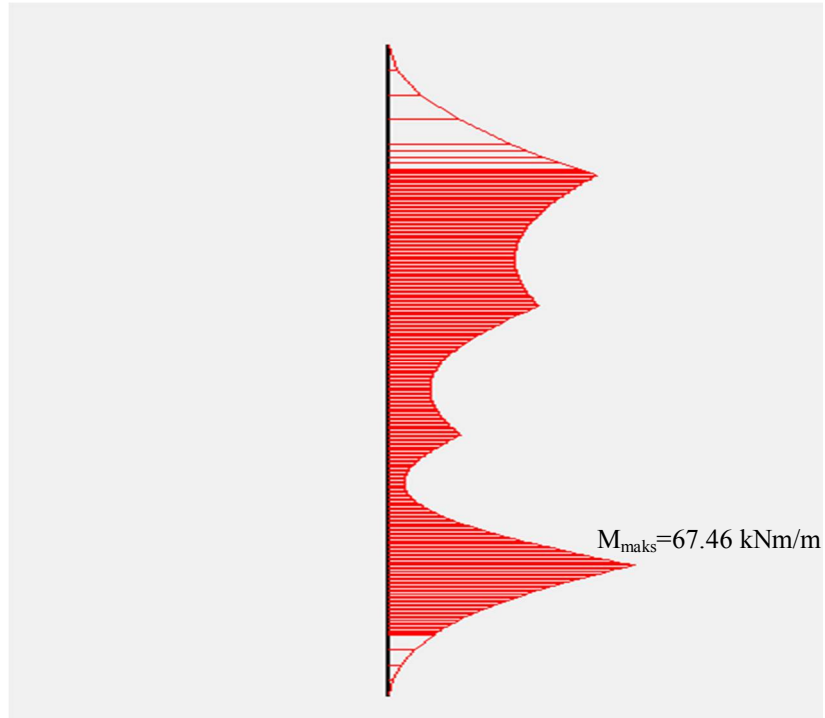
Ek Şekil 15.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 15.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

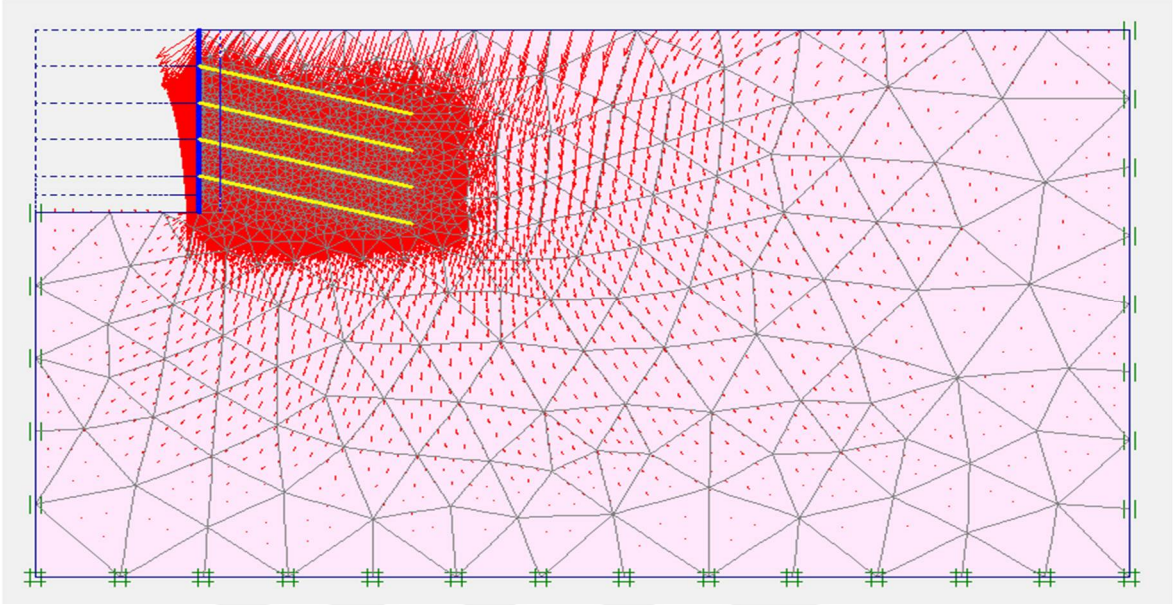


Ek Şekil 15.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



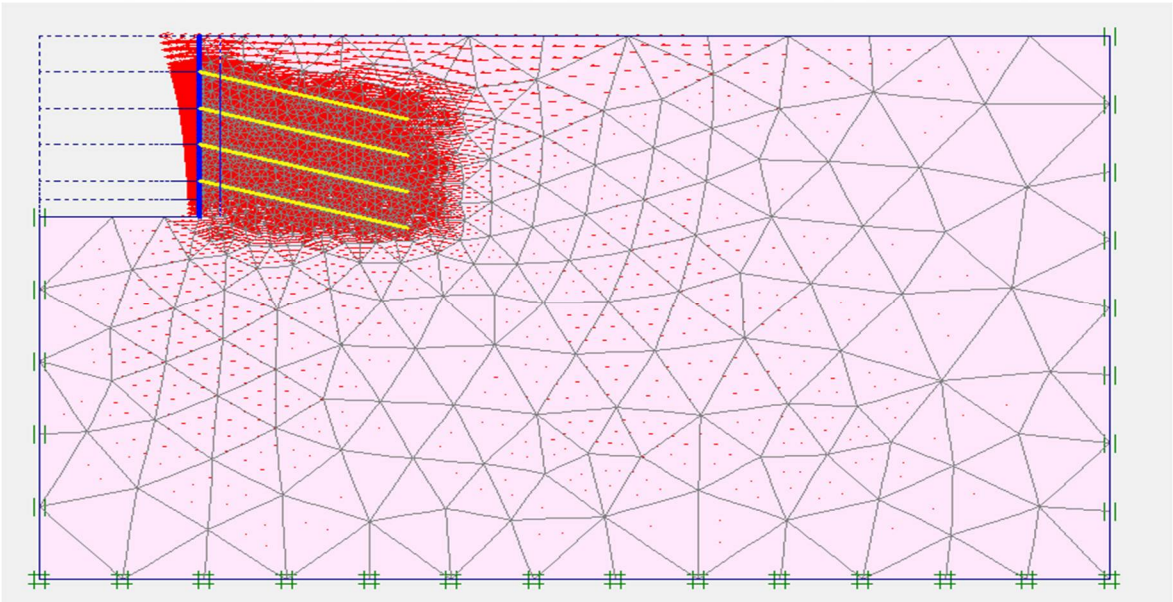
Ek Şekil 15.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 16. Dr=%65 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için Dört Zemin Çivili 150 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



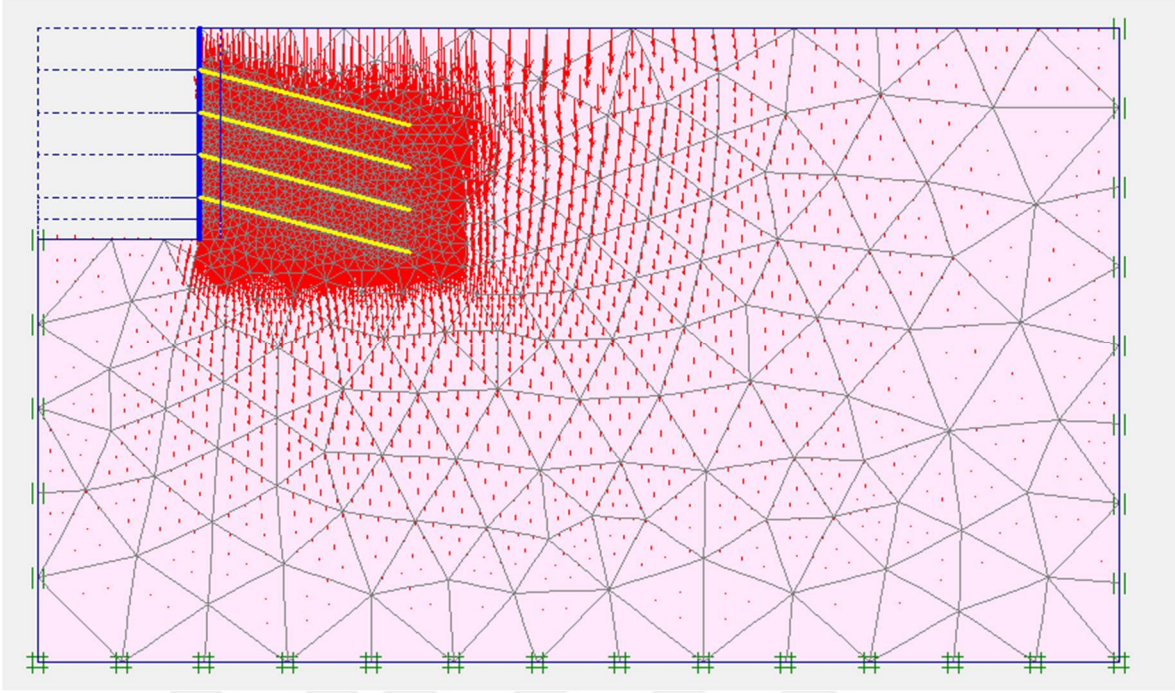
$$\delta_{\text{maksimum}} = 175.04 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 16.1. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



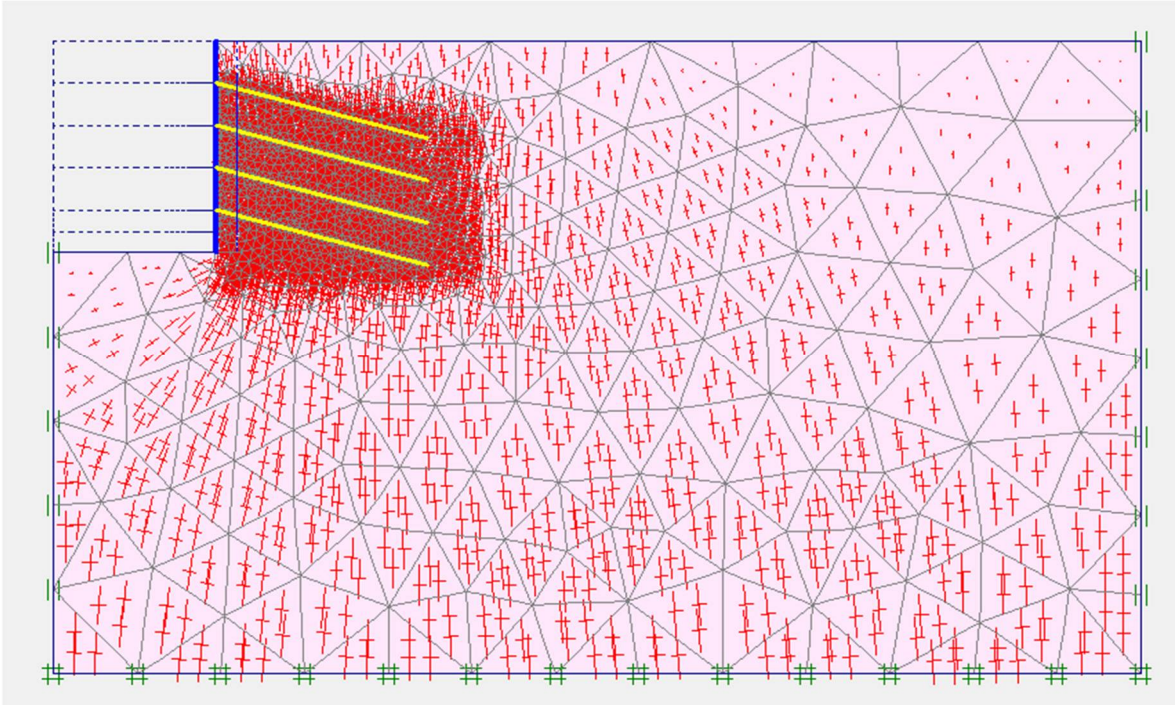
$$\delta_{\text{maksimum yatay}} = 100.73 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 16.2. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



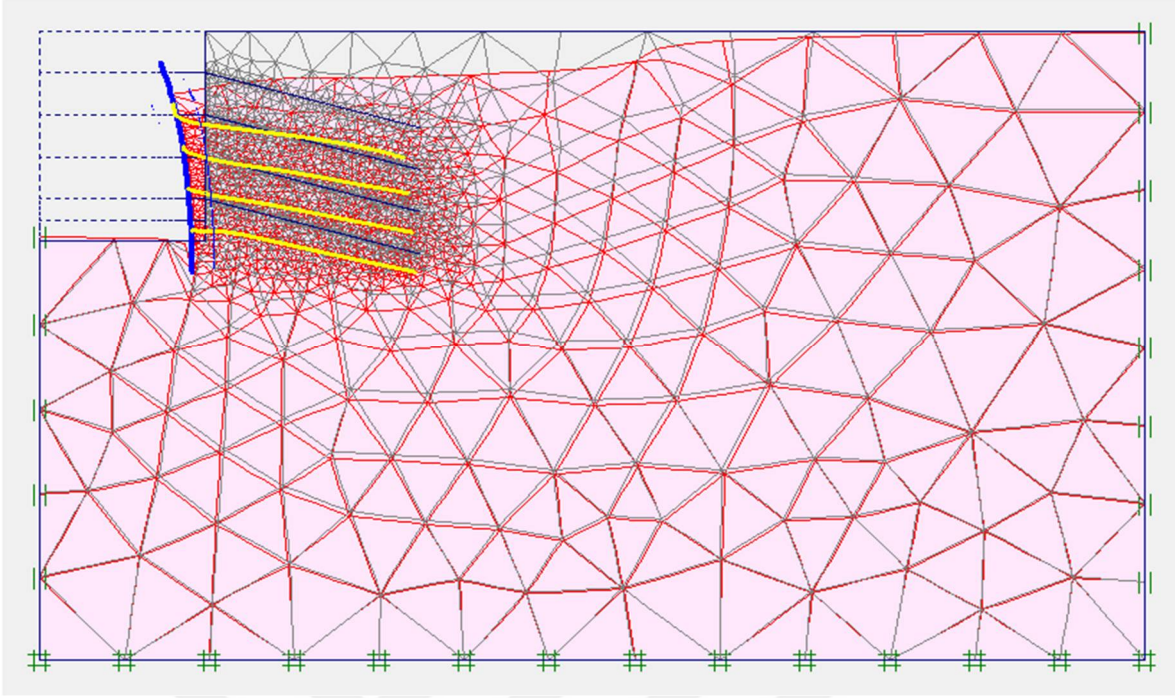
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 152.45 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 16.3. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



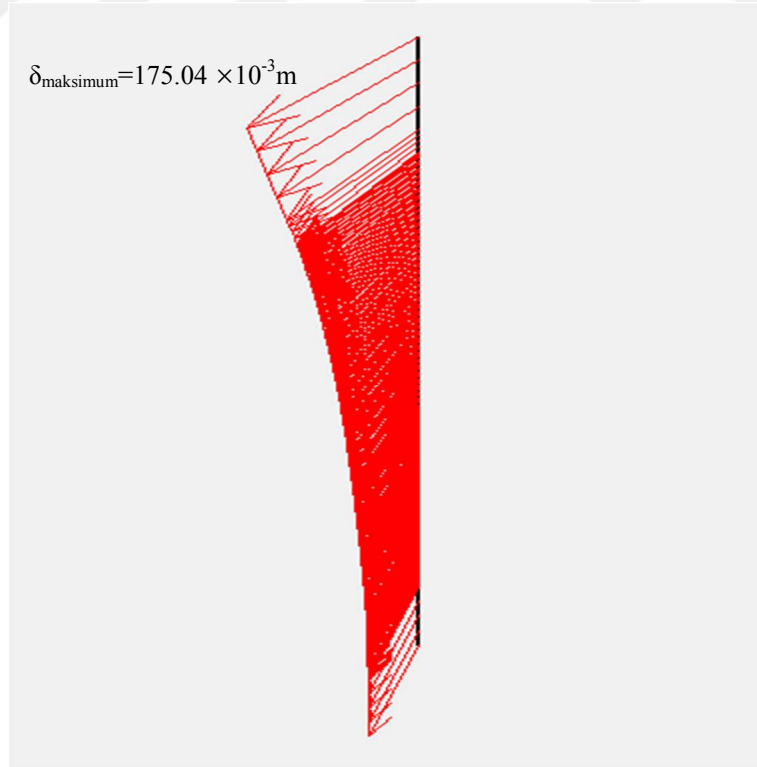
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -1530 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 16.4. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değışimi

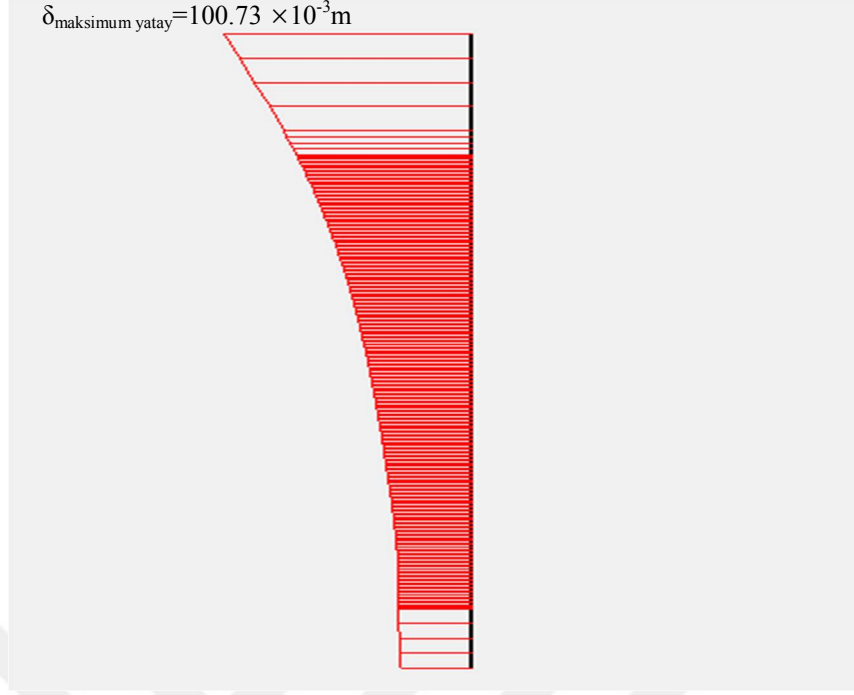


$$\delta_{\text{maksimum}}=175.04 \times 10^{-3} \text{m}$$

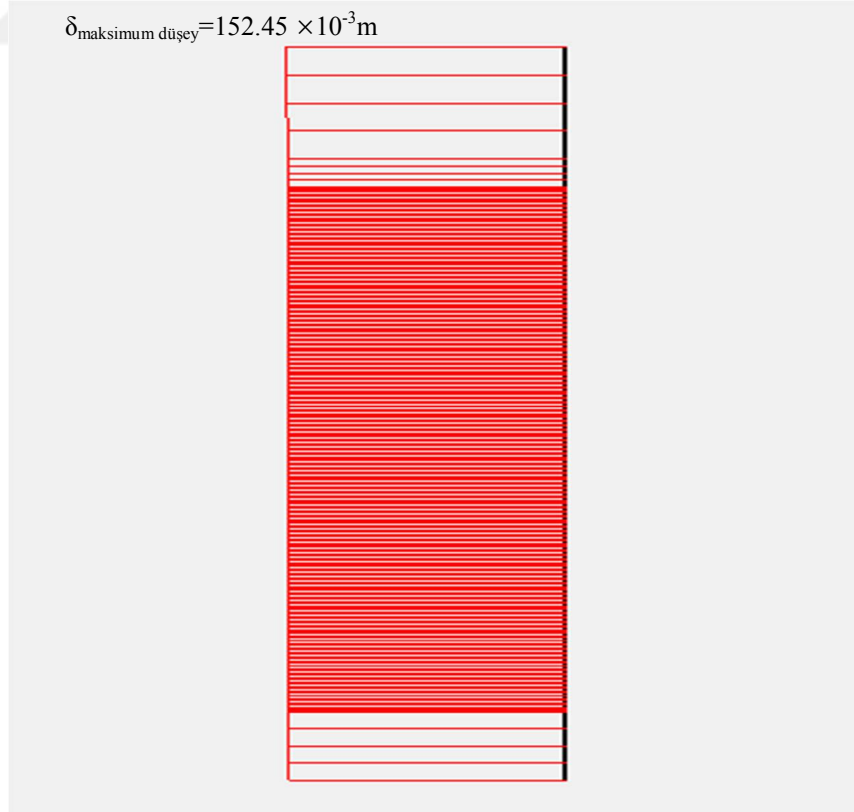
Ek Şekil 16.5. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



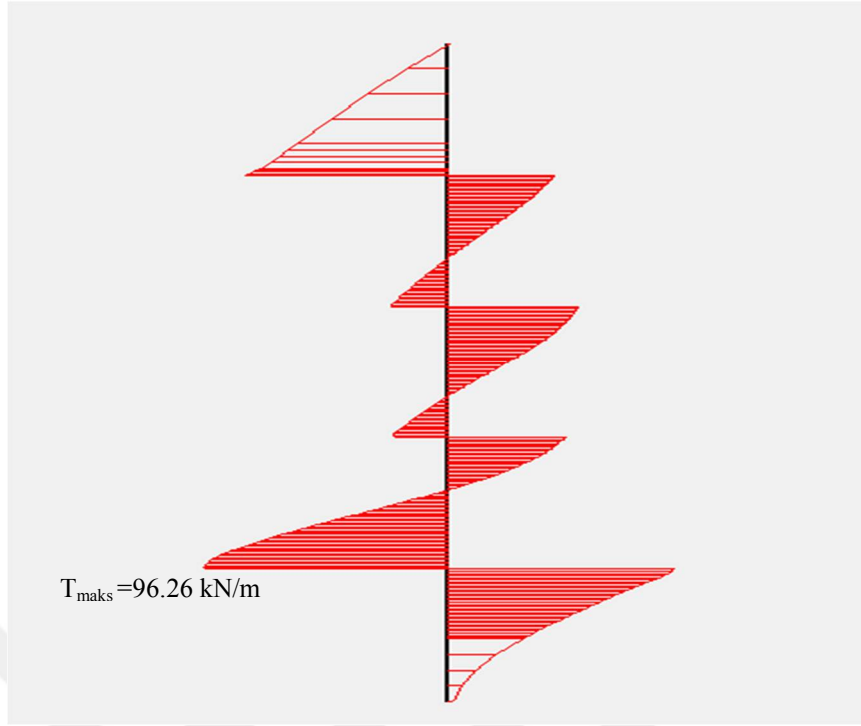
Ek Şekil 16.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



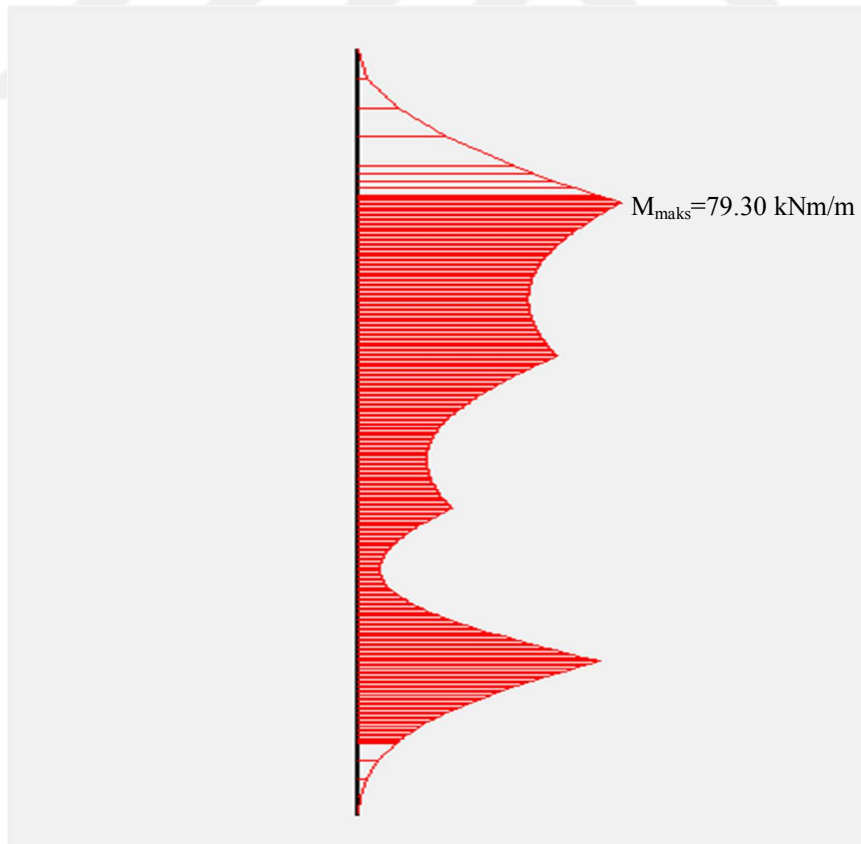
Ek Şekil 16.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 16.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

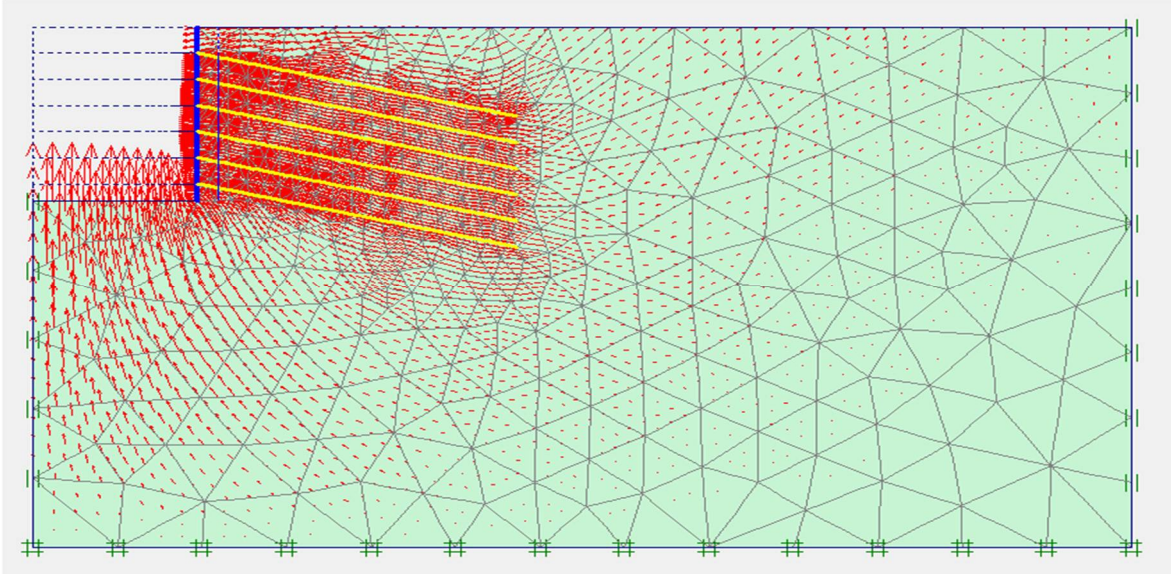


Ek Şekil 16.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



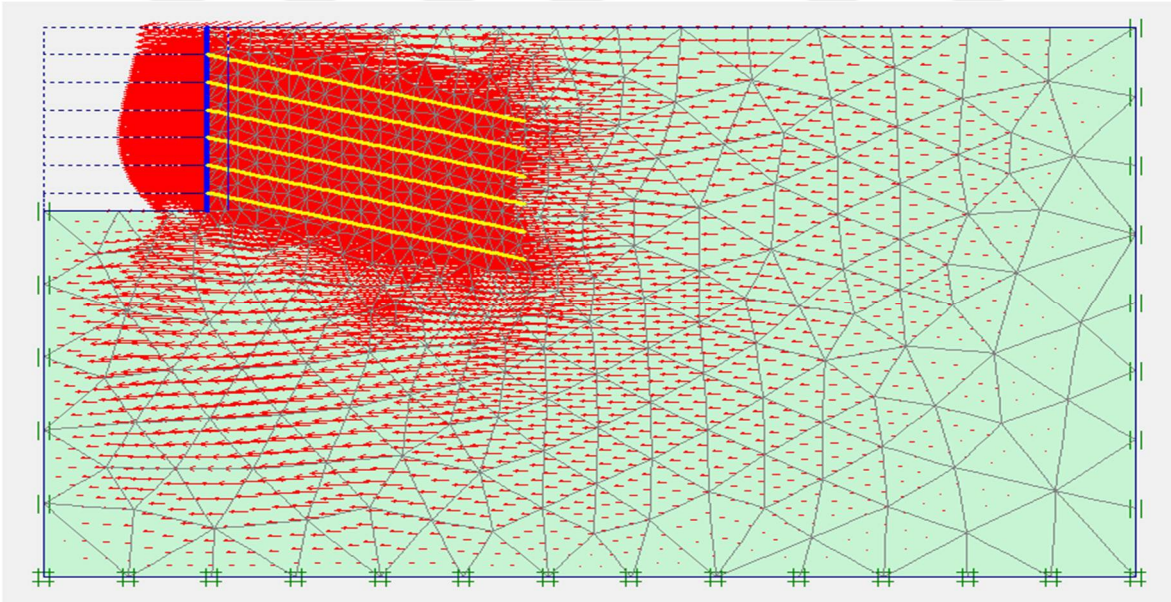
Ek Şekil 16.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 17. Dr=%35 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için Altı Zemin Çivili 0 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



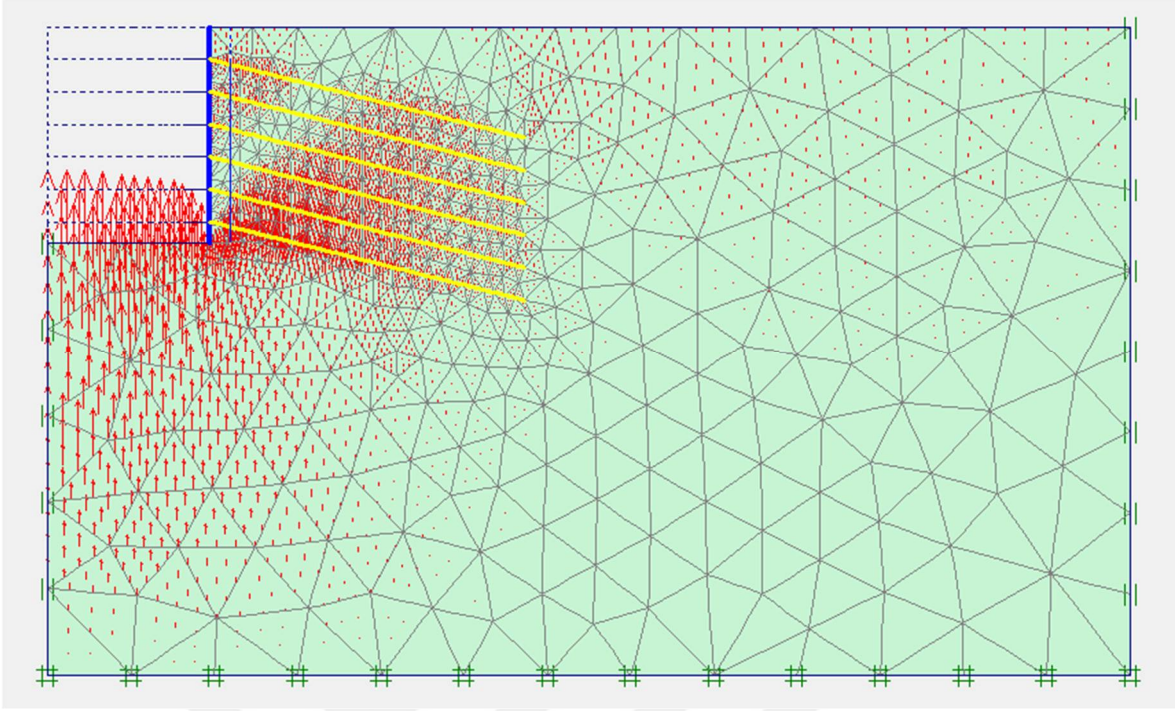
$$\delta_{\text{maksimum}}=33.97 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 17.1. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



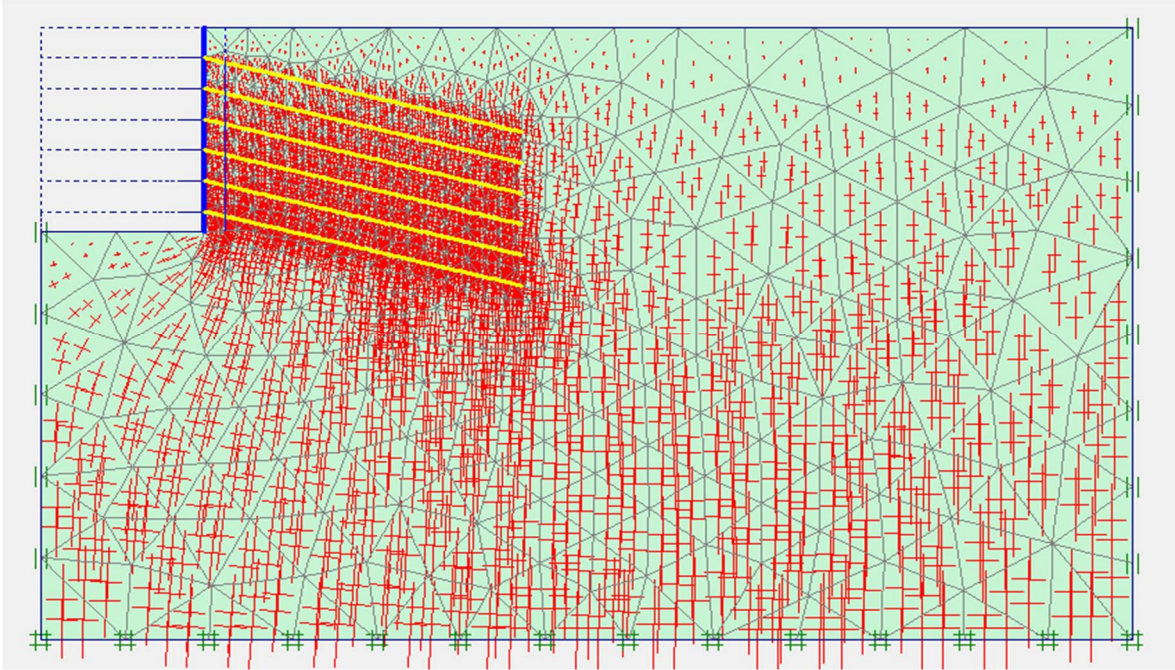
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}=8.26 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 17.2. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



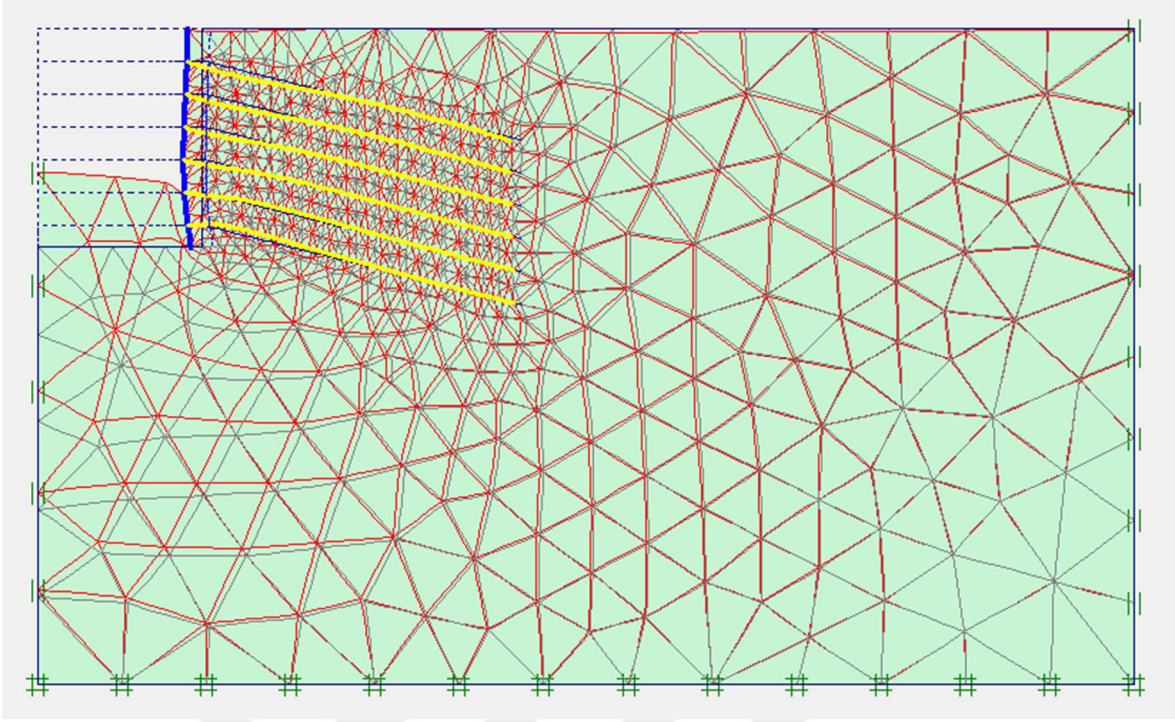
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 33.97 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 17.3. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



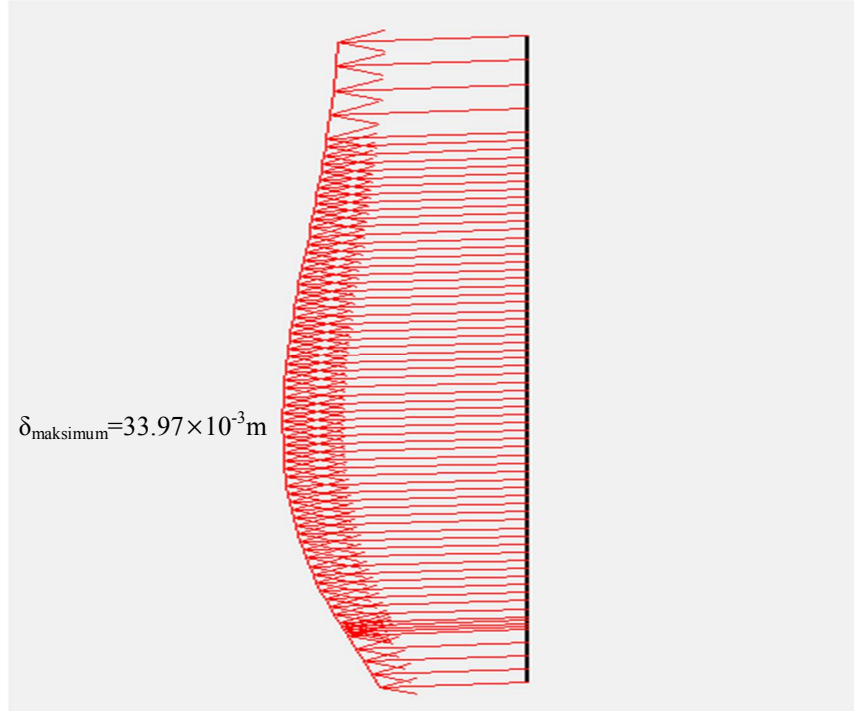
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -458.28 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 17.4. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi



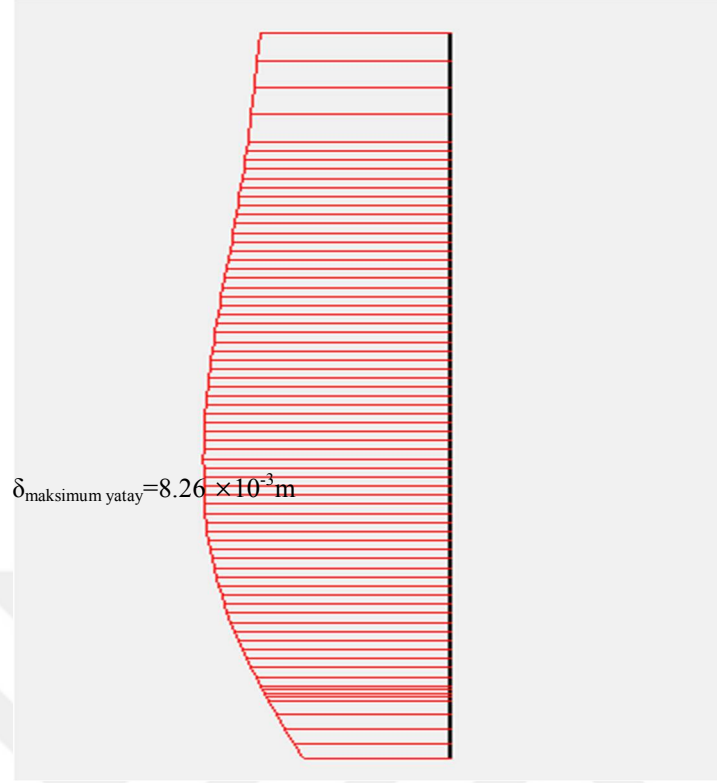
$$\delta_{\text{maksimum}} = 33.97 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 17.5. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler

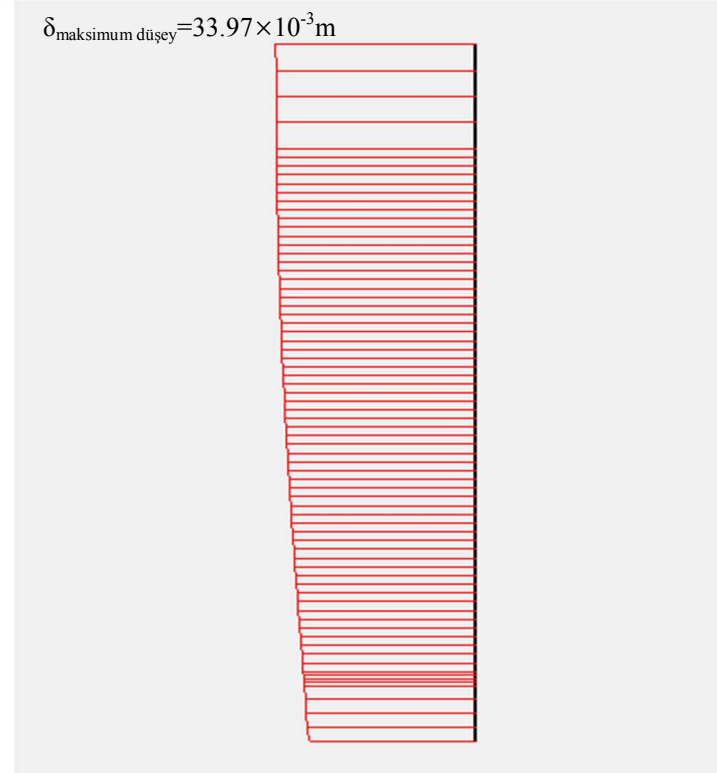


$$\delta_{\text{maksimum}} = 33.97 \times 10^{-3} \text{ m}$$

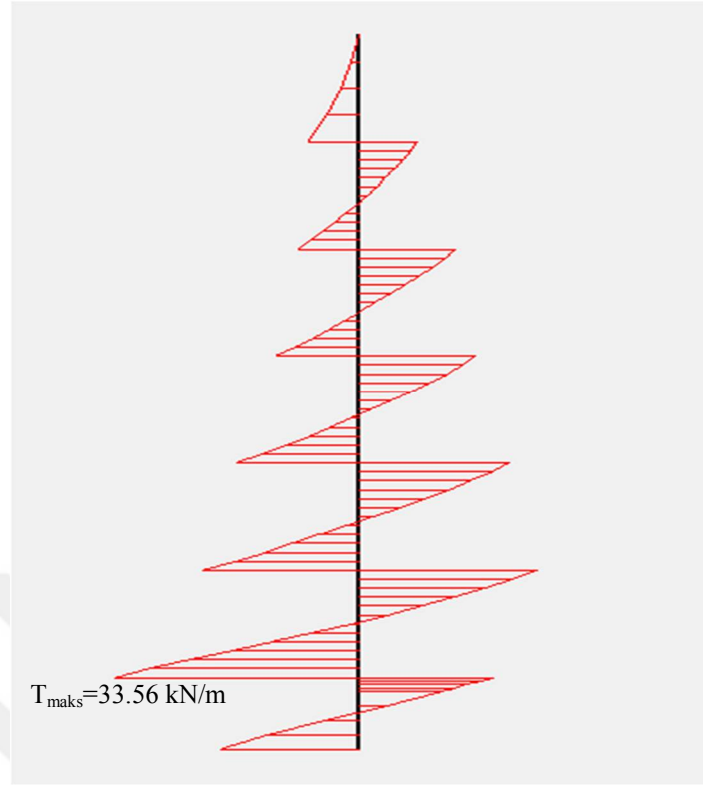
Ek Şekil 17.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



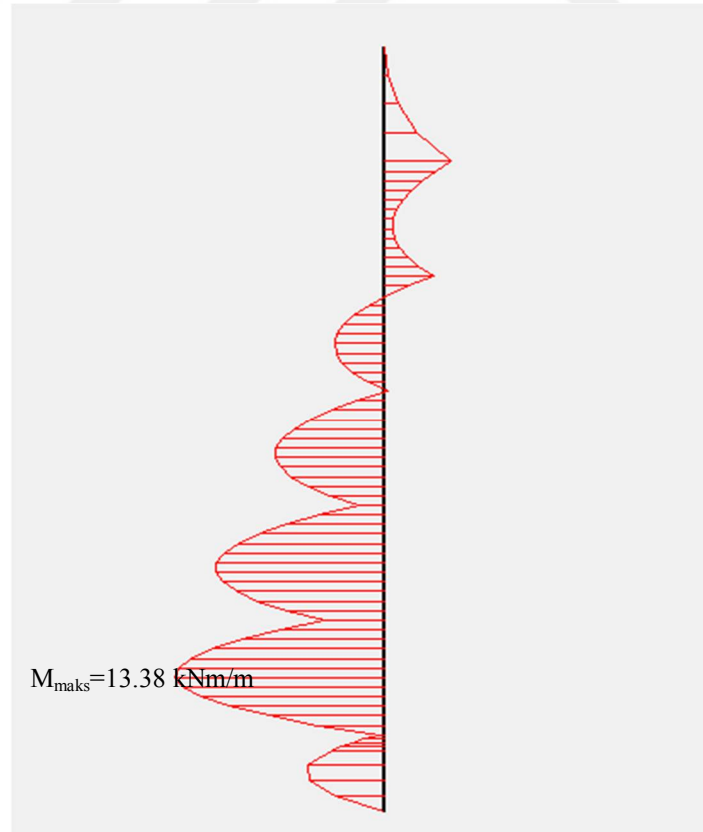
Ek Şekil 17.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 17.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

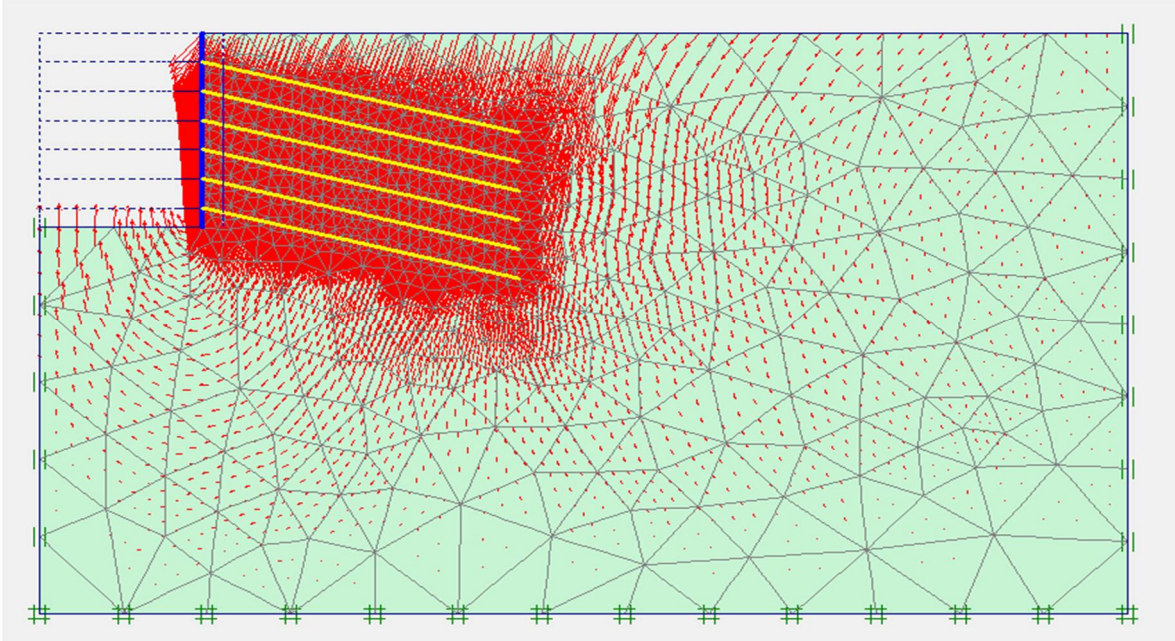


Ek Şekil 17.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



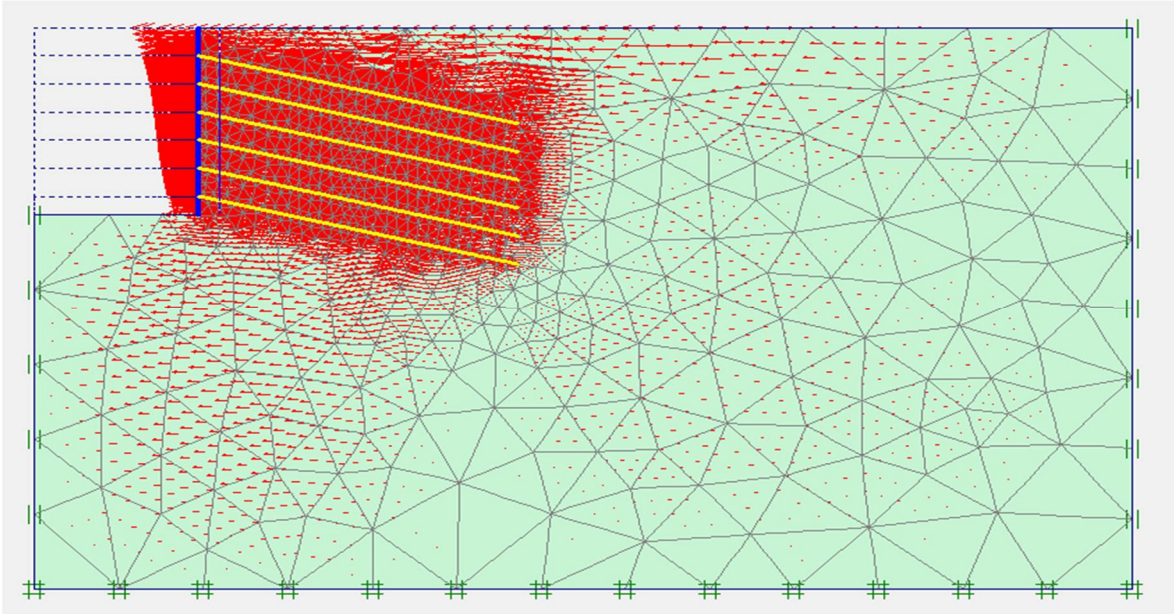
Ek Şekil 17.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 18. Dr=%35 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için Altı Zemin Çivili 50 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



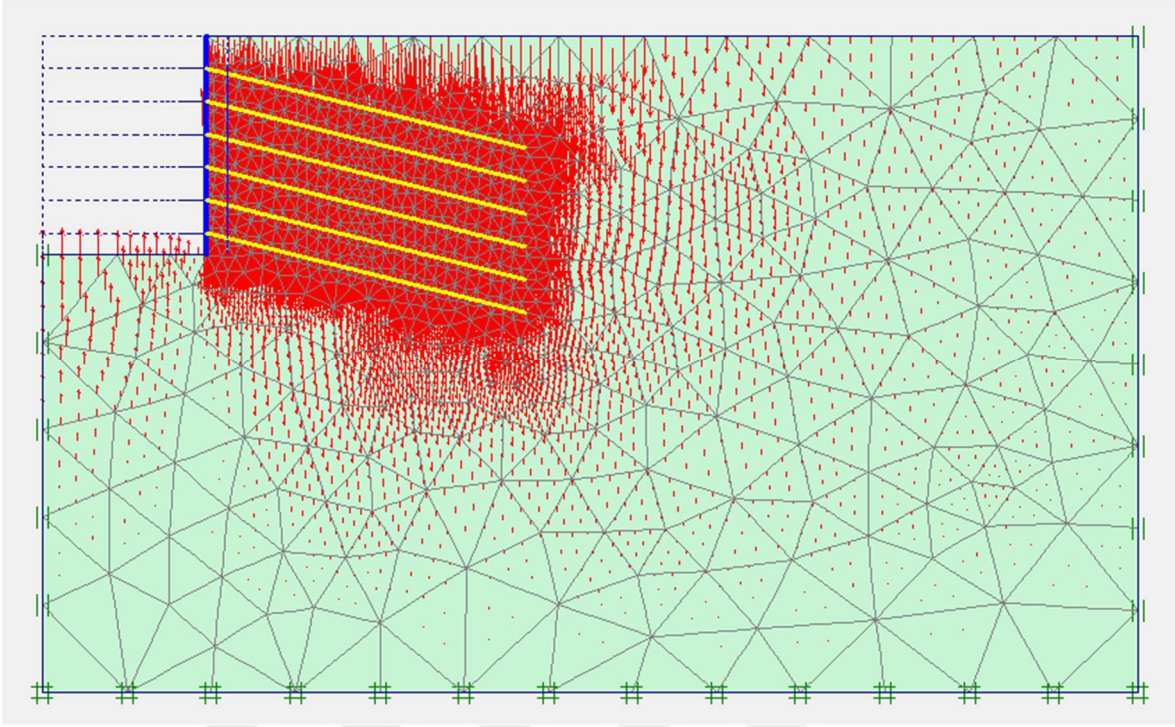
$$\delta_{\text{maksimum}}=70.58 \times 10^{-3}\text{m}$$

Ek Şekil 18.1. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



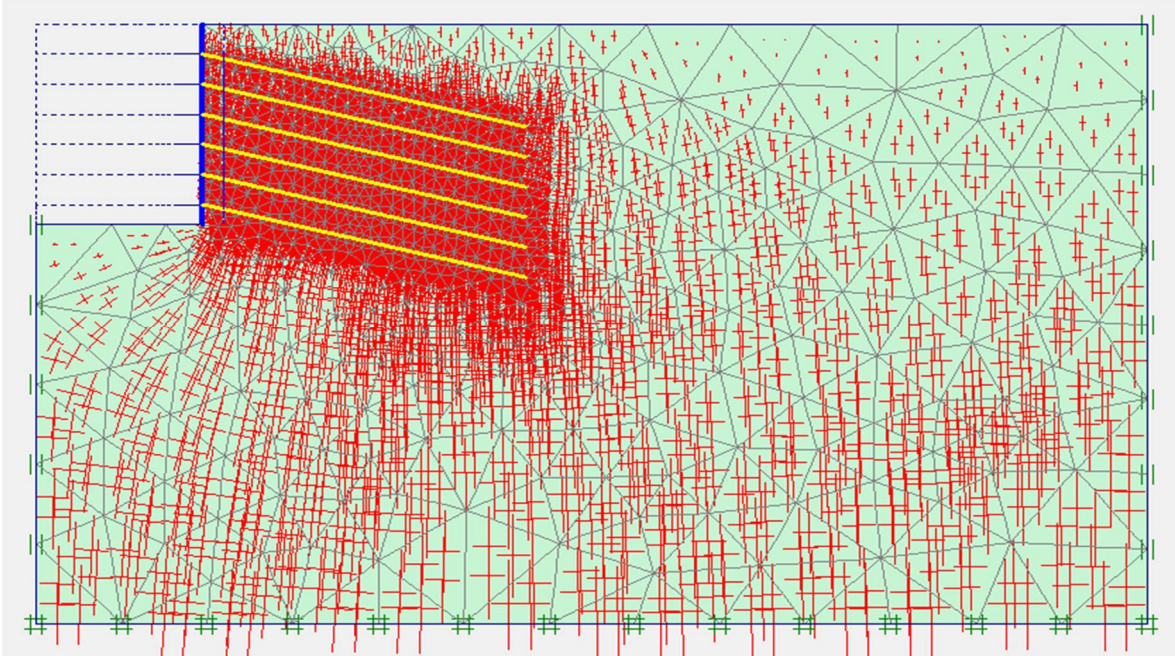
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}=31.19 \times 10^{-3}\text{m}$$

Ek Şekil 18.2. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



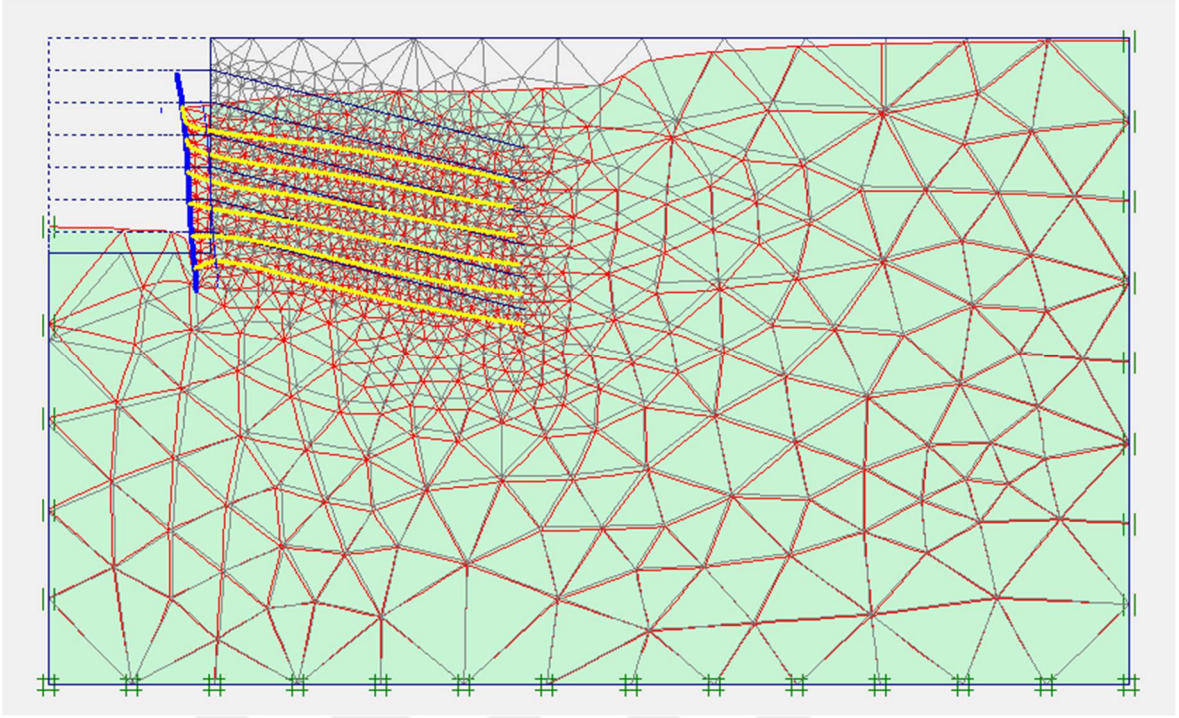
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 65.27 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 18.3. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



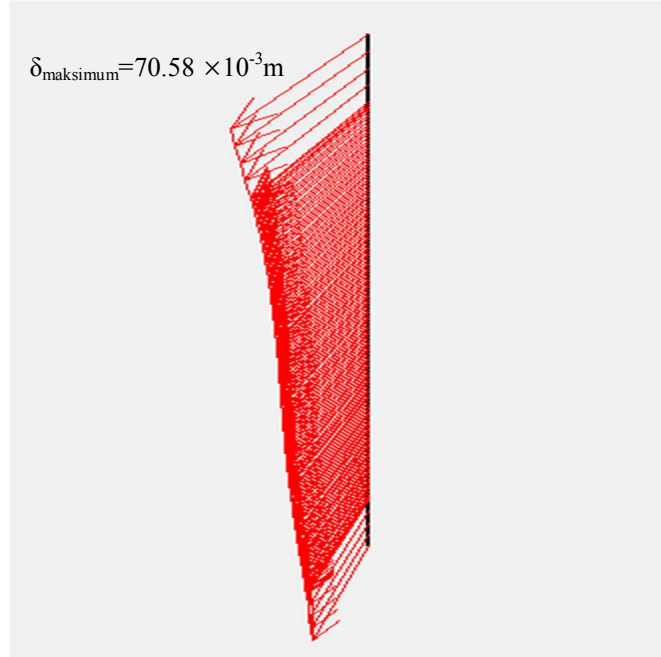
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -538.39 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 18.4. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi



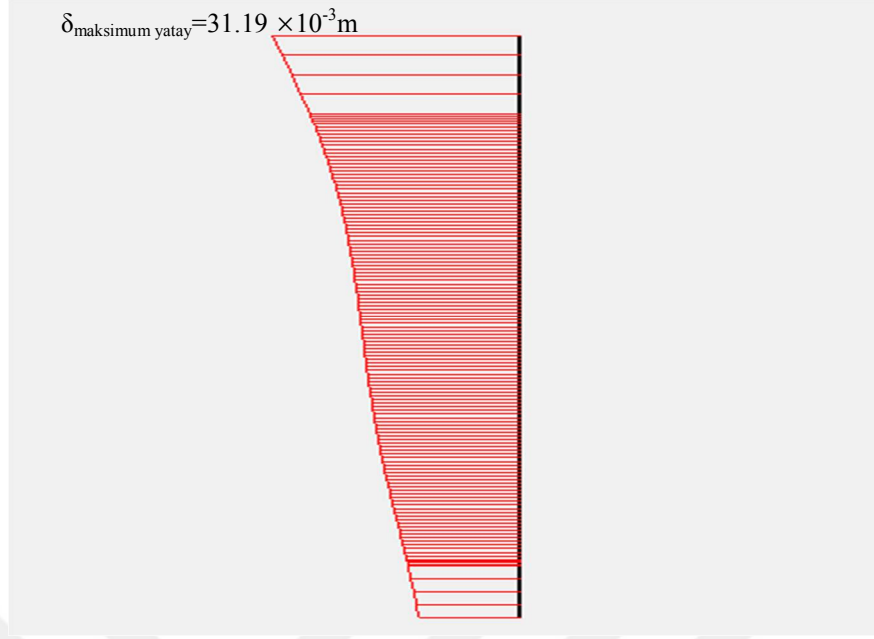
$$\delta_{\text{maksimum}}=70.58 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 18.5. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler

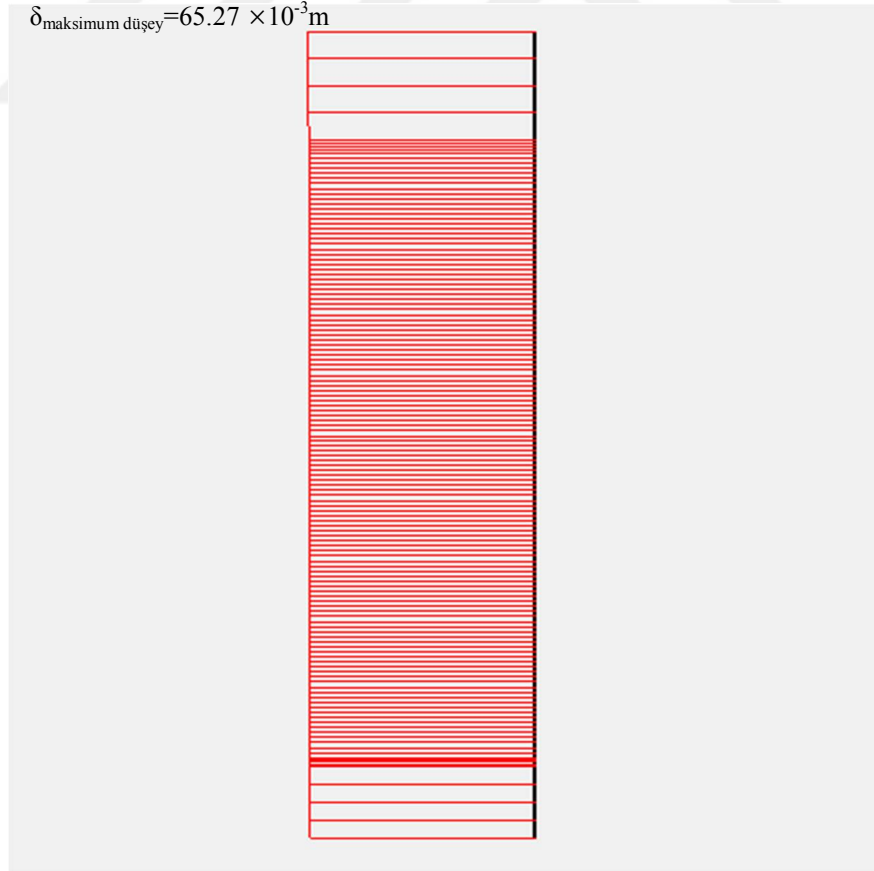


$$\delta_{\text{maksimum}}=70.58 \times 10^{-3} \text{m}$$

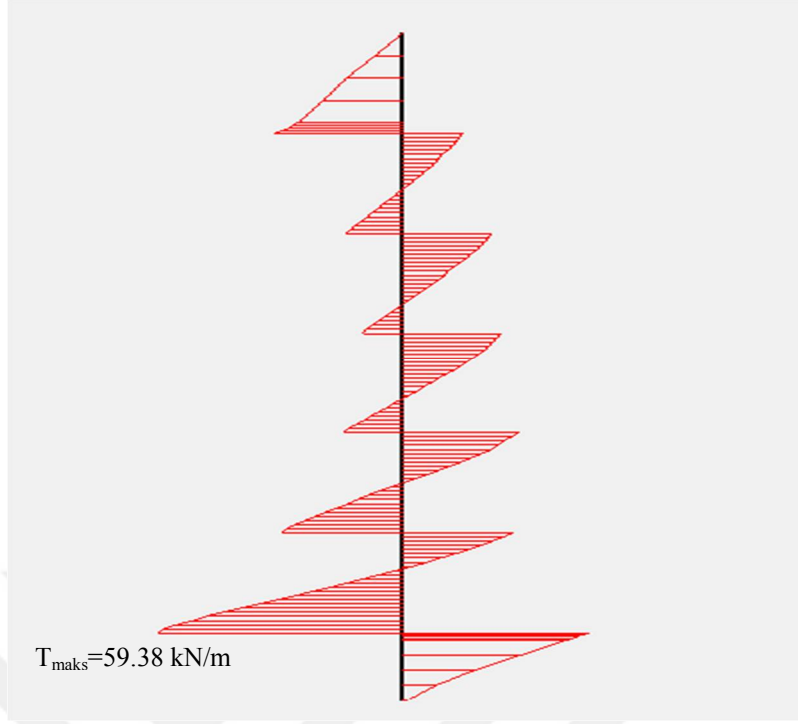
Ek Şekil 18.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



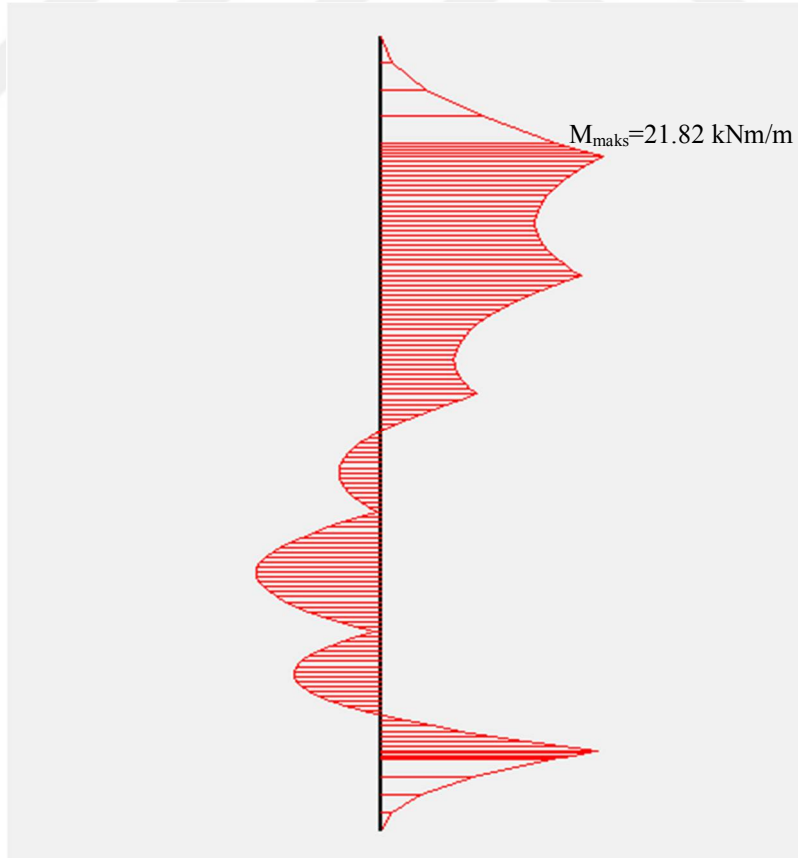
Ek Şekil 18.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 18.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

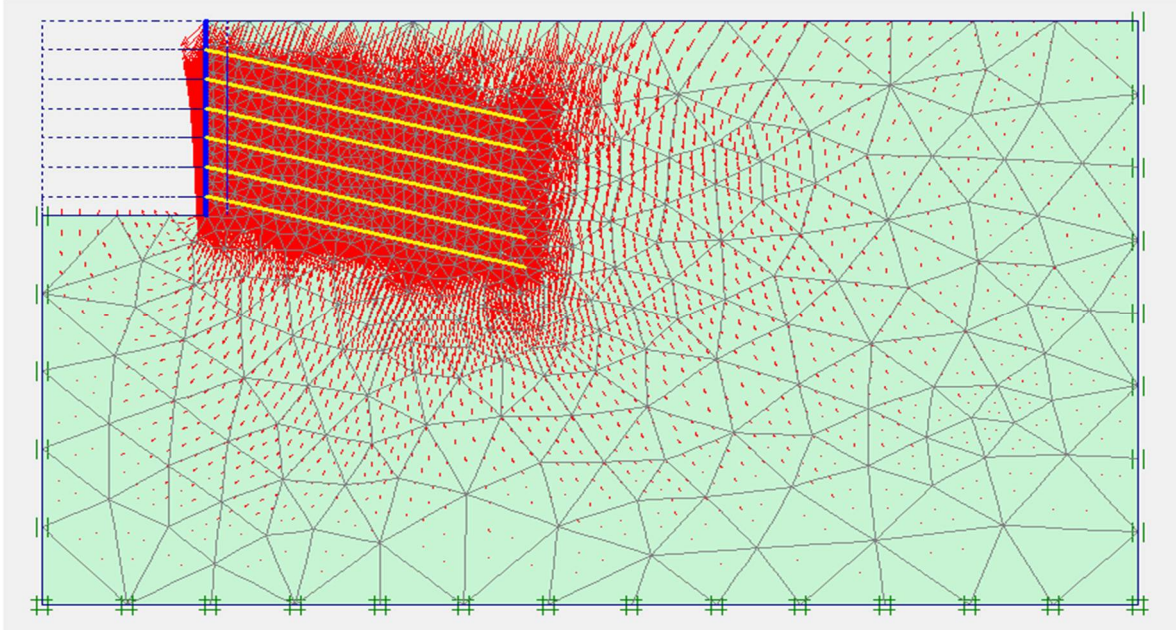


Ek Şekil 18.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



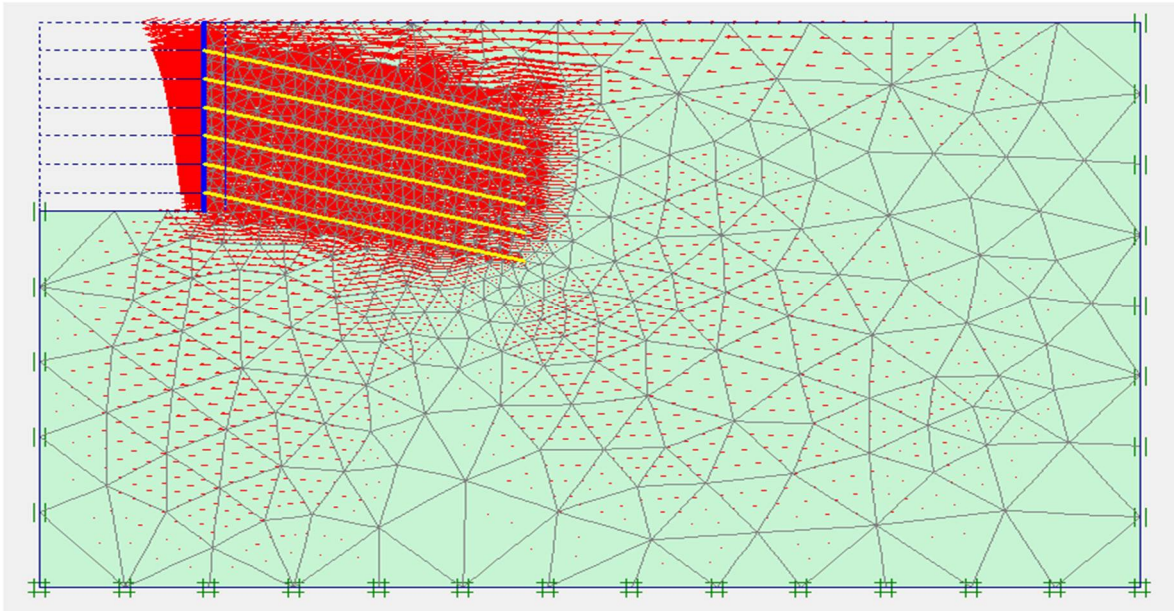
Ek Şekil 18.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 19. $D_r=35\%$ Rölafif Sıklıktaki Kum Zemin için Altı Zemin Çivili 100 kN/m^2 Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



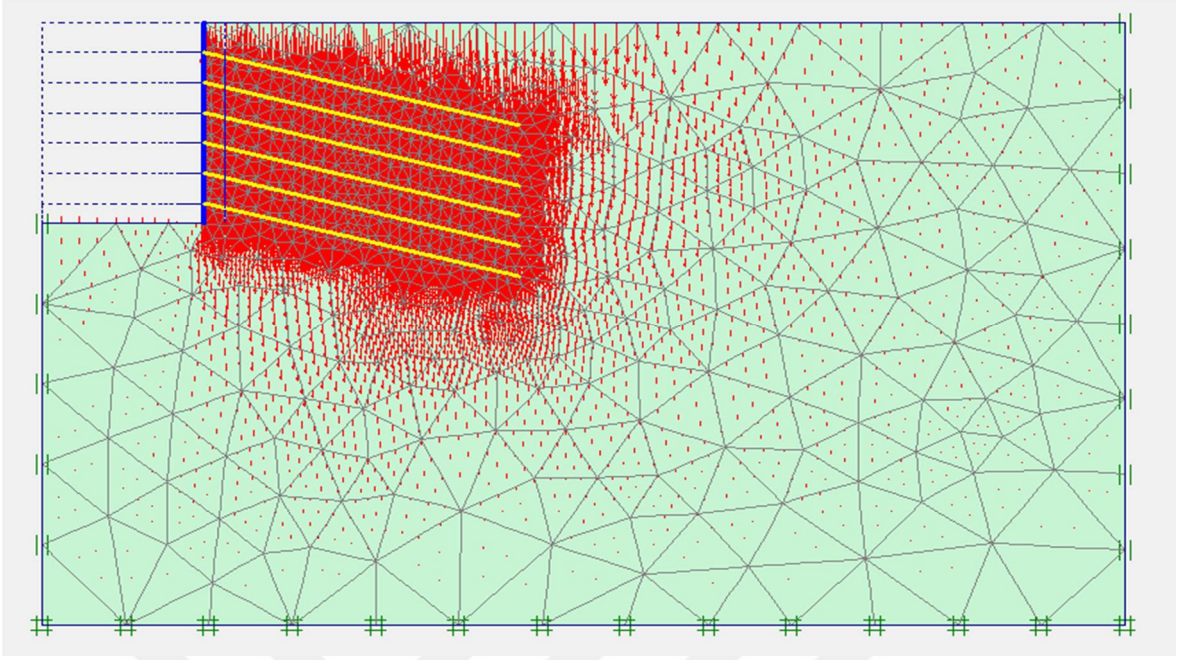
$$\delta_{\text{maksimum}}=135.42 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 19.1. 100 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiftirme miktarı



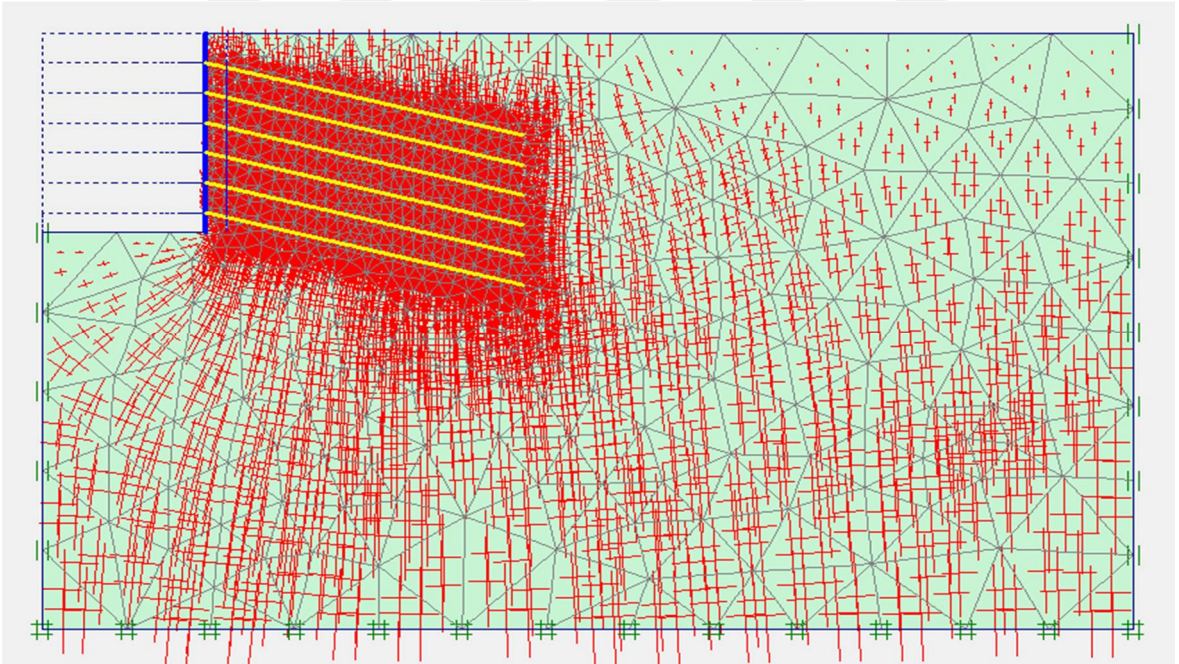
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}=59.38 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 19.2. 100 kN/m^2 Yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiftirme miktarı



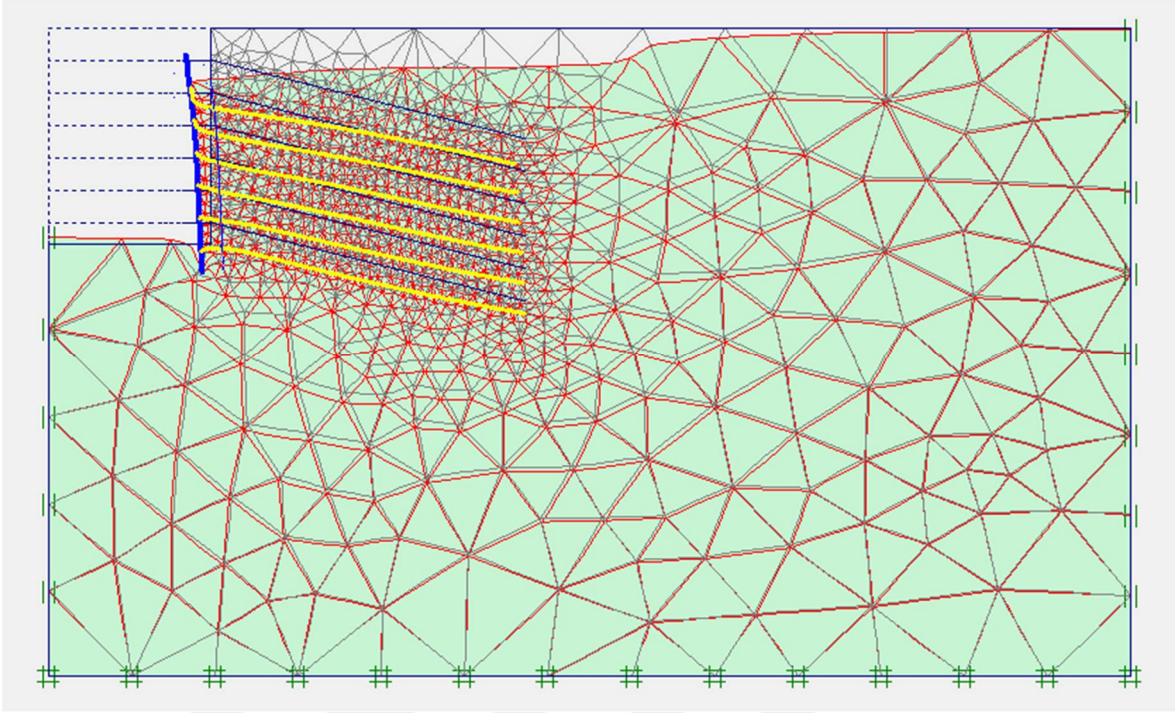
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 125.64 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 19.3. 100 kN/m² Yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



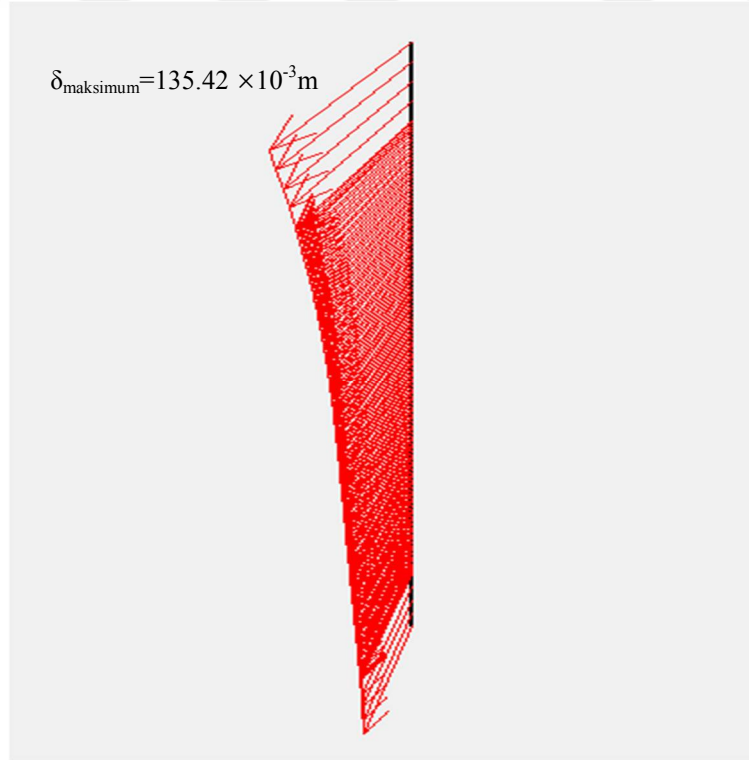
$$\text{Maksimum toplam gerilmeler} = -668.35 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 19.4. 100 kN/m² Yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi



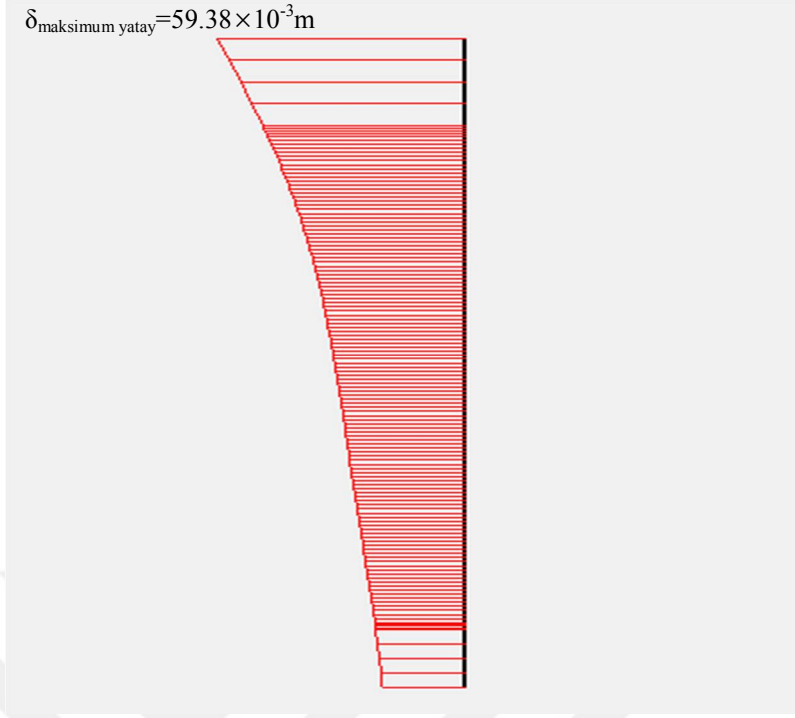
$$\delta_{\text{maksimum}}=135.42 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 19.5. 100 kN/m^2 Yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler

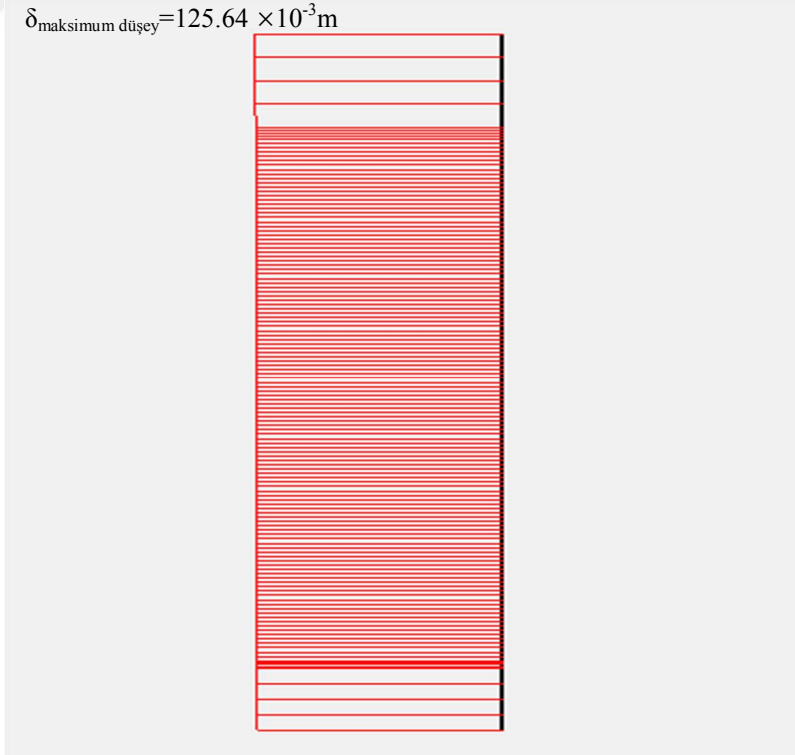


$$\delta_{\text{maksimum}}=135.42 \times 10^{-3} \text{ m}$$

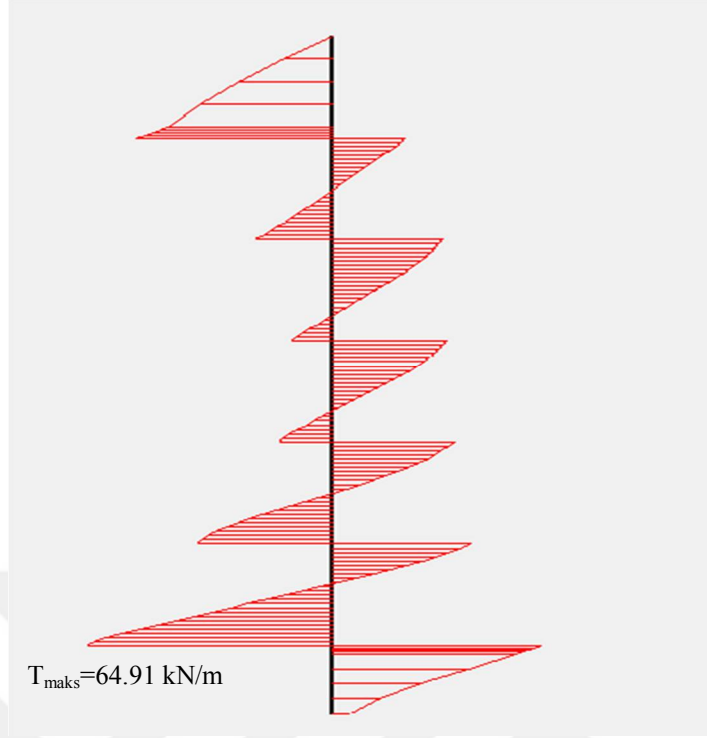
Ek Şekil 19.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



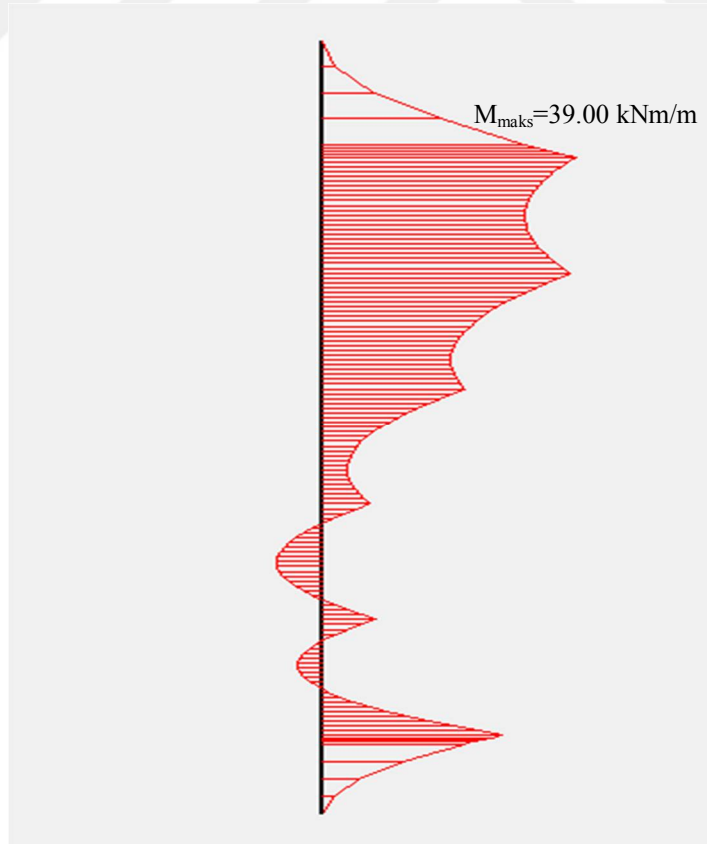
Ek Şekil 19.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 19.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

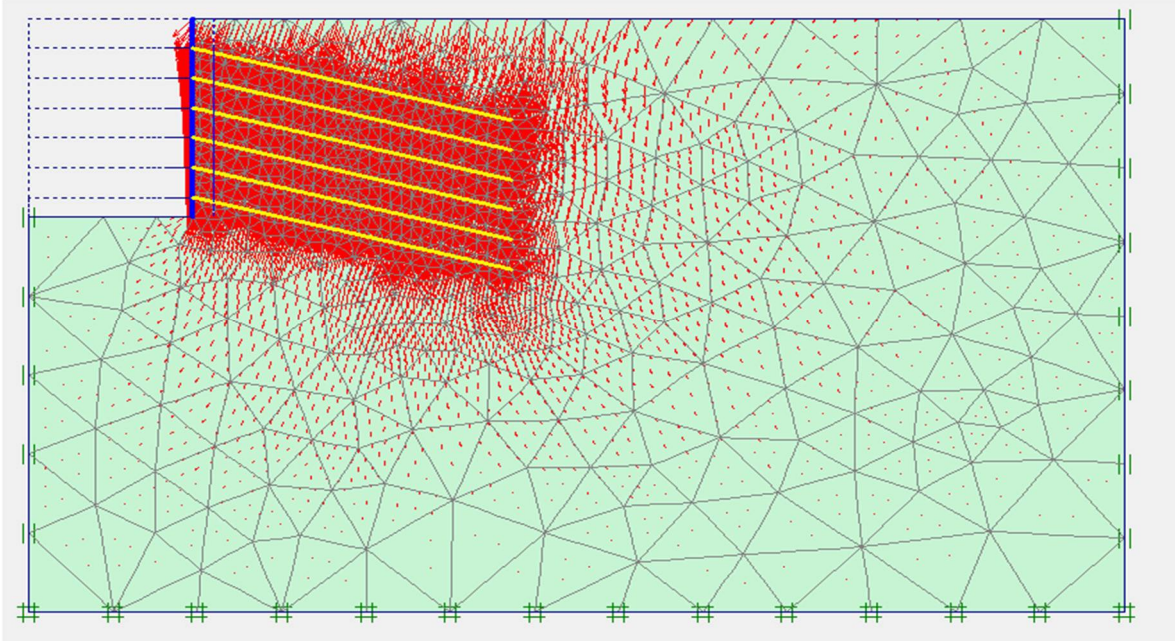


Ek Şekil 19.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



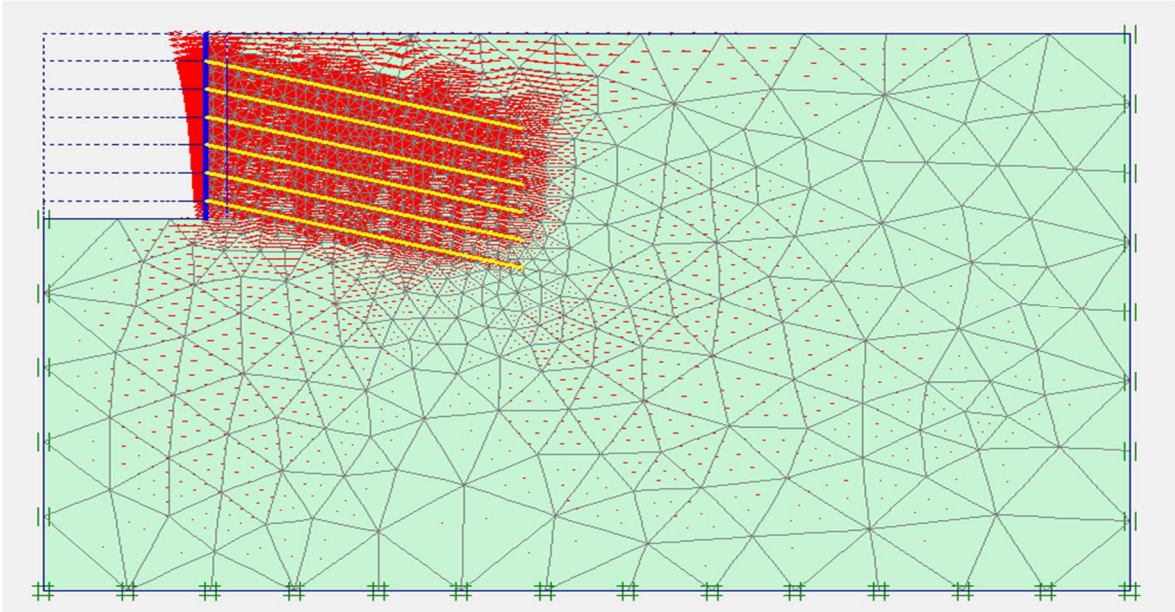
Ek Şekil 19.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 20. $D_r=35\%$ Rölaf Sıklıktaki Kum Zemin için Altı Zemin Çivili 150 kN/m^2 Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



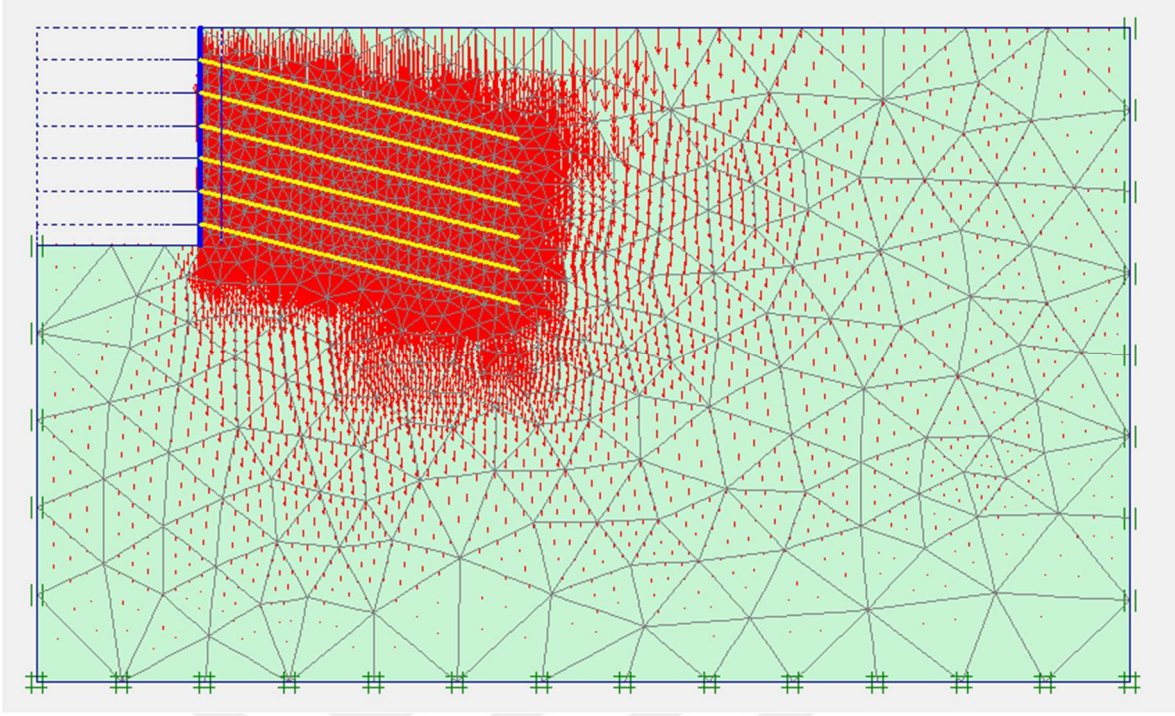
$$\delta_{\text{maksimum}}=201.17 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 20.1. 150 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğifirme miktarı



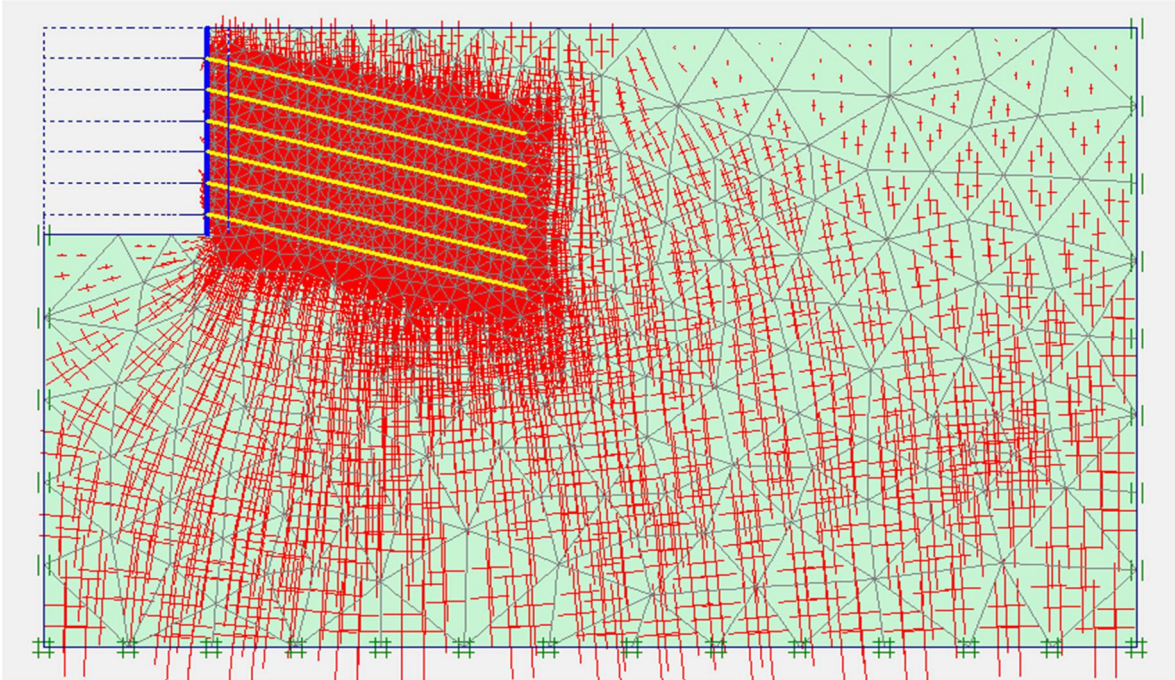
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}= 92.06 \times 10^{-3} \text{m}$$

Ek Şekil 20.2. 150 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğifirme miktarı



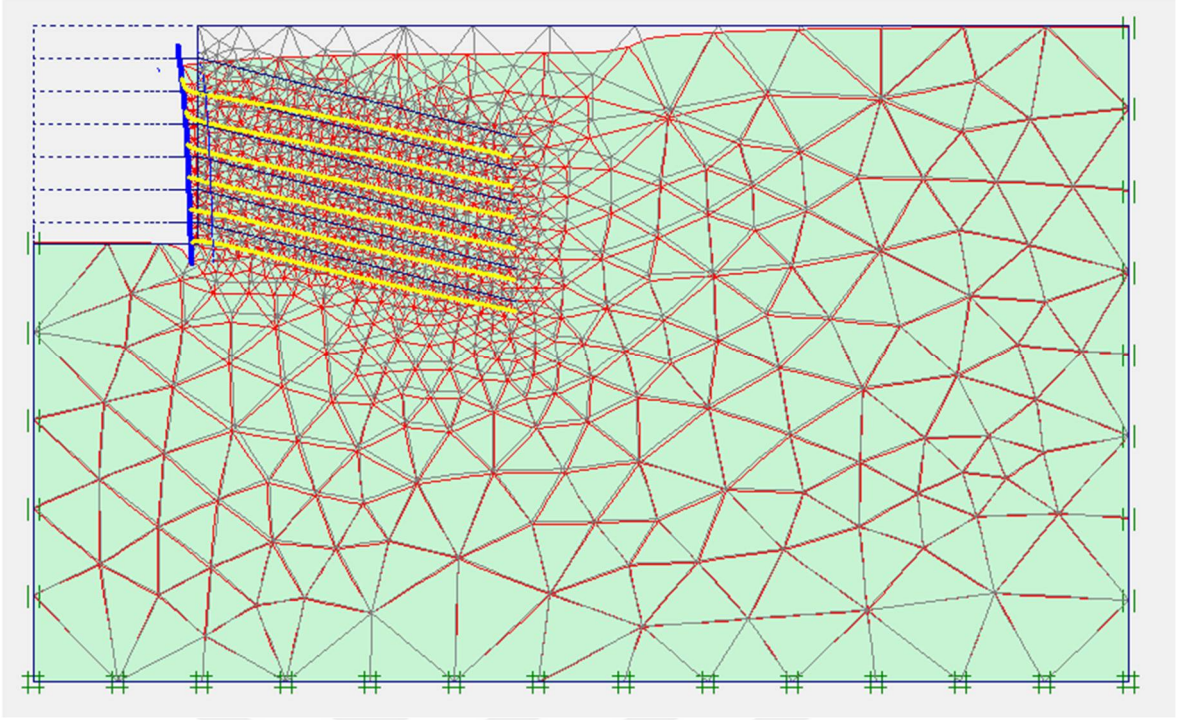
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 185.33 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 20.3. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



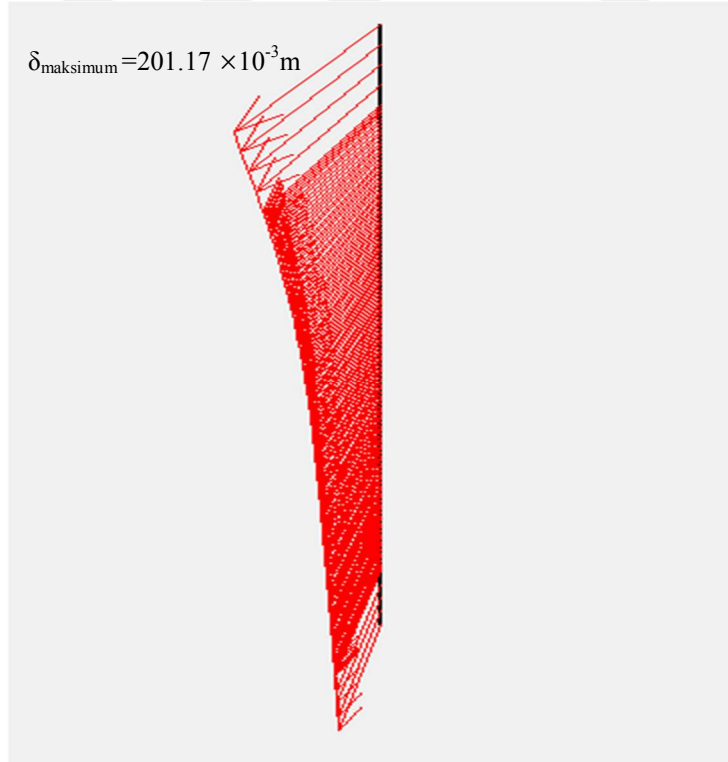
$$\text{Maksimum toplam gerilmeler} = -753.56 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 20.4. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi



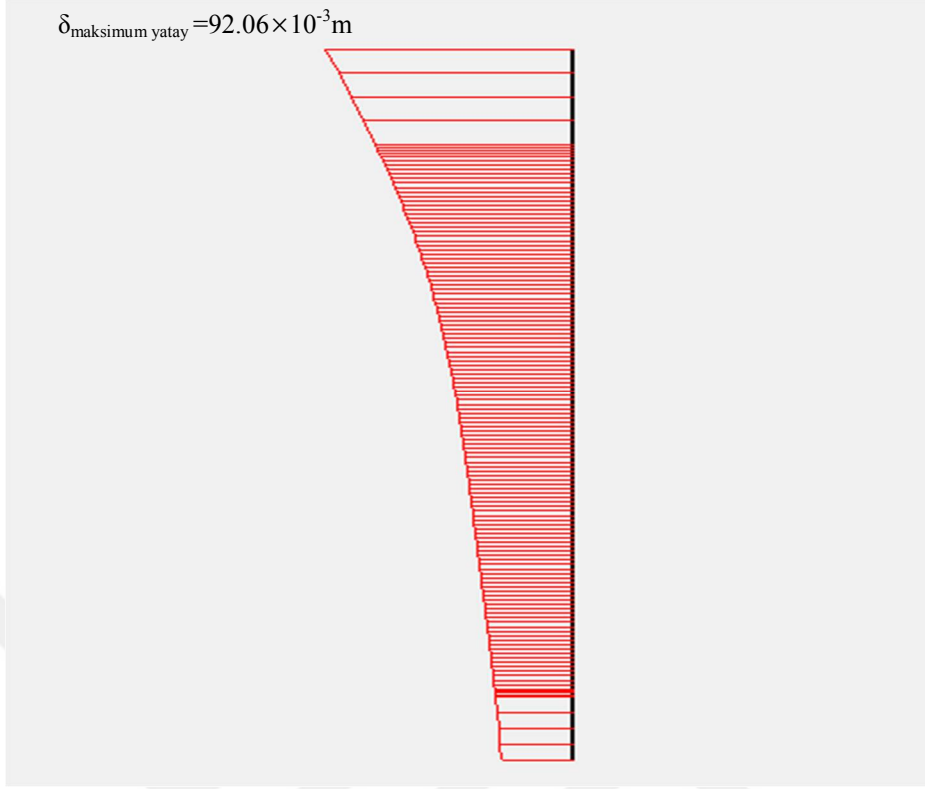
$$\delta_{\text{maksimum}} = 201.17 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 20.5. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler

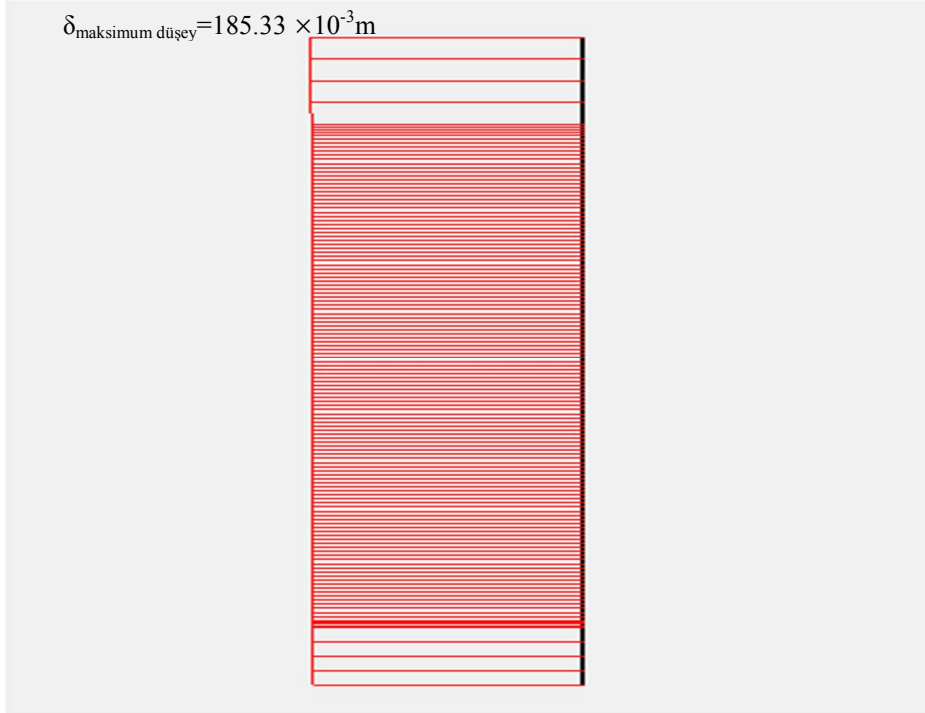


$$\delta_{\text{maksimum}} = 201.17 \times 10^{-3} \text{ m}$$

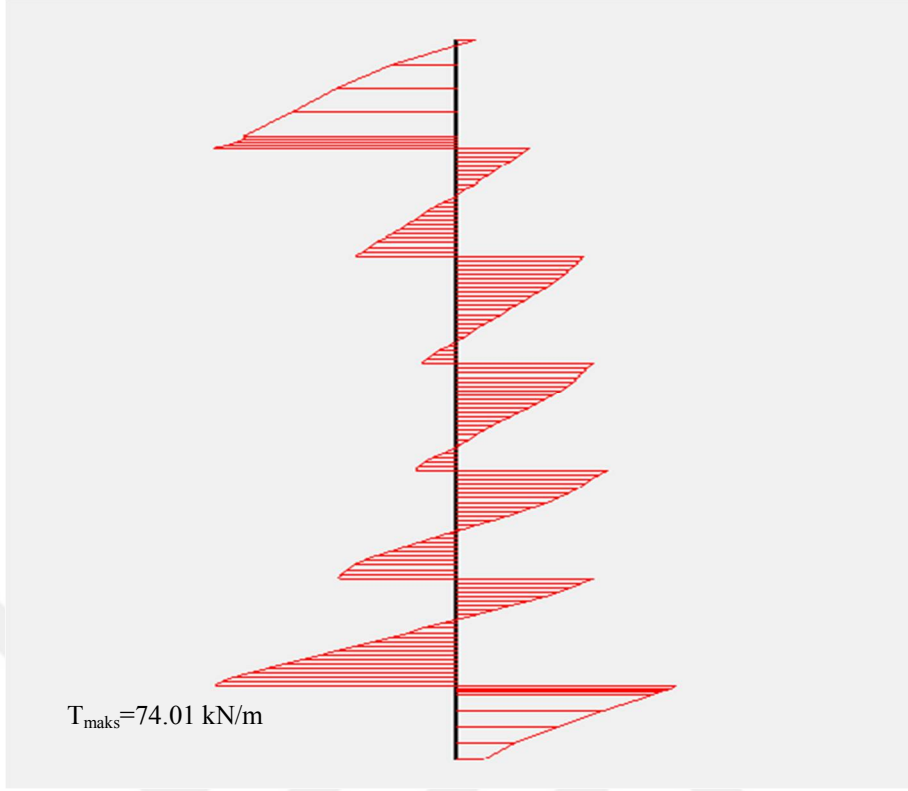
Ek Şekil 20.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



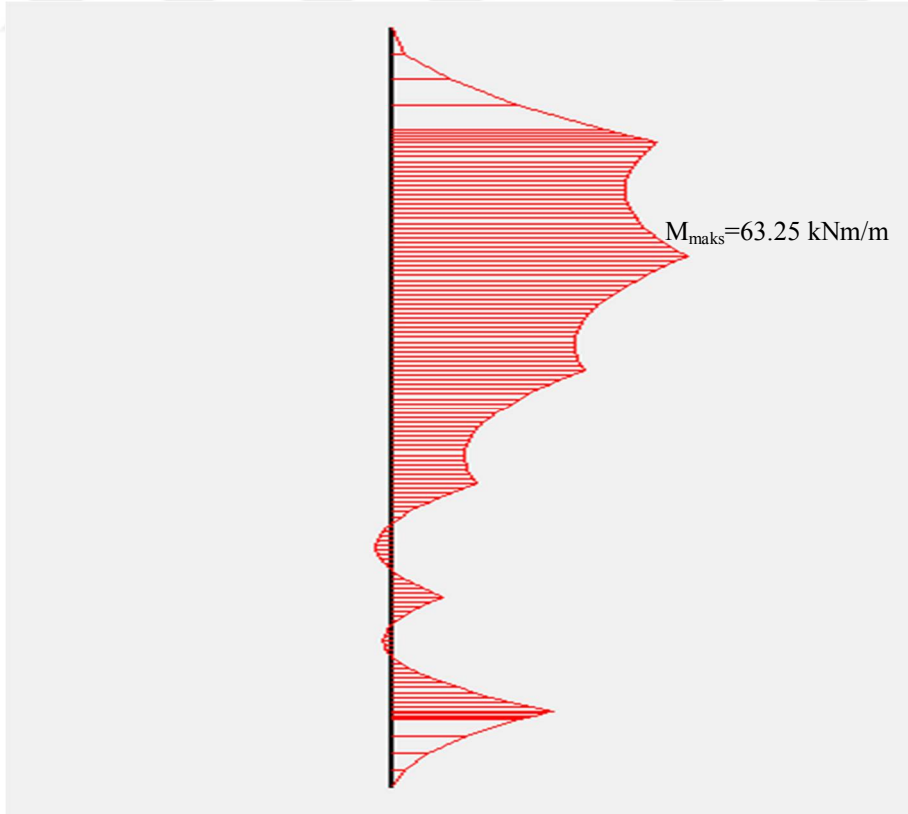
Ek Şekil 20.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 20.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

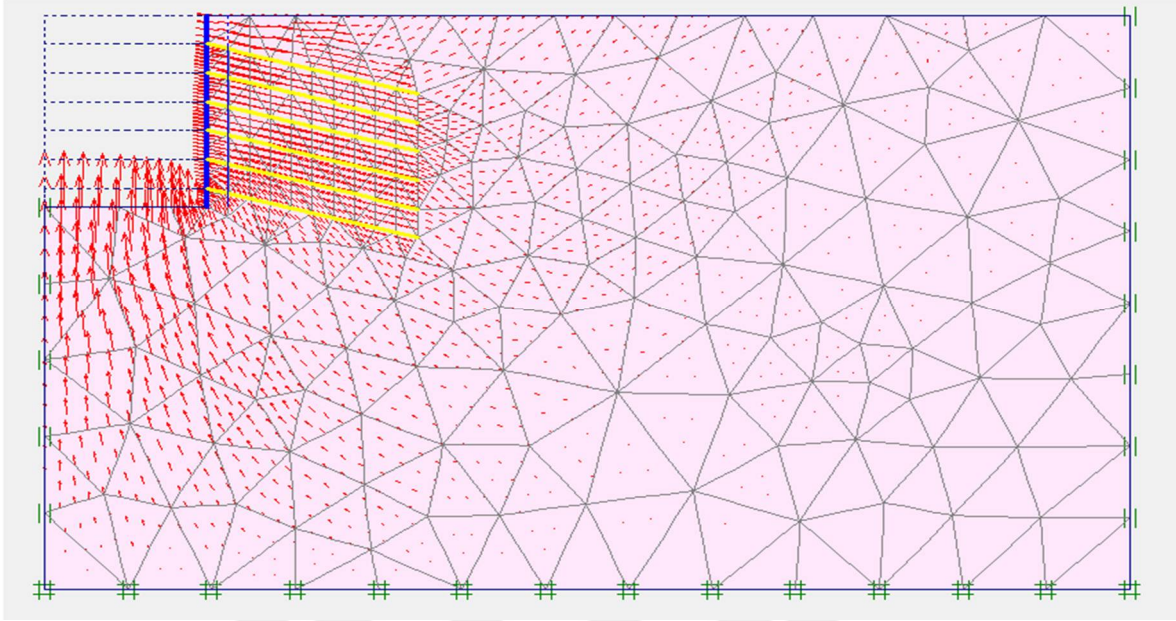


Ek Şekil 20.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



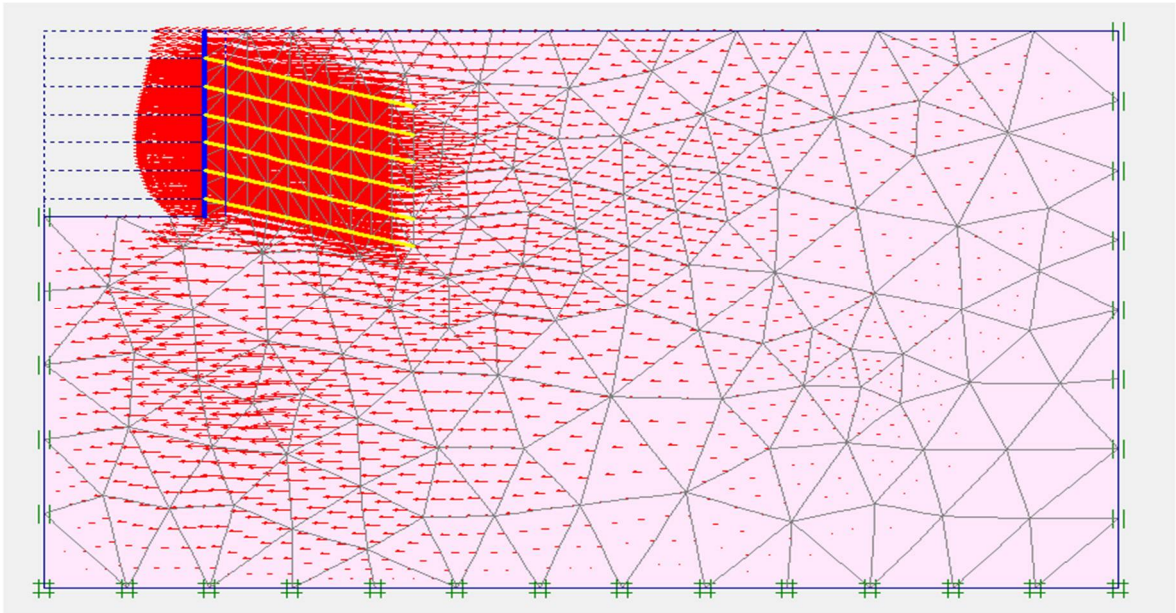
Ek Şekil 20.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 21. Dr=%65 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için Altı Zemin Çivili 0 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



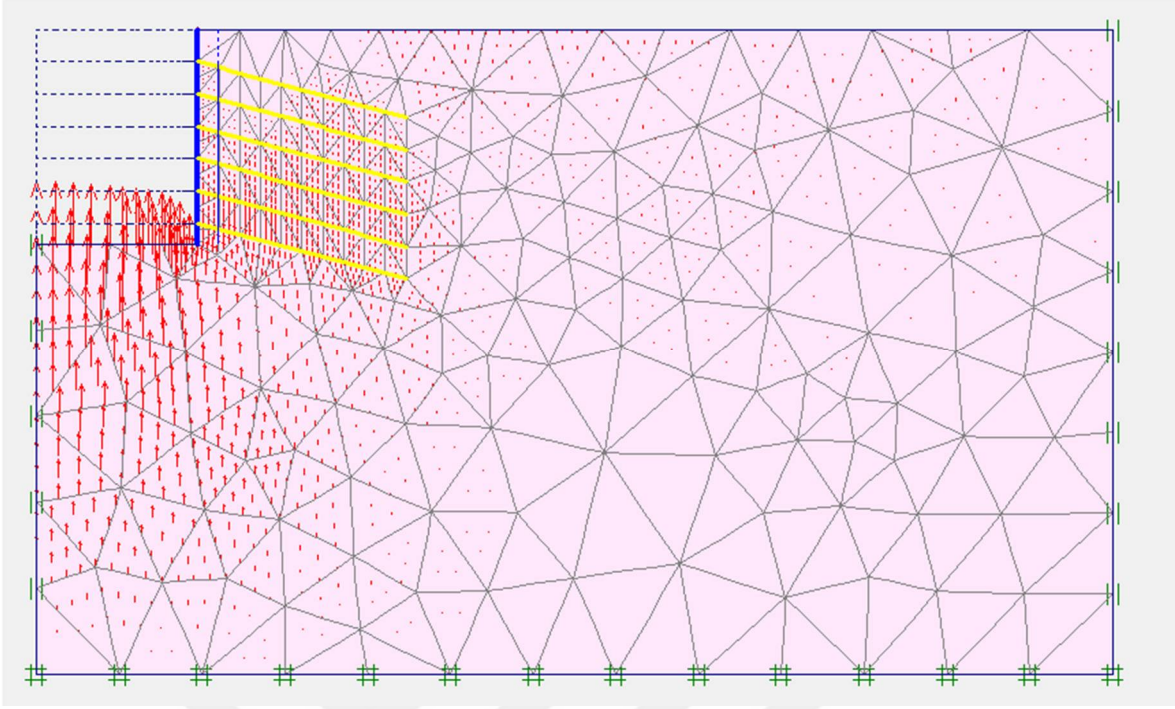
$$\delta_{\text{maksimum}}=29.34 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 21.1. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



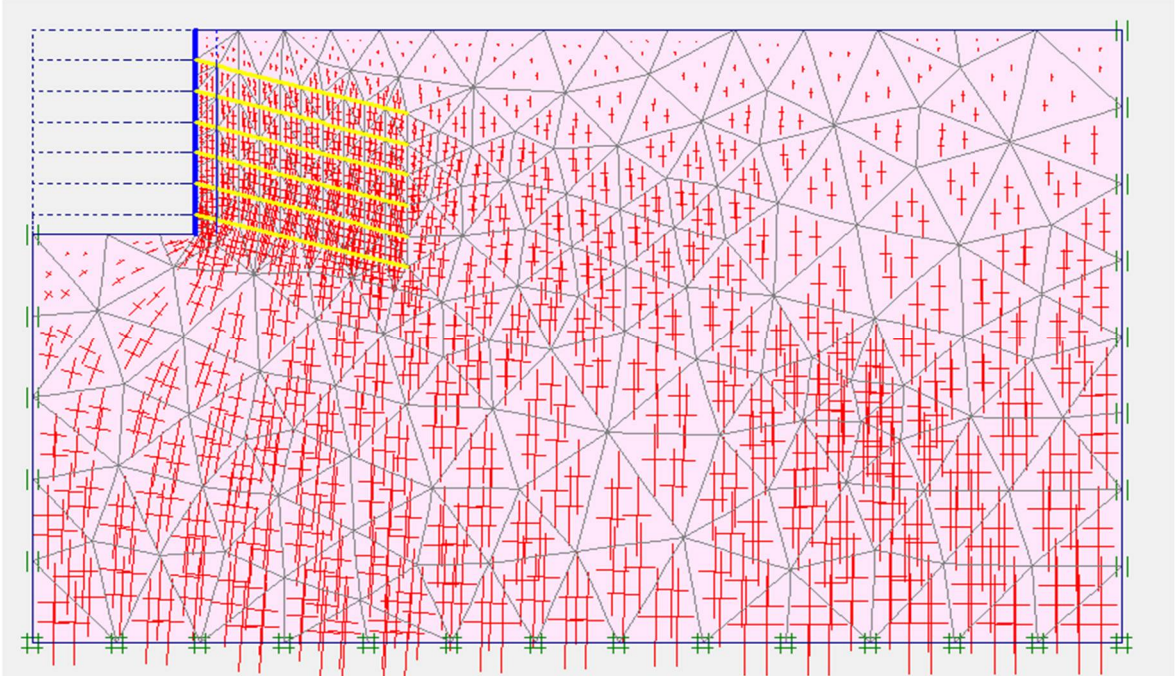
$$\delta_{\text{maksimum yatay}}=6.72 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 21.2. 0 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



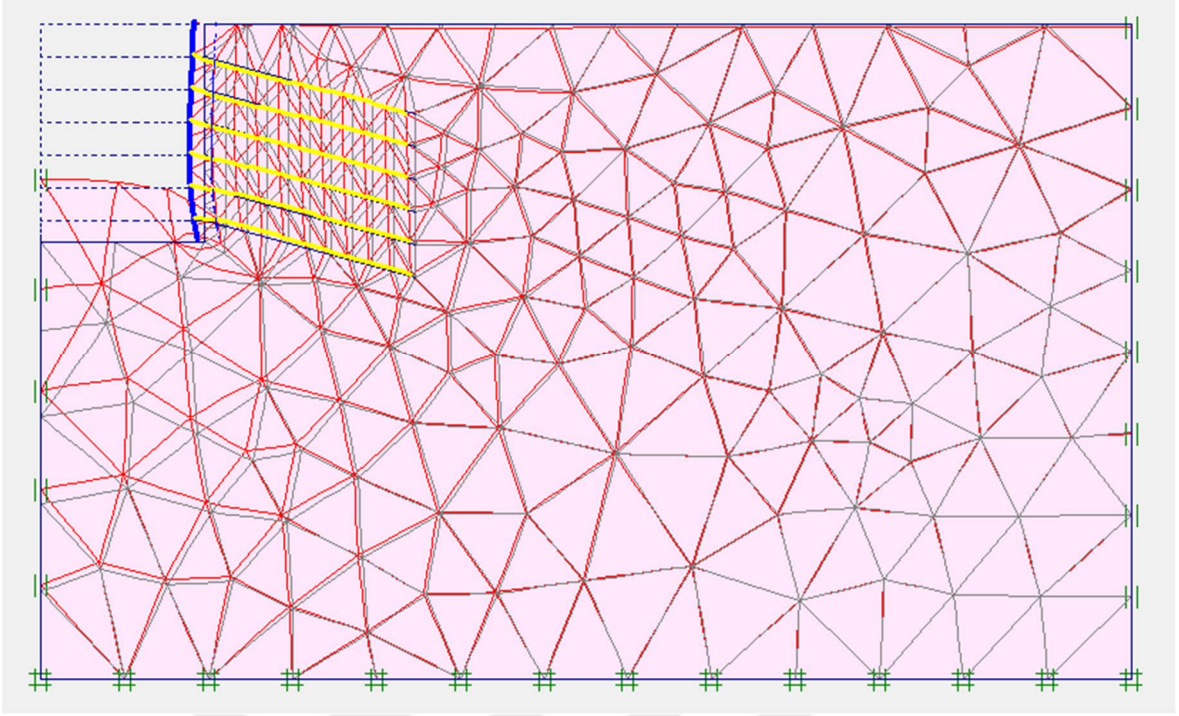
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 29.34 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 21.3. 0 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



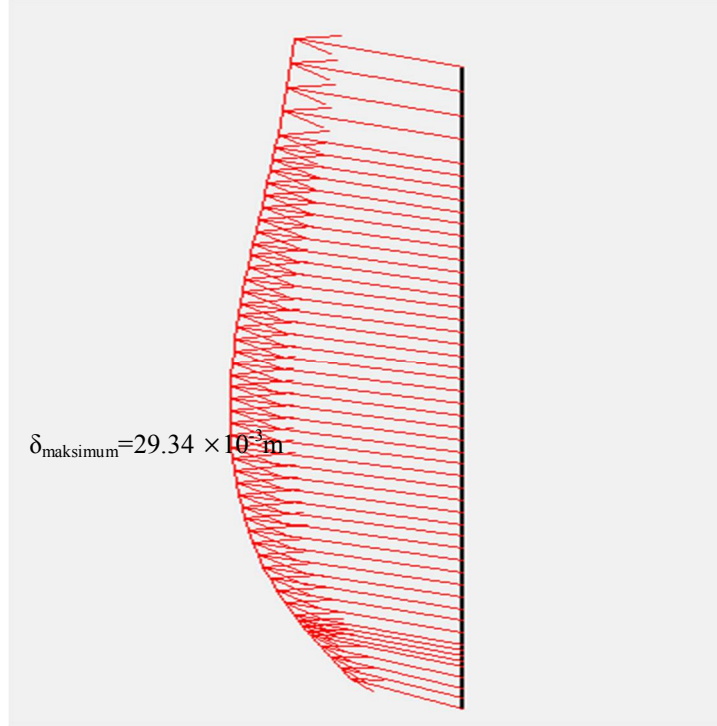
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -506.12 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 21.4. 0 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi



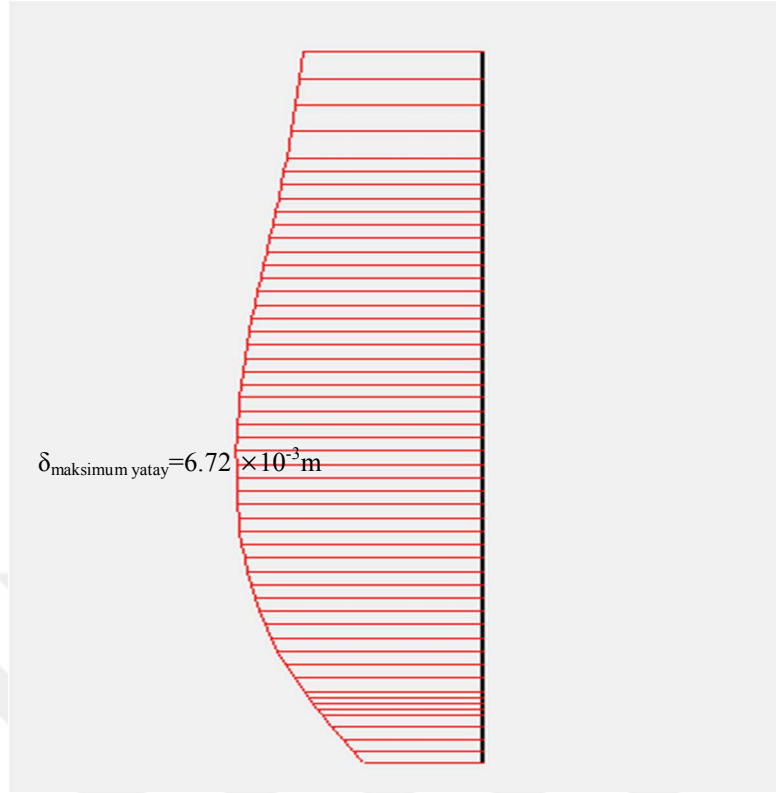
$$\delta_{\text{maksimum}} = 29.34 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 21.5. 0 kN/m^2 yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler

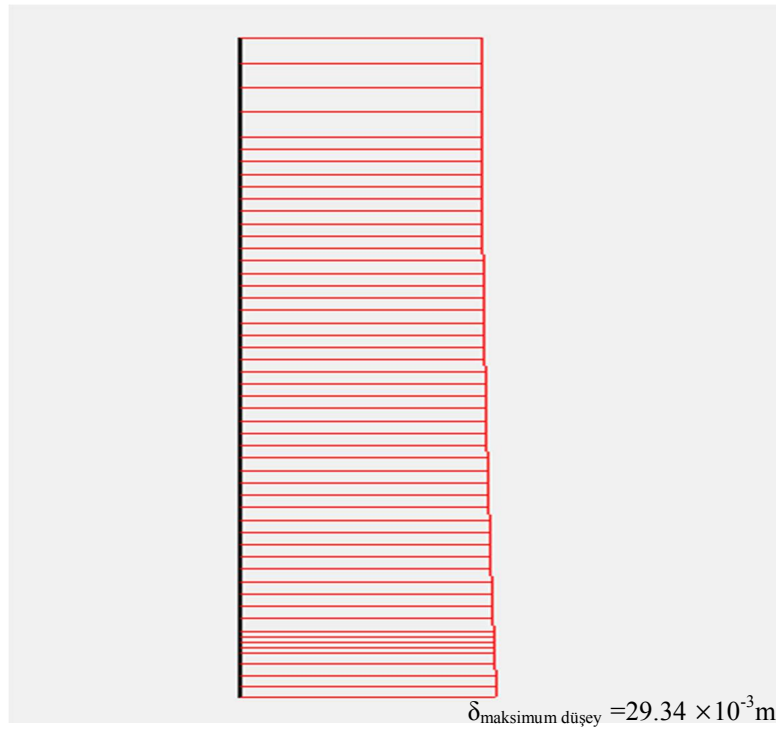


$$\delta_{\text{maksimum}} = 29.34 \times 10^{-3} \text{ m}$$

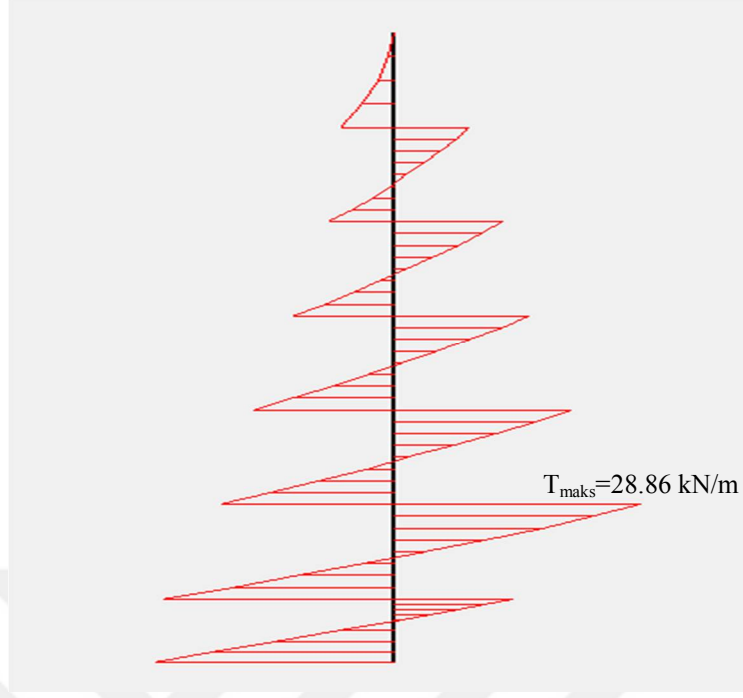
Ek Şekil 21.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



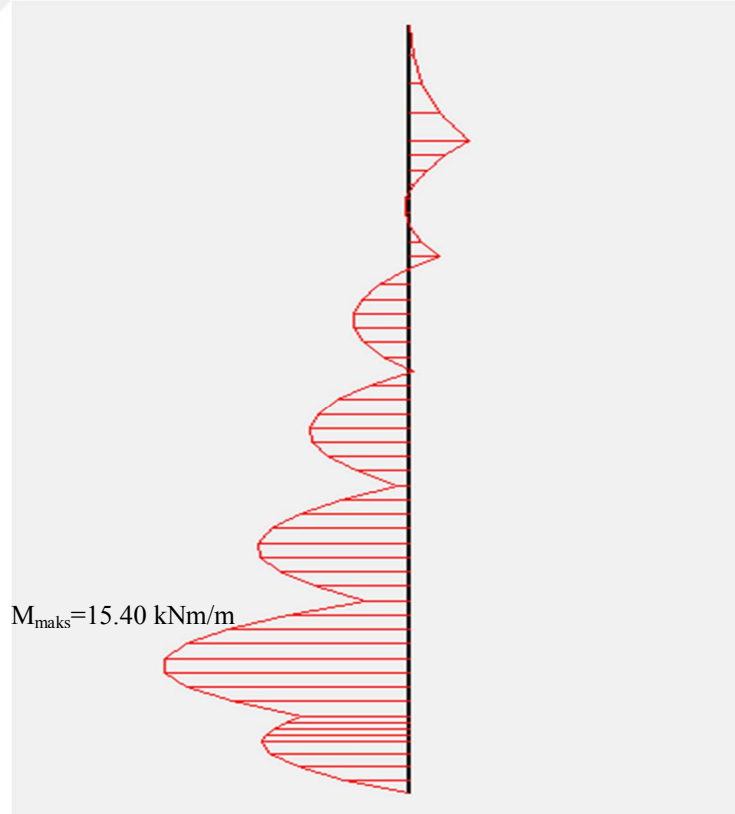
Ek Şekil 21.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 21.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

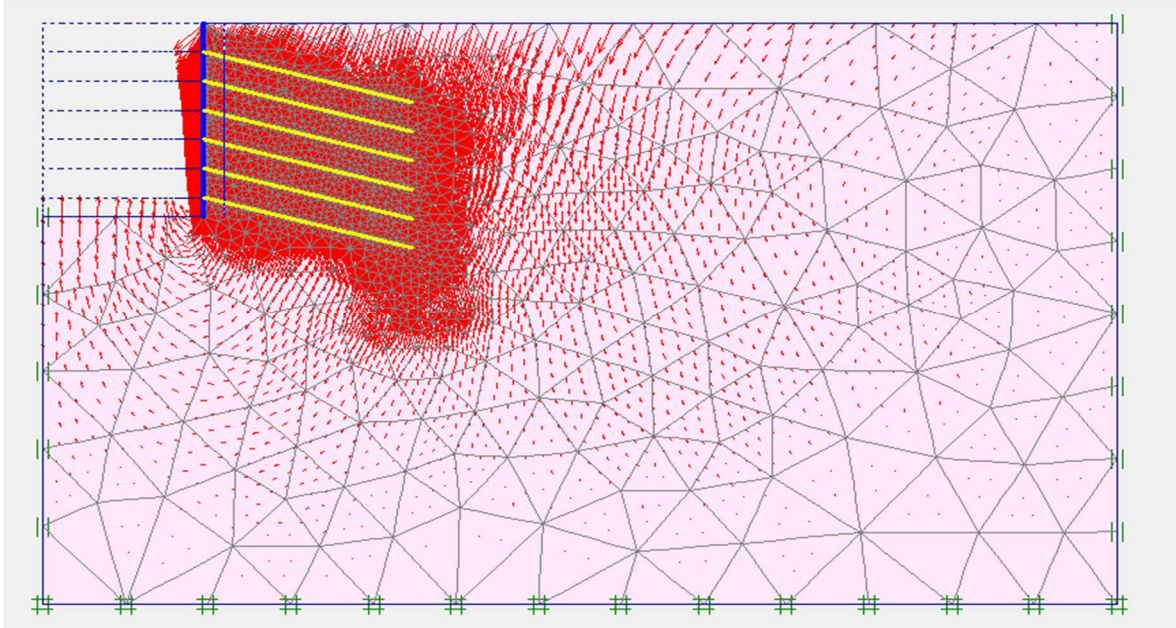


Ek Şekil 21.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



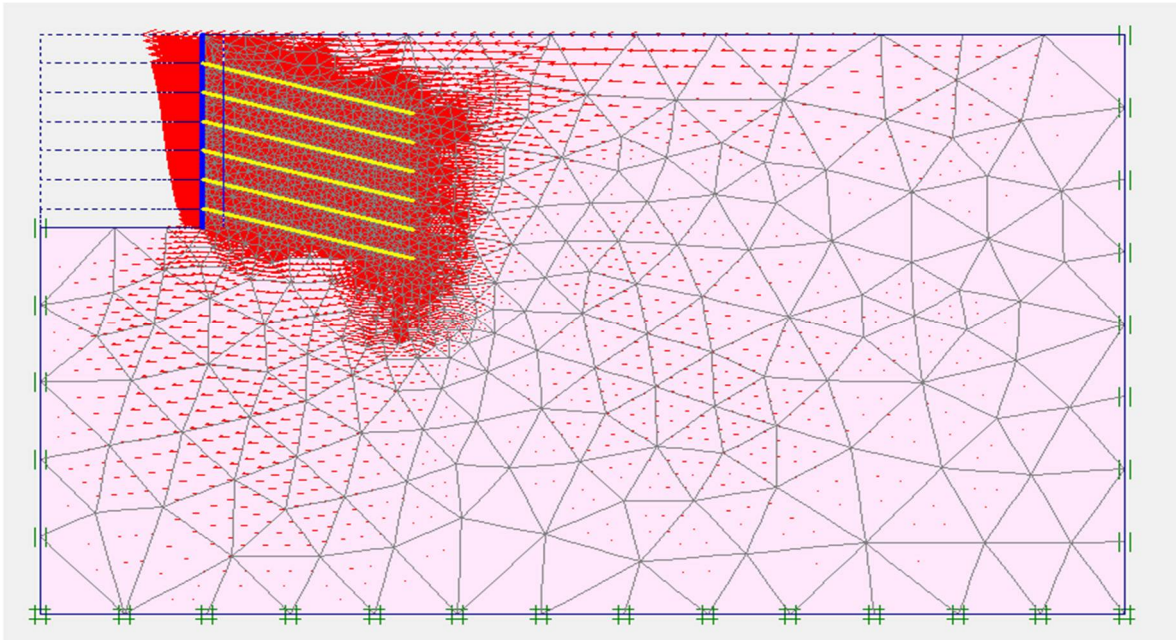
Ek Şekil 21.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 22. Dr=%65 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için Altı Zemin Çivili 50 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



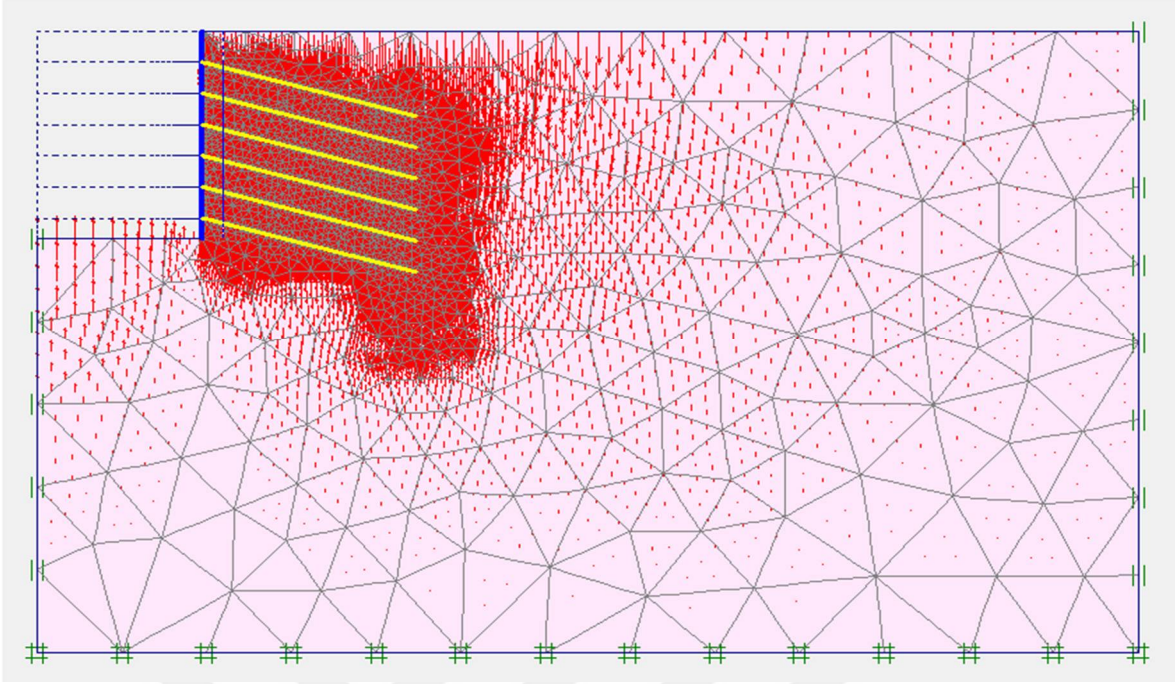
$$\delta_{\text{maksimum}} = 54.78 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 22.1. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



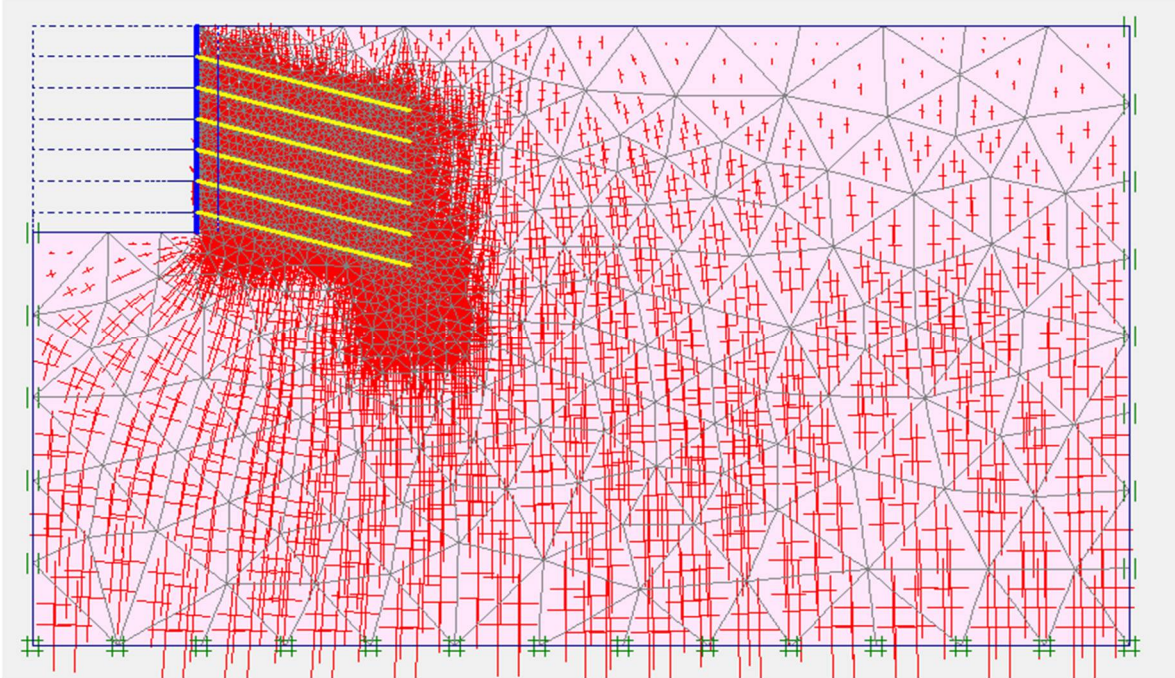
$$\delta_{\text{maksimum yatay}} = 28.56 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 22.2. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



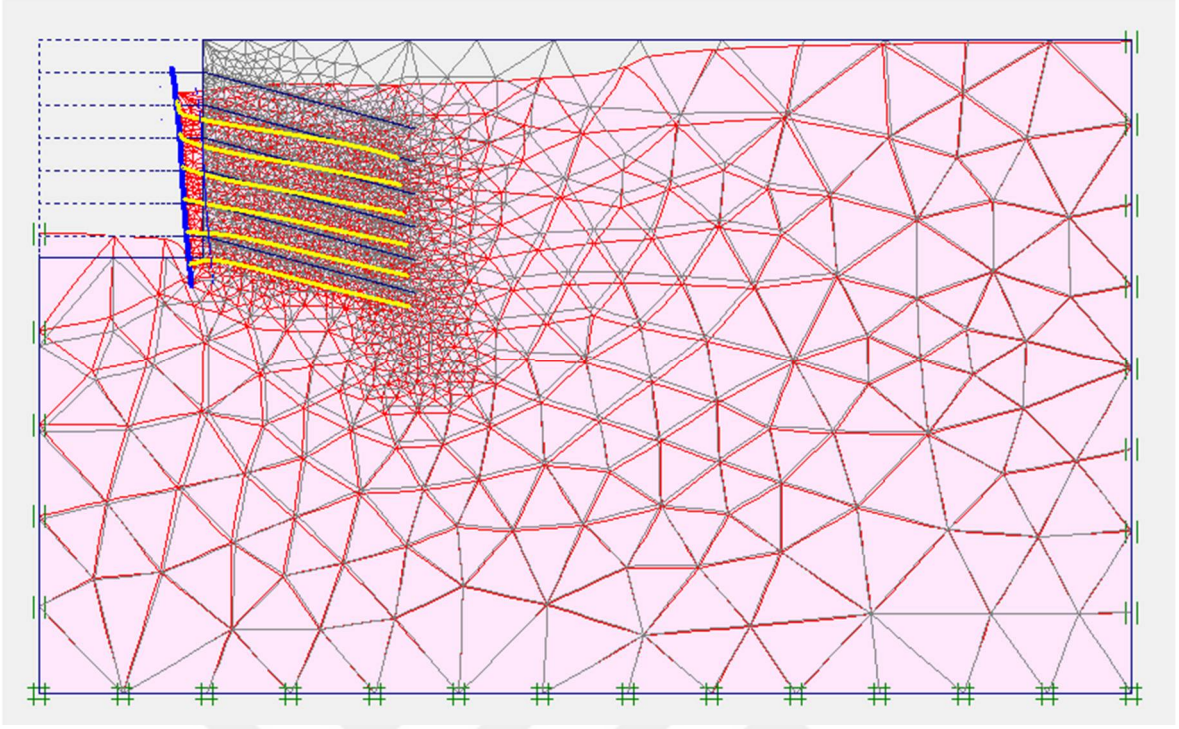
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 49.02 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 22.3. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



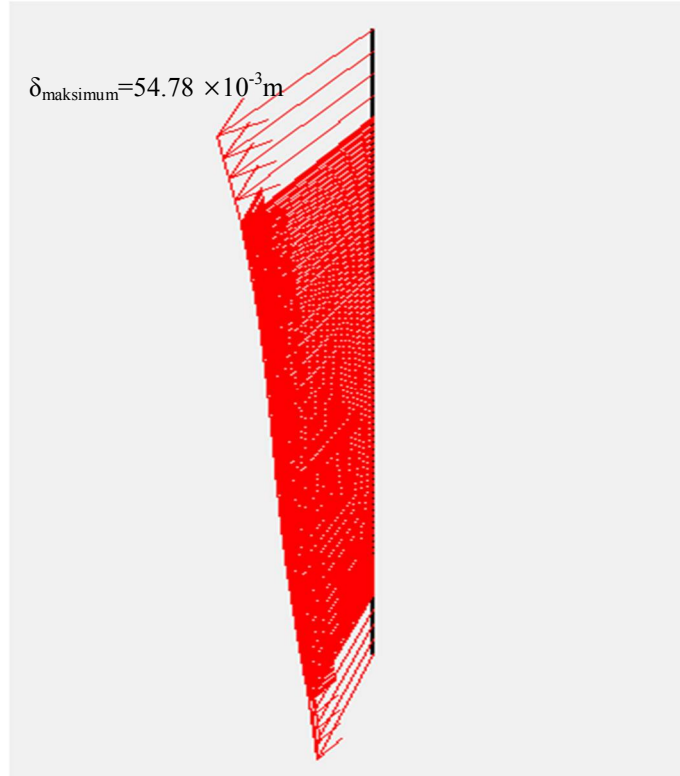
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -631.31 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 22.4. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

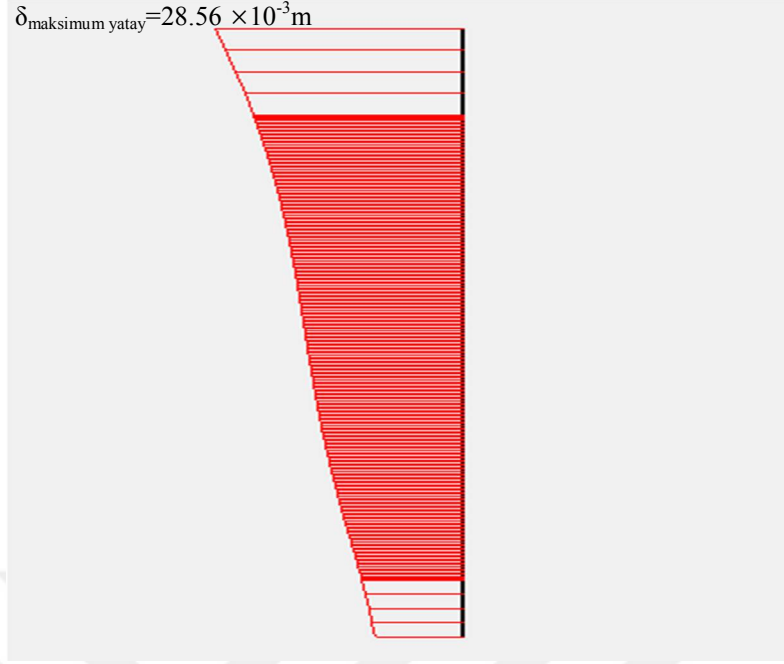


$$\delta_{\text{maksimum}} = 54.78 \times 10^{-3} \text{ m}$$

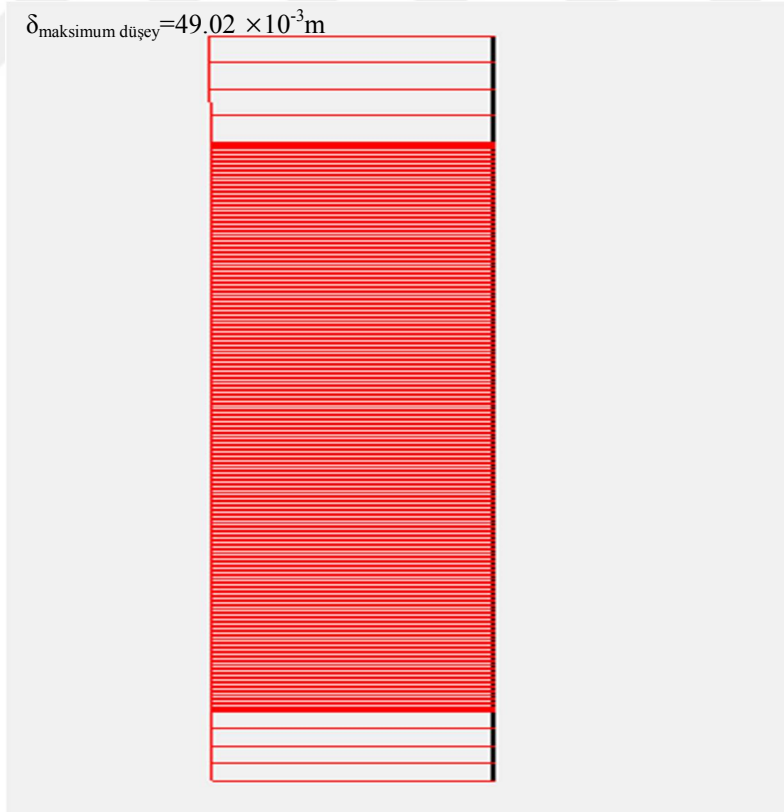
Ek Şekil 22.5. 50 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



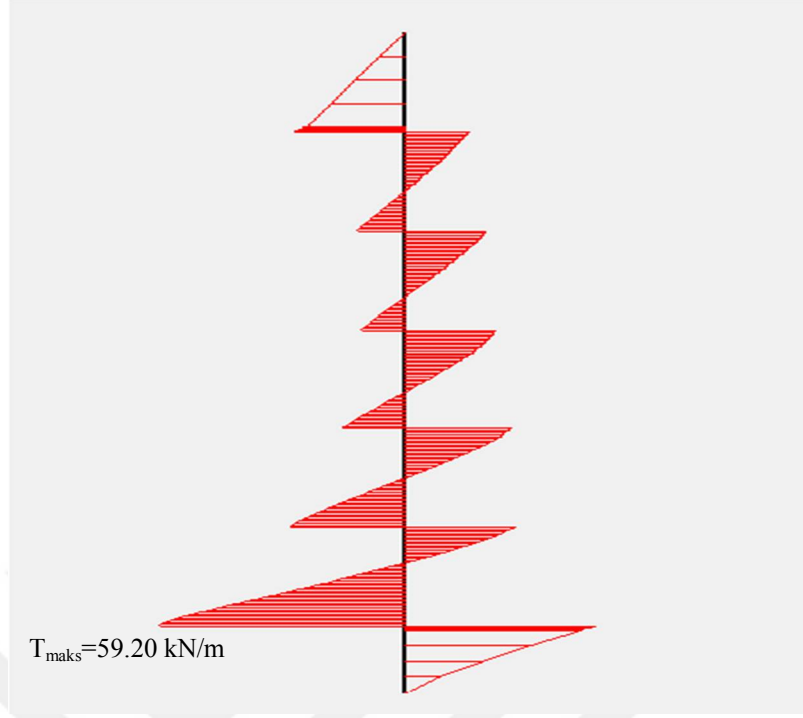
Ek Şekil 22.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



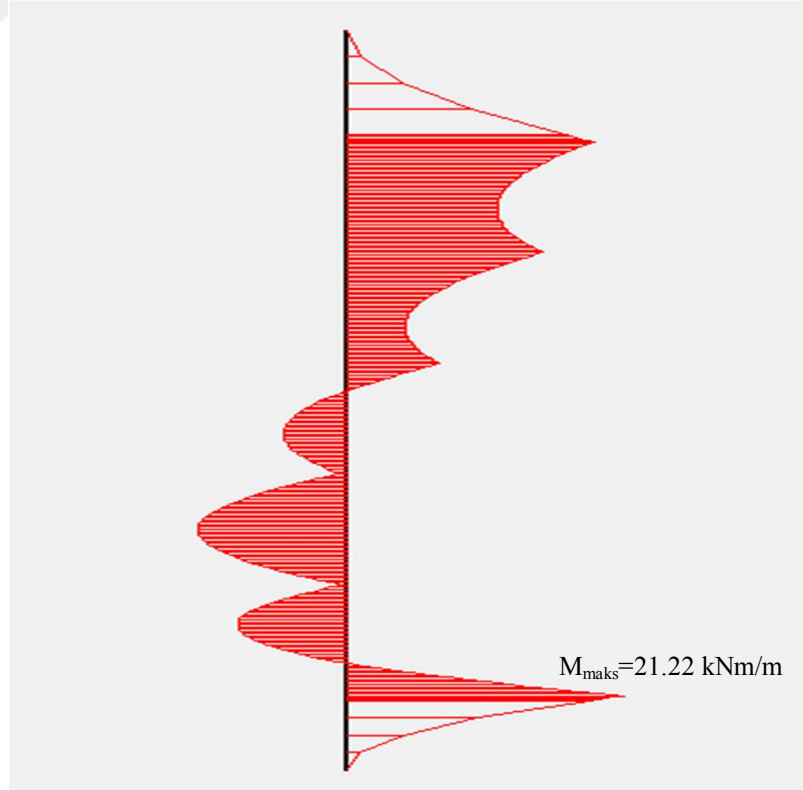
Ek Şekil 22.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 22.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

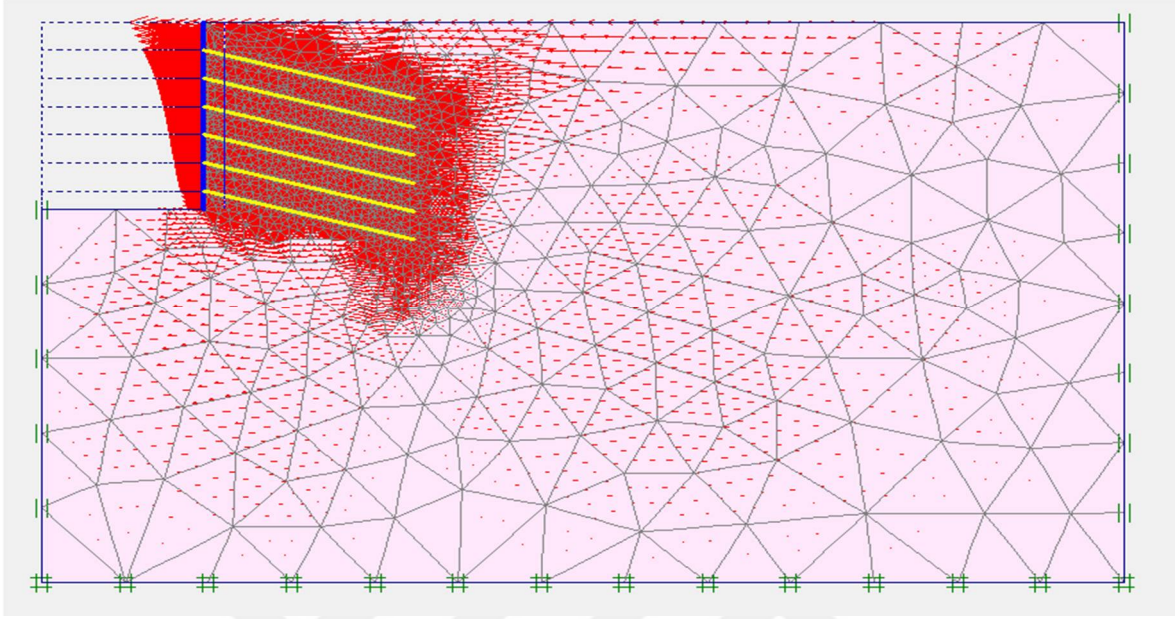


Ek Şekil 22.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



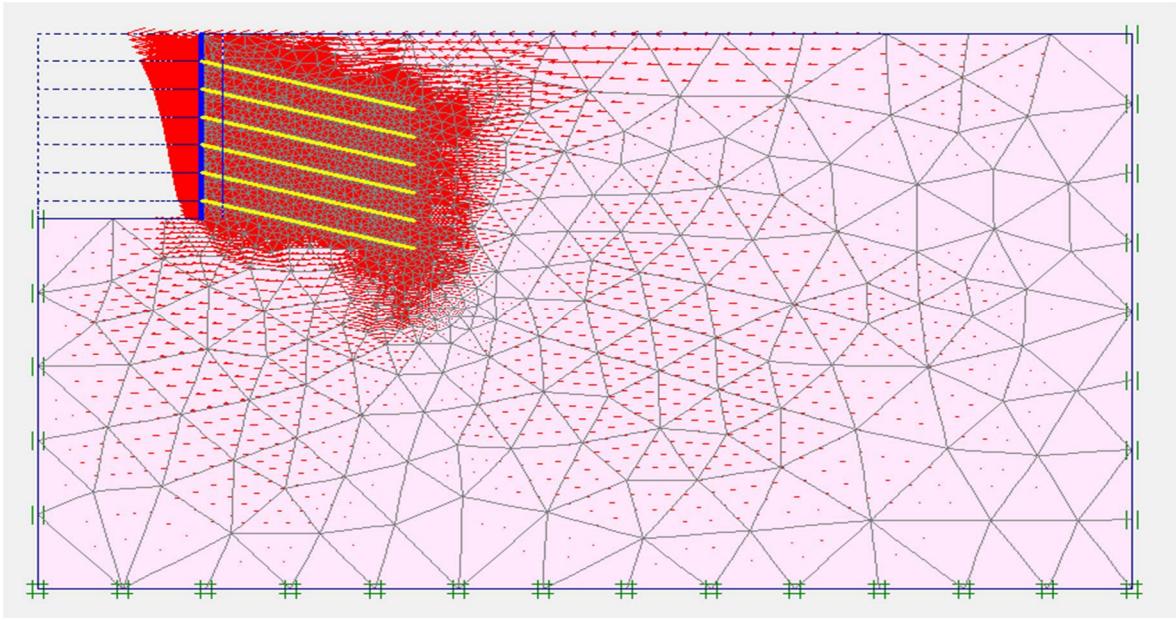
Ek Şekil 22.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 23. Dr=%65 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için Altı Zemin Çivili 100 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



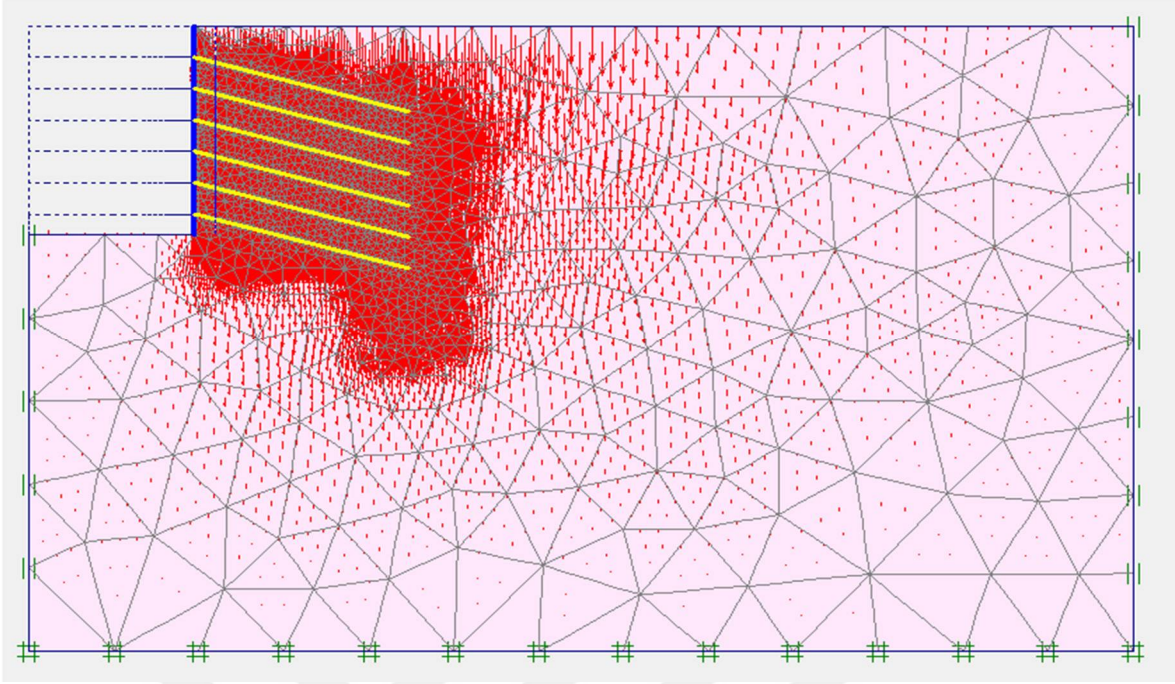
$$\delta_{\text{maksimum}} = 93.81 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 23.1. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



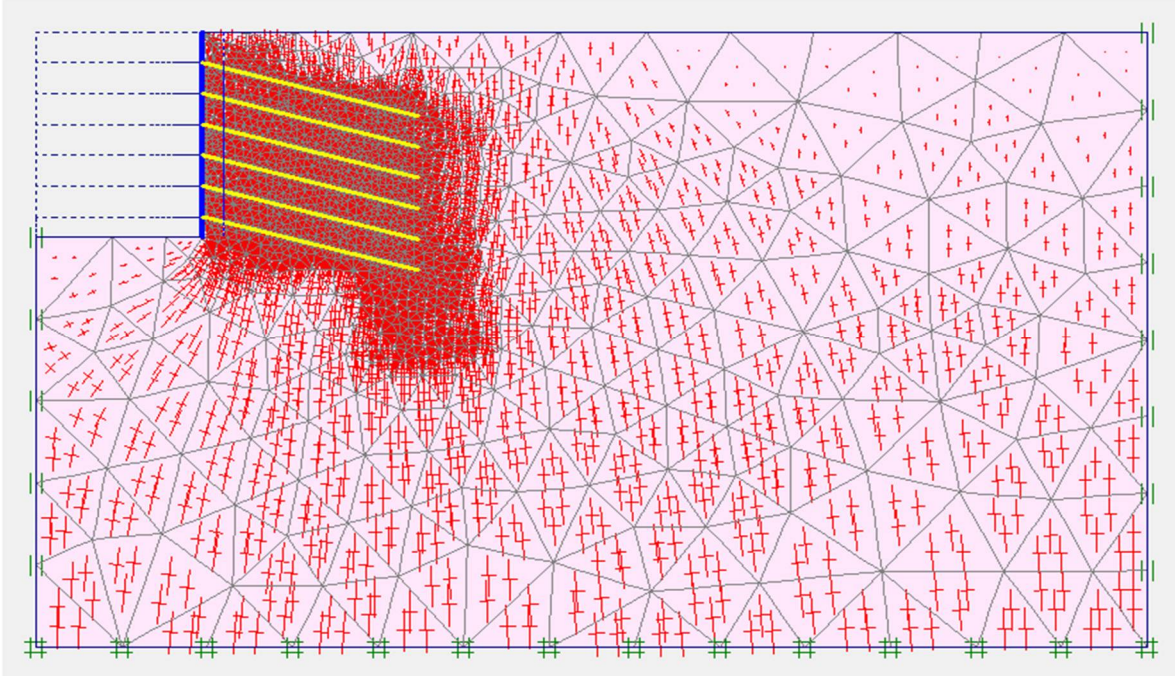
$$\delta_{\text{maksimum yatay}} = 44.63 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 23.2. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



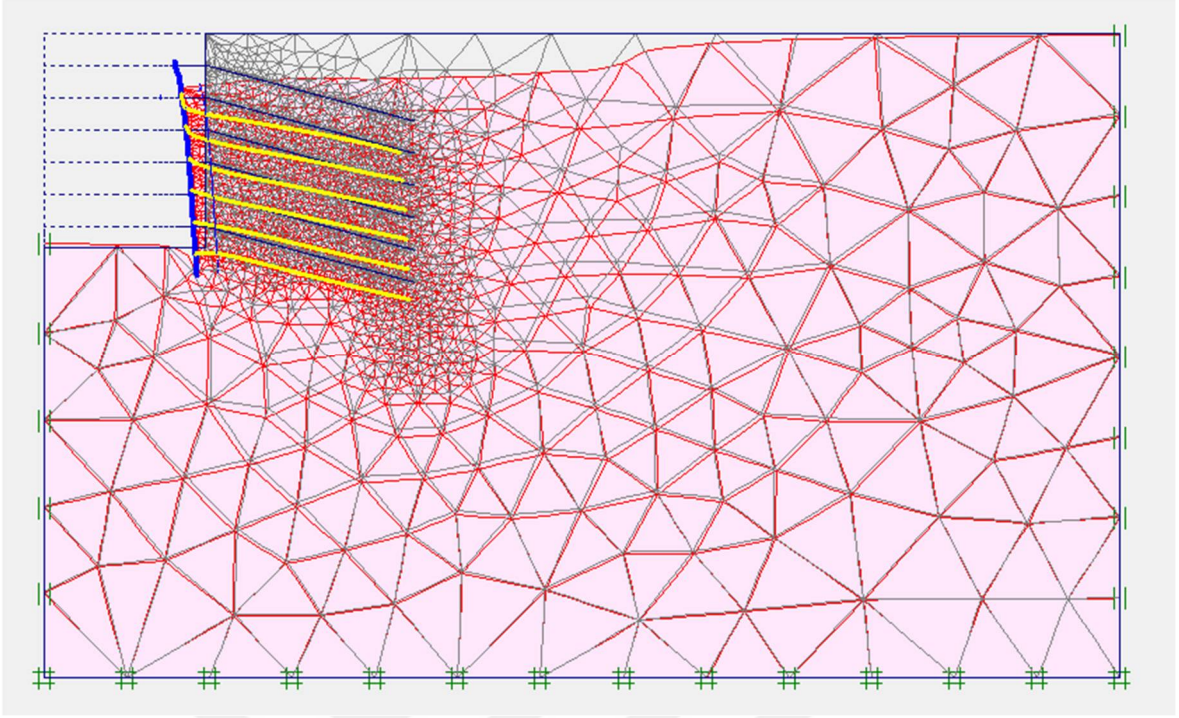
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 86.55 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 23.3. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



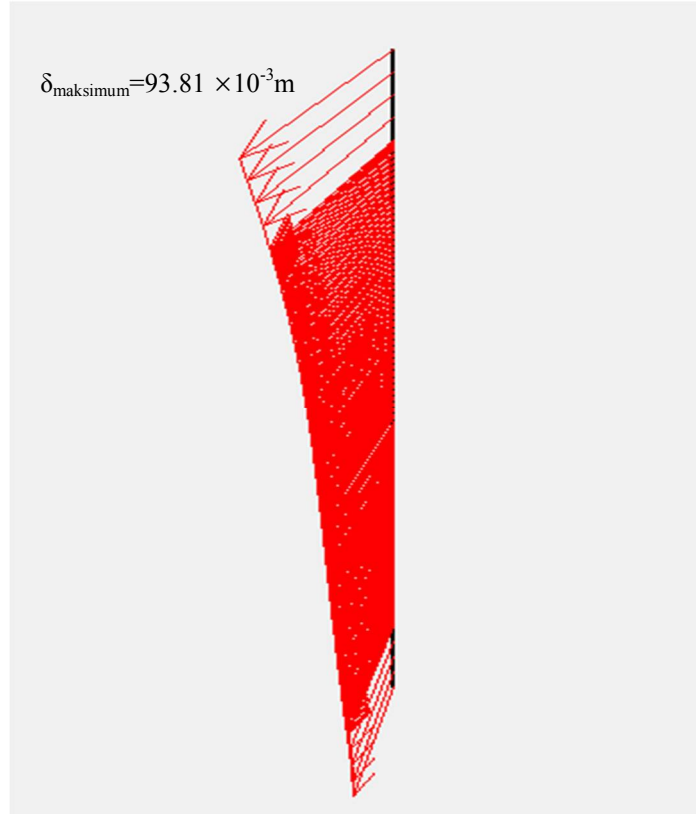
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -720.32 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 23.4. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

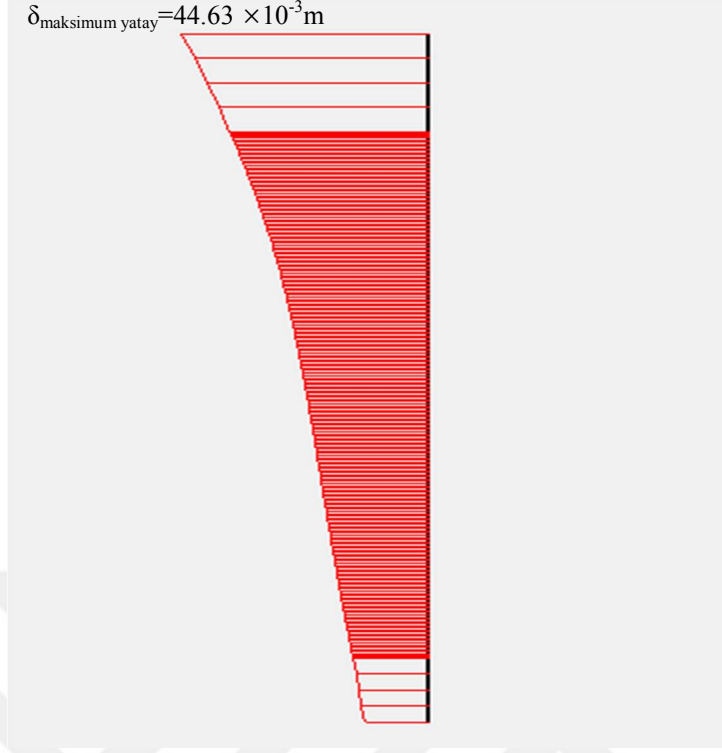


$$\delta_{\text{maksimum}} = 100.30 \times 10^{-3} \text{ m}$$

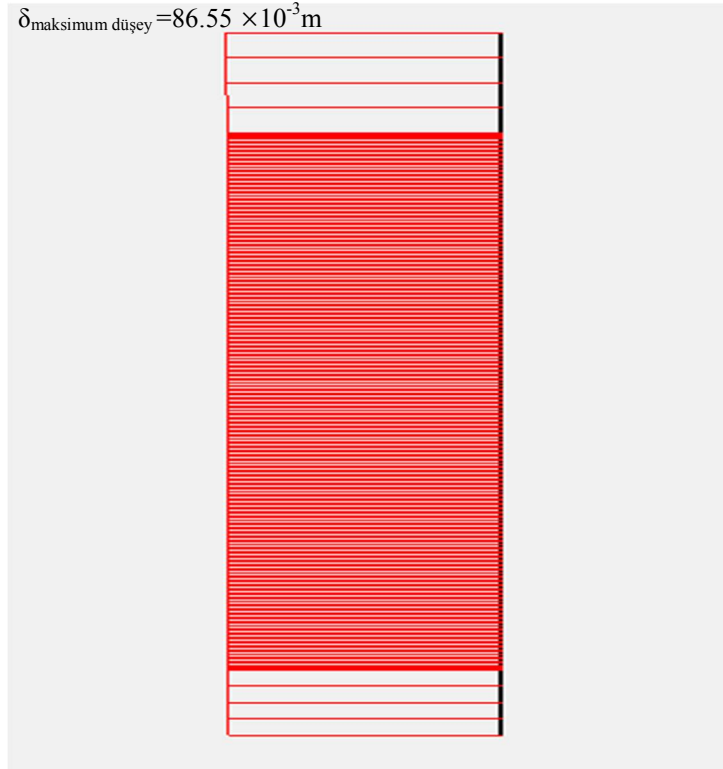
Ek Şekil 23.5. 100 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



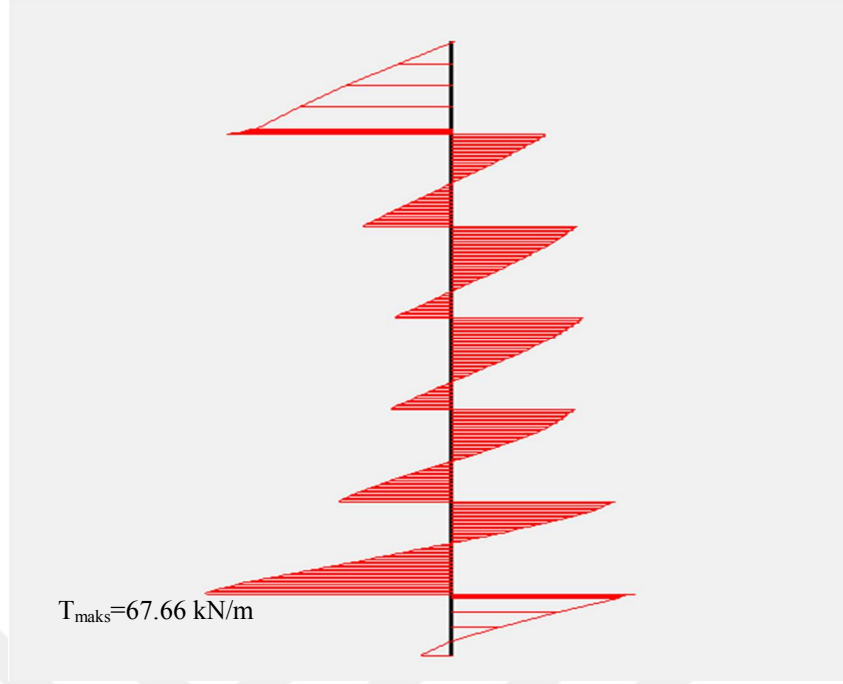
Ek Şekil 23.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



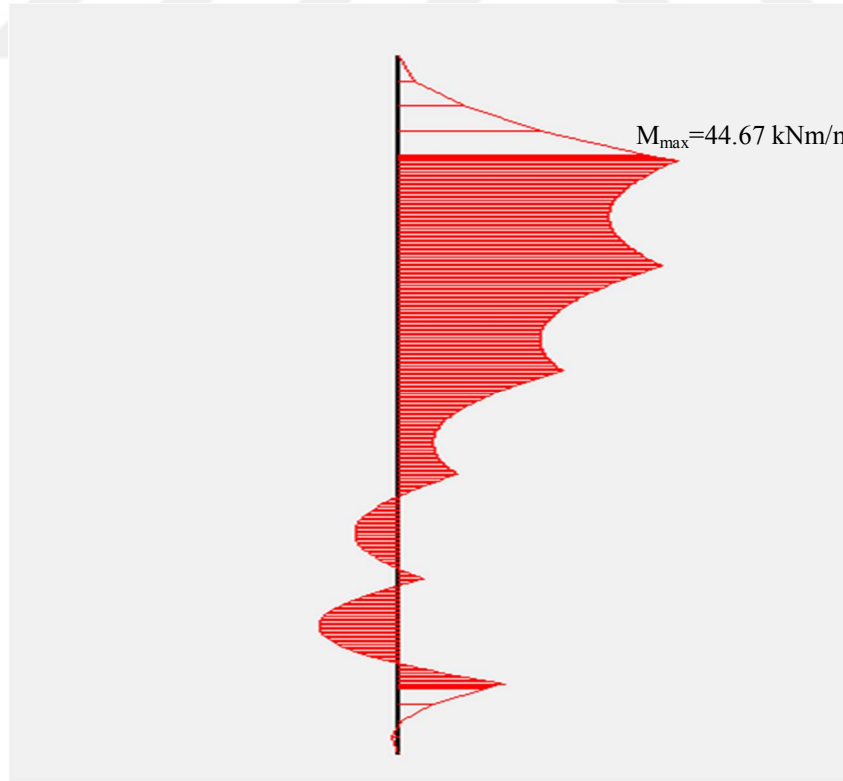
Ek Şekil 23.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 23.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı

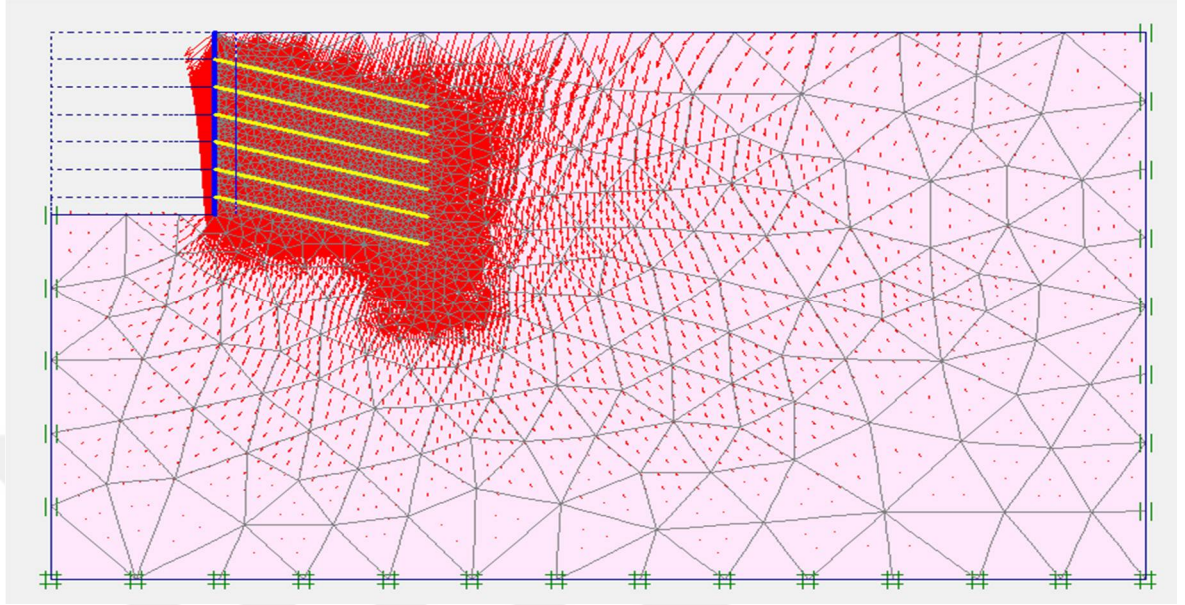


Ek Şekil 23.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



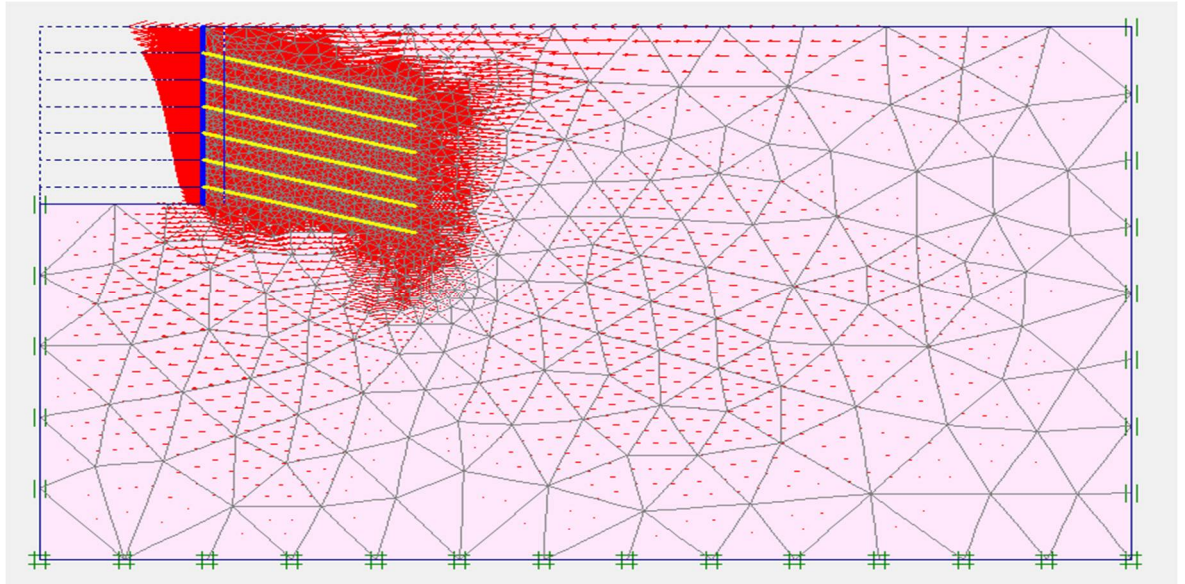
Ek Şekil 23.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

Ek 24. Dr=%65 Rölatif Sıklıktaki Kum Zemin için Altı Zemin Çivili 150 kN/m² Yayılı Yük Uygulanan Duvar Modelinin PLAXIS Sonuçları



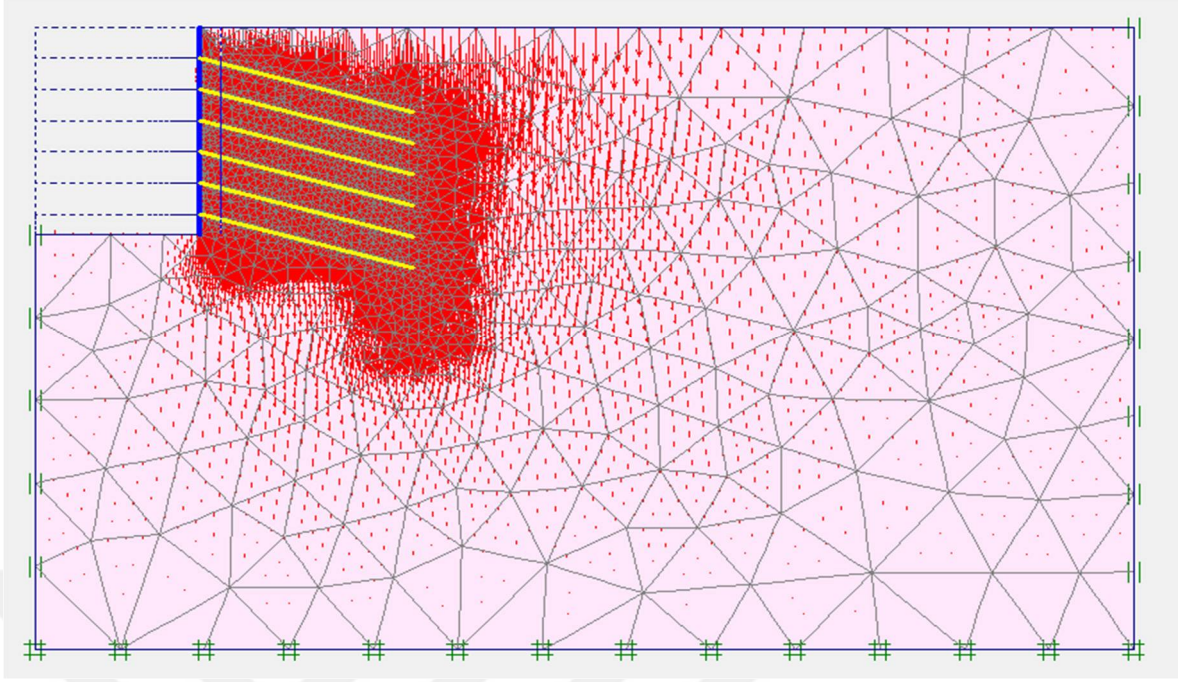
$$\delta_{\text{maksimum}} = 142.41 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 24.1. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam yerdeğiştirme miktarı



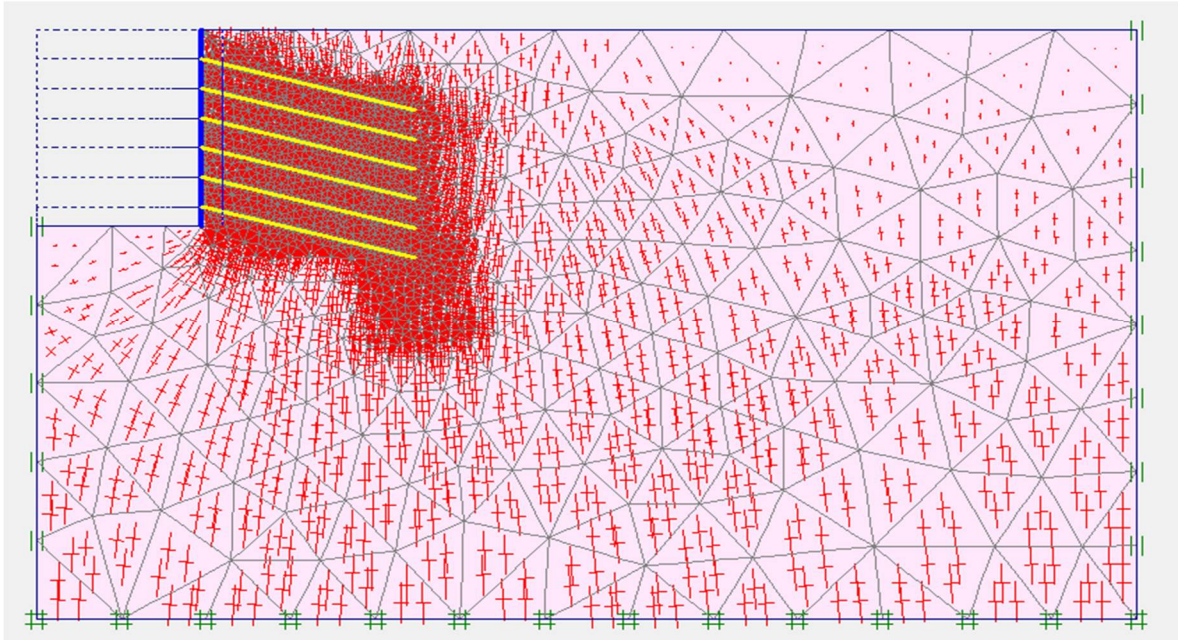
$$\delta_{\text{maksimum yatay}} = 70.57 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 24.2. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde yatay yerdeğiştirme miktarı



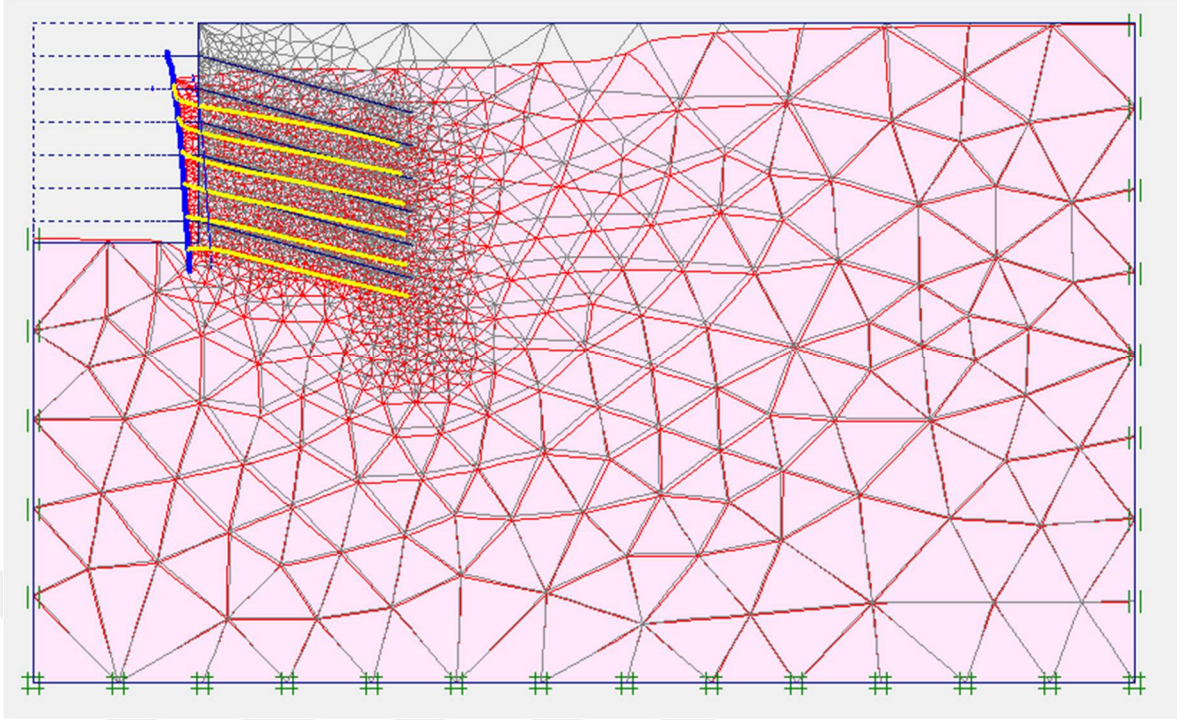
$$\delta_{\text{maksimum düşey}} = 129.9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ek Şekil 24.3. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde düşey yerdeğiştirme miktarı



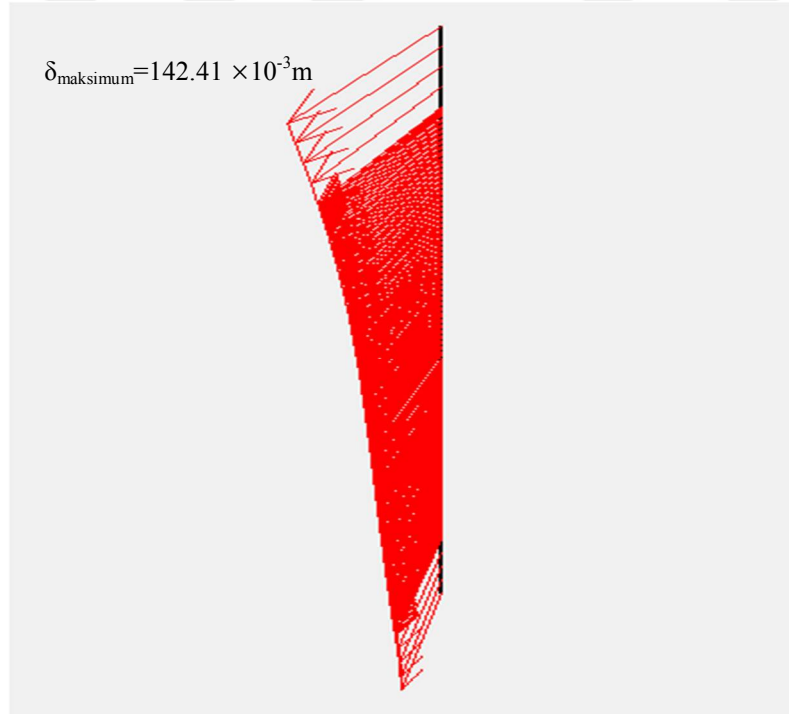
$$\text{Maksimum toplam gerilme} = -832.60 \text{ kN/m}^2$$

Ek Şekil 24.4. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde toplam gerilmelerin değişimi

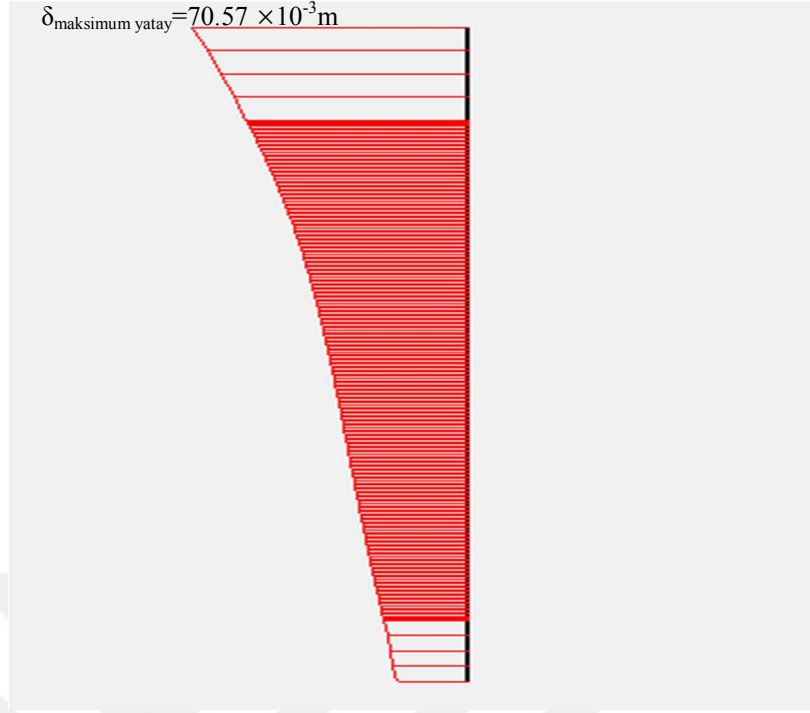


$$\delta_{\text{maksimum}}=142.41 \times 10^{-3} \text{ m}$$

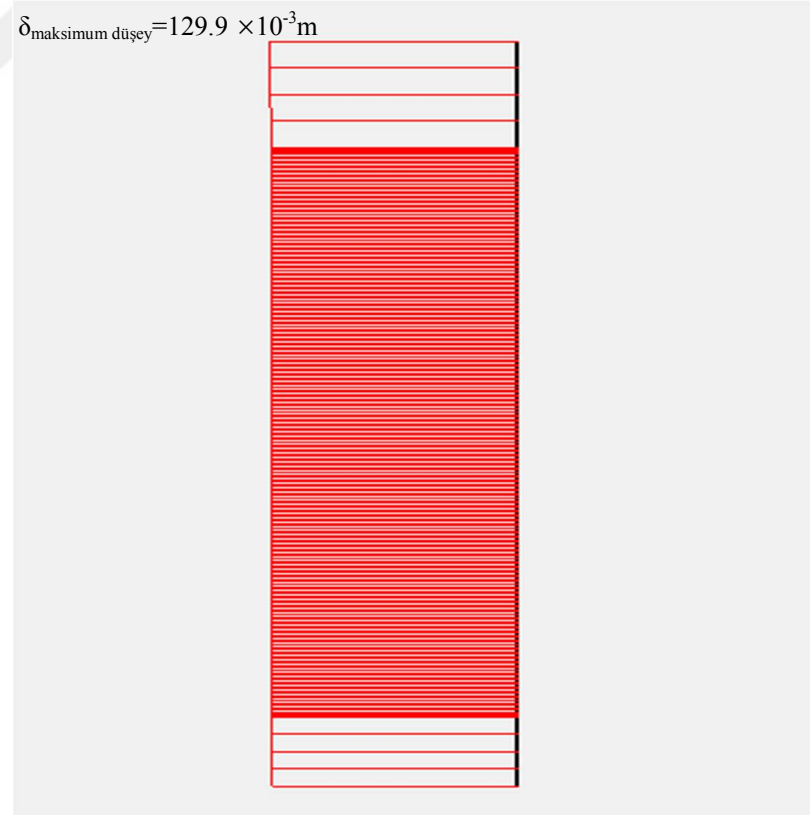
Ek Şekil 24.5. 150 kN/m² yayılı yük uygulanan modelde deforme olmuş meshler



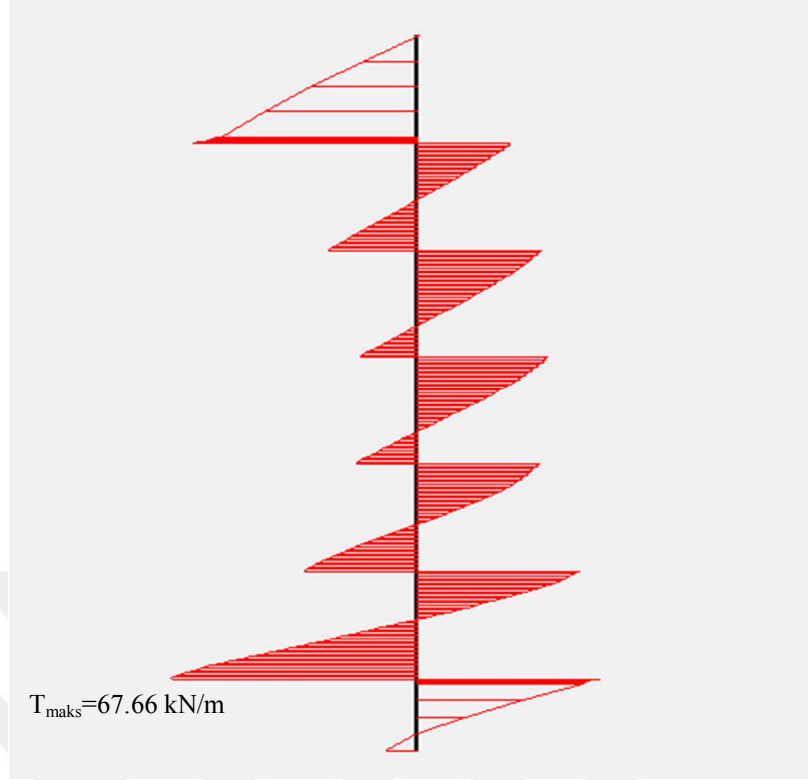
Ek Şekil 24.6. Duvarın toplam deplasman diyagramı



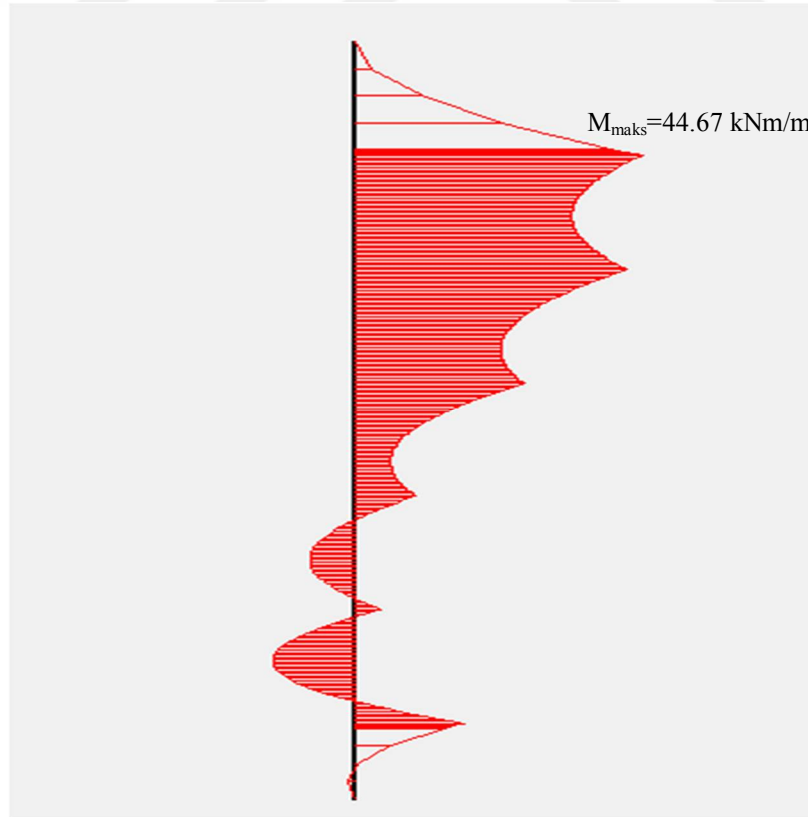
Ek Şekil 24.7. Duvarın yatay deplasman diyagramı



Ek Şekil 24.8. Duvarın düşey deplasman diyagramı



Ek Şekil 24.9. Duvarın maksimum kesme kuvveti diyagramı



Ek Şekil 24.10. Duvarın maksimum moment diyagramı

ÖZGEÇMİŞ

Burcu SEÇKİN HALAT 22.05.1986 tarihinde Sivas' ta doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sivas' ta bitirdi. 2012 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü' nde lisans öğrenimini tamamlayarak aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı' nda Yüksek Lisans yapmaya hak kazandı. Nisan 2015' te Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı' nda araştırma görevlisi olarak atandı.

Evli olan Burcu SEÇKİN HALAT, İngilizce bilmekte ve halen Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi' nde görevine devam etmektedir.